

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**HİBRİT KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN PROTAC500
ÇELİĞİNDE NDT(TAHRİBATSIZ MUAYENE) TEKNİKLERİYLE
KAYNAK KUSURLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERHAT DOĞAN

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. YUSUF BAŞOĞUL**

HAZİRAN, 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

.....'nın “.....”
.....” başlıklı tezi
.../.../20.. tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı)

:

.....

Üye

:

.....

Üye

:

.....

Üye

:

.....

Üye

:

.....

ÖZET

Hibrit Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Protac500 Çeliğinde NDT (Tahribatsız Muayene) Teknikleriyle Kaynak Kusurlarının İncelenmesi

Serhat DOĞAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran/2025, Sayfa: 77

Danışman: Doç. Dr. Yusuf BAŞOĞUL

Bu çalışmada, Protac 500 zırh çeliğinin ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi sonucunda elde edilen bağlantıların mekanik özellikleri, sertlik değerleri, makro ve mikro yapı karakteristikleri ile tokluk davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla toplam altı adet Protac 500 çeliğinden kesilen numuneler hazırlanmış; bunlardan ikisi alın kaynağı, ikisi ise köşe kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak işlemlerinde hibrit kaynak yöntem uygulanmış; kök pasoda SMAW (111) yöntemi, ters pasoda ise GTAW (141) yöntemi tercih edilmiştir. Tüm kaynak işlemlerinde aynı koruyucu gaz kompozisyonu kullanılmış olmakla birlikte, kaynak parametreleri uygulanan akım şiddetine göre farklılık göstermektedir. Hazırlanan test numuneleri, kaynak kalitesinin güvence altına alınması amacıyla önce tahribatsız muayene yöntemlerine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda Görsel Muayene, Manyetik Parçacık Muayenesi ve Radyografik Muayene yöntemleri uygulanmış; herhangi bir kaynak hatasına rastlanmamıştır. Kaynaklı bağlantıların performansı, tahribatlı muayene yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, çekme testi, çentik darbe testi, sertlik ölçümü ve makro/mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, Protac 500 çeliğinin farklı kaynak yöntemleri altındaki mekanik ve yapısal davranışlarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Protac 500; MIG Kaynak; TIG Kaynak; Hibrit Kaynak; Zırh çelikleri; NDT Muayene.

ABSTRACT

Investigation of Weld Defects in Protac500 Steel Joined with Hybrid Welding Method Using NDT (Non-Destructive Testing) Techniques

Serhat DOĞAN

Department of mechanical Engineering

Adıyaman University, Graduate Education Institute, June/2025, Page: 77

Supervisor: Assoc. Prof.Dr. Yusuf BAŞOĞUL

In this study, the mechanical properties, hardness values, macro and microstructural characteristics, and toughness behavior of joints produced by fusion welding methods on Protac 500 armor steel were investigated. For this purpose, a total of six specimens cut from Protac 500 steel were prepared; two were joined using butt welding and two using fillet welding methods. A hybrid welding technique was applied during the process, utilizing the SMAW (111) method for the root pass and the GTAW (141) method for the cover pass. Although the same shielding gas composition was used in all welding operations, the welding parameters varied depending on the applied current intensity. To ensure the quality of the welds, the prepared test specimens were first subjected to non-destructive testing methods. In this context, Visual Inspection, Magnetic Particle Testing, and Radiographic Testing were conducted, and no welding defects were detected. The performance of the welded joints was then evaluated using destructive testing methods. In this scope, tensile testing, Charpy impact testing, hardness measurements, and macro/microstructural examinations were carried out. The results obtained provided a comparative understanding of the mechanical and structural behavior of Protac 500 steel under different welding conditions.

Keywords: Protac 500; MIG Welding; TIG Welding; Hybrid Welding; Armor steels; NDT Inspection.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezde sunulan tüm veriler, akademik ilkeler çerçevesinde tarafımda toplanmış ve değerlendirilmiştir. Görsel ve yazılı içerikler, bilimsel ve etik standartlara uygun biçimde sunulmuş; kullanılan hiçbir veri üzerinde değişiklik ya da yanıltıcı işlem gerçekleştirilmemiştir. Başkalarına ait çalışmalardan yararlanılan durumlarda, kaynaklara bilimsel normlara uygun şekilde atıf yapılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada yer alan veriler daha önce bu üniversite ya da başka bir yükseköğretim kurumunda herhangi bir tez ya da bitirme projesinde kullanılmamıştır.

SERHAT DOĞAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve akademik gelişimim sürecinde bilgi ve deneyimiyle bu çalışmanın ortaya çıkmasına büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Yusuf Başoğlu'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmam süresince tesislerini ve verilerini kullanmama olanak sağlayan Tetsa Mühendislik firmasına ve orada bana her aşamada destek olan Metalurji ve Malzeme Mühendisi, aynı zamanda Kalite Kontrol Şefi Sayın Muhammed Zincirli'ye de şükranlarımı sunarım.

Her anımda yanımda olan hayat arkadaşım İlkay Doğan'a ve hayatımın anlamı, kalbime huzur katan Kızım Duru Doğan'a sonsuz sevgilerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
GÖRSELLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiv
1.GİRİŞ	1
1.1. Zırh Çeliklerinin Genel Özellikleri	2
1.2. Zırh Çeliklerinin Tarihçesi	3
1.3. Zırh Çeliklerinin Tanımlanması	5
1.4.Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalürjisi	6
1.5. Zırh Çeliklerinin Sınıflandırılması	6
1.6. Isıl İşlemler ve Oluşan Mikroyapılar	9
1.6.1. Karbon miktarı ve etkileri	11
1.6.2. Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler	12
1.6.3. Kaynak gerilmeleri	13
1.7. Kimyasal Kompozisyon ve Karbon Eşdeğeri	14
1.8. Malzeme Kalınlığı	15
1.9. Isı Girdisi ve Mikroyapının Korunması.....	15
1.10. Dolgu Metalinin Kaynak Edilebilirliği Üzerindeki Etkisi	16
1.11. Protac 500 Çelik İmalatı	17
1.12. Kimyasal Bileşim	18
1.13. Kaynak Bilimine Genel Bir Bakış	19
1.13.1. Kaynakta önemli olan ana etkenler.....	19
1.14. Zırh Çeliklerinde Kullanılan Kaynak Yöntemleri	20
1.14.1. Oksi-Asetilen kaynağı.....	20

1.14.2. TIG (Argon) kaynağı	21
1.14.3 Toz altı kaynak.....	23
1.14.4. Lazer ışın kaynağı	24
1.14.5. MIG-MAG gazaltı kaynağı	24
1.15. Zırh Çelik Kaynak Yöntemlerinin Genel Mukayese.....	26
1.16. Zırh Çeliklerinde Kaynak Sırasında Karşılaşılan Zorluklar	28
1.17. Zırh Çeliklerinin Kullanıldığı Askeri Alanlar	28
1.18. Kaynak Pozisyonları.....	30
1.19.Alın Kaynağı (Düz Kaynağı)	30
1.19.1.Köşe (dış köşe) kaynağı	31
1.19.2. Kaynak sırasında ısı dağılımı ve etkileri.....	31
1.20. Kaynakların Muayeneleri.....	34
1.20.1. Tahribatsız muayene.....	36
1.20.2. Göz ile muayene.....	36
1.20.3.Radyografik muayene	37
1.21. Tahribatlı Muayene Yöntemleri.....	38
1.21.1. Çekme deneyi	38
1.21.2. Kırma deneyi (Çentik darbe testi).....	39
1.22.3. Eğme testi.....	40
1.22.4. Sertlik ölçümü	41
2 MATERYAL ve METOT	44
2.1.Protac 500 Kimyasal Özeliği.....	44
2.2. FlayMarker Mini 65/30 Markalama Aletinin Özellikleri	45
2.3. Kaynak Ağzı Açma İşlemi	47
2.4.Termoseslenme İşlemi	50
2.5.Manyetik Alma Makinesinin Özellikleri	52
2.6.Kullanılan Kaynak SMAW Makinesini Özellikleri	53
3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	60
3.1.Görsel Muayene Raporunun Yorumlanması:	61
3.2.Manyetik Parçacık Test Raporunun Yorumlanması:	62
3.3.Radyografik Test Raporu Yorumu	62
3.4.Tahribatlı Muayene	63
3.5.Çekme Testinin Yorumlanması:	64
3.6.Eğme Testinin Yorumlanması:.....	64

4.SONUÇ TARTIŞMA ÖNERİLER	66
4.1.Tartışma	66
4.2.Sonuçlar	66
4.3.Öneriler.....	67
KAYNAKÇA	68
EKLER	
ÖZ GEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. 1. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri	7
Tablo 1. 2. Zırh çeliklerinin kimyasal özellikleri	8
Tablo 1. 3. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri	8
Tablo 1. 4. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri	9
Tablo 1. 5. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri	12
Tablo 1. 6. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri – 40 C de	12
Tablo 1. 7. Çelik zırh plakası için gerekli mekanik özellikler	18
Tablo 1. 8. Alaşım elementi içerikleri	18
Tablo 1.9. Farklı yöntemlerle elde edilmiş Protection 500 kaynaklı yapının mekanik özellikleri	27
Tablo 1. 10. ITAB'nin mikroyapılarına göre karakteristik sıcaklık aralıkları	34
Tablo 2. 1. Protac 500 kimyasal yapısı	44
Tablo 2. 2. Ultimate 320 THP (Su Soğutmalı - Arabalı).....	56
Tablo 2.3. TEZ-PRNT-001 uygulanan işlemler.....	61
Tablo 2.4. TEZ-PRN2-001 uygulanan işlemler.....	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. 1. Demir-Demir Karbür faz diyagramı. Farklı sıcaklıklarda çeşitli karbon içeriklerine bağlı olarak	10
Şekil 1. 2. Karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri	13
Şekil 1. 3. Oksi asetilen kaynağı: (a) Genel bakış, (b) kaynak bölgesinin detaylı görüntüsü .	21
Şekil 1. 4. Toz altı kaynak yönteminin şematik yapısı	23
Şekil 1. 5. Lazer ışını kaynak yöntemi şematik görüntüsü	24
Şekil 1. 6. (a) Gazaltı kaynağının genel şekli, (b) kaynak işleminin kesit görüntüsü	25
Şekil 1. 7. Zırh çeliği üretiminin genel prosesi	29
Şekil 1. 8. Alın kaynağı	31
Şekil 1. 9. Köşe Kaynağı	31
Şekil 1. 10. Kaynak prosesinde sıcaklık gradyentinin yönü	32
Şekil 1. 11. ITAB'nin kaynak sırasında maruz kaldığı termal ısı çevrimlerini gösteren Sıcaklık zaman eğrileri	33
Şekil 1. 12. Radyografinin şematik gösterimi	37
Şekil 1. 13. Çekme testi cihazı	38
Şekil 1. 14. Çentik darbe deneyi	40
Şekil 1. 15. Eğme testi	41
Şekil 1.16. Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi	42
Şekil 1. 17. Vickers sertlik deneyinin şematik gösterimi	42
Şekil 1. 18. Rockwell sertlik deneyinin şematik görüntüsü	42

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 1. 1. Geçmiş dönemlerde askeri koruma amacıyla kullanılan bir zırh ürününe ait görsel örnek.....	1
Görsel 1. 2. Zırhlı askeri personel araç örnekleri	2
Görsel 1. 3. Zırh giyinmiş bir asker	4
Görsel 1. 4. TIG Kaynak yönteminin kesit görüntüsü	22
Görsel 2. 1. Hd-F lazer kesim makinesi ile kesilen Protac 500	45
Görsel 2. 2. Şekil a ve b de markalama işlemi yapıldı.	46
Görsel 2. 3. Markalama işlemi yapılmış Protac 500.....	47
Görsel 2. 4. Kaynak Ağzı Açılmayan Protac 500.....	48
Görsel 2. 5. 40 ile 45 derece arasında kaynak ağzı açılmış Protac 500	48
Görsel 2. 6. Açılan kaynak ağzının derinliğine bakıldı.	49
Görsel 2. 7. Karşılıklı Kaynak ağzı açılmış protac500.....	49
Görsel 2. 8. Elektrot kaynağında kullanılan elektrotun Termoseslenme işlemi	50
Görsel 2. 9. Puntalama işlemi yapılmış Alın kaynak ve T kaynak.....	51
Görsel 2. 10. Şekil a ve Şekil b de manyetik alan işlemi gösterilmiştir.	52
Görsel 2. 11. Manyetik Kalıntıların Giderilmesi (Demanyetizasyon) makinesi	52
Görsel 2. 12. Şekil a puntalanmamış malzeme görüntüsü, Şekil Alın birleştirme ile puntalanmış malzeme	53
Görsel 2. 13. Ultimate 320 THP I-Panel üç fazlı kaynak makinesinin görüntüsü	54
Görsel 2. 14. Elektrot kaynağı yapılırken çekilen görüntüler.....	54
Görsel 2. 15. Protac 500 kaynağında kullanılan dolgu metali	55
Görsel 2. 16. Ultimate 320 THP (Su Soğutmalı - Arabalı) Görüntüsü.....	56
Görsel 2. 17. Kullanılan dolgu metali görseli.....	57
Görsel 2. 18. ER309L Kaynak Çubuğunun Argon kaynak yöntemiyle kaynak edilmesi	57
Görsel 2. 19. Şekil a da GMAW135(Automatic) yapılmadan önce. Şekil b de	

GMAW135(Automatic) yapılan Protac 500	58
Görsel 2. 20. T kaynak yöntemiyle yapılan GMAW135(Automatic) Protac 500	58
Görsel 3. 1. X-ray cihazıyla çekmiş olduğumuz bir film	63



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Co	: Kobalt
d	: Malzeme et kalınlığı
e	: Gerinim
E	: Elastisite modülü
EH	: Ergime hattı
EN	: Avrupa standardı
HB	: Brinell sertliği
HRC	: Rockwell C sertliği
HV	: Vickers sertliği
Hz	: Herz
I	: Akım
ISO	: Uluslararası standart
ITAP	: Isı tesiri altındaki bölge
İr	: İridyum
J	: Joule
KD	: Yüzde kesit daralması
kgf	: Kilogram kuvvet
KM	: Kaynak metali
KU	: Yüzde uzaması
Mpa	: Mega paskal
n	: Kaynak proses verimi
Q	: Isı girdisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Tm	: Tulyum
TS	: Türk standardı

V : Voltaj
Yb : İterbiyum
θ : Kaynak hızı
σ : Gerilme



1.GİRİŞ

Tarihteki ilk zırh malzemeleri, hayvan derileri ve çeşitli metallere yapılan kalkanlar gibi temel koruyucu ekipmanlardan oluşmaktaydı. Günümüzde ise, gelişmiş ve gelişmekte olan pek çok ülke, savaş ve barış dönemlerinde kullanılmak üzere savunma ve silah sistemlerini teknolojik olarak ileri düzeye taşımış; bu doğrultuda zırhlı sistemlerin gelişiminde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Özellikle gelişmiş ülkelerde zırhlı malzeme üretimi ve bu teknolojilerin entegrasyonu, ekonomik ve siyasi açıdan daha zayıf olan ülkelere kıyasla çok daha yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir [1].



Görsel 1. 1. Geçmiş dönemlerde askeri koruma amacıyla kullanılan bir zırh ürününe ait görsel örnek [2].

Zırh çelikleri; ateşli silahlara karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla, kişisel koruyucu ekipmanlarda, zırhlı personel taşıyıcı araçlarda, mühimmat taşıyan araçlarda, tanklarda ve çeşitli taktiksel askeri araçlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Görsel 1.1 de gösterildiği gibi savaş esnasında kullanılan bir zırh elbisesi verilmiştir. En önemli kullanım alanı ise askeri araçların üretimi ve bu araçların dış tehditlere karşı korunmasında etkili bir kalkan görevi görmesidir. Savunma sanayisinin teknolojik gelişimine paralel olarak, modern mühimmatlara karşı yüksek darbe dayanımı sunan zırh malzemelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar da hız kesmeden devam etmektedir [3].

1.1. Zırh Çeliklerinin Genel Özellikleri

Zırh çeliklerinden beklenen temel özelliklerden biri, balistik darbelere karşı yüksek tokluk göstermeleridir. Görsel 1.2. de yüksek mukavemetli zırh çelik kullanılmış Askeri helikopter ve askeri araç gösterilmiştir.

Zırh çelikleri dünya genelinde genellikle menevişleme işlemiyle sertleştirilerek, MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 gibi askeri standartlara uygun biçimde üretilir. Bu standartlarda tanımlanan 7.62 mm, 12.7 mm, 14.5 mm ve 20 mm çaplarındaki mühimmatlara karşı etkin koruma sağlamak amacıyla geliştirilmişlerdir. Modern zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh malzemelerinin önemli bir diğer özelliği ise hafif olmalarıdır. Görsel 1.2. de verilen askeri araçlar yüksek hız ve Hafiflik, özellikle engebeli arazi koşullarında aracın hareket kabiliyeti ve manevra yeteneği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır [4].



Görsel 1. 2. Zırhlı askeri personel araç örnekleri

MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarınca tanımlanan zırh çelikleri, düşük alaşımlı, su verilmiş ve temperlenmiş martenzitik yapıya sahip yüksek dayanımlı malzemelerdir. Bu çelikler, askeri araçlarda balistik koruma amacıyla kullanılır. Askeri araçlarda kullanılan çelikler iki sınıfa ayrılır:

- **Sınıf 1 çelikler**, mühimmat delici etkilerine karşı direnç sağlamak için geliştirilmiştir.

- **Sınıf 2 çelikler** ise, yüksek darbe ve şok yüklerine karşı üstün tokluk özellikleri sunar; bu nedenle mayın ve el bombası tehdidinin yoğun olduğu uygulamalarda tercih

edilir. Bu sınıflandırma, uygulama alanına uygun sertlik-tokluk dengesi esas alınarak yapılır [5].

Yüksek sertliğe sahip zırh çelikleri, özellikle penetrasyon direncinin kritik olduğu ve hafifliğin ön planda tutulduğu tasarım uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu çelikler, balistik tehditlere karşı koruma sağlamak amacıyla özel olarak geliştirilmiş olup; yüksek dayanım, yüksek sertlik ve orta seviyede süneklik gibi özelliklerle tanımlanmaktadır. Düşük alaşım elementi içermeleri nedeniyle, bu malzemeler genellikle yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA) sınıfı içerisinde değerlendirilir.

Zırh çelikleri, sahip oldukları mekanik ve balistik nitelikleri sayesinde; güvenlik kabinleri, para ve insan taşımacılığına yönelik zırhlı araçlar, askeri tanklar ve çeşitli muharebe araçları gibi sivil ve askeri alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [6],[7],[8]. Bu çeliklerin tercih edilme nedenlerinden biri de üretimlerinin görece kolay ve ticari olarak erişilebilir olmalarıdır [9].

Ancak zırhlı araçların yapısal karmaşıklığı, bu yapıların yekpare üretimini zorlaştırmakta; bu nedenle üretim sürecinde kaynak işlemleri kaçınılmaz hale gelmektedir [10]. Ayrıca, zırhlı muharebe araçlarında kullanılan malzemelerden biri olarak çelikten beklenen en önemli özelliklerden biri hafif olmalarıdır. Zira hafiflik, zırhlı araçların arazi koşullarında çok yönlü hareket kabiliyetini ve manevra performansını doğrudan etkilemektedir [11].

Günümüzde, zırh malzemelerinde balistik performansı artırmak ve ağırlığı azaltmak amacıyla alüminyum, seramik ve kompozit esaslı alternatifler de kullanılmaktadır [12]. Ancak zırh çelikleri; düşük maliyet, kolay temin edilebilirlik ve yüksek şekillendirilebilirlik gibi avantajları sayesinde bu alternatiflere kıyasla hâlâ daha yaygın olarak tercih edilmektedir [13].

1.2. Zırh Çeliklerinin Tarihçesi

İnsanlık tarihi boyunca bireyler, kendilerini dış tehditlere karşı koruyabilmek adına farklı şekil ve boyutlarda zırh malzemelerine ihtiyaç duymuşlardır. Bu zırhlar, ilk dönemlerde demir ve çelik gibi metallerin dövülmesiyle elde edilen kişisel koruyucu ekipmanlar olarak ortaya çıkmıştır [14]. Görsel 1.3. de savaşlarda korunma amacıyla verilen askeri bir zırhlı elbise gösterilmiştir. Barut teknolojisinin gelişimine kadar olan süreçte zırhlar yalnızca bireysel savunma amacıyla geliştirilmişken, ilerleyen dönemlerde kullanım alanları hayatın birçok yönünü kapsayacak şekilde genişlemiştir. Silah teknolojisindeki ilerlemeye paralel

olarak; kara taşıtları (örneğin personel taşıyıcılar, tanklar, obüsler ve toplumsal olaylara müdahale araçları), deniz ve hava taşıtları, yapılar ile bu yapılara ait iç mekân bileşenleri (örneğin bomba geçirmez bidonlar, camlar ve perdeler) da zırhlı hale getirilmiştir [15].

Zırhların kökeni İlk Çağ uygarlıklarına uzanmakta olup, Bronz Çağı'na (yaklaşık M.Ö. 2050) ait zırh kullanımına dair izler mevcuttur. M.Ö. 1500'lü yıllarda deri ve tunçtan imal edilen zırhlar, M.Ö. 400'lerde ise örme zincir zırhlar kullanılmaya başlanmıştır. Zamanla bu gelişmeler yerini levha zırhlara bırakmış, ancak ateşli silahların ortaya çıkışı ile geleneksel zırh sistemlerinin kullanımı azalmıştır [15].

Tarihsel olarak zırh sistemleri üç ana kategoriye ayrılmaktadır:

1. Deri, kumaş veya bu ikisinin katmanlı birleşenlerden oluşan, keçe ya da kapitone ile takviye edilen yumuşak zırhlar.
2. Birbirine geçmiş demir veya çelik halkalardan oluşan zincir zırhlar.
3. Metal, boynuz, ahşap, plastik gibi dayanıklı malzemelerden üretilen sert zırhlar.

Bu son gruba örnek olarak, Orta Çağ'da Avrupa şövalyeleri tarafından kullanılan plaka zırhlar verilebilir. Bu zırhlar, büyük metal plakaların gevşek perçinlerle ve iç deri bağlantılarla bir araya getirilmesiyle oluşturulur, böylece kullanıcının hareket kabiliyeti azalmadan yüksek koruma sağlanır [16].

Yüksek hızlı mermiler, bu malzemelerden geçememekte; bunun yerine deformasyona uğrayarak durdurulmaktadır. Yumuşak dokumalı veya lamine edilmiş liflerden üretilen modern zırh yelekleri; tabanca mermilerine, düşük kalibreli tüfek mühimmatına ve el bombası parçacıklarına karşı temel koruma sağlar. Bu yeleklere entegre edilen seramik plakalar ise yüksek hızlı tüfek mühimmatına karşı etkili koruma sunmaktadır [16].



Görsel 1. 3. Zırh giyinmiş bir asker [17]

Günümüzde Ana Muharebe Tanklarında (AMT) yaygın olarak kullanılan haddelenmiş homojen zırh (RHA), toplamda 60 tonun üzerindeki ağırlığıyla hem taşıma kabiliyetini hem de mobilitayı önemli ölçüde sınırlamaktadır [18].

1.3. Zırh Çeliklerinin Tanımlanması

Çelik, en basit düzeydeki tanımıyla, demir esaslı bir yapının içinde ilk başta karbon olmak üzere çeşitli alaşım elementlerinin belirli oranlarda bulunmasıyla oluşan bir metal alaşımıdır. Çeliklerin sınıflandırılması genellikle kimyasal bileşimlerine dayalı olarak yapılmaktadır. Demir esaslı alaşımlarda karbon oranı %2'nin altında ise bu malzemeler "çelik" olarak adlandırılır; %2'nin üzerindeki karbon içerikleri ise dökme demir sınıfına girmektedir. Gevrek yapısı nedeniyle geçmişte sınırlı kullanılan bu malzemeler, modern döküm teknolojileri ve ısıtma işlemlerin gelişimi sayesinde günümüzde metalurji sektörünün temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir [19].

Çelikler genel olarak iki ana grupta sınıflandırılır: yalın karbonlu çelikler ve alaşımlı çelikler. Yalın karbonlu çelikler, demir çubuk üretimi ve dövme işlemleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta olup, kimyasal bileşimlerinde en fazla %1,65 mangan (Mn), %0,60 silisyum (Si) ve %0,60 bakır (Cu) içerecek şekilde sınırlandırılmışlardır.

Alaşımlı çelikler ise, temel kimyasal limitleri açısından yalın karbonlu çeliklere benzerlik göstermektedir. Ancak bu çeliklerde özel alaşım özelliklerinin elde edilebilmesi için belirli elementlerin minimum düzeyde bulunması gerekmektedir. Bu amaçla alüminyum (Al), krom (Cr), kobalt (Co), niyobyum (Nb), molibden (Mo), nikel (Ni), titanyum (Ti), tungsten (W), vanadyum (V) ve zirkonyum (Zr) gibi alaşım elementleri kullanılmaktadır [20].

Zırhlı muharebe araçlarının tasarımında kullanılan zırh malzemelerinde aranan temel özelliklerden biri ise düşük ağırlık değeridir. Zira hafif malzemeler, bu araçların engembeli ve zorlayıcı arazi koşullarında çok yönlü hareket kabiliyetini ve manevra performansını önemli ölçüde artırmaktadır [21].

Balistik korumada ağırlığı azaltmak veya performansı artırmak amacıyla, alüminyum alaşımları, seramik zırhlar ve kompozit malzemeler, geleneksel çelik zırhlara alternatif olarak yaygın biçimde tercih edilmektedir. Bu malzemeler, farklı tehdit tiplerine karşı optimize edilmiş koruma sunar.

Bununla birlikte, zırh çelikleri; düşük maliyetleri, kolay temin edilebilirlikleri ve yüksek şekillendirilebilirlikleri sayesinde diğer zırh malzemelerine kıyasla daha yaygın olarak tercih

edilmektedir. Ayrıca bu malzemelerin iyi kaynak edilebilirliğe sahip olması, üretim sürecinde önemli bir avantaj sağlamakta ve tercih edilirliliğini artırmaktadır .

1.4. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalürjisi

Zırh çeliklerinden istenilen temel özellikler; dışarıdan gelebilecek her türlü mermi ve darbe etkisine karşı yüksek düzeyde direnç göstermeleri ve içyapıya nüfuzu engellemeleridir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan MIL-A-12560 standardındaki çelik, birçok savunma uygulamasında tercih edilen standart zırh malzemesidir. Buna karşılık, yüksek sertlik özelliğiyle öne çıkan MIL-A-46100 çeliği, 14.5 mm çapındaki delici mühimmatlara karşı yaklaşık %20 oranında daha yüksek balistik koruma sağlamaktadır. Bu tür zırh çelikleri, temel alaşım elementlerine ek olarak vanadyum, titanyum, niyobyum, alüminyum ve bor gibi mikro alaşım elementlerini de içerebilmektedir [22].

Savunma amaçlı geliştirilen zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh malzemelerinin önemli bir diğer özelliği ise hafifliktir. Zira düşük yoğunluklu malzemeler, zırhlı araçların engebeli arazilerde çok yönlü hareket kabiliyetini ve manevra yeteneğini doğrudan etkilemektedir [23]. Bu nedenle, söz konusu zırh sistemlerinde hem ağırlığı azaltmak hem de balistik performansı artırmak amacıyla alüminyum alaşımları, seramik bileşenli plakalar ve kompozit esaslı malzemeler gibi alternatif çözümlere de başvurulmaktadır [24].

Zırh çelikleri, düşük maliyet, kolay temin edilebilirlik ve yüksek şekillendirilebilirlik gibi özellikleri sayesinde diğer zırh malzemelerine kıyasla daha yaygın şekilde tercih edilmektedir [25]. Bunun yanı sıra, bu çeliklerin sahip olduğu yüksek kaynak edilebilirlik kapasitesi de kullanım alanlarını genişletmekte ve tercih edilirliliğini artırmaktadır. Örneğin, çelik esaslı zırh malzemeleri, alüminyum alaşımlı zırhlara göre daha yüksek mukavemet potansiyeline sahip olmalarının yanı sıra, kaynak işlemlerine daha elverişli yapıları sayesinde üretim açısından da önemli avantajlar sunmaktadır [26].

1.5. Zırh Çeliklerinin Sınıflandırılması

Zırh çelikleri, dünya genelinde genellikle **MIL-A-12560** ve **MIL-A-46100** standartlarına uygun olarak üretilmektedir [27]. Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen bu standartlardan **MIL-A-12560**, **homojen haddelenmiş zırh çeliği (RHA)** sınıfını tanımlarken; **MIL-A-46100**, daha yüksek sertlik gerektiren zırh çeliklerine yönelik kriterleri belirlemektedir. Bu tür zırh çelikleri, uygulanan ısıtım süreçlerine göre **Sınıf 1** ve **Sınıf 2** olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. **Sınıf 1 çelikler**, su veya yağ ortamında

sertleştirilip ardından temperlenirken, **Sınıf 2 çelikler** ise havada sertleştirme ve temperleme işlemleriyle ısıtılma işlemine tabi tutulur. Ayrıca, Sınıf 1 çeliklerde karbon eşdeğer değeri en fazla **0.80** ile sınırlandırılmışken, Sınıf 2 çeliklerde böyle bir sınırlama bulunmamaktadır (MIL-DTL-46100E, 2019) [28].

Uygulamada, balistik korumanın ön planda olduğu **zırhlı araç imalatında** genellikle Sınıf 1 çelikler tercih edilmektedir. Her iki sınıfa ait zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri benzerlik göstermektedir. Ancak **Sınıf 2 çelikler**, parçalanma ve yüksek mekanik şoklara karşı daha dayanıklı olabilmeleri için daha yüksek sıcaklıklarda ısıtılma işlemine tabi tutulur[29]. Bu çeliklerin karşılaştırmalı mekanik özellikleri Tablo 1.1.'de sunulmuştur.

Zırhlı araçların performansını doğrudan etkileyen bir diğer önemli unsur ise, doğru kaynak parametreleri ile uygun kaynak malzemesinin seçilmesidir. Sınıf 1 zırh çelikleri, özellikle mermi nüfuzuna karşı direnç gösterecek şekilde tasarlanırken; Sınıf 2 zırh çelikleri ise patlayıcı etkiler karşısında dayanım sağlayacak şekilde geliştirilmiştir [30].

Tablo 1. 1. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri

Zırh Çeliği		Kalınlık (mm)	Sertlik (HB)	Min. Darbe Enerjisi (J) *	Akma Dayanım (N/mm ²) (min.)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%) (min.)
Kalite	Sınıf						
MIL- A12560	1	3 < 20	380-430	18	950	1100-1400	9
		40-80	300-350	30	850	900-1200	11
	2	3-150	280-330	40	800	850-1150	12
MIL- A46100	1	3-150	480-540	16	1200	1400-1800	8
	2	3-50	420-480	27	1100	1200-1600	9

*Darbe testleri -40 °C gerçekleştirilmiştir.

Zırh çeliklerinin üretimi; ergitme, alaşımlama, sürekli döküm, haddeme ve ısıtılma işlem adımlarını içeren entegre bir süreçtir. Bu süreçte özellikle kimyasal bileşim ve ısıtılma işlem parametreleri, yüksek mukavemet ve dengeli tokluk özelliklerinin elde edilmesinde kilit rol oynamaktadır [31].

ABD askeri standartlarına uygun zırh çelikleri, düşük karbon içeriğiyle kaynaklanabilirliği artırmakta ve bu yönüyle zırhlı araç üretiminde tercih sebebi olmaktadır. Krom (Cr), mangan (Mn), molibden (Mo) ve nikel (Ni) gibi alaşım elementleri, çeliğin mikroyapısını geliştirerek balistik performansı destekler.

Tablo 1. 2. Zırh çeliklerinin kimyasal özellikleri

	C	M n	C r	N i	M o	S i	P	S
MIL-A-12560	0,18- 0,28	1,10- 1,60	1,20- 1,60	2,00- 3,40	0,40- 0,55	0,20- 0,40	Max. 0,015	Max. 0,015
MIL-A-46100	0,22- 0,32	0,70- 1,00	0,40- 0,70	0,80- 1,30	0,50- 0,65	0,35- 0,50	Max. 0,010	Max. 0,010

Zırh çeliklerinin mekanik performansı, içerdiği alaşım elementlerinin mikroyapı üzerindeki etkileriyle doğrudan ilişkilidir. Tablo 1.2.'de zırh çeliklerinin içine konulan kimyasal bileşenler ve oranı gösterilmiştir. Özellikle krom (Cr), yapının grafitleşme eğilimini baskılayarak sertliği artırırken; nikel (Ni), östenit faz alanını genişletmekte ve A1–A3 sıcaklıklarını düşürerek daha düşük sıcaklıklarda martenzit oluşumunu mümkün kılmaktadır. Bu durum, temperleme sonrası karbür çökmesini yavaşlatır, mikroyapıda iğnemsiz martenzit miktarını düşürür. Silisyum (Si), temper gevrekliğini azaltan bir rol oynarken; mangan (Mn), östenit fazını stabilize ederek perlitik dönüşüm hattını ötelee ve sertleşebilirliği iyileştirir. Nikel ve mangan ayrıca martenzit başlangıç sıcaklığını (Ms) düşürerek dönüşüm kinetiğini yönlendirir [32],[33].

Ayrıca nikel ve mangan martenzit başlangıç sıcaklığını (martensite start, Ms) en fazla düşüren elementlerdir [34]. Üretim esnasında sertleştirme ve temperleme aşamalarından geçen bu çelikler martenzitik bir mikroyapıya sahiptirler [34].

Bu çeliklerde uygulanan ısı işlemler sonucunda martenzitik bir yapı elde edilir. Bu yapı, yüksek mukavemet ve tok bir karakter kazandırır. Tablo 1.3.'te, MIL-A-12560 , MIL-A-46100 ve Proctac 500 çelik sınıfının Kimyasal kıyaslanması gösterilmektedir kalite zırh çeliklerinin mikroyapısında temperlenmiş martenzit ve yer yer birincil östenit tane sınırları (PAGB) içinde kalıntı östenit fazları gözlenmektedir [35].

Tablo 1. 3. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri

Kimyasal Bileşim (Maksimum)	MIL-A-12560 (%)	MIL-A-46100 (%)	Protac 500 T (%)
Karbon	0.30	0.32	0.27
Mangan	0.30	1.20	0.78
Kükürt	0.025	0.020	0.0003
Fosfor	0.015	0.010	0.006
Silisyum	0.40	0.60	0.70
Nikel	0.50	1.85	1.80
Krom	0.40	1.25	0.44
Molibden	0.15	0.20	0.28

Tablo 1. 4. Zırh eliklerinin mekanik zellikleri

Mekanik zellikler	MIL-A-12560	MIL-A-46100	Armox 500T
Sertlik(HBW)	277-388	477-600	480-540
Akma Mukavemeti(MPa)	1150	1100	1250
Çekme Mukavemeti	1250	1450	1450-1750
Uzama(%)	10	9	8
Tokluk(-40 C'de) (J)	20-30	30-40	25

Zırh elikleri, özellikle zırhlı muharebe tankları, zırhlı personel taşıyıcı araçlar, askeri miğferler, balistik kalkanlar ve savaş gemileri gibi askeri teçhizatın üretiminde savunma sanayisinde önemli bir yer tutmaktadır. Tablo 1.4 de Armox 500T elik kıyaslanması tablo olarak gösterilmiştir. Bu elikler, balistik darbelere bağlı olarak ortaya çıkan kinetik enerjiyi absorbe edebilen ve bu enerjiyi etkili biçimde dağıtabilen yüksek sertlik, mukavemet ve tokluk özelliklerine sahip olacak şekilde özel olarak tasarlanmaktadır [36], [37].

Zırh eliklerinin kullanım alanı yalnızca askeri uygulamalarla sınırlı kalmamaktadır. Sivil sektörde de güvenliğe yönelik pek çok uygulamada bu malzemelere yaygın biçimde başvurulmaktadır. Bu uygulamalar arasında; insan ve değerli varlıkların güvenli taşınması için kullanılan zırhlı araçlar, koruyucu kabinler, kurşungeçirmez kapı sistemleri, banka kasaları ve güvenli odalar yer almaktadır. Zırh eliklerinin sahip olduğu doğal mukavemet ve tokluk özellikleri, onları bu tür yüksek güvenlik gerektiren uygulamalar için ideal hale getirmektedir [38].

Bu eliklerin üretim sürecinde, yüksek gerilme altındaki ortamlarda optimum performans sağlayabilmesi amacıyla **su verme** ve **temperleme** gibi ısıl işlemlemlerle mekanik özellikleri geliştirilmekte ve dayanımları artırılmaktadır [39]. Ancak, zırhlı araçların sahip olduğu karmaşık yapısal geometriler nedeniyle, kritik yapı elemanlarının monolitik olarak üretilmesi çoğu durumda mümkün değildir. Bu durum, birden fazla bileşenin güvenli ve dayanıklı bir şekilde birleştirilmesini zorunlu kılmakta; dolayısıyla kaynak işlemlerinin etkinliği bu üretim sürecinde büyük önem kazanmaktadır [40].

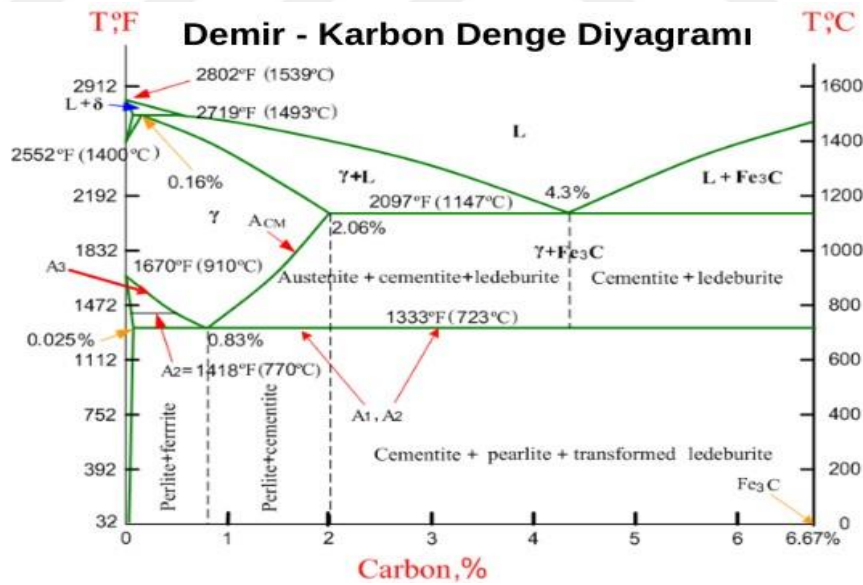
1.6. Isıl İşlemler ve Oluşan Mikroyapılar

Zırh elikleri tipik olarak yüksek oranda sertleştirilebilir. Sertleşebilirlik, eliğin soğuma sırasında martenzit oluşturma yeteneğidir [41]. Martenzit, martenzit başlangıç sıcaklığına ulaşıldığında östenitten hızlı soğutma ile oluşan ve martenzit bitiş sıcaklığına kadar oluşmaya devam eden kübik merkezli bir tetragonal fazdır. Diğer faz dönüşümlerinin çoğunun aksine, östenitten martenzite geçiş difüzyonla değil, yüksek sayıda dislokasyonla sonuçlanan ve martenzitin demir matrisindeki karbon. Karbon ile aşırı doymuş bu demir

matris, kristal kafesi bozar ve bu da temperlememiş martenzit ile ilişkili yüksek sertlik ve düşük tokluk ile sonuçlanır [42].

Zırh çeliği paneller son yıllarda askeri araçlarda araç ağırlığını azaltmak ve balistik performansı artırmak için kullanılmaktadır [43]. Bu düşük alaşımlı çelikler, iyi sertleştirilmiş martensitik yapının varlığı nedeniyle yüksek mukavemet, artırılmış çentik tokluğu ve orta sertlik gibi iyi mekanik özelliklere sahiptir [44]. Askeri araçların üretiminde, korumalı metal ark kaynağı (SMAW) ve özlü ark kaynağı (FCAW) yaygın olarak kullanılmıştır. Kaynak ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) mikroyapısal özellikleri, bağlantıların balistik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olacaktır. Mermi infiltrasyonuna karşı güçlü direnç, yaygın olarak balistik yetenek olarak kabul edilmektedir [45],[46]. Genel olarak, çelik ne kadar sert olursa, sızma direnci de o kadar güçlü olur [47]. Birçok araştırmacı tarafından birleştirme hatasını önlemek ve bir hedefin delici bağışıklığını geliştirmek için çeşitli kaynak prosedürleri etkili bir şekilde üretilmiştir.

Madhusudhan Reddy ve diğerlerine göre klasik SMAW işlemi kullanılarak yumuşak kaynaklar arasına sert yüzeyli alaşım sandviçlenerek balistik direnç artırılmıştır [48].



Şekil 1. 1. Demir-Demir Karbür faz diyagramı. Farklı sıcaklıklarda çeşitli karbon içeriklerine bağlı olarak

Şekil 1.1.'de Demir-karbon denge diyagramı, gerçekte demir ile sementit (Fe₃ C) arasındaki yarı kararlı (metastabil) denge bölgelerini göstermektedir. Ancak sementitin termodinamik olarak kararlı bir faz olmaması nedeniyle, gerçek denge diyagramı demir ve grafit arasındaki sistem için tanımlanmalıdır. Şekil 1.1'de de görülebileceği üzere, grafit fazı

dökme demirlerde (kütlece %2–4 C) yaygın olarak oluşmasına rağmen, çeliklerde (kütlece %0,03–1,5 C) grafit elde etmek oldukça zordur. Bu nedenle, çeliklerin üretimi ve ısıt işlemlerinde demir-sementit arasındaki yarı kararlı denge dikkate alınmaktadır [49].

1.6.1. Karbon miktarı ve etkileri

Karbonun demir matrisi içindeki oranının artması, Fe-C faz diyagramında çeşitli yapısal ve termodinamik değişikliklere neden olmaktadır. Ferrit ve östenit faz alanlarının karbon absorpsiyon kapasitesi, yalnızca Fe-C diyagramını değil aynı zamanda Fe-Fe₃C sisteminin davranışını anlamak açısından da kritik öneme sahiptir. Karbonun demir içerisine difüzyonu, saf demire göre mekanik özelliklerde belirgin artışlar yaratmakta; özellikle tokluk, sertlik, mukavemet ve süneklik gibi özellikler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu nedenle çeliklerde karbon, temel alaşım elementi olarak kabul edilir. Karbon, östenit fazını stabilize eden bir element olup, bu fazın oluşumunu daha geniş sıcaklık aralıklarında mümkün kılar. Karbon miktarının artmasıyla birlikte östenit faz bölgesinin 912 °C'den 1394 °C'ye kadar genişlediği gözlemlenmektedir. Östenitteki maksimum karbon çözünürlüğü, 1147 °C sıcaklıkta kütlece %2,14 seviyesine ulaşmaktadır. Buna karşın ferrit fazının karbon çözme kapasitesi oldukça sınırlıdır; bu faz, yalnızca 727 °C'de en fazla %0,02 C çözebilmektedir [50].

Fe-C faz diyagramından da açıkça anlaşılabileceği gibi, karbon miktarı yapının genel davranışı üzerinde belirleyici bir parametredir. Karbür çökeltilerinin oluşumu sayesinde ısıt işlemlerle yapının homojenleştirilmesi sağlanabilmekte; ayrıca karbon, diğer alaşım elementlerine kıyasla faz dönüşümleri üzerinde çok daha güçlü etkilere sahiptir. Özellikle martenzit ve beynit gibi fazların oluşumu, karbon oranına doğrudan bağlıdır.

Zırh çelikleri tipik olarak başlangıçta yüksek sertliğe sahiptir, bu da onları HAZ da yumuşamaya karşı oldukça hassas hale getirir ve bu da balistik ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olur [51]. Birçok çalışma bu olguyu araştırmış ve bu yumuşamış bölgede balistik sınırlara ulaşıldığına dair kesin sonuçlar elde etmiştir [52],[53]. Balistik sınırlar sadece HAZ değil kaynak metalinde de görülmektedir. Hem kaynak metalindeki hem de HAZ' ı çevreleyen düşük sertlik değerleri, yüksek balistik limitlere sahip olmayan ve aracın bütünlüğünün bozulmamasını sağlamak için ek malzeme ile birlikte karmaşık bağlantı tasarımları gerektiren bağlantılar üretir. Bu durum, tipik bir füzyon kaynaklı yapı için balistik limiti görülebilir [54].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan MIL-A-12560 standardı, birçok savunma uygulamasında tercih edilen temel zırh çeliği olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, yüksek

sertlik özellikleriyle bilinen MIL-A-46100 çeliği, özellikle 14.5 mm çapındaki delici mühimmatlara karşı yaklaşık %20 oranında daha yüksek balistik dayanım göstermektedir. Tablo 1.5.'te yer alan temel alaşım elementlerinin dışında, bu çelik türleri vanadyum, titanyum, niyobyum, alüminyum ve bor gibi mikro alaşım elementlerini de içerebilmektedir.

Bu zırh çeliklerinin karşılaştırmalı mekanik özellikleri Tablo 1.5'te verilmiştir. Tablo 4.1'de gösterilen kimyasal bileşimler incelendiğinde, söz konusu zırh çeliklerinin düşük karbonlu çelikler sınıfında yer aldığı görülmektedir. Bu çeliklerin karbon içeriği genellikle maksimum %0,3 civarında olup, daha düşük karbon seviyeleri yüksek tokluk ve iyi kaynaklanabilirlik gibi avantajlar sunması nedeniyle tercih edilmektedir [55].

Tablo 1. 5. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri

Kimyasal Bileşim (Maksimum)	MIL-A-12560 (%)	MIL-A-46100 (%)	Protac 500 (%)
Karbon	0.30	0.32	0.28
Mangan	0.30	1.20	0,72
Kükürt	0.025	0.020	0.002
Fosfor	0.015	0.010	0.010
Silisyum	0.40	0.60	0.40
Nikel	0.50	1.85	1.80
Krom	0.40	1.25	0.69
Molibden	0.15	0.20	0.30

1.6.2. Kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler

Zırh çeliklerinin düşük karbon içeriğine sahip olması, özellikle darbe dayanımı açısından büyük önem taşımaktadır. Çelik yapısında yer alan alaşım elementleri özellikle karbon kaynaklanabilirlik üzerinde doğrudan etkilidir. Karbon oranı arttıkça, kaynak bölgesinde çatlak oluşumu riski de önemli ölçüde artmakta; bu da kaynaklı yapıların mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Tablo 1.6.' da -40 C de ki mekanik özellikleri verilmiştir. Bu tür çatlakların giderilebilmesi için kaynak sonrası çeşitli düzeltici işlemler gereklidir. Ancak bu işlemler hem ek üretim süresi hem de artan maliyet anlamına geldiğinden, zırh çeliklerinde düşük karbon içeriği tercih edilmektedir.

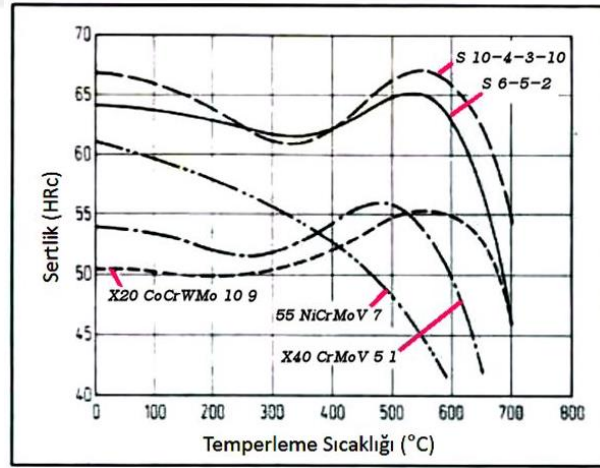
Bu bağlamda, düşük karbon oranı hem iyi kaynaklanabilirlik hem de yüksek tokluk sağladığı için, zırh çeliklerinin etkin şekilde kullanılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu iki özellik, özellikle askeri araç ve yapıların uzun ömürlü ve güvenli performansı açısından kritik parametreler arasında yer almaktadır [56].

Tablo 1. 6. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri – 40 C de

Mekanik Özellikler	MIL-A-12560	MIL-A-46100	Protac 500 T
Sertlik (HBW)	277-388	477-600	480-5403
Akma Mukavemeti (MPa)	1150 (minimum)	1100 (minimum)	1200(minimum)
Çekme Mukavemeti (MPa)	1250 (minimum)	1450 (minimum)	1600 (minimum)
Uzama (%)	10 (minimum)	9 (minimum)	8 (minimum)
Tokluk (-40 °C'de) (J)	20-30 (minimum)	30-40 (minimum)	20(minimum)

Çelik bileşiminde güçlü karbür yapıcı elementler (örneğin krom, molibden, vanadyum gibi) mevcutsa, bu elementler karbon ile daha yüksek temperleme sıcaklıklarında reaksiyona girerek çeşitli özel alaşımlı karbür çökeltilerinin oluşumuna neden olurlar. Bu süreçte meydana gelen ve sertlikte gözlenen ilave artış, literatürde ikincil sertlik (secondary hardening) olarak tanımlanmaktadır. İkincil sertlik, temel olarak karmaşık bir çökelme sertleşmesi mekanizmasıyla ortaya çıkar ve çeliklerin yüksek sıcaklık dayanımını iyileştirir.

Temperleme sürecinde farklı karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbür türleri ve bu türlerin sıcaklığa bağlı olarak gelişen çökelme davranışları, Şekil 1.2. de gösterilmektedir [57].

**Şekil 1. 2.** Karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri

1.6.3. Kaynak gerilmeleri

Kaynak sırasında, artık gerilmeler kaynak parçasının genel gerilme durumuna katkıda bulunur. Bu gerilmeler doğası gereği çekmedir ve gerilme korozyonu çatlamasına (SCC) ve yorulmaya katkıda bulunur.

Yorulma ve SCC'yi iyileştirmek için çok umut vaat eden bir kavram, düşük sıcaklıkta faz dönüşümü (LTPT) tellerinin kullanılmasıdır. Bu teller, termal büzülmeyle telafi etmek için

martensitik faz dönüşümü sırasında hacim genişlemesinden yararlanarak kaynaklı yapılarda çekme artık gerilmelerinin oluşumunu azaltır. 1970'lerde Jones ve Alberry [58], oda sıcaklığına kadar soğutma sırasında kaynaktaki çekme gerilmelerinin birikimini telafi etmek için faz değişiminin devam için Ms sıcaklığını düşürerek çekme kalıntı gerilmelerinin en iyi şekilde önlenebileceğini öneren ilk kişiler arasındaydı. LTPT kaynak telleri tipik olarak düşük sıcaklıklarda martensitik dönüşüm için ağırlıkça %0-15 Ni ve ağırlıkça %0-15 Cr içeren bir kimyaya sahiptir [58].

1.7. Kimyasal Kompozisyon ve Karbon Eşdeğeri

Zırh çelikleri, yapısal özellikleri bakımından düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelikler grubuna dâhildir. Bu çeliklerin sahip olduğu yüksek mukavemet, genellikle düşük alaşım içeriği ve uygun ısıtma işlemleriyle elde edilmesine rağmen, belirli düzeyde karbon içeriğine sahip olunması hâlâ zorunludur. MIL-A-46100 standardına göre üretilen zırh çeliklerinde karbon içeriğinin kaynak kabiliyetine olan etkisi, ilgili standartta yer alan karbon eşdeğeri (CEq) hesaplamasıyla değerlendirilmekte olup, bu ilişki Denklem 4.1'de sunulmuştur [59].

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (4.1)$$

Zırh çelikleri, kimyasal bileşimleri nedeniyle diğer çelik türlerine kıyasla kaynaklı birleştirme işlemlerinde çatlamaya daha yatkındır. Sahada elde edilen tecrübeler, özellikle farklı kalınlıklara sahip zırh parçalarının kaynakla birleştirilmesi durumunda çatlak oluşumunun daha sık meydana geldiğini göstermektedir. Bu istenmeyen durumlar, çeşitli ısıtma işlem stratejileri ile azaltılabilir. Uygulanan başlıca işlemler arasında kaynak öncesi ön ısıtma, çok pasolu kaynaklarda pasolar arası sıcaklık kontrolü ve kaynak sonrası kontrollü soğutma yer almaktadır.

Ön ısıtma, kaynak bölgesindeki sıcaklık gradyanını azaltarak dikiş bölgesinin daha yavaş soğumasını sağlar; bu da sertleşme çatlaklarını, iç gerilmeleri ve geometrik çarpılmaları önler. Ayrıca ferrit, perlit ve beynit fazlarının oluşumu için zaman kazandırır. Pasolar arası sıcaklık kontrolü, kaynak dikişinde hidrojen birikimini engelleyerek hidrojen kaynaklı çatlak riskini azaltır. Zırh çeliklerinde, özellikle Isıl Tesire Maruz Kalan Bölge (ITAB)'de uygulanan ısıtma işlemleri son derece kritiktir; çünkü bu bölgedeki yapısal bozulmalar, zırh çeliğinin koruyucu özelliğini kaybetmesine neden olabilir.

Bu yapı, demir matrisinin karbon ile aşırı doymuş hâle gelmesine neden olur ve bu durum kristal kafes bozulmalarına yol açar. Sonuç olarak, temperlenmemiş martenzit yüksek sertlik sağlarken, aynı zamanda düşük tokluk gibi istenmeyen özellikler de sergiler [60].

1.8. Malzeme Kalınlığı

Zırh çeliği tipik olarak büyük kalınlıklarda kullanılır, bu nedenle yeterli bağlantı verimliliğini sağlamak için birden fazla kaynak pasosu gerekir. Bu çoklu pasolar, aynı bölümün birden kez kaynaklanması nedeniyle yalnızca büyük miktarda zaman gerektirmekle kalmaz, aynı zamanda doğru mikro yapıyı elde etmek ve potansiyel çatlama sorunlarını önlemek için uygun pasolar arası sıcaklıkların korunmasını sağlamak için de zaman [61].

Zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliğini etkileyen en önemli faktörlerden biri de ön ısıtma uygulamasıdır. Özellikle kalın kesitli zırh parçalarında, kaynak bölgesinden yüzey yoluyla gerçekleşen ısı kaybını azaltmak ve kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımını dengelemek amacıyla ön ısıtma işlemi zorunlu hâle gelmektedir. Bu uygulama, hem sertleşme çatlaklarının oluşum riskini azaltmakta hem de kaynak sonrası yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlamaktadır.

Ön ısıtma sıcaklığının belirlenmesinde malzeme kalınlığı kritik bir parametredir. Et kalınlığı ile ön ısıtma sıcaklığı arasındaki ilişki, uygulamada genellikle Daniel Seferian tarafından geliştirilen deneysel formüle göre hesaplanmaktadır. Bu formül, kalın malzeme kaynaklarında homojen ısı dağılımı sağlamak ve kaynak bölgesinde ani soğuma riskini azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.

$$T_{\text{öntav}} = 350\sqrt{CE (1 + 0.005d)} - 0,25 \quad (4.2)$$

Özellikle plaka kalınlığı arttıkça, ön ısıtma gereksinimi kaçınılmaz hale gelir ve bu da ASS malzemelerinin kullanımını daha az katı koşullar altında hatasız kaynaklar elde etmek için endüstriyel olarak daha uygulanabilir hale getirir.

1.9. Isı Girdisi ve Mikroyapının Korunması

Zırh çeliklerinin kaynak işlemlerinde üzerinde özellikle durulması gereken temel hususlardan biri de ısı girdisidir. Kaynak sırasında malzemeye aktarılan ısı miktarı, kaynak bölgesinin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkileyebileceği için dikkatle kontrol edilmelidir. Yüksek ısı girdisi, özellikle ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) tane büyümesine, sertlik düşüşüne ve çatlak oluşum riskine neden olabilir.

Bu nedenle, kaynak sırasında kullanılan akım (I) ve gerilim (V) değerlerinin düşük tutulması, ısı girdisinin sınırlandırılması açısından kritik öneme sahiptir. Aşağıda denklem 4.3'te gösterildiği üzere, ısı girdisi (H) bu parametrelere doğrudan bağlıdır. Çalışmanın temel amacı da bu bağlamda, ısı girdisini minimize etmeye yönelik uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesidir.

$$Q = n \left(\frac{V \times I}{\eta} \right) \quad (4.3)$$

H: Isı girdisi

(kj/inçveya kj/mm).

E: Ark voltajı (volt). I:

Akım (amper).

S: Hız (inç/dakika veya mm/dakika)

1.10. Dolgu Metalinin Kaynak Edilebilirliği Üzerindeki Etkisi

Kaynak işlemlerinde dolgu metali seçimi, bağlantı bölgesinin hem dayanımı hem de tokluğu açısından kritik bir rol oynamaktadır. Uygun dolgu metalinin belirlenmesinde özellikle dikkate alınması gereken iki temel kriter, akma dayanımı ve tokluk değeridir. Bu bağlamda, yaklaşık 500 MPa'ya kadar akma dayanımına sahip yumuşak dolgu metalleri, zırh çeliklerinin kaynağında önerilmektedir.

Tokluk ile dayanımın optimum dengede olduğu bir kaynak bölgesi elde edebilmek için, bu aralıkta yer alan en düşük dayanımlı dolgu metali tercih edilmelidir. Düşük dayanımlı dolgu elektrotlarının kullanımının sağladığı avantajlar arasında:

- Yüksek tokluk değeri,
- Maksimum hidrojen çatlağı direnci,
- Düşük artık gerilme düzeyi

yer almaktadır. Ayrıca, dolgu metalinin hidrojen içeriğinin düşük tutulması, çatlak oluşumu riskini azaltmak açısından önem arz etmektedir [62].

Ancak, daha düşük dayanım gerektiren uygulamalarda bu tür dolgular tercih edilirken, bazı yapısal bölgelerde yüksek dayanım ihtiyacı, tokluk özelliğinin ikinci planda bırakılmasını gerektirebilir. Bu gibi durumlarda, daha yüksek mukavemete sahip dolgu metali elektrotları kullanılmakta; böylece kaynaklı bağlantı bölgesinin mekanik dayanımı güçlendirilmektedir.

Uygun zırhlı malzemenin seçimi, yeterli güvenlik ve hareketlilik taşıma sistemlerinin sağlanması için çok önemlidir. Zırh için uygun malzemeleri seçerken veya geliştirirken,

malzemelerin gerekli mekanik özellikleri arasında mümkün olan en iyi uzlaşmayı sağlamak, yoğunluğu ve ürünün nihai fiyatını en aza indirmek gerekir [62]. Sentez, sıcak şekillendirme, ısıtma işlemi vb. içeren uygun üretim teknolojisi ile uygun fiyatlarla iyi fonksiyonel özelliklere sahip yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik üretilir. Çeliğin mukavemeti ve tokluğu geliştirilerek gerekli kalınlık ve çelik kabuğun ağırlığı azaltılır. Bu tür çelikler zırh için diğer malzemelerle rekabet edebilir [63].

Slovenya çelik fabrikası ACRONI de standart prosedürlerle üretilir, ilgili mekanik özellikler su verme ve temperleme ile elde edilir [64]. Çelik PROTAC 500, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA) grubuna aittir. Çeliğin mekanik özelliklerine ilişkin ön testler, bu çeliğin hafif zırhlı araçlar için kullanılabileceğini göstermiştir. Balistik testler, İsveçli üretici Nammo'nun 7.62 mm zırh delici mermileri (Alman standardı VPAM, seviye 11 ve Amerikan standardı STANAG 4569, Seviye 3) kullanılarak ve mermi ile çelik plaka arasındaki etkileşimi incelemek için yapılmıştır [64].

Malzemenin basınç ve çekme dalgalarına karşı direnci, mukavemetinin ve tokluğunun artırılmasıyla geliştirilir. Düşük gerinim hızındaki deformasyon mekanizmaları nispeten homojen iken, aşırı yüksek hızlarda daha karmaşıktır. Burada, adyabatik kayma bantları (ASB) adı verilen dar bantlarda aşırı bir gerilme lokalizasyonu söz konusudur [65]. Bant deformasyon sırasında çok sıcaktır (hatta bazı durumlarda erime noktasına kadar), bu nedenle östenit fazının dönüşümü ortaya çıkar, yükten sonra hızla soğutulur, bu da martensite dönüşümüne ve dolayısıyla ASP'deki çeliğin yüksek sertliğine ve kırılganlığına neden olur. Kesme bölgeleri çelikteki zayıf alanlardır [66].

1.11. Protac 500 Çelik İmalatı

Çelik hurdası 85 ton kapasiteli bir elektrik ark ocağında (EAF) eritilir. Bu çelik için hürdanın kalitesi önemlidir. Çelik üretim sürecinde rafine edilemeyecek çok fazla element içermemelidir. En sorunlu olanı bakırdır. Külçe eritildikten sonra, eriyik oksitlenir ve uygun cüruflla, özellikle de defosfatlarla kısmen kükürtsüzleştirirler. Sonraki işlemlerde, fosfor giderme artık mümkün değildir. Bunu, eriyiğin döküm yeniden ısıtıcısına delinmesi ve cürufun sıyrılması izler [67].

Eriyik, bir yeniden ısıtma fırınında alüminyum ve silisyum ile oksijensizleştirilir ve oksitleri bağlamak için metalürjik kireç eklenir. Eriyik, ferro-alaşımların eklenmesi için uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Kireç ve gerekirse diğer cüruf oluşturuvcu katkı maddeleri ile alaşımlandırdıktan sonra, yeni bir sülfür ve diğer safsızlıkları bağlamak için rafine cürufu.

Bunu, eriyiği rafine eden ve homojenleştiren vakumlu VD'de (vakumlu gaz giderme) gaz giderme işlemi takip eder.

1.12. Kimyasal Bileşim

Penetrasyon direncine ulaşmak için çeliğin karşılaması gereken mekanik özellikler, askeri standartlar, teknik literatür ve kullanıcı gereksinimleri incelenerek belirlenmiştir. Gerekli mekanik özellikler şunlardır:

Tablo 1. 7. Çelik zırh plakası için gerekli mekanik özellikler

Sertlik [HB]	Kaçak gerilim Rp _{0,2} [N/mm ²]	Çekme dayanımı Rm[N/mm ²]	Rp _{0,2} / Rm	Streç e[%]	Darbe tokluğu -40°C'de Charpy - V çentik[J]
477 - 534	1150 - 1250	1500 - 1700	0,65 - 0,75	min. 9	min. 20

Mekanik özelliklerin doğru kombinasyonunu elde etmek için PROTAC 500 zırh çeliği için silikon, krom ve molibden, titanyum ve bor elementlerinden oluşan bir alaşım sistemi seçilmiştir. Alaşım elementlerinin konsantrasyonlarının sınırları aşağıdaki gibidir. Tablo 1.8.,

Tablo 1. 8. Alaşım elementi içerikleri

KİMYASAL BİLEŞİM [m.%]								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
0,28	0,91	0,72	0,006	0,002	0,69	0,14	0,2	0,302

Kaynak nedeniyle karbon eşdeğer değerini (CEV) aşmamak için karbon içeriği %0,30 m ile sınırlandırılmıştır.

Manganez ile birlikte %1 m'nin üzerindeki silisyum içeriği sünekliği, mukavemeti, modülü ve darbe tokluğunu artırır, süneklik ve eğilme mukavemeti sağlar. Sementitin çökmesini önleyerek martenzitin ayrışma sıcaklığını arttırdığı için çeliğin düşük sıcaklıkta temperlenmesi için uygun bir alaşım elementidir. Krom, çeliğin süper alaşımlanabilirliğini artırır ve mekanik özellikleri iyileştirir. Molibden, östenitin ferrit haline dönüşme sıcaklığını düşürür ve böylece sertleşebilirlik üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Vanadyum östenit tane boyutunu kontrol etmek için eklenir. Mikro alaşım elementleri alüminyum, titanyum ve bor kristal tanelerin boyutunu kontrol etmek için eklenir. Safsızlık olarak fosfor ve kükürt ve istenmeyen bir element olarak bakır, üretim teknolojisinin izin verdiği sınırlarla sınırlıdır ve nihai ürünü olumsuz etkilemez [68].

Gerekli 500 HBW sertlik için çelik suda söndürülmelidir. Sertleştirmeden sonra kalan gerilimin bir kısmı düşük sıcaklıkta temperleme ile ortadan kaldırılır. Uygun alaşımlama ile, gerekli mekanik özellikler sertleştirilmiş durumda zaten elde edilebilir. Isıl işleme, mikroyapıda mümkün olduğunca çok kendiliğinden tavlanmış martenzit olmasını istiyoruz. Bu, çeliğe aynı sertlikte daha yüksek bir tokluk verecektir [69].

1.13. Kaynak Bilimine Genel Bir Bakış

Kaynak şekil itibariyle cıvata ve perçinli bağlantının aksine şekil sürekliliği gösteren endüstriyel bir imalat yöntemi olarak bilinmektedir. Genel bir ifadeyle temelde ısı enerjisini kullanarak iki ya da daha fazla malzemeyi birleştirme işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Kaynak esnasında ana metalin bir kısmı ergitilir ve ihtiyaç duyulması halinde ilave kaynak metali ile önceden hazırlanan kaynak ağzı bölgesi doldurulmaktadır. Kaynak sonrası yapının kesit görüntüsüne bakıldığında sanki yekpare bir parça gibi olduğu gözükmemektedir [70].

Kaynak tarihinde literatürde bahsedilen yöntem aslında kaynak işleminden ziyade lehimleme tekniğini daha çok temsil etmektedir. Çünkü lehimleme tekniğinde ana metal değil yalnızca dolgu metali ergitilmektedir. Fakat uygulama açısından kaynak ile çok benzer olduğu için aynı kökenli sayılmaktadırlar [71].

1.13.1. Kaynakta önemli olan ana etkenler

Kaynak ile birleştirilen bir yapı şekil itibariyle gösterdiği süreklilik ile çok cezbedici olarak görülse de hiç de görüldüğü kadar masum değildir. Çünkü insan gözüyle görülemeyen birtakım metalürjik değişimler yapıda oluşabilecek birçok olumsuzluğu bize göstermektedir. Bu yüzden denilebilir ki kaynak yapmak kaynakçının eline torcu alıp inci gibi kaynak yapmasından daha öte bir süreçtir. Bugün bile havacılık sektöründe kaynaklı imalat yöntemi güvenilirliği tartışılan bir yöntemdir [72].

İdeal biçimde kaynak yapılan bir yapı, hiçbir süreksizliğin olmadığı ve metalin tüm yapı boyunca ayırt edilemeyecek şekilde birleştirildiği kaynaktır ve bu endüstriyel anlamda her zaman mümkün olamamaktadır. Fakat yeterli seviyede hizmet verecek bir kaynak gerekli tedbirlerin alınmasıyla onaylanabilmektedir. Bu yüzden ideal kaynak kavramı imkânsız bir kavram olmadığı önceden bilinmelidir. Her kaynak metodu her malzemeye, birleştirme malzemeye, birleştirme türüne ve geometriye uygun değildir, belli başlı gereksinimlerin doğru saptanması ve uygun kaynak yönteminin seçimi şarttır [73].

Kaynakta mekanizasyon derecesini kısaca özetlemek gerekirse; bir kaynak işleminin

insan gücünden ne kadar bağımsız olduğunu gösteren ifade olarak tanımlanabilmektedir. Çünkü bir kaynak işlemi incelendiğinde çok fazla el ustalığıyla gerçekleşen bir süreç olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Hızla büyüyen kaynak endüstrisi beraberinde sektörde rekabet anlayışını da yanında getirmiş ve insan gücünden çok daha hızlı ve verimli çalışan kaynak robotlarına doğru meyil etmektedir [74].

1.14. Zırh Çeliklerinde Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Kaynak tekniğinin çok yönlü oluşu ve çok fazla alanda kullanılmasından dolayı çok fazla yöntem bulunmaktadır. Bu bölümde çok özel kaynak yöntemlerine değinmeden sadece endüstriyel anlamda sık görülen ve popüler olan kaynaklar hakkında bilgi verilecektir.

Zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirme işlemlerinde; elektrik ark kaynağı, gaz altı kaynak yöntemleri (MIG/MAG), soy gaz altında tungsten elektrotla ark kaynağı (GTAW/TIG) ve toz altı kaynak yöntemi (SAW) gibi çeşitli teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, en eski ve yaygın kullanılanlardan biri olan elektrik ark kaynağı, özellikle zırh çeliklerinde hidrojen çatlağı riski açısından kritik kabul edilmektedir. Bu riskin temel nedeni, örtülü elektrotların nem absorbe etmesi sonucu kaynak banyosuna difüze olan hidrojenin, soğuma sırasında genişleyerek mikro çatlaklara neden olmasıdır.

Uzun ve sürekli kaynak dikişleri gerektiren, kalın kesitli zırh çeliklerinin birleştirilmesinde ise toz altı kaynak yöntemi avantaj sağlamaktadır. Bu teknik, yüksek dolgu oranı ve derin penetrasyon kabiliyeti sayesinde özellikle seri üretim uygulamalarında verimlilik kazancı sunar. Ancak bu yöntemde de kullanılan tozun hidrojen içeriği kontrol edilmeli ve fırınlama işlemi ile nem uzaklaştırılmalıdır.

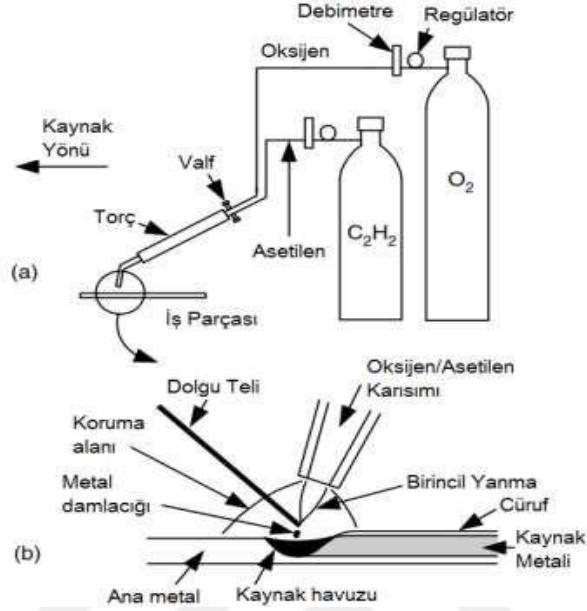
Bu çalışmada kullanılacak kaynak işlemleri, Fronius firmasına ait TPS/i 500 gaz altı kaynak makinası ile gerçekleştirilecektir. Bu ekipman, yüksek hassasiyetli parametre kontrolü ve adaptif kaynak kabiliyeti ile modern kaynak teknolojisinin bir örneğidir.

1.14.1. Oksi-Asetilen kaynağı

Üç alev türü de farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır. Nötral alev; oksijen ve asetilen miktarının eşit olması durumunda oluşur ve atmosferin oksitleyici etkisinden korunmak için en ideal alev türüdür, birçok metal kaynağından tercih edilmektedir.

İndirgeyici alev; asetilen miktarının oksijenden daha fazla olması durumunda oluşur ve asetilenin tamamı yanmadığından iç koni etrafında yeşilimsi renkte asetilen tüyü görülmekte, alüminyum alaşımları ve yüksek karbonlu çeliklerin kaynağında tavsiye edilmektedir. Şekil 1.3. de şema halinde oksi asetilen kaynağı gösterilmiştir.

Oksitleyici alev; Oksijen varlığı asetilenden fazla olduğu zaman oluşan alev türüdür. Pirinç kaynağında tercih edilmektedir, çünkü bakır oksit kaynak havuzunu kaplayarak çinkonun kaynak havuzundan buharlaşıp uzaklaşmasını engellemektedir [74].



Şekil 1.3. Oksi asetilen kaynağı: (a) Genel bakış, (b) kaynak bölgesinin detaylı görüntüsü

Bu yöntem günümüzde halen uygulaması alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerden (hatta dökme demirlerden) imal edilmiş boru ve plakaların kaynağında başarılı bir şekilde devam etmektedir. Fakat tam mekanizasyona uygun olmayışı, nispeten yavaş oluşu, ustalık gerektirmesi ve 0.8–6 mm kalınlık aralığında uygulanabilişi yöntemi dezavantajlı kılmaktadır. Ayrıca asetilenin 2.5 Bar’da patlama özelliği olan bir gaz olduğu 27 bilinmektedir. Çünkü 2.5 Bar’da asetilen bileşenleri olan hidrojen ve karbon kendi moleküllerine ayrılmaktadır. Ayrışma sırasında yüksek ısı meydana gelmekte ve reaksiyon çok hızlı olduğundan ani patlamalara neden olmaktadır. Asetilenin güvenli kullanılması en uygun basınç 1.5 Bar’dır [75].

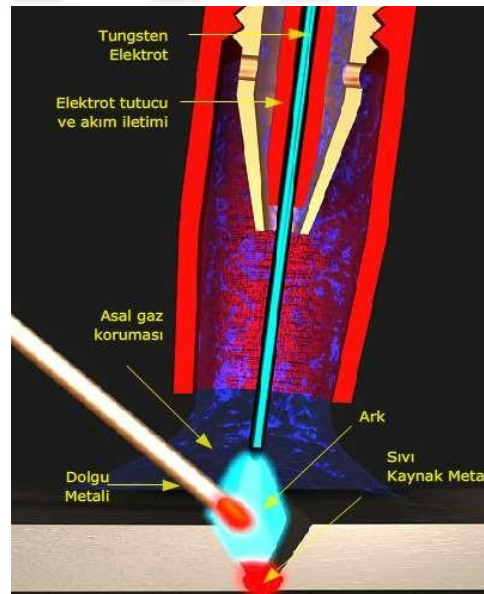
1.14.2. TIG (Argon) kaynağı

Tungsten Inert Gas kelimelerinin baş harfleriyle kısaltılan TIG kaynağı günümüzde sıkça tercih edilen kaynak yöntemlerinden birisi olmaktadır. Torç içinde konumlandırılmış bir tungsten elektrot üzerinden akım geçirilerek iş parçası ile arasında bir ark oluşturulduktan sonra iş parçası ve dolgu malzemesi ergitilmektedir [76].

Bir TIG torç yapısına ait kesit görüntüsü Görsel 1.4’te sunulmuştur. Bu yöntemde

kullanılan koruyucu gazlar ise asal gazlardır. Bu asal gazlar genellikle Helyum ve Argon'dur. Ülkemizde sıklıkla Argon gazı kullanıldığından yöntemin adı "Argon Kaynağı" olarak da bilinmektedir. Yöntem uygulanış itibarıyla oksis-asetilen kaynağına benzemektedir. Operatör bir eliyle torcu kontrol ederken diğer eliyle de dolgu malzemesini beslemektedir. Fakat burada ısı kaynağı olarak oksis-gaz karışımı değil elektrik ark enerjisi kullanılmaktadır. Koruyucu gaz olarak kullanılan asal gaz da hem ergiyik kaynak havuzunu hem de tungsten elektrotu atmosferin zararlı etkilerinde korumaktadır. Yöntemde koruyucu gaz olarak asal gaz kullanılmasının esas amacı tungsten elektrotun çok kolay reaksiyona girip bozulmasının önüne geçmektedir [77].

TIG kaynağının en çok tercih edilme sebeplerinden birisi de asal gaz kullanılmasından dolayı gayet stabil olan ark ile çok geniş aralıkların köprüleme işleminin uygun bir şekilde yapılabilmesidir. Çok karmaşık olmayan ekipmanlarla yapılabilirliği ve tüm kaynak pozisyonlarında uygulanabilirliğinden; petrol ve doğalgaz boru hatlarında alın kaynağı birleştirmelerinin kök pasolarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca etrafa sıçramadığı için bir kaynak olmasından ürünlerde estetik açıdan önem arz eden birçok alanda kullanılmaktadır [78].

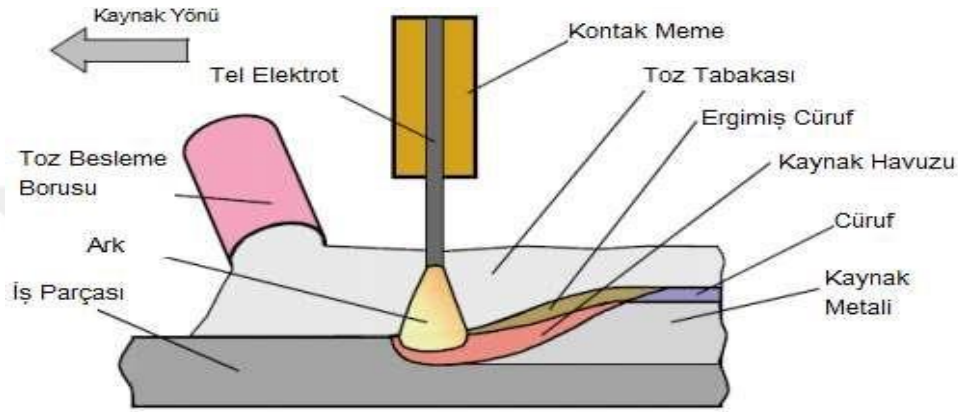


Görsel 1. 4. TIG Kaynak yönteminin kesit görüntüsü

Yöntemin en büyük dezavantajı ise uygulanışının zor oluşu ve mekanizasyon derecesinin düşük olmasıdır. Torç ve dolgu malzemesi operatör tarafından kontrol edildiği için hata oranı yüksek olabilmektedir. Gelişen teknoloji ile soğuk tel besleme ünitesi ile dolgu teli

otomatikleştirilse dahi bu cihazlar çokta yaygın değildir. Ayrıca ergitme gücünün nispeten düşük olmasından yalnızca kök paso ve ince (0.5- 5 mm) kalınlıklara sahip iş parçalarında ekonomik olmaktadır. Çelik malzemelerde kutuplama DC (-) olarak yapıldığından, iş parçası tungsten elektrota kıyasla daha fazla ısınmaktadır. Bu durum ince tane yapılı ve martenzit içeren çeliklerde yöntemi dezavantajlı kılmaktadır [79].

1.14.3 Toz altı kaynak



Şekil 1. 4. Toz altı kaynak yönteminin şematik yapısı

Endüstriyel kaynak yöntemleri arasında yığma oranı en yüksek kaynak yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde ark eriyen tel elektrot ve iş parçası üzerinde yanmaktadır. Ark ve kaynak havuzu özel hazırlanmış bir toz ile örtülmekte ve ilk koruma bu toz ile sağlanmaktadır. Arkın oluşturduğu ısı ile eriyen toz sıvı haldeyken kaynak banyosunu korumaya devam etmektedir. Bu yöntemle ark ve kaynak banyosunun üstü kapalı olduğu için ısı verimi de oldukça yüksektir. Şekil 1.4.'te tozaltı kaynak yönteminin şematik yapısı sunulmuştur [80].

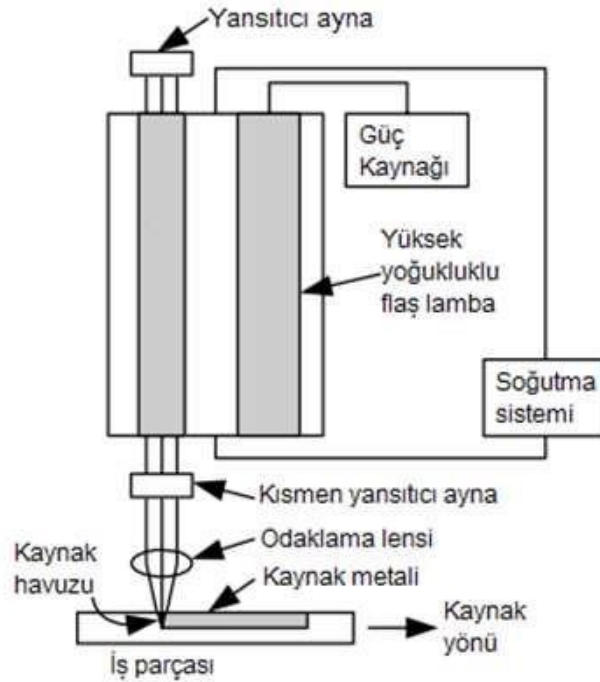
Bu yöntemde kullanılan dolgu teli ve tozun karakteristik olarak uyumlu olması son derece önemlidir. Her malzeme türü için ayrı ayrı seçilen tel-toz kombinasyonları arkta alınan ısı enerjisiyle meydana gelen kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak kaynak metaline de oksidasyon ve alaşım desteği sağlamaktadır. Ayrıca cürufun kaynak havuzuna uyguladığı fiziksel temas sonucu kaynak dikiş formunun düzgün olmasını sağlamaktadır.

Yöntem yarı mekanize şeklinde mekanize edildiğinden endüstriyel açıdan çok kalın kesitli parçaların kaynağında sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntem karmaşık bir düzenek gerektirdiğinden uygulama alanı kısıtlıdır. Tozun kaynak banyosu üzerinde muhafaza edilmesi ayrıca bir zorluk getirdiğinden farklı ve zor kaynak pozisyonlarında uygulanması pek

mümkün olmamaktadır [81].

1.14.4. Lazer ışın kaynağı

Lazer ışını kaynağı; metalleri bir lazer ışınıyla ısıtarak ergiten ve birleştiren bir kaynak yöntemidir. Lazer ışını bir katı hal lazeri veya bir gaz lazeri ile üretilebilmektedir. Her iki durumda da lazer ışını yüksek güç yoğunlukları elde etmek için optik araçlarla odaklanmakta ve kaynak bölgesine yönlendirilmektedir [82]. Şekil 1.5.'te lazer kaynağına ait şematik görüntü sunulmuştur.



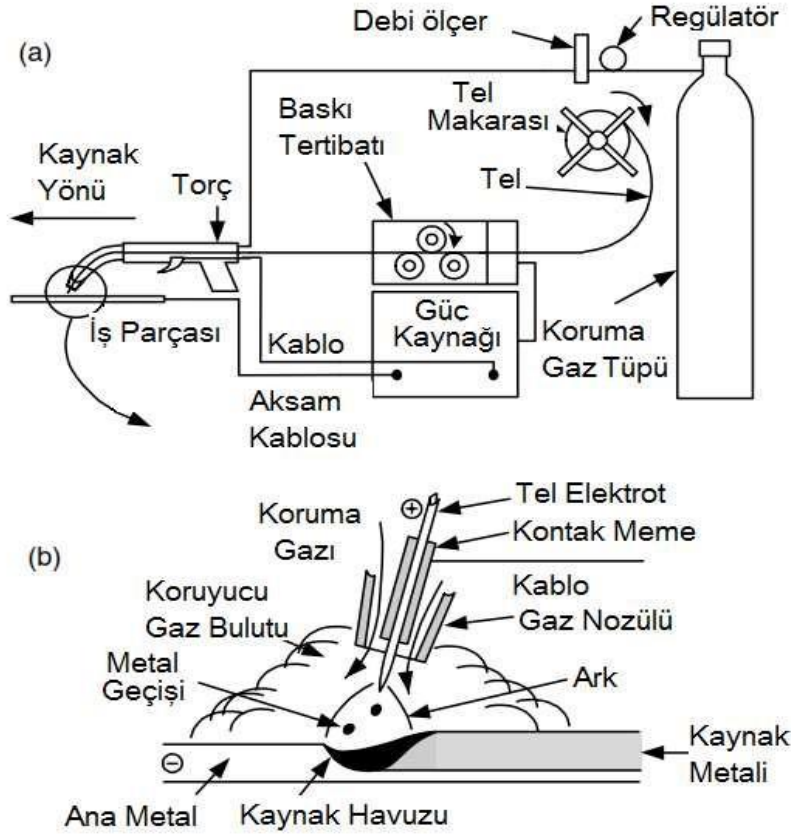
Şekil 1. 5. Lazer ışını kaynak yöntemi şematik görüntüsü

Yöntem son derece yüksek kaynak hızda ve farklı pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi ve mekanize edilebilmesi açısından çok avantajlıdır. Fakat ilk yatırım maliyetinin yüksek oluşu ve çalışma sahasının getirdiği kısıtlamalardan dolayı ekonomik açıdan zorlayıcı olduğu bilinmektedir [83].

1.14.5. MIG-MAG gazaltı kaynağı

Gazaltı kaynağı, sürekli beslenen bir dolgu telinin kontak meme içerisinden geçip kutuplanarak koruyucu gaz altında ark oluşturarak iş parçasını birleştirme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 1.6. da gaz altı kaynak tekniğine ait şematik görüntüler sunulmuştur. Kaynak havuzu; aktif veya asal gazlar ile havanın olumsuz etkilerinden korunmaktadır. Çeliklerin kaynağında aktif gazlar, demir dışı metallerin kaynağında ise genelde asal gazlar

kullanılmaktadır. Yöntem kullanılan gazın cinsine iki farklı yöneme ayrılmaktadır. Aktif gaz ile yapılan işleme MAG (Metal active gas), asal gazla yapılan işleme ise MIG (Metal inert gas) adı verilmektedir. Bu iki yöntemin ekipmanları ve uygulanışında çok fazla farklılık bulunmamaktadır [84].



Şekil 1. 6. (a) Gazaltı kaynağının genel şekli, (b) kaynak işleminin kesit görüntüsü

Bu yöntemde tel besleme üniteleri kaynağın ekonomik verimini etkilemektedir. Dakikada 1,5 metre ile 30 metre arasında tel yığma hızlarına ulaşılabilir. Şekil 1.6.'da de gaz altı kaynağın genel şekli gösterilmiştir. Yüksek yığma hızlarında kaynak yapmak için sıvı soğutmalı torç donanımları ve yüksek elektrik verim oranı olan kaynak makinaları gerekmektedir. Tel elektrot baskı makarası ile tel sürme makarası üzerine bastırılmaktadır. Baskının miktarı ve makaranın yatak şekli kullanılan telin türüne bağlı olarak manuel olarak ayarlanmaktadır. Eğer baskı düşük olursa tel elektrot düzenli şekilde sisteme sürülemez. Şayet baskı fazla olursa da tel deforme olarak kontak memeden geçişte sorunlar yaşanabilmektedir. Yumuşak malzemelerde (alüminyum, paslanmaz çelik) U yatak, sert malzemelerde V yatak kullanılmaktadır. Bu yöntemde koruyucu gaz olarak kullanılan

gazlar aşağıda ki gibidir [85].

- Argon
- Helyum
- Argon + Helyum
- Argon + CO₂
- Argon + O₂
- Argon + H₂
- CO₂

Kullanılan gazlarının kaynak banyosunu koruma görevi olarak fonksiyonları aynıdır fakat ısı ve elektrik iletkenliğı açısından çok farklı karaktere sahip oldukları bilinmektedir. Asal gazlarda Argon'un elektriksel iletkenliğı, Helyum'un ise ısı iletkenliğinin daha iyi olduğı bilinmektedir [86]. Diğeri gazlar ise belli oranlarda biri veya ikisi karıştırılarak karışım gazlar elde edilmiş olur. Aktif gaz olarak sadece CO₂ gazı tek başına kaynak gazı olarak kullanılmaktadır. CO₂ gazı kaynakta derinlemesine nüfuziyet açısından iyi sonuçlar vermekte olup miktarı arttıkça çapaklanma ihtimalini artırmaktadır [87],[88].

Kaynak gazında çok az miktarlarda bile O₂ miktarı damlacıkların yüzey gerilimi azaltarak adezyon kuvvetini artırarak daha küçük damlacıklar halinde kaynak havuzuna katılmasını sağlamaktadır fakat oksidasyonu artırmaktadır [89].

Bu da kaynak sonrası oluşan silikat tabakasını artırmaktadır. Kaynak gazı içinde kullanılan H₂ ise derinlemesine ve enlemesine nüfuziyet elde edilmesinde ve kısa ark bölgesinde daha düzgün damlacık geçişi sağlamaktadır. MIG/MAG kaynağında kullanılan koruyucu gazlar TS EN ISO 14175 standardında standartlaştırılmıştır. Yöntem gelişen robot teknolojilerine entegre olup sahip olduğı yüksek yığıma özelliğinin verdiği avantajla tümüyle mekanize edilebilen bir yöntemdir. Bu sebeple endüstriyel açıdan sıklıkla tercih edilmektedir [90].

1.15. Zırh Çelik Kaynak Yöntemlerinin Genel Mukayese

Zırh çeliklerinin kaynak prosesi kapsamında uygulanacak yöntemin seçiminde; malzemenin mekanik özellikleri, kaynak sonrası mikro yapı değişimleri ve üretim verimliliğı gibi kriterler göz önünde bulundurulmaktadır. Literatürde ve endüstriyel uygulamalarda yapılan çalışmalar sonucunda, özellikle metal inert gaz (MIG) kaynak yönteminin zırh çelikleri için en etkili kaynak teknolojilerinden biri olduğı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, gelişen üretim teknolojileriyle birlikte farklı kaynak tekniklerinin zırh çeliğı üzerindeki etkileri araştırılmaya devam etmektedir.

Askerî uygulamalarda kullanılan zırhlı araçların üretiminde yaygın olarak tercih edilen yöntemler arasında Gaz Metal Ark Kaynağı (GMAW), Korumalı Metal Ark Kaynağı (SMAW) ve Özlü Tel ile Ark Kaynağı (FCAW) yer almaktadır. Yapılan karşılaştırmalı analizler, SMAW yönteminin, FCAW ve GMAW yöntemlerine göre daha düşük birikme hızı sunduğunu göstermektedir. Ayrıca GMAW, sürekli tel besleme özelliği sayesinde üretkenlik açısından SMAW'a kıyasla daha avantajlıdır [91].

Ancak bu değerlendirmelerde, MIG yönteminin kıyas dışında bırakılması gerektiği ifade edilmiştir; çünkü MIG yönteminde kullanılan kaynak metalinin darbe dayanımı daha düşüktür. Yine de daha yüksek akma dayanımlı bir dolgu metali ile MIG kaynak yöntemi, eğilme dayanımı bakımından üstün sonuçlar vermiştir ve bu da MIG yönteminin zırh çelikleri için önemli bir avantaj sunduğunu ortaya koymaktadır [92].

Tablo 1. 9. Farklı yöntemlerle elde edilmiş Protection 500 kaynaklı yapının mekanik özellikleri

	Kaynak Metali Türü %Cr-%Ni- %Mn	Kaynak Metali Akma Dayanımı (MPa)	Kaynak Metali Darbe Dayanımı (J)	3 nokta Eğme Testi Sonuçları		Sertlik (HV _{0.5})			Çentik Darbe Dayanımı (J)	Darbe Tokluğu (kJ/m ²)
				σ_M (MPa)	ε_M (%)	Kaynak Metali	HAZ Max	HAZ Min		
Ana Malzeme				4155	2,59		530		64	799
MIG	AS-P 312/29-9-0.8	600	50	1745	3,18	395	585	440	53	668
MAG	307 Si / 19-9-7	420	80	1723	4,92	330	575	400	87	1083
TIG				1452	5,40	330	450	400	107	1343

Zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirme işlemlerinde en sık tercih edilen yöntemlerden biri olan ergiyen elektrotlu ark kaynağında, dikkate alınması gereken en kritik parametrelerden biri kullanılan dolgu metalinin türüdür. Bu bağlamda yapılan araştırmalar, zırh çeliği kaynaklarında kullanılan dolgu malzemesinin genellikle ana malzemeye kıyasla daha düşük mekanik özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle dolgu metali, kaynaklı birleştirmenin en zayıf noktası olarak değerlendirilmektedir [93]

Bu risklerin azaltılması amacıyla, zırh çeliklerinin birleştirme kaynağında uygun tel seçimi büyük önem taşımaktadır. Genellikle ferritik ya da östenitik karakterdeki teller tercih edilmektedir. Özellikle östenitik paslanmaz çelik sınıfına giren dolgu metalleri, birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan en öne çıkanlardan biri, östenitik yapı sayesinde kaynak dikişinde hidrojenin etkisinin minimize edilmesi ve hidrojen gevrekliğinin önüne geçilmesidir [93].

1.16. Zırh Çeliklerinde Kaynak Sırasında Karşılaşılan Zorluklar

Bununla birlikte, zırh çeliklerinin kaynağı, hidrojen kaynaklı çatlamaya (HIC) ve diğer sorunlara, ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) önemli ölçüde sertleşme ve yumuşamaya duyarlılığı artıran yüksek karbon eşdeğeri (CE) nedeniyle önemli zorluklar çıkarmaktadır.[94]. Bu zorluklar, bağlantıların mekanik ve balistik bütünlüğünü koruma ihtiyacı ile daha da artmakta ve optimize edilmiş kaynak işlemlerinin geliştirilmesini kritik bir araştırma alanı haline getirmektedir.

Zırh çelikleri, korumalı metal ark kaynağı (SMAW), özlü ark kaynağı (FCAW), gaz metal ark kaynağı (GMAW) ve gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) dahil olmak üzere çeşitli teknikler kullanılarak kaynaklanabilir [94].

Kaynak yönteminin seçimi, çeliğin kimyasal bileşimi, zırh plakalarının kalınlığı ve ürünün karmaşıklığı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [95]. Bu teknikler arasında GMAW, daha yüksek biriktirme oranları ve daha düşük ısı girdisi nedeniyle öne çıkmaktadır, bu da onu özellikle zırh çeliklerinin kaynağı için uygun hale getirmektedir.

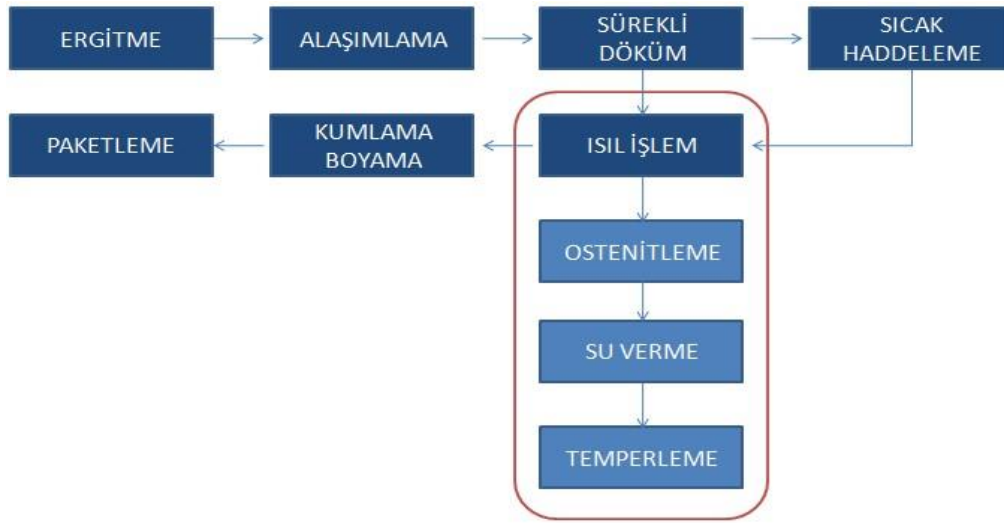
Bu nedenle, araştırmacılar son zamanlarda zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliğini geliştirmek için GMAW'a odaklanmışlardır, ancak bazıları katı bir tel yerine akı dolu boru şeklinde bir tel kullanan FCAW'ı da ele almıştır [96].

1.17. Zırh Çeliklerinin Kullanıldığı Askeri Alanlar

Zırh çelikleri, farklı türdeki mermilerin oluşturduğu çoklu darbelere karşı çatlama, parçalanma ve kırılmaya direnç gösterecek şekilde özel olarak tasarlanmış mühendislik malzemeleridir. Bu çelikler hem sivil hem de askeri uygulamalarda; kara, deniz ve hava platformlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Mermilerin geometrik yapısı ve mekanik etkileri doğrultusunda değişen darbe yüklerine karşı etkili olabilmek için zırh çelikleri, farklı kimyasal kompozisyonlara ve mekanik özelliklere sahip varyantlar hâlinde üretilmektedir. Özellikle tanklar ve diğer zırhlı muharebe araçlarında tercih edilen bu çelikler; yüksek dayanım, iyi kaynak edilebilirlik ve onunla beraber düşük üretim maliyetleri gibi avantajları sayesinde, alüminyum alaşımları, seramik, cam veya elyaf takviyeli kompozit malzemelere kıyasla daha sık tercih edilmektedir [97].

Zırh çeliklerinin, yüksek patlayıcılı ve parçalayıcı etkiler gösteren mühimmatlara karşı etkili bir koruma sağlayabilmesi için homojen bir mikroyapıya sahip olmaları kritik önem taşımaktadır. Bu malzemeler, kompozisyon yönünden alaşımlı çelik sınıfında yer almakta olup, istenilen sertlik ve tokluk kombinasyonunu elde edebilmek amacıyla östenitleme, su verme ve ardından yapılan temperleme işlemleri uygulanmaktadır. Bu ısıl işlemler sonucunda

zırh çeliğinde martenzitik yapı gelişmekte ve bu sayede malzeme yüksek mekanik performans göstermektedir [98].



Şekil 1. 7. Zırh çeliği üretiminin genel prosesi

Şekil 1.7 de gösterildiği üzere, zırh çeliği üretim süreci ergitme işlemi sonrasında gerçekleştirilen alaşımlandırma ile başlamakta, bunu takiben sürekli döküm prosesi uygulanmaktadır. Bu proseste çelik, slab formunda katılaştırılmaktadır. Eğer slab malzemesi sonrasında sıcak haddeleme işlemine tabi tutulursa, elde edilen ürün literatürde haddelenmiş homojen zırh çeliği (Rolled Homogeneous Armor – RHA) olarak tanımlanmaktadır. Diğer taraftan, sıcak haddeleme aşaması uygulanmadan doğrudan sertleştirme işlemlerine tabi tutulan çelikler ise yüksek sertlikte zırh çelikleri (High Hardness Armor – HHA) olarak adlandırılmaktadır.

Üretim zincirinin ilk aşamasında, bazik oksijen fırınında ergitilen şarja krom (Cr), nikel (Ni) ve molibden (Mo) gibi ana alaşım elementleri eklenerek çeliğin kimyasal bileşimi ayarlanır. Isıl işlem sonrası ihtiyaç duyulan boyutsal toleranslara göre sıcak haddeleme yapılabilir. Nihai ürünler, yüzey temizliği (kumlama) ve koruyucu boya işlemi ile tamamlanarak sevkiyata hazır hâle getirilir [99].

Ayrıca bu çeliklerin bileşiminde yer alan molibden, genellikle %0,3–0,7 aralığında kullanılır ve mikroyapı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Özellikle, tane büyümesini engelleyici etkisi ve tane sınırlarında karbür çökmesini baskılayarak gevrekliği azaltması, bu elementi zırh çeliği tasarımında vazgeçilmez kılar. Benzer şekilde, vanadyum, titanyum ve niyobyum gibi mikro alaşım elementleri de tane inceltici etkileriyle yapısal dayanımı

artırmaktadır. Zırh çeliklerinin sınıflandırılması, hem kimyasal kompozisyonlarına hem de kullanım alanlarına göre çeşitlilik göstermektedir [100].

Ancak zırh çeliklerinin alaşım bileşiminde yer alan karbür yapıcı elementler (örneğin krom (Cr), molibden (Mo), vanadyum (V) vb.), karbon ile daha yüksek temperleme sıcaklıklarında birleşerek özel karbür fazlarının (MC , M_2C , M_7C_3 vb.) oluşumuna neden olur. Bu durum, temperleme sürecinde gözlenen ve “ikincil sertlik” olarak adlandırılan sertlik artışını açıklar. Bu fenomen, esasen temperleme sıcaklığı yaklaşık $600^{\circ}C$ civarında uygulandığında belirginleşir ve yapıda lata tipi martenzit oluşumu gözlenir [96].

Temperleme sıcaklığı arttıkça, çeliklerin sertlik, akma ve çekme mukavemeti düşerken, genellikle tokluk değerleri artar. Bu nedenle, tokluk ve mukavemet korelasyonunun dengelenebilmesi açısından temperleme sıcaklığı $200^{\circ}C$ civarında seçilmiştir. Yapılan mikroyapı analizlerinde, %0.3 C, %0.2 Si, %0.5 Mn, %1.4 Cr, %1.5 Ni, %0.3 Mo ve %0.1 V içeren bir zırh çeliği bileşiminde, tüm ısıtma işlem kademeleri sonrasında martenzit fazının hâkim olduğu belirlenmiştir [100].

1.18. Kaynak Pozisyonları

Kaynak pozisyonunu seçmeden önce kaynak bağlantısını analiz etmek ve nihai ürünün gereksinimlerini belirlemek önemlidir. Bağlantının boyutu, şekli ve kalınlığı hangi kaynak pozisyonlarının uygulanabilir olduğunu belirler. Bunlara ek olarak kaynak yapılan malzeme, kullanılan kaynak yöntemi, kaynakçının beceri düzeyi, malzemenin kalınlığı ve mukavemeti dahil olmak üzere çeşitli faktörler kaynak pozisyonunu etkileyebilir. Bağlantı analiz edilip kaynak pozisyonunu etkileyen faktörler değerlendirildikten sonra uygun kaynak pozisyonu seçilmelidir. Seçilen kaynak pozisyonu bağlantı için en iyi erişilebilirliği, biriktirme oranını ve kaynak kalitesini sağlamalıdır. Uygun kaynak pozisyonunu seçtikten sonra bile kaynak kalitesini optimize etmek için ayarlamalar yapılması gerekebilir [97].

1.19. Alın Kaynağı (Düz Kaynağı)

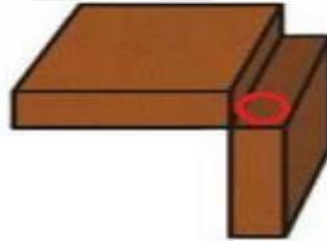
Torç veya elektrotun kaynak yönünde hareket ettirildiği bir kaynak yöntemidir. Yani kaynak operatörü kaynak yaparken torcu kaynak havuzunun önüne doğru hareket ettirir. Alın kaynağı, ince malzemelerin kaynağında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Alın kaynak işleminin gözeneklilik ve alttan kesme gibi hatalara neden olma olasılığı daha düşüktür. Bu kaynak türü daha hızlı, daha düzgün ve daha az hata gibi çeşitli avantajları vardır [97]. Alın kaynağı Şekil 1.8. de gösterilmektedir.



Şekil 1. 8. Alın kaynağı

1.19.1.Köşe (dış köşe) kaynağı

Köşe bağlantısı, kaynakta iki parça malzemenin dik açıyla birleştirildiği bağlantıdır. Ortaya çıkan malzemeler bir L şekli oluşturur. Bu bağlantı yaygın olarak metal levhaların veya boru şeklindeki malzemenin birleştirilmesi için kullanılır. Bu kaynak pozisyonunun köşe kaynağı olarak kabul edilmesi için malzemelerin birbirine 90 açıyla konumlandırılması gerekir. Şekil 1.9. da köşe kaynağı gösterilmektedir [98].



Şekil 1. 9. Köşe Kaynağı

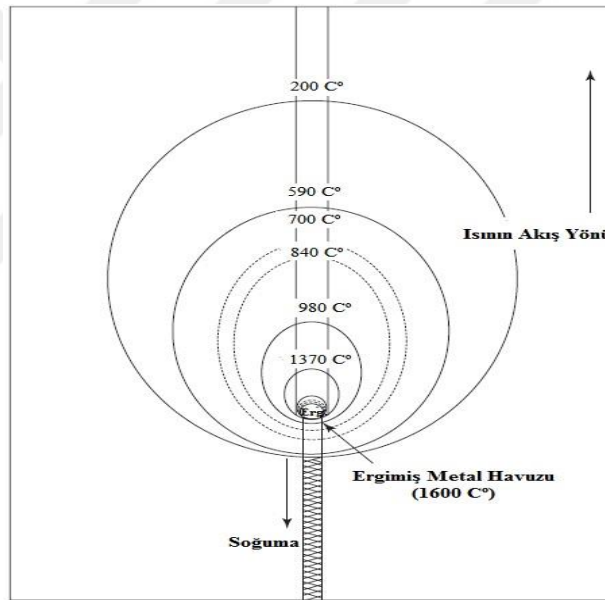
1.19.2. Kaynak sırasında ısı dağılımı ve etkileri

Kaynak proseslerinin tamamında, ısı enerjisi, metalik bağlantının gerçekleşmesinde temel rol oynayan ana etkidir. Bu enerji, kaynak dikişi ile ana malzeme arasında yayılım göstererek ısı dağılımını oluşturur. Isı, farklı kaynak tekniklerinde farklı mekanizmalarla elde edilebilse de, çoğunlukla iki metalin birleştirilmesi sırasında kullanılan doğru akım debisi ve kontak direnci ile sağlanır.

Kaynak sırasında oluşan bu termal dağılım, sadece kaynak yöntemine bağlı kalmaksızın, doğrudan malzemenin yapısal ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. Örneğin, kristal yapı dönüşümleri, artık gerilmelerin oluşumu ve geometrik distorsiyonlar gibi önemli

mikro-yapısal değişiklikler, uygulanan ısı çevrimin sonucunda ortaya çıkar. Malzeme davranışını bu bağlamda etkileyen dört temel termal faktör aşağıda sıralanmıştır [98].

1. Maksimum sıcaklık dağılımı (pik sıcaklık): Kaynak işlemi sırasında ulaşılan en yüksek sıcaklık, mikro yapı üzerinde belirleyici etkiye sahiptir.
2. Kaynak metali ve Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)'nin sıcaklık gradyanı: Bu bölgelerdeki ısı dağılımı, geçiş zonlarında mekanik özellikleri doğrudan etkiler.
3. Soğuma hızı: Kaynak sonrası metalin ve ITAB'ın soğuma süresi, martenzit, perlit ya da ferrit gibi faz dönüşümleri üzerinde belirleyicidir.
4. Katılaşma hızı: Ergitilen kaynak metalinin katı faza dönüşme hızı, tane yapısını ve dolayısıyla mukavemet ile tokluğu etkiler.



Şekil 1. 10. Kaynak prosesinde sıcaklık gradyentinin yönü

Şekil 1.10.'da da gözlemlenebileceği üzere, kaynak işlemi sırasında elektrik arkının çelikle ilk teması, hızlı bir sıcaklık artışına neden olur. Bu sıcaklık artışı sonucunda, yaklaşık 510 °C civarında çelikte mevcut olan distorsiyona uğramış taneler rekristalizasyon sürecine girer. Ergitilen çelik, kaynak banyosu ile çevrelenerek sıvı ve katı fazların birlikte bulunduğu yarı katı (peltensi) bir yapı oluşturur [98].

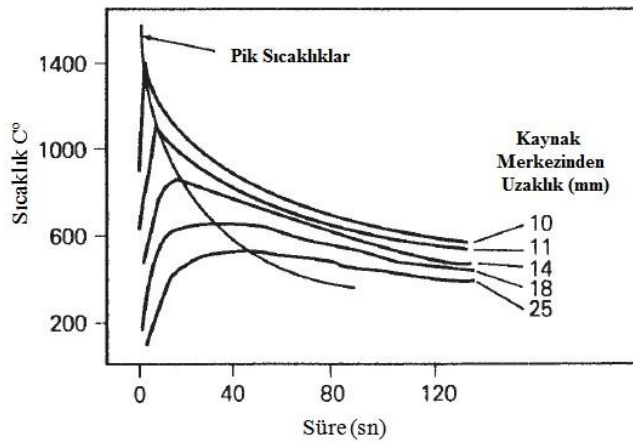
Yüksek sıcaklık bölgesinde, çelik 850 °C izoterm eğrisi içerisinde tamamen östenit (γ) fazına dönüşür. Ancak 510–725 °C sıcaklık aralığında yapı hem ferrit (α) hem de östenit (γ) kristallerinden oluşur. 850 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda küçük östenit taneleri birleşerek

daha büyük taneler oluşturur. Ergime sıcaklığına yaklaşıldığında, yaklaşık 1490 °C'de erime başlar ve 1520 °C'ye kadar tüm kristaller sıvı hale geçer [99].

İkincisi ise ergimenin olmadığı fakat ısı dolayısıyla ana malzeme özelliklerinin değiştiği ısı tesiri altındaki bölgedir (ITAB). Kaynak bölgesi kalıntı metal ile proses sırasında ergimiş çelik bileşenlerini içerir ve katılaştıran bir mikroyapıya sahiptir. ITAB ise kaynak bölgesine çok yakın ve ısı girdisi sırasında ergimemesine rağmen mikroyapıda önemli değişikliklerin meydana geldiği bir bölgedir [99].

Esas itibariyle çelikte meydana gelen her bir faz dönüşümü kaynak prosesinin konusu içindedir. Kaynak bölgesi Demir, ergime sıcaklığının hemen altında ferritik bir yapıya sahiptir. Soğuma ile birlikte ferrit östenite dönüşür. Soğuma arttıkça yeniden ferrit fazı elde edilir. Az miktarda alaşım elementi içeren çoğu çelikte aynı kristal yapı dönüşümleri gözlemlenir. Kaynak sonrası kaynak bölgesindeki katılaşmayla birlikte eş eksenli sütunsal δ -ferrit tane büyümesi başlar. Taneler ısı akışı yönünde büyüdükleri için anizotropik yapıdadırlar. Bu sebeple sütunsal tanelerin kalınlığı kaynak sınırından uzaklaştıkça artmaktadır [99].

Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak işlemi sırasında doğrudan ergimeye uğramayan, ancak uygulanan ısı çevrimleri nedeniyle mikroyapısal ve mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelen bir bölgedir. Tüm kaynak proseslerinde ergimeyi sağlamak amacıyla bir ısı kaynağı kullanılır ve bu enerji, kaynak metalini ile esas malzemenin birleşmesini sağlar [100].



Şekil 1. 11. ITAB'nin kaynak sırasında maruz kaldığı termal ısı çevrimlerini gösteren Sıcaklık zaman eğrileri

Kaynak bölgesinde oluşan pik sıcaklık ve ısınma hızı, kaynak merkezinden uzaklaştıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır. Şekil 1.11 de Itab bölgesinin sıcaklık ve süre oranı verilmiştir. Buna karşılık soğuma hızı, kaynak bölgesinden ısı tesiri altındaki bölgeye geçildikçe hızla düşer. Bu durum, özellikle 50–80 saniyelik süre zarfında sıcaklığın 800 °C ile 500 °C arasına inmesiyle belirginleşmektedir. Bu sıcaklık aralığında ısının çevreye daha yavaş nüfuz ettiği gözlemlenmektedir.

Çeşitli çelik türleri, bu sıcaklık aralığında katı halde östenit fazının oluşumuna olanak sağlayarak, yapısal dönüşümlere neden olabilir. Bu nedenle, ısı tesiri altındaki bölgenin sıcaklık dağılımının detaylı olarak analiz edilmesi büyük önem taşır. Faz yapısındaki bu dönüşümler, doğrudan malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Tablo 1.10. da Itab mikroyapılarına göre karakteristik sıcaklık aralıkları gösterilmiştir.

Bu bağlamda, ITAB içerisindeki faz dönüşümleri ve mikroyapısal değişimler anlaşıldıktan sonra, uygulanacak uygun ısı işlem prosedürleri ile bu bölgedeki yapının homojenizasyonu sağlanabilir ve kaynak sonrası mekanik performans istenilen seviyelere getirilebilir [100].

Tablo 1. 10. ITAB'nin mikroyapılarına göre karakteristik sıcaklık aralıkları

ITAB Bölgeleri	Sıcaklık Aralıkları
Kaba Taneli Bölge	$1500\text{ C}^{\circ} > T > 1200\text{ C}^{\circ}$
İnce Taneli Bölge	$1200\text{ C}^{\circ} > T > A_{c3}$
Kısmen Dönüşüm Geçirmiş Bölge	$A_{c3} > T > A_{c1}$
Temperlenmiş Bölge	$A_{c1} > T$

1.20. Kaynakların Muayeneleri

Gelişen üretim teknolojileri, malzeme kalitesinin ve yapısal bütünlüğünün değerlendirilmesine yönelik daha duyarlı, ekonomik ve hızlı analiz yöntemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda, üretim ve kalite kontrol süreçlerinde tahribatsız muayene (TM) yöntemleri yaygın biçimde tercih edilmektedir [100].

Tahribatsız muayene teknikleri, malzemeye fiziksel zarar vermeksizin hem yüzey hem de iç yapısal bozukluklara dair bilgi edinilmesini sağlar. Bu yöntemler hem numune bazlı bireysel testlerde hem de seri üretimlerde %100 kontrol amacıyla kullanılabilir [101].

Tahribatlı testlerin yalnızca sınırlı numunelere uygulanabilirliği göz önüne alındığında, tahribatsız yöntemler çok daha geniş kapsama ve etkinlik alanı sunar. Üretimin her aşamasında kullanılabilen bu yöntemler, erken hata tespiti sayesinde karmaşık sistemlerde ortaya çıkabilecek bakım, onarım ve işletme maliyetlerini azaltır. Ayrıca, ürünlerdeki süreksizliklerin üretimin ilk aşamasında tespit edilmesini sağlayarak, verimliliği artırır.

Tahribatsız yöntemler, genellikle daha yüksek maliyetli mekanik testlere göre daha hassas ve güvenilir sonuçlar vermekte, ayrıca üretim süreçlerinde belirli kalite düzeyinin korunmasına katkı sunarak güvenliğin artırılmasına yardımcı olmaktadır [101].

Bu teknikler, kullanım amaçlarına göre farklı sınıflara ayrılmaktadır. En yaygın sınıflandırma; incelenen bölgeler temel alınarak yapılır:

1. Yüzeysel yöntemler: Sıvı penetrant, manyetik parçacık ve girdap akımları.
2. Hacimsel yöntemler: Radyografi, ultrasonik ve termografik testler.
3. Birleşik yöntemler: Kaçak testi, akustik emisyon gibi birden fazla tekniğin birlikte kullanıldığı yöntemler [102].

Teknolojik ilerlemelere bağlı olarak mevcut yöntemlerin performansları geliştirilmiş, aynı zamanda yeni tahribatsız muayene teknikleri de literatüre kazandırılmıştır. En sık kullanılan yöntemler arasında görsel-optik muayene, sıvı penetrant, manyetik parçacık, girdap akımı, radyografi ve ultrasonik testler bulunmaktadır [102].

Tahribatsız yöntemler; kalınlık ölçümü, malzeme sınıflandırması, kimyasal bileşen tayini, yüzey özelliklerinin analizi, gerilme yoğunluğu bölgelerinin tespiti ve malzeme davranışının öngörülmesi gibi çok çeşitli uygulama alanlarına sahiptir [102]. Tahribatsız malzeme muayene yöntemlerinin seçimi; uygulanabilirlik, ulaşılabilirlik, maliyet ve incelemenin amacı gibi çeşitli faktörlerin değerlendirilmesini gerektirir. Uygulamada, denetlenecek malzemenin yapısal özellikleri ve saptanması hedeflenen kusurların türü göz önünde bulundurularak en uygun yöntem veya yöntemlerin tercih edilmesi önem arz etmektedir. Her yöntemin kendine özgü avantajları bulunduğundan, seçim sürecinin bilimsel ve titiz bir şekilde yürütülmesi gerekir. [103].

Radyografi, sahip olduğu çok yönlülük ve geniş uygulama yelpazesi nedeniyle tahribatsız malzeme muayene yöntemleri içinde en fazla benimsenen ve kullanılan metot olarak öne çıkar. [103]. Her yöntem, kullanım koşullarına, hata tipine ve test edilecek malzemenin türüne bağlı olarak farklı avantaj ve sınırlamalara sahiptir. TM teknikleri içinde radyografi, sahip olduğu çok yönlülük ve geniş uygulama alanı sayesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Radyografi; X ve gama ışınları kullanarak, malzemenin içyapısını bozmayacak şekilde kusurları tespit etme imkânı sunar [103]. Son yıllarda klasik radyografiye alternatif olarak dijital radyografi ön plana çıkmıştır [103]. Dijital sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sistemlerin performans ve kararlılığının düzenli olarak kontrol edilmesi gerekliliği doğmuştur [114]. Görüntü kalitesini garanti altına almak amacıyla sistem parametrelerinin periyodik kontrolü zorunlu hale gelmiştir [104].

1.20.1. Tahribatsız muayene

Tahribatsız malzeme muayenesi (TMM), incelenen parçadan numune almaya gerek duyulmadan, malzemenin işlevine zarar vermeksizin, doğrudan parçanın kendisi üzerinde gerçekleştirilen kontrol yöntemlerinin bütünüdür. Bu yöntemlerle hem yüzeyde hem de içyapıda meydana gelen kusurlar farklı tekniklerle tespit edilebilmektedir.

TMM, kalite kontrol süreçlerinin en kritik aşamalarından biridir ve üretim zincirinin tamamlayıcı son adımını oluşturur. Bu teknikler sayesinde; çatlak, içyapısal boşluk, kesit daralması, korozyon, aşınma gibi olası kusurlar, malzemelere zarar vermeden belirlenebilir. Muayene işlemleri, imalat aşamasında ya da kullanım süreci sonunda uygulanabilir. En önemli avantajlarından biri, parçaların %100'ünün kontrol edilebilmesidir. Uygulama sırasında testler doğrudan iş parçası üzerinde gerçekleştirildiğinden, parça bütünlüğü bozulmaz [104].

Tahribatsız muayene tekniklerinden en eskisi ise sıvı emdirme (penetrant) yöntemidir. Bu yöntemin kökeni, çatlakların yağ veya sıvılaştırılmış kireç ile gözle görünür hale getirilmesine dayanan, yüzyılı aşkın süredir uygulanan ilkel formlarına kadar gitmektedir [105].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri altı temel başlıkta toplanabilir:

1. Görsel Muayene (Visual Inspection)
2. Sıvı Emdirme (Penetrant Test)
3. Girdap Akımları (Eddy Current Testing)
4. Manyetik Parçacık Testi (Magnetic Particle Inspection)
5. Ultrasonik Muayene (Ultrasonic Testing)
6. Radyografik Muayene (Radiographic Testing) [121].

1.20.2. Göz ile muayene

Gözle muayene, tahribatsız muayene yöntemleri arasında en temel ve yaygın kullanılan yöntemdir. Ürün yüzeyindeki süreksizlikler, boyut sapmaları ve yüzey hataları, çıplak gözle veya optik araçlarla incelenerek değerlendirilir. Genellikle diğer muayene yöntemlerinden önce uygulanır ve bu nedenle operatörlerin gözle muayene konusunda yetkin olması gerekir.

Temel uygulama şekilleri şunlardır:

- Karşılaştırma: Master veya şablon ile standarda uygunluk kontrol edilir.
- Tahmin: Standartla fark yaklaşık olarak değerlendirilir.
- Sayma: Yapısal elemanlar sayılarak tespit edilir (örneğin, diş sayısı).

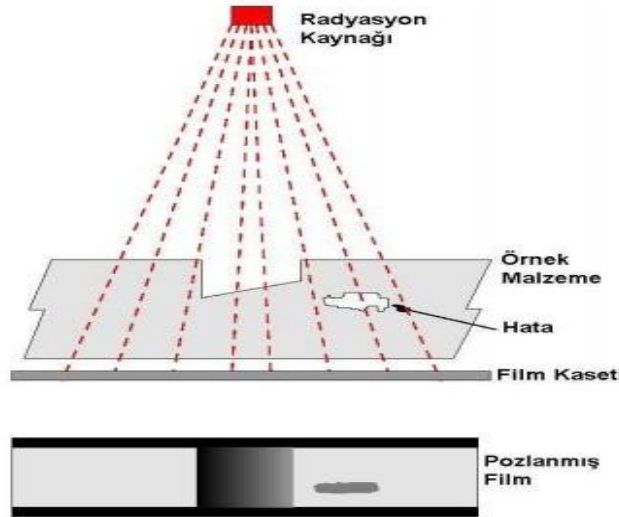
- Ölçüm: Ölçü aletleri ile boyutsal değerler tam olarak belirlenir.

Bu yöntem, kolay uygulanabilirliği ve hızlı sonuç vermesi nedeniyle kalite kontrol süreçlerinde sıklıkla tercih edilir.

1.20.3.Radyografik muayene

Endüstriyel radyografi, X veya gama ışınlarının nüfuz edici özelliğinden yararlanarak, ışığa geçirgen olmayan malzemelerin içyapısını değerlendirme amacıyla kullanılır. Bu yöntemde radyasyon, malzeme içerisinden geçerken bir kısmı absorbe edilir veya yön değiştirir. Emilme miktarı; malzemenin kalınlığına, yoğunluğuna ve atom numarasına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Şekil 1.12.'de radyografiinin şematik gösterimini detaylı olarak gösterilmiştir.

Görüntüleme amacıyla kullanılan algılayıcı sistemler arasında film, floresan ekranlar ve Geiger-Müller sayacı gibi dedektörler yer alır. Bu cihazlar, radyasyon yoğunluğundaki değişimleri görüntüye dönüştürerek malzeme içerisindeki kusurların tespit edilmesini sağlar. Radyografi yöntemi, özellikle kaynaklı bağlantılar, döküm parçalar ve kompozit malzemelerin iç kusurlarını saptamada yaygın olarak tercih edilir [105].



Şekil 1. 12. Radyografinin şematik gösterimi

X ve gama ışınları, elektromanyetik spektrumun kısa dalga boyuna sahip yüksek enerjili radyasyon türleridir. Bu ışınların giricilik gücü, dalga boyları ile ters orantılıdır. Yani:

- Dalga boyu azaldıkça, ışının enerjisi artar ve bu da malzemeye daha derin nüfuz etmesini sağlar.
- Dalga boyu arttıkça, enerjisi düşer ve giricilik yeteneği azalır.

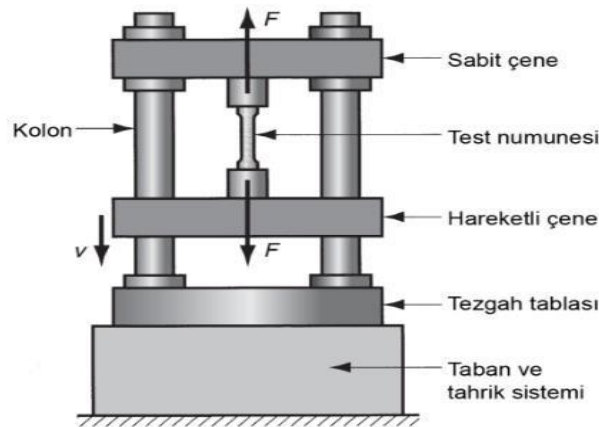
Bu ilişki, radyografik muayene yöntemlerinde kullanılacak ışın türü ve parametrelerin seçiminde belirleyici bir etkidir. Yüksek yoğunluklu veya kalın malzemelerin testinde daha kısa dalga boyuna sahip, dolayısıyla daha enerjik ışınlar tercih edilirken, daha ince ya da düşük yoğunluklu malzemelerde daha düşük enerjili ışınlar yeterli olabilmektedir.

1.21. Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Tahribatlı muayene yöntemleri, malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan, numuneye kalıcı zarar veren testlerdir. Bu yöntemlerle elde edilen veriler, özellikle kaynaklı imalat, döküm ve makine parçalarının seri üretime uygunluğunu değerlendirmede kullanılır. Endüstride çeşitli tahribatlı test yöntemleri yaygın olarak uygulanmaktadır.

1.21.1. Çekme deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin elastik ve plastik davranışlarını statik yük altında değerlendirmek amacıyla uygulanan temel bir tahribatlı test yöntemidir. Bu deney, malzemenin dayanım, uzama, akma ve kopma özellikleri gibi birçok mekanik parametresini tek bir işlemle belirleme imkânı sunduğundan, tahribatlı muayeneler arasında en yaygın kullanılan yöntemdir [106]. Şekil 1.13.'te çekme deneyine ait test düzeneği görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 1. 13. Çekme testi cihazı

Çekme deneyi, standartlara uygun şekilde hazırlanmış test numunesinin, tek eksen boyunca sabit bir hızla ve sabit sıcaklık koşullarında kopana kadar çekilmesi esasına dayanır.

Bu süreçte uygulanan yük ve numunede meydana gelen uzama miktarları sürekli olarak kaydedilir [106].

Deney sonucunda malzemenin;

- Akma gerilmesi,
- Maksimum (çekme) gerilmesi,
- Kopma gerilmesi,
- Elastisite modülü (Young modülü),
- Yüzde uzama,
- Yüzde kesit daralması gibi temel mekanik özellikleri belirlenebilir.

Gelişen test cihazları ve yazılım sistemleri sayesinde, bu veriler otomatik olarak kaydedilmekte ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri anlık olarak grafiksel biçimde sunulmaktadır [107].

1.21.2. Kırma deneyi (Çentik darbe testi)

Çentik darbe deneyi, metallerin darbe etkisi altındaki tokluk davranışını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. Tokluk, bir malzemenin kırılmadan önce bünyesine aldığı enerjiyi ifade eder ve genellikle birim alan başına düşen enerji cinsinden tanımlanır.

Deneyde, sabit kütleli bir çekiç belirli bir yükseklikten serbest bırakılarak test numunesine çarpar. Bu çarpışma sonucu numune kırılır ve numune tarafından absorbe edilen enerji, çekiç salınımının öncesi ve sonrası arasındaki enerji farkından hesaplanır. Söz konusu enerji, malzemenin darbe altında deformasyon yeteneğini yansıtır.

Çelik gibi bazı malzemelerde, farklı sıcaklıklarda yapılan darbe testleri sayesinde sünekten kırılgana geçiş davranışı da analiz edilebilmektedir [107]. Deneyin geçerli sonuçlar verebilmesi için numunelerin, ulusal veya uluslararası standartlara uygun şekilde hazırlanması gerekir.

Çentik darbe testleri başlıca iki yöntemle gerçekleştirilir: Izod ve Charpy yöntemi. Bu iki yöntem arasında numunenin tutulma biçimi ve çentik yönü açısından farklar bulunmaktadır. Deney düzeneği ve test uygulaması Şekil 1.14. te gösterilmektedir.

davranış hakkında önemli veriler sunar [110]. Deney düzeneği ve test uygulaması Şekil 1.15 te gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Eğme testi

1.22.4. Sertlik ölçümü

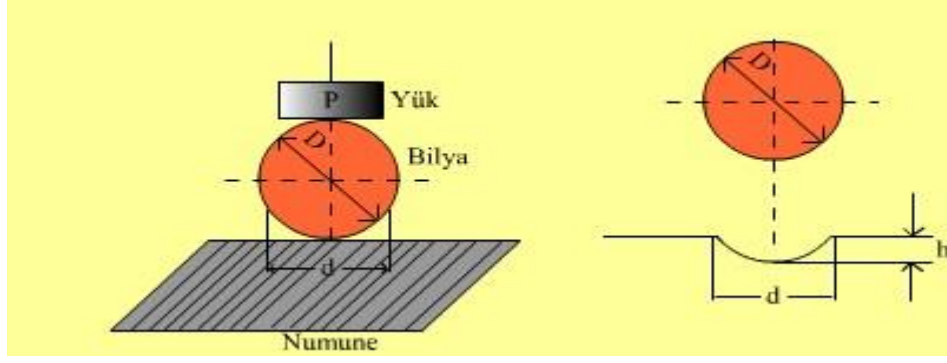
Sertlik, bir malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bu özellik, malzeme kalitesinin değerlendirilmesinde sıkça başvurulan mekanik testlerden biridir. Sertlik ölçümleri, çoğunlukla yüzeyde bırakılan kalıcı izin boyutuna dayanır ve hızlı, çoğu zaman tahribatsız şekilde gerçekleştirilir [111].

İz işlemi sonundaki taşan alan basit bir hesaplama ile yapılabileceği gibi, sertlik (H), maksimum yüklenmenin (P_{max}), etki ettiği alana (A_r), bölünerek bulunur [112].

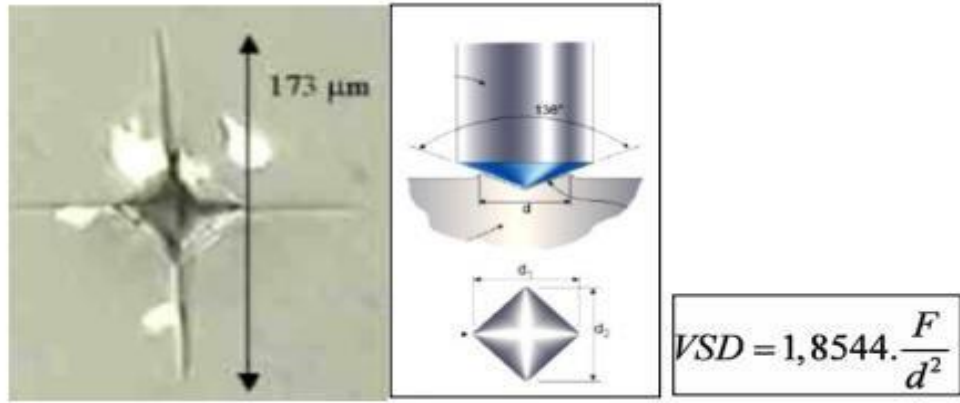
$$H = \frac{P_{max}}{A_r} \quad (9.1)$$

Sertlik Ölçme Yöntemleri

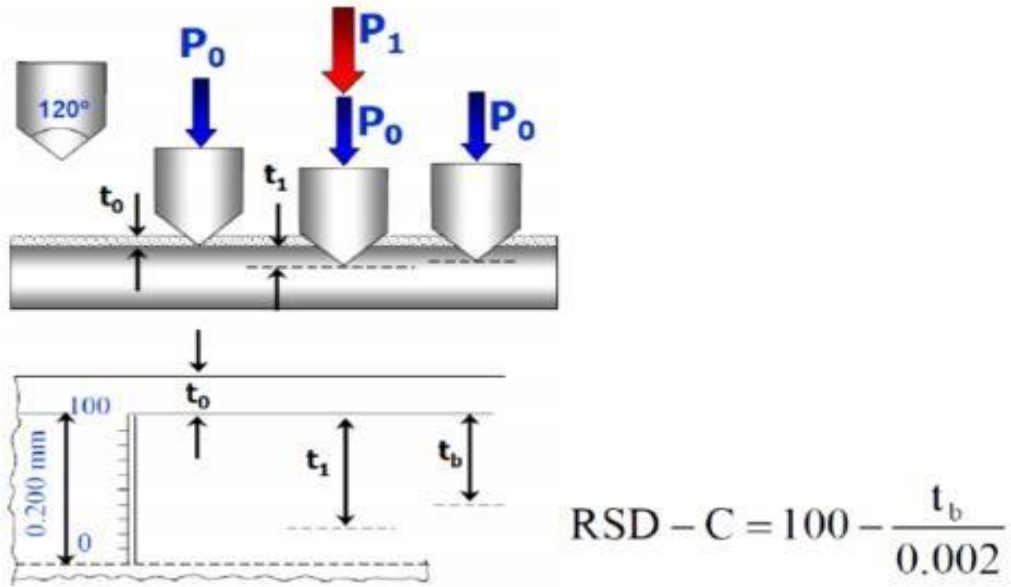
Sertlik ölçümünde en yaygın kullanılan yöntemler Brinell (HB veya BSD), Vickers (HV veya VSD) ve Rockwell (HR) testleridir. Brinell ve Vickers yöntemlerinde, sertliğin belirlenmesi için yüzeyde oluşan izin çapı veya diyagonalı ölçülürken; Rockwell yönteminde sertlik değeri, belirli bir yük altında oluşan batma derinliğine göre hesaplanır. . Deney düzeneği ve test uygulaması Şekil 1.16 da, Şekil 1.17. de ve Şekil 1.18. de deney düzenekleri tam detaylı gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Brinell sertlik deneyinin şematik gösterimi



Şekil 1. 17. Vickers sertlik deneyinin şematik gösterimi



Şekil 1.18. Rockwell sertlik deneyinin şematik görüntüsü

Bu çalışmada protac 500 malzemesinin Hibrit kaynak yöntemiyle kaynak edilmesi incelenmiştir. Protak 500 malzemesinin kesilip Elektrot tıç kaynağı ve Gaz altı kaynak ile kaynak edilmiştir. Kaynak yapılan malzeme alın kaynak birleştirme ile köşe kaynağı

birleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle kaynak edilen malzeme Tahribatsız muayene yöntemlerinden olan Radyografik muayene, Görsel muayene ve manyetik parcacık muayene yöntemi kullanılmıştır.

Tahribatlı muayene yöntemlerinden olan ekme Testi, Eğme Testi ve Sertlik Testi uygulanmıştır ve bu test sonuçları yorumlanmıştır.



2 MATERYAL ve METOT

2.1.Protac 500 Kimyasal Özeliği

Yapılan deneysel çalışmada tüm numuneler 6.5 mm kalınlığındadır. Kullanılan malzeme Protac 500 dür. Bu malzeme yüksek mukavemetli zırh grubu arasındadır.

Bu malzemeyi Ankara Organize Sanayi bölgesinde bulunan Sedef metalden tedariginden bulundum. Bize gönderilen malzeme Sedef Metal bünyesinde bulunan Seri numarası 322939 kodudur. S 22 0051 01/Z koduyla da sertifikalanmıştır. Tablo 2.1. de Protac 500 sertifikası EK-1’de verilmiştir.

Protac 500 Sedef metalde 6,5 x 750 x 1500 Şeklinde tek parça alında tedarik ettik. Tedarik ettiğimiz Malzemedan 6 adet parça kestik. Kestiğimiz 6 adet malzeme 6,5 x 300 mm x 300 mm ölçülerindedir.

Tablo 2. 1. Protac 500 kimyasal yapısı

Seri numarası						329936					
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu	%Al	%Mo	%V	%Ti
0,274	0,705	0,784	0,006	0,0003	0,44	0,55	0,158	0,047	0,284	0,01	0,021
%Nb	%N	%B									
0,018	0,0048	0,0017									



Görsel 2. 1. Hd-F lazer kesim makinesi ile kesilen Protac 500

Kesilen 6 Adet malzeme FlayMarker mini 65/30 markalama aletiyle markalama yapıldı. Görsel 2.1. de Lazerle ile kesilen protac 500 parçaları gösterilmiştir.

Bunu yapmadaki temel amaç malzemelerin süreç boyunca karışıp kaybolmasını önüne geçmek ve yapılan işlemler adım adım takip etmektir.

2.2. FlayMarker Mini 65/30 Markalama Aletinin Özellikleri

Pille çalışan el işaretleme sistemleri arasında en çok kullanılan üründür. FlyMarker mini 65/30 ile klasik el damgalarının neden olduğu el yaralanmaları ortadan kaldırılabilir. Plastikten sertleştirilmiş çeliğe (63HRC) kadar neredeyse tüm malzemeler üzerinde işaret oluşturmak mümkündür. Kompakt pille çalışan el kalemi, işlevselliği ve kompakt tasarımı çok kullanışlıdır. Pille çalışan iğneli kabartma makinesinin ağırlığı yalnızca 2,4 kg'dır.

Görsel 2.2. de markalama işlemi yapılırken çekilen görseller gösterilmiştir. Markalama işlemi yapılırken ürüne fiziksel bir zarar verilmemiştir



(a)



(b)

Görsel 2. 2. Şekil a ve b de markalama işlemi yapıldı.



Görsel 2. 3. Markalama işlemi yapılmış Protac 500

6 Adet kesilen Protac 500 Malzemenin İkiisi Alın kaynak yapılmak üzere, İkiisi T kaynak edilmek üzere ve geriye kalan iki adet Protac 500 de Herhangi bir ihtimale karşın oda alın kaynak yapılmak üzere markalama işlemi yapılmıştır. Görsel 2.3. markalama işlemi yapılan protac 500 verilmiştir.

2.3. Kaynak Ağzı Açma İşlemi

Kaynak ağzı açılması, kaynak yapılacak iki parçanın birleştirme yüzeylerinde belirli bir şekil verilerek boşluk bırakılması işlemidir. Bu işlem, kaynak dikişinin daha sağlam, nüfuziyetle ve kaliteli olabilmesi için yapılır. Bizde 40 ile 45 derece arasında Alın kaynak yapılmak için ayrılan 4 tane Protac 500 kaynak ağzı açıldı. Görsel 2.4.de kaynak ağzı açılan protac 500 gösterilmiştir.

Kaynak ağzı, elektrod ya da kaynak teli ile ergiyik metalin iki parçanın birleşim yerinin derinliklerine kadar ulaşmasını sağlar. Böylece kaynak metalinin tüm kesite nüfuz etmesi (penetrasyon) sağlanır. Böylelikle kaynakta mukavemet daha iyi olur. Görsel 2.5.'te kaynak ağzı açılan protac 500 gösterilmiştir.

Ayrıca kaynak ağzı malzemede çekme ve çatlak oluşumunu engellemek içinde yapılır. Eğer uygun kaynak ağzı açılmazsa malzemede tam nüfuziyet sağlanamaz böylece kaynak dış

tarafıta olur iç taraflara doğru gittikçe ergime olmaz. Böylece kaynakta tam nüfuziyet sağlanmaz.

İnce saclarda kaynak ağzı açılmasa da olur ama eğer malzeme 5 mm üzerinde ise kaynak ağzı açmak gerekir yoksa kaynak sadece yüzeyde kalır, içe işlemez.



Görsel 2. 4. Kaynak Ağzı Açılmayan Protac 500



Görsel 2. 5. 40 ile 45 derece arasında kaynak ağzı açılmış Protac 500



Görsel 2. 6. Açılan kaynak ağzının derinliğine bakıldı.



Görsel 2. 7. Karşılıklı Kaynak ağzı açılmış protac500

Kaynak ağzı 45 ile 50 derece arasında yapılmıştır. Kaynak ağzı açmak, parçaların daha sağlam, dayanıklı ve uzun ömürlü bir şekilde birleştirilmesini sağlar. Özellikle kalın parçalarda veya yük taşıyan yapılarda, doğru ağız tipiyle yapılmayan kaynaklar kısa sürede çatlayabilir veya kopabilir. Biz kaynak ağzını spiral ile açtık. Görsel 2.7. de gösterilmiştir.

2.4. Termoseslenme İşlemi

Bazı elektrotlar, özellikle rutubet çekici özelliğe sahip olanlar (örneğin bazik elektrotlar: E7018 gibi), kaynak işleminden önce fırınlanır veya özel elektrot fırınlarında kurutulur. Bunun temel amaçları şunlardır

Nem giderme işleminin temel sebebi Elektrot örtüsü nem alırsa, kaynak sırasında hidrojen açığa çıkar. Bu da kaynak dikişinde hidrojen çatlaklarına (soğuk çatlak) neden olabilir. Görsel 2.8. de Termoseslenme düzeneği detaylı şekilde verilmiştir

Kaynak kalitesini artırma için Nemli elektrotlar kaynak banyosunda gaz boşlukları (porozite) ve sıçrama yapabilir. Dikiş kalitesiz olur.

Elektrot kaynağı sırasında kullanılan elektrot çubuğunun Termoseslenme işlemi:



Görsel 2. 8. Elektrot kaynağında kullanılan elektrotun Termoseslenme işlemi

Kaynak yapılacak malzemede puntalama işlemi yapılır. Puntalama, kaynak öncesi parça konumlandırmasını sağlamak için yapılan küçük, noktasal kaynak dikişidir. Tam kaynak yapılmadan önce parçaları sabit tutar, hizalar ve yer değiştirmelerini engeller. Çünkü kaynak sırasında ısı nedeniyle parçalar genişler, eğilir veya kayar, puntalama işleminde ise parçalar istenilen konumda tutulur. Kaynakta çarpılmanındı önüne geçilir.

Kaynak yapılacak malzemelerde ilk başta puntalama işlemi yapılır. Puntalama

yapılmadaki temel amaç malzemenin yüksek ısıya maruz kalınca malzemede çekme olmaması ve malzeme de eksen kaçıklığına sebebiyet vereceğinden dolayı bunun önüne geçmektir. Şekil 10.12 puntalama işlemi yapılmış Protac 500 gösterilmiştir. Puntalama işleminin temel amacı kaynak öncesi montajın doğruluğunu ve stabilitesini sağlamak için kritik bir adımdır. Bu işlem sayesinde:

- Parçalar yerinden oynamaz,
- Kaynak düzgün olur,
- Çarpılmalar azalır,
- Üretim kalitesi artar.



Görsel 2. 9. Puntalama işlemi yapılmış Alın kaynak ve T kaynak

Manyetik alma işleminde kaynak işlemi sırasında yüksek sıcaklık ve elektrik akımı nedeniyle bazı parçalar, özellikle ferromanyetik malzemeler (örneğin çelikler), kalıcı olarak manyetikleşebilir. Bu istenmeyen bir durumdur çünkü:

- Tahribatsız muayene testlerini (özellikle manyetik parçacık testlerini) olumsuz etkiler.
- Parçaların mıknatıslanması, metal tozu veya talaş birikmesine neden olabilir.
- İlerideki montaj, taşıma ve hassas cihazlarla etkileşimde sorun çıkarabilir.

Kaynak edilen parçalar kaynak işlemi sırasında belirli bir strese maruz kalınır. Bu strese maruz kalan malzemede ise belli bir manyetik kuvvet olur bu kuvvet kaynak sırasında telin kaynak dikişi boyunca rahat ilerlemez Kaynak telinin tutuşmasına da mâni olur böylece kaynak dikişinde boşluklar meydana gelir. Şekil 2.10 da manyetik alma işlemi gösterilmiştir.



a



b

Görsel 2. 10. Şekil a ve Şekil b de manyetik alan ilşemi gösterilmiştir.

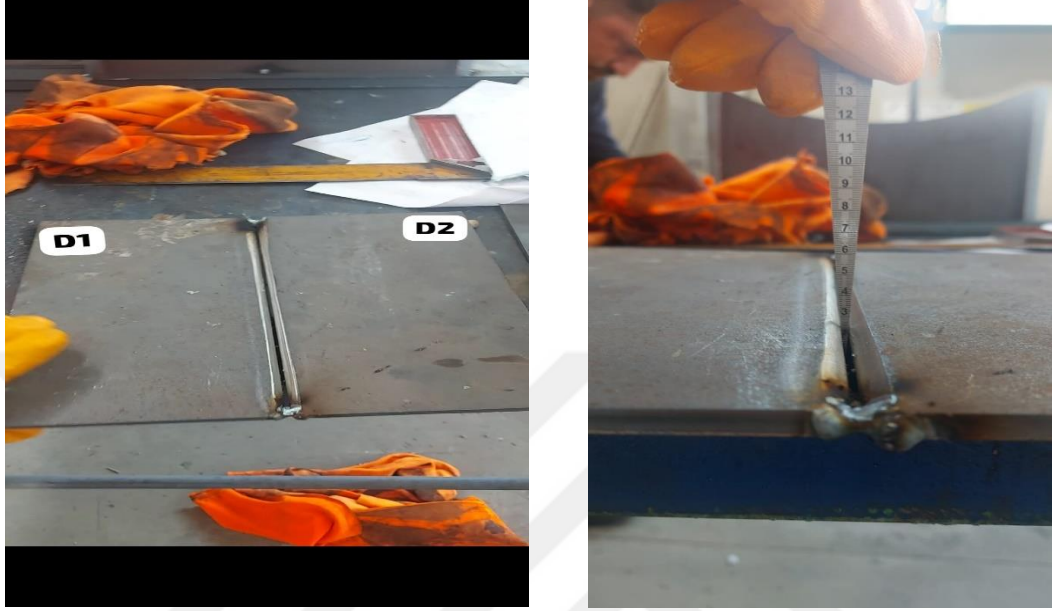
2.5.Manyetik Alma Makinesinin Özellikleri



Görsel 2. 11. Manyetik Kalıntıların Giderilmesi (Demanyetizasyon) makinesi

KY-2'nin istenen görev döngüsü 30 saniye Açık, 30 saniye Kapalı olmalıdır. Plastik kasanın dışı doğru ısınması aşırı açık kalma süresinin göstergesidir. Alet fişini uygun voltajlı

Topraklanmış bir elektrik prizine takın. Contour Probe bacaklarını çalışma yüzeyine, şüpheli arıza bacaklara dik açıda olacak şekilde yerleştirin (İyi temas en iyi sonuçları üretecektir).



(a) (b)
Görsel 2. 12. Şekil a puntalanmamış malzeme görüntüsü, Şekil b Alın birleştirme ile puntalanmış malzeme

D1 ve D2 iki adet malzeme punta kaynakla birbirine sabit hale getirildi. Kaynak yapılacak malzemelerde çekme ve gerilmeler oluşmaması için yapıldı. İlk başta Kök passo olarak SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Örtülü Elektrotla Ark Kaynağı kullanılmıştır.

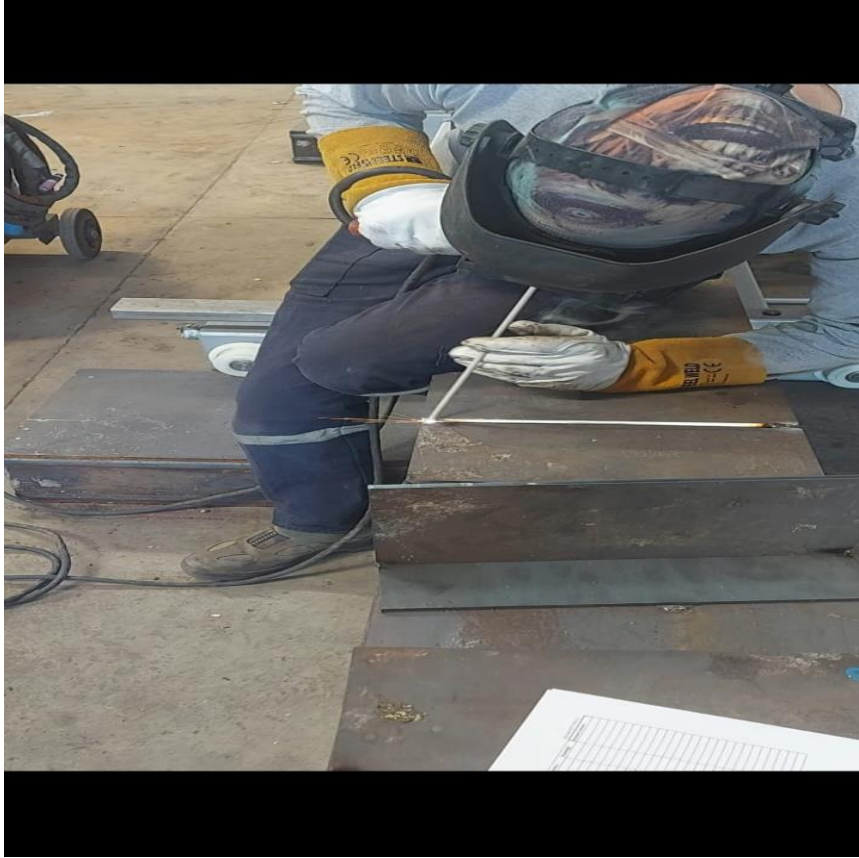
Kök passoda, iki parçanın ilk kez birleştirildiği, kaynak ağzının en dip kısmına yapılan ilk kaynak geçişidir. Bu pasonun amacı, birleşme bölgesini bir arada tutmak ve sonraki kaynak pasoları için sağlam bir temel oluşturmaktır. O yüzden kök paso SMAW kaynağıyla yapılmıştır. Görsel 2.12. de puntalanmış ve puntalanmamış malzeme gösterilmektedir.

2.6. Kullanılan Kaynak SMAW Makinesini Özellikleri

SMAW kaynak yöntemi, yüksek hassasiyet, kontrollü nüfuziyet ve temiz bir kaynak dikişi sağlaması sayesinde kök paso uygulamalarında en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Özellikle paslanmaz çelik, ince cidarlı borular, kazanlar ve basınçlı sistemlerde kullanılır.



Görsel 2. 13. Ultimate 320 THP I-Panel üç fazlı kaynak makinesinin görüntüsü



Görsel 2. 14. Elektrot kaynağı yapılırken çekilen görüntüler.

Tik kaynağında kullanılan kaynak çubuğunun OK 76.98, T91/P91 gibi modifiye edilmiş 9 Cr çeliklerin kaynağında kullanılan düşük hidrojenli bir elektrottur. Elektrot, borularda ve plakalarda her konumda kaynak yapmak için uygundur.

ESAB'ın VacPac ambalajı, düşük alaşımlı elektrotları nem alımından ve havadan yeniden emilmeden korumak için hava geçirmez şekilde kapatılmış ve vakumla paketlenmiştir. Görsel 2.15.'te protac 500 kaynağında kullanılan dolgu malzemesi gösterilmiştir.

Elektrotları yeniden pişirmeye gerek kalmadan doğrudan paketten kullanılabilir veya geçici olarak bekleme fırınlarında ve kılıflarda saklayabilirsiniz. ESAB ile her zaman taze, kuru, düşük alaşımlı kaplı elektrotlar elde edin.



Görsel 2. 15. Protac 500 kaynağında kullanılan dolgu metali

Kök paso yapılan D1 ve D2 Ara paso yapıldı. Yapılan ara passoda ise GTAW (Gas Tungsten Arc Welding / TIG) GTAW, erimeyen bir tungsten elektrot kullanılarak yapılan, koruyucu inert gaz (genellikle Argon) ile kaynak banyosunun korunmasını sağlayan ergitme tipi bir ark kaynağı yöntemidir. İlave metal gerekiyorsa ayrıca elle beslenir.

Kök pasodan sonra gelen dolgu pasolarıdır. Kaynak ağzını doldurmak için bir veya daha fazla geçiş yapılır. Sayısı, birleştirilen malzeme kalınlığına göre değişir. Genellikle MIG/MAG ya da örtülü elektrotla yapılır.



Görsel 2. 16. Ultimate 320 THP (Su Soğutmalı - Arabalı) Görüntüsü

Tablo 2. 2. Ultimate 320 THP (Su Soğutmalı - Arabalı)

Ürün Kodu	Z03.02.05
Ürün Adı	Ultimate 320THP(Su soğutmalı-Arabalı)
Şebeke Voltajı	3 X 380V + 10
Devrede Kalma Oranı	320A-%60
Akım Aralığı	5 – 320A
Güç Tüketimi	11.9kVA
Ağırlık	20 kg
Standart	EN60974-1 – EN60974 – 10 CE

Kaynak edilen parçalarda dolgu malzemesi kullanıldı. Kullanılan bu dolgu malzemesi zırh çelik gurubuna benzer özellik göstermektedir. Bunda kullanan dolgu metali ER309L dir.

ER309L temel özellikleri kimyasal bileşimi yüksek oranda Krom (%22–24) ve Nikel (%12–14) içerir. Bu sayede yüksek sıcaklık mukavemeti ve oksidasyon direnci sağlar. Düşük karbon (L) %0.03’ten düşük karbon oranı ile karbür çökmesi riskini azaltır; bu da taneler arası korozyona karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Kaynak yapılabirlik yüksek çatlak direnci sayesinde karbonlu çelik ile paslanmaz çelik gibi farklı malzemelerin kaynağında kullanılır.

Kullanılma amacı:

- Karbonlu çelik ile paslanmaz çeliklerin birleşim kaynakları
- Isıya dayanıklı parçalar, fırın ekipmanları
- İnşaat makineleri, kimya sanayi ekipmanları
- Tamir ve bakım işleri

Avantajlarının en büyük özeliği Karbon çelik ve paslanmaz çelik arasında geçiş metali olarak işlev görür Karbür çökmesini engelleyerek ömrü uzatır. Yüksek sıcaklıklarda bile mekanik özelliklerini korur.



Görsel 2. 17. Kullanılan dolgu metali görseli



Görsel 2. 18. ER309L Kaynak Çubuğunun Argon kaynak yöntemiyle kaynak edilmesi

Son işlem olarak kapak paso atıldı. Kapak paso ise GMAW135(Automatic) yapılmıştır. GMAW (Metal aktif gaz kaynağı) – Eriyen elektrot ile aktif koruyucu gaz altında yapılan kaynak genelde MAG (Metal Active Gas) kaynağına karşılık gelir.

Aktif gaz (MAG) koruması altında, eriyen tel elektrotla, tam otomatik olarak yapılan

gaz altı ark kaynağı.

- ISO 4063: "Kaynak ve ilgili işlemler – Sayısal işlem kodları"
- Kod 135, şu anlama gelir: ISO 4063 standardına göre kaynak işlem kodudur.



Şekil a



Şekil b

Görsel 2. 19. Şekil a da GMAW135(Automatic) yapılmadan önce. Şekil b de GMAW135(Automatic) yapılan Protac 500



Görsel 2. 20. T kaynak yöntemiyle yapılan GMAW135(Automatic) Protac 500

Toplam 4 adet kesilen protac 500 iki adet alın kaynak geriye kalan iki tanesinde köşe kaynak birleştirme şekli ile birleştirilmesidir

Kesilen 4 adet parça kaynak ağız açılıp kaynak yapılmıştır.



3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

TEZ-PRNT-001 Ve TEZ-PRNT-002 Olarak adlandırılmıştır

TEZ-PRNT -001 adlandırılan parçada 45 derecelik kaynak ağzı açılmıştır. Parça boyutu 300 mm x 300 mm x 5,5 mm'dir.

Ön yüzeyine Kök paso da SMAW 111 kaynak yapılmıştır. Kaynak makinesi 115 amper, voltaj 74 ve kullanılan tel çapı 3,25 mm olup kaynak süresi 3.5 dk'dır.

Ön yüzeyine tekrar Kök paso da SMAW 111 kaynak yapılmıştır. Kaynak makinesi 115 amper, voltaj 74 ve kullanılan tel çapı 3,25 mm olup kaynak süresi 2.4 dk'dır.

Ön yüzeyine kapak paso yapılmıştır. Gmaw 135 (Automatik) ile yapılmış olup, 300 amper olup voltaj 21 volt ayarlanmıştır. Kullanılan tel çapı 1.28 dk olup oslicasyon açıktır.

Arka yüzeyine ise Kök paso da SMAW 111 kaynak yapılmıştır. Kaynak makinesi 115 amper, Voltaj 74 ve kullanılan tel çapı 3,25 mm olup kaynak süresi 3.5 dk'dır.

Arka yüzeyine tekrar Kök paso da SMAW 111 kaynak yapılmıştır. Kaynak makinesi 115 amper, Voltaj 74 ve kullanılan tel çapı 3,25 mm olup kaynak süresi 2.4 dk'dır.

Arka yüzeyine kapak paso yapılmıştır. Gmaw 135 Automatic ile yapılmış olup, 200 amper olup voltaj 27 volt ayarlanmıştır. Kullanılan tel çapı 1.20 mm'dir. Kaynak süresi 1.28 dk olup oslicasyon açıktır.

TEZ-PRNT -002 adlandırılan parçada kaynak ağzı açılmamıştır. Sadece birleştirme yapılacak parçanın yüzeyinde temizlik yapılmıştır. Parça boyutu 300 mm x 300 mm x 5,5 mm dir.

Ön yüzeyine Kök paso da SMAW 111 kaynak yapılmıştır. Kaynak makinesi 100 amper, voltaj 74 ve kullanılan tel çapı 2.5 mm olup kaynak süresi 2.15 dk'dır.

Ön yüzeyine kapak paso yapılmıştır. Gmaw 135 (Automatic) ile yapılmış olup, 280 amper olup voltaj 27 volt ayarlanmıştır. Kullanılan tel çapı 1.20 mm olup kaynak süresi 1.28 dk'dır. Osilasyon açıktır.

Arka yüzeyine tekrar Kök paso da SMAW 111 kaynak yapılmıştır. Kaynak makinesi 126 amper. Voltaj 60 ve kullanılan tel çapı 3,25 mm olup kaynak süresi 3.25 dk'dır.

Arka yüzeyine kapak paso yapılmıştır. Gmaw 135 (Automatic) ile yapılmış olup, 180 amper olup voltaj 27 volt ayarlanmıştır. Kullanılan tel çapı 1.20 mm'dir. Kaynak süresi 1.15 dk olup oslicasyon açıktır.

TEZ-PRNT-001 Parçası Kaynak Parametreleri

Parça Bilgisi

Parça Adı: TEZ-PRNT-001

Boyut: 300 mm x 300 mm x 5,5 mm

Kaynak Ağız Açısı: 45°

Kaynak Parametreleri

Tablo 2.3. TEZ-PRNT-001 UYGULANAN KAYNAK İŞLEMLERİ

Yüzey	Paso Türü	Yöntem / Proses	Akım (A)	Voltaj (V)	Tel Çapı (mm)	Süre (dk)	Ek Özellikler
Ön Yüzey	Kök Paso	SMAW 111	115	74	3,25	3,5	-
Ön Yüzey	Kök Paso	SMAW 111	115	74	3,25	2,4	-
Ön Yüzey	Kapak Paso	GMAW 135 (Otomatik)	300	21	1,28	?	Osilasyon açık
Arka Yüzey	Kök Paso	SMAW 111	115	74	3,25	3,5	-
Arka Yüzey	Kök Paso	SMAW 111	115	74	3,25	2,4	-
Arka Yüzey	Kapak Paso	GMAW 135 (Otomatik)	200	27	1,20	1,28	Osilasyon açık

TEZ-PRNT-002 Parçası Kaynak Parametreleri

Parça Bilgisi

- **Parça Adı:** TEZ-PRNT-002
- **Boyut:** 300 mm x 300 mm x 5,5 mm
- **Kaynak Ağız Açısı:** Açılmamış (sadece yüzey temizliği yapılmıştır)

Kaynak Parametreleri

Tablo 2.4. TEZ-PRN2-001 UYGULANAN KAYNAK İŞLEMLERİ

Yüzey	Paso Türü	Yöntem / Proses	Akım (A)	Voltaj (V)	Tel Çapı (mm)	Süre (dk)	Ek Özellikler
Ön Yüzey	Kök Paso	SMAW 111	100	74	2,5	2,15	-
Ön Yüzey	Kapak Paso	GMAW 135 (Otomatik)	280	27	1,20	1,28	Osilasyon açık
Arka Yüzey	Kök Paso	SMAW 111	126	60	3,25	3,25	-
Arka Yüzey	Kapak Paso	GMAW 135 (Otomatik)	180	27	1,20	1,15	Osilasyon açık

3.1.Görsel Muayene Raporunun Yorumlanması:

Görsel Muayene standartlar gereği 5817 ile değerlendirilmesi yapılır.17637 standardı ile genel ilkeler ile muayene gerçekleşir. Değerlendirme kısmında ise 5817 standardına göre

değerlendirilir. Görsel Muayene raporunda önemli olan değerlendirme ölçütlerinin en önemli özelliklerinde değerlendirme yapılırken parçanın ölçü boyutsal kontrolleri, Kaynak imalatı konusunda ise Kaynak kısmı olarak köşe kaynaklarının boğaz kalınlıkları, Bacak uzunlukları, Nüfuz edip etmediği varsa eksenel kaçıklıkları, yüzeyde gözle gözlemlenebilen kaynak kusurlarının tespiti ve bunların değerlendirilmesi yapılır[113].

TEZ-PRNT-001 Parçaya baktığımızda parçanın ölçü boyutsal kontrolleri, Kaynak imalatı konusunda ise Kaynak kısmı olarak köşe kaynaklarının boğaz kalınlıkları, Bacak uzunlukları, Nüfuz edip etmediği varsa eksenel kaçıklıkları, yüzeyde gözle gözlemlenebilen kaynak kusurlarının alın kaynaklarında herhangi bir kusura rastlanmamıştır ve kabul edilmiştir

TEZ-PRNT-002 Kaynaklı imalatlı kısmında elimizdeki parçalara baktığımızda Köşe kaynaklarında 512 referans koduyla aşırı kenar eşitsizliği tespit edilmiştir. Şimdi elimizdeki TEZ-PRNT-002 tez çalışmasına baktığımız zaman boğaz kalınlıklarının veya bacak boylarının eşit olmadığı gözlenmiştir. Bu yüzden parça 5817 deki B seviyesine göre ret edilmiştir. 512 kodu ise 6520 standardından gelmektedir hatanın tiplerine göre ret edilmiştir. Normal şartlar altında görsel muayene raporunda ret yiyen TEZ-PRNT -002 parçanın diğer testlere tabi tutulmaması gerekmektedir lakin bu tez çalışmasında diğer testlere tabi tutulmasının sebebi ileriye dönük oluşacak kaynak kusurlarının önüne geçmesine engel olmaktadır[114].

3.2.Manyetik Parçacık Test Raporunun Yorumlanması

Manyetik parça test raporu malzemenin yüzeyinde ve yüzeyin hemen altındaki hataların tespiti için kullanılan hacimsel olmayan yüzeysel bir test muayene yöntemidir. Bu muayene kapsamında 17638 standardındaki durumlar incelenerek ISO 23278 kabul seviyelerine göre kontrol edilmiştir ve herhangi bir lineer ya da Nanliner bir belirtiye rastlanmamıştır.

TEZ-PRNT-001 ve TEZ-PRN -002 numuneler bu testten başarıyla geçmiştir.

3.3.Radyografik Test Raporu Yorumu

Radyografik muayene yöntemi alın kaynakları için yapılan bir muayene yöntemidir. Bu muayene yönteminde kaynaklı plakanın iç kısmında hacimsel kısmındaki hata tipleri gözlemlenmekte ve değerlendirilmektedir. Burada manyetik testin ferromanyetik malzemelere yapılmaktadır yani paslanmaz alüminyum gibi malzemelerde bu yöntem yapılamamaktadır.

Radyografik test ise hem X ray cihazı ile hem de gama cihazları ile parça yüzeyinde bir gölge oluşumu ile elde ettiğimiz bir film diye tabir ettiğimiz bir muayene yöntemidir[115]. Parçanın hacimsel hata tipleri var ve bu hata tiplerinin belirtileri var ise bunları tespit etmek amacıyla kullanılır. Yapmış olduğumuz çalışmada TEZ-PRNT-001 parçasında uygulanmıştır. Uyguladığımız zaman 4011 referans kodu ile bir hata tespit edilmemiştir.

Özelikle tam duvar ergime noksanlığı yoktur dolayısıyla parça kabul edilmiştir. Radyografi muayene deki hata tiplerinde görsel muayenedeki hata tiplerinde 652'dir.

Burada değerlendirme yapılırken de filmin yoğunluğu ve filmin doğru çekilip çekilmediği önemlidir. Film yoğunluğu 2 ile 4 arasında olması gerekmektedir[116]. Test ettiğimiz filmler içine baktığımız zaman bu yoğunluğu karşılamaktadır değerlendirme kriterimiz 10675-1 Test standardımız ise 10736-1 X-Ray cihazıyla çekmiş bulunmaktayız[117].



Görsel 3. 1. X-ray cihazıyla çekmiş olduğumuz bir film

3.4.Tahribath Muayene

TEZ-PRNT-001 Den çekme testi ve eğme testi numuneler almak için 300mm x300mm x6.5mm parçalardan kesilip parça alınmıştır. Kesilen Numuneler Çekme Testi, Eğme Testi ve Sertlik Testleri uygulanmıştır[118].

3.5.Çekme Testinin Yorumlanması

Akma Gerilmesi $\approx$ Çekme Gerilmesi: Akma gerilmesi ile maksimum yükteki gerilme neredeyse eşit. Bu, malzemenin sünekliğinin düşük veya akma noktası olmadan kırıldığını (gevrekleşme eğilimi) gösterebilir.

Çekme Dayanımı: 1.261 MPa oldukça yüksek bir dayanım gösteriyor. Bu, malzemenin muhtemelen ısıtıl işlem görmüş, yüksek mukavemetli bir çelik olduğunu düşündürülebilir.

Kopma Gerinimi: Yaklaşık %6,3 uzama, orta düzeyde süneklik göstermektedir.

Kopma Noktası: Malzeme kaynaklı bölgeden kopmuş. Bu da kaynak bölgesinin, ana malzemeye göre daha zayıf olduğunu gösterir. Kaynak işleminin mekanik dayanımı düşürdüğünü söyleyebiliriz. Olumlu Yönleri ise:

Yüksek çekme dayanımı (1261 MPa): Bu değer, çoğu yapı çeliği için oldukça yüksek. Bu, malzemenin yüksek mukavemetli olduğunu gösterir. Makul süneklik (%6,3 uzama): Malzeme çok gevrek değil; bir miktar şekil değiştirip kırılıyor. Bu da mühendislik açısından iyi bir denge. Malzeme kopana kadar yük taşımaya devam ediyor bu malzemedan beklene özelliklerdir. Dikkat Edilmesi Gerekenler:

Kopma yeri kaynak bölgesi: Bu önemli. Çünkü kaynak, tüm yapının zayıf halkası olmuş. Yani kaynak bölgesi, ısıdan ve/veya işlemiden dolayı ana malzemeye göre daha zayıf hâle gelmiş. Akma ile çekme gerilmesi neredeyse aynı yani Malzeme belirgin bir akma göstermiyor olabilir. Bu da bazı tasarım kriterlerinde istenmeyebilir, özellikle şekil değiştirme gereken uygulamalarda. Sonuç olarak:

Malzeme mekanik olarak güçlü ama kaynak bölgesi zayıf halka. Eğer bu malzeme bir yapının kritik yerinde kullanılıyorsa, kaynak kalitesi artırılmalı ya da alternatif bağlantı yöntemleri düşünülmeli[119].

3.6.Eğme Testinin Yorumlanması

Bu rapor, bir kaynaklı numune üzerinde yapılan 3 nokta eğme testinin sonuçlarını sunmaktadır. Test, malzemenin mekanik özelliklerini (akma, maksimum yük, kırılma, deformasyon vs.) belirlemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca kaynak bölgesinde yapılan Brinell sertlik ölçümleri ile malzemenin yüzey sertliği değerlendirilmiştir[120].

Akma Gerilmesi (2.600 MPa) & Maksimum Yük Gerilmesi (2.600 MPa), Akma ve maksimum yük değerleri neredeyse aynı (2.600 MPa), bu da malzemenin sünek davranmadığını, kırılma öncesi sınırlı plastisiteye sahip olduğunu gösterebilir. Kaynak

bölgesinde gevrekleşme olmuş olabilir, çünkü akmadan hemen sonra kırılma gerçekleşiyor[121].

Kırılma Gerilmesi (2.576 MPa), Kırılma gerilmesi, maksimum yük gerilmesine göre sadece %0.9 daha düşük. Bu, malzemenin sünekliğinin düşük olduğunu, yani çatlama ve kırılmaya yatkın olduğunu gösterir. Bu küçük fark, kaynak bölgesinde yeterince tokluk olmadığını düşündürebilir.

Uzama Değerleri ise Maksimum uzama 30.94 mm. Kırılmadaki toplam uzama: 34.04 mm bunun anlamı ise Malzeme bir miktar deformasyona uğramış, fakat yüksek süneklik göstermemiştir. Uzama miktarının sınırlı olması, kaynak bölgesinin tokluk kaybına uğradığını gösterir.

Brinell Sertliği: 128,4 HRB, Bu değer orta seviyede bir sertliktir Alüminyum alaşımları ve düşük karbonlu çelikler için normaldir. Sertliğin çok yüksek olmaması olumlu bir durumdur çünkü gevrekliği artırmaz ancak kaynak bölgesinde daha fazla mukavemet beklenilir.

Olumlu Yönler ise Gerilme değerleri yüksek, malzeme güçlü. Kaynak sonrası sertlik çok yüksek değil; çatlama riski aşırı değil lakin Uzama var, tamamen gevrek değil.

4.SONUÇ TARTIŞMA ÖNERİLER

4.1.Tartışma

Olumsuz Yönler ise Akma – kırılma arası çok kısa yani düşük süneklik. Gerilme-yük eğrisindeki ani düşüş yani kırılma ani olabilir yani tokluk düşük. Kaynak bölgesinde muhtemel gevrekleşme var.

Öneriler:

Kaynak sonrası ısıtıl işlem uygulanarak tokluk artırılabilir. Farklı bir kaynak yöntemi veya kaynak dolgu metaliyle tekrar test yapılmalı. Mikro yapı analiziyle kaynak bölgesindeki yapısal değişiklikler gözlemlenmeli.

4.2.Sonuçlar

Bu çalışmada, hibrit kaynak yöntemiyle birleştirilen Protac 500 zırh çeliğinde uygulanan tahribatsız muayene (NDT) ve Tahribatlı muayene yöntemlerinin kaynak kusurlarının tespiti üzerindeki etkinliği araştırılmıştır. Gözle muayene, manyetik parçacık muayenesi ve radyografik test gibi NDT yöntemleri farklı koşullarda uygulanarak kaynaklı bağlantı bölgelerindeki hataların belirlenmesi amaçlanmıştır. Tahribatlı muayene yöntemlerinde Çekme testi, eğme testi ve brinell sertlik testi uygulanmıştır.

Yapılan testler sonucunda, radyografik muayenenin özellikle içyapıda oluşan gözenek, çatlak ve cüruf gibi hacimsel kusurların tespitinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Tahribatsız muayene yöntemlerinden elde edilen bulgular, kaynaklı bölgelerde yüzeye açık çatlak, porozite, lamel ayrışmalar ve iç boşluklar gibi süreksizliklerin tespitinde etkin olmuştur. Özellikle radyografik incelemeler, kaynak dikişi boyunca oluşan iç kusurların ayrıntılı olarak gözlenmesini sağlamıştır. Ultrasonik muayeneler de bu bulguları desteklemiş, hataların boyutu ve konumu belirlenmiştir

Genel olarak, hibrit kaynak yönteminin Protac 500 çeliği üzerinde yüksek mukavemetli ve homojen bağlantılar oluşturduğu, ancak uygun kaynak parametreleri ve ön ısıtıl işlemler sağlanmadığı takdirde bazı mikroyapısal kusurların ortaya çıkabileceği anlaşılmıştır.

Kaynaklı birleştirme işlemlerinde kalite, yalnızca kaynak dikişinin dış görünüşüyle değil, aynı zamanda iç yapısal bütünlüğü ve mekanik dayanım özellikleri ile değerlendirilir. Bu çalışmada, Protac 500 çeliği üzerinde uygulanan hibrit kaynak yöntemi sonrasında yapılan tahribatsız (NDT) ve tahribatlı testlerin birleşik analizi, genel kaynak kalitesi hakkında bütüncül bir değerlendirme yapılmasına olanak sağlamıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, hibrit kaynak yöntemi ile birleştirilen Protac 500

çeliğinde gerek tahribatsız muayene gerekse tahribatlı testlerden elde edilen sonuçlar, başarılı bir kaynak uygulamasına işaret etmektedir. Özellikle uygun kaynak parametrelerinin kullanılması, ön ısıtma ve kontrollü soğuma gibi önlemler hem mekanik hem de mikroyapısal açıdan homojen ve kusursuz kaynak dikişlerinin elde edilmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak Kaynak Uygunluğu eğer Kritik yük taşıyan bir yapı içinse Yetersiz olabilir. Çünkü kaynak bölgesi yeterli süneklik ve tokluk göstermiyor. Ani kırılmalar risklidir. Düşük ve orta yük taşıyan yapılar için örneğin dekoratif yapılar, hafif konstrüksiyonlar ise Kabul edilebilir olabilir, çünkü dayanım yeterli, sertlik de makul seviyede.

4.3.Öneriler

1. Hibrit kaynak yöntemi uygulanırken, kaynak parametreleri (akım, voltaj, hız vb.) optimize edilmeli ve malzeme türüne göre uygun kaynak modları tercih edilmelidir.
2. Tahribatsız muayene yöntemleri bir arada kullanılmalı; yüzey ve yüzey altı kusurların tam tespiti için radyografik ve ultrasonik testler entegre bir şekilde değerlendirilmelidir.
3. Kaynak öncesi yüzey hazırlığı ve kaynak sonrası ısıt işlemler ihmal edilmemeli, bu işlemlerin doğru uygulanması kaynak kalitesini artırmaktadır.
4. Protac 500 gibi yüksek mukavemetli zırh çeliklerinde, kaynak sırasında ortaya çıkabilecek gerilimler göz önünde bulundurulmalı ve uygun kaynak sarf malzemeleri kullanılmalıdır.
5. Elde edilen verilerin karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmesiyle, farklı kaynak yöntemlerinin malzeme davranışı üzerindeki etkileri gelecekteki çalışmalarda daha detaylı incelenebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Yumak, N., Pekbey, Y., & Aslanta, K. (2014). Zırh tasarımında kullanılan kompozit malzemelerin deformasyon karakteristiğinin araştırılması.
- [2] Vikipedi. (2016, Aralık 8). Plaka zırh. https://tr.wikipedia.org/wiki/Plaka_zırh
- [3] Örenler, A. (2018). Zırh çeliklerinin kaynak kabiliyetinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü). YÖK Tez Merkezi.
- [4] Karagöz, Ş., Atapek, Ş. H., & Yılmaz, A. (2008). Zırh çeliklerinde perforasyon ve balistik korumanın anlaşılması açısından fraktografik etüt. Metal Dünyası, 46(3), 34–39.
- [5] Tülbentçi, K. (1998). MIG-MAG Gazaltı kaynak yöntemi. İstanbul: Arctech Yayını.
- [6] Kara, S., & Korkut, M. H. (2012). Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtılma işleminin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması. Savunma Bilimleri Dergisi, 11(2), 159–171. <https://doi.org/10.17134/sbd.44699>
- [7] Popławski, A., Kędzierski, P., & Morka, A. (2020). Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. Materials & Design, 190, 108536. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108536>
- [8] Saxena, A., Kumaraswamy, A., Madhusudhan Reddy, G., & Madhu, V. (2018). Influence of welding consumables on tensile and impact properties of multi-pass SMAW Armox 500T steel joints vis-a-vis base metal. Defence Technology, 14(3), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.01.005>
- [9] Kumar, K. S., Ponguru Senthil, P., & Jena, P. K. (2016). Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. Journal of Applied Research and Technology, 14(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.02.002>
- [10] Manganello, S. J., & Wilson, A. D. (1993). Direct quenching and its effects on high-strength armor plate. In R. Asfahani & G. Tither (Eds.), Proceedings of the International Symposium on Low Carbon Steels for the 90's (pp. 235–241). The Minerals, Metals & Materials Society.
- [11] U.S. Army Materiel Command. (1962). Elements of terminal ballistics, part II: Collection and analysis (Report No. 161-706). Washington, DC.
- [12] Demir, T., Übeyli, M., & Yıldırım, R. O. (2008). Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile. Materials & Design, 29, 2009–2016.

- [13] Şimşir, C., Yıldırım, R. O., & Ögel, B. (2002). Çelik zırh plakaların çekiç düşürme deneyi ile düşük hızlarda balistik karakterizasyonu. In Savunma Teknolojileri Kongresi (pp. 35–43), 24–25 Ekim, Ankara.
- [14] Vikipedi. (2022, Nisan 14). Vücut zırhı. https://tr.wikipedia.org/wiki/V%C3%BCcut_z%C4%B1rh%C4%B1
- [15] Encyclopædia Britannica. (n.d.). Armour: Protective clothing. In Britannica.com. Retrieved April 14, 2024, from <https://web.archive.org/web/20150905113819/https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing>
- [16] Kara, S., & Korkut, M. H. (2012). Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtılma işleminin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması. Savunma Bilimleri Dergisi, 11(2), 159–171. <https://doi.org/10.17134/sbd.44699>
- [17] Tirendaz. (2008, Kasım 18). Hakkımızda. https://www.tirendaz.com/tr/?page_id=2
- [18] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Madhusudhan Reddy, G. (2014). Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour-grade quenched and tempered steel joints. Defence Technology, 10(1), 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2013.12.001>
- [19] Krauss, G. (2005). Steels: Processing, structure and performance. ASM International.
- [20] ISS. (1994). Steel bar product guidelines (pp. 7–10). Warrendale, PA.
- [21] AMCP. (1962). Elements of terminal ballistics, part II: Collection and analysis (Report No. 161-706). Washington, DC: U.S. Army Materiel Command.
- [22] Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, S. R. (2006). Steels: Microstructure and properties (3rd ed.). Elsevier.
- [23] Tülbentçi, K. (1998). MIG-MAG Gazaltı kaynak yöntemi. İstanbul: Arctech Yayını.
- [24] McGraw, H. (1958). Constitution of binary alloys (2nd ed.). New York, USA.
- [25] Sun, D. Q., Gu, X. Y., Liu, W. H., & Xuan, Z. Z. (2005). Welding consumable research for austempered ductile iron. Materials Science and Engineering: A, 402(1–2), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.05.027>
- [28] Cimpoeu, S. J. (2016). The mechanical metallurgy of armour steels. Land Division, Defence Science and Technology Group, Australia.

- [29] Şahintürk, C., Tozlu, İ., Utku, Ş., & Pamuk, U. (2005). Erdemir levha haddehanesi ve zırh çeliği üretim çalışmaları. Makina Mühendisleri Odası.
- [30] Soykan, H. Ş., Aslanoğlu, Z., & Karakaş, Y. (2005). Zırh çeliklerinin metalurjisi. Makina Mühendisleri Odası, 427, 838–869.
- [31] Akça, C., & Karaaslan, A. (2008). Weldability of class 2 armor steel using gas tungsten arc welding. Archives of Materials Science and Engineering, 34(2), 110–112.
- [32] Naveen Kumar, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rahman, A. H., & Balaguru, V. (2022). Effect of failure modes on ballistic performance of Gas Metal Arc welded dissimilar armour steel joints. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 37, 570–583. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.03.004>
- [33] Kolla, H. H., Mishra, B., Jena, P. K., Kumar, K. S., Bhat, T. B., Srinivas, M., & Reddy, A. V. (2011). Development of an ultrahigh strength low alloy steel for armour applications. Materials Science and Technology, 27(2), 141–147. <https://doi.org/10.1179/026708309X12560332736476>
- [34] Gülgen, İ. S. (2008). İş makineleri tırnakları üretiminde kullanılan az alaşımlı çeliklerin ısı işlemleri (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [35] Pashangeh, S., Zarchi, H., Banadkouki, S. S., & Somani, M. (2019). Detection and estimation of retained austenite in a high strength Si-bearing bainite–martensite–retained austenite micro-composite steel after quenching and bainitic holding (Q&B). Metals, 9(5), 492. <https://doi.org/10.3390/met9050492>
- [36] Kavuncu, N. E. (2019). Zırh çeliklerinde robot ve manuel kaynak uygulamalarının malzeme üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması. 11. Ulusal Kaynak Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 171–177.
- [37] Vimal Kumar, N., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., & Velayudham, A. (2022a). The effect of weld-groove surface modification on the joint performance of military grade armour steel: A sustainability approach – I. çalışma. Materials Chemistry and Physics, 281, 125902. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125902>
- [38] Yakut, V. (2025). Zırh çeliklerinin ferritik ve östenitik dolgu malzemeleri ile kaynağının incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [39] Robledo, D. M., Gomez, J. A. S., & Barrada, J. E. G. (2011). MIL A 46100 zırh çeliği bağlantıları için gaz metal ark kaynağı kullanılarak bir kaynak prosedürünün geliştirilmesi. Dyna (Medellin), 78, 65–71.

- [40] Morsy, M. A., Abdel Aziz, S. M., Abdelwahed, K., & Abdelwahab, S. A. (2022). Kaynak parametrelerinin zırh çeliği kaynağının mekanik ve metalurjik özellikleri üzerindeki etkisi. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00102-7>
- [41] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Madhusudan Reddy, G. (2018). Savaş aracı yapımında kullanılan zırh çeliği kaynaklı bağlantıların metalurjik özellikleri. *Defence Technology*, 14, 590–606. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.07.021>
- [42] Vimal Kumar, N., Uthayakumar, M., Thirumalai Kumaran, S., & Velayudham, A. (2022b). Kaynak oluşu yüzey modifikasyonunun askeri sınıf zırh çeliğinin birleşme performansı üzerindeki etkisi: Sürdürülebilirlik yaklaşımı – II. çalışma. *Materials Chemistry and Physics*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125902>
- [43] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., & Madhusudhan Reddy, G. (2008). Zırh sınıfı yüksek mukavemetli, su verilmiş ve temperlenmiş çelik kaynaklar üzerinde hidrojen kaynaklı soğuk çatlama çalışmaları. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(6), 1897–1908. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.01.035>
- [44] Lippold, J. C. (2014). *Welding metallurgy and weldability*. Wiley. ISBN: 9781118960332
- [45] Reddy, J., Maters, G. M., Mohandas, T., & Papukutty, K. K. (1998). Kaynak işleminin yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik kaynakların balistik performansı üzerindeki etkisi. *Process Technology*, 74, 27–35.
- [46] Nanavati, P. K. (2018). Kaynak parametrelerinin dubleks paslanmaz çelik kaynaklarının korozyonu ve mekanik davranışı üzerindeki etkisi üzerine çalışmalar (Doktora tezi, Maharaja Sayajirao Baroda Üniversitesi).
- [47] Ade, F. (1991). Zırh çeliği kaynaklarının balistik yeterliliği. *Kaynak Dergisi*, 70, 53–58.
- [48] Crouch, I. G. (1988). Metalik zırh: form döküm alüminyum alaşımlarından yüksek mukavemetli levhalara. *Materials Forum*, 12, 31–37.
- [49] Maweja, K., & Stumpf, W. (2008). İleri performanslı yüksek mukavemetli düşük karbonlu martenzitik zırh çeliklerinin tasarımı: Mikroyapısal hususlar. *Materials Engineering: A*, 480, 160–166.
- [50] Jena, P. K., Kumar, K. S., Krishna, V. R., Singh, A. K., & Bhat, T. B. (2008). Yüksek mukavemetli bir zırh çeliğinin performansı üzerinde mikroyapının rolü üzerine çalışmalar. *Engineering Failure Analysis*, 15(8), 1088–1096. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.011>

- [51] Hu, C. J., Lee, P. Y., & Chen, J. S. (2002). Modifiye edilmiş haddelenmiş homojen zırh çeliğinin balistik performansı ve mikroyapısı. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 25(1), 99–107. <https://doi.org/10.1080/02533839.2002.967068>
- [52] Sangoy, L., Meunier, Y., & Pont, G. (1988). Balistik koruma için çelikler. *İsrail Teknoloji Dergisi*, 24, 319–326.
- [53] Reddy, G. M., Mohandas, T., & Papukutty, K. (1999). Yumuşak kaynakların balistik yeteneklerinin sert dolgu ile geliştirilmesi. *International Journal of Impact Engineering*, 22, 775–791. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(99\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00020-2)
- [54] Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, S. R. (2006). *Steels: Microstructure and properties* (3rd ed.). Butterworth-Heinemann.
- [55] Kirkaldy, J. S., Thompson, B. A., & Baganir, E. A. (1993). Properties and selection: Irons, steels and high-performance alloys. In *ASM Handbook* (Vol. 1, pp. 303–304).
- [56] Hanhold, B. J. (2012). Flaş işleme ile üretilen ileri yüksek mukavemetli çeliklerin kaynaklanabilirlik incelemeleri (Yüksek lisans tezi, Ohio Eyalet Üniversitesi).
- [57] Bassett, J. (1998). Yüksek sertlikteki zırh çeliğinin lazer kaynağı. *Bilim ve Teknoloji Kaynak Katıl.*, 3(5), 244–248. <https://doi.org/10.1179/stw.1998.3.5.24>
- [58] Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). John Wiley & Sons Inc.
- [59] Reddy, G. M., Mohandas, T., & Papukutty, K. K. (1998). Kaynak işleminin yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik kaynakların balistik performansı üzerindeki etkisi. *Journal of Materials Processing Technology*, 74, 27–35. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00245-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00245-8)
- [60] Atapek, Ş. H. (2011). Bor katkılı bir zırh çeliğinin fiziksel metalürjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve balistik performansının değerlendirilmesi (Doktora tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [61] Manganello, S. J., & Wilson, A. D. (1993). Direct quenching and its effects on high-strength armor plate. In R. Asfahani & G. Tither (Eds.), *Low Carbon Steels for the 90's*, International Symposium (pp. 235–241). The Minerals, Metals & Materials Society.
- [62] Karagöz, Ş., & Atapek, Ş. H. (2008). Çökelti sertleştirilmiş bir sac çeliğinde mikroyapı-kırılma karakteristiği ilişkisi. *Deformasyon Sac İşleme*.
- [63] Jones, W. K. C., & Alberly, P. J. (1977). Kaynak sırasında çeliklerde gerilme birikimi için bir model. *Metal Technology*.

- [64] Yue, X., Feng, X., & Lippold, J. C. (2013). Quantifying heat-affected zone hydrogen-induced cracking in high-strength naval steels. *Welding Journal*, 92(9), 265s–273s.
- [65] U.S. Military Specification. (2008). MIL-A-46100E: Armor plate, steel, wrought, high-hardness.
- [66] Lippold, J. C. (2014). *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons. ISBN: 9781118960332
- [67] Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., & Reddy, G. M. (2013). Sert dolgu sarf malzemelerinin Q&T çelik bağlantıların balistik performansı üzerindeki etkisi. *Defence Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2013.12.007>
- [68] Wright, T. W. (2002). *Adyabatik kayma bantlarının fiziği ve matematiği*. Cambridge University Press.
- [69] VPAM (2006). Balistik malzeme, yapı ve ürün testleri için genel esaslar. Kurşuna Dayanıklı Malzeme ve Yapılar için Test Laboratuvarları Birliği.
- [70] Bernetič, J., Kosec, G., Marčetič, M., Vuherer, T., Rimac, M., Burzić, Z., & Kosec, B. (n.d.). Development of new grade armour steel. 9th Scientific-Research Symposium.
- [71] ACRONI d.o.o. (2014, Mart 20). www.acroni.si
- [72] Bernetič, J., Kosec, G., & Kosec, B. (2013). Jeklo nove generacije PROTAC 500. *IRT 3000*, 8(3), 30–31. (Slovenian)
- [73] Demir, T., Ubeyli, M., & Yıldırım, R. O. (2008). Çeşitli alaşımların 7.62 mm zırh delici mermiye karşı balistik darbe davranışlarının incelenmesi. *Materials and Design*, 29(10), 2009–2016.
- [74] Wright, T. W. (2002). *Adyabatik kayma bantlarının fiziği ve matematiği*. Cambridge University Press.
- [75] Bai, Y., & Dodd, B. (1992). *Adyabatik kayma lokalizasyonu: Oluşumu, teorileri ve uygulamaları*. Pergamon Press.
- [76] Wright, T. W. (2002). *Adyabatik kayma bantlarının fiziği ve matematiği*. Cambridge University Press.
- [77] Kong, F. (2008). Quality evaluation for the digital radiography inspection based on imaging parameters. In 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China.

- [78] Anık, S., & Vural, M. (1996). Gazaltı ark kaynağı (TIG–MIG–MAG). İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları.
- [79] Kou, S. (2003). Welding metallurgy (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [80] Türker, M., & Tosun, M. (2017). Havacılık endüstrisinde kullanılan modern kaynak teknolojileri. X. Kaynak Teknolojisi Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı.
- [81] Hull, J., & John, V. (2015). Non-destructive testing. Macmillan International Higher Education.
- [82] Bär, L., Hüller, V., Kammel, C., Kathage, K., Schmidt, H., Zwätz, R., & Volz, M. (2014). Ausführung von Stahlbauten: Kommentare zu DIN EN 1090-1 und DIN EN 1090-2.
- [83] Kiesel, D. (2006). Radiography – Radioscopy ...a technology comparison. Asia-Pacific Conference on NDT, Auckland, New Zealand.
- [84] Durgutlu, A., Kahraman, N., & Gülenç, B. (2005). Bakır ve çelik levhaların örtülü elektrod ve TIG kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi ve arayüzey özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20(2).
- [85] Doruk, İ. (2005). Gıda sanayinde kullanılan paslanmaz çelikler ve bu çeliklere uygulanan kaynak yöntemleri. Pamukkale Üniversitesi Yayınları.
- [86] Weman, K. (2011). Welding processes handbook.
- [87] Yavuz, N., Özcan, R., & Polat, F. G. (2005). Tozaltı kaynak bağlantısının sonlu elemanlar yöntemi ile termal ve mekanik analizi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi.
- [88] Eryürek, İ. (2003). Gazaltı kaynağı. Eczacıbaşı-Lincoln Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret AŞ.
- [89] Kaplan, A. (1994). A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile. Journal of Physics D: Applied Physics.
- [90] Anık, S., & Tülbentçi, K. (1982). Kaynak Tekniği. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.
- [91] Tanaka, M., Tashiro, S., Satoh, T., Murphy, A., & Lowke, J. (2008). Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding. Science and Technology of Welding and Joining.

- [92] Wahba, M., Mizutani, M., & Katayama, S. (2015). Hybrid welding with fiber laser and CO₂ gas shielded arc. *Journal of Materials Processing Technology*.
- [93] Kah, P., Suoranta, R., & Martikainen, J. (2013). Advanced gas metal arc welding processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [94] Kuzmikova, L. (2013). An investigation of the weldability of high hardness armor steel (Doctoral dissertation, University of Wollongong). <https://ro.uow.edu.au/theses/3853>
- [95] Doğrugiden, M. Y. (2019). Farklı kaynak metotları ile birleştirilen zırh çeliklerinin kırılma tokluk değerlerinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [96] Cabrilo, A., & Geric, K. (2016). Weldability of high hardness armor steel. *Advanced Materials Research*, 1138, 79–84. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1138.79>
- [97] Gürol, U., Karahan, T., Erdöl, S., & diğerleri. (2022). Östenitik ve ferritik dolgu metalleri kullanılarak yapılan zırh çeliği kaynaklarının karakterizasyonu. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02464-7>
- [98] Sathish Kumar, K., & Arivazhagan, N. (2024). Zırh çeliği için yenilikçi bir darbeli akım ark kaynağı teknolojisi: süreçler, mikroyapı ve mekanik özellikler. *Materials Today: Communications*, 38, 108237. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108237>
- [99] Çelik, C., Göçmen, M., Çoban, O., & diğerleri. (2023). Yüksek mukavemetli balistik zırh çeliklerinin kaynaklanabilirliği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28, 1009–1028.
- [100] Son, H. J., Jeong, Y. C., Seo, B. W., & diğerleri. (2023). Darbeli gaz metal ark kaynağında yüksek sertlikteki zırhlı çeliğin kaynak kalitesi analizi. *Metals*, 13, 303. <https://doi.org/10.3390/met13020303>
- [101] Karagöz, Ş., & Atapek, H. (2007). Bor katkılı zırh çeliklerinin kırılma davranışı. In 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı (İstanbul, Türkiye).
- [102] U.S. Military Specification. (1990). MIL-A 46100D (MR): Armor plate, steel, wrought, high hardness.
- [103] U.S. Military Specification. (2000). MIL-A 12560H (MR): Armor plate, steel, wrought, homogenous (for use in combat vehicles and for ammunition testing).
- [104] Jena, P. K., Mishra, B., Rameshbabu, M., Babu, A., Singh, A. K., & Sivakumar, K. (2010). Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *International Journal of Impact Engineering*.

- [105] Welding and Welder. (2024, Şubat 27). Welding positions techniques, defects and safety consideration. <https://www.weldingandwelder.com/help-and-advice/welding-positions-techniques-defects-and-safety-consideration/>
- [106] D&H Sécheron. (2024, Haziran 10). Forehand vs. backhand welding techniques: Choosing the right method. <https://www.dnhsecheron.com/blogs/Forehand-vs.-Backhand-Welding>
- [107] Slideplayer. (2024, Nisan 27). <https://slideplayer.biz.tr/slide/14064572/>
- [108] Singh, R. (2012). Physical effect of heat on material during welding. In Applied Welding Engineering: Process, Codes and Standards (pp. 171–174).
- [109] Bhadeshia, H. K. D. H., & Honeycombe, R. (2006). Steels: Microstructure and properties (3rd ed.). Elsevier.
- [110] Weisman, G. (1981). Welding Handbook, Volume 1. American Society for Welding.
- [111] McGraw, H. (1958). Constitution of Binary Alloys (2nd ed.). New York, USA.
- [112] Şahin, N. (2003). X-ışını radyografi tekniğine ilişkin görüntü kalite değerlendirmesi (Yüksek lisans tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul).
- [113] Willcox, M., & Downes, G. (2003). A brief description of NDT techniques. Insight NDT Equipment Ltd, UK.
- [114] Şişman, F. Ç. (1992). Radyografik performans ve görüntü rezolüsyonu tayini (Yüksek lisans tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul).
- [115] Duman, M. (2000). Radyografi ile kaynak dikiş kontrolü (Yüksek lisans tezi, İTÜ Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul).
- [116] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2012). Training guidelines in non-destructive testing techniques: Leakage testing at Level 2 (Training Course Series 52). Vienna, Austria.
- [117] Valle, J. F. H. (2011). Pulsed-electromagnet EMAT for high temperature application (PhD Thesis, University of Warwick, Department of Physics, UK).
- [118] Hayes, C. (1997). The ABC's of nondestructive weld examination. American Welding Society, USA.
- [119] Quinn, R. A., & Sigl, C. C. (1980). Radiography in modern industry (4th ed.). Eastman Kodak Company.

[120] Kiesel, D. (2006). Radiography – Radioscopy: A technology comparison. Asia-Pacific Conference on NDT, 5–10 October, Auckland, New Zealand.

[121] Mango, S. A. (2011). Automated and quantitative method for quality assurance of digital radiography imaging systems. International Workshop on Digital Imaging.

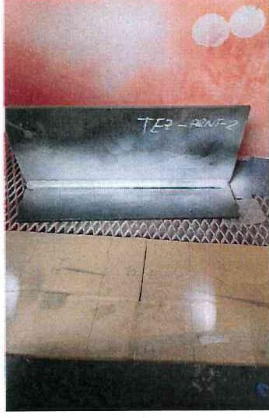


EKLER

EK-1 Görsel Muayene Raporu

AKINNDT TAHİRİATSİZ MUAYENE & KALİTE SERVİSLERİ		GÖRSEL MUAYENE RAPORU VISUAL TEST REPORT		TÜRKAK Muayene TS EN ISO 9712:1999 AT-0033-14				
Teklif Numarası Offer Nr	-	İş Emri Numarası Work Order Nr	-	Sayfa No Page Nr	1/1			
Müşteri Customer	-	İş - Parça Tanımı Job - Part Matter	TEZ ÇALIŞMASI	Rapor Tarihi Report Date	3.06.2025			
Proje No / Ad Project Nr/Name	TEZ ÇALIŞMASI	Resim No Drawing Nr	-	Test Tarihi Test Date	3.06.2025			
Test Yeri Test Location	AKIN NDT / İZMİR	Test Oranı Test Ratio	%100 Kaynak+ITAB 100% Weld+HAZ	Rapor No / Rev No Report Nr / Rev Nr	TEZ-VT-001			
Test Zamanı Test Time	Kaynakten Min 12 Saat Sonra Min 12 Hours After Welding	İmalat Tipi Manufacturing Type	Kaynak / Welding	Yüzey Durumu Surface Condition	Kaynatıldığı Gibi As Welded			
Isıl İşlem Durumu Heat Treat. Status	YOK N/A	Malzeme Tipi Material Type	Hardox Steel	Test Prosedürü Test Procedure	-			
Test Standardı Test Standard	EN ISO 17637	Değerlendirme Std Evaluation Std	EN ISO 5817	Değ Std Kabul Seviyesi Eval. Std Accept. Level	Level B			
Muayene Amacı Inspection Scope								
Muayene Tekniği Inspection Technique								
Uzaktan Kumanda Remote		☐	Kullanılan Cihaz / Ekipman Device or Equipment Used	Cihaz-Ek. Marka-Model-Seri No Device Brand-Model-SN				
Doğrudan Direct		☒	Kullanılan Cihaz / Ekipman Device or Equipment Used	Cihaz-Ek. Marka-Model-Seri No Device Brand-Model-SN				
Görünür Işık Şiddeti Visible Light Intensity		600 lx	Aydınlatma Ekipmanı Lighting Equipment	el feneri hand light	Bakış Açısı / Mesafesi Viewing Angle / Distance			
60° / 500 mm								
EN ISO 6520-1 e Göre Süreksizlik Tipi ve Kısaltmaları / Discontinuity Type and Abbreviations According EN ISO 6520-1								
100-Çatlak	100-Cracks	506-Binme/Tasma	506-Overlap					
104-Krater Çatlağı	104-Crater Crack	509-Çökme	509-Sagging					
2017-Yüzey Deligi	2017-Surface Pore	510-İçe Yanma	510-Burn Through					
2025-Uç Krater Oluşu	2025-End Crater pipe	511-Yetersiz Kaynak Dolgusu	511-Incompletely Filled Groove					
401-Ergime Noksanlığı	401-Lack of Fusion	512-Aşırı Kenar Eşitsizliği (Köşe K.)	512-Excessive Asymmetry of fillet weld					
4021-Kökte Nüfuziyetsizlik	4021-Incomplete Root Penetration	515-Kök İbükeyliği	515-Root Concavity					
5011-Sürekli Yanma Oluşu	5011-Continuous Undercut	516-Kök Gözeneliği	516-Root Porosity					
5012-Kesintili Yanma Oluşu	5012-Intermittent Undercut	517-Kötü Başlama/Bitiş	517-Poor Restart					
5013-Çekme Oluşu	5013-Shrinkage Groove	5213-Yetersiz (Boğaz) kalınlığı	5213-Insufficient throat thickness					
502-Aşırı Kaynak Metali (Alın)	502-Excess Weld Metal (Butt weld)	5214-Aşırı (Boğaz) kalınlığı	5214-Excessive Throat Thickness					
503-Aşırı Düş Bükümlük (Köşe)	503-Excessive convexity (Fillet Weld)	601-Rastgele Ark	601-Stray Arc					
504-Aşırı Nüfuziyet	504-Excess Penetration	602-Sıçranta	602-Spatter					
505-Yanlış Kaynak Kenarı	505-Incorrect weld toe							
TEST SONUÇLARI / TEST RESULT								
Item No	Parça Tanımı Part Designation	Parça No Part Nr	Parça Boyutu (Uzunluk / Çap) Part Dimension (Length / Dia.) (mm)	Kalınlık Thickness (mm)	Belirti Tipi Type of Indication	Belirti Boyutu Size of Indication	Belirti Konumu Location of Indication	Sonuç Result Kabul/Accept Ret/Reject
1	TEZ-PRNT-001	1	300	5,5	-	-	-	KABUL ACCEPT
2	TEZ-PRNT-002	1	300	5,5	512	300	0-300	RET REJECT
3	TEZ-PRNT-003	1	300	5,5	-	-	-	KABUL ACCEPT
4	TEZ-PRNT-004	1	300	5,5	-	-	-	KABUL ACCEPT
5	TEZ-PRNT-005	1	300	5,5	512	300	0-300	RET REJECT
6								
7								
8								
9								
10								
Açıklamalar / Remarks								

EK-2 Radyografik Test Rapo

 AKIN NDT TAHRİBATSIZ MUAYENE & KALİTE SERVİSLERİ		MANYETİK PARÇACIK TEST RAPORU (KAYNAK) MAGNETIC PARTICLE TEST REPORT (WELD)		 TÜRKAK Muayene YS EN ISO 9001:2015 AB-0633-M	
Teklif Numarası Offer Nr	-	İş Emri Numarası Work Order Nr	-	Sayfa No Page Nr	2/2
Müşteri Customer	-	İş - Parça Tanımı Job - Part Matter	TEZ ÇALIŞMASI	Rapor Tarihi Report Date	3.06.2025
Proje No / Ad Project Nr/Name	TEZ ÇALIŞMASI	Resim No Drawing Nr	-	Test Tarihi Test Date	3.06.2025
Test Yeri Test Location	AKIN NDT / İZMİR	Test Oranı Test Ratio	100%	Rapor No / Rev No Report Nr / Rev Nr	TEZ-MT-001
RESİMLER / PHOTOS					
    					
Açıklamalar / Remarks					

AKIN

NDT

TAHMİNİSİZ MÜAYENE & KALİTE SERVİSLERİ

MANYETİK PARÇACIK

TEST RAPORU (KAYNAK)

MAGNETIC PARTICLE TEST REPORT (WELD)

TÜRKAK

AKIN

NDT

AKIN

NDT

AKIN

NDT

Teklif Numarası Offer Nr		İş Emri Numarası Work Order Nr		Sayfa No Page Nr	
Müşteri Customer		İş - Parça Tanımı Job - Part Matter		Rapor Tarihi Report Date	
Proje No / Ad Project Nr/Name		Resim No Drawing Nr		Test Tarihi Test Date	
Test Yeri Test Location		Test Oranı Test Ratio		Rapor No / Rev No Report Nr / Rev Nr	
		100%		1/2	
TEZ ÇALIŞMASI				3.06.2025	
AKIN NDT / İZMİR				3.06.2025	
				TEZ-MT-001	

Test Zamanı Test Time	Kaynaktan min 12 saat sonra Minimum 12 hours after welding	Test Kapsamı Test Scope	Kaynak + ITAB Weld + HAZ	Kaynak Yöntemi Welding Process	111,135
Isıl İşlem Durumu Heat Treat. Status	YOK N/A	Malzeme Tipi Material Type	HARDOX STEEL	Kaynak Birleşim Tipi Weld Joint Type	Köşe Kaynağı / Alın Kaynağı Fillet Weld / Butt Weld
Yüzey Sıcaklığı Surface Temperature	°C	Yüzey Durumu Surface Condition	Kaynatıldığı Gibi As Welded	Test Prosedürü Test Procedure	-
Test standardı Test Standard	EN ISO 17638	Değerlendirme Std Evaluation Std	EN ISO 23278	Değ Std Kabul Seviyesi Eval. Std Accept. Level	Level 2x

Test Cihazı Tipi Type of Test Device	Manyetik Boyunduruk Magnetic Yoke	Cihaz Marka / Kod / Seri No Device Brand / Code / SN	Manyetikleştirme Tekniği Magnetization Technique	Doğrudan Miknatıslama Directly Magnetizing
Doğrulama / Blok No Verification / Block Nr	Yapıldı / 4,5 kg AKN-23 kaldırma bloğu Done / 4,5 kg AKN-23 lifting block	Min. ve Maks. Kutup Mesafesi Min. and Maks. Pole Distances	(100-250) mm	Manyetik Akım Tipi Magnetic Current Type
Manyetik Alan Şiddeti Magnetic Field Strength	3,5 ka/m	Man Alan Şiddeti Ölçüm Cihazı Mag. Field Strength Meas. Device	AKN-035 / HUATEC JCZ-50 / SN:71512	AC

İnceleme Şartları Viewing Conditions	Görünür Işık Visible Light	☒	Görünür Işık Şiddeti Visible Light Intensity	550 Lux	Gör. Işık Sd. Ölç. Cihazı Lux-meter
	Ultraviyole Işık UV-A	☐	Ultraviyole Işık Şiddeti UV-A Irradiance	w/m ²	UV-A Işık Ölçüm Cihazı UV-A Radiometer

Tespit Ortamı Detection Media	Yağ Dye	☒	Görünür Işık Visible Light	☐	Manyetik Partikül Magnetic Particle	Marka / Brand MR	Model / Model 765	Parti No / Batch No
	Kuru Dry	☐	Fluoresan Fluorescent	☐	Fon Boyası Contrast Paint	Marka / Brand MR	Model / Model 72	Parti No / Batch No

Miknatıslık Giderme Demagnetization	Yapıldı / El Magneti ile Done / with Using Handyoke	Maks. Kalıntı Alan Max. Residual Field	0,4 ka/m	Son Temizlik Final Cleaning	Yapıldı Done
--	--	---	----------	--------------------------------	-----------------

TEST SONUÇLARI / TEST RESULT

Item No	Kaynak Tanımı Weld Designation	Kaynak No Weld No	Kaynak Boyu Weld Length (mm)	Kalınlık Thickness (mm)	Belirti Tipi Type of Indication	Belirti Uzunluğu Length of Indication	Belirti Konumu Location of Indication	Sonuç Result Kabul/Accept Ret/Reject
1	SMAW+GMAW(Automatic) TEZ-PRNT-001	-	-	-	-	-	-	KABUL ACCEPT
2	SMAW+GMAW(Automatic) TEZ-PRNT-002	-	-	-	-	-	-	KABUL ACCEPT
3	GTAW+GMAW(Automatic) TEZ-PRNT-003	-	-	-	-	-	-	KABUL ACCEPT
4	SMAW+GMAW(Automatic) TEZ-PRNT-004	-	-	-	-	-	-	KABUL ACCEPT
5	SMAW+GMAW(Automatic) TEZ-PRNT-005	-	-	-	-	-	-	KABUL ACCEPT
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								

Açıklamalar / Remarks

EK-4 Manyetik Parçacık Test Raporu

HD-F / HD-FL FİBER LAZER

	3015	4020	6020	8020	12020	
X Eksen	3060	4100	6150	8200	12200	mm
Y Eksen	1530	2100	2100	2100	2100	mm
Z Eksen	160	185	185	185	185	mm
Maks. Sac Ölçüsü	3048 x 1524	4064x2032	6096x2032	8128x2032	12192x2032	mm
Maks. Sac Ağırlığı	315	315	315	315	315	Kg/m²

	Krenayer HD-F	Lineer Sistem HD-FL 3015	
X Eksen	120	160	m/dak.
Y Eksen	120	160	m/dak.
Senkronizasyon	170	226	m/dak.
İvmelenme	28	35	m/s²
Pozisyonlama Hassasiyeti	±0,05	±0,03	mm
Tekrarlanabilirlik	±0,05	±0,03	mm

EK-5 Flaymarker özellikleri

Markalama alanı (x / y)	65 x 30 mm
Mevcut karakter yükseklikleri	1,0 ila 29,9 mm
Yazı tipleri	Orta aralıklı harfler, tek nokta karakterlerinde DIN 1451'e benzer (boyut 5 x 7 veya 9 x 13)
İşaretleme piminin tahriki	Elektromanyetik
Mevcut karakterler	0-9 sayıları, büyük harfler / küçük harfler A - Z; a-z çeşitli noktalama işaretleri. , / vb.
Arayüz	USB-A, USB-B, Ethernet
Yükseklik toleransı telafisi	Maks. 5 mm (düz olmayan yüzeylerde de sabit markalama derinliği)
Ağırlık	2,4 kg dahil. pil
Pil kapasitesi	2,0 Ah 18V (Lityum-İyon) / 5,2 Ah 18V (isteğe bağlı)
Markalama kuvveti	30 olası kuvvet ayarı (tüm akü çalışma süresi boyunca sabit darbe performansı)

EK-6 Kaynak ağızı açılan spiralin teknik verileri

Giriş gücü	750 W
Taşılama disk çapı	115 mm
Rölanti devir sayısı	12.000 dev/dak
Alet ölçüleri(U x G x Y)	268 x 72 x 102 mm
Ağırlık	1.8 kg
Boştaki devir sayısı, den	12.000 dev/dak



EK-7 Spral makinesinin görseli bosch-spiral-avuc-ici-taslama- makinasi-sipral-avuc-taslama-750-watt-115-mm-115-mm-metal-kesme-diski-pm-HBC00004AR4B0



EK-8 Protac 500 kaynağında kullanılan dolgu metali



EK-9 Malzemenin kaynak edilebilirliğine bakmaktadır.

Kaynak Akımı	DC+
Yayılabilir Hidrojen	< 5.0 ml/100g
Alaşım Tipi	Low alloyed (9 % Cr, 1 % Mo + Ni / V / Nb)
Kaplama Türü	Basic covering



EK-10 Kaynak çubuğunun Çekme mukavemeti

Tipik Çekme Özellikleri			
Koşul	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama
ISO			
PWHT 2 hour(s) 755 °C	720 MPa	820 MPa	21 %

EK-11 ER309L Kaynak Çubuğu Teknik Veri Sayfası

	Değer / Açıklama
Ürün Adı	ER309L Paslanmaz Kaynak Teli
Ticari Sınıf	Austenitik Paslanmaz Çelik Dolgu Teli
Standardı	AWS A5.9 / ASME SFA 5.9
Kimyasal Bileşim (% ağırlıkça)	C: ≤ 0.03 Cr: 22.0 – 24.0 Ni: 12.0 – 14.0 Mn: ≤ 2.0 Si: ≤ 0.90 Fe: Denge
Çekme Dayanımı (MPa)	≥ 550 MPa
Akma Dayanımı (MPa)	≥ 350 MPa
Uzama (%)	$\geq 30\%$
Yoğunluk	Yaklaşık 7.9 g/cm ³
Çalışma Pozisyonları	Tüm pozisyonlar (1G, 2G, 3G, 4G vb.)
Kaynak Akımı	DCEN (Doğru Akım, Elektrot Eksi) – TIG / MIG işlemlerinde
Önerilen Kaynak Yöntemleri	TIG (GTAW), MIG (GMAW), SAW (Toz Altı Kaynağı – uygun tel ile)
Korozyon Direnci	Yüksek – özellikle taneler arası korozyona karşı
Sıcaklık Dayanımı	850°C'ye kadar yüksek sıcaklıkta yapısal kararlılık sağlar
Uygulama Alanları	Karbonlu çelik + paslanmaz çelik birleşimleri Kimyasal ekipmanlar Fırın parçaları Petrokimya tesisleri
Ambalaj Şekli	1kg – 15kg makaralı tel, 1m – 1.5m çubuk hal

EK-12 Deney Raporu

 ULUTEM Gaziantep Üniversitesi Uludağ Bey Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi	GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ ULUĞ BEY YÜKSEK TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ Üniversite Bulvarı 27310 Şehitkamil - Gaziantep, TÜRKİYE	
		T25-0913
		28.07.2025
	DENEY RAPORU <i>TEST REPORT</i>	



Resim 1. Analiz için getirilen numune

Merkezimize getirilen kaynaklı malzeme numunesine ait görsel, Resim 1 de gösterilmiştir. Bu numuneye çekme, 3 nokta eğme ve sertlik analizleri yapılmış olup, bu analizlere ait sonuçlar aşağıdaki tablolarda belirtilmiştir.

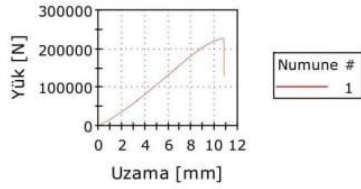
EK-13 Deney Raporu

 ULUTEM Gaziantep Üniversitesi Uluğ Bey Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi	GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ ULUĞ BEY YÜKSEK TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ Üniversite Bulvarı 27310 Şehitkamil - Gaziantep, TÜRKİYE	
		T25-0913
		28.07.2025
	DENEY RAPORU <i>TEST REPORT</i>	

24.07.2025 15:10:59

Grafik 1

Kaynaklı Malzeme Çekme Testi



Sonuç tablosu 1

	Çekme gerilmeside Maksimum Yük [MPa]	Çekme gerinimi (Uzama)de Maksimum Yük [mm/mm]	Çekme gerinimi (Uzama)de Akma (Sıfır eğim) [mm/mm]
1	1,261.65979	0.06272	0.06272
	Çekme gerilmeside Akma (Sıfır eğim) [MPa]	Çekme gerilmeside Kırılma (Standart) [MPa]	Çekme gerinimi (Uzama)de Kırılma (Standart) [mm/mm]
1	1,261.65979	1,248.14661	0.06319

Tablo 1. Çekme Analiz Sonucu

Tablo 1 de görüldüğü üzere, kaynaklı malzemeye çekme işlemi uygulanmış ve yukarıdaki parametreler elde edilmiştir. Malzeme, kaynaklı bölgeden kopmuştur.

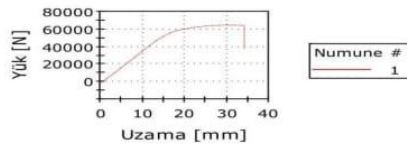
EK-14 Deney Raporu

 ULUTEM Gaziantep Üniversitesi Uludağ Bey Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi	GAZİANTEP ÜNİVERSİTESİ ULUĞ BEY YÜKSEK TEKNOLOJİ UYGULAMA VE ARAŞTIRMA MERKEZİ Üniversite Bulvarı 27310 Şehitkamil - Gaziantep, TÜRKİYE	
		T25-0913
		28.07.2025
	DENEY RAPORU <i>TEST REPORT</i>	

24.07.2025 11:43:49

Grafik 1

Kaynaklı Malzeme 3 Nokta Eğme Testi



Sonuç tablosu 1

	Eğme gerilmeside Akma (Sıfır eğim) [MPa]	Eğme gerinimi (Uzama)de Akma (Sıfır eğim) [mm/mm]	Eğme uzamasıde Akma (Sıfır eğim) [mm]
1	2,600.63135	0.01782	30.94358
	Eğme gerilmeside Maksimum Yük [MPa]	Eğme gerinimi (Uzama)de Maksimum Yük [mm/mm]	Eğme uzamasıde Maksimum Yük [mm]
1	2,600.63135	0.01782	30.94358
	Eğme gerilmeside Kırılma (Standart) [MPa]	Eğme gerinimi (Uzama)de Kırılma (Standart) [mm/mm]	Eğme uzamasıde Kırılma (Standart) [mm]
1	2,576.60107	0.01961	34.04328

Tablo 2. 3 Nokta Eğme Analiz Sonucu

Tablo 2 de görüldüğü üzere, kaynaklı malzemeye 3 nokta eğme işlemi uygulanmış ve yukarıdaki parametreler elde edilmiştir.

Kaynaklı malzeme numunesinde, kaynaklı bölgeye 3 farklı bölgeden Brinell sertlik ölçümü yapılmış olup, bu ölçümlerin ortalaması 128,4 HRB olarak tespit edilmiştir.