

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ

MİG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN
ALÜMİNYUM 7039 ALAŞIMININ MEKANİK VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

Salih KÜÇÜKKATIRCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harp Silah ve Araçları Ana Bilim Dalı
Harp Silah ve Araçları Programı

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Serdar SALMAN

Şubat 2025

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ

MIG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN
ALÜMİNYUM 7039 ALAŞIMININ MEKANİK VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

Salih KÜÇÜKKATIRCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harp Silah ve Araçları Ana Bilim Dalı
Harp Silah ve Araçları Programı

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Serdar SALMAN

Şubat 2025

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ VE MİLLÎ GÜVENLİK
ENSTİTÜSÜ

MİG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEN
ALÜMİNYUM 7039 ALAŞIMININ MEKANİK VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

Salih KÜÇÜKKATIRCI tarafından hazırlanan tez çalışması 10.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Millî Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Harp Silah ve Araçları Ana Bilim Dalı, Harp Silah ve Araçları Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Serdar SALMAN
Millî Savunma Üniversitesi
Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serdar SALMAN, Tez Danışmanı

Millî Savunma Üniversitesi

Prof. Dr. Ferhat GÜL, Üye

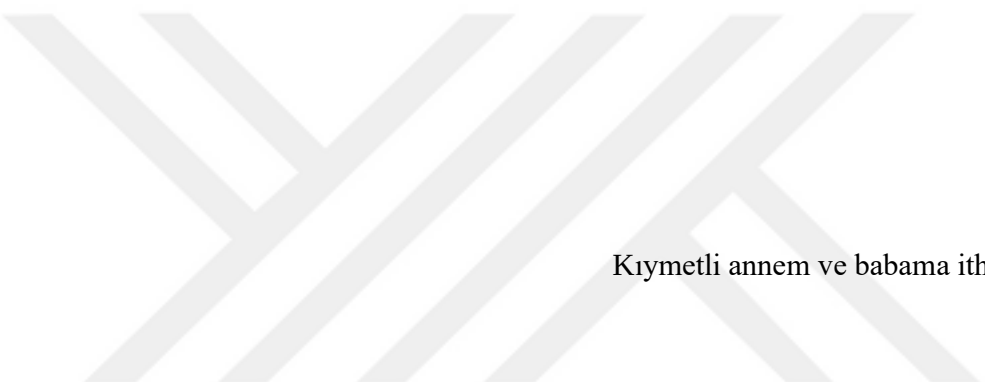
Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Ayhan AYTAÇ, Üye

Millî Savunma Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Serdar SALMAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Alüminyum 7039 Alaşımının Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Tespiti” başlıklı çalışmada veri toplama ve kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Salih KÜÇÜKKATIRCI



Kıymetli annem ve babama ithafen...

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında bana yol gösteren, bilgi ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam, Sayın Prof. Dr. Serdar SALMAN'a öncelikli olarak en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans süreci boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ'a, tez aşaması deneysel süreçte desteklerini sunan Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü'nün değerli öğretim görevlilerine ve Doç. Dr. Öğ. Alb. Ayhan AYTAÇ ile Müh. Ütgm. Yunus Emre KARAKOCA'ya, Prof. Dr. Ferhat GÜL'e, 22 Mart 2021 tarihinde göreve başladığım günden beri bir parçası olmaktan büyük bir gurur ve mutluluk duyduğum, bana çok büyük motivasyon sağlayan Savunma Sanayii Başkanlığı'ndan sayın başkanlarım ve amirlerime, Bilal KARAOĞLU ve Cengizhan BAHAR'a, tez çalışmalarımı destekleyen çalışma arkadaşlarıma, tecrübelerini benimle paylaşan Muammer GÜLCAN, Musa Talha İZGİ ve Serhat KISA'ya, Emekli Albay Serhan ÖZKAN'a, Emekli Yarbay Taner ALİKOÇ'a, balistik testlerin gerçekleştirilmesi konusunda Balistik Test Laboratuvarı altyapısından faydalanma imkanı sunan, kaynak işlemlerinde ve malzeme tedariki konusunda destek sağlayan FNSS Firmasına ve Sayın Murat GÜRLEYİK ile Ali Rıza PİŞKİN'e ve Cüneyt TUZLACIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının, Ülkemizin parladığı alanların başında gelen Savunma Sanayiimiz için yapılan çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederken, son olarak bugüne kadar her zaman desteklerini, benimle beraberliklerini, bana olan inançlarını ve güvenlerini hissettiğim çok kıymetli annem ve babama hem tez çalışmam sürecindeki ilgi ve destekleri hem de bugünlere kadar bana olan katkıları için minnettarlığımı belirterek teşekkür ederim.

Salih KÜÇÜKKATIRCI

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER	4
2.1.Zırhlı Araçlar.....	4
2.2.Zırhlı Araçların Geliştirilmesi.....	4
2.3.Zırh Çeşitleri.....	5
2.3.1.Pasif Zırh Sistemleri.....	5
2.3.2.Monoblok Zırhlar.....	5
2.3.3.Kafes Zırhlar.....	6
2.3.4.Boşluklu Zırhlar.....	7
2.3.5.Delikli Zırhlar.....	7
2.3.6.Kompozit Zırhlar.....	8
2.3.7.Reaktif Zırhlar.....	9
2.3.8.Seramik Zırhlar.....	11
2.4. Alüminyum Haricinde Kullanılan Zırh Malzemeleri.....	12
2.4.1. Çelik Zırhlar.....	13
2.4.1.1. Dövme Zırh Çelikleri.....	13
2.4.1.2. Döküm Zırh Çelikleri.....	15
2.4.1.3. Değişken Sertlikte Zırh Çelikleri.....	15
2.4.1.4. Perfore Zırh Çelikleri.....	15
2.5.Alüminyum ve Alaşımları.....	17
2.5.1.Alüminyumun Önemi.....	17
2.5.2.Alüminyum Metalinin Genel Özellikleri.....	18

2.5.3. Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	19
2.5.4. Alüminyum Alaşım Serileri.....	21
2.5.5. Kaynak İşlemi ve Alüminyum Alaşımlarının.....	27
Kaynak Edilmesinde Kullanılan Yöntemler	
2.5.5.1. Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Ark Kaynağı.....	28
2.5.5.2. Alüminyum Alaşımlarının Oksi Asetilen Kaynağı.....	28
2.5.5.3. Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağı.....	29
2.5.5.4. Alüminyum Alaşımlarının Direnç Kaynağı.....	30
2.5.5.5. Alüminyum Alaşımlarının Işın Kaynakları ile Kaynağı.....	31
2.5.5.6. Alüminyum Alaşımlarının Katı Hal Kaynak Yöntemleri ile Kaynağı...	31
2.5.5.7. Alüminyum Alaşımların MIG Kaynak Yöntemi ile Kaynağı.....	31
2.5.6. Kaynak Kusurları.....	34
2.5.6.1. Dikişlerde Gözeneklilik.....	35
2.5.6.2. Nüfuziyet Azlığı.....	37
2.5.6.3. Yanma Olukları.....	37
2.5.6.4. Cüruf Kalıntıları.....	38
2.5.6.5. Kaynak Çatlakları.....	39
2.5.6.6. Sıçramalar.....	39
2.5.6.7. Çarpılma (Distorsiyon) Hatası.....	39
2.5.7. Ark karakteristikleri.....	40
2.6. Balistik.....	41
2.6.1. Balistiğin Tanımı ve Tarihçesi.....	42
2.6.2. İç Balistik.....	44
2.6.3. Dış Balistik.....	46
2.6.4. Hedef Balistiği.....	46
2.6.5. Patlayıcı Maddeler.....	47
2.6.6. Hedefte Hasar Oluşturma.....	48
3. LİTERATÜR TARAMASI VE DEĞERLENDİRMESİ	50
3.1. Yapılan Çalışmalarda Kazanılmış Deneyimler ve Öğrenimler.....	50
3.2. Literatür Değerlendirmesi.....	52
4. MATERYAL VE METOT	53
4.1. Materyal.....	53
4.1.1. Ana Malzeme.....	53
4.1.2. Tel Elektrot ve Koruyucu Gaz.....	54

4.1.3.Zırh Delici Mermi.....	55
4.1.4.Balistik Test Düzeneği.....	56
4.2.Metot.....	57
4.2.1.Parçaların Kaynak Edilmesi.....	57
4.2.2.Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	60
4.2.2.1.Numune Seçimi.....	60
4.2.2.2.Numune Alma.....	61
4.2.2.3.Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması.....	62
4.2.2.4.Eğme Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	63
4.2.2.5.Sertlik Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	63
4.2.2.6.Balistik Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	63
4.2.3.Deneyler.....	63
4.2.3.1.Tahribatsız Deneyler.....	64
4.2.3.2. Tahribatlı Deneyler.....	64
4.2.3.3. Çekme Deneyi.....	65
4.2.3.4. Eğme Deneyi.....	66
4.2.3.5. Sertlik Deneyi.....	68
4.2.3.6. Balistik Deneyi.....	69
4.2.4.Atılan Kurşunun Hedefe Ulaşana Kadar Geçirdiği Süreç.....	69
4.2.5.Mermi Çekirdeğinin Zırh Levhasına Çarpma Hızı.....	69
4.2.6.V ₅₀ Hız Limitinin Hesabı.....	70
5.DENEY SONUÇLARI	71
5.1.Çekme Deney Sonuçları.....	71
5.2.Eğme Deneyi Sonuçları.....	79
5.3.Sertlik Deneyi Sonuçları.....	82
5.4. Makroyapı ve Mikroyapı Sonuçları.....	84
5.4.1. Makroyapı Sonuçları.....	85
5.4.2. Mikroyapı Sonuçları.....	87
5.5.Balistik Deney Sonuçları.....	93
5.5.1.MIG Kaynak Öncesi Yapılan Atışlar ve V ₅₀ Hız Değerinin Hesabı.....	93
5.5.2. MIG Kaynak Sonrası Yapılan Atışlar ve V ₅₀ Hız Değerinin Hesabı.....	95
5.5.2.1.Kaynak Bölgesine Yapılan Atışlar.....	95
5.5.2.2.Geçiş Bölgesine Yapılan Atışlar.....	98
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	101

KAYNAKÇA	105
ÖZGEÇMİŞ	111



SİMGE LİSTESİ

V_{50}	Balistik Hız Sınırı,
Al	Alüminyum,
Al 7039	Alüminyum 7039,
Em	Kütle Verimliliği,
kg/m^2	Alansal Yoğunluk,
η	Balistik Verim,
α	Isıl Genleşme Katsayısı,
σ	Normal Gerilme,
ε	Birim Uzama,
E	Elastisite Modülü,
M_e	Eğilme Momenti,
HV	Vickers Sertliği

KISALTMA LİSTESİ

E	Kinetik Enerji,
RHA	Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği (Rolled Homogeneous Armour),
HHA	Yüksek Sertlikte Zırh Çeliği (High Hardness Armour Steel),
BHN	Brinell Sertlik Sayısı (Brinell Hardness Number),
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge,
IEB	Isıdan Etkilenen Bölge,
HRC	Rockwell Sertlik Ölçü Birimi,
ERA	Patlayıcı Reaktif Zırh (Explosive Reactive Armour),
NERA	Patlayıcı İçermeyen Reaktif Zırh (Non - Explosive Reactive Armour),
SLERA	Sınırlı Patlayıcılı Reaktif Zırh (Self-Limiting Explosive Reactive Armour),
AP	Zırh Delici (Armour Piercing),
CE	Çelikler İçin Eşdeğer Karbon Miktarı,
Add-On Zırh	Hafif Zırh,
NATO	Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü,
N	Newton,
MPa	Megapaskal,
GPa	Gigapaskal,
mm	Milimetre,
mm ²	Milimetrekare,
m/s	Metre bölü saniye,
mm/dk	Milimetre bölü dakika,
mBar	Milibar,
kgf mm	Kilogram-kuvvet milimetre.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Eski çağlarda kullanılmış olan bronz bir zırh.....	1
Şekil 1.2 Yüzergezer özellikte zırhlı askeri araç.....	3
Şekil 2.1 Jagdtiger (S/N 305020) tankı.....	6
Şekil 2.2 Roketsan esnek katmanlı kafes zırh.....	7
Şekil 2.3 Boşluklu zırhların çalışma mantığı.....	7
Şekil 2.4 Delikli zırh.....	8
Şekil 2.5 +3 Nesil muhabere tankı Altay.....	9
Şekil 2.6 Altay Tankı kompozit zırhı.....	10
Şekil 2.7 Altay Tankı.....	11
Şekil 2.8 Alüminyumlarda oksii-asetilen kaynağı.....	29
Şekil 2.9 TIG kaynağının uygulanması.....	30
Şekil 2.10 MIG kaynak yönteminin şekilsel gösterimi.....	33
Şekil 2.11 MIG, Argon gazı ve %75 He-%25 Ar.....	33
Şekil 2.12 Kaynak işleminde meydana gelen gözenek oluşumu kusuru.....	35
Şekil 2.13 Kaynak işleminde nüfuziyet azlığı kusuru.....	37
Şekil 2.14 Kaynak işleminde yanma olukları kusuru.....	38
Şekil 2.15 Kaynak işleminde oluşan cüruf kalıntıları kusuru.....	39
Şekil 2.16 Kaynak işlemi sırasında oluşan kaynak çatlağı kusuru.....	39
Şekil 2.17 Kısırtma etkisinin gösterilmesi.....	41
Şekil 2.18 Kaynak metali intikal karakteristikleri.....	41
Şekil 2.19 Alüminyum MIG elektrotlarının yanma eğrileri.....	41
Şekil 2.20 Ateşleme yapıldıktan sonraki zamanla basınç değişimi.....	45
Şekil 2.21 Yiv-set yapısı.....	46
Şekil 2.22 Mermi tasarımları.....	46
Şekil 2.23 Balistik darbe etkisi altında oluşan hasar.....	47
Şekil 2.24 Delme gücünün vuruş açısına bağlı olarak değişimi.....	49
Şekil 4.1 ER 5356 tel elektrot.....	54
Şekil 4.2 Deneylerde kullanılan zırh delici mermi.....	55
Şekil 4.3 M14 tüfek.....	56
Şekil 4.4 M60 makineli tüfek.....	56
Şekil 4.5 Heckler&Koch G3.....	56
Şekil 4.6 Balistik deney düzeneği.....	57

Şekil 4.7 Mekanik deneylerde kullanılan levhanın birleşim taslağı.....	58
Şekil 4.8 Mekanik deneylerde kullanılan levhanın kaynak detayı.....	58
Şekil 4.9 Kaynak işlemi esnası görüntü.....	58
Şekil 4.10 Voltaj, Amper ve kaynak hızı verileri.....	59
Şekil 4.11 38 mm kalınlıktaki levhanın birleşim taslağı.....	59
Şekil 4.12 Balistik deneyde kullanılan parçanın paso kaynak sırası.....	60
Şekil 4.13 Çekme deneyi makinesi ve numunelerin.....	65
deney esnasında aldığı şekiller	
Şekil 4.14 Çekme deneyi birim uzama grafiği.....	66
Şekil 4.15 Eğme deneyinin yapılışı.....	68
Şekil 5.1 Deney cihazı.....	72
Şekil 5.2 Numunelerin teknik görseli.....	72
Şekil 5.3 4 No’lu kaynaklı çekme deneyi numunesinin deney sonrası görüntüsü.....	75
Şekil 5.4 1 No’lu numunenin çekme deneyi grafiği.....	76
Şekil 5.5 2 No’lu numunenin çekme deneyi grafiği.....	76
Şekil 5.6 3 No’lu numunenin çekme deneyi grafiği.....	77
Şekil 5.7 4 No’lu numunenin çekme deneyi grafiği.....	77
Şekil 5.8 5 No’lu çekme deneyi grafiği.....	78
Şekil 5.9 6 No’lu numunenin çekme deneyi grafiği.....	78
Şekil 5.10 Eğme deneyi esnası görüntüsü.....	80
Şekil 5.11 1 Numaralı kaynaklı numunenin eğme deneyi sonrası görüntüsü.....	82
Şekil 5.12 4 Numaralı kaynaksız numunenin eğme deneyi sonrası görüntüsü.....	82
Şekil 5.13 Sertlik deneyi grafiği.....	83
Şekil 5.14 Nikon markalı Clemex modeli mikroskop.....	84
Şekil 5.15 Al 7039 levha görünümü	85
Şekil 5.16 Al 7039 Alaşımının makroyapı görüntüsü (x10)	86
Şekil 5.17 Al 7039 Alaşımının makroyapı görüntüsü (x10)	86
Şekil 5.18 Ana metalin mikroyapı görüntüsü (x100)	87
Şekil 5.19 Ana metalin mikroyapı görüntüsü (x200)	88
Şekil 5.20 Ana metalin mikroyapı görüntüsü (x400)	88
Şekil 5.21 Kaynak geçiş bölgesi mikroyapı görüntüsü (x100)	89
Şekil 5.22 Kaynak geçiş bölgesi mikroyapı görüntüsü (x200)	90
Şekil 5.23 Kaynak geçiş bölgesi mikroyapı görüntüsü (x400)	90
Şekil 5.24 Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (x100)	91
Şekil 5.25 Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (x200)	92

Şekil 5.26 Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (x400)	92
Şekil 5.27 Balistik deney sonrası levhanın ön yüzey görüntüsü.....	94
Şekil 5.28 Balistik deney sonrası şahit plaka görüntüsü.....	95
Şekil 5.29 Kaynak bölgesi atışlarında kullanılan levhanın ön yüzey görüntüsü.....	97
Şekil 5.30 Kaynak bölgesi atışlarında kullanılan levhanın arka yüzey görüntüsü.....	97
Şekil 5.31 Balistik deneyler sonrası kaynaklı levhanın ön yüzey görünümü.....	99
Şekil 5.32 Balistik deneyler sonrası levhanın şahit plaka görünümü.....	100



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Zırh yapılarında kullanılan seramikler ve zırh çeliğinin özellikleri.....	12
Tablo 2.2 RHA Çeliklerinin kimyasal bileşimi.....	14
Tablo 2.3 Bazı zırh kalınlık, alansal yoğunluk, kütle verimliliği ile tanımlayıcı.....	17
konfigürasyonları	
Tablo 2.4 Temel alüminyum alaşımlarının gösterilişi.....	24
Tablo 2.5 Isıl işlem görmeyen alüminyum temper tanımlamaları.....	27
Tablo 2.6 Kaynakta gözenek kusuru nedenleri ve önleme yolları.....	36
Tablo 4.1 Alüminyum 7039 alaşımının kimyasal bileşimi.....	53
Tablo 4.2 İlave metalin kimyasal bileşimi.....	54
Tablo 4.3 APM2 NATO mermi parametreleri.....	55
Tablo 4.4 Pasolar arası kaynak yöntem parametreleri.....	59
Tablo 4.5 Balistik deneylerde kullanılan levha özellikleri.....	63
Tablo 4.6 MIL-DTL-7039 Al zırh plakasının V_{50} balistik özellikleri.....	69
Tablo 5.1 Çekme deneyinden elde edilen veriler.....	73
Tablo 5.2 MIL-DTL-7039 Al zırh plakasının mekanik özellikleri.....	74
Tablo 5.3 Eğme deneyinden elde edilen veriler.....	80
Tablo 5.4 Sertlik deneyi sonuçları.....	83
Tablo 5.5 MIG kaynak öncesi levhanın balistik deney sonuçları.....	94
Tablo 5.6 Kaynak bölgesi balistik deney sonuçları.....	96
Tablo 5.7 Kaynak geçiş bölgesi balistik deney sonuçları.....	99

MIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Alüminyum 7039 Alaşımının Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Tespiti

Salih KÜÇÜKKATIRCI

Harp Silah ve Araçları Ana Bilim Dalı

Harp Silah ve Araçları Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar SALMAN

Bu çalışmada amfibi özellikteki muhabere araçlarında kullanımı uygun malzemelerden biri olduğu değerlendirilen Alüminyum 7039'un mekanik ve balistik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerin tespiti için 2 ve 2,5 mm kalınlığında levha kullanılmış olup kaynak öncesi ve sonrası çekme ve eğme testlerine tabi tutularak bulunan sonuçlar mukayese edilmiştir. Balistik özelliklerin incelenmesinde 38 mm kalınlığında levha kullanılarak kaynak öncesi ve sonrası zırh delici mermi ile atış testlerine tabi tutulup sonuçlar değerlendirilmiştir. Kaynak öncesi balistik deneyler için 300 mm x 250 mm boyutlarında plaka kullanılmış ve 10 adet mermi atışı yapılarak V_{50} hızı hesaplanmıştır. Bulunan değer standartları karşılama açısından değerlendirilmiştir. Kaynak sonrası balistik deneyler için MIG kaynakla birleştirilmiş 300 mm x 550 boyutlarındaki plakanın kaynak bölgesine 10 adet mermi atışı ve kaynak geçiş bölgesine 11 adet mermi atışı yapılarak V_{50} hızları hesap edilmiştir. Bulunan sonuçlar MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri ile ve kaynak öncesi yapılan deneylerde elde edilen balistik sınır değeri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum 7039, V_{50} Hız Hesabı, Balistik, Mekanik

Determination of Mechanical and Ballistic Properties of Aluminum 7039 Alloy Joined by MIG Welding Method

Salih KÜÇÜKKATIRCI

Department of Warfare Weapons and Vehicles

Program of Warfare Weapons and Vehicles

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Serdar SALMAN

In this study, the mechanical and ballistic properties of Aluminum 7039, which is considered to be one of the suitable materials for use in amphibious communication vehicles, were investigated. To determine the mechanical properties, 2 and 2.5 mm thick plates were used and the results were compared by subjecting them to tensile and bending tests before and after welding. In the investigation of ballistic properties, 38 mm thick plates were used and subjected to armor-piercing bullet shooting tests before and after welding and the results were evaluated. For ballistic tests before welding, a 300 mm x 250 mm plate was used and 10 bullet shots were made to calculate the V50 velocity. The found value was evaluated in terms of meeting the standards. For ballistic tests after welding, 10 bullet shots were made to the weld area of the 300 mm x 550 plate joined with MIG welding and 11 bullet shots were made to the weld transition area to calculate the V50 velocities. The results were compared with the standard ballistic limit value of the MIL-DTL-7039 Al Armor plate and the ballistic limit value obtained in the tests carried out before welding.

Keywords: Aluminum 7039, V₅₀ Velocity Calculation, Ballistics, Mechanics

1

GİRİŞ

İnsanlar için korunmak ve güvende olmak eski çağlardan günümüze kadar en önemli ihtiyaç olmuştur. İçinde bulunulan duruma göre insanlık tarihi boyunca korunma amaçlı çok farklı ve çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. İnsanlar için bulundukları durumun tehlikesi ne ölçüde büyükse korunma ihtiyacı da o oranda artmakta ve önem kazanmaktadır. Ülkemizin sahip olduğu stratejik konum ve kaynaklar savunma alanında yapılan çalışmaların kıymetini artırmaktadır.

En üst seviyede korunma ihtiyacı gerektirecek durum ise savaş ortamıdır. Tarihin her döneminde insanlar başta kendilerini, ailelerini, topluluklarını ve ülkelerini korumak amacıyla ve diğer çeşitli sebeplerden dolayı savaşların içinde yer almak durumunda kalmışlardır. Bu doğrultuda insanlar canlarını korumak ve zayıatları azaltarak savaş sahasında üstünlük kurabilmek maksadıyla çeşitli yöntemler kullanmışlardır. Kullanılan bu yöntemlerin başında zırh gelmektedir. Zırhlar kesici ve delici silahlardan korunma maksadıyla kullanılırlar ve dolayısıyla genel anlamda sert ve yoğunluğu yüksek malzemelerden üretilirler. Milattan önce 2000’li yıllarda ortaya çıktığı dönemlerde zırhlarda genellikle demir ve bronz gibi malzemeler kullanılırken zamanla çelik de kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler yüksek yoğunlukları nedeniyle oldukça ağır yapıları ve hareket kabiliyetini kısıtlamalarından dolayı büyük olumsuzluklara da yol açmışlardır. Şekil 1.1’de bronzdan yapılmış olan eski dönemlerde kullanılmış bir zırh bulunmaktadır.



Şekil 1.1 Eski çağlarda kullanılmış olan bir zırh, (“vücut zırhı,” 2024)

İlerleyen zaman ve savaş teknolojilerinin de gelişmesiyle bugün zırhlara duyulan ihtiyaç da çok farklı boyutlara ulaşmıştır. Günümüzde askerler ve ordular eski dönemlerin aksine at, kılıç ve basit silahlar yerine yüksek teknolojiye sahip silahlar ve askeri araçlar kullanılmaktadır. Dolayısıyla askerlerin can güvenliği bakımından askeri araçların dışarıdan gelebilecek saldırılara dayanıklı olması gereklidir. Gelişen malzeme teknolojisi bu ihtiyaca çeşitli çözümler sunmaktadır. Bu bağlamda malzeme teknolojisinin sunduğu imkanlardan faydalanırken askeri araçlarda kullanılacak zırh malzemesinin seçimi de oldukça önem arz eden bir husustur. Bir askeri araçta kullanılacak zırh malzemesinin seçiminde şu konular önem teşkil etmektedir:

- Malzemenin mekanik ve balistik dayanımının yüksek olması,
- Malzemenin maliyetinin uygun olması,
- Malzemenin askeri aracın hızını ve manevra kabiliyetini çok fazla olumsuz etkilemeyecek düzeyde özgül ağırlığa sahip olması,
- Askeri aracın çok farklı coğrafyalarda görev icra edeceği düşünüldüğünde amfibi yapıda olmasının uygun olacağından dolayı sızdırmazlık özelliğinin sağlanabilmesi adına kaynak edilebilir bir malzeme olması,
- Malzeme tedarikinin ekonomik açıdan uygun olması,

Çalışmada ihtiyaçları karşılama noktasında çeşitli yöntemler araştırılmış ve askeri alanda kullanılan zırhlı araçlarda alüminyum alaşımları içerisinde sahip olduğu mekanik özellikler sayesinde kullanılması en uygun malzemelerden biri olan ve Al-Zn alaşım grubu içerisinde yer alan Alüminyum 7039 malzemesi seçilerek, sızdırmazlık özelliğini de sağlaması adına yapılması elzem bir işlem olan kaynak işlemi yapılarak, işlem öncesi ve sonrası bu malzemenin mekanik ve balistik dayanımları test edilmiştir. Kaynak yöntemi olarak bir gaz altı ark kaynak yöntemi olan MIG kaynak tercih edilmiştir. Bu yöntemin seçilmesinde kaynaklanacak malzemelerin kalınlığı ve koruyucu gazın arkı koruma kabiliyetine sahip olması ve kolayca giderilebilecek küçük kaynak sıçramaları haricinde bir olumsuzluk ihtiva etmemesi gibi avantajları önemli rol oynamıştır. Şekil 1.2.'de günümüz malzeme teknolojisi sayesinde zırhlı ve yüzer gezer özellikte geliştirilen bir askeri araç yer almaktadır.



Şekil 1.2 Yüzergezer özellikte zırhlı askeri araç (“fnss zaha,” t.y.)

Yapılan çalışmada Al 7039 alaşımı kaynak öncesi ve sonrası çekme ve eğme deneylerine tabi tutularak alaşım malzemesinin mekanik özelliklerin MIG kaynak öncesi ve sonrası durumlar için kıyaslaması yapılmıştır. Zırh delici mermi kullanılarak yapılan atış testleri ile malzemenin MIG kaynak işlemi öncesi ve sonrası durumları için balistik dayanımı test edilmiştir.

2.1 Zırhlı Araçlar

Zırhlı araçlar esasen balistik koruma, atış gücü ve hareket kabiliyetine sahip, muharebe ortamları için geliştirilen sistemleridir. Bu özellikler uyumlu şekilde bir araya getirildiğinde başarılı sistemler elde edilmektedir. Tasarım ve geliştirme esnasında en önemli husus araç içindeki personel ve iç aksamaya operasyon esnasında en yüksek seviyede muhafaza sunmaktır.

Koruma soğanı konsepti çerçevesinde alınan tedbirlerle tehdidin hedef platforma gelmesinin engellenememesi durumunda, zırh sisteminin tehdidin hedefi etkisiz hale getirmesini önlemesi gerekmektedir. Zırh sistemleri personel, kara, deniz ve hava araçları ile sabit yapılar olmak üzere savunma sanayiinde birçok farklı platformda kullanılmaktadır. Hareketli platformlar için koruma gereksinimi kadar hareket kabiliyeti de oldukça önemli olmaktadır. Bu kapsamda en iyi zırh, hareket kabiliyetinden en az feragatle en fazla korumayı sağlayan zırh olarak kabul görmektedir (Papetti, 1980).

2.2 Zırhlı Araçların Geliştirilmesi

Tarihte ilk olarak Hititler Kadeş Savaşı'nda demir savaş araçları kullanmış ve sonraki dönemlerde karbon ve demir karışımından oluşan çelik, Sanayi çağıının temelini oluşturmuştur. Bu gelişmeler neticesinde ahşap malzemelerden imal edilen savaş gemilerinin üretiminde metaller kullanılmaya başlanmıştır. Otomobillerin geliştirilmesi ile kara sistemleri üretilmiştir. İlk geliştirilen muharebe araçlarında karbon ihtiva eden çeliğin birleştirilmesi esnasında çıkan sorunlar nedeniyle perçinleme işlemi uygulanmıştır. İlerleyen dönemlerde yüksek balistik koruma özelliği olan tel kaynaklama yöntemi uygulanmıştır. Tiger ve Panther tankları tel kaynaklama metodu ile imal edilmiştir.

Balistik korumaya duyulan ihtiyacın Soğuk Savaş zamanlarında artması ile değişik metotlar geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi havacılıkta kullanılan alüminyumun balistik amaçlı olarak kara sistemlerine uygulanmasıdır. Yoğunluğunun ve korozyona uğrama oranının düşük olması alüminyumun bu alanda sık tercih edilmesini sağlamıştır. Başka bir uygulama 1954 yılında T95 prototip üretiminde kompozit zırh

kullanımıdır. Ön tarafta 100 milimetrelik cam, 25 milimetrelik çelik ile arka kısımda 50 milimetrelik çelik yer alan 65 derecelik eğime sahip lamine zırhlı araç çukur imlalı mermiler karşısında önemli ölçüde koruma sağlamıştır. Fakat bu projede maddi imkansızlıklardan dolayı seri üretime geçilmemiştir.

1966 yılında kullanılmaya başlanan T-64 kompozit lamineden zırha sahip ilk tanktır. Bu zırhlı aracın zırhında iki adet çeliğin arasında erimiş durumda cam yer almaktadır. Ancak camın kırılğan yapısı nedeni ile üretim sona ermiştir. T-72 ve sonrası dönemlerde geliştirilen tankların çerçeveli cam elyafı, çelik levhaların arasında konumlandırılmıştır. Yapılan iyileştirmelerle birlikte geleneksel çeliğin kullanımı bütünüyle sona ermiştir. Kompozit lamine zırhlar güdümlü tanksavar füzelerinin gelişmiş özelliklerine karşın en tesirli yanıttır (“zırhlı araçlar,” 2018).

2.3 Zırh Çeşitleri

Günümüzde gelişen askeri teknoloji, korunma ihtiyacını da artırmış ve bu doğrultuda birçok zırh çeşidi geliştirilip üretilir hale gelmiştir. Farklı ihtiyaçlara ve eldeki imkanlara göre çok çeşitli zırh yapıları bulunmaktadır.

2.3.1 Pasif Zırh Sistemleri

Pasif zırh sistemleri, zırh malzemesinin mekanik özellikleri yardımıyla belirlenmiş, zırh delme kabiliyetine sahip tehditlere karşı koruma sağlayan bir zırh türüdür. Aslında oldukça basit bir temele dayanır. Zırh malzemesinin sahip olduğu dayanıklılık gelen tehdidi önlemeye çalışır. Yapısal bir eleman olarak kullanılan zırh sistemleri darbe aldığı vakit yapısal bütünlüğünü korumalı, çoklu darbelerde çatlamaya, parçalanmaya ve kırılmaya karşı dirençli olmalıdır (Papetti, 1980).

Pasif zırh sistemleri başlığı altında çelik, alüminyum gibi metalik malzemelerden dövme üretim metoduyla imal edilen plakaların monoblok olarak kullanılmasıyla veya birden çok plakanın boşluklu veya katmanlı kullanımıyla elde edilen çeşitli yapıda zırhlar, aynı malzemelerden döküm metoduyla üretilebilen daha kompleks şekilli zırhlar ile metal, seramik veya plastik gibi farklı malzeme türlerinin birlikte kullanıldığı kompozit zırhlar yer alır.

2.3.2 Monoblok Zırhlar

Tankların kullanılmaya başlandığı I. Dünya Savaşı’ndan itibaren 40 yıl boyunca tanklar yüksek mukavemetli çelik zırhlarla donatılmıştır. II. Dünya Savaşı’na dek geçen süre

içinde zırhların gelişimini belirleyen en önemli husus tank topları olmuştur. Kalibresi ve etkinliği artan toplara karşı daha kalın homojen çelik plakalar kullanılmıştır. Bu dönemde 2. Dünya Savaşı'nda kullanılmış olan ve Şekil 2.1.'de görseli bulunan Alman Jagdtiger tankında çelik monoblok zırh yapısı bulunmaktaydı (Ogorkiewicz, 1991).



Şekil 2.1 Jagdtiger (S/N 305020) tankı (“Jagdtiger.” 2024)

Zırhın kalınlığını artırmak, tankın ağırlığının önemli ölçüde artmasına ve hareket kabiliyetinin azalmasına neden olmuştur. Bununla beraber, hem kinetik enerjili zırh delici mermilerin artan etkinliği hem de II. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkan ve çalışma mekanizması Munroe etkisine (çukur imla hakkı) dayanan 600 mm’ye kadar kalınlıklarda zırhları delebilen tanksavar sistemlerinin kullanılmaya başlanması farklı zırh çözümlerinin geliştirilmesinin önünü açmıştır (Ogorkiewicz, 2017).

2.3.3 Kafes Zırhlar

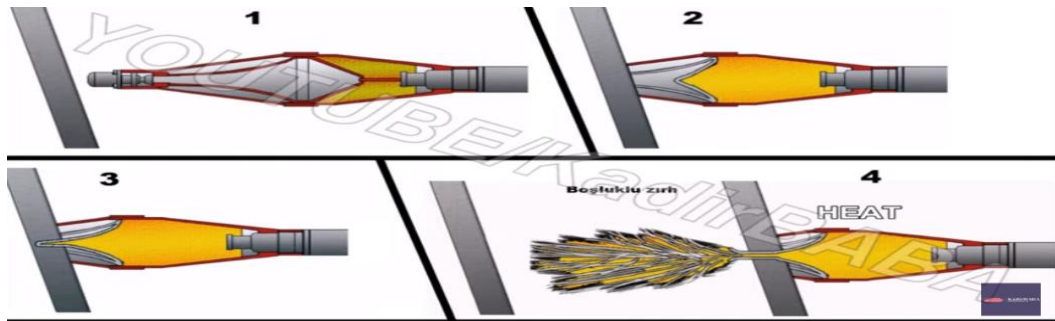
Kafes zırhlar çukur imla mantığı ile çalışan mühimmatlara karşı etki gösterirler. Bu zırh tipi çalışma mantığı mühimmatın esnek katmanlı kafes zırha çarparak deforme olması esasına dayanır. Tahrip olan başlık vazifesini tam anlamıyla icra edemez ve yüksek enerjiye sahip jet dağıldığı için delme yeteneğinin büyük kısmını kaybeder. 2016 yılında Savunma Sanayii Müsteşarlığı’nın (şimdiki adı Savunma Sanayii Başkanlığı) teklif alınmasına yönelik çağrıda bulunduğu “Zırhlı Araçlar İçin Esnek Katmanlı Kafes Zırh Sistemi Projesi” kapsamında çalışmalarda bulunan firmalar, birtakım zırhlı araçlara yönelik ilk çalışmalarını gerçekleştirdi. Her bir zırh tipi farklı prensiplere dayalı olarak tehdidi en etkin şekilde durdurmaya çalışmaktadır. Şekil 2.2.’de Roketsan’ın geliştirerek askeri araca uyguladığı kafes zırh sistemi görülmektedir (“esnek katmanlı kafes zırh sistemi projesi,” 2016).



Şekil 2.2 Roketsan esnek katmanlı kafes zırh (“esnek katmanlı kafes zırh sistemi projesi,” 2016)

2.3.4 Boşluklu Zırhlar

Kinetik enerjili mermilerin artan etkinliği ve kimyasal enerjili mühimmatın ortaya çıkışı alternatif zırh sistemlerine duyulan ihtiyacı artırmıştır. Bu kapsamda, 1960’lardan sonra farklı yapılarda boşluklu zırh sistemleri kullanılmıştır. Ana zırh tabakasının belirli bir miktar önüne yerleştirilen sert zırh plakası ile ana zırha ulaşmadan kinetik enerjili merminin saptırılması, parçalanması veya belirli bir sapma açısı ile ana zırha çarptırılarak etkinliğinin azaltılması hedeflenmiştir (Ogorkiewicz, 2017). Bir diğer konfigürasyonda kimyasal enerjili merminin harp başlığının ana zırha ulaşmadan aktive edilmesi ile balistik performansının azaltılması amacıyla ön plakaya yumuşak zırh yerleştirilmiştir. Boşluklu zırh sistemleri daha iyi balistik performansı sağlarken daha büyük hacim ihtiyacı duymaktadır (İzgi, 2023). Boşluklu zırhlar çok katmanlı yapıları sayesinde mühimmatın enerjisini her bir katmanda soğurarak yıkıcı etkisini azaltır. Şekil 2.3.’te boşluklu zırhın çalışma mantığı gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Boşluklu zırhların çalışma mantığı (“Tank Zırhlarını Tanıyalım.” 2021)

2.3.5 Delikli Zırhlar

Tehditlere yönelik olarak malzemenin dayanımının yanında tehdidi yolundan saptırmanın veya kırmanın denendiği bir zırh çeşididir. Asimetrik etkileşimlerden yararlanma prensibine dayalı bir zırh çeşididir. Plaka üzerinde bulunan belirli büyüklükteki delikler sayesinde plakaya çarpan mühimmatın bir kısmı boşluğa gelir ve mermi üzerinde asimetrik kuvvetlerin oluşmasına neden olur. Delikli plakalar platform yüzeyi ile genellikle 200-300 mm mesafe boşluk kalacak şekilde yerleştirilir. Plakaya çarpan mermi, asimetrik kuvvetlerin etkisinde platform yüzeyine ulaşmaya kadar parçalanabilir, yörüngesinden sapabilir veya belirli bir sapma açısı ile ana zırha çarpabilir. Bu şekilde merminin zarar verme kabiliyeti azaltılır. Bahsedilen sistemin etkinliği gösterebilmesi plaka malzemesi, delik çapı ve platforma uzaklığı gibi etkenlerin göz önünde bulundurulmasına bağlıdır (İzgi, 2023). Şekil 2.4.'te askeri araçlarda kullanılan bir delikli zırh görülmektedir.



Şekil 2.4 Delikli zırh (“add on armour,” t.y.)

2.3.6 Kompozit Zırhlar

Kompozitler giderek daha da önem kazanmakta ve farklı uygulamalarda kendilerine yer bulmaktadır. Bu alanlardan biri de zırhlardır. En az iki farklı malzemenin makro seviyede birleştirilmesiyle elde edilen ve yeni özellikler taşıyan malzemelere kompozit malzeme adı verilir. Metaller ve diğer geleneksel malzemelerin özelliklerinin günümüzün gereksinimleri karşısında yetersiz kalması nedeni ile daha gelişmiş özellikleri bünyesinde barındıran kompozit malzemelerin üretimi başlamış ve önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır. Geleneksel materyallerle mukayese edildiğinde kompozitlerin en öne çıkan nitelikleri hafif ve sağlam yapılarıdır. Gerçekleştirilen çalışmaların nihayetinde, bu materyallerin darbe ile çekme dayanımlarının iyileştirilmesi; kimyasal

direnç, yorulma ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi sağlanmış ve kompozit malzemeler yoğun olarak hava ve deniz araçları, otomobil sanayi, makine ve inşaat sektörü ile askeri ve uzay teknolojilerinde tercih edilmeye başlanmıştır.

Kompozitler çoğunlukla bir ya da birkaç türde elyaf ve rijit parçacıkların reçine veya metal/seramik matrislerle birtakım süreçlerde bulunmaları neticesinde imal edilirler. Bu maksatla, elyaflar karbon, aramid, seramik gibi elyaflardır. Bazı durumlarda elyafa alternatif olarak elyaf esaslı keçe ya da dokuma tercih edilmektedir. Bu sayede mukavemet arttığı için, imalatla avantaj elde edilmektedir.

Kompozit malzemelerin zırh olarak kullanılabilmesi için yoğunluklarının düşük ve balistik özelliklerinin iyi olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereklikten dolayı kompozit zırhlar genelinde plastik içeren kompozitler ve seramik içeren kompozitler ön plana çıkmaktadır. İngiltere'deki FV 4211 tankının 1971 yılında geliştirilmesine dek zırhlı araçların hiçbirinde kompozit yer almamıştır.

Ülkemizde özellikle 2000'li yıllar ve sonrasında büyük gelişim gösteren Savunma Sanayii kabiliyetleri sayesinde yerli imkanlarla üretilen ve Şekil 2.5'te bir görseli bulunan 3+ nesil ana muhabere tankı Altay'da yine yerli imkanlarla Roketsan'ın geliştirdiği ve Şekil 2.6'da gösterilmekte olan kompozit zırh sistemi kullanılmıştır. ("Zırhlı Araçlarda Kompozit Zırhlar," 2019).



Şekil 2.5 +3 Nesil muhabere tankı Altay ("Yeni Altay Tankı," 2019)



Şekil 2.6 Altay tankı kompozit zırhı (Mehmet, 2023)

2.3.7 Reaktif Zırhlar

Reaktif zırh sistemleri maruz kaldıkları mühimmata karşı reaksiyon oluşturarak tehdidin penetrasyon performansını ortadan kaldırmayı veya azaltmayı hedefler. Reaktif zırh sistemlerinin çalışma prensibi de eğimli veya delikli plaka kullanımı gibi tehdit ile zırh plakası arasında asimetrik etkileşim oluşturmaya dayanır. Tehdit doğrultusunda eğimli plakalar vasıtasıyla mermiye asimetrik kuvvet uygular (Rosenberg ve Dekel, 2020). En yaygın kullanılan türü patlayıcı reaktif zırhtır (İzgi, 2023). Reaktif zırhlar tarihte ilk kez 1982 Lübnan Savaşı sırasında kullanılmış ve oldukça etkili oldukları ortaya çıkmıştır. Reaktif zırhlar üç farklı türdedir:

- 1- ERA (Explosively Reactive Armor): Patlayıcı reaktif zırh anlamındadır.
- 2- SLERA (Self-Limiting Explosive Reactive Armour): Sınırlı patlayıcılı reaktif zırh anlamındadır.
- 3- NERA (Non-explosive Reactive Armor): Patlayıcı olmayan reaktif zırh anlamındadır.

Ülkemizde yerli ve milli olarak Roketsan firması tarafından ERA zırh geliştirilerek Altay Tankına entegre edilecektir. Reaktif zırhlarla beraber günümüzde artık aktif zırhlardan bahsetmek de mümkündür. Aktif zırhlar sahip olduğu radar ve diğer algılayıcılar sayesinde, tehdidi uzaktan fark ederek, koruduğu sisteme ulaşmadan tehdide yönelik önlem alır. Bu önlem soft kill denilen elektronik aldatma yöntemleri ve hard kill adı

verilen mühimmatlı imha yöntemidir. Ülkemizde ASELSAN'ın geliştirdiği AKKOR aktif zırhlara bir örnektir. Şekil 2.7'de Altay Tankı yer almaktadır.



Şekil 2.7 Altay tankı (Metin, 2019)

2.3.8 Seramik Zırhlar

Seramikler yüksek sertlik özelliğine sahip ve kırılğan yapıda malzemelerdir. En büyük avantajları hafif yapıları en büyük dezavantajları ise sert yapılarından dolayı çok kırılğan olmalarıdır. Seramikler günümüzde endüstrinin birçok farklı kolunda talep görmektedir. Savunma sanayiindeki kullanımı da gün geçtikçe artmaktadır. Zırh delici mermiler de tungsten karbür veya sertleştirilmiş çelikten üretilen, sertlik değerleri 60 HRC'nin üzerinde olan penetratörlerdir. Yüksek hızlı ve sert malzemeler kendilerinden daha yumuşak bir malzemeye temas ettiklerinde temas ettikleri malzemenin sertliği ile ters orantılı olarak sahip oldukları yapıyı korumaktadırlar. Temas ettikleri malzeme sertleştikçe yüksek hızlı malzeme enerjisinin büyük kısmını temas esnasında kaybetmektedir. Böylelikle, zırhlarda kullanılan ve sert yapıya sahip olan seramikler merminin enerjisinin büyük bir bölümünü ilk temas sırasında sönmüleyebilmektedirler. Mermi tarafından aktarılan enerjisinin sönmülenmesi esnasında seramik zırh yapısı kırılma davranışı sergilemektedir.

Bu nedenle araç zırhlarında, silisyum karbür (SiC), Alümina (Al_2O_3), bor karbür (B_4C), titanyum diborür (TiB_2), tungsten karbür (WC), alüminyum nitrür (AlN) gibi seramik yapılar metal zırhlar ile kombine edilerek kullanılmaktadır (Gül, 2022).

Zırh çeliği ve zırh yapımında kullanılan seramiklere ait özellikler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Zırh yapılarında kullanılan seramikler ve zırh çeliğinin özellikleri (Madhu ve Blat, 2011)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Sertlik (Kg/mm ²)	Kırılma Tokluğu (MPa m)	Balistik Etkinlik Parametresi (EH/ρ)
Zırh Çeliği (RHA)	7.9	382	180	<670	12	1
Bor Karbür (B ₄ C)	2.5	410	400	3000	2.5	2.5
Titanyum Diborür (TiB ₂)	4.5	400	565	3300	6.2	6.2
Silisyum Karbür (SiC)	3.15	400	370	2700	4.3	4.3
Alüminyum Nitrür (AlN)	3.25	310	330	1300	3.7	3.7
Alümina (Al ₂ O ₃)	3.8	379	340	1600	3.5	3.5

2.4 Alüminyum Haricinde Kullanılan Zırh Malzemeleri

Zırhların üretiminde metal, seramik, polimer ve kompozit gibi farklı tür ve özelliklerde malzemeler kullanılmaktadır. Bu alanda metaller oldukça yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Zırh üretiminde, alaşımın ana elementine göre, dört malzeme türü kullanılmaktadır. Bunlar; alüminyum, titanyum, magnezyum ve çeliktir. Bunlar arasında en fazla tercih edilenler, maliyetlerinin uygunluğu, işlenebilir ve kaynaklanabilir olmaları nedeni ile alüminyum ve çelik alaşımlarıdır. Magnezyum ve titanyum alaşımları ise, maliyetli olmalarına karşın sağlamış olduğu birtakım avantajlar nedeniyle

kullanılabilmektedir. Metalik zırhların önemli bir bölümü haddeme, kalıpla dövme veya ekstrüzyon proseslerini içeren dövme zırhlar olarak üretilirler. Bazı nadir durumlarda döküm yönteminden faydalanılmaktadır (Hazell, 2016).

Zırhlı kara araçlarında sıklıkla tercih edilen malzeme grubu olan metal malzemeler bu başlık altında incelenecektir.

2.4.1 Çelik Zırhlar

Çelikler eskiden en çok aranan zırh malzemesi olsa da ağır yapıları ve maliyetleri sektörü farklı alternatiflere itmiş ve kullanımı azalmıştır. Sertlik, tokluk, imalat pratikliği, yorulma direnci, kaynaklanabilme özellikleri ve uygun fiyatı çeliği zırhlı araçlarda kullanım için ideal bir seçenek haline getirmektedir (Hazell, 2016). Çeliklerin zırh delici mermilere karşı daha iyi direnç göstermesi için ısıtılma işlemi uygulanarak sertlikleri artırılır. Sonrasında temperleme ısıtılma işlemi uygulanarak çeliğin kırılabilirliği azaltılır ve tokluğu artırılır. Böylelikle gelen merminin kinetik enerjisinin sönmünebilmesi sağlanır (Hazell, 2022; R. Ogorkiewicz 2017; R. Ogorkiewicz, 1991.; Gooch 2006). Zırh üretiminde kullanılan çelikler, uygulanan imalat metotları, sistem ve materyaller dikkate alındığında döküm, dövme, perfore zırh çelikleri ve değişken sertlikte zırh çelikleri olarak dört ana kategoride incelenir.

2.4.1.1 Dövme Zırh Çelikleri

Bütün çeliklerin gösterdiği yüksek mukavemet ve balistik performans özelliklerine sahiptir. Zırhlı muhabere araçlarının başlıca yapı elemanları bir zırh çeliği çeşidi olan monolitik çeliğidir. Zırhlarda kullanılan çelikler sıklıkla orta seviyede sertleşebilen, orta karbonlu ve Mo, Mn, Ni, Cr elementlerinden oluşan düşük alaşıma sahiptirler. Karbon eşdeğerliğinin %1 oranını aşmaması birleştirilme kabiliyetlerinin kötüleşmesini önlemek için gereklidir. Bu nedenle alaşım miktarı sınırlanmaktadır. Çelik malzemeler için karbon eşdeğerliği (CE) miktarı Denklem 2.1’de verildiği şekilde hesap edilir (Crouch, 2017).

$$CE = \frac{C + Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2.1)$$

RHA (Rolled homogeneous armour) çelikleri haddelenmiş homojen zırh çeliği anlamındadır ve geleneksel, dövülmüş, zırh üretiminde tercih edilirler (Crouch, 2017). Homojen zırh çeliklerinin haddelenmiş olanları, MIL-S-12560B standartları ile belirlenmiştir ve imal edilecek zırh malzemelerinin RHA çelikleriyle kıyaslanarak

başarım göstermelerinin tespitinde faydalanılmaktadır (Laible, 1980). RHA plakının kimyasal bileşimi Çizelge 2’de gösterilmektedir. Element oranları yeterli aralıklarla yer almakta olup istenilen niteliklere ve sertleştirilmesi gereken levha kalınlığına göre, bu oranlar tespit edilmektedir (Hazell, 2016). Haddelenmiş homojen zırh çelikleri, 100 mm ve üzerinde kalınlıkta olabilmektedir (Doig, 1998). T-62, T-54 gibi Sovyet tanklarının önlerinde 100 mm’lik RHA levhalar bulunmaktadır. 1950’li yıllarda geliştirilen en fazla ağırlığa sahip tanklardan biri olan Conqueror’ın ön bölümlerindeki RHA plakaların kalınlığı ise 125 mm’yi bulmaktadır (Ogorkiewicz, 1991). Ancak bu durum tankların ağırlığını oldukça artırırken hareket kabiliyetlerini ise son derece kısıtlamaktaydı. RHA çeliklerinde optimum tokluk ve mukavemetin elde edilebilmesi için, çeliklere ısıtılma işlemi uygulanarak su katılır ve ardından menevişlenerek martenzitik mikroyapı sağlanmış olur (Doig, 1998). Sıcak haddelenerek arzu edilen biçime kavuşturulan levhalar, ısıtılarak ortalama 840°C sıcaklığa sahip olunca yağ ya da su ortamında su katılır. Elde edilen ürün, içeriğindeki katı ve gevrek martenzit fazı nedeniyle iyi mukavemet değerine sahip olmakla birlikte kırılgandır. Bu yapı, 400°C-650°C sıcaklık değerlerinde yeterli süre fırın içinde bekletilerek menevişlenir. Böylelikle levhanın nihai hali daha tok, sünek ve üniform bir mikroyapıya kavuşturulur. Menevişleme sıcaklığı ihtiyaç duyulan mekanik ve balistik niteliklere yönelik belirlenir (Hazell, 2016). 100 mm’den daha fazla kalınlıklara sahip RHA levhalara ilave nikel elementi katılarak su verme sırasında daha fazla sertleşme elde edilmektedir (Doig, 1998). Tablo 2.2’de RHA çeliklerinin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Tablo 2.2 RHA çeliklerinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Hazell,2022).

C	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Fe
0.18-0.32	0.60-1.50	0.05-0.95	0.00-0.90	0.30-0.60	0.015 (maks.)	0.015 (maks.)	95.70-98.87

RHA çeliklerine kıyasla daha yüksek sertlikte olan HHA (High hardness armour steel), yüksek sertlikte zırh çeliği manasına gelir. Esasen RHA çeliklerinin nispeten düşük sıcaklık değerlerinde temperlenmesi ile oluşurlar. Bu homojen yapıdaki zırh çelikleri 430 HBN değerinden daha yüksek sertliktedirler. RHA çelikleri ile kıyaslandığında daha düşük kalınlıklarda üretildiklerinden sertleştirilmeleri daha basittir. Bundan dolayı RHA çeliklerine kıyasla daha düşük seviyede alaşım içerirler. Su vermenin akabinde martenzitik yapının 400°C-650°C aralığında sıcaklıklarda menevişlendiği RHA çelikleri

ile kıyaslandığında, sadece 150°C-200°C sıcaklık değerlerinde menevişlenen HHA çelikleri, hafif zırhlı araç üretimlerinde kullanılmaktadırlar (Crouch, 1988; Hazell, 2016).

2.4.1.2 Döküm Zırh Çelikleri

Çelikler hangi yöntemle imal edilirlerse edilsinler oldukça dayanıklı malzemelerdir. Zırhlarda kullanılan çeliklerin imalatında başvuru olan başka bir metot döküm yöntemidir. Bu zırh türünün kimyasal yapıları homojen haddelenmiş zırh çeliklere benzerlik gösterir. Çelik alaşımlarında Cr, Ni, Mn, V ve Mo elementleri bulunmaktadır (Ogorkiewicz, 1991; Crouch, 2017). Bununla birlikte döküm yöntemi ile üretildiklerinde RHA levhalara göre iri tanelere sahip olacaklarından mekanik özellik bakımından zayıflarlar. Bu durumdan dolayı, RHA plakalar seviyesinde balistik koruma sağlayabilmeleri için RHA plakalara göre ortalama %10 daha kalın olmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tanklar düşünüldüğünde, gövdeleri RHA plakalardan kaynakla üretilirken, taret ve benzeri karmaşık şekilli diğer bileşenler döküm yöntemi ile imal edilir (Doig, 1998). Kompleks biçime sahip bileşenlerin üretiminde döküm işleminin tercih edilmesi haddelenmiş zırh çelikleri ile mukayese edildiğinde zırhtaki kaynak bağlantılarının sayısını düşürerek üretim sürelerini kısaltır. Fakat, döküm prosesinin doğası gereği zırhın gösterdiği özellikler her bölgede farklı olabilmekte ve dökümlerin kalınlığının ayarlanması zorlaşmaktadır. Öte yandan, döküm işleminin genellikle kompleks biçimli ve farklı kalınlıklara sahip plakalara uygulanmasından dolayı ısı işlem üniform şekilde gerçekleştirilememektedir (Ogorkiewicz, 1991). Son zamanlarda, özellikle döküm işleminde oluşan ağırlık dezavantajından kurtulmak maksadı ile, taret gibi kompleks bileşenlerin de RHA plakaların birbirlerine kaynaklanmaları yöntemi ile imal edilmeleri yaygınlaşmıştır (Doig, 1998).

2.4.1.3 Değişken Sertlikte Zırh Çelikleri

Bir başka zırh çeliği türüdür. Zırhlı delebilen mühimmatları kırabilmek, zırh yapılarının çok yüksek sertliğe sahip olmaları ile mümkündür. Homojen zırhların çok sert ve gevrek olduklarından kırılmak gibi istenmeyen özellikleri beraberinde getirmektedir. Değişken sertlikte zırh çelikleri bu durumu çözüme kavuşturma doğrultusunda meydana gelmiştir. Sert yapıdaki ön yüzeyleri mühimmatın kırılarak etkisinin azaltılması, daha sünek halde bulunan arka katmansa merminin sahip olduğu enerjinin sönmelenmesi, çatlakların yayılmasının engellenmesi ve zırhın sahip olduğu yapısal bütünlüğün muhafaza edilmesini sağlamaktadır (Crouch, 2017).

2.4.1.4 Perfore Zırh Çelikleri

Askeri zırhlı araçların mühimmatlara karşı pasif savunmasında, add-on zırh olarak adlandırılan görece hafif ilave levhalar kullanılmaktadır. Pasif zırh sistemleri mermileri esas zırha ulaşmadan saptırmak veya kırılmalarına neden olmak maksadıyla kullanılmaktadır. Fakat, bu savunma sistemleri için en önemli dezavantajlardan biri sahip oldukları ağırlıktır. Ağırlık, aracın parçaları üzerine çok fazla yük bindirerek hareket yeteneğinde azalmalara yol açar. Günümüzde bir zırhlı muhabere aracının geliştirilmesi aşamasında ağırlık oldukça önemli bir husustur. Bu sebeple add-on zırh sistemlerinin aracın gövdesini meydana getiren çelik ve alüminyum alaşımlı zırhlardan ağırlıklarına kıyasla daha yüksek etkinlikte olması gerekmektedir (Balos vd., 2010 a; Fras vd., 2017).

Farklı biçim konfigürasyonlarında tercih edilen yüksek mukavemete sahip çelik perfore levhalar, zırh yapılarında balistik performansı iyileştirmek maksadıyla uzun zamandır kullanılmaktadır. Perfore plakalar, düşük kalibreye sahip mühimmatlara karşı zırh sistemlerinin pasif add-on koruma kapasitelerini artırmak için kullanılan bir dizi delik ihtiva eden ince çelik plaka yapılarıdır. Perfore plakalar zırh yapılarında, özellikle tehdidin çapına göre etkileyecek delik veya kanallar şeklinde dizayn edilir ve bu sayede zırh çözümlerinin etkinliği; malzemenin mukavemet değeri, plakanın kalınlığı ve deliklerin konumuna göre belirlenir. Perfore plakaların sahip olduğu kalınlık, sertlik değerleri, açısal konumları, delik biçim ve ebatları, deliklerin arasındaki uzunluk, esas zırha mesafe ve bunun gibi pek çok hususta araştırmalar gerçekleştirilerek optimum perfore plaka dizaynı konusunda çalışmalarda bulunmaktadır (Radisavljevic vd., 2013).

II. Cihan Harbi döneminde Almanya yapımı “Panzer IV” adlı tankın Ausf. J versiyonunun dış katmanına ilave edilen telden kafes tarihteki ilk perfore zırhtır. Bu düşük karbona sahip çelik telden kafes zırh Thoma Schuerzen olarak isimlendirilmiştir ve 14.5 mm Sovyet tanksavar mühimmatlarının zırha hasar vermesini önlemek için esas zırhın dış kısmına eklenmesi ile geliştirilmiştir. Bu zırh, 19 mm tel eksenleri arası mesafeye ve 5,5 mm tel çapına sahiptir. Bu yapı sayesinde levhanın bütününe kıyasla daha düşük ağırlık sağlanmakta ve mühimmatların saptırılmasıyla tehditlere karşı etkin muhafazaya sahip olması amaçlanmaktadır (Balos vd., 2010 b; Balos vd., 2021).

Özetle zırh malzemeleri için kalınlık, kütle verimliliği (**Em**) ve alansal yoğunluk özellikleri oldukça önem arz etmektedir. Tablo 2.3’te bazı zırh kalınlık, alansal yoğunluk, kütle verimliliği ile tanımlayıcı konfigürasyonları gösterilmektedir.

Tablo 2.3 Bazı zırh kalınlık, alansal yoğunluk, kütle verimliliği ile tanımlayıcı konfigürasyonları (Tarku,2023)

MALZEME	Alansal Yoğunluk (<i>kg/m²</i>)	Kütle Verimliliği (<i>Em</i>)
380 BHN* (RHA)	322	1.00
500 BHN* (HHA)	283	1.14
Alüminyum Alaşımı 5083	356	0.90
Alüminyum Alaşımı 7019	270	1.19
Alüminyum Alaşımı 7039	253	1.27
Titanyum Alaşımı Ti-6Al-4V	199	1.62
500 BHN* HHA ve Alüminyum Alaşımı 5083	192	1.68
500 BHN* HHA ve Titanyum Alaşımı Ti-6Al-4V	167	1.93
Yüksek Sertlikte Perfore Plaka ve Alüminyum Alaşımı 5083	168	1.92
Al_2O_3 Seramik ve 500 BHN* HHA Al_2O_3 Seramik ve Alüminyum Alaşımı 5083	152	2.12
	146	2.19
Cam Elyafarla güçlendirilmiş Al_2O_3 Seramik Kompozit	141	2.28

2.5 Alüminyum ve Alaşımları

2.5.1 Alüminyumun Önemi

Alüminyum en yaygın olarak kullanılan metal türlerinden biridir. Özellikle evde kullanılan birçok metal malzeme alüminyumdan imal edilmektedir. Yeryüzünün %8'inden çıkarılan alüminyum (Demircioğlu, 2002), ancak 1886 yılında elektroliz yönteminin uygulanmasıyla endüstriyel düzeyde imal edilebilmiştir (Edwards, 2001). Üretilen miktarın artmasıyla beraber alüminyumun ederi ilk zamanlarında gümüş ve altın gibi değerli madenler kategorisinde bulunmasına karşın, günümüzde bakırla kıyaslanabilir seviyeye inmiştir (Ankara Alüminyum Sanayicileri Derneği, 2003). Bugün alüminyum ve alüminyum alaşımlı malzemelerin imalatı ve kaynak edilebilirliği konularındaki araştırmaların önemli bir kısmında, ilerlemeler kaydedildiği

anlaşılmaktadır. Alüminyum düşük yoğunlukludur ve alaşımları, kopmaksızın çelik ile eşit miktarda yük taşımaları durumunda eşit boy ve kesit için çelikten daha düşük ağırlıktadır. Alüminyumun ısı ve elektriksel iletkenliği avantajları ile birlikte, iyi derecede ışık ve ısı yansımaya da sahiptir. Farklı ortam koşullarında korozyon direnci son derece iyidir ve zehir içermez. Alüminyumun dökülme, şekillendirilme ve iyi yüzey kalitesi özellikleri bulunur. Alüminyum sahip olduğu bu üstün nitelikleriyle mühendislik malzemesi olarak büyük önem taşımaktadır.

2.5.2 Alüminyum Metalinin Genel Özellikleri

Saf alüminyum, maviye benzer renkte beyaz bir metaldir. Al ile gösterilmektedir. Alüminyum metalinin yoğunluğu $2,7 \text{ gr/mm}^3$, % uzaması 60, sertliği 17 BHN, akma dayanımı $2,6 \text{ kg/mm}^2$, çekme dayanımı $10,4 \text{ kg/mm}^2$, elastisite modülü $7 \times 10^{13} \text{ N/mm}^2$, kristal yapısı yüzey merkezli kübiktir. Yörüngelerine göre elektron dizilişi $1s^2 2s^2 2p^6 3p^2 3p^1$ şeklindedir (Salman vd.,2003). Malzeme biliminin temelleri, s. 15). Bu özellikleriyle beraber alüminyum düşük mekanik özelliklere sahiptir ancak element ilavesi gibi çeşitli yöntemlerle bu özellikler iyileştirilebilmektedir. Bu sayede alüminyumun mekanik özellikleri iyileşmekte ve dayanımı st 37 gibi bazı çeliklerin sahip olduğu değere ulaşabilmektedir (Batıgün, 1997).

Saf alüminyum yumuşak bir dokuya ve yüksek süneklik özelliğine sahiptir. Alaşım haline geldiğinde ve temperlendiğinde ise dayanıklılığı ve mukavemeti artar. Bununla beraber alüminyum, çeliğin yaklaşık üçte biri yoğunlukta oldukça hafif bir metaldir. Alüminyumun hafifliği, imalat giderlerinin düşmesini sağlarken üretiminde kullanıldığı aracın hafif olmasını da sağlar. Ayrıca alüminyum sünek yapıya sahip olduğundan şekillendirilebilme, bükülebilme ve çok ince dövülebilme özellikleri bulunur. Alüminyumun bir diğer önemli özelliği saf durumda yüzeyinde bulundurduğu muhafaza sağlayan ince oksit film sayesinde korozyona direncinin yüksekliğidir. Öte yandan kimyasal bakımdan aktif bir malzeme olduğu halde havada meydana gelen güçlü oksit tabaka, alüminyumun oksitlenmesini engellemekle birlikte korozyon direnci yüksek bir malzeme olmasını sağlarken zorlu hava ve iklim koşullarında dahi özelliklerini muhafaza etmesini sağlar. Ekseriyetle mutfak ve araç dolapları gibi alanlarda aşındırıcı etkiler altında kaldığı durumlar için son derece uygundur (Polmear, 2017). Ancak bu alanların dışındaki uygulamalar için yeterli ölçüde dayanımı elde etmek amacıyla farklı elementlerle alaşımlamak gereklidir. En önemli alaşım elementleri çinko, magnezyum, silisyum, bakır, lityum ve manganezdır. Düşük oranda titanyum, zirkonyum, krom

gümüş, nikel ve bizmut da eklenir ve demir her zaman için belli oranda vardır. Sıklıkla kullanılan 300'ün üstünde işlenebilen alaşım bulunur. Alüminyumun pek çok farklı üretim sahasında tercih edilmesinin önemli sebeplerinden biri sahip olduğu üstün işlenebilme yeteneğidir. Alüminyum alaşımları sıcak ve soğuk şekilde işlenebilmektedir.

Ayrıca bu alaşımlar çok iyi düzeyde hadde özelliğine de sahiptir ve bu sayede haddeleme yöntemi kullanılarak birkaç mikron kalınlığında folyo haline getirilebilirler. Alüminyumun bir diğer üstün özelliği ise elektrik iletkenliğidir. Birim kütle başına elektrik iletkenliği bakırdan daha iyi seviyededir. Bu nedenle enerji sektöründe de sıklıkla tercih edilir. Alüminyumun bilgisayar anakartları ve LED ışıkları gibi ısı iletimi gerektiren alanlarda kullanımının uygunluğunu sağlayan özelliği ise ısı emiciliğinin iyi olmasıdır. Alüminyumun termal genleşme katsayısı (α) 23,6'dır (humbarahane, 2018).

Bu özelliklerinin yanında alüminyum geçirimsiz ve kokusuz yapısı, geri dönüştürülebilir özellikte olması, manyetik yapıda olmaması ve düşük sıcaklık değerlerinde yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasıdır ancak alüminyumların ticari alaşımlarının ergime noktası 690 °C' nin altında olduğundan yüksek sıcaklıklar için pek tercih edilmemektedir. Bu sıcaklık değerleri örneğin çeliklerin ergime noktasının çok altındadır. Bunun yanı sıra alüminyum alaşımları 93 °C gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta yumuşama özelliği gösterir ancak bazı alüminyum alaşımları 200 °C sıcaklıklara kadar mukavemetlerini korurlar.

Alüminyumun savunma sanayii alanında kullanılmasını sağlayan en önemli özellikleri ise görece düşük yoğunluğunun yanında balistik başarımının iyi olması ve uygun maliyeti ile tedarik kolaylığıdır.

2.5.3 Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Alüminyum sahip olduğu çeşitli üstün özellikler ve avantajlardan dolayı endüstride çok farklı ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Sıcaklık ve basınç değişimlerine uyum kabiliyeti ve hafifliği sayesinde havacılık sanayiinde en çok kullanılan malzemelerden biri alüminyumdur. Sahip olduğu ısı iletkenliğinin sayesinde içten yanmalı motorlarda silindir ve piston kafası olarak kullanılmaktadır. Isıya, neme, UV ışığa ve kokuya karşı iyi korozyon direnci sağlamalarından ötürü gıda sanayiinde ambalaj olarak tercih edilmektedir. Yüksek korozyon dirençleri alüminyumları kimya ve inşaat sanayisinde de tercih edilmesini sağlamaktadır. Hafif yapıları sayesinde otomotiv sektörü için de en cazip malzemelerden olan alüminyum bu yapısı sayesinde gelişen teknoloji ile birlikte üretimi artmakta olan uzay araçlarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanların dışında

alüminyum çeşitli mühendislik uygulamaları, tıp ve elektronikte de çokça kullanılmaktadır (Campbell, 2003). Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri düşünüldüğünde önümüzdeki dönemler içinde öneminin artacağı değerlendirilmektedir. Yurtiçinde ve yurtdışında gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda, artan nüfus, küresel ısınma ve yapılaşmadaki artış gibi faktörler düşünüldüğünde pek çok ülke ve bölgede alüminyum alaşım talebinin yükselmesi öngörülmektedir (Demirci, 2011).

Bu noktada alüminyumun en öne çıkan özelliklerinden biri olan çeliğe göre çok daha hafif yapısı alüminyum hem kara hem hava taşıtlarında ve hafif yapının önem arz ettiği diğer pek çok alanda tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir (Wang vd., 2001). Diğer metallere göre düşük özgül ağırlığa sahip olması sayesinde üretiminde kullanılan araçların daha hızlı ve çevik yapıda olmasını sağlamaktadır. Günümüzde alüminyum kullanımının neredeyse çeyreği otomotiv sektörü kaynaklıdır. Otomotiv üretim sürecinde 1 kg alüminyumun 2 kg'a kadar demir veya çeliğin yerini tutabileceği düşünülmektedir. Alüminyumun oldukça iyi seviyede ağırlık-mukavemet oranı bu metali otomotiv sektörünün en çok kullanılan ikinci metali haline getirmektedir. Otomotiv sektöründe en çok kullanılan metal ise demir-çeliktir. Alüminyumun otomotiv sektöründe kullanımı 1970 yılında Ford Motor şirketinin alüminyum kaporta üretmesi ile başlamıştır. Bu tarihten itibaren alüminyumun otomotiv sanayisinde kullanımı giderek artmıştır.

Alüminyum alaşımlarının gündelik hayatımızda kullandığımız otomobillerin yanı sıra askeri araçlarda da zırh malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmasının başlıca nedenleri yüksek düzeyde balistik dayanım göstererek oldukça iyi bir koruma sağlaması ve bununla beraber bu alaşımların hafif yapısının askeri aracın hız ve çevik manevra kabiliyetlerini olumsuz anlamda asgari düzeyde etkilemesi ile birlikte kaynak edilebilirlik kabiliyetinin iyi olmasıdır. Alüminyum alaşımlarının kaynak edilebilir olması sızdırmazlık sağlama konusunda elzemdir. Askeri araçlar her türlü operasyonda ve savaş sahasında çok çeşitli coğrafyalarda kullanılan ve bu sebeple her türlü zor şarta uyum sağlaması beklenen araçlardır. Bundan dolayı günümüzde yeni nesil askeri araçlar genellikle amfibi yapıda yani yüzergezer olmaktadır. Bu özellik askeri araçların göl, dere, su birikintisi gibi olası rotalardan rahatlıkla geçmesini sağlamaktadır. Amfibi özelliğin sağlanması açısından askeri araçta kullanılan malzemelerin sızdırmaz yapıda olması gerekmektedir ve sızdırmazlık kabiliyeti için malzemelerin kaynaklanması şart olduğundan malzemenin de kaynak edilebilir özellikte olması gerekmektedir. Askeri

araçlar yüksek nem, çok düşük sıcaklık, aşırı yüksek sıcaklık gibi ağır ve yıpratıcı koşulların olduğu sahalarda kullanılmakta olduğundan alüminyum alaşımlarının yüksek korozyon direnci de askeri zırhlı araçlarda zırh malzemesi olarak tercih edilmesinde önemli bir etkidir.

2.5.4 Alüminyum Alaşım Serileri

Alüminyum, mükemmel düzeyde işlenebilirlik özelliklerine sahip hafif, gümüşü renkte, korozyona karşı direnci yüksek bir metaldir. Oksijen ve silisyumun ardından en çok bulunan elementtir. Alüminyum alaşımları, alüminyumun alüminyum dışındaki metaller veya elementlerle uygun ve çeşitli oranlarda birleştirilip karıştırılması ile meydana gelir. Bu alaşımlar, alüminyumun birtakım özelliklerinin iyileşmesini sağlarken bazı özelliklerinde ise değişikliğe yol açar. Örneğin; alüminyumun alaşımlanması ile alüminyuma kıyasla daha yüksek sertlik, dayanıklılık, mukavemet, ısı iletkenliği veya korozyon direnci elde edilebilir. Bu sebeple alüminyum alaşımları, alüminyumun özelliklerini geliştirmek veya değiştirmek için sıklıkla kullanılır. Alüminyum alaşımlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri alüminyuma katılan ilave elementlere ve mikroyapıya göre farklılık göstermektedir. Alüminyumu alaşımlandırmada kullanılan başlıca alaşım elementleri mangan, bakır, silisyum, çinko ve magnezyumdur. Genellikle daha dayanıklı malzemeler elde etmek amacıyla üretilen alüminyum alaşım ürünlerine, sahip olduğu özelliklerden dolayı endüstriyel uygulamalarda sıklıkla ihtiyaç duyulmaktadır. Çeliğin ardından en fazla tercih edilen metallerden biri olan alüminyum ve alüminyum alaşımları, inşaat, otomotiv, havacılık, yapı, mutfak ürünleri, gıda ürünlerinin ambalajları gibi oldukça geniş bir sahada kullanılmaktadır (Wang vd., 2001).

Bu alaşımlar döküm ve dövme alaşımları olarak iki sınıfta incelenir. Dövme alaşımları grubunun, plastik deformasyon özelliği yüksek olduğundan kolaylıkla şekil verilebilir özelliktedirler. Alüminyumun dövme ve döküm alaşımlarının geneli ısıl işleme uygundur.

Alüminyum alaşımlarını sınıflandırmada en yaygın kullanılan yöntem Amerikan Standartlar Birliği'nin belirlediği simgesel bir gösterimdir. Bu gösterim şekline göre dört rakamdan oluşan simgenin ilk rakamı, esas alaşım elementini ifade etmektedir. Örneğin 1XXX serisi saf alüminyumu ifade ederken 7XXX şeklindeki gösterim çinko ihtiva eden bir alaşım olduğunu gösterir. Bu sınıflandırmaya göre alüminyum serileri şu şekildedir:

1xxx Serisi

Bu serinin alaşımları, %99,00-%99,99 (neredeyse %100) arası oranda alüminyum ihtiva etmektedir. Bununla beraber saflığı bozmayacak oranda demir, silisyum, manganez, bakır, magnezyum, titanyum ve çinko da içerebilmektedir. Dayanım değerindeki artışlar gerinim sertleşmesi ile mümkün olabilir. Silisyum ve demir, bu hususta esas malzemelerdir. Bu seriye sahip alaşımlar zayıf mekanik özelliklere, yüksek süneklik değerlerine, çok yüksek korozyona dayanım, yüksek ısıl-elektrik iletkenliği ve oldukça iyi şekillendirilme özelliklerini taşımaktadır (Kaufman, 2000; Davis, 2001).

2xxx Serisi

Bu seri, esas alaşım elementi olarak bakır bulundurur. Bununla beraber nikel, titanyum ve magnezyum gibi alaşım elementleri içerebilmektedir. Bu serideki alüminyum-bakır alaşımları ısıl işleme uygundur. Yaşlandırma işlemi ve ısıl işlem çökmesi neticesinde akma dayanımı büyük oranda iyileşmektedir. Sahip olduğu süneklik ise ısıl işlemin neticesinde düşmektedir. Alüminyumun bakırla alaşımlanması ile imal edilmiş bileşenlerin korozyona karşı dayanıklılığını yükseltmek için 6XXX serisi alaşımlar ya da alüminyumun saf hali ile kaplama yapılabilir (Kaufman, 2000; Davis, 2001). Bu alaşımlar ısıl işlemin ardından çok gelişmiş mekaniksel özelliklerin yanında düşük korozyon direncine sahip olur. 2XXX serisi alaşımları, hava araçlarında, vida bağlantı bileşenlerinde ve araç gövdelerinde kullanılmaktadır (Davis, 2001).

3xxx Serisi

3xxx serisinin, temel alaşım elementi manganezdır. Bu alaşımlara, magnezyum minör alaşım elementi olarak ilave edilebilmektedir. Bu serinin alaşımları ısıl işleminden geçmez ve soğuk işlem yoluyla mekanik özellikleri geliştirilebilir. 3xxx serisi alaşımları, orta seviyede mekanik özelliklere, yüksek sünekliğe ve oldukça yüksek korozyon direncine sahiptir (Kaufman, 2000; Davis, 2001). Folyo, tavan levhaları, pişirme kapları, sert kaplar ve içecek kutularının imal edilmesinde 3XXX serisi alaşımları kullanılır.

4xxx Serisi

Bu seri alaşımların, esas alaşım elementi silisyumdur. 4xxx serisi alaşımların geneli ısıl işlem görmektedir (Kaufman, 2000). Alaşımlar çoğunlukla kaynak teli ya da lehim çubuğu olarak görev gördüğünden erime noktalarını düşürmek ve akışkanlık özelliklerini iyileştirmek için bu alaşımlara %12'ye kadar silisyum katılmaktadır. Alaşımların bazıları

ise anodize olduklarında, aldıkları koyu gri renkleri nedeniyle mimaride tercih edilmektedir (Davis, 2001).

5XXX serisi

Bu seri, ana alaşım elementi olarak magnezyum içermektedir ve minör alaşım elementi olarak manganez ilave edilebilir. 5xxx serisi alaşımları ısıtılma tabi tutulmaz ve soğuk işlem yoluyla kuvvetlendirilebilir. 5xxx serisi alaşımlarının sünekliğı iyi olmakla birlikte yüksek korozyona direnç ve birleştirilebilir olma, iyi düzeyde mekanik özellikleri bulunur (Kaufman, 2000; Davis, 2001). Bu serinin alaşımları, iyi mukavemete sahip folyo, basınçlı kriyojenik kaplar, deniz sistemleri, bağılantı bileşenleri, otomotiv kaplamaları ve mimari uygulamalarda kullanılır.

6xxx Serisi

6xxx serisi alaşımlarda, temel alaşım elementleri silisyum ve magnezyumdur. Bu serinin alaşımları ısıtılma uygundur. Isıtılma ile alaşımın sahip olduğı süneklik azalmaktadır. İyi biçimlendirilebilir ve korozyona dayanım özellikleri bulunur (Kaufman, 2000; Davis, 2001). Bu alaşımlar, otomotiv ve uçak sanayiinde, mimari uygulamalarda ve yapı malzemesi olarak tercih edilir (Davis, 2001).

7xxx Serisi

Bu çalışmada kullanılan alüminyum 7039'un dahil olduğı seridir. 7xxx serisinin, ana alaşım elementleri çinko ve magnezyumdur. Bununla birlikte, alaşımlara manganez ve bakır minör alaşım elementleri olarak ilave edilebilir. Alüminyum-çinko-magnezyum alaşımlar ısıtılma uygundur (Kaufman, 2000). 7XXX serisi, alaşımları farklı türde hava taşıtlarında ve hidrolik parçaların imalatında kullanılabilir (Davis, 2001). Ayrıca sahip olduğı özellikler nedeni ile sıkça zırh malzemesi olarak savunma sanayiinde de rağbet görmektedir.

8xxx Serisi

Bu serinin esas alaşım elementi lityumdur. Bu alaşımların minör alaşım elementleri olarak bakır, gümüş, manganez ve zirkonyum olabilmektedir. 8xx serisi alaşımlar ısıtılma işleminden geçmeye uygundur (Kaufman, 2000). Bu alaşımlar, uçakların ağırlıklarını düşürmek amacıyla üretilir. Alaşımın yoğunluğunu %3 oranında düşürülmek için %1 oranında lityum katılması gerekir. (Prasad ve Wanhill, 2017). Tablo 2.4'te temel alüminyum alaşımlarının gösterilişi yer almaktadır. Açıklanmış olan tüm gösterim ve

semboller alüminyumların tanımlanması ve sınıflandırılmasında öneme sahip olup her bir ilave element alaşıma farklı özellikler kazandırmaktadır.

Tablo 2.4 Temel alüminyum alaşımlarının gösterilişi
(“alüminyum numaralandırma sistemi,” 2019)

Alüminyum Alaşımı	İlave Element
1XXX	Saf Alüminyum
2XXX	Bakır
3XXX	Manganez
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum-Silisyum
7XXX	Çinko
8XXX	Lityum

İşlenebilir özellikteki alüminyum alaşımları ısıtılma işlemi uygun ve uygun olmayan olmak üzere iki farklı türde bulunmaktadır. Isıtılma işlemi sayesinde alaşımların mekanik özellikleri iyileşme göstermektedir. Isıtılma işlemi uygun olmayan 3XXX ve 5XXX serisi alaşımların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla temperleme işlemi uygulanır. Temper durumu bir harf ile ifade edilirken, temperleme işleminin durumu bir rakam ile gösterilir. Bu gösterimler ve anlamları sırasıyla şu şekilde açıklanabilir (“ısıtılma işlemi ve kondisyon göstergeleri,” t.y.)

F: Üretim aşaması sonrası durumdur. Bu durum, sertlik ya da mukavemeti değiştirmek için başka bir işlem gerektirilmeyen, üretim sonrası fiziki yapıyı ifade etmektedir. Biçimlendirilen alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin hiçbir garantisi yoktur. Döküm hali için, örneğin 43-F işareti kullanılmaktadır.

W: Solüsyona alma ısıtılma işleminin sonrasındaki geçici durumu belirtir.

T: T harfi, ısıtılma işlemi yoluyla oluşan temperleri belirtir. Isıtılma işlemlerinin farklı türleri, aşağıdaki harf ve rakamlarla belirtilmektedir.

T1: Sıcak işlemden sonra soğutma uygulanır ve doğal yaşlanma ile kararlı vaziyete getirilir.

T2: Sıcak işlemin ardından soğutulur, soğuk işleme tabi tutulur ve doğal yaşlanma ile kararlı yapıya kavuşturulur.

T3: Solüsyona alma ısıtıl prosesinden geçirilir, soğuk işleme tabi tutulur ve doğal yaşlanmayla kararlı hale sokulur.

T4: Solüsyona alma ısıtıl işleminden geçirilir, yapay yaşlanma işlemiyle sertleştirilir (Termik) (“ısıtıl işlem ve kondisyon göstergeleri,” t.y.)

T5: Sıcak işlemin ardından soğutma uygulanır ve yapay yaşlanma neticesinde sertleştirilir (Termik),

T6: Solüsyona alma ısıtıl işlemini uygulanır ve yapay yaşlandırma yardımıyla sertleştirilir (Termik).

T7: Solüsyona alma ısıtıl işlemini uygulanır ve aşırı yaşlandırma işlemi gerçekleştirilir.

T8: Solüsyona alma ısıtıl prosesine sokulur, soğuk işlem uygulanır ve yapay yaşlanma yapılır (Termik).

T9: Solüsyona alma ısıtıl işlemine tabi tutulur, yapay yaşlanma uygulanır (termik) ve soğuk işlem uygulanır.

T10: Sıcak işlemde soğutulur, soğuk işlemde geçirilir ve yapay olarak yaşlandırılır (Termik).

H: H, gerinimle sertleştirilmiş ürünleri ifade etmek için kullanılan bir tanımdır. Bazı durumlarda, H-temper adı verilen alüminyum malzemelere ısıtıl işlem uygulanmamıştır. Bu işlemde alüminyumı kuvvetlendirmek maksadıyla kullanılan ana metot gerinim sertleştirmesidir.

(H)’nin ardından sıklıkla iki ya da daha fazla rakam yer almaktadır. İlk rakam, temel prosesleri belirtirken ardından gelen rakamlar, plastik şekillendirme limitleri dahilindeki son fiziksel özellikleri ifade eder. Bu rakamların belirttiği özellikler aşağıda yer almaktadır:

H1: Plastik şekil verme limitleri dahilinde şekillendirilmiştir. Sonraki rakam, uygulanan soğuk prosesi belirtmektedir. Örnek olarak; 8 rakamı ulaşılabilen en sert yapıyı belirtir. En sertle yumuşak arasında bulunan orta sertlik (H14) biçiminde gösterilir. Çeyrek sertlik ise (H12) biçiminde gösterilir.

Üçüncü rakam, sıklıkla farklı özelliklerin ifadesinde kullanılır. Örneğin; (H14) sağladığı aynı minimum özellikleri vermekle birlikte maksimum değerler standart değerlere daha yakındır. Üçüncü rakam, (H14)’ten daha farklı değerleri belirtmekle birlikte (H13) ya da

(H15)'in yerine tercih edilecek seviyededir denilmez. Çok sert özellikler, üçüncü rakam olmaksızın, ikinci rakam olarak (9) kullanıldığı zamanı gösterir. (H112) işareti “kontrollü” olarak, F-ısıtım işlem durumunun garanti edilen mekanik özelliklerini belirtir (“ısıtım işlem ve kondisyon göstergeleri,” t.y.).

H2: Plastik şekillendirme sonrası kısmi tav durumunu belirtir. Alaşımın plastik şekil alma neticesinde sertlik ve mukavemetin sağlanması sonrası kısmen tav yapılarak bu değerlerin kabul edilir sınırlara düşürülmesi anlamına gelir. Bu durum, ilk rakamın 2 olarak yazılmasıyla ifade edilir. Arzu edilen stabil mukavemet ve sertlikte (H1) olduğu gibi ikinci rakam ile gösterilir. Örnek olarak H28 tam sert, H24 yarı sert anlamındadır. Oda sıcaklığında yaşlanma yumuşaması sağlayan alaşımların H2 hali H3 ün fiziksel özelliğine eşit olmaktadır. Diğer alaşımlar düşünüldüğünde, H2 hali yaklaşık olarak H1'in fiziksel özelliklerine eşit olmakla beraber, uzama katsayısı daha fazladır (“ısıtım işlem ve kondisyon göstergeleri,” t.y.).

H3: Plastik şekil verme ve ardından gelen istikrarlı durumdur. Alüminyum alaşımları magnezyum içerdiklerinde yüksek olmayan sıcaklık değerlerinde ısıtılarak stabilize edilip mukavemetleri azalırken şekillendirilme yetenekleri artmaktadır. Bu işlem uygulanmazsa, değişim normal koşullarda oldukça fazla vakitte gerçekleşir. Bu proses (H)'den sonraki üçüncü rakamla gösterilir. Plastik şekil verme işlemi de (H)'den sonra gelen ilk ya da iki rakamla gösterilir (Korkut, 2017). Tablo 2.5'te ısıtım işlem görmeyen alüminyum temper tanımlamaları verilmiştir.

Açıklamaları verilmiş olan göstergeler, işlem aşamalarının tanımlanması konusunda pratiklik sağlamaktadır.

Tablo 2.5 Isıl işlem görmeyen alüminyum temper tanımlamaları

(“alüminyum temper tanımlamaları hakkında ayrıntılı bir rehber,” t.y.)

TERİM	TANIM
H1X	Sertleştirilmiş işlemi
H2X	Sertleştirilmiş ve kısmen tavllanmış
H3X	Düşük sıcaklık işlemi ile sertleştirildi ve stabilleştirildi
H4X	Sertleştirilmiş ve fırınlanmış
H5X	Çeyrek sertleştirme
H6X	Yarı sertleştirme
H7X	Üç çeyrek sertleştirme
H8X	Tamamen sertleştirme

I: F,O,H halleri haricinde, yapısal stabilizasyonun elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen ısıt işlemleri ifade eder. Bu sembol plastik şekillendirme yapılmasından bağımsız olarak yapının istikrarlı duruma kavuşması için uygulanması gereken ısıt işlemi belirtir. T harfinin ardından 2-9 arası rakamlar bulunabilir. Bu rakamlar gerçekleştirilecek olan prosesleri gösterirler. 6061-T6 göstergesi alınırsa, bahsi geçen alaşım için temel işleme ilaveten farklı nitelikleri sağlaması amacıyla farklı proseslerin uygulanması amaçlandığı vakit bu esas göstergeye 6061-T62’de olduğu gibi ilaveler yapılabilmektedir.

Oda sıcaklığı şartlarında tabii yaşlanma, temel ısıt işlemlerin uygulandığı esnada ya da uygulandıktan sonra yapılabilmektedir. İşlemin süresi, metalürjik olarak önem taşıdığı takdirde kontrolü sağlanmalıdır (“ısıt işlem ve kondisyon göstergeleri,” t.y.).

2.5.5 Kaynak İşlemi ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Edilmesinde Kullanılan Yöntemler

Metallerin bir araya getirilmesinde birçok farklı kaynak metodu kullanılmakta olup bu yöntemlerin büyük kısmı alüminyumlara da uygulanabilmektedir. Aynı ya da farklı niteliklere sahip ve genellikle metal malzemelerin basınç ve uygun ısıt şartlarda makul bir birleşim ile ayrılmaz bir şekilde entegre etme prosesi kaynak olarak adlandırılır. Kaynak işleminde farklı türlerde enerji kaynağına gerek duyulmaktadır. Kaynak prosesi özellikle metallerin üretildiği fabrikalarda uygulanan bir birleştirme yöntemidir. Metal

malzemeler ve termoplastiklerin bir araya getirilmesinde tercih edilir. Materyallerin kaynaklanarak bir araya getirilmesindeki asıl maksat bir harici enerji kaynağıyla bir araya getirilecek metallerin birleşim noktası yani kaynak edilen kısmın dolgu malzemesiz ya da harici olarak ilave edilen malzemenin yüksek enerji kullanılarak ısıl proses yoluyla metallerin eriyerek bir araya gelmesinin sağlanmasıdır. Yani birleştirilecek parçanın kaynaklanacak bölümü eritilerek, eriyen bölgeye dolgu metali ilavesi ile ya da ilave olmaksızın birleşim yeri soğutulup sertleştirilir (Weston, 2000), (Kurt, 2013).

Alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesinde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi örtülü çubuk elektrotla kaynaktır. Kullanılan metot alüminyum çeşitlerinin tamamının ve ısıl prosesle sertleşme göstermeyen alaşımların da kaynaklanmasını mümkün kılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler şu şekilde sıralanıp açıklanabilir:

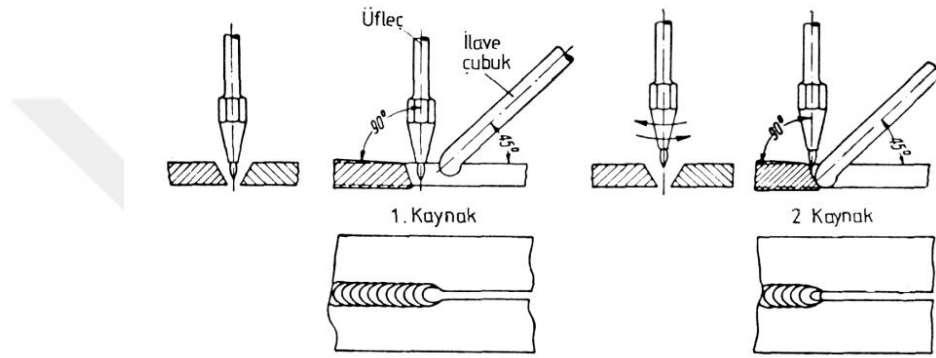
2.5.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Elektrik Ark Kaynağı

Bu yöntem kullanılarak alüminyum türlerinin tamamıyla ısıl işlem yöntemiyle sertleşmeyen alaşımları kaynaklama elverişliliği bulunmaktadır. Yapısal sertleşmeli alaşımlar içinde 4xxx serisi alaşımlar da elverişli biçimde kaynak elektrotla kaynaklanabilirler fakat dikiş bölgesine yakın mesafelerde mekanik özellikler kötüleşir. Kaynakla birleştirme işlemi için elektrot (+) gerekir. Alüminyumun metal-ark yöntemi ile kaynaklanmasında dikkate alınması gereken önemli hususlar ön ısıtma, nem, dekapan ve kullanılan parçanın temiz olmasıdır. Elektrot örtüsünün nemli olması, gözenek oluşumuna yol açar. Kaynak işleminin kalitesini sağlamak için elektrotların kuru ve temiz ortamlarda muhafaza edilmesi oldukça önemlidir. İş parçasına ön ısıtma uygulanması, özellikle kalın parçalar için şarttır. Elektrotu kaplayan örtü (dekapan) ile çalışmak oldukça zor bir işlem olduğundan bunun dikiş içinde sıkışmaması için yetenek ve tecrübe gereklidir. Kaynak işleminin ardından bu dekapanın (cürufun) temizlenmesindeki hassasiyet de kaynağın kalitesi için oldukça elzemdir (Oğuz, 1990).

2.5.5.2 Alüminyum Alaşımlarının Oksi Asetilen Kaynağı

Bu kaynak yöntemi hafif metallerin her türüne uygulanabilen ancak yetersiz kalitede kaynak metali veren bir kaynak çeşididir. Özellikle tercih edildiği belirli alanlar bulunmaktadır. Bu yöntem gelişen kaynak teknolojisi sayesinde ilerleme gösteren diğer kaynak çeşitlerinin ortaya çıkmasıyla alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak işlemlerinde ekonomik değerini büyük ölçüde kaybetmiş fakat tamirat maksatlı tercih

edilen bir teknik halini almıştır. Tamir kaynaklarında uygulanmasında ise “Oksitleyici” alevden mutlaka kaçınılması gerekmektedir. Hiçbir şekilde alevin beyaz konisi iş parçasına dokundurulmamalıdır. Bu kaynak yöntemi 6 mm’den kalın alüminyum levhaların oksitlenmiş kaynak işleminde tam nüfuziyet sağlamakla beraber çatlamları önlemek adına ön ısıtma gerekliliği vardır. Ön ısıtma sıcaklığı 150 °C ile 200 °C arasında olmakla beraber bu değerlerin aşılması, istenilen özelliklerin sağlanmasını engeller (Oğuz, 1990). Şekil 2.8’de alüminyum ve alaşımlarından kalın saçların Oksi-Asetilen kaynağı gösterilmektedir.

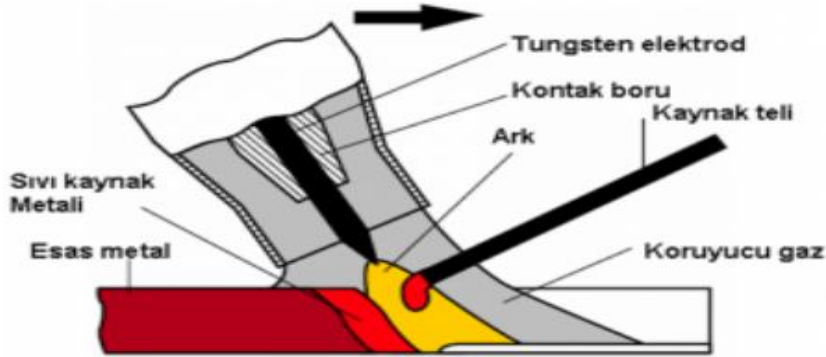


Şekil 2.8 Alüminyumlarda oksitlenmiş kaynağı (Oğuz, 1990)

2.5.5.3 Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağı

Farklı metal türleri sahip oldukları mekanik ve kimyasal özellikler ile ebatlarına bağlı olarak çeşitli yöntemlerle kaynak edilebilmektedir. TIG kaynak yönteminin MIG kaynak yönteminden en belirgin farkı daha ince parçalara uygulanabilmesidir. Bu çalışmada MIG kaynak prosesinin bu yönetime tercih edilme sebebi de çalışmada kullanılan levhaların kalın olmalarıdır. TIG kaynak yöntemi oldukça hassas ve temiz bir kaynak sağlar. Alüminyumlar da pek çok farklı metotla bir araya getirilebilmektedir. TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı, son derece geniş kullanıma sahip olan bir kaynak tekniğidir. Bu kaynak prosesi ile kaynak kalitesi anlamında çeşitli birleştirme yöntemlerine göre daha temiz ve estetik bir dikiş görünümü elde edilmektedir. Demir bazlı ve demir haricindeki metaller ve alaşımların önemli bölümünün kaynak edilmesinde uygulanmakta ve bununla beraber bütün kaynak pozisyonlarında başarılı neticeler alınabilmektedir. TIG kaynağı kalın olmayan levhaların birleştirilmesinde oldukça iyi neticeler sağlamanın yanı sıra kalın parçaları rahatlıkla birleştirebilmektedir. Ergimeyen tungsten elektrot tercih edilmesi, gerektiğinde ana metal ertirilerek, ek kaynak metaline olan ihtiyacı bitirmektedir. Bunun yanında kaynak banyosunun kontrolü mümkün olduğundan banyo

üzerinde cüruf oluşumu ortadan kaldırılarak dikişte cüruf kalma tehlikesi engellenmektedir. Kaynak prosesinin mekanik karakteristikleri açısından, kullanılan birleştirme metodu, kaynak pasosu, ısı girdisi, dikiş hareketi ve kaynağın hızı gibi kriterler, kaynaktaki mikroyapıyı değiştirerek kaynak bölgesinin niteliklerini etkilemektedir (Uzunonat, 2012). Bu kriterlerin seçimi uygun yapılmadığında ana metalleri olumsuz etkilemekte ve kaynağın kalitesini bozmaktadır. Kaynağın uygulandığı bölgedeki kaynak dikişi, kaynak edilen metalin katıya geçişi esnasındaki durumu nedeniyle düzensiz taneleri de ihtiva eder. Bundan dolayı kaynağın uygulandığı bölgedeki yapı kötü etkilenecek birleştirilen numunede çatlakların ortaya çıkma riski artar. Fazladan ısı girişi oluşması halinde kaynağın dikişi üzerindeki sıcaklık düşüşü gözlemlenmelidir. Sıcaklığın katıya geçişte mikroyapı üzerine de etkide bulunacağı söylenebilir. Kaynak esnasında birleştirilecek yüzeyde kullanılan torcun sapma göstermemesi ve kaynaklanacak numunelerin stabilizasyonu kaynağın kalitesi için oldukça mühim etkenler olduğundan kaynak dikişiyle beraber kaynak işlemindeki el hareketi de kritik bir husustur (Salman vd., 2020). Şekil 2.9.'da TIG kaynak yönteminin uygulanışı gösterilmektedir.



Şekil 2.9 TIG kaynağının uygulanması (“TIG Kaynağı”, t.y.)

2.5.5.4 Alüminyum Alaşımlarının Direnç Kaynağı

Alüminyumu kaynak etmede başvurulan yöntemlerden bir diğeri de direnç kaynak yöntemidir. Direnç kaynak yöntemi mukavemeti iyi olup ısıl proses uygulanabilen alaşımların kaynak edilmesinde kullanılmaktadır. Bu tip alaşımların ergime kaynağıyla kaynaklanması zor olmasına rağmen alaşımlar direnç kaynağı süreçleriyle kolaylıkla mukavemet kaybı olmaksızın kaynaklanabilirler. Alüminyum, katı duruma geçerken büyük oranda hacimce küçülür (ortalama %6). Bu durum, mukavemeti yüksek olan 7xxx serisi ve 2xxx serisi gibi ısıl işleme uygun alaşımlarda daha belirgin olmakla birlikte

çatlak oluşmasına neden olabilir. Isıl işleme uygun olmayan alaşımlar ile 6xxx serisi alaşımlarında bu çekmeden dolayı çatlamaya pek rastlanmaz. Yüksek mukavemete sahip dikiş ve nokta kaynakları için sıklıkla kaynak öncesi bu kaplamayı redüklemek gerekmektedir (Oğuz, 1990).

2.5.5.5 Alüminyum Alaşımlarının Işın Kaynakları ile Kaynağı

Işın kaynak yöntemi alüminyumları birleştirme konusunda da tercih edilen bir kaynak metodudur. Lazer ışın kaynak işlemi, elektron ışın kaynak prosesi ve elektrocuruf birleştirme teknikleri esasen bir araya getirme için gereken ısı miktarının, malzemeye yüksek hassasiyet ile odaklanmış yoğunluğu yüksek elektron grupları ya da ışın kullanılarak uygulandığı bir birleştirme metodudur. Belirli ısı girdisiyle birleştirilebilen ebatlar büyük oranda değişiklik gösterir. Kalın kesite sahip olan malzemeler bir defada kaynaklanabildiği için bu durum avantaj sağlamaktadır. 6xxx, 7xxx ve 2xxx gibi ısııl işleme uygun bazı serilerde çatlamalara sebebiyet verebilmesinin nedeni soğuma hızının yüksek olmasıdır (Bozkurt, 2016).

2.5.5.6 Alüminyum Alaşımlarının Katı Hal Kaynak Yöntemleri ile Kaynağı

Katı hal kaynak yöntemi sık başvurulan kaynak yöntemlerinden biridir. Bu kaynak yöntemi, birleşmenin esasen ana metallerin ergime noktasından düşük sıcaklıklarda, bir lehimleme metali ilavesi olmaksızın yapılan kaynak prosesidir. Bu yöntemde basınç uygulanabilir ya da uygulanmayabilir. Bir araya getirme işlemi, belirli koşullar altında, temizlenmiş yüzeylerin birbirine karşılıklı getirilmesiyle gerçekleşir. Parçada öncelikle plastik akma gerçekleşir ve sonrasında parçalar arası metalürjik bağ oluşur. Alaşımların ısııl işleme duyarlılığı bu kaynak işlemlerinde belirleyici unsur değildir. Alüminyum alaşım serilerinin tamamı katı hal kaynak yöntemleri ile farklı malzemelerle ve kendi aralarında birleştirilmeye uygundur. Katı hal kaynak metotlarıyla gerçekleştirilen kaynaklarda mukavemet değerinde bir azalma olmadığı için birleştirme bölgesi kaynak işlemi sonunda sünek yapısını muhafaza eder (Bozkurt, 2016).

2.5.5.7 Alüminyum Alaşımların MIG Kaynak Yöntemi ile Kaynağı

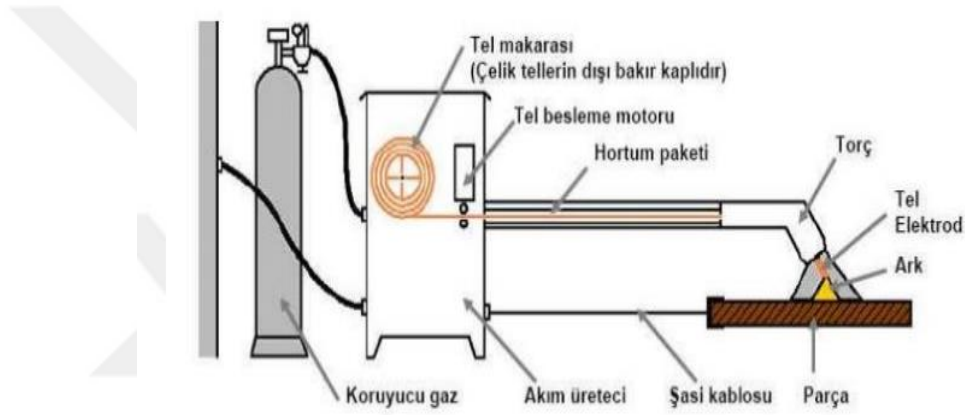
Alüminyumları kaynak etmede en etkili yöntemlerin başında gelmektedir. Yapılan çalışmalar özellikle kaynaktan etkilenen bölgenin sınırlı tutulması ve balistik başarımın korunması konusunda uygulanması gereken kaynak yönteminin MIG kaynak metodu olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kaynak türü, gaz metal ark kaynak yönteminin bir alt türüdür. Koruyucu gaz olarak; Argon ve helyum soy gazları yalnız başlarına, karıştırılmış

şekilde veya ekseriyetle çeliklerin kaynak edilmesinde O_2 ve CO_2 gibi aktif gazlar ile birlikte kullanılır. Çeliklerin kaynaklanmasında argona; %3-6 arasında değişen oranlarda O_2 ve %5-13 arası oranlarda CO_2 gazları eklenerek, birtakım özellikleri iyileştirilip gözenekli yapıların önüne geçilmiş olur. Düşük yoğunluklu metallerin kaynağının ise yüksek saflıktaki Ar gazıyla gerçekleştirilmesi gereklidir. Bakırların ve bakır alaşımlarının birleştirilmesinde muhtemel delinme ve çarpılma durumlarını engellemek maksadıyla, alaşım yapısına bağlı değişiklik gösteren 200-400 °C sıcaklık aralığında bir ön tavlama işlemi uygulanmalıdır. Alüminyum alaşımlarının ergime kaynağının büyük kısmı MIG kaynak metoduyla gerçekleştirilir. Kaynağın özellikleri genellikle sıfır menevişte ana metalin özelliklerine yakın seviyede olur. Kaynağın hızı, diğer birleştirme metotlarına göre fazladır. IEB'ler, oksii-asetilen ya da örtülü elektrot kaynağına göre dar olur. Bu birleştirme metodunda, bir kaynak akımı birleştirilecek parçaların bir araya getirilmesinde kullanılır. Kaynak tabancası, dolgu metalini kesintisiz olarak besler. Kaynak havuzunda bulunan ana metallerle beraber eritilirken elektrik arkı elektrot telini eritir ve bu sırada koruyucu gaz, kaynağı atmosferdeki kirlere korumak için kaynak tabancası boyunca hareket eder. MIG kaynağı birçok açıdan TIG kaynağına benzer olmakla birlikte birtakım bariz farklılıkları bulunmaktadır. MIG kaynak prosesinde, kaynak havuzunda bulunan metallerle kaynaşması sağlanan bir sarf edilebilir tel elektrot kullanılırken, TIG kaynak yönteminde, sarf edilemeyen bir tungstenden yapılmış elektrot kullanılır ve dolgu metalinin kullanılması şart değildir (Nevcanoğlu, 2019).

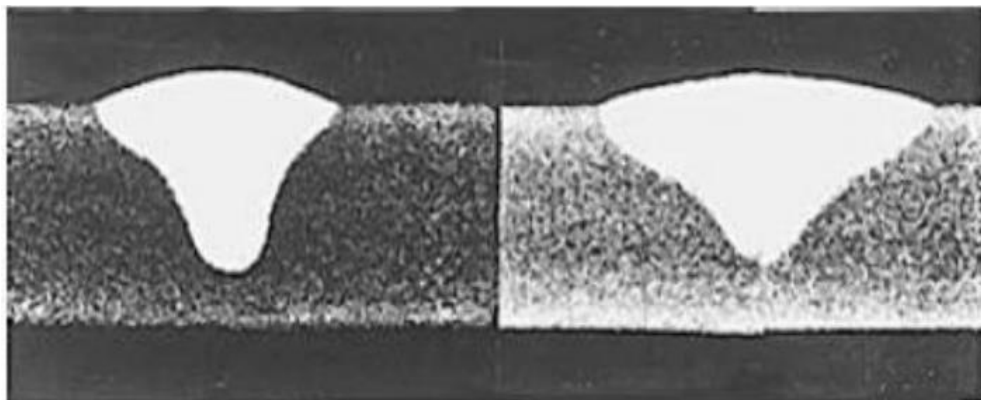
Tel kaynak yöntemi zamanla farklılaşıp geliştiğinden, farklı metal çeşitleri ve birleştirme metotları için koruyucu gazların da farklılaşacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bir başka metot olan metal aktif gaz kaynağı (MAG), farklı kaynak neticeleri ve karbon çeliği ve bazı diğer metaller için bir yöntem teşkil ettiğinden MIG yöntemine başka bir alternatif olmuştur. Bu iki kaynak yöntemi kıyaslamasında şu hususlardan bahsetmek mümkündür: MIG kaynak yönteminde tercih edilen soygazlar, MAG kaynak yöntemindeki CO_2 gazına kıyasla yüksek fiyatlıdır, nüfuz etme kapasiteleri azdır ve ultraviyole yayılımı daha fazladır, buna rağmen; oskidasyonu engellemesi ve yüzeyde pürüzsüzlük sağlaması MIG kaynağını cazip kılar. Bunlarla beraber MIG metodunun bir özelliği olan enerji verimliliği, çoğunlukla ön ısıtma işlemini ortadan kaldırır. Bu kaynak işlemi tüm kalınlıklardaki alüminyum alaşımları için uygun olduğu halde daha ziyade 3 mm ve üzeri kalınlıktaki parçaların kaynak edilmesinde rağbet gören bir yöntemdir. Bu durumun sebebi, MIG kaynak işleminde kaynak hızı ve erime gücünün TIG kaynağına göre daha

büyük olmasıdır (Tülbentçi, 1990). Şekil 2.10’da MIG kaynak yönteminin şekilsel gösterimi yer almaktadır.

Koruyucu gazlar düşünüldüğünde; helyum, argon ve bu gazların karışım halleri, alaşımlı ve paslanmaz çeliklerle beraber demir dışındaki metallere yönelik de tercih edilmektedir. Ayrıca, ark enerjileri kıyaslandığında, argon arkının enerjisi, argonun ısıl iletkenliğinin daha az olmasından dolayı helyum arkının dağılımından daha düzensiz biçimdedir. Bu duruma bağlı bir netice olarak, argon ark plazması oldukça fazla bir enerji çekirdeği ve bir dış mantoyu içerir. Daha düşük termal enerji ve bu durum sayesinde argon ark plazması aracılığıyla metal damlacıklarının transferi istikrarlı ve eksenel şekilde sağlanabilir. Damlacık biçimlerine ait bir görsel Şekil 2.11’de yer almaktadır.



Şekil 2.10 MIG kaynak yönteminin şekilsel gösterimi (Geliş, 2024)



Şekil 2.11 MIG, Argon gazı (solda) ve %75 He-%25 Ar (sağda) (Okay, 2016)

Sağladığı Avantajlar

* Yüksek kaynak hızı: MIG-MAG kaynağı, yüksek hızda kaynak yapma yeteneğine sahiptir, bu da kaynak işleminin verimliliğini artırır.

* Otomatik kaynak yapabilme: MIG-MAG kaynak, otomatik kaynak sistemlerinde kullanılmak için uygun bir yöntemdir. Bu, üretim sürecinin otomatikleştirilmesine olanak tanır ve insan hatasını en aza indirir.

* Az kaynak dumanı: MIG-MAG kaynağı, az miktarda duman üretir, bu da çalışma ortamının daha temiz ve sağlıklı olmasını sağlar.

* Yüksek kaliteli kaynaklar: MIG-MAG kaynağı, yüksek kaliteli kaynaklar yapmak için idealdir. Bu, kaynak işleminin sonunda daha az düzeltme ve işleme işlemi gerektirir.

* Çok yönlülük: MIG-MAG kaynağı, farklı kalınlıklardaki malzemeleri kaynak etmek için uygun bir yöntemdir. Ayrıca, farklı gaz ve elektrotlar kullanarak farklı malzemelerin kaynağını yapmak mümkündür.

* Az artık malzeme: MIG-MAG kaynağı, az miktarda artık malzeme üretir. Bu, malzeme tasarrufu sağlar ve aynı zamanda kaynak işleminin maliyetini düşürür.

* Kolay kullanım: MIG-MAG kaynak, diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha kolay kullanılır. Bu, kaynak işlemi için gerekli eğitim süresini azaltır ve kaynak işleminin daha hızlı gerçekleştirilmesini sağlar (Eryürek, 2007).

* Balistik performansın büyük ölçüde korunması.

Dezavantajları

* Gaz tüketimi: MIG-MAG kaynağı, gaz kullanımına bağlıdır. Bu, işlem sırasında daha fazla gaz tüketimine neden olabilir ve bu da işlem maliyetlerini arttırabilir.

* İyi havalandırma gereksinimi: MIG-MAG kaynağı sırasında açığa çıkan gazlar, iyi havalandırılmış bir ortamda olmadığında sağlık sorunlarına neden olabilir.

* Hassas ayar gereksinimi: MIG-MAG kaynağı, hassas bir ayar gerektirir. Bu, operatörlerin uygun ayarlamaları yapması gerektiği anlamına gelir. Aksi takdirde, kaynak işlemi kalitesi düşebilir (Eryürek, 2007).

2.5.6 Kaynak Kusurları

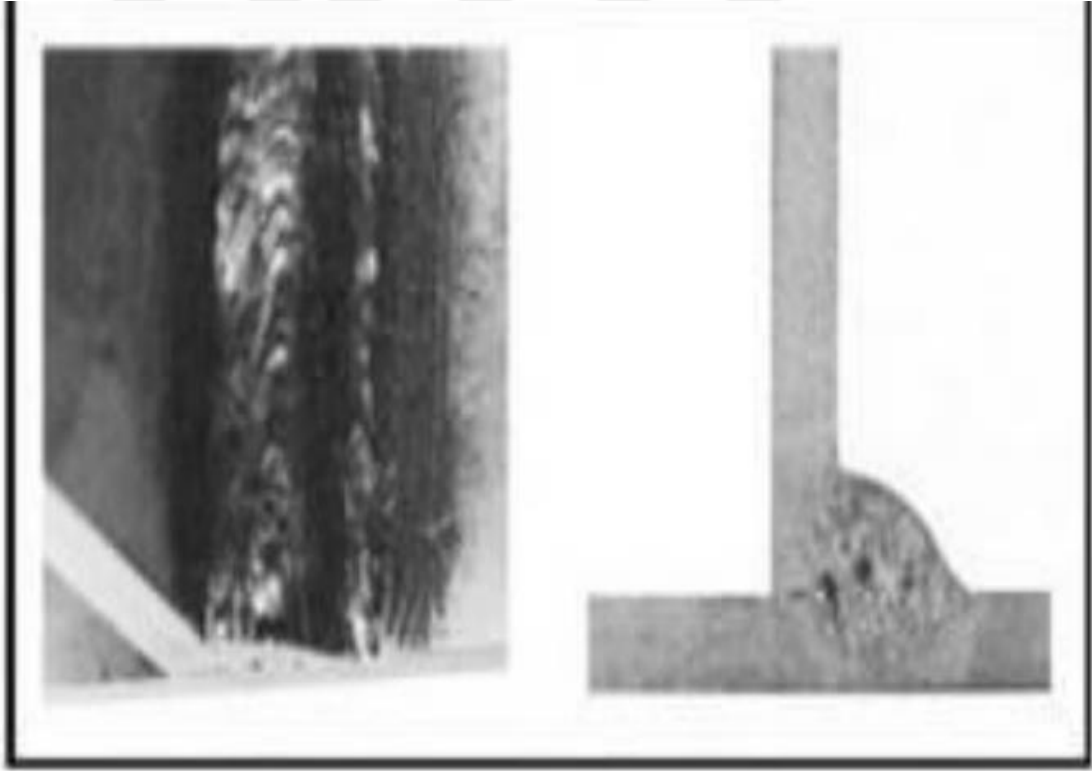
Her işlemde olduğu gibi kaynak işlemi de sağlamış olduğu avantajların yanı sıra birtakım olumsuzluklar da içermektedir. Teorik olarak kaynakta hata yapılmaması istenir. Fakat bu pratikte mümkün değildir. Önemli olan hatanın kabul edilir olup olmamasıdır. Yani istenilen özelliklere sahip olan dikişin elde edilmesidir. Hatanın az olması yöntem ve elektrot seçimine de bağlıdır. Kaynak hataları ikiye ayrılır;

- **Dış hatalar:** Genellikle gözle ve büyüteçle belirlenebilen hatalardır.

- **İç yapı hataları:** Genellikle mikroskop ile belirlenebilen gözle görülmeyen hatalardır.

2.5.6.1 Dikişlerde Gözeneklilik

Kaynak işlemlerinde en fazla gözlemlenen kusurlardan biridir. Kaynak işlemlerinde belirli düzeyde gözeneğe izin verilmesi durumunda bu durum çekme, yorulma ve süneklik mukavemetlerine olumsuz tesir eder. Alüminyum birleştirmelerinde gözenek oluşumunun esas sebebi ise, kaynak banyosu sırasında sıkışan gazlardır. Gazın kaçmaya fırsatı olmadan metal donduğunda, gözenek oluşur. Kaynak banyosunda kalan gaz miktarı banyonun soğuma hızına bağlıdır. Ana metalin kimyasal bileşimi içinde S(kükürt), P(fosfor) fazla ise gözenek riski artar. Gözenekler dinamik zorlamada mukavemeti azaltır. Gözenek çevrelerinde gerilme yığılmaları oluşur. Şekil 2.12’de kaynak işleminde meydana gelen gözenek oluşumu gösterilmektedir (Kurgan, 2023).



Şekil 2.12 Kaynak işleminde meydana gelen gözenek oluşumu kusuru (Kurgan, 2023)

Oluşan bu gözenekleri meydana getiren belli başlı etmenler bulunmaktadır. Çeşitli gözeneklilik nedenleri ve alınabilecek önlemler Tablo 2.6’da gösterilmiştir.

Tablo 2.6 Kaynakta gözenek kusuru nedenleri ve önleme yolları (Kurgan, 2023)

Nedenler	Etkenler	Önlemler
Gazların sıkışıklığı	Kaynak banyosundaki türbülans	Damlacık intikalini stabilize etmek için uygun akım
Hidrojen	Elektrot üzerinde hidrate oksit filmi MIG tabancasında yağlı sürme makaraları veya layner (kovan). Islak koruyucu gaz. MIG tabancasında su kaçağı. Yağlı iş parçası. Banyonun ilerisinde püskürme tanecikleri. Elektrot üzerinde yağ veya başka bulaşıcı maddelerin bulunması	Temiz, yüksek kaliteli elektroda dönüşme. Elektrot stokunu örtü altında bekletmek. Kurutulmuş olan ambalajı hazır olmadan açmamak. Makaraları temizlemek; layneri değiştirmek. Gazın çiğ noktasının kontrolü. - 40°C'ın üstünde çiğ noktalı şişeleri kullanmamak. Su kaçağı dolayısıyla fazla ısınan tabancanın tamiri. Levhanın temizlenmesi. Püskürmeyi asgariye indirecek kaynak koşullarına sağlamak.
Kaynak banyosunun hızlı soğuma temposu	Düşük ısı girdi oranı. Kaynaktan yüksek hızlı ısı çekilmesi. Eğer kullanılmışsa, destek çubuğunun alçak sıcaklığı. Destek çubuğunun oluk biçimi.	Daha yüksek akım şiddeti veya daha yavaş kaynak hızı kullanmak. Sıcak destek çubukları kök gözenekliliğini azaltır. Destek çubuklarında sıg, geniş oluklar, dar derin oluklardan daha iyidir
Hatalı tel sürme	Sürme makarası kayması. Gayd laynerinin (kovanının) aşırı eğilmesi eğik temas borusu elektrotlara kıvrım verir. Temas borusunda hasar.	Makaralarda basıncı yükseltmek, tırtıllı makara kullanmak, bunun U oluklu yerine V oluklu olması. Tabancaya giden kablounun iğim gereğini azaltmak için MIG makinasının yerini değiştirmek. Thyatron tüpü veya denge bataryasını değiştirmek.
Sair	Kısmi nüfuziyetli birleştirme. Çok pasolu kaynaklar.	Tam nüfuziyetli birleştirmeler kullanmak. Kritik uygulamalarda kök süneklilik çizgisini telâfi etmek için dış köşe boyutunu artırmak. Yüksek akım şiddeti yoğunluğu, her yüzde tek paso tekniği kullanmak.

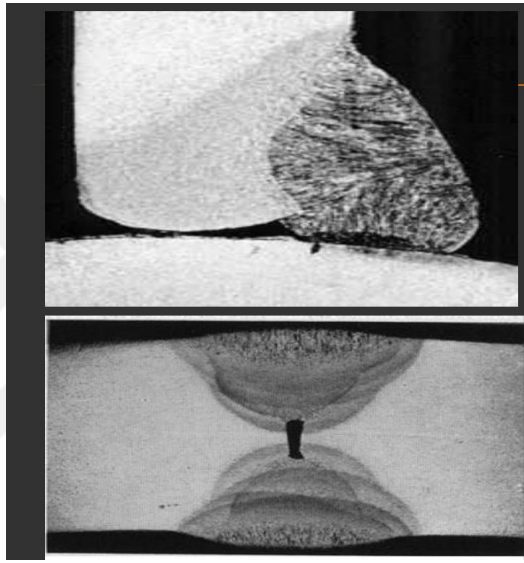
2.5.6.2 Nüfuziyet Azlığı

Kaynak işleminin kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan biri kaynağın parçalara tam olarak nüfuz edebilmesidir. Nüfuziyet azlığı, erimenin bütün malzeme kalınlığı boyunca

gerçekleşmemesi sonucunda meydana gelir ve bağlantının alt bölümlerinde kırılmaya etki eden oyuk ve çentikler oluşur. Şu sebeplerden ötürü oluşabilir (Kurgan, 2023):

- Birleştirme noktasının biçimiyle uyumlu bir elektrot çapının belirlenmemesi,
- Doğru akım şiddetinin ayarlanmaması,
- Uygun bir kaynak ağzının açılmaması,
- İyi çekilememiş bir dip (ilk) pasosu.

Şekil 2.13'te kaynak işleminde nüfuziyet azlığı kusuru sonucu oluşan yapı gösterilmektedir.



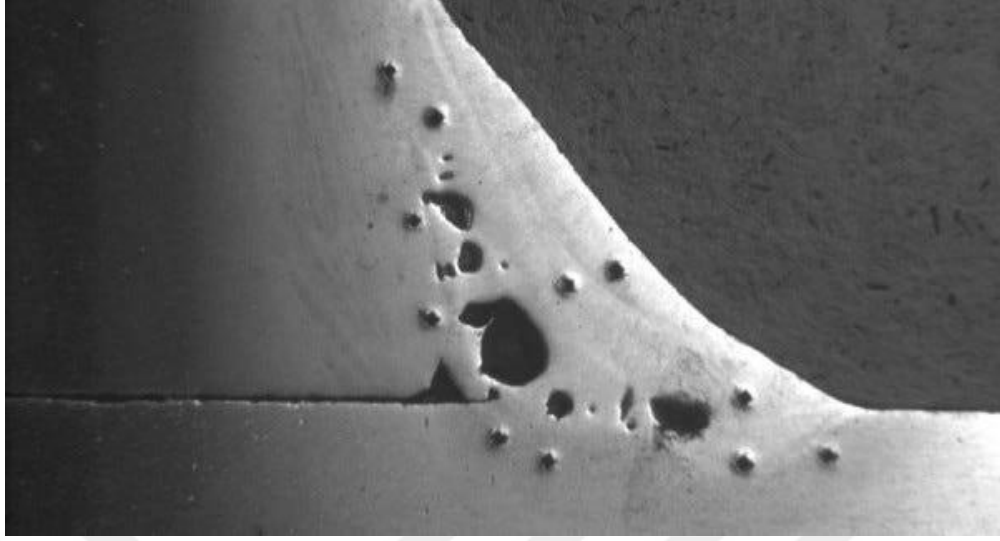
Şekil 2.13 Kaynak işleminde nüfuziyet azlığı kusuru (Kurgan, 2023)

2.5.6.3 Yanma Olukları

Sık görülen bir başka kaynak kusurudur. Ana malzemenin yan bölümlerinde meydana gelen oluklara denir. Genellikle eğer kaynak sırasında oluşan gazın miktarı fazla olduğunda, bu durum hacmi ani olarak yükseltir ve patlama meydana gelir.

- Hacimdeki hızlı artışı,
- Akımın şiddetindeki yükseklik,
- Kaynakçının çalışma hızının fazla yüksek olması,
- Elektrotu fazla zikzak hareketi yaptırılması,
- Elektrotun yanlış açı ile tutulması,
- Ana metalde bulunan aşırı pas ve elektrotun nemli olması gibi durumlar yanma oluşu oluşumuna sebebiyet vermektedir (Kurgan, 2023).

Şekil 2.14’te yanma olukları kusuru yer almaktadır.



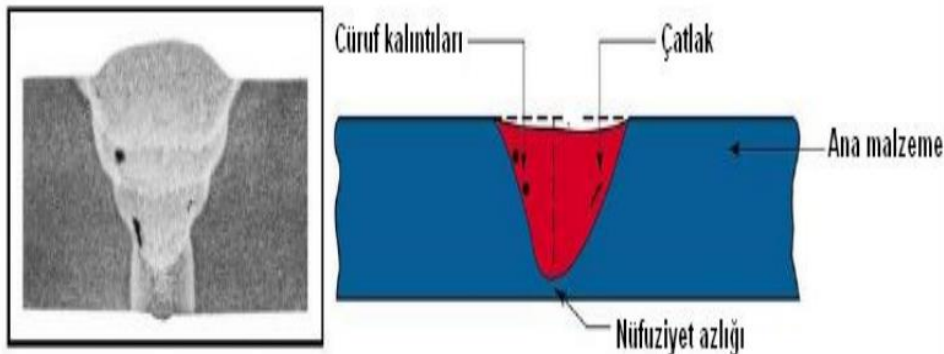
Şekil 2.14 Kaynak işleminde yanma olukları kusuru (“Kaynak Hataları,” 2024)

2.5.6.4 Cüruf Kalıntıları

Kaynak metalinde bulunan istenmeyen sülfür, oksit gibi maddelerin bulunması nedeniyle oluşan kusurdur. Üst üste gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde kaynak yüzeyinin cüruftan tamamen temizlenmesi gerekir. Aksi takdirde kaynak metalinde çatlak meydana gelir. Bu kusur aşağıdaki nedenlere bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir:

- Kaynakta 1. pasodan sonra temizlik işleminin yetersizliği,
- Kaynak sırasında sıvı metalin elektroda göre önde ilerlemesi,
- Pasolarda kaynak dikişi iç bükey olduğu için kaynak dikişinin curuflarının temizlenmesi zor olur (Kurgan, 2023).

Şekil 2.15’te kaynak işlemi sırasında meydana gelen cüruf kalıntıları kusuru yer almaktadır.



Şekil 2.15 Kaynak işleminde oluşan cüruf kalıntıları kusuru (Kurgan, 2023)

2.5.6.5 Kaynak Çatlakları

Kaynak işlemi sonucunda meydana gelebilecek en büyük olumsuzluklardan biri çatlamlardır. Kaynak çatlakları pek çok farklı etmene bağlı olabilir. Çatlak kaynak dikişinde kesinlikle bulunmaması gereken bir kusurdur. Genelde dinamik yüklenme halinde çatlağın boyutu küçük olsa da zamanla büyüyerek parçanın kırılmasına yol açar. Çatlak çentik etkisi yaparak malzemenin kırılmasına sebebiyet verir. Çatlak; kaynak bölgesinde, ITAB bölgesinde ya da esas metalde oluşabilir. Şekil 2.16’da kaynak çatlağı kusuru gösterilmektedir (Kurgan, 2023).



Şekil 2.16 Kaynak işlemi sırasında oluşan kaynak çatlağı kusuru (Kurgan, 2023)

2.5.6.6 Sıçramalar

Kaynak işlemi sırasında ergimiş metalin sağa sola sıçraması sıçrama hatasını oluşturur. Özellikle akım şiddeti yüksek olduğunda ve nemli elektrot kullanıldığında ortaya çıkar. Bu hata kaynak dikişinin görünümünü bozar. Ergimiş metal sıcaktır. Düştüğü yeri yakar ve operatöre zarar verir. Metal yan yüzeylere sıçradığı zaman elektrot dolgusunda kayıp olur. Sıvı metal damlacığının düştüğü yeri temizlemek gerekir buda işçilik ve maliyeti artırır (Kurgan, 2023).

2.5.6.7 Çarpılma (Distorsiyon) Hatası

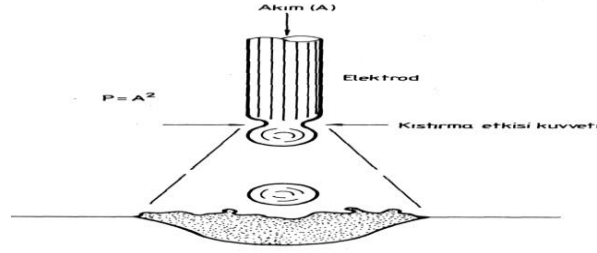
Nötr eksene simetrik kaynak yapıldığı zaman çarpılma oluşabilir. Kaynak metalinin üst kısmında ergimiş metal fazla olduğu için üst kısımda büzülme fazla, alt kısımda ise büzülme azdır. Bu büzülme farkından dolayı çarpılma olur. Bu hatayı önlemek için x –

kaynak ağzı açılır ve nötr eksene simetrik kaynak yapılır. Parçayı kaynatmadan önce puntalamak çarpılmayı engeller. Toz altı kaynağında hızlı kaynak yapmak çarpılmayı azaltır (Kurgan, 2023).

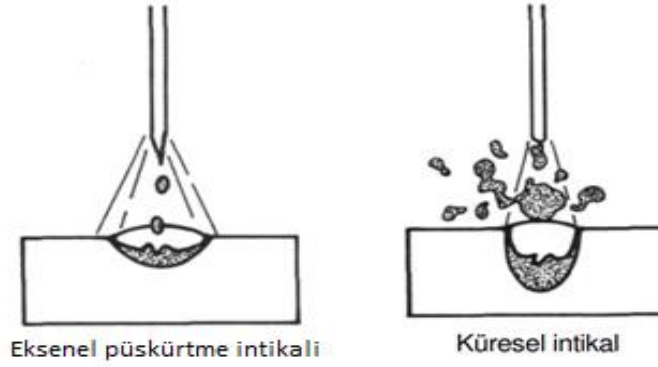
2.5.7 Ark karakteristikleri

Kaynak işlemi için önemli konulardan biri de ark karakteristiğidir. Kaynakta akım şiddetinin artması metal intikalın kısa devre durumundan küresel hale ve ardından da püskürme metal intikali durumuna sokar. Kaynak yöntemlerinden biri olan MIG tekniğinin karakteristik özellikleri özetle, üç esas metal intikal şekliyle açıklanabilir. Bunlar: küresel intikal, kısa devreli intikal ve eksenel püskürme intikaldir. Küresel intikaller ve eksenel püskürme bağlı oldukları bir yüksek ark enerji kaynağı bulunur. Elektrotun kesitinde birimi başına yoğunluk olarak 80-450 A/mm² arasında değişen akım şiddeti düşer. Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının çeliğin MIG kaynağı ve TIG kaynağındaki yoğunluğun ortalaması 15.5 A/mm²'dir.

Çok ince çapa sahip elektrotlardaki püskürme biçiminin birtakım istisnai durumları hariç, küresel intikal ve eksenel püskürmeler tabii şekilde, en az 3.2 mm kalınlığa sahip malzemede, düzlemde yatay pozisyonlarla sınırlı olurlar. Bir kesintisiz veya akım arkıyla uygulanan püskürtme, alüminyum alaşımlarının hemen hemen tüm MIG kaynak işlemlerinde uygulanır. Birtakım özel uygulamalarda ise küresel intikalle kesintisiz akım kullanılır. Enerji seviyesi ortalamasının azaldığı pulslu püskürme intikal bir başka istisnai durum oluşturur. Kısa-devreli intikal, çoğunlukla en fazla 3.2 mm kalınlığa sahip bir görece düşük enerji sürecidir; fakat bu tüm pozisyonlarda uygulanır. Geçiş-transfer mekanizmasının (intikal) ve bunun üç esas şeklinin basitçe tanımlanmasında yer çekimi ile "kısırtma etkisi" kuvvetlerinin dikkate alınması gerekebilir. "Kısırtma etkisi", akımın elektromanyetik etkisinin sonucu olarak oluşan, akımı taşıyan elektrottan sıvı damlanın ani sıkılmasıdır. Bu, eksenel püskürme intikalın bir hareket noktası ve kısa-devreli intikalın bir etkenidir. Şekil 2.17'de kısırtma etkisi ve Şekil 2.18'de kaynak metali intikal karakteristikleri gösterilmektedir.



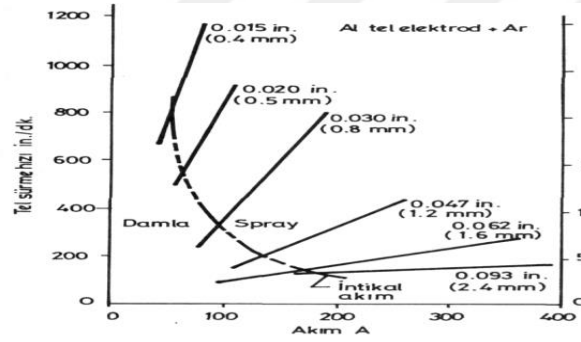
Şekil 2.17 Kısıtma etkisinin gösterilmesi
(Oğuz, 1990)



Şkil 2.18 Kaynak metali intikal karakteristikleri (Oğuz, 1990)

İletkenlerde kısıtma etkisinin kuvveti, geçen akım değerinin karesiyle orantılıdır. Küresel intikal, yerçekimi kuvvet etkisi ile hesaplanır. Küreselden püskürmeye intikalın bulunduğu kesintisiz akım ile akımın yoğunluğunun aralığı, kullanılan elektrot çapı ve ark voltajına bağlı olarak değişir. Bir 1.2 mm elektrot ve 22-31 V aralığındaki gerilim için intikalın türündeki değişim yaklaşık olarak 120 A veya 105 A/mm² 'de meydana gelir. Elektrot çapı 2.4 mm'ye yükseltildiğinde intikal akımı yaklaşık olarak 220 A'e yükselir, fakat akım yoğunluğu 46 A/mm² 'ye düşer. Püskürme intikalın iki kritik özelliği bunun peklik ve darlıktır. Eksenel püskürme intikalinde (minimum %80 oranında Ar ile gaz korumasında) ark içinden metalin ilerleyişi, elektrot çapına eşit veya bundan daha küçük damlacıklar halinde oluşur. Damlacıklar elektrottan kaynak banyosuna düz çizgide eksenel şekilde yönelirler. Ark katı olmayan ve stabil yapıdadır. Bu durumun neticesinde azalmış püskürtme ve görece düzgün yüzeye sahip bir dikiş elde edilmiş olur. Ark (plazma) enerjisi koni şekilli bir düzenle yayılır. Bu, dikiş kenarlarını iyi "yalama" karakteristiği ile neticelenir, ancak nispeten sık bir nüfuziyet meydana getirir. Nüfuziyet, örtülü elektrotla metal-ark kaynağı ile elde edilenden daha derin, yüksek enerji (yüksek akım şiddeti) ile MIG küresel intikalinkinden fazla olmaz. Eksenel püskürmenin biçimi, belirli bir elektrot çapına karşılık bir minimum akım şiddeti düzeyinde oluşur. Bu akımın

sahip olduğu şiddet genellikle "geçiş akım şiddeti" olarak isimlendirilir. İyi saptanmış bir intikal akım şiddeti, sadece asgari %80 argon içeren bir gaz koruması halinde mevcut olur. İntikal akım şiddetinin altında akım düzeylerinde, damla boyutu büyüyerek elektrot çapını geçer ve bu çalışma koşulunda ark kesinlikle stabil olamaz. Küresel intikal CO₂ veya helyum korumasında gerçekleşir. Bu türde arkın içinden metal geçişi, düzensiz şekilde ve gelişigüzel yönlendirilmiş küreciklerden ibaret olur ve büyük ölçüde püskürtmeler gerçekleşir. Helyumca zengin gaz karışımları tercih edildiğinde daha geniş bir dikiş ve argondakine benzer bir nüfuziyet derinliği elde edilmesiyle beraber daha iyi dikiş profili elde edilir (Oğuz, 1990). Şekil 2.19'da MIG elektrotlarının yanma eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 2.19 Alüminyum MIG elektrotlarının yanma eğrileri (Oğuz, 1990)

2.6 Balistik

2.6.1 Balistiğin Tanımı ve Tarihçesi

Balistik kelime manası olarak atış bilimi anlamına gelmektedir ve cisimlerin hareketleri ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Daha detay tanım olarak balistik, ateşli silahlarda, mühimmatın barut gazı sayesinde oluşan basınçla fırlayarak hedef noktaya varıncaya dek gerçekleşen devinimini konu edinen bilim dalıdır. Balistik; iç (internal), dış (external) ve terminal (hedef) olarak üç grupta incelenir.

Ateşli silahlarda ateşlemenin başlamasından mühimmatın namluyu terk etmesine kadar gerçekleşen olayların tamamı iç balistik kapsamına dahildir (Al-khaf, 2019). Dış balistik; silahın namlusundan çıkan mühimmatın hedefe ulaşıncaya dek geçen süreçteki yörünge üzerindeki hareketini konu alır (Çelikel, 2008). Hedef balistiği; mermilerin hedefte

oluşturduğu tesirleri inceler. Bu tesirler; zırhlı hedeflerde delik meydana gelmesi, yanma/patlama, sis, zehirli gaz, parça etkisi ve radyoaktif tesirlerdir (Akçay, 1986).

Balistik bilimi için başlangıç noktasının barutun kullanılması ile başladığı söylenebilir. Çinliler 10. yüzyıl öncesinde güherçile bazlı barut kullanmışlardır, 12. yüzyılda Müslüman Endülüsler rahatça tutuşabilen tozlar üzerine çalışmalar yapmışlardır, Hindistan’da barutun 13. yüzyılda kullanılmasına karşın barutun ilk bulunuşu konusu net değildir (Çelikel, 2008). 1700’lerde Benjamin Robins adlı bilim adamı geliştirdiği balistik sarkaç sayesinde mermilerin namluyu terk ederken sahip oldukları sürati ölçmüştür. Count Rumfort isimli bir araştırmacı 1700’lerin sonunda ilk kez barut gazındaki basıncı bilimsel olarak hesaplamıştır. Balistik konusundaki çalışmalar giderek hızlanmış ve 18. yüzyılın sonuna gelindiğinde Rumfort mühimmat uçuş yörüngesi ve namlu ağzı çıkış süratini ve basınç/atış mesafesindeki değişimi, hesap etmiştir. 1800’lerin ilk yarısında yılındaki çalışmalar neticesinde kara barut için kendisinin oluşturduğu kanununu ortaya koyulmuştur. Piobert isimli bir bilimci, namlu içindeki gaz hareketlerinin çözüm yolunu yaklaşık olarak ortaya koyarak ateşli silahlardaki etki-tepki kuvvetleri konularında çalışmalar gerçekleştirmiştir. Rodman, 1800’lerin ikinci yarısında ise çalışmasında gaz basıncının tesiri ile ezilen kurşunun ezilme miktarını kullanarak en yüksek gaz basıncını hesaplamış ve kapalı kaptaki basınç-yoğunluk ilişkisine açıklık getirmiştir. Takip eden dönemde yapılan bir diğer çalışmada Andrew Noble, geliştirdiği masterlar ile daha kesin basınç ölçüm sonuçları elde etmek mümkün hale gelmiştir. Aynı dönem içerisinde Resal yaptığı çalışmalarda, balistiğin termodinamik modelini ortaya koyan barutun yanma enerji eşitliğini bulmuştur (Özer, 2008). Bu yüzyılda bu konu üzerine yapılan çalışmalar önemli gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Balistik biliminin temelleri 19. yüzyılda atılarak bir bilim dalı halini almıştır. Zamanla daha fazla araştırmacı ve bilim adamı balistik konusu üzerine çalışmaya başlamıştır. 1835 yılında gerçekleştirilmiş olan bir diğer önemli çalışmada Henry Goddard, bir olayda kullanılmış olan mermi çekirdeği ile kendisinin dökmüş olduğu ve aynı çentiği taşıyan mermi çekirdeklerinin benzerliğini karşılaştırarak katilin yakalanmasına yardım etmiştir. Bununla birlikte adli balistik bilimi Goddard tarafından kavram haline getirilmiştir. 1863 yılındaki Amerikan iç savaşı sırasında General Jackson’un yaralanarak ölmesi ile mermi çekirdeğinin şekli ve çapının tanımları yapılmıştır. Bu çekirdek incelendiğinde 67 kalibre (0.675 inç çaplı) ve yuvarlak şekilli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu türdeki mermi çekirdeklerinin eski tip piyade tüfeklerine ait olduğu ve generalin kendi askerlerinden biri tarafından yanlışlıkla

vurulduğu belirlenmiştir. 20. yüzyılın başlarındaki gelişmelerle mermi çekirdekleri ve mermi kovanlarının atıldığı silah ile ilişkilendirilmesi mümkün olmuştur. Balthazard adlı başka bir araştırmacı 1900'lerin ilk çeyreğindeki çalışmasında, deneme atışlarından elde edilen mermi çekirdekleri üzerindeki set izlerinin fotoğraflarını çekerek mermilerin hangi silahtan ve hangi kovandan atıldığını belirlemeye yarayan bir teknik geliştirmiştir. Aynı dönemde New York şehrinde, mermi kovanının ayırt edilmesinde mukayese mikroskobu kullanılmaya başlanarak bugünlere kadar süren bir yöntem olmuştur. İlerleyen dönemlerde namlunun içindeki setlerin kıvrımlarını ölçebilen Helixometer ortaya çıkmıştır (Çelikel, 2008). II. Cihan Harbi'nden sonra bilgisayar programları sayesinde kompleks sayısal problemler daha kolay çözülebilir hale gelmiştir (Özer, 2008). Balistik bilimi adına geçmişten günümüze kadar yapılmış olan bu çalışmalar, ateşli silah teknolojisinin gelişiminde büyük rol oynamıştır. Gelişen balistik bilimi beraberinde yeni silah teknolojilerini getirerek muhabere alanında kullanıma sunmuştur. Günümüzde artık çok daha isabetli atışlar yapan ve tesir gücü artırılmış mühimmat tipleri bulunmaktadır. Balistik bilimindeki ilerlemeler, korunma maksatlı geliştirilen zırh sistemleri üzerine yapılan çalışmaları da artırmaktadır.

Adli vakaların araştırılıp açıklığa kavuşturulması konusunda da balistik biliminden faydalanmak önem arz etmektedir.

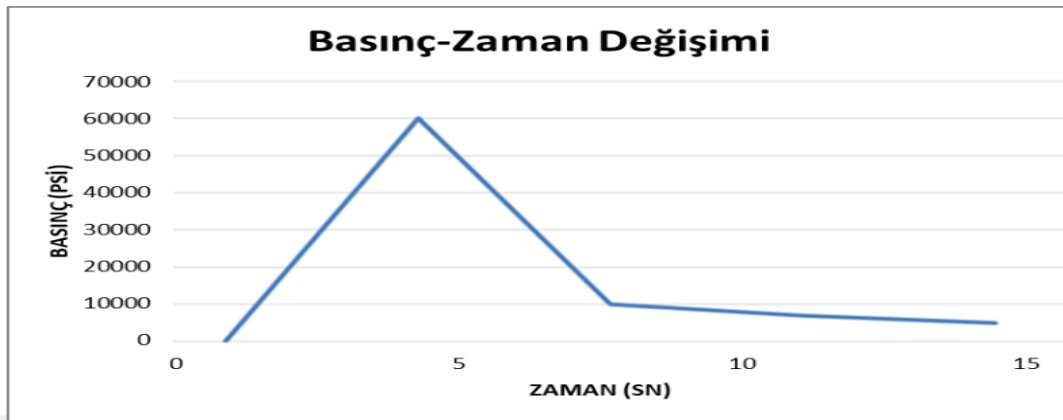
2.6.2 İç Balistik

Balistik kavramının başlangıç noktasıdır. Genel anlamda iç balistik, silah içinde meydana gelen patlamadan merminin namluyu terk ettiği ana kadar meydana gelen olaylarla ilgilenmektedir. Ateşleme olayı, sevk barutunun yanması ve bunun sonucunda namlu içerisinde yükselen basınç, sıcaklık ile merminin namlu içindeki hareketi iç balistiğin konusu dahilinde olan başlıklardır. En basit haliyle ateşleme sonrasında sevk barutunun yanması sonucunda namlu içerisinde oluşan basıncın mermiyi dışarıya atmasına kadar olan süreci doğrudan etkileyen barut, namlu ve mermi özellikleri iç balistik kavramı çerçevesinde incelemektedir (Al-khaf, 2019; Carlucci & Jacobson, 2008).

Askeri amaçlı kullanılan silahlar, askeri amaçlı olmayanlara kıyasla sıcaklık ve basınç açısından daha zorlu koşullarda kullanılırlar. Namlu içindeki merminin hareketi, gazın mermiye uyguladığı tesire bağlıdır. Bu hareket esnasında, bulunmuş olduğu namlu üzerine basınçta bulunurken sürtünme kuvveti ortaya çıkar. Gazın sıcaklığının çok

yüksek olması, namlunun çok fazla ısınmasına neden olduğunda kimyasal reaksiyon oluşabilmektedir.

Esasen silahlar birer ısı makinesidir. Çalışma prensibi otomobil motorları gibidir. Hacmi artan gaz bir pistonun değil, merminin harekete geçmesini sağlar. Ateşlemenin gerçekleşmesi neticesinde yüksek basınçla yayılan gazın basıncı yükselirken, mermi sürtünme ve ataletten dolayı sabit durur. Fakat, basıncın daha fazla yükselmesi, merminin harekete geçmesine sebebiyet verir. Merminin hareketinden dolayı hacim artarken, basınç bir maksimum noktaya ulaşıncaya kadar ani bir şekilde artar. Sonraki süreçte basınç azalır, merminin silahı terk etmesi esnasında bu miktar maksimum değerın %10-30'u arasında değişiklik gösterir. Silahın ağzında oluşan basınç sayesinde, mermi namluyu terk ettikten sonra da belli bir mesafeye kadar hızlanır. Genişleyen gazların bir kısmının diğer yönde çıkmasıyla silaha etki eden kuvvetler dengelenmiş olur. Merminin hızı ve gaz basınçlarını zaman ve merminin namlu içindeki hareketine bağlı olarak ortaya koyan formüller kullanılmaktadır. Günümüzün top mermilerinde yerçekimi ivmesinin 20.000-30.000 katlarına kadar ivme sağlanırken, yüksek gerilmeler oluşur. Bundan dolayı, iç balistik namlu gerilmesi değerinin hesap edilmesini kritik bir konu olarak ele alır. Şekil 2.20'de ateşleme yapıldıktan sonraki basıncın zamanla değişiminin grafiği yer almaktadır (Yavaş, 2009).



Şekil 2.20 Ateşleme yapıldıktan sonraki zamanla basınç değişimi (Özbağdatlı, 2023)

İç balistik kapsamındaki bir başka konu ise silah namlusu içinde bulunan spiral biçiminde yiv set yapılarıdır. Yiv-setler, bir merminin hedefe kararlı bir rota izleyerek ulaşmasını sağlar (Yavaş, 2009). Şekil 2.21'de bir yiv-set yapısı görülmektedir.



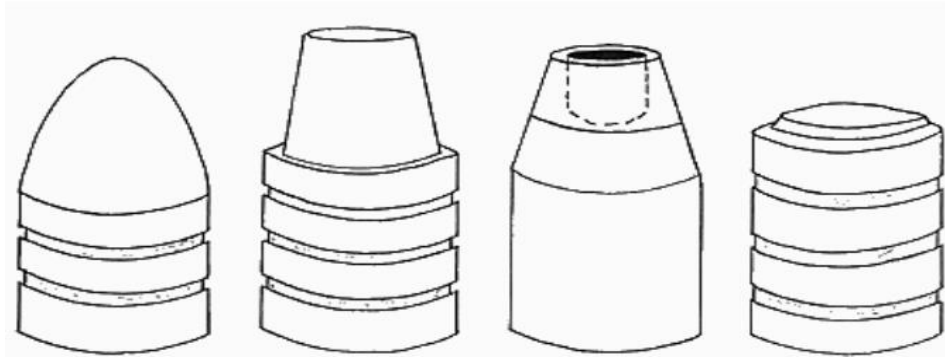
Şekil 2.21 Yiv-set yapısı (“yiv,” 2024)

]

2.6.3 Dış Balistik

İç balistik kısmının noktalandığı yerde dış balistik başlamaktadır. Dış balistik, bir merminin silahın namlusundan hedefe doğru uçuşunun incelenmesidir. Dış balistik verilerinin hesaplanabilmesi için iç balistik verilerinin tam ve doğru olması gereklidir. Dış balistik, temel olarak merminin uçuş esnasında maruz kaldığı yer çekimi, sürtünme kuvveti ve hava koşulları gibi etmenlerin yörünge, stabilite, hız ve çarpma açısına olan etkisini incelemektedir. Bunların hesap edilebilmesi için iç balistik ve merminin tasarım bilgilerinin bilinmesi gereklidir. Mermi çıkış açısı ve hızı, namludaki yiv-set sayısı, geometrisi ve ağırlık bilgileri olmadan dış balistik hesapları yapılamaz. Bu sebeple dış balistik, namlu ve mermi tasarımcılarına da yol göstermekte ve tasarımcılar farklı türlerde mermiler dizayn etmektedirler (Al-khaf, 2019; Carlucci & Jacobson, 2008).

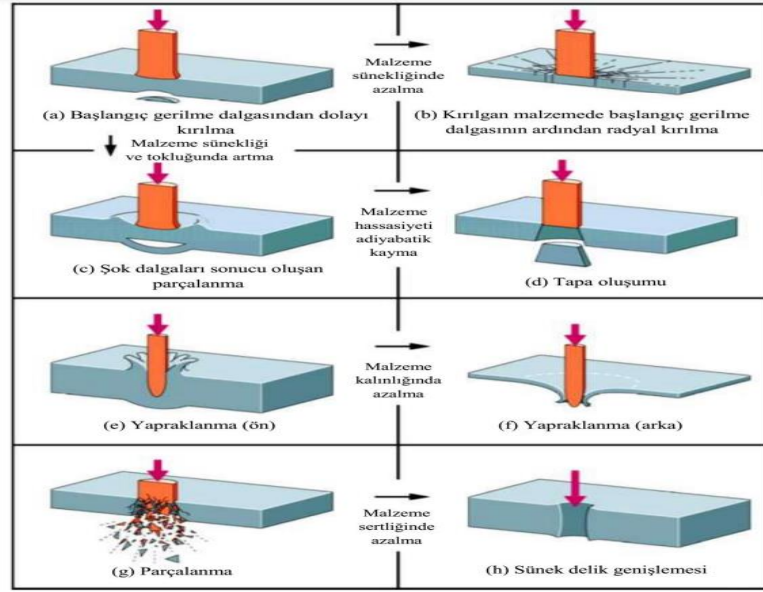
Mermilerin izlediği rota anlamında konuşulacak olursa günümüzdeki mermiler yiv-set yapıları sayesinde çok daha kararlı bir doğrultuda hedefe ilerler. Bunun nedeni yiv-setler sayesinde kazanılan dönel hareketin sağladığı jiroskobik etkidir. Bu etki nesnelerin hedefe doğru ilerlerken, dış etkilere karşı gösterdiği direnci artıran bir kuvvettir. Bu etki Mermi tasarımı ve namlu boyutunun optimizasyonu balistik verimi (η) artırarak yanma enerjisinin etkin kullanımını sağlar. Mermi yörüngesindeki hareketini tamamlayıp hedefe ulaştığı anda hedef (terminal) balistiğinin konusu başlar. Şekil 2.22’de belli başlı mermi tasarım tipleri görülmektedir.



Şekil 2.22 Mermi tasarımları (“Guns,” 2024)

2.6.4 Hedef Balistiği

Bu çalışmanın konusu ile doğrudan ilişkili olan balistik türüdür. Hedef balistiğinin araştırma konusunun oluşabilmesi için merminin hedef ile etkileşime geçmiş olması gereklidir. Hedef balistiği ile av tüfeği, şarapnel saçmaları ve mermi çekirdeğinin katı yüzeylerde meydana getirdiği etkilerin nedenleri, mermi çekirdeği ve hedefin hareketleri açısından incelenip araştırılır (Ergun, 2023). Doğal korumanın yetersiz olduğu durumlarda zırh, korunma sağlamak amacıyla kullanılan bir malzemedir. Öncelikle kalın olmayan zırh materyalleriyle birtakım denemeler gerçekleştirilir ve bu testler sırasında mermi hedefi deler. Ardından hedefin mermi üzerindeki tahribatları araştırılır. Bu testler neticesinde ulaşılan sonuçlar değerlendirilir ve hedef-mermi etkileşimi başarıyla kavranırsa, zırh dizaynına yönelik son derece faydalı olacağı değerlendirilmektedir (Rosenberg, 2020). Hedefin mermi üzerindeki etkileri de hedef balistiği kapsamına dahildir. Hedef balistiği konusu dahilinde bir alt başlık olarak değerlendirilen yara balistiği de yer almaktadır. Yara balistiği, merminin hedefinin insan olduğu durumlarda, mermi ve insan vücudu arasındaki etkileşimleri inceleyerek tedavi yöntemlerinin geliştirilmesinde ve mermi tasarımları konusunda önemli bilgiler sağlar. Pek çok askeri uzman muhabere sahasında, muhasımı yaralamanın öldürmekten daha fazla fayda sağladığı görüşündedir. Bunun nedeni yaralı birinin etrafındakilerce taşınma ve tedavi edilme gerekliliğidir ve böylece 2 ve daha fazla sayıda muhasım ekarte edilmiş olur. Bu amaçla yaralama maksatlı mermi tasarımları da bulunmaktadır. Şekil 2.23’te hedefin mekanik özelliklerindeki farklılıklara göre, mermiyle hedef arasındaki etkileşimin muhtemel neticeleri gösterilmektedir.



Şekil 2.23 Balistik darbe etkisi altında oluşan hasar mekanizmaları
(Wetzel, 2009)

2.6.5 Patlayıcı Maddeler

Balistik biliminin başlangıcı kabul edilen barutun da yer aldığı bir madde grubudur. Patlayıcı maddeler, kimyasal enerji depolayan, darbe, sürtünme, kıvılcım veya şok gibi dışarıdan gelen bir etki sonucu hızla kimyasal reaksiyona giren, ani olarak büyük miktarlarda ısı ve gaz yayan kimyasal maddelerdir (Akçay, 2010). Patlama için dışarıdaki oksijene ihtiyaç duymaksızın hızlı bir şekilde reaksiyona girerek yüksek miktarda ısı ve basınç açığa çıkaran maddeler enerjik veya enerjetik maddeler olarak adlandırılmaktadır (Şen & Bozkuş, 2019). Burada, oksijen miktarının fazlalığı, azot oksit oluşmasına, azlığı ise eksik yanma meydana geleceği için karbon monoksit (CO) oluşumuna yol açar (Dağçimen, 2006).

Patlayıcılar, dışarıdan gelen etki veya şok sonucu kimyasal reaksiyona girmemeleri veya kimyasal reaksiyon sonucu ısı ve gaz açığa çıkaramamaları halinde patlayıcı olarak kabul edilmezler. Örneğin azot ve oksijen kimyasal reaksiyona girerek azot oksit meydana getirdiklerinde, ortama ısı vermeyip aksine ortamdan ısı çektiklerinden patlayıcı olarak kabul edilmezler (Akçay, 2010).

2.6.6 Hedefte Hasar Oluşturma

Balistik biliminin ilgi alanlarından biri de hedefte oluşan hasarlardır. Hedefte oluşan hasarın incelenmesi özellikle silah ve mühimmat tasarımcılarına önemli veriler

sağlamaktadır. Bununla birlikte hedefin insan olduğu durumlarda yapılan araştırmalar yeni tedavi yöntemlerinin geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

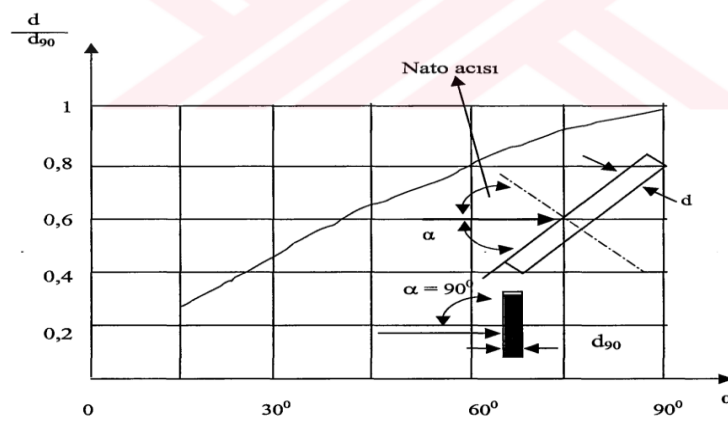
Hedefte oluşan hasar atılan merminin türü ve özelliklerinden bağımsız olarak, merminin vuruş açısı ile hedefe girmesi ile oluşur. Kullanılan mühimmatın türü ve özelliklerine bağlı olarak hedefte meydana gelen hasarın oluş biçimi de farklılık göstermektedir. Bu çalışmanın konusu kapsamında yapılacak deneylerde mermiler zırh levhaları üzerinde iki farklı şekilde hasar oluşturabilir:

- 1- Parça tesir etkisi: Mermi muhteviyatında bulunan infilak maddelerinin patlaması ile mermi gövdesinin parçalara ayrılarak levhaya hasar vermesidir.

Mermi gövdeleri 30-40 RC sertliğe sahip döküm veya dökme çelikten imal edilmektedir. Bir merminin hedef üzerindeki tesirini ölçmek adına genellikle 12.7, 6.35 veya 3.1 mm kalınlığa sahip levhalar kullanılır. Eğer mermi 12.7 mm'lik levhayı delip geçiyorsa, bu merminin hafif zırhlı araçlar üzerinde, 6.35 mm'lik levhayı deliyorsa zırhsız araçlar üzerinde ve 3.1 mm'lik levhayı deliyorsa alanda duran uçaklar üzerinde etkili olacağı düşünülebilir (Öztürk, 1988).

- 2- Darbe etkisi: Merminin hedefe çarptığı esnada sahip olduğu kinetik enerjisinin oluşturduğu etkidir. Bu çalışmada balistik test aşamasında kullanılan kinetik enerjili zırh delme mermileri bu etkiyi gösterir. Kinetik enerjili mermilerin zırh delme güçleri merminin çapına, enerji ve vuruş açısına ve mermi ile zırh malzemelerinin kalitesine bağlıdır.

Şekil 2.24'te delme gücünün vuruş açısına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. d/D oranı zırh delici mermilerde delme gücü olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.24 Delme gücünün vuruş açısına bağlı olarak eğişi (Öztürk, 1988)

LİTERATÜR TARAMASI VE DEĞERLENDİRMESİ

3.1 Yapılan Çalışmalarda Kazanılmış Deneyimler ve Öğrenimler

Geçmişten günümüze kadar yapılan araştırma ve çalışmalarda çeşitli malzemelerin mekanik ve balistik dayanımları test edilip gözlemlenerek zırh malzemesi olarak uygunluğu ve performansı ile birlikte kaynak gibi çeşitli işlemlerin malzemenin balistik ve mekanik dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

İyi bir birleştirme taslağı, kaynak ısısı verimliliği, ısıya maruz kalan bölgenin büyüklüğü, sertlik ve mikroyapıdaki değişimlerin mekanik ve balistik mukavemeti etkileyen en başta gelen etmenler olduğu araştırmaların önemli sonuçlarından biridir. Bu önemli parametrelerin optimum seviyede belirlenmesi kaynaklı malzemelerin mekanik ve balistik karakteristiklerini muhafaza etmesinde faktördür. Kaynaklı birleştirmelere ilişkin gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları yüksek sertlik değerine sahip çeliklerin balistik koruma maksatlı zırh sistemlerinde tercih edildiğini ortaya çıkarmıştır (Madhusudhan vd., 1998). Bu çeliklerin kaynak birleşim bölgelerinin ısı etkisi sebebi ile sertliklerinin azaldığı yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Sertlikte meydana gelen bu düşüşün balistik başarımın derecesini belirleyen en kritik husus olduğu belirtilmiştir (Madhusudhan & Mohandas, 1996). Isı tesiri altındaki bölgenin sertliğindeki düşüşün, birleştirme esnasında ortaya çıkan kaynak ısı döngüsüne bağlı bir fonksiyon olduğunu ve sertlik düşüşünün çelikteki faz dönüşüm kinetiğine ve kimyasal bileşime endekli olduğu tahmin edilmektedir (Mohandas vd., 1999).

Bu konuya ilişkin gerçekleştirilen pek çok çalışma farklı zırh yapılarının balistik performans konusunda birbiriyle mukayese edilmesini sağlamaktadır. Demir ve arkadaşlarının çalışmasında, 7075 ve 5083 alüminyum alaşımlarının ve HSLA ve AISI 4140 çeliklerinin 7,62 mm'lik zırh delici özellikteki mermiler yardımıyla balistik ve mekanik karakteristikleri araştırılmıştır. Bu alaşımların içinde 7075- T651 alüminyum alaşımının en yüksek balistik başarımı gösterdiğini ve zırhın toplam ağırlığında ortalama %25 oranında bir azalmayı mümkün kıldığını ortaya çıkarmışlardır (Sadanandan & Hetherington, 1997). Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının sertliği arttığında zırh

delici mermiler karşısında dayanıklılığının da artmış olduğunu ifade etmişlerdir. Başka bir çalışmada Übeyli ve arkadaşları yapmış oldukları bir çalışma ile, farklı kalınlıklara sahip iki türden materyali (Al2024-0 ve Al2024-T6) destek bloğu ve farklı kalınlıklardaki alümina metalini öncül seviye olarak değerlendirdikleri bir uygulama icra etmişlerdir. Yapılan çalışmada ısıtıl işlem yardımıyla mekanik kalitesi yükseltile Al2024-T6 alaşımının Al2024-0 alüminyum alaşımına göre daha yüksek balistik koruma sağladığını tespit etmişlerdir. (Übeyli vd., 2008). Sadanandan ve Hetherington isimli iki araştırmacının çalışmasında iki farklı malzeme (Al 5083-0 ve 4360 sıcak hadde çeliği) destek katmanı ve alüminayı ise ön katman olarak kullanıldı. Bu çalışmada, farklı açılardaki zırh yapılarına bilye ve 7,62'lik zırh delebilen mühimmatlarla balistik başarımlar deneyi uygulamışlardır. Çarpma açısının arttığında her iki zırh grubunda V_{50} sınır değerinin arttığını gözlemlemişlerdir (Sadanandan & Hetherington, 1997).

Gerçekleştirilen uygulamalarda araştırmacılar artan ısı girişi miktarının ısı etkisi altındaki bölgelerin sertliğinde düşmeye yol açtığını ve alanını büyüttüğünü ifade etmişlerdir. Araştırmalar bununla beraber sertlik kaybı yaşayan ve alanı genişleyen ısı etkisindeki bölgedeki balistik başarımlarının olumsuz etkilendiğini ifade etmektedir (Madhusudhan & Mohandas, 1996). Bu konuya ilişkin G. Madhusudhan Reddy'nin arkadaşları ile birlikte ortaya koyduğu çalışmada sertleştirilen ve menevişlenen yüksek sertlikteki düşük alaşımlı çeliği üç farklı teknikle kaynaklamışlardır ve farklı kaynaklama metotlarının balistik performansa tesirini karşılaştırma fırsatı bulmuşlardır. Araştırmanın sonucunda, en iyi balistik başarımları sahip olduğu ince taneli yapıdan dolayı koruyucu gaz metal ark kaynak metodunun, en düşük balistik başarımları iri taneler sebebiyle örtülü elektrot ark kaynak işleminin sağladığını, tungsten gaz ark kaynağının da ortalama bir balistik performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır (Madhusudhan vd., 1998). Bununla birlikte ısı girdisinden dolayı tanelerin yapısal değişime uğradığı ve ısı etkisi altındaki bölge büyüdükçe balistik performansın düştüğü kanaatine varmışlardır. Bir araya getirilecek metalin birleşim taslağının ve kaynak yönteminin uygunluğunun birleştirme bölgesindeki balistik performansını iyileştirmede son derece kayda değer bir tesiri olduğu ifade edilmiştir (Madhusudhan vd., 1999).

Özşahin ve Tolun'un gerçekleştirdiği çalışmada, yaptıkları çalışmada yüzey kaplamanın AA6061 T651 alüminyum levhada yüksek hızlı çarpma karakteristiklerine tesiri incelendi. Bu çalışmada, barut düzeyi ayarlanarak hızlarının kontrolü sağlanan 9'luk mermilerden faydalandılar. 6,35 mm ve 8 mm kalınlığa sahip Al plakalara argon ve

hidrojen gaz karışımı kullanarak plazma tekniği ile 0,762 mm kalınlığında Metko 68 F-NS-1 (kobalt, molibden Krom tozu) ve Metco 201 NS (ZrO₂-zirkonyum oksit tozu) kaplama yaparak yüzeyi kaplanmış 8 mm ve 6,35 mm kalınlığa sahip Al plakaların balistik dayanımının yüzeyi kaplanmamış levhaya kıyasla daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır (Özşahin ve Tolun, 2010). Erdem M. yaptığı çalışmalarda Alüminyum 5083 ve 7039 malzemelerinin kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik performanslarını inceleyerek kaynağın V₅₀ hızını düşürerek kaynak öncesi kabul edilebilir sınırlar içerisinde olan V₅₀ hızının kaynak işlemi neticesinde hem geçiş hem kaynak bölgeleri için kabul edilebilir sınırların altına düştüğü sonucunu elde etmiştir (Erdem, 2001).

Jena ve arkadaşları ise, iki farklı menevişleme sıcaklığında ısıtılma maruz bırakılmış yüksek mukavemetli bir zırh çeliği ve 7017 Al alaşımını tercih ettiler. Kalınlıkları farklı (26, 27, 28 ve 30 mm) Al levhalara 830 m/s çarpma hızında balistik başatım deneyi uyguladılar ve kalınlık arttıkça balistik korumanın da arttığı sonucuna ulaştılar (Jena vd., 2010).

3.2 Literatür Değerlendirmesi

Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı metallerin balistik ve mekanik özelliklerinin de birbirinden farklılık gösterdiği, bununla beraber çeşitli yöntemlerle mekanik ve balistik özelliklerin iyileştirilebileceği görülmüştür. Bir zırh malzemesinin balistik dayanımını belirlemedeki en temel yöntemin V₅₀ hızını hesaplamak olduğu anlaşılmış olup, bu hız malzemenin sahada göstereceği balistik performansın tahmini açısından oldukça önem arz etmektedir.

Kaynak yöntemi olarak farklı yöntemlerin uygulanabileceği ancak bu yöntemlerin malzemenin balistik performansına etkilerinin aynı düzeyde olmayacağı sonucu ortaya çıkmakla birlikte yapılan çalışmalardan sonra Alüminyum 7039'un kaynaklanmasında en uygun kaynak yönteminin koruyucu gaz metal ark kaynak yöntemi olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte yapılan kaynak işleminin kalitesi ve parametrelerinin, malzemenin balistik performansı etkilediği sonucu yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur. Kaynak işlemindeki sıcaklığın arttıkça kaynak işleminden etkilenen bölge genişlemekte ve balistik dayanım düşmektedir. Bu alandaki yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve araştırmaların sunduğu bilgiler, günümüzdeki araştırmalara referans niteliğindedir.

4.1 Materyal

4.1.1 Ana Malzeme

Yapılan çalışmada kimyasal bileşimi Tablo 4.1’de verilen 7039 alüminyum-çinko alaşımının MIG kaynağı ile birleştirilerek, kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özellikleri incelenmiştir. Mekanik deneylerde 12,7 mm kalınlığa sahip levha, balistik deneylerde 38 mm kalınlığa sahip levha kullanılmıştır. Bu kalınlık değerleri, MIL-DTL-46063 H Armor Plate Standartlarında, mekanik ve balistik deneyler için verilen değerlerdir. Balistik deneylerde daha kalın plaka kullanılmasının nedeni, askeri araçlarda kullanılan levhaların balistik performansı sağlama açısından kalın yapıda olmalarıdır. Bir zırhın balistik başarımı, kalınlığı ile doğru orantılıdır. Mekanik deneyler için ise malzemenin karakteristiklerini belirleyecek ölçülerde daha ince levhalar tercih edilir. Bunun nedeni, deney cihazlarının yük uygulama kapasitelerinin sınırlı olması nedeniyle kalın parçaların çekme ve eğme testlerine tabi tutulmasındaki zorluktur.

Tablo 4.1 Alüminyum 7039 alaşımının kimyasal bileşimi (Erdem ve Türker,2011)

Element	%Yüzde Bileşim
Çinko	3,5-4,5
Magnezyum	2,3-3,3
Mangan	0,10-0,40
Bakır	0,10
Demir	0,40
Silisyum	0,30
Krom	0,15-0,25
Titanyum	0,10

Diğer	0,05
Başka metallerin bileşimi toplamı	0,15
Alüminyum	90-93

(Tablo 4.1 devamı)

4.1.2 Tel Elektrot ve Koruyucu Gaz

Birleştirmelerde ilave metal olarak, Dünya genelinde kabul gören standartlardan biri olan ANS/AWS A5. 10-92'ye uygun olan, 1,2 mm çapa sahip ve kimyasal bileşimi Tablo 4.2'de, görünümü Şekil 4.1'de verilen ER 5356 kullanılmıştır.

Koruyucu gaz olarak %99,999 saflıktaki Argon gazı kullanılmıştır.

Tablo 4.2 İlave metalin % kimyasal bileşimi (Erdem, 2001)

AWS Sınıflaması	UNS No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Toplam	Al
ER 5356	A 95356	0,25	0,40	0,10	0,05 - 0,20	4,5- 5,5	0,05 - 0,20	-	0,1	0,06- 0,20	0,15	99,85



Şekil 4.1 ER 5356 tel elektrot (“product welding wire,,” 2024)

4.1.3 Zırh Delici Mermi

Yapılan balistik deneylerde NATO Standartlarında APM2 kodlu 7.62 mm çapa sahip zırh delici mermi kullanılmıştır. Mermiye ait görsel ve mermi boyutunun bir kalem pil ile kıyası Şekil 7.2’de ve mermiye ait önemli parametreler Tablo 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Deneylerde kullanılan zırh delici mermi (‘‘7,62 mm NATO,’’ 2024)

Tablo 4.3 APM2 NATO mermi parametreleri (Veriler FNSS tarafından sağlanmıştır.)

Merninin Cinsi	NATO APM 2
Merminin Boyu	7.62 mm
Kütlesi	163,50 g
Kalibresi	0,3
Kovan Boyu	51 mm

Şekil 7.3, 7.4 ve 7.5’te 7.62x51mm APM2 mermi atan bazı silahlar yer almaktadır. Şekillerde yer alan silahların dışında M1 Garand, M1919 Browning, FN Minimi, Heckler&Koch HK417, Heckler&Koch SR9, M110 yarı otomatik Sniper, Beretta BM59, PSG-, M240 Makineli Tüfek gibi silahlar da APM2 mermi ile atış yapmaktadır.

Gerçekleştirilen deneyler, FNSS Firması Balistik Laboratuvarında M240 makineli tüfek ve NATO APM2 mermiler kullanılmıştır.



Şekil 4.3 M14 tüfek (“Springfield M14,” 2024)



Şekil 4.4 M60 makineli tüfek (“Wiki M60,” 2024)



Şekil 4.5 Heckler&Koch G3 (“SAS Weapons Rifles Heckler,” 2024)

4.1.4 Balistik Test Düzeneği

Balistik testler FNSS Firması'nın Gölbaşı Tesislerinde yer alan Balistik Test Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler MIL-DTL-46063H-7039 Al Zırh plakasının standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Atış yapan silah sistemi ve hız ölçer sensörlerden oluşan balistik deney düzeneği Şekil 4.6'da yer almaktadır.

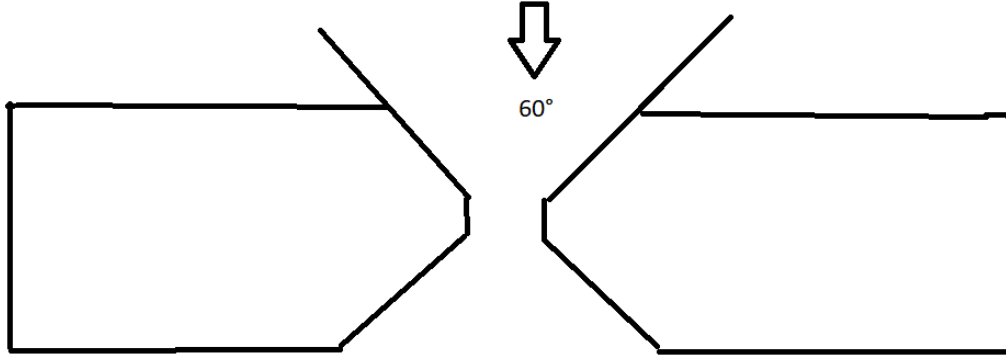


Şekil 4.6 Balistik deney düzeneği (“balistik deneyler,” t.y.

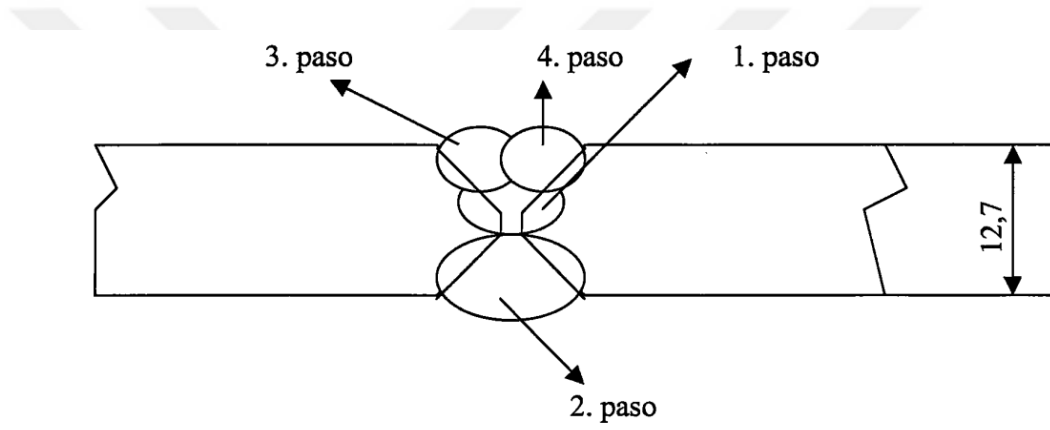
4.2 Metot

4.2.1 Parçaların Kaynak Edilmesi

Kaynak işlem parametreleri ve birleşim detayları belirlenmiş olan mekanik deneylerde kullanılacak 12,7 mm kalınlıktaki parçalara, kaynak öncesi gerekli önlemlerin alınmasının ardından Şekil 4.7'de birleşim taslağı ve Şekil 4.8'de kaynak detayı görüldüğü üzere, pasolar arası kaynak yöntem parametreleri Çizelge 10'da yer alan çift V kaynak ağızı açılarak dört paso kaynaklama işlemi yapılmıştır. Kaynak metodu olarak alüminyum alaşımların özellikle kalın olanlarında iyi sonuçlar veren ve balistik koruma performansını en az ölçüde etkileyen yöntemlerin başında gelen MIG kaynak yöntemi FNSS Firması kaynak biriminde uygulanmıştır.



Şekil 4.7 Mekanik deneylerde kullanılan levhanın birleşim taslağı



Şekil 4.8 Mekanik deneylerde kullanılan levhanın kaynak detayı

Şekil 4.9’de kaynak işleminin yapılması esnasındaki görsel ve Şekil 4.10’da Voltaj, Amper ve kaynak hızı verilerinin ölçümü gösterilmektedir. Parçaların kaynak işlem parametreleri Tablo 4.4’te yer almaktadır.



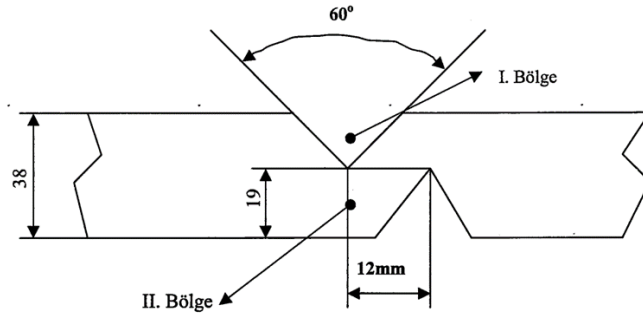
Şekil 4.9 Kaynak işlemi
esnası görüntü



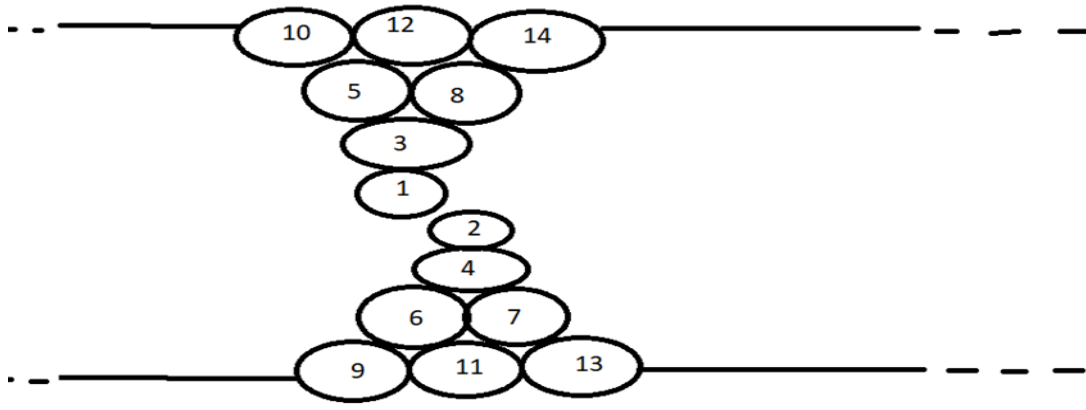
Şekil 4.10 Voltaj, Amper ve kaynak hızı verileri

Tablo 4.4 Pasolar arası kaynak yöntem parametreleri

Kaynak Yöntemi	Levha Kalınlığı	Paso Sayısı	Akım	Gerilim	Kaynak Akımı	Kaynak Hızı (m/dakika)
GMA W (MIG) Gaz Altı Ark Kaynağı	38 mm	14 adet	240 A (Ortalama)	25 V (Ortalama)	Doğru Akım(DC)	16 (ortalama)
GMA W (MIG) Gaz Altı Ark Kaynağı	12,7 mm	4 adet	240 A (Ortalama)	25 V (Ortalama)	Doğru Akım(DC)	16 (ortalama)



Şekil 4.11: 38 mm kalınlıktaki levhanın birleşim taslağı



Şekil 4.12 Balistik deneyde kullanılan parçanın paso kaynak sırası

38 mm'lik levhada kaynak ağzının Şekil 4.11'de gösterildiği şekilde açılmasının sebebi, levhanın balistik deneylerde kullanılmasından dolayı mermi kaynak bölgesine atıldığında merminin iki farklı bölgeden geçmesidir. 1. Bölge kaynak dolgu metalinin yer aldığı kısım, 2. bölge ise kaynak dolgu metalinden sonra gelen özel olarak işlenen ana malzemedir. Bu işlem neticesinde ana malzemenin balistik mukavemetine yakın bir değer elde edilir.

Yapılan çalışmalarda, yapılacak balistik deneylerde gerekli V_{50} hızlarını elde etmek üzere, verimlilik ve maliyetin günümüzdeki önemi düşünülerek mümkün olan en küçük boyutlarda malzemeler kullanılarak çalışmanın maliyetleri ve sarf edilen malzeme miktarı daha önceki benzer çalışmalara göre oldukça düşürülmüştür.

4.2.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri TS 485-2 standartlarının belirttiği ölçülerde, malzemenin yapısında değişikliğe sebep olmadan talaş kaldırmak suretiyle mekanik olarak hidrolik testerede kesilip, frezede ilgili standardın ölçülerine getirilmiştir.

4.2.2.1 Numune Seçimi

Deneylerde kullanılacak parçaların seçilmesinde dikkate alınacak husus, numunelerin parçalara ilişkin genel bir yargıyı verebilecek düzeyde fikir vermesidir. Örneğin; semantasyon işlemi uygulanmış parçalarda karbonlama derinliğinin ölçüleceği numuneler, tavlanmış çelik çubuklarda tane büyüklüğünün belirleneceği numuneler hakkında bilgi edinilecek parçaları temsil etmek üzere örnekleme yoluyla seçilmelidir. Bunların dışında hasar tespitinde bulunulacak olan parçalar için, numunenin hasar görmüş bölgelerden ya da bu bölgelere yakın bir noktadan alınmaları gerekir.

Metalografik inceleme hangi amaçla yapılıyorsa numune seçimi de o amaca uygun olarak seçilmelidir.

Genel maksatlı metalografik incelemeler için, numunenin alınacağı bölgenin parçanın tüm yapısını gösteren bir bölgeden seçilmesi gerekir. Temelde çatlak ve kırılma bölgelerinin incelenmesinin amacı olayın oluş nedeni ve kaynağını bulmaya yöneliktir. Bu amaçla numune tespiti yapılırken bu amacı göz önünde bulundurarak çatlamanın ya da kırılmanın başladığı kısımdan, hasarın olduğu noktadan ve parçanın diğer hasara uğramamış noktalarından numune alınmalıdır. Numune sayısının fazla olması sonuçların güvenilirliğini artırırken, masrafların da büyümesine sebep olur.

Metalografik numunelerin büyüklüğünün tespitinde en önemli unsur mikroskop tablası üzerine rahatça oturtulabilmesi ve numunenin objektifler altında rahatça hareket ettirilebilmesidir. Bu sebeple numunelerin kesit alanları genellikle 25-30 mm²'yi, çapları ise 25 mm'yi geçmemelidir. Bununla birlikte bu ölçülerin çok altındaki veya çok üstündeki numunelerin incelenmesi de mümkün olabilmektedir (Salman ve Gülsoy, 2021).

4.2.2.2 Numune Alma

Metalografik numuneler gerek süreç gerekse de nitelik denetiminde sıklıkla kullanılır. Numune alınacak ürün ya da parça kolaylıkla ele gelip kesilebilecek bir parça değilse, ayrı ayrı deney parçaları esas parçayla birlikte ya da bir döküm veya dövme parçasına önceden iştirilmiş bir ek parça olarak hazırlanır (Salman ve Gülsoy, 2021). Numuneler yapının genelini özelliğini gösterecek bir bölgeden seçilip alınmalıdır. En gerçekçi sonucu elde etmek için belirlenmiş bir kısımdan boyuna ve enine kesit alınması gerekir. Enine ve boyuna alınan numunelerdeki mikroyapı görüntüleri birbirinden oldukça farklılık gösterir. Örnek olarak; dövülmüş ya da tavlansmış malzemelerde enine kesit görmek mümkündür. Döküm malzemelerde bütün yüzeyler benzer özellikler gösterir ve katılma yönüne paralel numunelerin incelenmesi tercih edilir. Yuvarlak çubuk veya tel şeklindeki numunelerdeki mikroyapı, şekillendirme eksenine boyunca neredeyse aynıdır. Malzemelerde bazı özelliklerin tespit edilebilmesi adına numuneler standart olarak enine veya boyuna kesilir. Enine ve boyuna kesit alma işlemlerinin hangi durumlarda tercih edilebileceği aşağıda sıralanmıştır.

* Kesitin enine olarak alınması gereken haller:

1) Karbonlaşma derinliğinin ve bölgedeki iç yapının belirlenmesi,

- 2) Genel amaçlı mikroyapı incelenmesi,
- 3) Korozyonların derinlik ve yapı incelemesi,
- 4) Dekarbürizasyon derinlik incelemesi,
- 5) Kaplama ve kaplama kalınlığının tespiti,
- 6) Oksitlenmenin derinliğinin tespiti,
- 7) Yüzeyden merkeze olan yapı değişiklikleri,
- 8) Yüzey hatalarının tespiti.

* Boyuna kesit alınması gereken durumlar:

- 1) Isıl işleme maruz kalan parçalar,
- 2) Genel mikroyapı görünümü,
- 3) İç yapıda oluşan bantlaşma,
- 4) Plastik deformasyona uğramış malzemeler (Salman ve Gülsoy, 2021).

4.2.2.3 Çekme Deney Numunesinin Hazırlanması

Çekme numuneleri kaynak dikişine dik olarak alınıp, enine kaynak numuneleri halinde, freze tezgahı TS 485-2'deki ölçülere getirilmiştir. Çekme deneylerinde kullanmak üzere 3 adet kaynak işlemi görmüş ve 3 adet kaynak işlemi görmemiş toplam 6 adet numune hazırlanmıştır. Kaynak işlemi görmüş numuneler 40 mm uzunluk, 5 mm genişlik ve 2 mm kalınlığa sahiptir. Kaynak işlemi uygulanmamış olan numuneler 40 mm uzunluk, 7,5 mm genişlik ve 2,5 mm kalınlığa sahiptir. Ölçü farklılığının sebebi, kaynak işlemi gören numunelerde kaynak bölgesinde, birleştirme esnasında tam olarak karşılıklı kaynaşma sağlanmasındaki zorluk nedeni ile oluşan eğriliğin giderilmesi için kaynaklı parçanın ebatlarının inceltilmesidir.

4.2.2.4 Eğme Deney Numunesinin Hazırlanması

Eğme deneyi yapılacak parçalar TSE 485-2 standartlarına göre hazırlandıktan sonra numuneler, yine TSE 205 Metalik Malzemelerin Eğme ve Katlama Deneyleri standardına uygun olarak eğilmiştir. 3 adet kaynak işlemi görmüş ve 3 adet kaynak işlemi görmemiş olmak üzere her biri 120 mm boya ve 2mm ene sahip 6 adet eğme deneyi numunesi hazırlanmıştır.

4.2.2.5 Sertlik Numunelerinin Hazırlanması

Deney malzemeleri TSE 207 Standardına uygun hazırlanarak Vickers sertlik ölçme yöntemi ile sertlikleri kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde yapılan kaynak işleminden dolayı ısıdan etkilenmiş bölgelerdeki sertlik değişimlerinin görülmesi amaçlanmıştır.

4.2.2.6 Balistik Deney Numunelerinin Hazırlanması

Balistik özelliğe sahip olan 7039 Al-Zn alaşımına ait zırh malzemesi FNSS Firmasının balistik test laboratuvarında balistik testlere tabi tutulmadan önce özel balistik kaynak ağzı açılarak çoklu paso ile balistik deneyler için levha kaynaklanmıştır. Kaynak öncesi ve kaynak sonrası balistik deneylerde kullanılan levha boyutları Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Balistik deneylerde kullanılan levha özellikleri

Durum	Malzeme	Kalınlık	Genişlik	Boy	Malzeme Spesifikasyonu
Kaynak Öncesi	Al 7039	38 mm	300 mm	250 mm	MIL-DTL 46063-H
Kaynak Sonrası	Al 7039	38 mm	300 mm	550 mm	MIL-DTL 46063-H

38 mm kalınlıktaki, balistik deneylerde kullanılan levhanın birleşim taslağı Şekil 4.11'de ve paso kaynak sırası Şekil 4.12'de yer almaktadır. Balistik deneylerde kullanılan levhalarda 7+7 şeklinde olmak üzere toplam 14 paso kaynak yapılmıştır.

4.2.3 Deneyler

Malzemeler, tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere iki farklı yöntemle muayene edilebilirler.

4.2.3.1 Tahribatsız Deneyler

Tahribatsız malzeme muayenesi, kalite kontrol aşamasının başlıca bölümlerinden biridir. Üretim aşamasının tamamlayıcısıdır. Adından da anlaşılacağı üzere numune hasar meydana getiren deney türüdür. Tahribatsız muayene, inceleme altına alınan malzemelere zarar vermeksizin incelenerek, statik ve dinamik yapılarına yönelik fikir sahibi olunan muayene tekniklerinin hepsi için kullanılan isimdir. Tahribatsız muayene metoduyla

parçalar üretim sırasında ya da belirli süreli kullanılmalarının ardından aşınma ya da korozyon benzeri etkiler sebebiyle meydana gelen çatlak, iç yapıda oluşan boşluk ve kesit azalması gibi kusurların tespitinde bulunulur. Bu işlemler için, parçalardan numune almaya gerek duyulmaz. Deneyler direkt olarak iş parçası üzerinde gerçekleştirilir ve bu sayede parçaların muayenesi tam anlamıyla gerçekleştirilebilir. Kullanım uygunluğu bulunmayan ya da kullanım uygunluğunu kaybetmiş parçalar genellikle kullanımdan kaldırılır (<https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/tahribatsiz-malzeme-muayenesi-deney-foyu>).

Tahribatsız muayene metotları farklı fiziksel prensiplerle, değişik biçimlerde gerçekleştirilir. Belirlenecek metot, incelenen malzemenin türüne ve aranan hata türüne göre değişiklik gösterir. Her bir metodun farklı avantaj ve dezavantajları vardır. Sıklıkla birbirlerinin tamamlayıcısıdır. Tahribatsız muayene sırasına tercih edilebilen metotlar şunlardır:

1. Göz ile yapılan inceleme,
2. Manyetik parçacık metodu,
3. Girdap akımları metodu,
4. Sıvı emdirme metodu,
5. Röntgen metodu,
6. Ultrason.

4.2.3.2 Tahribatlı Deneyler

Tahribatlı deneyler malzemede hasar meydana getirerek yapılan uygulamalar içerdiğinden malzeme daha sonrasında kullanılamaz duruma gelir. Deney numunelerinin alınmasında kullanılan yöntem deney parçası üzerinde en az hasar ve ısı oluşturan yöntem olmalıdır. Mekanik özelliklerin tayini için deney numunelerinin talaş kaldırma yöntemi ile hazırlanması en iyi yöntemdir. İlgili standartlarda belirtilen numune alma sırasına riayet edilmesi gerekir (Ateş, 1996).

4.2.3.3 Çekme Deneyi

En basit tanımlama ile malzemenin kopuncaya kadar çekilip zorlanarak dayanımının ölçülmesidir. Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için en sık tercih edilen

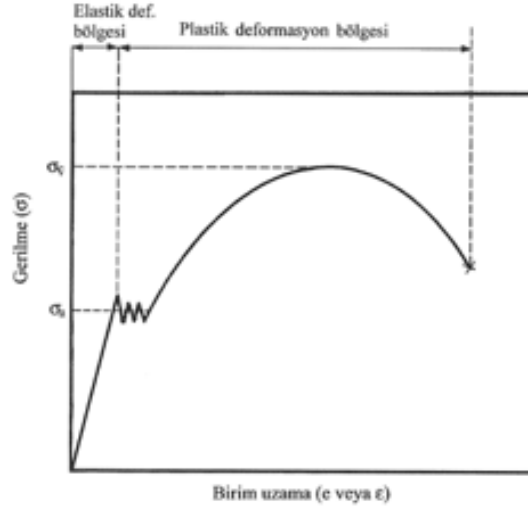
yöntemdir. Bu deneyle ulaşılan çıktılar mühendislik hesaplarında direkt olarak kullanılabilir.

Bu deney neticesinde kuvvet (F) ve Uzama (Δl) eğrisine ulaşılır. Bununla birlikte, daha genel geçer olan uzama-gerilme eğrisi olduğundan uygulanmış olan kuvvetin, numunenin ilk kesitinin alanına bölünmesiyle ($\sigma=F/A_0$), uzama-gerilme grafiğine ulaşılır. Bu grafiğin şekli, karbon miktarı düşük olan yumuşak çeliklerde akmanın olduğu bölgede bir dalga biçiminde oluşurken yüksek karbona sahip sert çeliklerde doğrusal olmaktadır. Bundan dolayı yüksek karbonlu çeliklerde akmanın olduğu bölgenin göz yardımıyla tespiti kolay olmadığından elastik bölgenin çizgisi %0,2 oranında ötelenir ve ana çizgiye denk geldiği yer akma noktası olarak alınır (“çekme deneyi,” t.y.). Şekil 4.13’te çekme deneyi makinesi ve deney numunesinin deney esnasında almış olduğu şekiller yer almaktadır.



Şekil 4.13 Çekme deneyi makinesi ve numunelerin deney esnasında aldığı şekiller (“çekme deneyi,” t.y.)

Bu deneyin neticesinde materyalin elastisite modülü, kopma ve akma sınırı gibi mukavemet değerleriyle kopma büzülmesi, kopma uzaması ve tokluk gibi süneklik değerleri belirlenmiş olur. Materyalin cinsi, kimyasal bileşimi, metalografik yapısı bu özellikleri etkiler. Şekil 4.14’te çekme deneyi sonucu oluşan birim uzama grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Çekme deneyi birim uzama grafiği (“çekme deneyi,” t.y.)

4.2.3.4 Eğme Deneyi

Eğme deneyi malzemenin mukavemeti konusunda tasarım detaylarını belirli hale getirmek ve malzemenin eğmeye karşılık mekanik özelliklerini kavramak maksadı ile gerçekleştirilir. Yüke enine şekilde maruz kalan kiriş benzeri yapılar eğilme kuvvetine maruz kalmaktadır. Yapılan deneyde ana prensip, deney esnasında yararlanılacak materyali basit kiriş modeli olarak kullanmaktan ibarettir. Kiriş denkleminin ideal momente göre çıkarılması nedeniyle, kiriş üzerinde meydana gelen kayma gerilmesinin normal gerilmelere nazaran mümkün olduğunca küçük olması hedeflenmektedir. Bu nedenle materyalin sabit kesit alanına sahip olması ve uzunluk değerinin en geniş değerine oranla minimum 16 katına denk olması gerekir. Eğilme momentleri kirişin her bir noktasında oluşur. Geleneksel eğilme denklemlerinin geçerliliği için materyalin heterojen yapıda olmaması gereklidir. Eğilme deneyinde TS EN ISO 7438 standardı incelendiğinde, mesnetlere serbest şekilde yerleştirilen, çoğunlukla dörtgen ya da daire kesite sahip düz bir deney parçasının yön değiştirme olmadan orta noktasına bir kuvvet uygulandığında oluşan şekil değişikliği olarak ifade edilmektedir. Deney parçası bir kuvvete maruz kaldığında, parçanın bir bölümünde basma gerilmesi, diğer kısmında çekme gerilmesi oluşuyorsa numune eğiliyor demektir. Eğilen numunelerin kesitinde, iç yüzey bölgesinde basma gerilmeleri, dış yüzey bölgesindeyse çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Eğmenin özel bir durumu ise katlamadır. Dikdörtgen ya da daire kesite sahip test numunesinin kollarının birbirlerine paralel hale getirilmesi ile olur. Bu deneyde sünekliği

yüksek olan materyaller 180° katlanmalarına karşın çatlaklar oluşmaz. İleri-geri eğme deneyinde, numune ile cihaz birbirine sıkıca bağlanır ve yarıçapı belirli mandreller etrafında ileri-geri olarak bükülür. Bu esnada materyal basma ve çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Eğilme testi neticesinde;

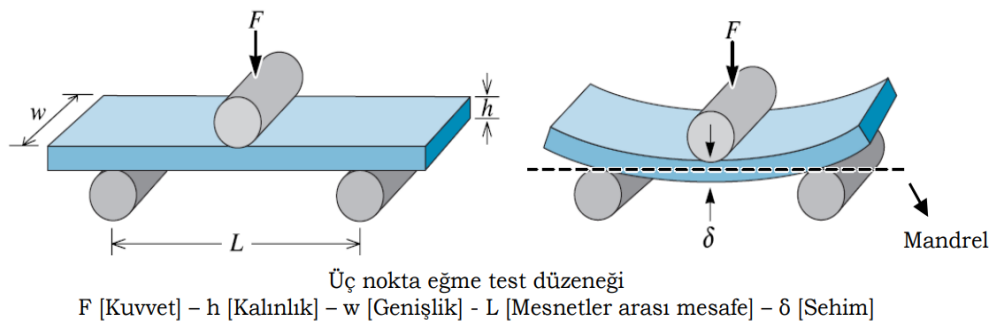
* Eğme momenti $[M_e]$,

* Eğilme gerilmesi $[\sigma_e]$,

* Elastisite modülü $[E_e]$,

* Sehim miktarı $[\delta]$ gibi değerler elde edilebilmektedir. [Sehim; basit eğilme tesirindeki bir parçanın eğilmeden önceki çubuk eksenini durumu ile elastik eğri durumları arasındaki deformasyon miktarıdır. Anılan kuvvet etkisindeki yapı elemanın uyguladığı deplasmana ‘sehim’ adı verilir.] Metal parçaların katlama deneyi, malzemelerin biçim değiştirme özellikleri konusunda sıklıkla kalitatif [nitel] bilgi edinmek için gerçekleştirilir. İmalat esnasında eğerek ya da katlanarak şekil verilen malzemelerin biçim değiştirme kapasitesinin belirlenmesinde [örneğin: kazan sacı, gemi sacı, kaynaklı dikişlerin şekil değiştirme potansiyeli, kaynak dikişiyle ana malzeme arasındaki bağlantı durumlarında] çoğunlukla bu deney yapılır. Kantitatif [nicel] deneyler çoğunlukla kırılman ve gevrek malzemeler [dökme demirler, yüksek mukavemetli çelikler, çelik döküm parçaları vb.] için gerçekleştirilir (“eğme deneyi föyü,” 2017).

Şekil 4.15’te deneyin yapılışı gösterilmektedir.



Şekil 4.15 Eğme deneyinin yapılışı (“eğme deneyi föyü,” 2017)

Deney neticesinde verileri hesap etmek maksadıyla uygulanmış olan yükün değeri P ya da F yükü ile δ eğilmesinin hassasiyetle ölçülerek mesnetlerin merkezleri arasında

bulunan mesafe bilgisinin elde edilmesi gereklidir. Kuvvet desteklere yerleştirilmiş olan deney numunesinin tam ortasına etki ettiğinden, eğme momenti aşağıdaki formülle hesap edilmektedir:

$$M_e = F \cdot L_s / 4$$

M_e [Eğme Momenti] [kg.mm] [N.m]

F [Uygulanan Kuvvet, Yük P] [kg] [N]

L_s [Mesnet merkezleri arasındaki uzaklık] [mm] [m]

$[b]$ Eğilme Dayanımı $[\sigma_e]$ veya Kırılma Modülü Hesabı: $\sigma_e = M \cdot y / I$ σ_e [Eğilme Dayanımı] [N/m²] M [Eğme Momenti] [N.m] Y [Numunenin en dış yüzeyinden uzaklık] [m] I [Nötr eksene göre eylemsizlik momenti]

Mandrel üzerinde eğme deneyi kaynak bağlantısının sünekliğini ve varsa kusurlarını belirlemek amacıyla uygulanır. Enine dar ve geniş dikiş yüzeyli numuneler kaynak dikişi içindeki kusurlardan ziyade dikiş üzeri ve dibinde bulunan yüzeysel hataları ortaya çıkarır. Enine yan yüzeyli numunelerle kaynak dikişi içindeki hatalar bulunur. Bununla birlikte bu numuneler ana metal, ergime bölgesi ve ısıdan etkilenen bölgelerin (ITAB) durumu hakkında bilgi verir. Kaynağın süneklik derecesi, kaynak dikişi ile ana metalin dayanımları birbirine yakın düzeyde ise enine dar ve geniş dikiş yüzeyli numunelerle belirlenir. Kaynak malzemesinin dayanımının ana metalden yüksek olduğu durumlarda deformasyonun büyük bölümü ana metalde gerçekleşir. Bu nedenle bu durumlar için boyuna kaynak dikişli numune seçilmelidir. Boyuna dikişli numunelerde deformasyon ana metal ve kaynak bölgesi üzerlerinde eşit seviyede vuku bulur. Bazı metaller kaynak edildiğinde kaynak dikişi arasında sünekliği azalan bölgeler oluşabilir. Bu durum ergime bölgesinde veya ısıdan etkilenen bölgelerin birinde oluşursa numunede erken çatlamalara neden olabilir (Alpay, 1982).

4.2.3.5 Sertlik Deneyi

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyon etkisine karşı sahip olduğu direnç olarak ifade edilir. Sertliğin ölçümü standart batıcı ucun numuneye batırılmasıyla malzemenin direncini belirlemektir. Batıcı uçlar piramit, bilye ya da koni şeklindedir. Test edilen malzemeye göre çok daha yüksek sertliğe sahiptir. Münaşip bir batıcı uç, uygulanan bir yük altında malzemeye batırıldığı zaman malzeme üzerinde bir iz bırakır. Bu iz ne kadar büyükse, malzemenin sertliği o kadar düşüktür. Sertlik ölçme yöntemleri makro sertlik

ölçme ve mikro sertlik ölçme olmak üzere iki kısma ayrılır. Makro sertlik ölçme yöntemleri arasında Brinell, Rockwell ve Vickers yöntemleri yer alır. Mikro sertlik ölçme yöntemleri arasında Knoop sertlik deneyi bulunur.

4.2.3.6 Balistik Deneyi

Zırh malzemelerinin kullanım koşullarına dayanımını gözlemlemek maksadıyla yapılan tahribatlı bir deneydir. Yani zırhın kurşunlara olan direnci ölçülür. Bu deney özel laboratuvar ortamı gerektirdiği için pahalı bir işlemdir. Balistik deney, miktarı belli olan barut tozunun yanması neticesinde oluşan gaz basıncı ile merminin belli bir hız kazanarak hedefe çarpması ile hedefte oluşan hasarın tespiti (Erdem, 2001). Tablo 4.6’da 7039 Alüminyum plakasının balistik ve mekanik özellikleri yer almaktadır.

Tablo 4.6 MIL-DTL-7039 Al zırh plakasının V₅₀ Balistik Özellikleri (Erdem ve Türker, 2011)

Kalınlık (mm)	V ₅₀ Balistik (m/sn)
38’e kadar	807,42
38’den kalın	

4.2.4 Atılan Kurşunun Hedefe Ulaşana Kadar Geçirdiği Süreç

Belirli miktarda bulunan barut ile birlikte, belirli çapa sahip mermi ilk olarak atış makinasına yerleştirilir. Atış makinası üzerinde bulunan ve hedef tespiti yapmaya yarayan lazer ile hedef üzerinde atış yapılacak nokta tespit edilir. Atış kontrol noktasından mermi ateşlenir. Mermi içerisinde bulunan barut ateşlendiğinde barut gazı meydana getirmektedir. Meydana gelen barut gazının oluşturduğu gaz basıncı sayesinde kinetik enerji kazanan mermi çekirdeği, namluyu terk ettikten sonra 1 ve 2 numaralı çerçevelerden geçerek, lazerin hedef tespiti yapmış olduğu noktaya çarpar. Bu çarpmanın neticesinde eğer merminin kinetik enerjisi yeterliyse zırh malzemesi delinir. Aksi durumda zırh malzemesi delinmez.

4.2.5 Mermi Çekirdeğinin Zırh Levhasına Çarpma Hızı

Namluyu terk eden kurşunun hızı sensörler yardımı ile ölçülür ve ardından kurşunun levhaya çarpma hızını hesap edebilmek için standartlarda verilen “G” faktörünün tanımını yapmak gerekir. “G” faktörü mermi çekirdeğinin hedef noktaya çarpma kadar geçen sürede kaybettiği hız olarak ifade edilir. Sensörler yardımıyla hız ölçümünün ardından,

bu hıza karşılık gelen “G” faktörü standartlarda belirtilmiş olan tablodan bulunur ve sensör ile ölçülen hızdan çıkarılarak mermi çekirdeğinin zırh levhasına çarpma hızı belirlenmiş olur.

4.2.6 V₅₀ Hız Limitinin Hesabı

Bir zırh levhasının, balistik başarımının tespitinde çok önemli bir unsur V₅₀ hız verisidir. V₅₀ hızında zırh levhasının delinmesi ihtimali %50’dir. V₅₀ ifadesindeki “50” bu ihtimalin gösterimidir. V₅₀ sınır değerinden küçük hıza sahip mühimmatlar zırh üzerinde kısmi delinmeye neden olurken, V₅₀ delme hızından büyük hızlara sahip mühimmatlar ise zırhta tam delinmeye sebep olur. V₅₀ hız değerinin tespiti maksadıyla zırh levhasına en az dört adet mermi atışı yapılmalıdır. Hesaba katılan asgari dört atıştan, ikisi zırhı delen diğer ikisi ise delmeyen hız değerleri olmalıdır. Bununla beraber, bu dört hız değerinin belirlenmesinde, levhayı delen en fazla hıza sahip merminin plakaya çarpma hızından, plakayı delmeyen en düşük hızdaki merminin plakaya çarpma hızının farkı 18,29 m/s değerini aşmaması hususu dikkate alınmalıdır. Bu şartlara uyan dört atışın çarpma hızlarının aritmetik ortalaması alınarak hesaplama yapılır. Elde edilen sonuç zırh plakasının V₅₀ balistik sınır değerini gösterir. 7039 Al-Zn levhanın MIL-DTL-46063H standardındaki V₅₀ balistik sınır değeri 807,42 m/s’dir. Kaynaklı plakadan elde edilen V₅₀ balistik değerleri, bu değerin (807,42 m/s) altında ise kabul edilebilir limitler içinde bulunmadığı, üstünde ise kabul sınırları içinde bulunduğu ifade edilir. V₅₀ hız değerinin bilinmesi, bir askeri aracı operasyon bölgesinde kullanıma sokmadan öncesi için oldukça önemlidir. Olası tehdit mermilerin hızları V₅₀ hız değeri ile karşılaştırılırsa risk faktörü ortaya çıkmış olur.

DENEY SONUÇLARI

Alüminyum 7039 alaşımının MIG kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerini incelemek amacıyla çeşitli deneyler yapılmıştır. Mekanik deneyler kapsamında çekme, eğme ve sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen verilerin balistik ve mekanik özelliklere etkileri yorumlanmıştır. Yapılan deneylerin seçiminde, balistik ve mekanik özellikler hakkında kapsamlı bilgi vermesi göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki bilgiler ve daha önce yapılmış çalışmalarla kıyaslanmıştır. Deneylerde, kaynak öncesi ve sonrası durumu karşılaştırma imkanı veren numuneler kullanılmıştır.

MIG kaynak işlemi öncesinde Alüminyum 7039 alaşımının ve sonrasında MIG kaynak yöntemi ile kaynak işlemi yapılan alaşımın kaynak bölgesi ve geçiş bölgelerinin balistik dayanımları yapılan atış testleriyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Armor plate (Zırh levhası) standardında verilen değerlerle ve daha önce yapılan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

5.1 Çekme Deneyi Sonuçları

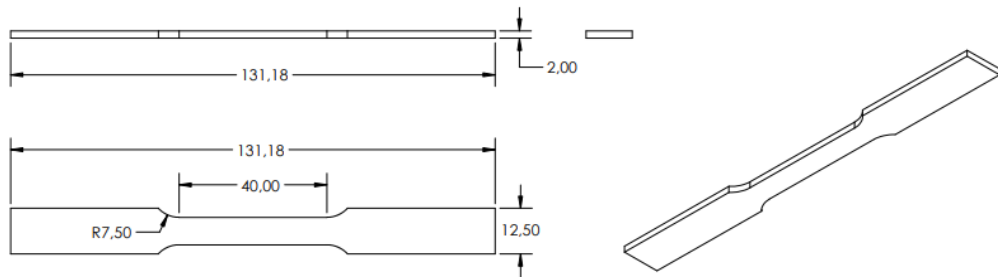
Çekme deneyleri DIN EN 10002-1 standartlarını karşılayan Instron marka Electroplus 1000 model Universal test cihazında Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yorulma test cihazının özellikleri şunlardır: 1000 N dinamik ve 710 N statik yük kapasitesi, 600 mm strok. Çekme deneyleri, ASTM-E-8 Standartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 1 mm/dk, 2 mm/dk ve 3 mm/dk olmak üzere deformasyon hızının numunelerin mukavemetine etkisini tespit etmek için üç farklı çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan Instron marka Electroplus 1000 model Universal deney cihazı yer almaktadır.



Şekil 5.1 Deney cihazı

Armor Plate Standardında verilen çekme değerlerinde Al 7030 alaşımının çekme değerleri, kalınlığın 25,4 mm'ye kadar olan parçalarda $\sigma_c=42 \text{ kg/mm}^2$, kalınlığın 25,4 mm'den fazla olduğu parçalarda çekme mukavemeti değeri $\sigma_c=39,9 \text{ kg/mm}^2$ olduğu belirtilmektedir. Al 7039 alaşımının çekme değerleri St 42 gibi çeliklerin mukavemet değerlerine ulaşabilmektedir.

Al 7039 alaşımlarının kaynaklı ve kaynaklı olmayan numunelerine çekme deneyleri uygulanmıştır. Kaynaklı olarak üç adet 40 mm uzunluk, 5 mm genişlik ve 2 mm kalınlığa sahip, kaynaklı olarak üç adet 40 mm uzunluk, 7,5 mm genişlik ve 2,5 mm kalınlığındaki numunelere 1 mm/dk, 2 mm/dk ve 3 mm/dk olmak üzere farklı hızlarda çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Çekme deneyi numunelerinin teknik çizimine ait görsel Şekil 5.2'de ve yapılan testlerde elde edilen veriler Çizelge Tablo 5.1'de yer almaktadır.



Şekil 5.2 Numunelerin teknik görseli

Tablo 5.1 Çekme deneyinden elde edilen veriler

No	Kaynak Durumu	Numune Boyu (mm)	Akma Hızı	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Numune kalınlığı (mm)	Elastisite Modülü (GPa)	Deney Parçasının Kesit Alanı (mm ²)
1	Kaynaksız	40	1 mm/dk	422,49	359,14	12,84	2,5	70,18	15
2	Kaynaksız	40	2 mm/dk	431,20	366,42	12,06	2,5	71,24	15
3	Kaynaksız	40	3 mm/dk	456,62	386,12	11,46	2,5	73,41	15
4	Kaynaklı	40	1 mm/dk	349,95	296,45	6,87	2	54,75	10
5	Kaynaklı	40	2 mm/dk	361,06	305,90	7,92	2	55,14	10
6	Kaynaklı	40	3 mm/dk	341,54	290,40	7,49	2	53,68	10

Çekme dayanımı ya da çekme direnci bir malzemenin, kırılmadan ya da kopmadan dayanabildiği en yüksek çekme gerilmesidir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde kaynaklı numunelerde çekme dayanımının belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum kaynak ısısından etkilenen bölgelerin mukavemet kaybı ile açıklanabilir. En yüksek çekme dayanımı değeri 456,62 MPa olarak 3 numaralı kaynaklı numunede 3 mm/dk test hızında, en düşük çekme dayanımı değeri 6 numaralı kaynaklı numunede 341,54 MPa olarak 3 mm/dk test hızında ölçülmüştür. Kaynaksız numunede artan deformasyon hızı ile mukavemet artarken, kaynaklı numunede azaldığı görülmüştür. Genel olarak deformasyon hızındaki artışın malzemenin mukavemet değerini artırdığı bilinmektedir. Farklı deformasyon hızlarında farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kaynaklı numuneler için ortalama çekme dayanımı değeri 350,85 MPa, kaynaksız numuneler için ortalama çekme dayanımı değeri 436,77 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre kaynak işlemi sonrası numunelerin çekme dayanımında ortalama %19,67 oranında azalma olmuştur. Kaynaklı numunelerde çekme dayanımı değerinin daha düşük çıkmasının sebebi, kaynak işleminde oluşan ısının malzemenin sertlik ve mukavemetinde azalmaya yol açmasıdır. Tablo 5.2’de Al Zırh plakasının mekanik özellikleri yer almaktadır. Kaynak öncesi numunelerin kabul edilebilir çekme dayanımı değerlerine

sahip olduğu, kaynak işlemi görmüş numunelerin MIL-DTL-46063H standardında belirtilen değerin altında yer aldığı görülmektedir. Bu standart değeri karşılayamayan numunelerin kabul edilir sınır değerin altında kaldığı ifade edilir.

Tablo 5.2 MIL-DTL-7039 Al zırh plakasının mekanik özellikleri (Erdem vd, 2015)

Kalınlık(mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)
38 mm'ye kadar	413,6	351,6
38 mm'den kalın	393	331

Uygulanan çekme kuvveti değerinin neredeyse sabit olmasına rağmen, plastik şekil değiştirme miktarının büyük oranda yükseldiği ve çekme diyagramında düzgünlük gözlemlendiği kısma karşılık gelen gerilme değeri akma sınırı olarak ifade edilir. Materyallerin belirgin şekilde akma göstermemesi durumunda, genelde %0,2'lik plastik uzamadan eğriye paralel çizilerek karşı gelen çekme gerilmesi akma dayanımı veya akma sınırı olarak alınır. Çekme deneyinden elde edilen uzama verileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda kaynaksız numunelerin daha yüksek akma dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. En yüksek akma dayanımı değeri 3 numaralı kaynaksız numunede 386,12 MPa olarak hesaplanmıştır. En düşük akma dayanımı değeri 6 numaralı kaynaklı numunede 290,40 MPa olarak hesap edilmiştir. Çekme dayanımı daha yüksek olan numunelerin, akma dayanımlarının da daha iyi olduğu görülmüştür. Kaynaklı numunelerin ortalama akma dayanımı değeri 297,58 MPa ve kaynaksız numunelerin ortalama akma dayanımı değeri 370,56 MPa'dır. Kaynak işlemi numunelerin akma dayanımı değerlerinde ortalama olarak %19,69 oranında azalmaya sebep olmuştur. Kaynak işlemi görmemiş numunelerin Alüminyum 7039 için verilen akma dayanımı standart değerini karşıladığı, kaynak işlemine maruz kalmış numunelerin bu standart değerin altında kaldığı görülmektedir.

Çekme örneğinin boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama miktarı kopma uzaması olarak tanımlanır. En fazla kopma uzaması 1 numaralı kaynaksız numunede 1 mm/dk deformasyon hızında %12,84 olarak, en düşük uzama yüzdesi 4 numaralı kaynaklı numunede 1 mm/dk deformasyon hızında %6,87 olarak ölçülmüştür. Kaynaklı numunelerin uzama yüzdeslerinin ortalaması %7,42, kaynaksız numunelerin uzama yüzdeslerinin ortalaması %12,12 olarak hesap edilmiştir. Kaynaklı numunelerin ortalama uzama yüzdesi, kaynaksız numunelere oranla %38,77 daha düşüktür. Kaynaksız numunelerin daha fazla uzama yüzdeslerine sahip olmaları, dayanımlarının daha yüksek olmalarından dolayı kopmadan daha fazla dayanım göstermelerinin ve daha yüksek

kopma sınırı değerine sahip olmalarının sonucudur. Şekil 5.3'te 4 No'lu çekme deneyi numunesinin deney sonrası kopmuş görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 5.3 4 No'lu kaynaklı çekme deneyi numunesinin deney sonrası görüntüsü

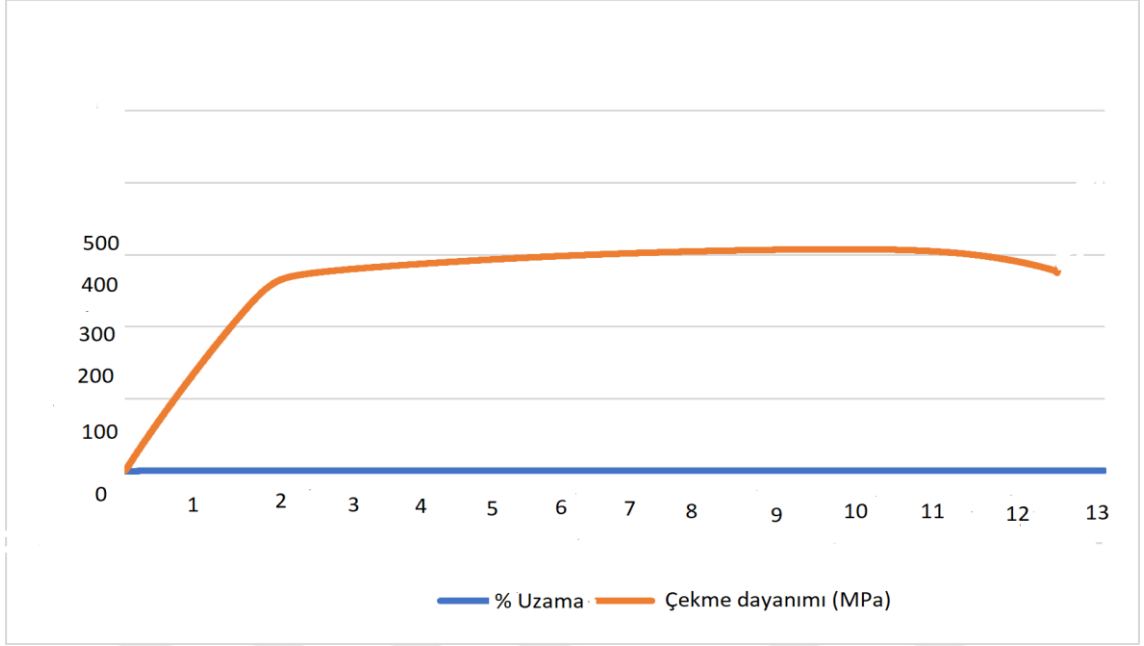
Elastisite modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Young Modülü olarak da ifade edilir. Birim uzama ile çekme ya da basma gerilmesi arasındaki doğrusal ilişki şöyle tanımlanabilir:

$$\text{Elastisite Modülü (E)} = \text{Normal Gerilme } (\sigma) / \text{Birim Uzama } (\epsilon)$$

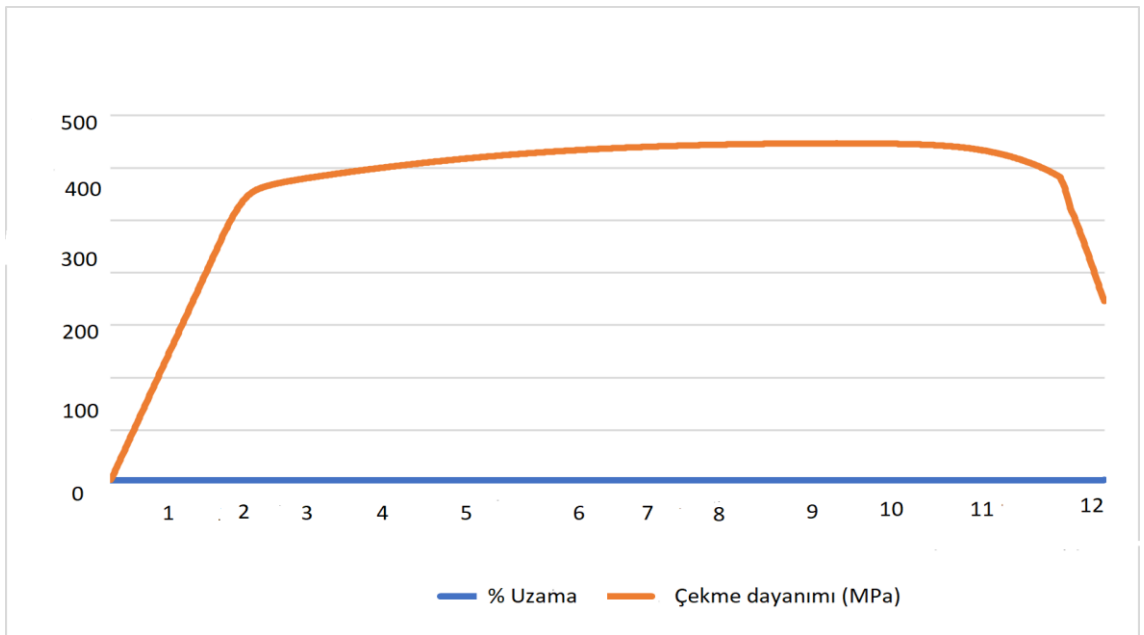
Yapılan çekme deneyinde elde edilen elastisite modülü verileri incelendiğinde en yüksek değer 3 numaralı kaynaklı numunede 3 mm/dk akma hızında 73,41 GPa, en düşük değer 6 numaralı kaynaklı numunede 3 mm/dk akma hızında 53,68 GPa olarak ölçülmüştür. Kaynaklı numuneler için elastisite modülü ortalaması 54,52 GPa, kaynaklı numunelerin elastisite modülü ortalaması 71,61 GPa olarak hesap edilmiştir. Elastisite modülünün yüksek olması, malzemenin dayanımının yüksek olduğunu gösterir. Kaynak işlemi, malzemenin sertliğini azaltıp dayanımını düşürdüğü için kaynaklı numunelerin elastisite modülü ortalaması kaynaklı numunelerin ortalamasından %23,86 oranında daha düşük çıkmıştır. Standartlara göre Alüminyum 7039 için verilen elastisite modülü değeri 69,6

GPa'dır. Buna göre kaynak öncesi numunelerin elastisite modülü, standardı karşılamaktadır. Kaynak edilmiş numunelerin elastisite modülü standart değerinin altında kalmaktadır.

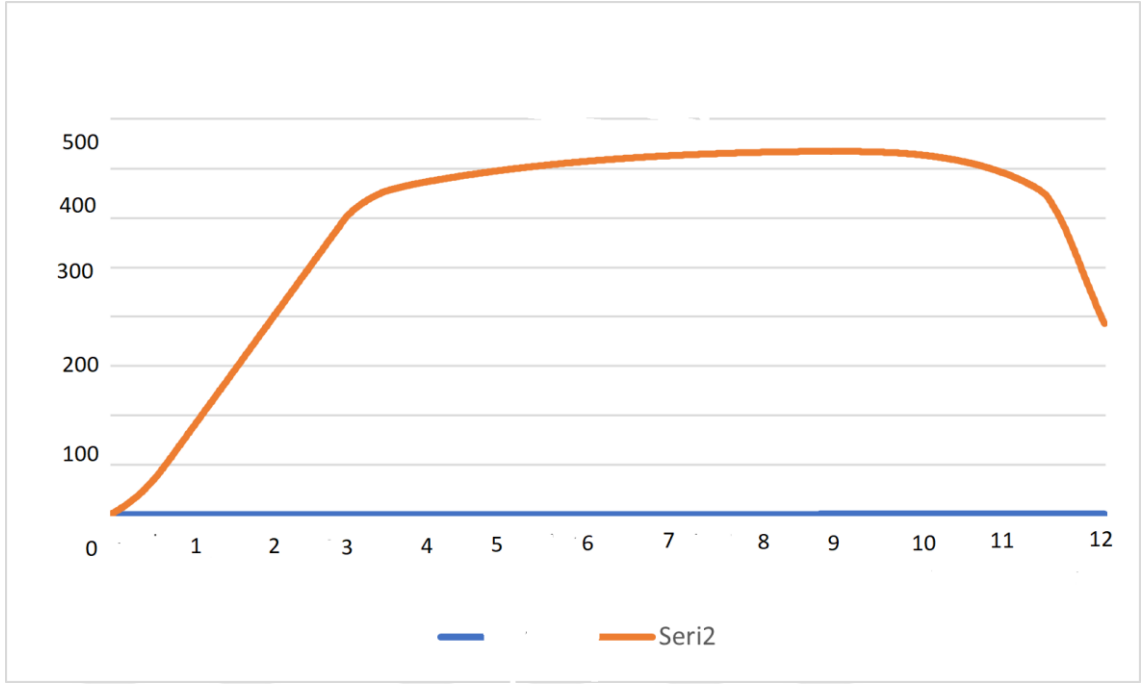
Çekme deneylerinde kullanılan numunelerin çekme grafikleri Şekil 5.4-5.9 arasında bulunmaktadır.



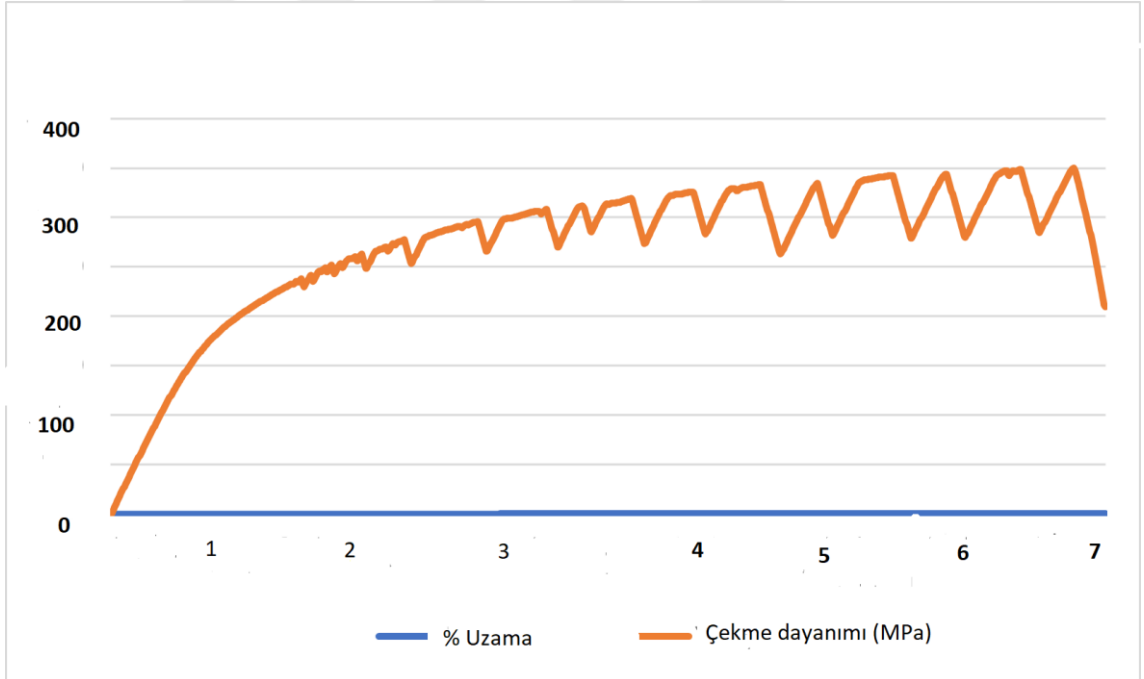
Şekil 5.4 1 No'lu numunenin çekme deneyi grafiği



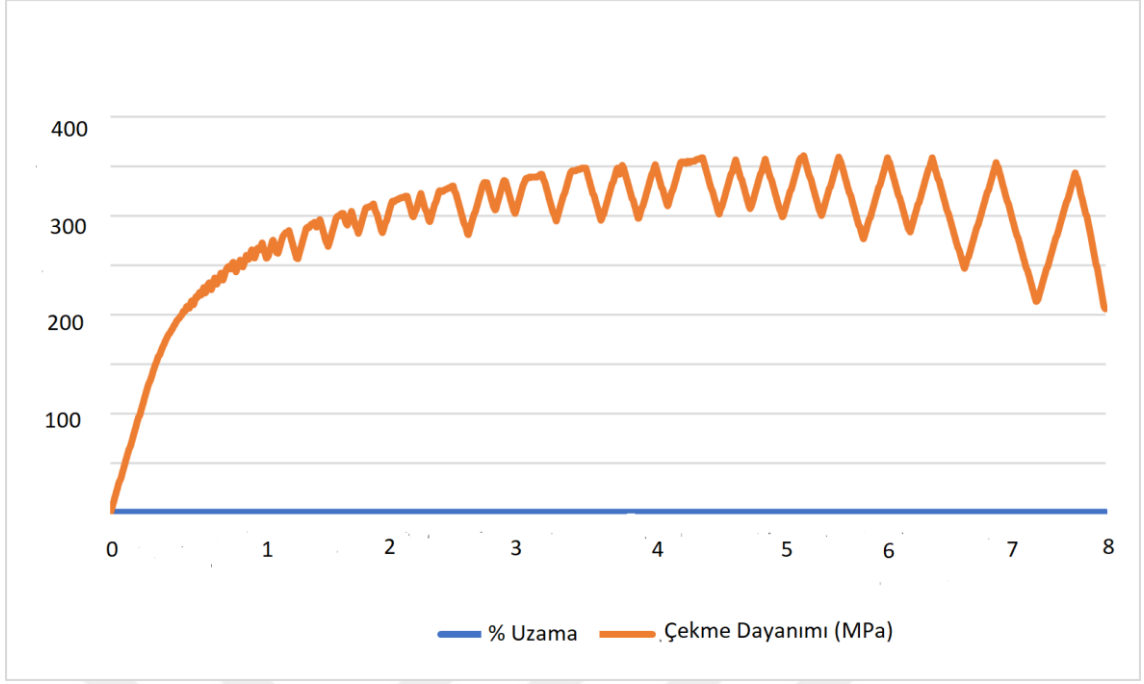
Şekil 5.5 2 No'lu numunenin çekme deneyi grafiği



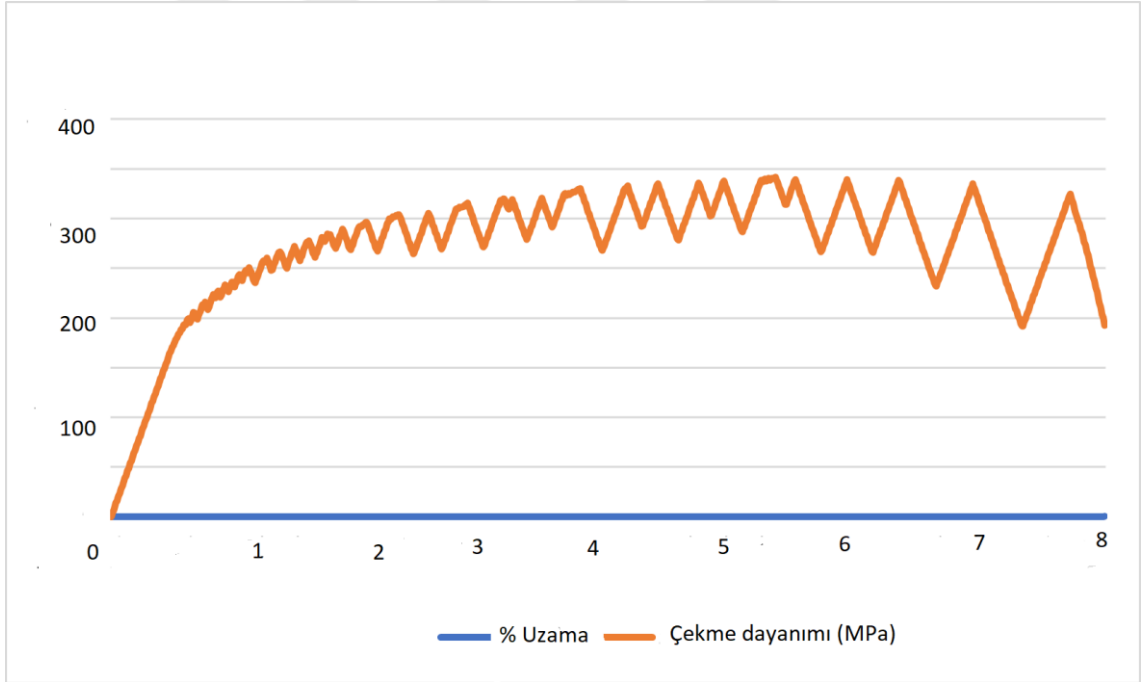
Şekil 5.6 3 No'lu numunenin çekme deneyi grafiği



Şekil 5.7 4 No'lu numunenin çekme deneyi grafiği



Şekil 5.8 5 No'lu çekme deneyi grafiği



Şekil 5.9 6 No'lu numunenin çekme deneyi grafiği

Kaynak işlemi uygulanmış numunelerin grafikleri incelendiğinde, çekme dayanımı eğrilerinin aşağı ve yukarı yönde dalgalanmalar sergilediği göze çarpmaktadır. Bu durum, MIG kaynak işlemi esnasında, özellikle alüminyum gibi yüksek reaktiviteye sahip malzemelerde, gaz tutulumu ve porozite oluşumu gibi durumlar yaygındır. İç yapıdaki bu kusurlar, çekme deneyi esnasında gerilme konsantrasyonlarına neden olarak çekme

eğrisinde süreksizliklere yol açmaktadır (Kotecki ve Lippold, 2005). Bu durum kaynak işlemi sırasında tane yapısının değişmesi ve tane sınırlarında zayıflama meydana gelmesi ile de açıklanmaktadır. Tane sınırlarındaki zayıflama neticesinde çekme deneyi sırasında tane sınırları boyunca çatlak oluşumu ve süreksizlikler oluşabilmektedir (Sharma vd, 2012).

Kaynaklı numunelerin çekme-uzama grafiğinde meydana gelen süreksizliklerin mikroyapıdaki boşluk, porozite ve tane sınırlarındaki çatlakların bir sonucu olarak meydana geldiği değerlendirilmektedir.

5.2 Eğme Deneyi Sonuçları

Eğme deneyleri, DIN EN 10002-1 standartlarını karşılayan Universal markalı Electropus 1000 modeli cihazda Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Yorulma test cihazının özellikleri şunlardır: 1000 N dinamik ve 710 N statik yük kapasitesi, 600 mm strok. Deneyler 1 mm/dk, 2 mm/dk ve 3 mm/dk olmak üzere üç farklı çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney neticesinde eğilme dayanımı, eğilme momenti dayanımı ve eğilme açısı gibi önemli verilere ulaşılmıştır.

3 adet kaynaklı ve 3 adet kaynaklız olmak üzere toplamda 6 adet numune 3 noktadan eğme testine tabi tutulmuştur. Kaynaklı ve kaynaklız numuneler 1 mm/dk, 2 mm/dk ve 3 mm/dk akma hızında test edilmiştir. Eğme deneyi uygulanırken görüntüsü Şekil 5.10'da ve deney sonuçları Tablo 5.3'te yer almaktadır.



Şekil 5.10 Eğme deneyi esnası görüntüsü

Tablo 5.3 Eğme deneyinden elde edilen veriler

No	Kaynak Durumu	Akma Hızı (mm/dk)	Eğilme Momenti (M_e) Dayanımı (kgf mm)	Eğilme Açısı (Derece)	Eğme Dayanımı (MPa)	Yüzey Durumu
1	Kaynaksız	1	46.569	74	941,85	Eğme çatlağı oluştu
2	Kaynaksız	2	48.341	74	979,86	Eğme çatlağı oluştu
3	Kaynaksız	3	51.024	74	1034,24	Eğme çatlağı oluştu
4	Kaynaklı	1	18.175	70	519,86	Eğme çatlağı oluştu
5	Kaynaklı	2	19.144	71	547,60	Eğme çatlağı oluştu
6	Kaynaklı	3	15.962	71	456,59	Eğme çatlağı oluştu

Eğme deneyinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde kaynak işleminin numune üzerindeki etkisi görülmektedir. İlk olarak eğilme momenti dayanımı sonuçlarına bakıldığında, en yüksek dayanımın 3 numaralı kaynaklı numunede 3 mm/dk akma hızında 51.024 kgf mm, en düşük dayanımın 6 numaralı kaynaklı numunede 15.962 kgf mm olduğu ölçülmüştür. Kaynaklı ve kaynaklı numunelerin arasında belirgin bir eğilme momenti dayanımı farkı vardır. Kaynaklı numunelerin eğilme momenti dayanımı ortalaması 17.760 kgf mm olarak, kaynaklı numunelerin eğilme momenti dayanımı ortalaması 48.644 kgf mm olarak hesap edilmiştir. Deney sonuçlarına göre kaynak işleminin dayanılan eğilme moment değerini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Kaynaklı

numunelerin ortalama eğilme momenti dayanımı, kaynaklı numunelerden %63,49 daha düşüktür. Elde edilen veriler, deformasyon hızındaki artışın kaynaklı numunede eğilme momenti dayanımını artırdığını, kaynaklı numunede düşürdüğünü göstermektedir.

Eğme dayanımları sonuçlarında kaynaklı ve kaynaklı numuneler arasında önemli ölçüde fark bulunmaktadır. En yüksek eğme dayanımı 3 numaralı kaynaklı numunede 3 mm/dk akma hızında 1034,24 MPa olarak, en düşük eğme dayanımı 6 numaralı kaynaklı numunede 3 mm/dk akma hızında 456,59 MPa olarak ölçülmüştür. Eğilme momenti dayanımı en düşük olan numunenin eğme dayanımının da en düşük olduğu, eğilme momenti dayanımı en yüksek numunenin eğme dayanımının da en yüksek olduğu görülmektedir. Kaynaklı numunelerin ortalama eğme dayanımı 508,01 MPa, kaynaklı numunelerin ortalama eğme dayanımı 985,31 MPa'dır. Kaynak işleminin eğme dayanımlarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Kaynaklı numunelerin ortalama eğme dayanımı, kaynaklı numunelerden %43,74 daha düşüktür. Bu sonuçlar, deformasyon hızındaki artışın kaynaklı numunede eğme dayanımını artırdığını, kaynaklı numunede düşürdüğünü göstermektedir.

Eğilme açısı sonuçları incelendiğinde, kaynaklı numunelerin eğilme açılarının yaklaşık aynı ve 74 derece olduğu görülmektedir. En düşük eğilme açısı 70 derece olarak 4 numaralı kaynaklı numunede ölçülmüştür. 5 ve 6 numaralı kaynaklı numunelerin eğilme açısı 71 derecedir. Kaynaklı numunelerin çok daha yüksek kuvvete maruz kalmalarına rağmen eğilme açılarının kaynaklı numunelere yakın olmasının nedeni, kaynaklı numunelerin daha sert ve yüksek mukavemette olmasıdır. Kaynak işlemi gören numuneler önemli ölçüde sertlik ve mukavemet kaybına uğramıştır. 1 numaralı kaynaklı numunenin eğme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 5.11'de ve 4 numaralı kaynaklı numunenin eğme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 5.12'de yer almaktadır.



Şekil 5.11 1 Numaralı kaynaksız numunenin
eğme deneyi sonrası görüntüsü



Şekil 5.12 4 Numaralı kaynaklı numunenin
eğme deneyi sonrası görüntüsü

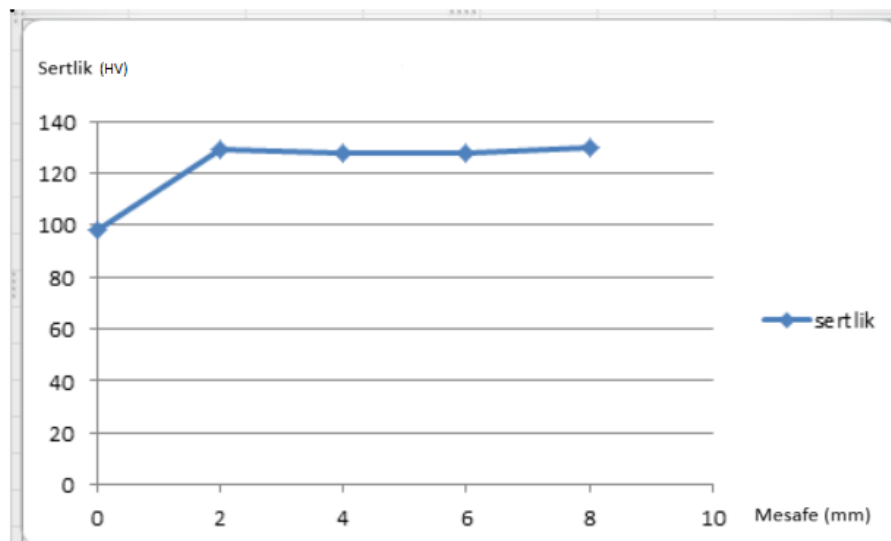
5.3 Sertlik Deneyi Sonuçları

Malzemelerin kaynak edilmesi sırasında ısıнын etkisi ile tane yapısında, partikül bileşimi ile şeklinde, kimyasal bileşimde ve buna bağlı olarak sertlik ve mukavemetinde birtakım değişiklikler meydana gelmektedir. Isı girdisinden kaynaklanan bu değişikliklerin miktarı, ısı girdi miktarına ve kaynak parametrelerine bağlıdır. Bu değişikliklerin tespiti maksadı ile Vickers sertlik deneyi yapılmıştır. Geçiş bölgesi sertlik deneyleri kaynak

bölgesine 2, 4, 6 ve 8 mm mesafelerde bulunan noktalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Malzemenin kaynak öncesi durumu, geçiş bölgeleri ve kaynak bölgesinin sertlik sonuçları Tablo 5.4'te ve kaynak bölgesine olan mesafeye göre sertlik grafiği Şekil 5.13'te yer almaktadır.

Tablo 5.4 Sertlik deneyi sonuçları

Sertlik Ölçü Noktaları	Kaynak Bölgesine Mesafe (mm)	Vickers Sertliği (HV)
1	0	98,9
2	2	129
3	4	128
4	6	128
5	8	130
6	Kaynaksız Numune	159



Kaynak Merkezinden Ana Metale Olan Mesafe	Sertlik HV	Dolgu metali	Geçiş bölgesi	Ana metal
0	98,9			
2	129			
4	128			
6	128			
8	130			

Şekil 5.13 Sertlik deneyi grafiği

Sonuçlar değerlendirildiğinde kaynak bölgesinde %37,79 oranında sertlik kaybı olduğu, geçiş bölgesinde kaynak esnasında ortaya çıkan ısıdan etkilenme miktarının daha az olduğu ve sertlik kaybının en fazla %19,49 oranında gerçekleştiği görülmüştür. Bununla birlikte kaynak geçiş bölgesi üzerinde farklı noktaların sertlik değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

5.4 Makroyapı ve Mikroyapı Sonuçları

A1 7039 levhanın, makro ve mikroyapısının incelenmesi Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Laboratuvarında Şekil 5.14'te görseli bulunan Nikon markalı ve Clemex modeli mikroskop ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14 Nikon marka ve Clemex modeli mikroskop

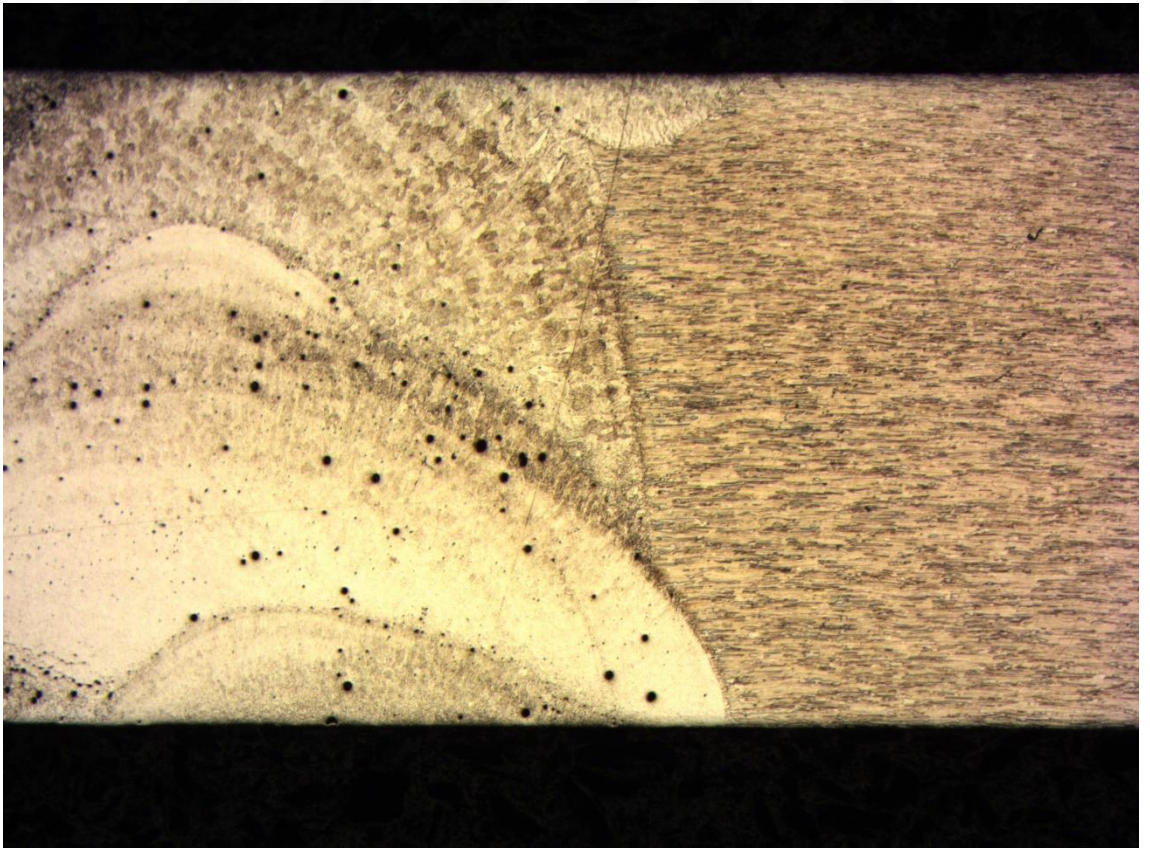
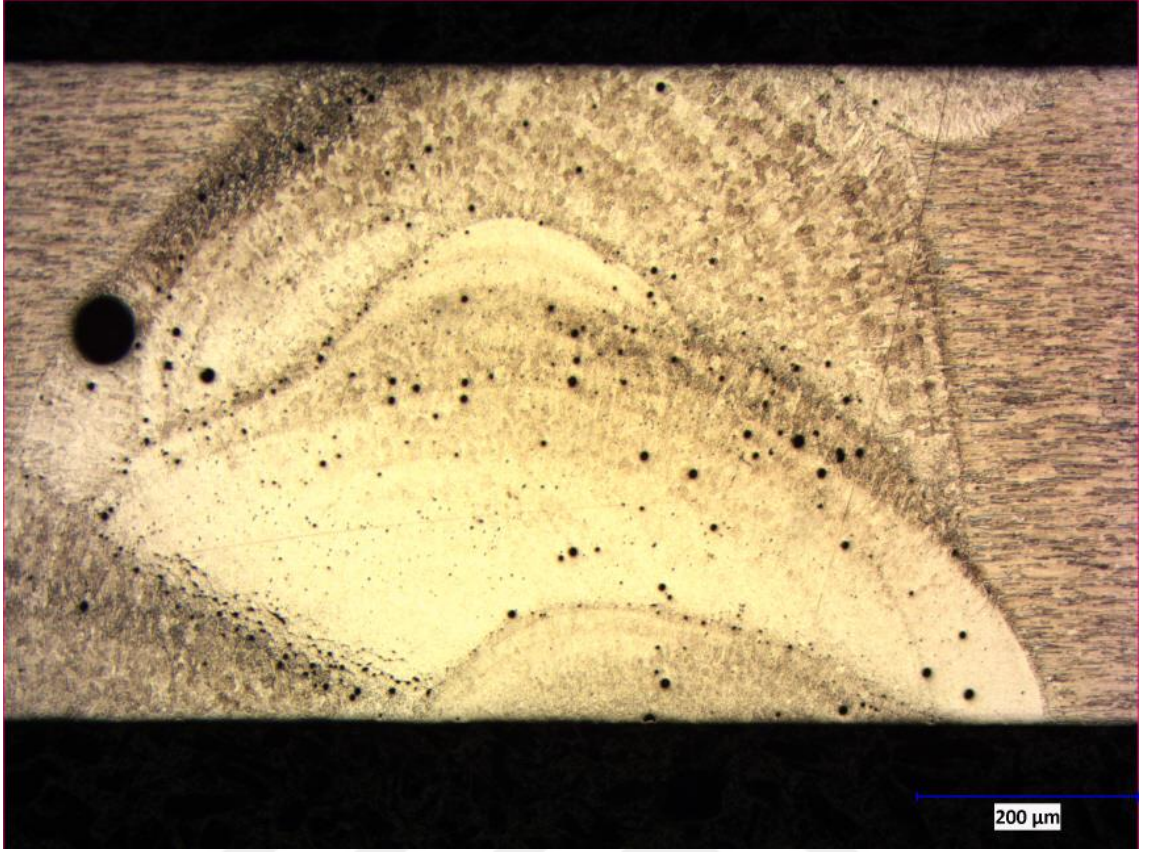
AL 7039 levha, Keller reaktifi içerisine daldırılarak yaklaşık 20 saniye süre boyunca bekletilmiştir. Şekil 5.15’te inceleme öncesi Al 7039 levha yer almaktadır.



Şekil 5.15 Al 7039 levha görünümü

5.4.1 Makroyapı Sonuçları

Tane yapısı hakkında kaynak öncesi ve sonrası durumlar için bilgi edinmek amacıyla mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 5.16 ve 5.17’de Al 7039 alaşımın genel makroyapısı görülmektedir.

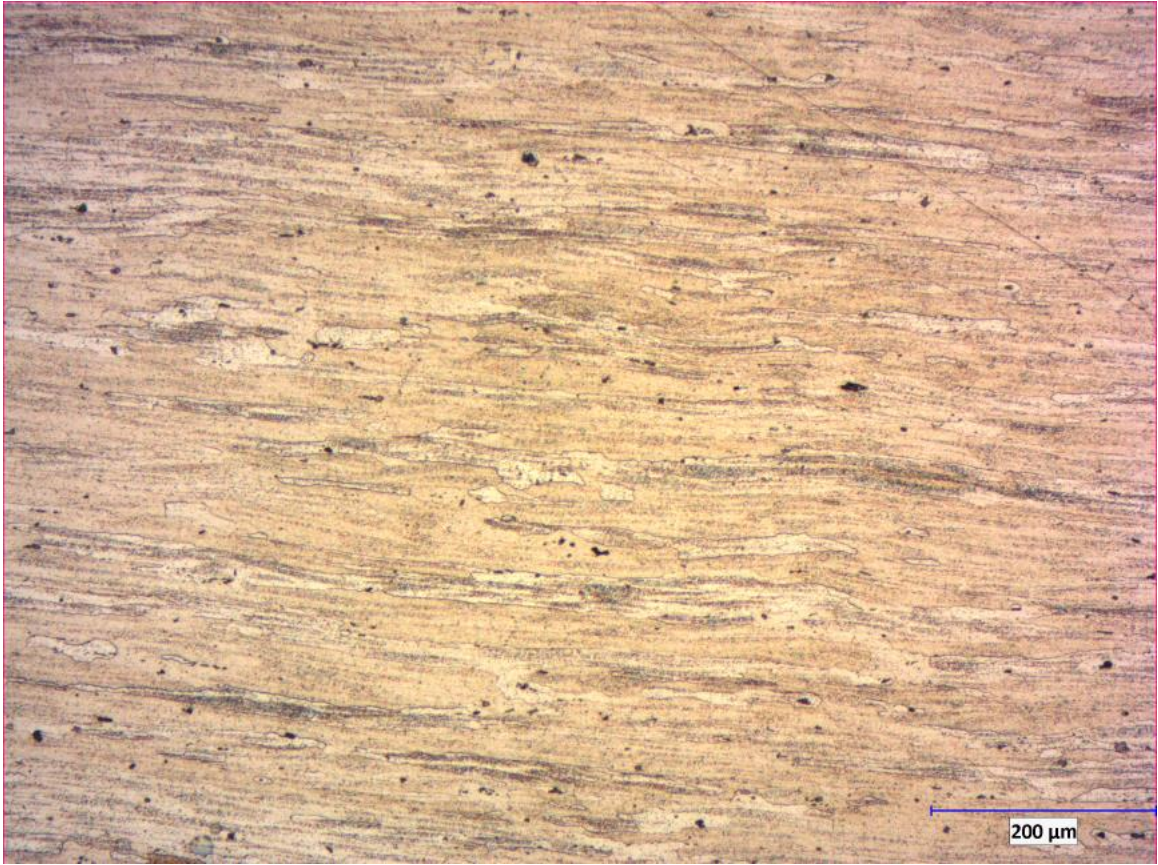


Şekil 5.16 ve 5.17 Al 7039 Alaşımının makroyapı görüntüsü (x10)

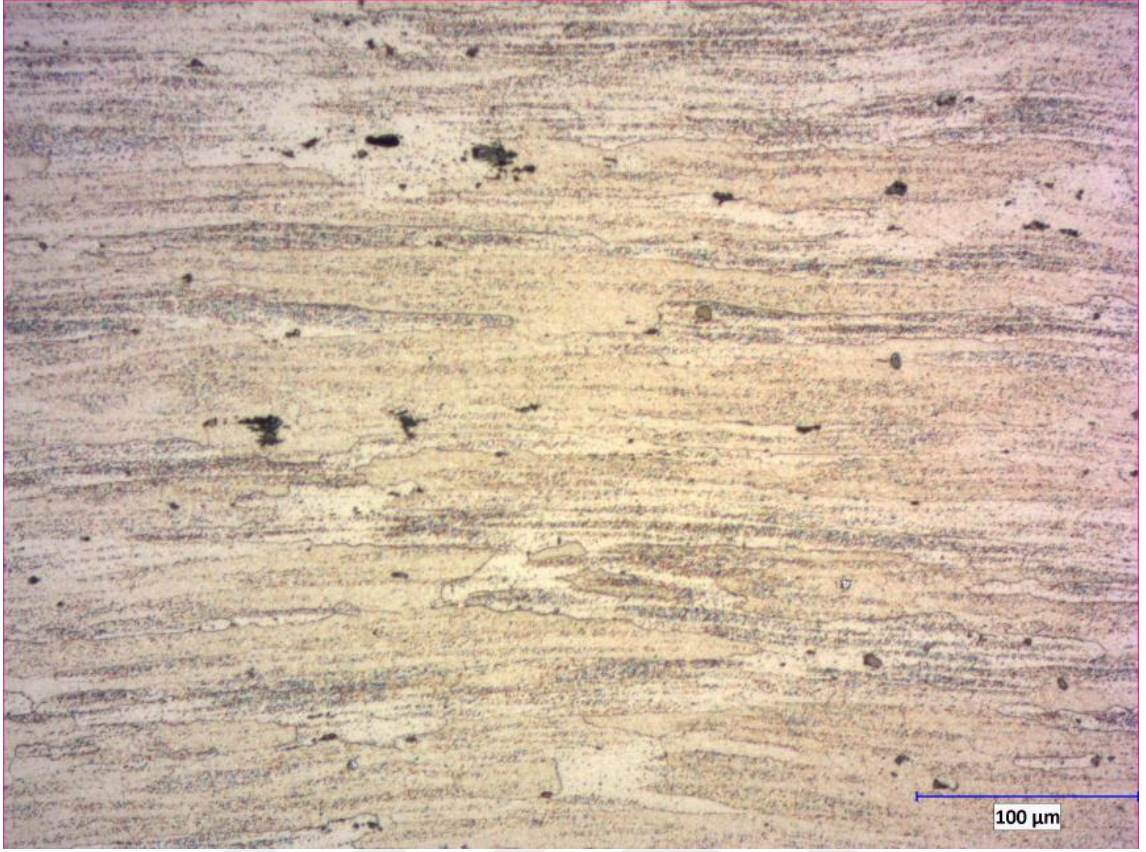
Dentritik yapıda ve belli bir boyutu olmayan taneler yüksek sıcaklık tesiri ile bozularak geçiş bölgelerinde ve ITAB'da kaynak bölgesine doğru yönlendikleri görülmektedir.

5.4.2 Mikroyapı Sonuçları

Ana metalin mikroyapı görüntüleri Şekil 5.18, 5.19 ve 5.20'de yer almaktadır. Ana malzeme mikroyapı sonuçları malzemenin ısıdan etkilenmemiş halinin tane yapısını göstermektedir. Isı etkisinin tane yapısı üzerindeki etkileri ana metal ile kaynak bölgesi ve geçiş bölgeleri kıyaslanarak görülebilir.



Şekil 5.18 Ana metalin mikroyapı görüntüsü (x100)

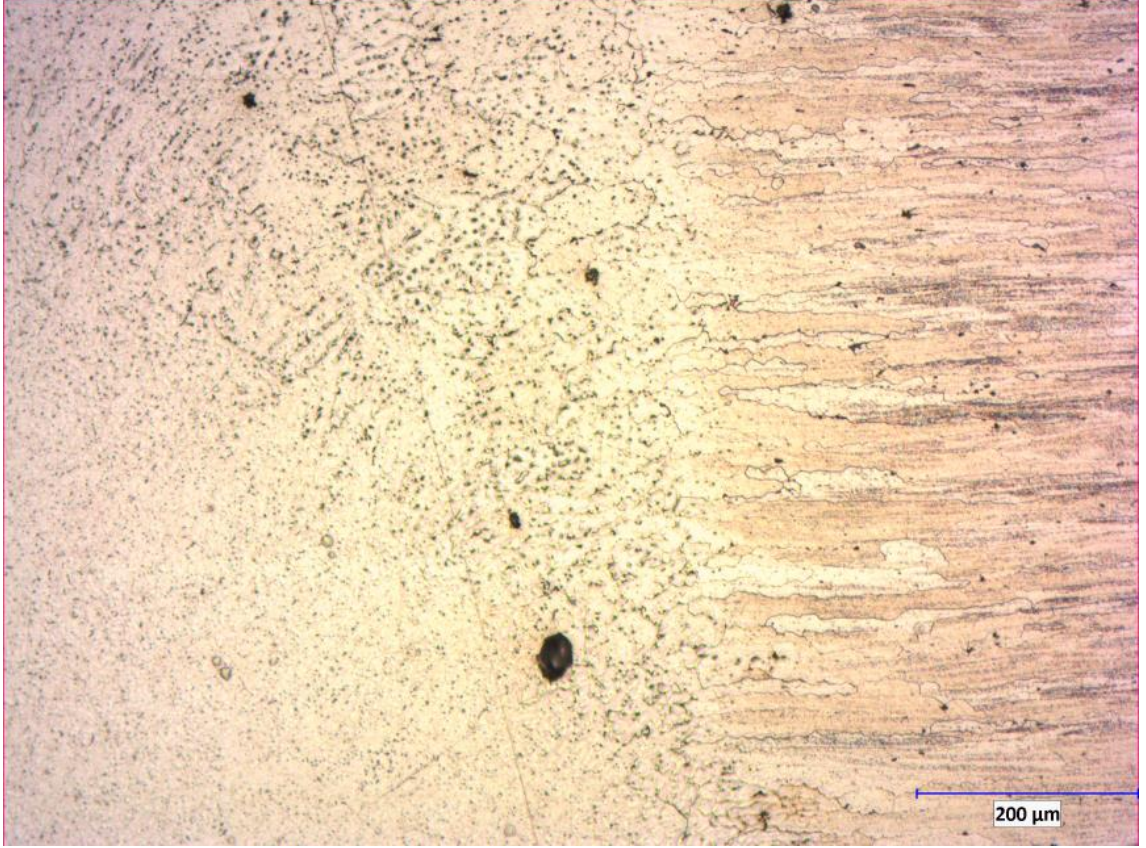


Şekil 5.19 Ana metalin mikroyapı görüntüsü (x200)

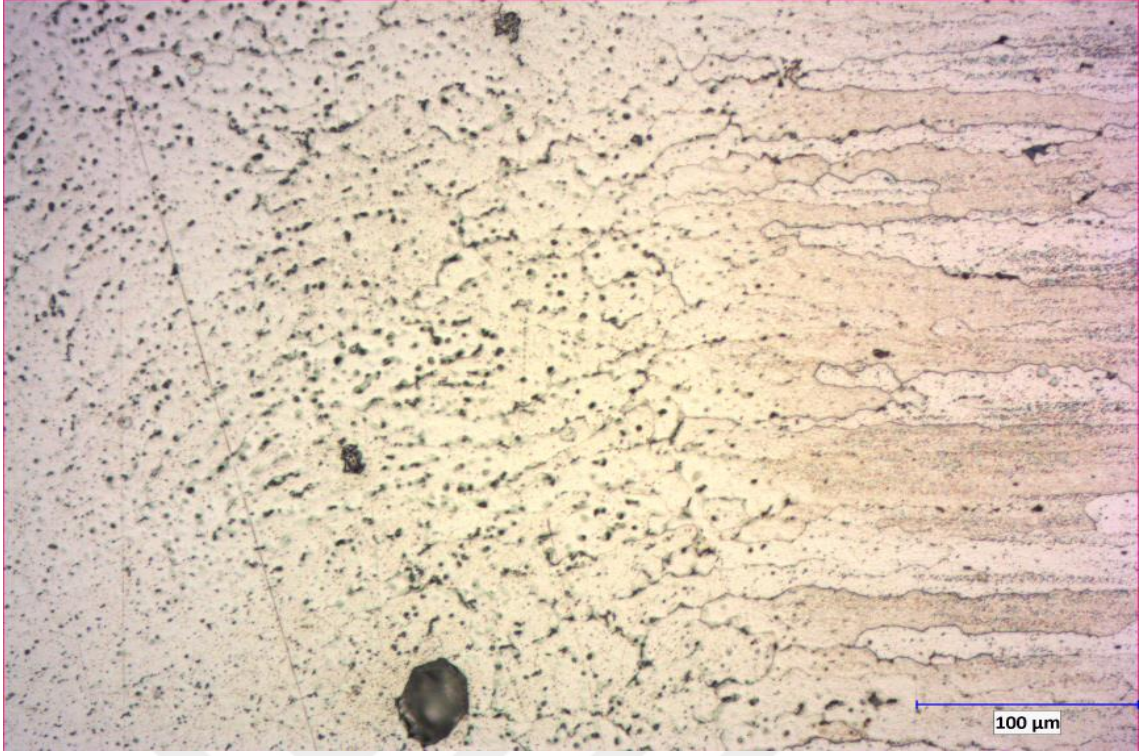


Şekil 5.20 Ana metalin mikroyapı görüntüsü (x400)

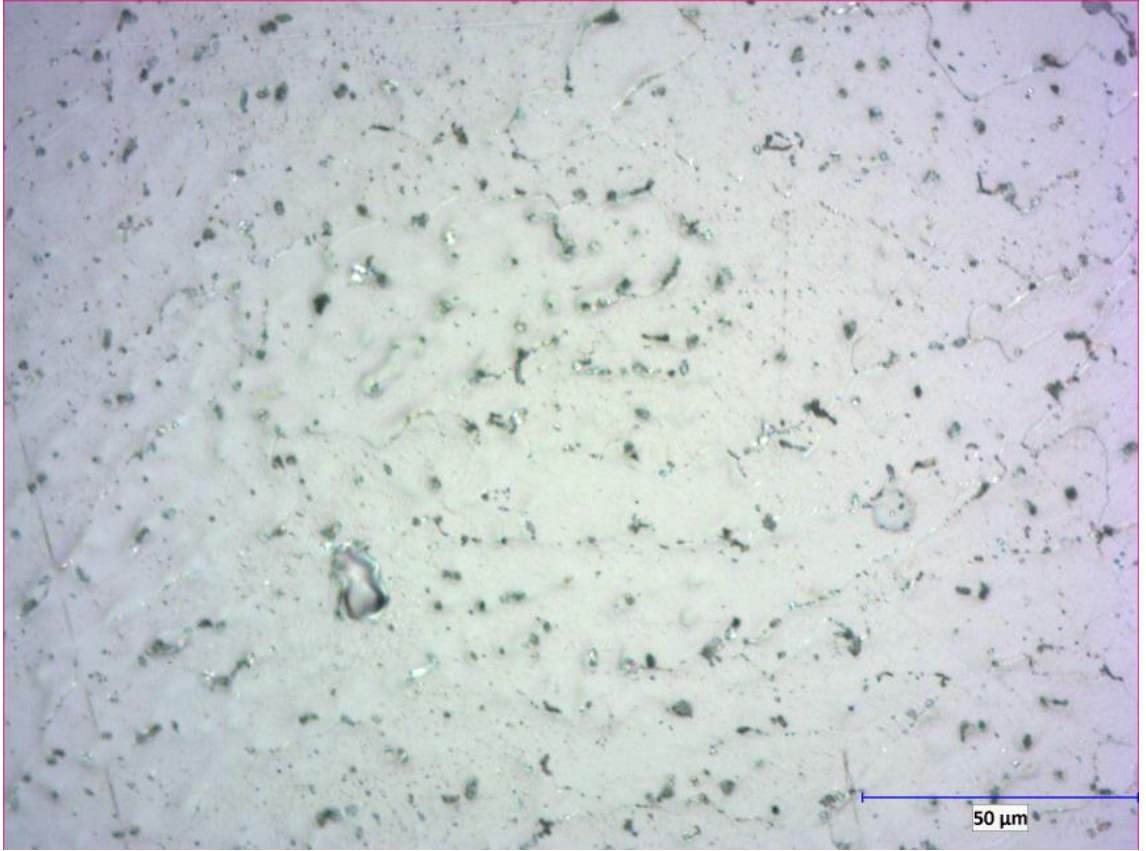
Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'te kaynak geçiş bölgesinin mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Geçiş bölgesinin tane yapısı, ana metal ile kıyaslandığında tanelerin boyutunda artış olduğu gözlenmiştir. Kaynak bölgesindeki tanelere göre ise daha küçük yapıda olduğu görölmektedir.



Şekil 5.21 Kaynak geçiş bölgesi mikroyapı görüntüsü (x100)

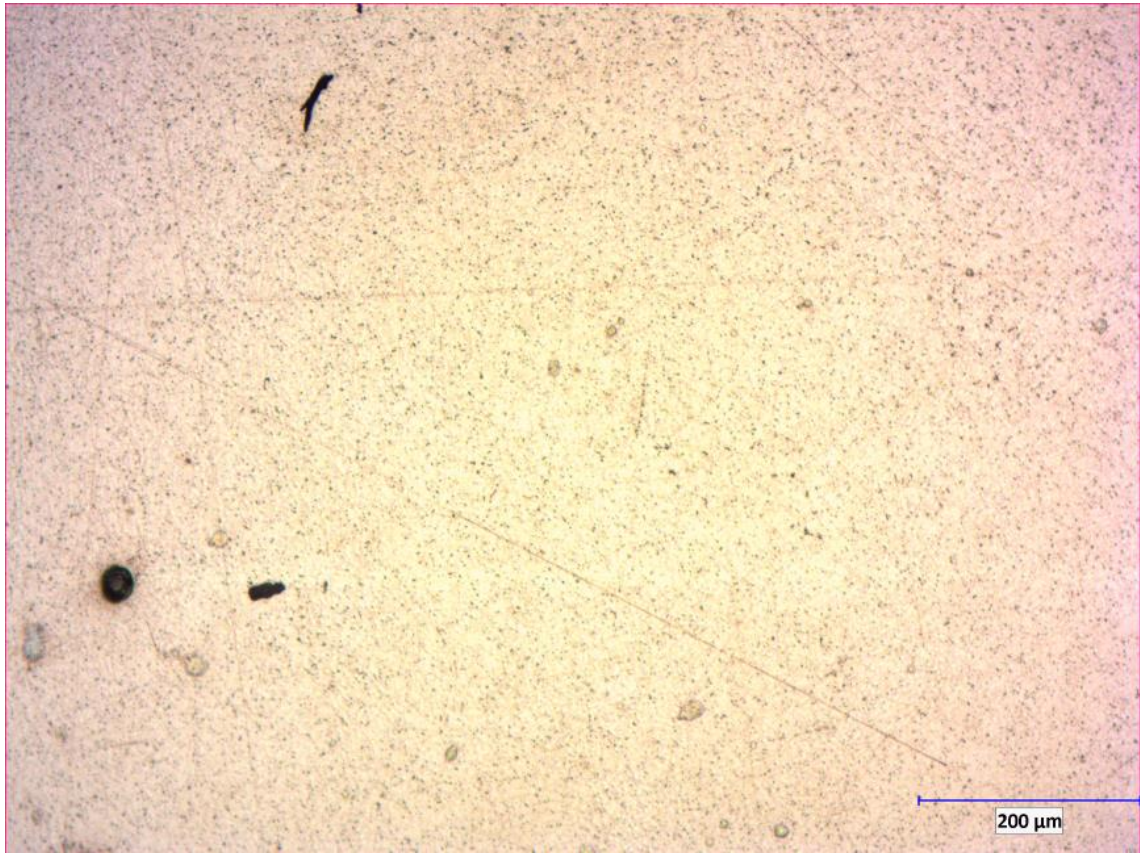


Şekil 5.22 Kaynak geçiş bölgesi mikroyapı görüntüsü (x200)

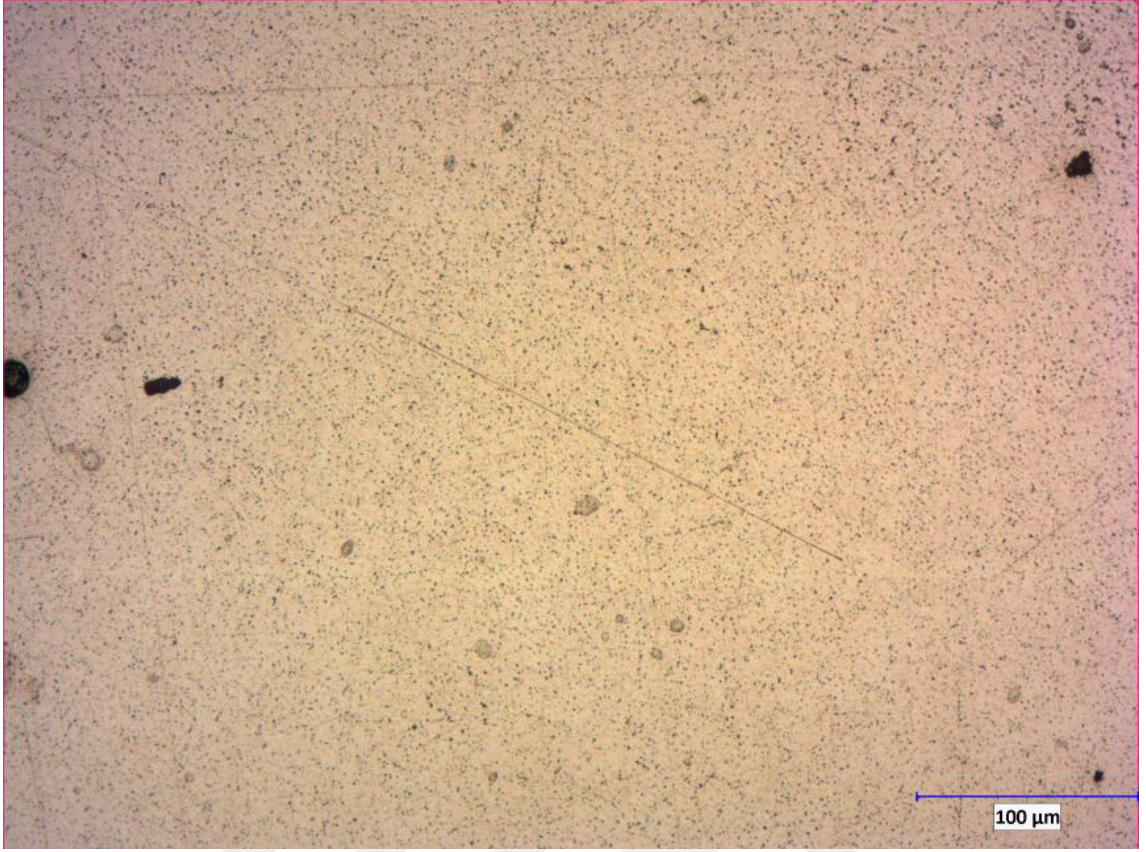


Şekil 5.23 Kaynak geçiş bölgesi mikroyapı görüntüsü (x400)

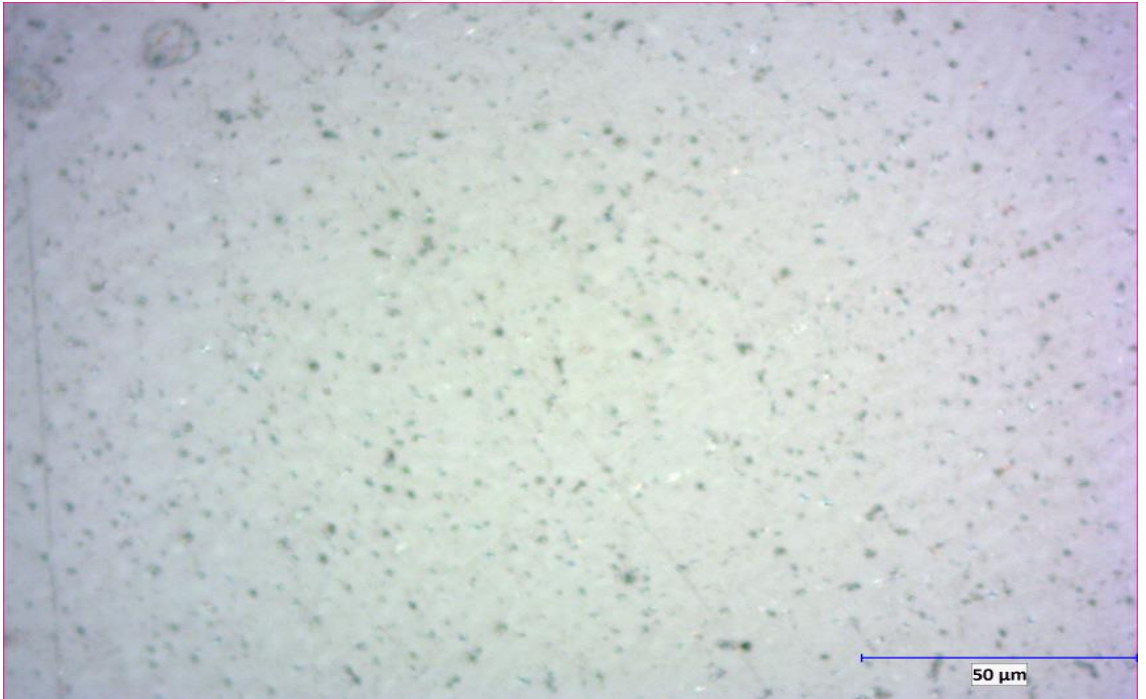
Kaynak bölgesinin mikroyapısı incelendiğinde, tane yapılarındaki büyüme dikkat çekmektedir. Tane yapılarındaki bu büyümenin nedeni, kaynak işlemi esnasında oluşan yüksek sıcaklıktır. Tane yapısının büyümesi, toplam tane sınırı uzunluğunun azalması ve bunun neticesi olarak da metalin enerjisinin azalmasıyla sonuçlanır. Tane sınırı ve enerjisi azalmış bir metalin mekanik özelliklerinin düştüğü bilinmektedir. Kaynak bölgesindeki tanelerin boyutu hem geçiş bölgesi hem de ana metale göre artmıştır. Bu bölgeler içinde en az tane sınırı uzunluğu ve metal enerjisinin kaynak bölgesinde olduğu söylenebilir. Bu durumun, kaynak bölgesinin mekanik özellikler açısından en zayıf bölge olduğunu da göstermektedir. Şekil 5.24, 5.25 ve 5.26’da kaynak bölgesinin mikroyapı görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 5.24 Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (x100)



Şekil 5.25 Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (x200)



Şekil 5.26 Kaynak bölgesi mikroyapı görüntüsü (x400)

5.5 Balistik Deney Sonuçları

5.5.1 MIG Kaynak Öncesi Yapılan Atışlar ve V₅₀ Hız Değerinin Hesabı

MIG kaynak işleminin balistik dayanım üzerine olan etkisini incelemek amacıyla öncelikle kaynak işlemi öncesi testler için hazırlanmış olan 300 mm x 250 mm boyutlarındaki plaka levhaya 7,62 mm çapındaki APM2 NATO zırh delici mermi ile 8 adet atış yapılmıştır. Yapılan bu 8 adet atışın neticesinde 5 adet atış levhayı delerken, 3 adet atışın levhayı delmediği görülmüştür. Yapılan balistik deney %46,3 nem oranında ve 899,6 mBar basınçta gerçekleştirilmiştir. V₅₀ hız değerini hesaplamada 2, 4, 6 ve 8 numaralı atışlara ait veriler dikkate alınmıştır. Yapılan bu hesaba göre bu 4 adet hızın aritmetik ortalaması alınmıştır:

$$V_{50} = \frac{809+827+821+822}{4} = 819,75 \text{ m/s olarak hesaplanmıştır.} \quad (5.1)$$

Bu 4 atışın seçilerek hesaba katılmasının nedeni V₅₀ hızının hesabında, levhayı delen en yüksek hıza sahip merminin hız değerinin, levhayı delmeyen en yavaş merminin hızından farkının 18,29 m/s'den fazla olmamasıdır. Bu şartı sağlamak için V₅₀ hız değerinin bulunmasında genellikle 4 adetten daha fazla sayıda atış yapmak gerekmektedir. Kaynak öncesi yapılan testlerde 8 adet atış yapılarak gerekli şartları sağlayan 4 tanesi seçilmiştir. Hesaba katılan hız verilerine bakıldığında atışlar arasındaki hız farkı:

$$827-809 = 18 \text{ m/s'dir. (18,29 m/s'den düşük olma şartı sağlanmaktadır.)}$$

Hesap edilen 819,75 m/s değerindeki V₅₀ hızı, MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri olan 807,42 m/s hız değerinden 12,33 m/s fazladır. Buradan çıkarılabilecek sonuç MIG kaynak öncesi Alüminyum 7039 levhanın balistik performansının ilgili standartları karşıladığıdır. Yapılan balistik deneylerde elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 5.5'te, deneyde kullanılan levhanın ön yüzeyine ait görsel Şekil 5.27'de ve levhanın arka yüzeyinde bulunan şahit plakaya ait görsel Şekil 5.28'de yer almaktadır. Balistik deney sonuç tablolarında yer alan "CP" kısmi delinme, "PP" tam delinme anlamına gelmektedir. Deneyde atışların yapılması esnasında, namluya konulan barut miktarı manuel olarak ayarlanmakta ve değişen barut miktarı, merminin hızını etkilemektedir. V₅₀ hız değerinin hesaplanabilmesi için gerekli kriterlerin sağlanması için,

atışlar esnasında barut miktarının ayarlanarak, mermi hızının duruma göre artırılıp azaltılması gerekmektedir.

Tablo 5.5 incelendiğinde V_{50} hız değerinin hesabı için 8 adet atış yapıldığı görülmektedir.

Tablo 5.5 MIG kaynak öncesi levhanın balistik deney sonuçları

Atış No	Barut Miktarı mg	1. Hız Ölçer		2. Hız Ölçer		Hız (m/s)			Sonuç
		Zaman μ sn	Hız	Zaman μ sn	Hız	Ortalama Hız	Hız Kaybı	Çarpma Hızı	
1	2,72	1240	806	1244	804	805	2	803	PP
2	2,76	1235	810	1236	809	809	1	809	PP
3	2,86	1183	845	1184	845	845	0	844	CP
4	2,84	1208	828	1209	827	827	1	827	CP
5	2,85	1194	838	1197	835	836	3	835	CP
6	2,83	1217	822	1218	821	821	1	821	PP
7	2,81	1203	831	1204	831	831	0	830	CP
8	2,79	1215	823	1216	822	823	0	822	CP



Şekil 5.27 Balistik deney sonrası levhanın ön yüzey görüntüsü



Şekil 5.28 Balistik deney sonrası şahit plaka görüntüsü

Şahit plaka tam delinme durumunun tespiti için kullanılır. Zırh levhasına bakıldığında önden görülen delik, şahit plakada görülmüyorsa bu kısmi delinme olduğu anlamındadır. Zırh levhasında bulunan deliğin, levhanın arka kısmındaki şahit plakada da görülebilmesi tam delinme durumunun olduğu anlamına gelir.

5.5.2 MIG Kaynak Sonrası Yapılan Atışlar ve V_{50} Hız Değerinin Hesabı

5.5.2.1 Kaynak Bölgesine Yapılan Atışlar

MIG kaynak işleminin balistik dayanım üzerine olan etkisini incelemek amacıyla kaynak sonrası balistik deneyler için hazırlanmış olan 300 mm x 550 mm boyutlarında levha kullanılmıştır. Levhanın V_{50} hız değerine 10 adet atış sonucunda ulaşılmıştır. Bu 10 adet atıştan 7 tanesi levhayı tam delerken, atışların 3 tanesi levhayı delememiştir. Yapılan balistik deney %46,3 nem oranında ve 899,6 mBar basınçta gerçekleştirilmiştir

Yapılan atışlar sonucunda 4, 5, 7 ve 10 numaralı atışlar V_{50} hız değerinin hesaplanması işlemine dahil edilen atışlar olmuştur. Bu 4 adet atışın aritmetik ortalaması V_{50} hızı olarak bulunmuştur:

$$V_{50} = \frac{705+711+721+706}{4} = 710,75 \text{ m/s olarak hesap edilmiştir.}$$

V_{50} hızının hesaplanmasında hesaba katılan hız değerlerine bakıldığında, levhayı delen en yüksek hızlı merminin hızı ile levhayı delemeyen en düşük hızdaki merminin hızları farkı:

$721-705 = 16$ m/s olarak hesaplanır (18,29 m/s'den düşük olma şartı sağlanmaktadır).

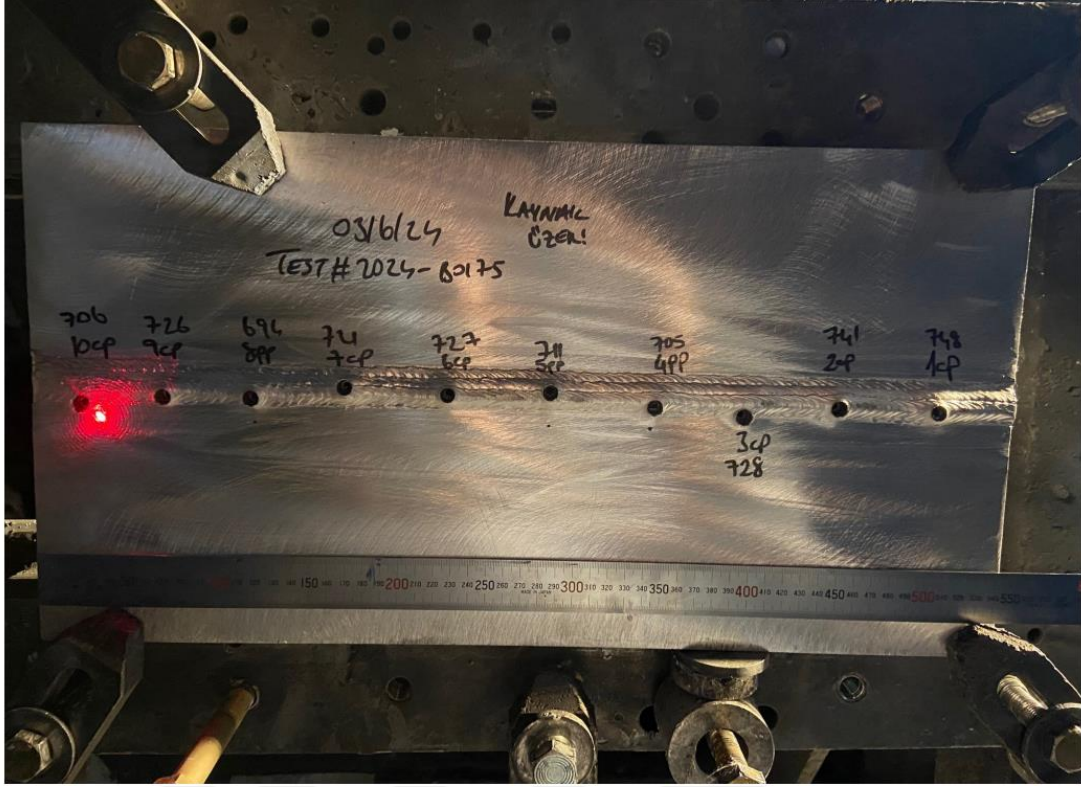
Bu hız değeri MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri olan 807,42 m/s hız değerinden 96,67 m/s daha düşüktür. Bu nedenle kaynak bölgesinin balistik performansının ilgili standarda göre kabul edilebilir sınırın altında olduğu sonucu çıkartılır. Bulunan 710,75 m/s V_{50} hızı kaynak öncesi levhanın 819,75 m/s olan V_{50} hızı ile kıyaslandığında 109 m/s daha düşük olduğu görülür.

Kaynak bölgesine yapılan atışlar ve elde edilen sonuçlara ait veriler Tablo 5.6'da, Şekil levhanın ön yüzeyine ait görsel 5.29'da ve levhanın arka yüzeyine ait görsel Şekil 5.30'da yer almaktadır.

Tablo 5.6'ya bakıldığında 10 adet atışın yapıldığı görülmektedir.

Tablo 5.6 Kaynak bölgesi balistik deney sonuçları

Atış No	Barut Miktarı mg	1. Hız Ölçer		2. Hız Ölçer		Hız (m/s)			Sonuç
		Zaman µ sn	Hız	Zaman µ sn	Hız	Ortalama Hız	Hız Kaybı	Çarpma Hızı	
1	2,52	1335	749	1337	748	749	1	748	CP
2	2,49	1345	743	1348	742	742	1	741	CP
3	2,44	1374	728	1374	728	728	0	728	CP
4	2,38	1416	706	1418	705	706	1	705	PP
5	2,40	1399	715	1404	712	714	2	711	PP
6	2,42	1373	728	1375	727	728	1	727	CP
7	2,41	1382	724	1385	722	723	1	721	CP
8	2,4	1441	694	1441	694	694	0	694	PP
9	2,42	1371	729	1375	727	728	2	726	CP
10	2,42	1412	708	1415	707	707	1	706	CP



Şekil 5.29 Kaynak bölgesi atışlarında kullanılan levhanın ön yüzey görüntüsü



Şekil 5.30 Kaynak bölgesi atışlarında kullanılan levhanın arka yüzey görüntüsü

5.5.2.2 Geçiş Bölgesine Yapılan Atışlar

Kaynakta oluşan yüksek ısıdan etkilenen kaynak geçiş bölgesinin balistik başarısını ölçme amacıyla kaynak bölgesine yakın bölgelere 11 adet atış yapılmıştır. Yapılan atışlardan 7 adedi levhayı delmezken, 4 tanesi levhayı delmeyi başarmıştır. Yapılan balistik deney %46,3 nem oranında ve 899,6 mBar basınçta gerçekleştirilmiştir.

V_{50} hızının hesaplanmasında 4, 6, 8 ve 11 numaralı atışlar hesaba katılmıştır. Bu 4 atışın aritmetik ortalamalarının hesabı ile elde edilen V_{50} hızı:

$$V_{50} = \frac{743+741+754+742}{4} = 745 \text{ m/s olarak bulunur.}$$

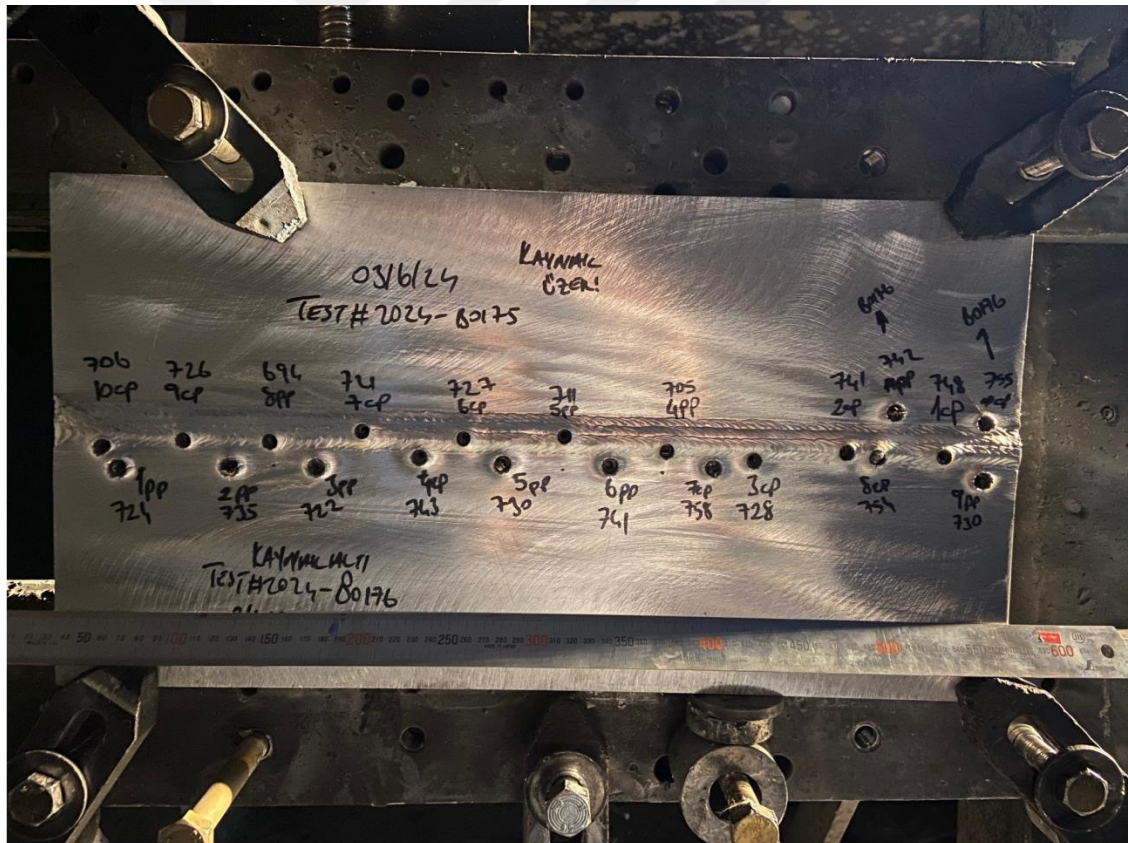
V_{50} hız limiti hesabının geçerli olabilmesi için levhayı delen en yüksek hız değeri ile levhayı delmeyen en düşük hız değerinin farkı hesaplanır:

$$754-741 = 13 \text{ m/s (18,29 m/s'den düşük olma şartı sağlanmaktadır.)}$$

Bulunan 745 m/s V_{50} hız değeri MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri olan 807,42 m/s hız değerinden 62,42 m/s daha düşüktür. Bu nedenle kaynak geçiş bölgesinin balistik performansının ilgili standarda göre kabul edilebilir bir değer olmadığı ifade edilebilir. Kaynak geçiş bölgesinin balistik hız limiti olan 745 m/s kaynak öncesi levhanın balistik hız sınırı olan 819,75 m/s olan hız değerinden 74,75 m/s daha düşük, kaynak bölgesi balistik hız sınır değeri olan 710,75 m/s hız değerinden 34,25 m/s daha yüksektir. Yapılan balistik deneylere ilişkin veriler Tablo 5.7'de, levhanın ön yüzeyine ait görsel Şekil 5.31'de ve şahit plakaya ait görsel Şekil 5.32'de yer almaktadır. Tablo 5.7'ye bakıldığında deneyin bu aşamasında 11 adet atış yapıldığı görülmektedir. Deneyler esnasında atış sayısı arttıkça levha üzerindeki bölgede yeni atışlar için alanın kalmama ihtimalinden dolayı barut miktarı iyi ayarlanmalı ve balistik hız sınır değerinin bulunması için gerekli şartlar deney esnasınca kontrol edilmelidir.

Tablo 5.7 Kaynak geçiş bölgesi balistik deney sonuçları

Atış No	Barut Miktarı mg	1. Hız Ölçer		2. Hız Ölçer		Hız (m/s)			Sonuç
		Zaman μ sn	Hız	Zaman μ sn	Hız	Ortalama Hız	Hız Kaybı	Çarpma Hızı	
1	2,41	1378	726	1381	724	725	1	724	PP
2	2,42	1360	735	1360	735	735	0	735	PP
3	2,44	1379	725	1383	723	724	2	722	PP
4	2,5	1341	746	1345	743	745	2	743	CP
5	2,48	1364	733	1368	731	732	2	730	PP
6	2,5	1349	741	1349	741	741	0	741	PP
7	2,52	1316	760	1318	759	759	1	758	CP
8	2,51	1325	755	1326	754	754	1	754	CP
9	2,5	1368	731	1370	730	730	1	730	PP
10	2,51	1321	757	1323	756	756	1	755	CP
11	2,51	1342	745	1346	743	744	2	742	PP



Şekil 5.31 Balistik deneyler sonrası kaynaklı levhanın ön yüzey görünümü.



Şekil 5.32 Balistik deneyler sonrası levhanın şahit plaka görünümü

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, Alüminyum 7039 alaşımının mekanik ve balistik özellikleri araştırılmıştır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla 2 ve 2,5 mm kalınlıkta numune MIG kaynak öncesi ve sonrası çekme ve eğme testlerine tabi tutulmuştur.

Yapılan çekme deneyleri ile kaynak işleminin malzemenin sertlik ve dayanıklılığı üzerine olan olumsuz etkisi tespit edilmiştir. Kaynak işlemi görmeyen numunelerin Al zırh plakası için kabul edilebilir standart akma dayanımı değeri olan 351,6 MPa değerini ve standart çekme dayanımı değeri olan 413,6 MPa değerini karşıladığı ancak kaynak görmüş numunelerin, bu standart değerlerin altında kaldığı görülmüştür. Kaynaksız numunelerde en yüksek çekme dayanımı 456,62 MPa olarak, kaynaklı numunelerde en düşük çekme dayanımı 341,54 MPa olarak ölçülmüştür. Kaynaksız numunelerde en yüksek akma sınırı 386,12 MPa olarak, kaynaklı numunelerde en düşük akma sınırı 290,40 MPa olarak ölçülmüştür. Kaynak işlemi görmüş numunelerin, elastisite modüllerinin ve kopma uzaması değerlerinin de kaynak görmemiş numunelere kıyasla önemli ölçüde düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. Elastisite modülü ve kopma uzamasının yüksek olması malzemenin sertlik ve dayanımının yüksek olması anlamına gelmektedir. Kaynaksız numunelerde en yüksek kopma uzaması %12,84 olarak, kaynaklı numunelerde en düşük kopma uzaması %6,87 olarak ölçülmüştür. Kaynaksız numunelerde en yüksek elastisite modülü 73,41 GPa olarak, kaynaklı numunelerde en düşük elastisite modülü 53,68 GPa olarak ölçülmüştür. Kaynaksız numunelerin tamamında ölçülen bu değerler, kaynaklı numunelerden yüksek çıkmıştır. Çekme deneyi neticesinde elde edilen tüm sonuçlar kaynak işleminin sertlik ve dayanım üzerine olan olumsuz etkisini ortaya koymaktadır. Diğer taraftan ise, kaynaksız numunelerde deformasyon hızındaki artışın mukavemeti artırdığı görülmüştür.

Eğme deneyi sonuçları kaynak işleminin malzemenin sertlik ve mukavemet gibi dayanımını belirleyen özellikleri üzerine olumsuz etkilerini gösterir niteliktedir. Yapılan eğme deneyleri neticesinde kaynaksız numunelerin eğme dayanımları, kaynaklı numunelere göre belirgin şekilde yüksek çıkmıştır. Kaynaksız numunelerde en yüksek eğme dayanımı 1034,24 MPa olarak, kaynaklı numunelerin en düşük eğme dayanımı 456,59 MPa olarak ölçülmüştür. Aradaki belirgin fark kaynak işlemi gören numunenin

dayanıklılığının önemli ölçüde azaldığının göstergesidir. Yapılan deneyler sonucunda kaynaklı numunelerde en yüksek eğilme momenti 51.024 kgf olarak, kaynaklı numunelerde en düşük eğilme momenti 18.175 kgf olarak ölçülmüştür. Eğilme momentinin yüksek olması malzemenin dayanımının yüksek olduğunu göstermektedir. Kaynaklı numunelerin tamamı 74 derecelik eğilme açısına sahiptir. Kaynaklı numuneler 70 ve 71 derecelik eğilme açılara sahiptir. Bu eğilmeler sonucunda numunelerin tamamında yüzey çatlağı oluşmuştur. Kaynaklı numunelerde daha büyük açı değerinde yüzey çatlağı oluşması, daha iyi mukavemete sahip olmalarının sonucudur. Eğme deneyinden elde edilen sonuçlar, kaynak işleminin malzemenin dayanım özelliği üzerine olan olumsuz etkilerini göstermiştir.

Sertlik deneyi sonuçları kaynak işleminin sertlik üzerine olumsuz etkisini göstermektedir. Kaynak işlemi uygulanmamış numune 159 HV sertlik değerine sahiptir. Bu sertlik değeri St37 gibi bazı çeliklerin sahip olduğu sertlik değeri seviyesindedir. Yapılan sertlik deneyleri kaynak bölgesine ve kaynak geçiş bölgelerine de uygulanmıştır. En düşük sertlik değeri 98,9 HV ile kaynak bölgesinde ölçülmüştür. Sertlik değerindeki bu önemli orandaki azalma malzemenin dayanımını büyük oranda düşürebilmektedir. Kaynak geçiş bölgesinde sertlik değerlerinin 120 ile 130 HV arasında olduğu görülmüştür. Bu değerler kaynak bölgesine göre yüksek olsa da kaynağa yakın bölgelerin de kaynağın sertlik üzerine olan olumsuz etkisini göstermiştir.

Makroyapı ve mikroyapı sonuçları incelendiğinde, kaynak işlemi esnasında oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile tane boyutlarının arttığı görülmüştür. Kaynak bölgesindeki tane boyutlarının, ana metale ve kaynak geçiş bölgesine göre daha büyük olduğu, bu durumun tane sınırlarında azalmaya yol açmasından dolayı metalin enerjisini düşürdüğü ve mekanik özelliklerini kötüleştirdiği yorumu yapılmıştır.

Balistik dayanımı ortaya koyan en önemli veri, balistik dayanımı ölçülmek istenen malzemenin V_{50} hızıdır. V_{50} hız, malzemenin delinme ihtimalinin %50 olarak kabul edildiği hız sınırı değeridir. Bu sınır değer hesap edilirken çok fazla sayıda atış yapmak gerekebilmektedir. Bu durumun sebebi bu sınır değer bulunurken 2 adet malzemeyi delen ve 2 adet malzemeyi delmeyen atışın hesaba katılması ve bu atışlardan levhayı delen en yüksek hıza sahip olanla levhayı delmeyen en düşük hıza sahip olanın farkının 18,29 m/s'den düşük olması gerekliliğidir. Bu durum hesaba katılarak balistik deneyler kapsamında 38 mm kalınlığa sahip 2 adet levha kullanılmıştır. Levhaların boyutları seçilirken, V_{50} hızının hesap edilebilmesi için gereken tahmini atış sayısı göz önünde

bulundurularak, maliyetler de düşünülerek ihtiyaca cevap verecek en küçük ölçülerde levhalar hazır edilmiştir. Bu levhalardan biri kaynak öncesi balistik deneyler, diğeri kaynak işlemi sonrası balistik deneyler için kullanılmıştır. Kaynak işlemi öncesi balistik deneyler için 300 mm genişlik ve 250 mm uzunluğa sahip levha kullanılmıştır. Bu levhaya yapılan 8 adet atışın sonucunda V_{50} hızın hesabı için gerekli verilere ulaşılarak 819,75 m/s sonucu elde edilmiştir. Atışlar esnasında hem MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri olan 807,42 m/s hız değeri verisi, hem de literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalar dikkate alınarak, levhanın sınırlı atış alanı ve her bir merminin yüksek maliyeti düşünülerek, mümkün olan en az sayıda atış yapılarak sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. Sonuç olarak elde edilen sonuç, kabul edilebilir standartlar içindedir.

Kaynak sonrası balistik deneyler için hem kaynak bölgesi, hem de kaynak geçiş bölgesine atışlar yapılacağından 550 mm genişlik ve 250 mm uzunlukta bir levha hazırlanmıştır. Kaynak bölgesine yapılan atışlarda da hem MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri olan 807,42 m/s hız değeri verisi, hem de literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalar dikkate alınmıştır. Deneyin bu aşamasında da amaç hem sınırlı atış alanı hem de maliyeti düşük tutmak maksadıyla mümkün olan en az sayıda atış yaparak gerekli hız verilerine ulaşmak olmuştur. Deneyin bu kısmında 10 adet atış sonucunda gerekli hız verilerine ulaşılarak 710,75 m/s hız değeri hesap edilmiştir. Bu hız değeri, kabul edilebilir sınır değerden düşüktür.

Kaynak geçiş bölgesine, V_{50} hız sınır değerinin hesabı için 11 adet atış yapılmıştır. Bu aşamada da MIL-DTL-7039 Al Zırh plakasının standart balistik sınır değeri olan 807,42 m/s hız değeri verisi ve literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalardan faydalanılarak en az sayıda atış ile gerekli verilerin elde edilmesi amaçlanmış ve başarılı olunmuştur. Yapılan atışların sonucunda balistik hız sınırı değeri 745 m/s olarak hesaplanmıştır. Bu değer, Al Zırh plakasının standart balistik sınır değerinin altındadır.

Sonuç olarak, kaynak işleminin balistik dayanım üzerine olumsuz etkisi deneylerle ortaya konulmuştur. Bu durumun temel sebebi olarak, kaynak esnasındaki ısının malzemede mikroyapı ve kimyasal bileşim değişikliğine yol açması gösterilebilir. Hem kaynak bölgesi hem de kaynağa yakın bölgelerin balistik dayanımının belli oranda düştüğü gözlemlenerek, kaynak bölgesinden uzaklaştıkça bu olumsuz etkinin azaldığı görülmüştür. Kaynak işlemi, malzemenin balistik dayanımını olumsuz etkilemesine ve dayanımın kabul edilebilir sınır değerinin altına düşmesine neden olmasına rağmen,

malzemenin balistik koruyuculuk özelliği büyük oranda devam etmektedir. V_{50} hızının hesabında elde edilen verilerin yapılan atış sayısını azalttığı ve oldukça önemli olduğu söylenebilir. Deneyde kullanılacak malzeme boyutları, yapılması muhtemel atış sayısı düşünülerek seçilmelidir. Aksi takdirde levha üzerinde atış yapılacak alanın yetersizliğinden, deney sonucunda istenen veriler elde edilemeyebilir.

Balistik deney anlamında, V_{50} hız değerinin hesap edilmesi gereken çalışmalarda bu hız değerinin hesaplanabilmesi için gereken şartlar göz önünde bulundurulmalı ve atış yapılacak yüzey alanının belirlenmesinde fazla sayıda atış yapma ihtiyacının oluşması ihtimali mutlaka değerlendirilmelidir. Deneyler sırasında, ilgili malzemenin V_{50} standart değeri kontrol edilerek, atışların yapılması esnasında kullanılacak barut miktarının ayarı yapılmalıdır. Kaynak işlemi gören numuneler için yapılan deneylerde kaynak bölgesindeki sertlik kaybının neden olduğu balistik koruma performansındaki muhtemel düşüş göz önünde bulundurularak ilgili malzeme için standartta yer alan V_{50} hız değerinden ortalama olarak %20 düşük bir hız ile atışlara başlanmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Askeri zırhlı araçlarda kullanılan malzemelerin balistik ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özellikleri etkileyen faktörlerin tespiti ile bu etkilerin hangi oranda gerçekleştiğinin farkına varılması operasyonel güvenliğin sağlanması adına elzemdir.

Bununla birlikte günümüzde malzeme biliminin ilerlemesi ile yeni malzeme türleri geliştirilmekte ve bu malzemelerden bazıları zırh malzemesi adayı olmaktadır. Yine bu yeni geliştirilen aday malzemelerin balistik performanslarının araştırılması konusunda alternatif oluşturduğu malzemelerin V_{50} limitleri ile karşılaştırmak ve literatüre sonuçları eklemek faydalı olacaktır.

- Add On Armour Systems. (t.y.). Smas Ballistic. Erişim adresi <https://www.secantglobal.com/add-on-armour>.
- Akçay, M. (1986). *Bir tip merminin hareketinin deneysel incelenmesi ve dış balistik ve teorik yaklaşım*. K.K. Yayınları. Ankara.
- Akçay, M. (2010). *Balistik*. Kazmaz Yayıncılık. İstanbul.
- Aluminum Alloy 7039, MIL-DTL-46063 H. ARMOR PLATE.
- Alüminyum Numaralandırma Sistemi. (2019, 7 Ocak). Solmaz Metal. Erişim adresi <https://solmazmetal.com.tr/aluminyum-numaralandirma-sistemi/>.
- Alüminyum Temper Tanımlamaları Hakkında Ayrıntılı Bir Rehber. (t.y.) Erişim adresi <https://aydinlarmakinametal.com.tr/aluminyum-temper-tanimlamalari/>.
- Al-khaf, Zainab. (2019). *Introduction to Ballistics*.
- Alpay, O. (1982). *Kaynak dikişlerinin tahribatlı muayene teknikleri*. SEGEM. Yayın No:100. 27-34. Ankara.
- Ankara Alüminyum Sanayicileri Derneği, (2003).
- Balistik Deneyler. (t.y.) ROKETSAN. Erişim adresi <https://www.roketsan.com.tr/tr/cozumlerimiz/hizmetlerimiz/balistik-test-hizmetleri>.
- Ballistics. (t.y.). Guns/Gunblst. Erişim adresi <https://webpath.med.utah.edu/TUTORIAL/GUNS/GUNBLST.html>.
- Balos, S., Grabulov, V. & Sidjanin, L. (2010). Future Armoured Troop Carrying Vehicles. *Defence Science Journal*, 60. pp. 483-490. 3-4. doi:10.14429/dsj.60.550.
- Balos, S., Howard, D., Brezulianu, A. & Zlatanović, D.L. (2021). "Perforated Plate for Ballistic Protection—A Review". *Metals* 11 (4). doi:10.3390/met11040526.
- Batıgün, C. (1997). *Alüminyum Malzemelerde Kaynaklama İşlemine Bağlı Sıcak Çatlama Eğilimi*, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı. İstanbul.
- Bozkurt, B. (2016, 5 Aralık). Alüminyum Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri. [Malzeme bilimi] <https://malzemebilimi.net/aluminyum-alasimlarinda-kullanilan-kaynak-yontemleri.html>
- Campbell, J. (2003). *Castings: The new metallurgy of cast metals*, butterworth heinemann. 2nd edition. United Kingdom. 4-57.
- Carlucci & Jacobson. (2008). *Ballistics theory and design of guns and Ammunition*. CRC Press. Boca. Raton & London & New York. 3-5.
- Çekme Deneyi. (t.y.). Sütçü İmam Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü. Erişim adresi [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ks%C3%BC%20%C3%A7ekme%20\(1\)_1702221612397020.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ks%C3%BC%20%C3%A7ekme%20(1)_1702221612397020.pdf).

- Crouch, I.G. (1988). Metallic Armour – From Cast Aluminium Alloys to High Strength Steels. *Materials Forum*. 2-7.
- Crouch, I. G. (2017a). Introduction to Armour Materials. In *The Science of Armour Materials*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-0-08-100704-4.00001-3. 2.
- Crouch, I. G. (2017b). Laminated materials and layered structures. In *The Science of Armour Materials (Vol. 1)*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-0-08-100704-4.00004-9. 3-4.
- Crouch, I.G. (2016). *The science of armour materials*. 1st edition. Woodhead publishing. 16-17.
- Crouch, I. G., Franks, G. V., Tallon, C., Thomas, S., & Naebe, M. (2017). Glasses and Ceramics. In *The Science of Armour Materials*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-0-08-100704-4.00007-4. 4-7.
- Çelikel, A., (2008). *Av tüfeği namı uzunluğunun saçma dağılımına etkisi ve atış mesafesinin belirlenmesinde önemi*. Tıpta uzmanlık tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Tıp Fakültesi Adli Tıp Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Dağçimen, A. (2006). *Patlatma tasarımı için geliştirilen bir bilgisayar programı*. Yüksek Lisans Tezi Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Davis, J. R. (2001). *Alloying: understanding the basics*. ASM International. United States of America. 351-416.
- Demirci, M.K. (2011) Dünya Alüminyum Ticaretinde Türkiye'nin Yeri. 5. Alüminyum Sempozyumu. İstanbul.
- Demircioğlu, P. (2002). *Alüminyum alaşımlarının dökümünde gaz oluşumu ve gaz giderme tekniklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul.
- Doig, A., (1998b). *Military metallurgy*, IOM Communications Ltd. London, Great Britain, pp. 61-66.
- Edwards, R.A, Whittaker, M.M., Whittaker, J.W., Baker, E.N. (2001). Outer Sphere Mutations Perturb Metal Reactivity İn Manganese Superoxide Dismutase. *Biochemistry* 40(1):15-27. doi:10.1021/bi0018943. 6.
- Erdem, M. (2001). *Alüminyum alaşımlarının (5083 ve 7039) kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi. Ankara.
- Erdem, M., Cıncı, H., Gökmen, U., Karakoç, H., Türker, M., (2015), Mechanical and ballistic properties of powder metal 7039 aluminium alloy joined by friction stir welding, *Science Direct*. doi: 10.1016/S1003-6326(16)64090-6.
- Erdem, M. ve Türker, M. 7039 (2011), Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve Sonrası Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Ankara.
- Eryürek, B.İ. (2007). *Kaynak teknolojisi. Gaz altı ark kaynağı*. Askaynak Yayını. İstanbul.

- Esnek Katmanlı Kafes Zırh Sistemi Projesi. (2016, 19 Aralık). Erişim adresi <https://www.millisavunma.com/esnek-katmanli-kafes-zirh-sistemi-projesi/>.
- FNSS ZAHA. (t.y.). Zırhlı Amfibi Hücum Aracı Genel Bakış. Erişim adresi <https://www.fnss.com.tr/en>
- Fras, T., Murzyn, A. & Pawlowski P. (2017) Defeat mechanisms provided by slotted add-on bainitic plates against small-calibre 7.62 mm × 51 AP projectiles. *Int J Impact Eng.*
- Geliş, Ö.G.K. (2014). Kaynak Teknolojisi, vol. 8, no. 33. Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu.
- Gooch, W. (2006). “An Overview of Protection Technology for Ground and Space Applications”. Land Warfare Conference, 2006: Brisbane, Australia.
- Gun Wiki. (t.y.). Weapons. Erişim adresi https://guns.fandom.com/wiki/Main_Page
- Gül, M. (2022). *Bor karbür (B₄C) ve grafen nano partikül (GNP) takviyeli alüminyum (AA7075) matrisli kompozit zırh tasarımı ve balistik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü. Harp Silah ve Araçları Anabilim Dalı, Millî Savunma Üniversitesi. Ankara.
- Günümüzde Kullanılan Zırhlar, Çeitleri ve Malzemeleri. (2018, 10 Şubat). Erişim adresi <https://www.savunmasanayi.org/gunumuzde-kullanilan-zirhlar-ve-cesitleri/>
- Hakan, A. (2019, 16 Temmuz). Zırhlı Araçlarda Kompozit Zırhlar”. Erişim adresi <https://www.savunmasanayist.com/s-400-teslimatlari-besinci-gununde-devam-ediyor/>
- Hazell, P. J. (2015). *Armour: Materials, Theory, and Design*. CRC Press. doi:10.1201/b18683. 3-6.
- Hazell, P. J. (2022). *Armour; Materials, Theory, and Design*. Second Edition. doi:10.1201/b18683.
- Hazell, P. J., Roberson, C. J. & Moutinho, M. (2008). The design of mosaic armour: The influence of tile size on ballistic performance. *Materials and Design*, 29(8), 1497–1503. doi:10.1016/j.matdes.2008.03.003
- Isıl Genleme Katsayısı. (2018, 21 Eylül). Erişim adresi <https://www.humbarahane.com/isil-genlesme-katsayisi/>.
- Isıl İşlem ve Kondisyon Göstergeleri. (t.y.). Amade Metal Web Sayfası. Erişim adresi <https://www.amademetal.com/isil-islem-ve-kondisyon-gostergeleri/> ,
- İzgi, M.T. (2023). Zırh Sistemlerinde Farklı Mekanik Özelliklere Sahip Ön Yüz Seramik Malzemelerin Balistik Performansının İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Harp Silah ve Araçları Anabilim Dalı, Milli Savunma Üniversitesi, Ankara.
- Jagdtiger. (2024, 7 Ocak). Wikipedia. Erişim adresi <https://en.wikipedia.org/wiki/Jagdtiger>
- Jena, P. K., Mishra B., Kumar K. S. & Bhat B. (2010). An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour materials against 7,62 mm deformable projectile, *Materials and Design*. 31, 3308–3316.

- Kalman, D.P., Merrill, R.L., Wagner, N.J. & Wetzel, E.D. (2009). Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle– fluid suspensions, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1 (11), 2602-2612.
- Kaufman, J. G. (2000). “Introduction to Aluminum Alloys and Tempers”, *ASM International*. United States of America, 87-115.
- Korkut, S. (2017). *Statik ve dinamik yükler altında kompozit plakaların hasar durumlarına karşı davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Kurgan, N. (2023). *Kaynak hataları*. 1-24. On Dokuz Mayıs Üniversitesi.
- Kurt, A. (2013) *Kaynak Metalurjisi*. 1–151.
- Laible, R. C, et al. Ballistic Materials and Penetration Mechanics. *New York: Elsevier Scientific Publishing Company*. 1980.
- Madhu, V. & Bhat, T. (2011). “Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles”. *Defence Science Journal* 61(4):394-402. doi:10.14429/dsj.61.365.
- Madhusudhan Reddy, G., Mohandas T. & Papukutty K.K. (1998). Effect of welding process on the ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments, *J. of Mater. Proces. Tech.* 74, 27–35.
- Madhusudhan Reddy, G. & Mohandas, T. (1996). Ballistic performance of high strength low alloy steel weldments. *J. of Mater. Proces. Tech.* 57, 23- 30.
- Madhusudhan Reddy, G. & Mohandas, T. & Papukutty K.K. (1999). Enhancement of ballistic capabilities of soft welds through hardfacing, *Int. J. of Impact Eng.* 22, 775-791.
- Mehmet, F. (2023, “15 Nisan). Altay Tankının Daha Güçlü Yeni Zırhı”. Erişim adresi <https://www.defenceturk.net/altay-tankinin-daha-guclu-yeni-zirhi-roketsandan>.
- Metin, Y. (2019, 25 “Mart). Reaktif (Tepkisel) Zırh Çeşitleri” Erişim adresi <https://www.savunmasanayist.com/reaktif-tepkisel-zirh-cesitleri/>.
- Mohandas, T., Madhusudhan Reddy, G. & Satish Kumar, B. (1999). Heat affected zone softening in high strength low alloy steels. *J. of Mater. Proces. Tech.* 88, 284-294. doi:10.1016/S0924-0136(98)00404-X.
- Nevcanoğlu, A. (2019). *TIG kaynağı yöntemi ile birleştirilmiş inconel 718 süper alaşım malzemenin kaynak sonrası özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Marmara Üniversitesi. İstanbul.
- Ogorkiewicz, R. (1991). *Technology of Tanks*.
- Ogorkiewicz, R. (2017). *Tanks: 100 Years of Evolution. Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Oğuz, B. (1990). *Demir dışı metallerin kaynağı*. Oerlikon Yayını.

- Okay, S. (2016). *Investigation of mechanical property changes after MIG welding of (7XXX) series aluminum alloys*. Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Özbağdatlı, E. (2023). *Alümina Seramik Plakaların Şekillendirilmesi ve Balistik İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Bartın Üniversitesi.
- Özer, G. (2008). *Dış balistik analizinde izdüşüm alanı etkilerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Kırıkkale Üniversitesi.
- Özşahin, E. & Tolun, S. (2010). Influence of surface coating on ballistic performance of aluminum plates subjected to high velocity impact loads, *Materials and Design*, 3, 1276–1283.
- Öztürk, A.R.(1988). *Dış balistik*. M.K.E. Kütüphanesi. 78-83. Ankara.
- Papetti, Dino J. (1980). “Chapter 7 - Metallic Armor Materials”. *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, 5:145-67. *Methods and Phenomena*. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-41928-6.50012-0.
- Polmear, I. J. (2017), “Light Alloys Metallurgy of The Light Metals” 90 Tottenham Court Road, 17-21, London W1P 9 HE.
- Prasad, N.E. & R. J. H. Wanhill Springer. (2017). *Aerospace Materials and Material Technologies Vol 2: Aerospace Material Technologies*. : <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2143-5>.
- Products Welding Wire. (t.y). One Touch Exim. Erişim adresi <https://onetouchexim.com/pipe-bending-techniques-methods/>.
- Radisavljevic, I., Balos, S., Nikacevic, M. & Sidjanin, L. (2013). Optimization of geometrical characteristics of perforated plates. *Mater Des.*49:81–9. doi:10.3390/met11040526.
- Rosenberg, Z. & Dekel, E. (2020). Terminal Ballistics. In *Terminal Ballistics*. 256-307. doi:10.1007/978-3-030-46612-1.
- Sadanandan, S., & Hetherington, J.G. (1997). Characterisation of ceramic/steel and ceramic/aluminium armors subjected to oblique impact. *Int. J. Impact Enrgng*. 19, 811-819.
- Salman, S. & Gülsoy H. Ö. (2021). *Metalogrofi bilimi*. 5. Basım. Nobel Akademik Yayıncılık. Ankara. 1-3.
- Salman, S., Fındık F. & Uzun H., (2003) *Malzeme biliminin temelleri*. Değişim Yayınları. İstanbul. 12-15.
- Salman, S., Bozkurt, Y., Çelik, A., Ulupınar, H. & Kalender, M. (2020). *3 Boyutlu Yazıcı Sistemine Monte Edilmiş TIG Kaynak Mekanizması*. Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği & Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

- SAS Weapons Rifles Heckler Koch G3. (t.y.). Smallarmssurvey. Eriim adresi <https://www.smallarmssurvey.org/sites/default/files/SAS-weapons-rifles-Heckler-Koch-G3..pdf>.
- Sharma, C., Kumar, D., Kumar, P (1980-2015), *Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminum alloy*, Materials & Design Volume 36, 2012, Pages 379-390, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.054>.
- Springfield M14. (t.y.). WeaponSystem.Net. Erişim adresi <https://weaponsystems.net/system/293-Springfield+M14>.
- Tank Zırhlarını Tanıyalım. (2021, 8 Haziran). Youtube Sayfası. Erişim adrresi <https://www.youtube.com/watch?v=2wcm5MApKRY>.
- Tarku, M. (2023). *Add-on perfore zırh plakaların deneysel balistik performans analizleri*, Yüksek Lisans Tezi. Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Ana Bilim Dalı. Başkent Üniversitesi. Ankara.
- TIG Kaynağı. (t.y.). Kaynak Okulum Web Sayfası. Erişim Adresi <https://www.kaynakokulum.com/tig%20kayna%C4%9F%C4%B1>
- Tülbentçi, K. (1990). *MIG-MAG eriyen elektrot ile gazaltı kaynağı*. Gedik Holding Yayını. İstanbul. 137-141.
- Uzunonat, Y. (2012). *TIG kaynağı uygulanmış inconel 718 malzemenin darbe dayanımının incelenmesi*. Doktora Tezi. Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Übeyli, M., Yıldırım O. & Ögel B. (2008). Investigation on the ballistic behavior of Al2O3/Al2024 laminated composites, J. of Mater. Proces. Tech.,196:356, 64.
- Üç Nokta Eğme Testi Deneyi. (2017, 24 Mart). Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi. Erişim adresi chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/http://cdn.hitit.edu.tr/mf/files/39932_1703231357926.pdf.
- Wang, Q. G.; Apellian, D.; Lados, D. A. (2001). “Fatigue Behavior of A356 - T6 Aluminium Cast Alloys. Part I. Eff.ect of Casting Defects” *Journal of Light Metals*. 1, 73 – 84. doi:10.1016/S1471-5317(00)00008-0.
- Weston, J. (2000). Surface related features of laser welding of aluminum alloys. *ISIJ Int*. 40, 6–9. doi:10.2355/isijinternational.40.Suppl_S6.
- Yavaş, M.O. (2009). *Hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı kompozit malzeme tasarımı ve balistik dayanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi. Konya.
- Yiv. (2024, 15 Şubat). Vikipedi. Erişim adresi <https://tr.wikipedia.org/wiki/Yiv#:~:text=Namlu%20i%C3%A7indeki%20oyuklara%20%22yiv%22%2C,yivli%20silah%20kategorisinde%20yer%20al%C4%B1rlar>.
- 7.62x51 mm NATO. (2024, 10 Ocak). Erişim adresi https://tr.wikipedia.org/wiki/7.62%C3%9751mm_NATO.

Adı Soyadı: Salih KÜÇÜKKATIRCI

Eğitim

Lisans: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Kayseri, 2018.

Yüksek Lisans: Millî Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü, Harp Silah ve Araçları Anabilim Dalı/ Harp Silah ve Araçları Programı, Ankara, 2025.

Çalışma ve Araştırma Alanları: Elektronik Harp ve Radar Sistemleri, Anten Teknolojileri, Zırh Sistemleri ve Malzemeleri, Balistik, İHA Önleme Sistemleri, Proje ve Maliyet Yönetimi.

Yıl	Kurum	Unvan
2021-2023	Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı	VHKİ
2023-Halen	Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Savunma Sanayii Başkanlığı	Savunma Sanayii Uzman Yardımcısı