

**T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**LAZER KAPLAMA YÖNTEMİYLE ZİRH
ÇELİKLERİNDE BALİSTİK PERFORMANSIN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Büşra ASLAN
1781005**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ**

**ANKARA
AĞUSTOS 2020**

**T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**LAZER KAPLAMA YÖNTEMİYLE ZİRH
ÇELİKLERİNDE BALİSTİK PERFORMANSIN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Büşra ASLAN
1781005**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ**

**ANKARA
AĞUSTOS 2020**

T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ALPARSLAN SAVUNMA BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HARP SİLAH VE ARAÇLARI ANABİLİM DALI
SİLAH SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

LAZER KAPLAMA YÖNTEMİYLE ZIRH
ÇELİKLERİNDE BALİSTİK PERFORMANSIN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜŞRA ASLAN
1781005

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07.08.2020
Tezin Savunulduğu Tarih: 19.08.2020

Tez Oy birliği ile başarılı bulunmuştur.

Unvan Ad Soyad

İmza

Tez Danışmanı	Dr.Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ
Jüri Üyeleri	Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR
	Dr.Öğr. Üyesi Emre AYTAV

ANKARA
AĞUSTOS 2020

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve ç) Sonuç ve Öneriler kısımlarından oluşan toplam 126 sayfalık kısmına ilişkin, 07/08/2020 tarihinde “Turnitin” adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6’dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/ dâhil
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları’nı inceledim ve bu Uygulama Usul ve Esasları’nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Büşra ASLAN

/ / 2020

ETİK BEYAN

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Türk Silahlı Kuvvetleri, Kara Kuvvetleri Komutanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Büşra ASLAN

/ / 2020

Türkiye Cumhuriyeti'nin kurucusu Ulu Önder Mustafa Kemal Atatürk,

Aziz Şehitlerimiz ve Kahraman Gazilerimize...



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, lazer kaplama yöntemi kullanılarak zırh çelikleri ile birleştirilen toz malzemeler neticesinde elde edilen metal davranışları laboratuvar deneyleri ve atış testleri ile incelenerek zırh çeliklerinin balistik performansını artırmaya yönelik öneriler sunulmuştur. Bu kapsamda, üç farklı zırh çeliklerine üç farklı kaplama tozu ikişerli bölümlere uygulanmak suretiyle her bir metal türü altışar levha halinde elde edilerek çalışmalara başlanmıştır. Zırh çeliklerinin iki eş bölümünden birine 7,62 mm M60 ve M81 fişekleri ile atış testi uygulanırken diğer kısımlara laboratuvar ortamında mikro yapı, mikro sertlik ve ağırlık düşürme incelemeleri ve testleri gerçekleştirilerek elde edilen veriler delinme derinliği, tokluk, sertlik, mikro yapı özellikleri çerçevesinde kıyaslanmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde; literatür araştırması, kuramsal temeller, malzeme ve metot, deney sonuçları ve tartışma ile sonuç ve öneriler başlıklarına yer verilmiştir. Böylelikle, Türk Savunma Sanayinin ihtiyaç duyduğu hafif ve dayanımı yüksek malzeme araştırmalarına girdi sağlanarak Türk Silahlı Kuvvetlerinin bu alandaki projelerine katkı sunulması hedeflenmiştir.

Çalışmalarına tecrübe ve bilgisiyle yön vererek desteğini ve hoşgörüsünü esirgemeyen değerli hocam Dr.Öğr. Üyesi Albay Ayhan AYTAÇ'a ve hayatımdaki varlıklarına her daim şükrettiğim annem Belgin ASLAN ve ablam Bahar ASLAN'a sabır, anlayış ve desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Metal malzemelerin temin edilmesini sağlayan Kara Harp Okulu Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve laboratuvar testlerinde desteklerini esirgemeyen teknik personele, dolgu malzemelerinin toz halde temini ve lazer kaplama uygulaması için UniqueTech Mühendislik Teknik Müdürü Osman KIRLI'ya ve yardımlarını esirgemeyen Malzeme Mühendisi Melih TARIM'a, zırh çeliklerinin laboratuvar ve atış testine uygun boyutlara getirilmesi amacıyla lazer ve tel erozyon uygulamalarına imkân tanıyan Kara Kuvvetleri Komutanlığı 4. Ana Bakım Merkez Komutanlığı Fabrika Müdürü Albay Ertan URAL'a, Binbaşı Uğur ÇAKIR'a ve yardımlarını esirgemeyen Makine Mühendisi Barış Burak AYDOĞAN'a, atış testlerinin gerçekleştirilmesine katkı sağlayan Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Şube Müdürü Selvi AKDENİZ'e, Sanayi ve Teknoloji Uzmanı Emrullah EMEN'e ve atış testlerinin gerçekleştirilmesine imkân tanıyan Makina ve Kimya Endüstrisi Genel Müdür Yardımcısı Mehmet ÜNAL'a, Kalite Mühendisi Hande ŞENTÜRK'e, Kalite Müdürü Can YAĞCI'ya, Atış Poligonu Teknik Şefi Bayram COŞKUN'a ve desteklerini esirgemeyen çok kıymetli okul arkadaşlarım Binbaşı Erkan SAĞDIÇ'a ve Yüzbaşı Mehmet Fatih ÇELEBİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Literatüre kazandırılan bu eserin, tüm ilgililere faydalı olmasını dilerim.

Ankara; Ağustos, 2020

Büşra ASLAN

İÇİNDEKİLER

ONAY

ÖZGÜNLÜK RAPORU

ETİK BEYAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İTHAF

İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
SİMGELER LİSTESİ.....	xiv
KISALTMALAR.....	xvi
ÖZ	xviii
İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT)	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Zırh Çelikleri	5
2.2. Yüzey Kaplamaları	7
2.3. Kompozit Malzemeler	8
2.4. Balistik Testler.....	10
2.5. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi.....	11
3. KURAMSAL TEMELLER.....	12
3.1. Mühimmat	12
3.2. Balistik.....	13
3.3. Kompozit Malzemeler	15
3.4. Zırh Çeliği, Zırh Tasarımı, Kompozit Zırhlar	19
3.5. Hasar Oluşum Mekanizması.....	25
3.6. Yüzey Kaplama Yöntemleri	31
3.7. Balistik Standartlar ve Deneyler	36
3.8. Akma Dayanımı.....	40
3.9. Balistik Hesaplamalar	40
3.9.1. Balistik Performasyon İndeksi	40

3.9.2. Balistik Limit.....	42
3.9.3. Kritik Açısı.....	42
3.9.4. Ters Balistik.....	43
3.9.5. Terminal Balistik.....	43
3.10. Malzeme Deney ve Test Yöntemleri.....	44
3.10.1. Mikro Yapı İncelemeleri.....	44
3.10.2. Sertlik Deneyi Testi.....	46
3.10.3. Ağırlık Düşürme Testi.....	47
4. MALZEME VE METOT	50
4.1. Numunelerin Hazırlanması.....	51
4.1.1 Zırh Çelikleri ve Kaplama Tozları	51
4.1.2 Lazer Kaplama Uygulaması	54
4.1.3 Lazer Kesim ve Tel Erozyon	57
4.2. Mikro Yapı İncelemeleri	57
4.3. Sertlik Deneyi Testi.....	58
4.4. Ağırlık Düşürme Testi.....	58
4.5. Atış Testi	60
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	62
5.1. Atış Testi Sonuçları	62
5.2. Mikro Yapı ve Sertlik Deneyi Sonuçları.....	66
5.3. Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	78
KAYNAKÇA	81
EKLER.....	91
Ek 1: Çalışma Başlangıcında Temin Edilen Zırh Çelikleri.....	91
Ek 2: Lazer Kaplama Sonrası Elde Edilen Kompozit Zırh Çelikleri.	92
Ek 3: Lazer Kaplama İşlemi.....	95
Ek 4: Tel Erozyon Cihazı.....	97
Ek 5: Lazer Kesim Cihazı.....	98
Ek 6: Mikro Yapı İncelemelerine Uygun Boyutlara Getirilen ve Gruplandırılan Parçalar.	99
Ek 7: JEOL JCM 6000 PLUS Model Taramalı Elektron Mikroskobu Cihazı.	100
Ek 8: FutureTech Marka FM 700 Mikro Sertlik Cihazı.....	101
Ek 9: Instron CEAST 9350 Droptower Impact System Ağırlık Düşürme Test Cihazı.....	102

Ek 10: Ağırlık Düşürme Testinde Kullanılan Yanal Yüzeyleri Kavisli Uç.....	103
Ek 11: Ağırlık Düşürme Cihazı Sabitleyicisi.....	104
Ek 12: Atış Yapılan Silah Sisteminin NATO Standartlarındaki Teknik Resmi.....	105
Ek 13: 7,62 mm X 51 (M61) Normal Fişek Teknik Özellikleri.....	106
Ek 14: 7,62 mm X 51 (M80) Normal Fişek Teknik Özellikleri.....	107
Ek 15: 7,62 mm M80 Fişegi Hız Basınç Test Raporu.....	108
Ek 16: 7,62 mm M61 Fişegi Hız Basınç Test Raporu.....	109
Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları.....	110
Ek 18: Atış Testi Sonrası Delinen Numunelerin Dilimlenme Fotoğrafları.....	119
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları.....	123
ÖZGEÇMİŞ	132

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1	: Zırh Çeliği Genel Kimyasal Kompozisyonu.....	21
Tablo 3.2	: Hedef ve Tehdit Açısından Balistik Performans Parametreleri.....	30
Tablo 3.3	: Balistik Koruyucu Standartları.....	37
Tablo 3.4	: NIJ- STD- 101.06 Balistik Koruma Seviyeleri.....	38
Tablo 4.1	: Zırh Çeliklerinin Mekanik Özellikleri.....	52
Tablo 4.2	: Zırh Çeliklerinin Kimyasal Kompozisyonu (%'sel Ağırlık).....	53
Tablo 4.3	: Tozların Yoğunluk, Sertlik Değerleri ile Kimyasal Kompozisyonu (%).....	54
Tablo 4.4	: Lazer Kaplama İşlemini Parametreleri.....	55
Tablo 4.5	: Çalışmada Kullanılan Dağlacıyı Özellikleri.....	57
Tablo 4.6	: Ağırlık Düşürme Cihazı Standartları.....	60
Tablo 4.7	: 7,62 mm X 51 M61 ve M80 Fişek Karşılaştırması.....	61
Tablo 5.1	: Atış Testi Sonuçları.....	62

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1 : Mermi Yapısı.....	13
Şekil 3.2 : 7,62 mm NATO Fişekleri.....	13
Şekil 3.3 : Kompozit Malzemelerin Çelik ve Alüminyum ile Karşılaştırılması.....	16
Şekil 3.4 : Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	17
Şekil 3.5 : Seramik Malzemelerin Darbe Cevabı.....	17
Şekil 3.6 : Polimer Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırması.....	18
Şekil 3.7 : Seramik Yapıda Tasarlanan Kompozit Zırhın Şematik Gösterimi.....	24
Şekil 3.8 : Kompozit Yapı İçerisinde Kullanılan Seramik Levhanın Çarpışma Anındaki Davranışı.....	25
Şekil 3.9 : Delinme Türleri.....	27
Şekil 3.10 : Zırh Çeliği Sertlik Değerinin Balistik Performansa Etkisi.....	27
Şekil 3.11 : Mermi Deformasyon Görüntüleri.....	28
Şekil 3.12 : Mermi Uç Geometrisine Bağlı Hedef Giriş (A) ve Çıkışlarda (B) Gözlenen Tahribatlar.....	29
Şekil 3.13 : Delinme Mekanizması.....	30
Şekil 3.14 : Düşük Hızlı Çarpma Sonrası Numune ve Mermi Şekil Değişimi.....	31
Şekil 3.15 : Lazer Kaplama Yönteminin Şematik Gösterimi.....	34
Şekil 3.16 : Tel Beslemeli Lazer Dolgu Yönteminde Kaynak İşleminin Şekilsel Gösterimi.....	35
Şekil 3.17 : Toz Beslemeli Lazer Kaynağı ile Uygulanan Dolgunun Şematik Gösterimi.....	35
Şekil 3.18 : V50 Hızı ile Nüfuziyet Yüzdesi İlişkisi.....	39
Şekil 3.19 : NIJ-STD 010.04 Balistik Test Düzeneği.....	39
Şekil 3.20 : Hedef Malzeme Yoğunluk Değerinin Mermi Çarpma Açısına Göre Değişimi.....	43
Şekil 3.21 : Terminal Balistik Test Düzeneği.....	44
Şekil 4.1 : Zırh Çelikleri Akma Dayanımı Karşılaştırması (MPa).....	52
Şekil 4.2 : Atış Testi Kompozit Yapı Boyut Bilgisi.....	56
Şekil 4.3 : Ağırlık Düşürme Testinde Kullanılan Numunelere Ait Boyut Bilgisi.....	59

Şekil 4.4	: Darbe Ucuna Ait Boyutlar.....	59
Şekil 4.5	: A- Düzeneğe Sabitlenen Levha Ön Yüzü, B- Düzeneğe Sabitlenen Levha Arka Yüzü ve C- Atış Tüneli.....	60
Şekil 5.1	: Penetrasyon Derinliği Karşılaştırması.....	63
Şekil 5.2	: M2 Tozu Kaplı HRX'e Ait Atış Testi Sonrası Görüntüleri.....	65
Şekil 5.3	: MIL Zırh Çeliğine Lazer Kaplama ile Uygulanan Üç Farklı Kaplamaya ait Optik Mikroskop Görüntüleri.....	67
Şekil 5.4	: HRX Zırh Çeliğine Lazer Kaplama ile Uygulanan Üç Farklı Kaplamaya ait Optik Mikroskop Görüntüleri.....	68
Şekil 5.5	: WLX Zırh Çeliğine Lazer Kaplama ile Uygulanan Üç Farklı Kaplamaya ait Optik Mikroskop Görüntüleri.....	69
Şekil 5.6	: HRX, MIL ve WLX Zırh Çelikleri ile Kompozit Yapılarının Sertlik Değerleri.....	70
Şekil 5.7	: Kompozit Zırh Çeliklerine ait Mikro Sertlik Değerlerinin Kıyaslanması.....	71
Şekil 5.8	: Taban Malzemelere Kıyasla Kompozit Metallerinde Elde Edilen Mikro Sertlik Artış Yüzdeleri.....	72
Şekil 5.9	: Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları.....	73
Şekil 5.10	: Farklı Kalınlıklarda ve Enerji Değerlerinde Uygulanan Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları.....	76
Şekil 5.11	: WC Tozu Kaplı WLX'e Ait Ağırlık Düşürme Testi Sonrası Görüntüler.....	77

SİMGELER LİSTESİ

J	: Joule
kJ	: Kilojoule
ρ	: Yoğunluk
E	: Elastisite Modülü
σ_y	: Akma Mukavemeti ($\frac{N}{mm^2}$)
σ_T	: Çekme Mukavemeti ($\frac{N}{mm^2}$)
ν	: Poisson Oranı
ϵ_r	: Kesit Daralması ve Fraksiyonel Uzama
v_0	: Çarpma Hızı ($\frac{m}{s}$)
v_r	: İlerleme Hızı ($\frac{m}{s}$)
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
Nm	: Nanometre
μm	: Mikron ($1 \mu m = 10^{-6}m$)
F	: Fahrenheit
K	: Kelvin
Hz	: Hertz
W	: Watt
kW	: Kilowatt
V	: Hız
Mpa	: Megapascal
%	: Yüzde
X^0	: Derece
HV	: Vickers Sertliği
HB	: Brinell Sertliği
HRc	: Rockwell Sertliği

Cm	: Santimetre
inç	: İngiliz Uzunluk Birimi (1 inç = 25,4 mm)
N	: Newton ($\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)
s	: Saniye
dk	: Dakika
kg	: Kilogram
gr	: Gram



KISALTMALAR

AFRP	: Aramid Fiber Takviyeli Polimerler
BPI	: Balistik Performans İndeksi
BSD	: Brinell Sertlik Değeri
C	: Karbon Elementi
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
CMT	: Soğuk Metal Transfer Ark Kaynağı
Cr	: Krom Elementi
CuZn	: Bakır- inko Alaşıımı
CVD	: Kimyasal Buhar öktürme
DBB	: Doğrudan Buhar Biriktirme
FBF	: Fiziksel Buhar Biriktirme
Fe	: Demir Elementi
GMAK	: Gaz Metal Ark Kaynağı
GMRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimerler
HAY	: Hacimsel Enerji Yoğunluğu
HHS	: Yüksek Hız eliği
HPAK	: Hibrit Plazma Ark Kaynağı
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Yöntemi
IBAD	: İyon Işını Aşılaması
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
KHO	: Kara Harp Okulu
KKK	: Kara Kuvvetleri Komutanlığı
MAG	: Aktif gaz korumasıyla yapılan kaynak yöntemi (Metal Aktif Gaz)
MKEK	: Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu
MMBML	: Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı
MMK	: Metal Matris Kompozit

Mn	: Manganez Elementi
Mo	: Molibden Elementi
MSÜ	: Milli Savunma Üniversitesi
NATO	: Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü
NIJ	: Amerikan Ulusal Adalet Enstitüsü
O	: Oksijen Elementi
PMK	: Polimer Matris Kompozit
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
RHA	: Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHPB	: Split Hopkinson Basınç Barı (SHPB)
SKK	: Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SMK	: Seramik Matris Kompozit
STANAG	: Standartlaştırma Anlaşması
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TSK	: Türk Silahlı Kuvvetleri
V	: Vanadyum Elementi
VSD, HV_{0.3}	: Vickers Sertlik Değeri
W	: Wolfram Elementi
WC	: Wolfram Karbür

ÖZ

LAZER KAPLAMA YÖNTEMİYLE ZIRH ÇELİKLERİNDE BALİSTİK PERFORMANSIN İNCELENMESİ

Büşra ASLAN

Millî Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü

Ankara, Ağustos 2020

Bu çalışmada, üç farklı zırh çeliği üç farklı toz çeşiti kullanılarak lazer yöntemiyle kaplanmıştır. Elde edilen kompozit yapılarıdaki mermi enerjisini sönmüleme, penetrasyon miktarını düşürme, düşük terminal balistik hasarı gibi balistik kabiliyet iyileşmeleri; atış ve ağırlık düşürme testleri, SEM ve sertlik ölçümleri ile tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, 18 mm kalınlığında temin edilen MIL 46100, WELDOX 700 ve HARDOX 500 zırh çelikleri 15x20 cm boyutlarındaki parçalara lazer kesim yöntemiyle ayrılmış olup 10x10 cm'lik orta bölgeleri; Wolfram Karbür ve takım çeliklerinden M2 ve H13 tozlarıyla 3 mm kalınlığında, kaplanmıştır. Atış testleri 18 mm taban malzemeler ile 15 mm ana malzeme ve 3 mm kaplama kalınlığına sahip kompozit yapılara, 7,62 mm M80 kurşun ve M61 çelik zırh delici mermi çekirdekleri NATO standardında yer alan modüler keskin nişancı tüfeği kullanılarak 50 metreden her fişek türünde 10 atış yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı ve sertlik sonuçları, tel erozyon ile numune üzerinden alınan örnekler aracılığıyla belirlenmiştir. Ağırlık düşürme cihazına numune bağlama donanımı eklenmiş olup gerçek ortama yakın sonuçlar elde etmek amacıyla mermi geometrisine sahip zımba kullanılarak parametreleri cihaza tanımlanmıştır. 1 mm ana malzeme 2 mm kaplama olmak üzere toplam 3 mm kalınlığındaki yapılara 400 J, 2 mm ana malzeme ve 2 mm kaplama olmak üzere 4 mm kalınlığındaki M2 tozu işlenen HARDOX malzemesine 400 J ve 2 mm HARDOX zırh çeliğine 200 J darbe enerjisi uygulanarak numunelerin enerji sönmüleme yeteneği incelenmiştir. Sonuç olarak, M2 tozu işlenen HARDOX malzemesinin kırılma enerjisi, yüksek hızlardaki darbe dayanımı ve sertlik değerlerinin diğer yapılara kıyasla en iyi balistik performans artışını sergilediği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Zırh Çeliği, Metal Kompozit, Lazer Kaplama, Balistik Performans, Mekanik Özellik.

Bilim Kodu : 91405

Sayfa Sayısı : 132

Tez Danışmanı : Dr.Öğr. Üyesi Ayhan AYTAÇ

ABSTRACT

A RESEARCH ON BALLISTIC PERFORMANCE OBTAINED BY LASER CLADDING METHOD ON THE ARMOR STEELS

Büşra ASLAN

National Defense University, Alparslan Defence Sciences Institute

Ankara, August 2020

Within the scope of this study, three different powder materials were applied to three different armor steels by laser coating method. Ballistic capability improvements such as absorbing bullet energy, reducing the amount of penetration, low terminal ballistic damage in the composite structures were determined by shooting and weight reduction tests, SEM and hardness measurements. In this direction, MIL 46100, WELDOX 700 and HARDOX 500 armor steels supplied in 18 mm thickness are separated into 15x20 cm pieces by laser cutting method and their 10x10 cm middle areas are coated with Wolfram Carbide and tool steels M2 and H13 powders in 3 mm thickness. Firing tests carried out by 10 shots of each cartridge type from 50 meters, using modular sniper rifles in NATO standard, 7.62 mm M80 bullet and M61 steel armor-piercing bullet on composite structures with 18 mm base materials and 15 mm base material and 3 mm coating thickness. Microstructure and hardness results were determined from samples taken by wire erosion machining. A designed and manufactured fixture was assembled on the bottom table of drop weight test machine and the new punch parameters were defined in the database of device. Tip geometry of a bullet was copied to the new punch in order to obtain results close to the real environment. 400 J impact energy was applied to the structures with a total thickness of 3 mm, 1 mm of the main material and 2 mm of coating. 400 J impact energy was applied to the HARDOX material, which is 2 mm base material and 2 mm coating with M2 powder, 4 mm thick in total. 200 J impact energy was applied to 2 mm HARDOX armor steel. Thus, the energy absorption ability of the samples was examined. As a result, it has been observed that the fracture energy, impact strength and hardness values of the M2 powder treated HARDOX material show the best ballistic performance increase compared to other structures.

Key words : Armor Steel, Composite Steel, Laser Coating, Ballistic Property, Mechanical Behaviour.

Science Code : 91405

Pages : 132

Supervisor : Asst. Prof. Ayhan AYTAÇ

1. GİRİŞ

Varoluş nedeninden uzaklaşıp bir olma fikrinden yoksun bir gönülle dayatılan düşüncelerin, vaatlerin, beklentilerin esaretinde bencilliği ön planda tutarak savaşçı özün kaybedildiği günümüz dünyasında her alanda başarılı duruş sergilemek güçlü bir savunma sisteminden geçmektedir. Ülkemizin başarılı bir savunma sistemi hâkimiyeti ise sadece Türkiye Cumhuriyeti sınırlarında değil tüm dünyada barışın ve huzurun sağlanması açısından bir zorunluluktur. Savunma sanayisine yönelik yapılan çalışmaların; esas itibarıyla bu düşünce ışığında yürütülmesi ile başarılı sonuçlara ulaşılacak, Türk Silahlı Kuvvetlerinin uluslararası düzeyde rekabetçi ve sürdürülebilir savunma gücü artırılmaya devam edecektir.

Zırh çelikleri; gerek askeri ve sivil alandaki caydırma (yüksek koruma sağlanan araçlarda, tank ve uçaklarda) gerekse ülkelerin bu alanda sahip olduğu teknolojilerle uluslararası ortamlarda söz sahibi olmasına imkân tanıma gibi geniş bir çerçevede insan hayatını korumaya hizmet etmektedir. Böylesine araştırmaya, geliştirmeye, çıktılarının doğrudan canlı hayatını kurtarmaya ve vatanın bütünlüğünü savunan personelin operasyonel yönünü elini güçlendirmeye olanak tanıyan malzemeler üzerine çalışmak, küçük yüzdelerde dahi bu yöndeki araştırmalara katkı sağlamak ve önerilerde bulunmak, ülkelerin savunma sanayisine katkı sunan en kıymetli faaliyetleri niteliği göstermektedir. Savunma sisteminin hayati önem taşıdığı askeri alanlarda geçmişten günümüze var olan korunma ihtiyacına cevap veren malzeme özelliklerinin; dönemin teknolojisine, tehditlerde gözlemlenen gelişmelere ve savaş ortamının farklılaşan ihtiyaçlarına bağlı olarak çeşitlenmesi ve geliştirilmesi gerektiği herkesçe bilinmektedir. Örneğin; meskûn mahal savaşlarının yaygınlaşmasıyla önem kazanan zırhlı araçların manevra kabiliyetinin iyileştirilmesi veya uçak ağırlığının düşürülerek yakıt tasarrufu sağlanması ile o ağırlığa denk mühimmatın hava aracına yüklenebilmesi veya aracın daha uzun süre havada kalabilmesi gibi kazanımlar nedeniyle hafif malzemelere yönelik araştırmalar günümüzde elzem duruma gelmiştir. Öyle ki; tank zırhları, güvenlik güçlerinin kullandığı el kalkanları ve sivil-askeri amaçlı üretilen balistik gömlek, balistik yelek

gibi ilk akla gelen koruma malzemelerine yönelik araştırmalar, savunma sanayisini geliştirme hedefi doğrultusunda, ilgililerce önceliklendirilmiş durumdadır. Bu doğrultudaki araştırmalarda ortak payda, malzeme dayanımının artırılması ve ağırlılığının düşürölmesi üzerine olmaktadır. Literatürde yer alan birçok çalışma farklı özellikteki malzemelerin bir araya getirilmesi ve kompozit yapı geliştirilmesi ile, bu hedefe ulaşma çabasındadır. Seramik, Alüminyum, Titanyum, polimer esaslı malzemeler, cam elyaf takviyeleri ve bunların çeşitli modellerde bir arada kullanılmasıyla oluşturulan kompozit malzemelerin yanı sıra metaller, zırh yapım malzemeleri arasında önemli bir konuma sahiptir. Bunun nedeni, bu malzemeden beklenen direncin tek başına seramik ya da polimer malzeme tarafından sağlanamamasıdır. Zırh çeliklerinin, maliyet ve dayanım açısından polimer ve seramiklere kıyasla tercih edilebilir konumda olduğu bilinmektedir. Öte yandan, yüksek oranda dayanımın gerekli olduğu ortamlarda birden fazla çeliğın bir arada oluşu, sahip oldukları büyük yoğunluk katsayısı nedeniyle, zırhı taşıyan personele veya araca hareket kısıtı problemini beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, koruyucu zırh ağırlılığını olabilecek en düşük seviyede tutarak dayanımı artırmak, hafıflık ve hızlı manevra gibi malzeme özelliklerini temin etmek önem kazanmaktadır. Geliştirilen kompozit malzemelerin yukarıda belirtilen çeşitli özellikleri bir arada barındırabilmesi şüphesiz alt malzemelerinin birbirine yapışma kabiliyeti ile paraleldir. Bu nedenle, savunma sanayisinde alanında son yıllarda sunduğu yüksek teknoloji hizmeti nedeniyle özellikle tercih edilen, taban malzeme ile kaplama malzemesi arasında sıkı tutunabilme kabiliyeti sunan lazer kaplama yöntemi tez çalışmasında uygulanmıştır. Lazer kaplama sonrası, taban malzeme ile kaplama tabakası arasında gözlenen kuvvetli yapışma ve termal tahrif ile çatlama gibi sorunların az görölmesi bu teknolojinin tercih edilmesinin diğer sebepleridir.

Bu çalışmada, yüksek sertliğı ile şok direnci sayesinde yapılara dayanım katacağı öngörölün ve toz metalürjisi tekniğıyle üretilmiş olup ticari olarak temin edilen üç farklı zırh çeliğı kullanılmıştır. Bu çelikler üç farklı toz çeşiti kullanılarak lazer yöntemiyle kaplanmıştır. Bu çalışma, elde edilen kompozit yapılardaki mermi enerjisini sönümleme, delinme derinliğini düşürme gibi balistik kabiliyet iyileşmelerinin tespit edilmesi amacıyla gerçekteştirilmiştir. Bu doğrultuda, güvenlik sektöründe tercih edilen 15 mm kalınlığındaki MIL 46100, WELDOX 700 ve HARDOX 500 zırh çelikleri 15x20 cm boyutlarında kesilmiş olup 10x10 cm'lik orta

bölgeleri; Wolfram Karbür ve takım çeliklerinden M2 ve H13 tozlarıyla 3 mm kalınlığında olacak şekilde, lazer yöntemi ile kaplanmıştır. Üç ayrı metal kaynaklı tabakaya sahip zırh çeliklerinin balistik performansı, atış ve ağırlık düşürme testlerine tabi tutularak SEM ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Atış testleri, çıkış hızı aynı uç yapısı farklı olan 7,62 mm M80 kurşun ve M61 çelik zırh delici mermi çekirdekleri NATO standardında yer alan modüler keskin nişancı tüfeği kullanılarak 50 metreden taban ve kompozit malzemelere birer kere atış yapılmak suretiyle her fişek türünde 10 atış olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Atış testlerinde ana malzemeler 18 mm, kaplamalı malzemeler 15 mm ana malzeme 3 mm kaplama olacak şekilde çalışmaya dahil edilmiştir. Böylece, meydana gelen terminal balistik hasarları ve penetrasyon miktarları incelenmiştir. Malzemelerin mikro yapı ve mikro sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Metal kompozit malzemeye yönelik standart bulunmaması nedeniyle ağırlık düşürme cihazı kalibre edilerek numune bağlama donanımı eklenmiştir ve standart dışı bir uç kalibre edilerek parametreleri cihaza tanımlanmıştır. Gerçek ortama yakın sonuçlar elde etmek amacıyla mermi geometrisine sahip, yanal yüzeyleri kavisli uç ile düşük hızlardaki hasar altında tüm kompozit malzemeler 1 mm ana malzeme 2 mm kaplama kalınlığında 400 J enerji darbesine maruz bırakılmıştır. Akabinde, yapılacak yorumları güçlendirmek amacıyla iki ayrı senaryo daha çalışılmıştır. Bunlar: 2 mm ana malzeme ve 2 mm kaplamaya sahip HRX-M2 kompozit yapısına 400 J, 2 mm HRX zırh çeliğine ise 200 J darbe enerjisi uygulanarak enerji sönümleme yetenekleri grafik kıyaslamaları ile sunulmuştur. Çalışma neticesinde, lazer kaplama yöntemiyle; M2 tozu işlenen WELDOX 700 kompozit zırh çeliklerinin dayanım açısından en iyi sonucu verdiği, M2 tozu işlenen HARDOX 500 ile sıcak iş takım çeliği H13 tozu işlenen MIL 46100 kompozit zırh çeliklerinde yakın dayanım değerlerine ulaşıldığı, H13 tozu işlenen HARDOX 500 ile WC işlenen MIL 46100 kompozit zırh çeliklerinde de benzer değerlerin elde edildiği hem ağırlık düşürme testihem de atış testi sonuçlarıyla tespit edilmiştir. Sıralanan yapılar başta olmak üzere geliştirilen kompozit zırh çeliklerinin kırılma enerjisi, yüksek ve düşük hızlardaki darbe dayanımı ve sertlik değerlerinin taban malzemelere kıyasla arttığı tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda lazer kaplama yöntemiyle: M2 tozu işlenen HARDOX 500 ile sıcak iş takım çeliği H13 tozu işlenen MIL 46100 kompozit zırh çeliklerinde yakın dayanım değerlerine ulaşıldığı, H13 tozu işlenen HARDOX 500 ile WC

işlenen MIL 46100 kompozit zırh çeliklerinde de benzer değerlerin elde edildiği hem laboratuvar hem de atış testi sonuçlarıyla tespit edilmiştir. Sıralanan yapılar başta olmak üzere geliştirilen kompozit zırh çeliklerinin kırılma enerjisi, yüksek ve düşük hızlardaki darbe dayanımı ve sertlik değerlerinin taban malzemelere kıyasla arttığı belirlenmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik yürütülen projelerde, araştırmacının yaratıcılığına ve bilgisine bağlı olarak yeni fikir ve ürünler ortaya çıkmaktadır. Araştırmacının yaratıcılığına girdi sağlayan bir unsur şüphesiz tehditlerde gözlemlenen teknolojik gelişmelerdir. Öte yandan, tehditlerde gözlemlenen gelişmelerin önceden tahmin edilmesi hayati önem taşımaktadır ve literatür araştırmalarının bu doğrultuda zenginleştirilmesi elzemdir.

Tez çalışmasına konu olan; lazer kaplama yöntemi ile elde edilen kompozit zırh çeliklerinin balistik kabiliyetinin iyileştirilmesi hususunda literatürde yer alan çalışmalar bu başlık altında zırh çelikleri, yüzey kaplamaları, kompozit malzemeler ve balistik deneyler olarak derlenmiştir.

2.1. Zırh Çelikleri

Matsubara vd.(1972), Ade (1991) ve Manganello vd. (1993) farklı yıllarda yapmış oldukları zırh çeliği özelliklerinin geliştirilmesi konusundaki araştırmalarda zırh çeliği üretiminin kontrollü haddeleme ile sağlanabildiği sonucuna varmışlardır.

Jacobi (1988) ve Ade (1991) farklı yıllarda gerçekleştirdikleri çalışmalarda ortak sonuca varmış olup; zırh çeliklerinde mukavemet ve sertliği artırırken meydana gelen tokluk kaybının önüne geçilmesi için malzemenin sahip olduğu Kükürt ve Fosfor oranlarının mümkün olan en düşük düzeye çekileceği ikincil metalurjik işlemlerin uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir.

Mohandas ve Reddy 1996 yılında yaptıkları araştırmada, zırh malzemelerinin balistik direnci kadar birleşim noktalarının da zırh kritik bölgeleri arasında olduğunu tespit ederek kaynak yöntemlerinin (birleştirme tekniği) önemini ortaya koymuşlardır.

Hu ve diğerleri tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada homojen haddelenmiş zırh çeliği mikro yapısının, balistik özellikleri ile olan ilişkisi irdelenmiştir. Çeliğin; korozyona karşı düşük direnç, yüksek kırılma tokluğu ve süneklik gibi özellikleri

nedeniyle balistik çalışmalar öncesi iyileştirme faaliyetlerine tabi tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Karagöz ve Atapek 2009 yılında yaptıkları çalışmada: MIL-A 12560 ile MIL-A 46100 zırh çeliklerine yakın özellikteki bir çeliğinin malzeme dayanımında kaynak işlemi sonrası azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Kulmann 2011 yılında yaptığı araştırmada Reddy ve Mohandas'ın çalışmasını (1996) destekler nitelikte; kaynak yöntemi ile zırh malzemesi ömrünün doğru orantılı bir ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Isı Tesiri Altında Kalan Bölge'de (ITAB) ısı ve basınç etkisiyle metalürjik dönüşümlerin olduğunu rapor etmiştir.

Barnyi (2012) ile Jena ve diğerlerinin (2016) farklı yıllarda yapmış olduğu çalışmaların neticesinde zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulanan ikincil işlemler esnasında, malzemenin zarar görmemesi için en yüksek sıcaklık değerinin 200 C olması önerilmiştir.

Kara ve Korkut 2012 yılında yaptıkları araştırmada ARMOX 500T zırh çeliğini incelemişlerdir. Kimyasal olarak tepkimeye girmeyen gazlar ile yapılan MIG kaynak yönteminde 307 Si kaynak teli ile yapılan kaynak işlemi sonrası malzemede oluşan mekanik özellikleri araştırmışlardır. İşlem sonrası, kaynak metali sertliğinin taban malzeme ile ITAB'dan düşük olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, düzensiz soğuma sonucu meydana gelen kusurların kısmen giderilmesi sonrası kaynak metalinde ve ITAB malzemesinin darbe dayanımında artış tespit edildiği belirtilmiştir.

Merzalı 2013 yılında gerçekleştirdiği araştırmada, kaynak sonrası ısı tesirine maruz kalan zırh çeliği üzerindeki bölgelerde iyileştirme gayesiyle üçüncü işlem olarak yapılan ısı işlem sonrası malzeme tokluk ve sertlik değerlerinde artış elde edildiği ve zırh çeliği balistik özelliklerinin arttığı belirtmiştir.

Kurt (2015), MIL-A 46100 eliğine MIG yönteminde farklı aı ve geometride 307Si kaynak telinin kaynatılması sonrası malzeme mikro yapı analizi ile çekme ve sertlik testi yaparak ısı girdisinin malzeme özelliklerine etkisini araştırmıştır. Neticede, kaynak metali sertliğinin malzemenin sahip olduğu sertlik değerinden düşük olduğu belirtilmiştir. Çalışma dâhilinde gerçekleştirilen çekme testlerinde kullanılan numunelerdeki kopma olayının kaynak bölgesinde gerçekleştiği tespit edilmiş olup

bunun sebebinin esas metalden düşük mukavemet değerine sahip olan kaynak metali olduğu yorumu yapılmıştır.

2.2. Yüzey Kaplamaları

Türküz 1997 yılında yaptığı araştırmada, direnç ile buharlaştırma yönteminin Alüminyum, Gümüş, Bakır ve Kurşun gibi düşük ergime sıcaklıklarındaki malzemeler için uygulanabilir bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

Türküz (1997) ve Çalışkan (2008) yapmış oldukları araştırmalarda ortak paydada buluşmuş olup İndüksiyon ile Buharlaştırma Yöntemi'nin, ergime sıcaklığı 2.100°C seviyesine kadar olan tüm malzemelere uygulanabilir olduğu yorumunu yapmışlardır.

DieMelfi ve diğerlerinin 1998 yılında yaptıkları çalışmada ray yüzeylerindeki çatlak ilerlemesini azaltma hedefi doğrultusunda uygulanan Lazer Sertleştirme Yöntemi ile işlem gören yüzeyin sürünme katsayısında %25 oranında azalma olduğu paylaşılmıştır.

Chow ve Koch (1999) yapmış oldukları çalışmada lazer ışını yardımıyla yüzey sertleştirme, kaplama, dolgu, yüzey temizleme gibi farklı ihtiyaçların giderilebildiğini vurgulamışlardır.

Kagan ve Bray (2001) lazer uygulamalarının havacılık ve savunma sanayisinde, zaman tasarrufu kazandırması gerekçesiyle, önem arz ettiğini belirtmişlerdir.

Dağ ve Toprak aynı yıl (2002) yapmış oldukları farklı çalışmalarda PVD teknolojisi ile teorik olarak tüm metal, seramik, polimer ve alaşım kaplamaların elde edilebileceğini aktarmışlardır.

Okay 2006 yılında Kimyasal Buhar Biriktirme yöntemini araştırmış olup malzeme yüzeyinde ince sert tabakalar oluşturma mümkün olduğuna değinilmiştir.

Çalışkan, 2008 yılında yaptığı araştırmada incelediği Parçacık Sıçratılması, Elektron Demeti ile Koparma, Ark ile Buharlaştırma gibi yüzey kaplama yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemin Parçacık Sıçratma olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, Cotell ve diğerleri (1994) ile İnçal da (2007) araştırmalarında, Fiziksel Buhar Biriktirme (PDV) yöntemlerinden en sık kullanılan tekniğin sıçratma olduğunu tespit etmişlerdir.

Dahotre ve Harimkar (2008); lazer yönteminin, uyarılan atomların kararsız duruma geçmesiyle ortaya çıkan yüksek enerji yoğunluğu sayesinde dolgu, kaplama, yüzey sertleştirme ve benzeri birçok alanda kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Chang'ın 2005 yılında yaptığı araştırmada, lazer yönteminin temelinin uyarılan atomların kararsız hale geçişi sırasında meydana gelen ışın demetleri olduğu aktarılmıştır.

Pawlowicz 2011 yılında yaptığı çalışmada, karmaşık malzeme yüzeylerinin, lazer sertleştirme yöntemiyle, malzemede erimiş yüzey oluşturmada sertleştirilebileceği kanıtlanmıştır.

Uzun ve Keleş (2012) tarafından, Lazer Kaynak Yöntemi ile numuneye yönlendirilen ışının hassas boyutlarda noktasal olarak ilerlemesi nedeniyle malzeme üzerindeki ısı girdisinin düşük olduğu ve böylelikle kaynak bölgesinde gözlemlenen kusur miktarının az olduğu belirtilmiştir.

Wang ve diğerleri 2013 yılında gerçekleştirdikleri araştırmada aşınma ve hasar altında kalan malzemelere uygulanan Lazer Sertleştirme Yöntemi ile numunelerin aşınma oranları en az % 89,5, en çok % 92,9 oranında azaltılmıştır.

2.3. Kompozit Malzemeler

Dekkers ve Heikens'in 1983 yılında, Fu ve Lauke'un ise 1997 ile 1998 yıllarında yapmış oldukları araştırmalarda incelendiğinde, mikro boyuttaki parçacıkların malzemelere zayıf bağlarla birleştirilmesi durumunda malzeme dayanım değerinin düştüğünü gözlemlemiştir.

Spanoudakis ve diğerleri (1984) ile Lange'nin (1970) çalışmaları incelendiğinde, polimer malzeme tokluk değerinin inorganik parçacıkların eklenmesiyle arttığı tespit edilmiştir.

Pukanszky ve Voros 1993 yılında yaptığı araştırmada, takviye edilen parçacık boyutunun kompozit malzeme dayanımı ile ters orantıya sahip olduğu belirtilmiştir.

Shi ve diğerleri 2003 yılında nano boyutta Si_3N_4 parçacıklarını takviye ettikleri kompozit malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu malzemeye ait, Charpy çentik darbe dayanım testi sonucu elde ettikleri sertlik değerinin malzemeye takviye edilen parçacık miktarı ile doğru orantıya sahip olduğu paylaşılmıştır.

McGrath ve diğerleri 2008 yılında farklı şekil, boyut ve oranlarda Al_2O_3 parçacıklarını epoksi reçine içine takviye etmek suretiyle kompozit malzeme geliştirmişlerdir. Çalışmaların neticesinde, parçacık ile epoksi arasındaki zayıf bağlardan dolayı çatlakların gözlemlendiği ve parçacık takviye oranı ile malzeme kırılma tokluğunun doğru orantılı olduğu belirtilmiştir.

Wang ve diğerleri (2008) ile Gibson'un (2010) yapmış olduğu çalışmalardan hareketle mekanik özelliklerinin zayıf olduğu bilinen polimerlerin kompozit malzeme olarak kullanılması durumunda takviye elemanı olarak grafen, sürekli cam elyaf, karbon fiber, aramit ve karbon nanotüplerin tercih edildiği görülmüştür.

Das ve diğerleri 2011 yılında farklı oranlarda küresel parçacık takviye ettikleri polipropilen malzemesi ile kompozit yapılar geliştirmişlerdir. İlave edilen parçacık sayısı arttıkça yapının çekme dayanımı ile darbe dayanımının azaldığı vurgulanmıştır.

Şen 2013'te $AlMg_3$ matrisli $SiCp$ takviye edilen kompozit malzemelerin balistik özelliklerini incelemiştir. % 20 oranında yapılan SiC takviyesine kadar balistik dayanımının takviye miktarı ile doğru orantılı olduğu ancak bu orandan sonra yapının gevrekleşmesi sonrası balistik özelliklerde düşüş (parça kopması, kırılma vb.) meydana geldiğini belirtmiştir.

Dittanet ve Pearson tarafından 2013 yılında gerçekleştirilen çalışmada, mikro ve nano boyutta takviye edilen silika parçacıkların epoksi reçine malzeme tokluğunu artırdığı tespit edilmiştir.

Lauke tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada geliştirilen parçacık takviyeli kompozit malzeme kırılma tokluk değerinin, parçacık çapının artmasıyla yükseldiği belirtilmiştir.

Yesgat ve Kitey 2016 yılında gerçekleştirdikleri cam parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi sonrası, parçacık takviyelerinin bulunduğu alanlarda çatlak ve ayrılma meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Baptista ve diğerleri 2016 yılında grafit parçacık takviyesiyle epoksi matrisli kompozit malzeme geliştirmişlerdir. Kompozit malzemeye parçacık takviyesi yapıldıkça daha düşük çekme dayanım değerine ulaşıldığı paylaşılmıştır.

2.4. Balistik Testler

Malzemelerin yüksek hızlı darbe altında sergilediği davranışı incelemek amacıyla, mermi etkisiyle en yakın sonuçları verdiği düşünülen Split Hopkinson Basınç Barı (SHPB) deneyi Demirkol ve Özlü tarafından 2003 yılında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, SHPB deney standı tasarımı sunulmuş olup bir SHPB çıktısı üzerinden gerilme birim şekil değişikliği diyagramının elde edilme yöntemi açıklanmıştır. Sonrasında ise bir balistik atış testi benzetimi ANSYS LS-Dyna Programı ile analiz edilmiştir.

Temiz'in 2005 yılında kompozit yapıya ait balistik malzeme ve test yöntemi araştırması kapsamında farklı uç geometrilerine sahip mermiler ile atış testi gerçekleştirmiş olup sivri ve konik uçlu mermilerin daha az iplik ile teması nedeniyle malzeme tarafından emilen enerji miktarının küt uçlu mermilere kıyasla daha az olduğu bu nedenle malzeme delinme oranlarının fazla olduğu yorumu yapılmıştır.

Balistik hesaplamalar konusunda Tabiei ve Nilakantan 2008 yılında yaptıkları çalışmada koruyucu zırhların balistik dayanımlarına etki eden faktörlerin malzeme özelliği, mermi geometrisi, darbe hızı ve sınır koşulları olduğunu belirtmişlerdir.

Karagöz ve diğerleri (2010) zırh çeliği balistik davranışı üzerine çalışmış olup, V50 hız değeri ile malzeme sertliği arasında doğru orantı olduğunu belirtmişlerdir.

Bogdan ve diğerleri (2012) ile Çerkez (2007) balistik malzemeler üzerine yapmış oldukları araştırmalarda malzemelerin V50 hızını tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen atış testleri sonucunda en yüksek lif kopuş miktarının ucu yuvarlatılmış mermi ile elde edildiğini gözlemleyerek gelen darbe enerjisinin malzeme geneline yayılmak suretiyle sönmelenmesi yönündeki araştırmaların faydalı olacağı yorumunda bulunmuşlardır.

Alarçin 2014 yılında yaptığı araştırmada savunma sanayinde yaygın olarak kullanılan kompozit kumaşların balistik dayanım özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, farklı özelliklere sahip polietilen ve aramid kumaşlar birleştirilerek NIJ ve STANAG standartlarında farklı atış hızlarında deneyler yapılmıştır. Çalışma sonucunda, artan tabaka sayısına bağlı olarak V50 hızlarında genellikle artış olduğu belirtilmiştir.

2.5. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

Zırh çeliklerinin geleneksel yöntemlerle birleştirme işlemlerine tabi tutulması esnasında yüksek ısı girdisi nedeniyle taban malzemede bölgesel olarak gözlemlenen şekil bozukluğu ve benzeri kusurların en düşük seviyede tutulması amacıyla lazer yönteminin tercih edilmesi gerektiği görülmüştür.

Kaynak yönteminde zırh malzemesi ömrünün doğru orantıya sahip olması nedeniyle, zırh çeliklerinde gözlemlenen tokluk kaybının önüne geçilmesi için malzeme içeriğinde yer alan Kükürt ve Fosfor oranının düşürülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Zırh malzemesinin sahip olduğu mukavemet özelliğine balistik karakteristikler kadar birleşim noktalarının da etkisi olduğu görülmüştür.

Aşınmaya maruz kalan parçaların iyileştirilmesi için yüzey sertleştirme işlemlerinin sıklıkla tercih edildiği görülmüştür.

Kompozit malzeme geliştirme çalışmalarında, malzeme balistik özelliklerini geliştirme hedefi doğrultusunda takviye edilen parçacıkların küçük boyutlarda numuneye ilave edilmesinin dayanımı artırdığı görülmüştür.

Takviye edilen parçaların olduğu bölgelerde çatlak ve ayrılmalar olduğu ve dolayısıyla malzemenin en hassas bölgelerinin müdahale edilen bu bölgeler olduğu sonucuna varılmıştır.

Uluslararası standartlar dâhilinde üretilmesi planlanan balistik malzemeler için gerekli olan 200 atış ve benzeri isterlerin sağlanamadığı durumlarda balistik limit gibi malzemenin dayanabileceği en yüksek mermi hızı test yöntemlerinin uygulanmakta olduğu belirlenmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

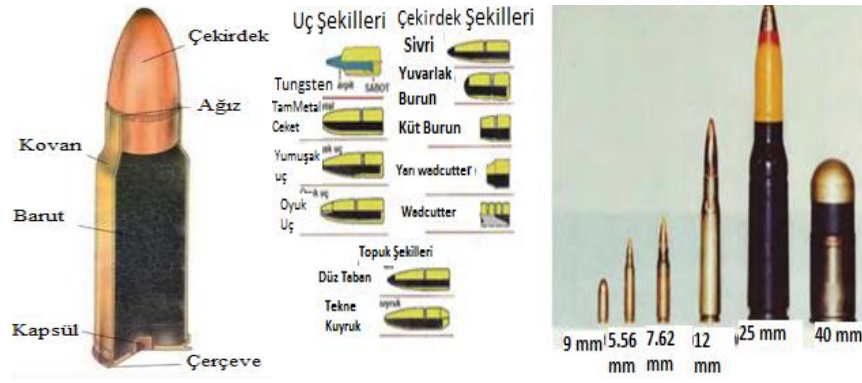
Bu başlık altında mühimmat, balistik, kompozit malzemeler; zırh çeliği, zırh tasarımı, kompozit zırhlar, hasar oluşum mekanizması, yüzey kaplama yöntemleri, balistik standartlar ve deneyler, akma dayanımı, balistik hesaplamalar; balistik performans indeksi, balistik limit, kritik açı, ters balistik test yöntemi, terminal balistik başlıkları araştırma konusu çerçevesinde detaylandırılmıştır.

3.1. Mühimmat

İçeriğine bir takım kimyevi maddeler veya patlayıcı yerleştirilen, silahtan ateşlenebildiği gibi havadan da bırakılabilen malzemelerin tümüne mühimmat, diğer adıyla patlayıcı madde, cephane, denilmektedir. Silahlar gibi mühimmatların da kullanım amacına göre çok sayıda çeşidi bulunmaktadır. Temelde ise küçük, orta ve büyük olmak üzere üç kalibre çeşidinde sınıflandırmaya tabi tutulmaktadırlar. Kalibre, ateşli silahlarda mermi çapını ifade etmektedir:

- 5,56 mm – 12,7 mm arasındaki mühimmat çapları küçük kalibre,
- 12,7 mm – 40,0 mm arasındaki mühimmat çapları orta kalibre,
- 40,00 mm ve üstü mühimmat çapları büyük kalibre olarak tanımlanmaktadır.

Mermi yapısı kesit görüntüsü, uç ve çekirdek şekilleri ile farklı kalibrelerdeki mermi görüntüleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Fişek uç şekilleri, mermi çekirdeğinin kurşun yapısının farklı kaplamalara tabi tutulması sonucu elde edilmektedir.



Şekil 3.1: Mermi Yapısı.

Kalibre çeşidine göre farklılaşan mermiler aynı kalibre grubu içerisinde olsa dahi farklı barut ağırlıklarına bağlı olarak çeşitli tam delme (perforasyon) ve hasar verme (penetrasyon) özelliklerine sahip olabilmektedirler.

Hafif ateşli silahlara sürülen, içinde barut ve ucunda mermi bulunan kovanın dışında kalan mermi çekirdeği ile bütününe fişek denilmektedir. Türkiye’de bu mühimmatın, üretimi Ankara’da bulunan Gazi Fişek Fabrikası’nda yapılmaktadır.

Şekil 3.2’de 7,62 mm kalibredeki mermilerin sahip oldukları barut ağırlığı, basınç ve dolayısıyla hız ve enerji değerlerine göre farklılaşan isimlendirmeleri yer almaktadır:



Şekil 3.2: 7,62 mm NATO Fişekleri

3.2. Balistik

Balistik, Fransızca “balistique” kelimesinden türeyerek Türkçe’ye yerleşmiş olup uzağa fırlatılan cisimleri belirtmektedir. 19. yy ve sonrası silah alanında yapılan çalışmaların hız kazanması sonucu değerlendirilen bir bilim dalıdır (Akasaki ve diğ.

2005). Özetle, mermilerin fırlatılma sürecinden havadaki hareketine, hedefe girme ve hedefi tahrip etme etkilerine kadar detaylı incelemeler yapan bilim dalıdır. Bazı kaynaklarda, Makine Bilimi'nin alt bölümü olarak da kabul edilmektedir. Genel olarak üç başlık altında incelenmektedir: İç Balistik, Dış Balistik ve Terminal Balistik. Carlucci 2008 yılında silah ve mühimmat teorisi ile tasarımı üzerine gerçekleştirmiş olduğu çalışmada bu üç temel başlığa ek olarak merminin namluyu terk ettiği anda meydana gelen olayları inceleyen Ara Balistik kavramını da kullanmıştır.

Merminin namluyu terk ettiği süre zarfında; mermi ve dolayısıyla silah bütünüünün maruz kaldığı ısı, basınç, tahrip miktarı, gaz karışımı, kütle dengesi, aşınma ömrü, yiv-set pozisyonu, namlu et kalınlığı, titreşim hesapları ve geri tepme oranı gibi konuların bütünüünü inceleyen bilim dalına İç Balistik denilmektedir. Ingalls, 2008 yılında yaptığı çalışmada merminin ateşlenmesi sonucu ortaya çıkan basınca yönelik hesaplamalar yaparak namlunun boy ve kalınlık bilgilerine ulaşıldığını belirtmiş olup merminin namlu içerisinde maruz kaldığı kuvvetlerin analizi ile mermi hızının artırılmasına yönelik çalışmaların yapıldığını belirtmiştir.

Mermi çekirdeği, patlama sonrası silahtan ayrılan ve hedefe yönelen kısımdır. Dünya çapında genel kabul gördüğü üzere, mermi çekirdeğinin namluyu terk ettiği andan hedefe temas anına kadar geçen süre zarfında meydana gelen olayları inceleyen bilim dalına Dış Balistik denilmektedir. Bu alt kol; uçuş esnasında mermiye etkiyen kuvvetleri, öngörülen uçuş güzergâhını, merminin kararlılığını, yer ile arasındaki açıyı ve darbeden etkilenecek bölgeyi incelemektedir. Dış Balistik hesaplamalarında İç Balistik verilerinin doğruluğu ile mermi tasarım bilgileri önem taşımaktadır. Öyle ki, merminin namludan çıkış hızı ve açısı, mermi geometrisi ve ağırlığı ile merminin namlu içerisindeki yiv hızı bilinmeden Dış Balistik hesaplamalarının gerçekleştirilmesi mümkün olamamaktadır. Dış Balistik hesaplamalarında önemli rol oynayan diğer bir konu ise hava dinamiğidir. Mermi ile hava arasında meydana gelen sürtünme kuvveti nedeniyle mermi ve havanın tepkimeye girmesi göz önünde bulundurularak mermi yörüngesi hesabında hava koşullarının da dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır.

Terminal Balistik, merminin hedefe çarpması sonrası meydana gelen olayları inceliyor oluşu nedeniyle Hedef Balistik olarak da adlandırılmaktadır. Merminin hedefe nüfuzu sonrasında hem mermi hem de hedefte meydana gelen olaylar ile

sıçrayan parçacıklara ait bilgilerin tespit edilmesi ve yapılan atışın yaralayıcı ya da öldürücü olma durumlarının araştırılması bu alt dalın incelemeleri sonucunda ortaya çıkan hususlardır.

Zırh çeliğinin zırh delici ile olan etkileşiminin anlaşılması için tam delinme ve tahrip etme durumlarında şok, kırılma ve tahrip olgularının bilinmesi gerekmektedir (Özkan ve diğ. 2011). Deniz, 2009 yılında yaptığı çalışma ile bu görüşü destekler nitelikte; merminin hedeften sekme, hedefe saplanıp kalma ve hedefi delip geçme mekanizmalarının ayrı başlıklar altında incelendiğini belirtmiştir.

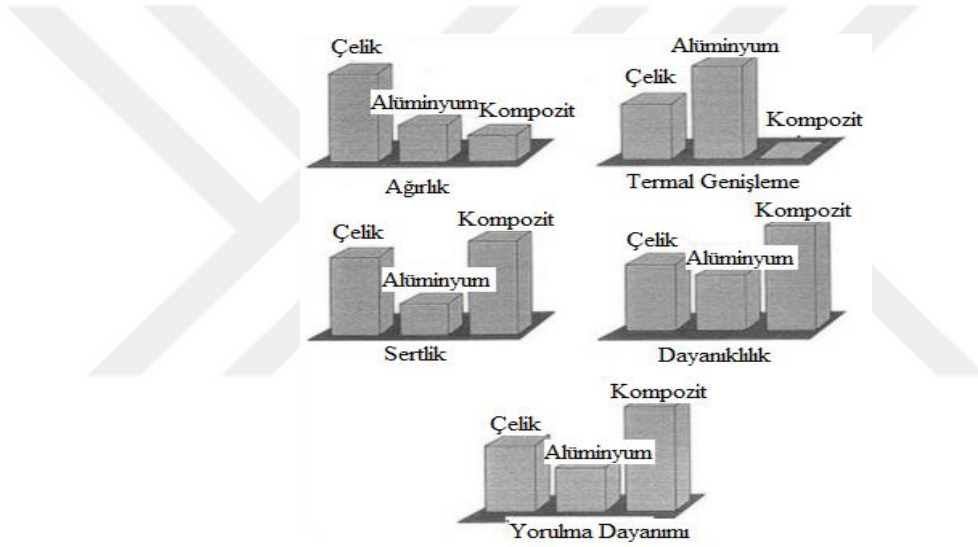
Merminin canlı hedefe teması sonrası dokulara olan etkisi ise Terminal Balistik dalından türetilen Yara Balistiği altında çalışılmaktadır.

3.3. Kompozit Malzemeler

Zırh çeliklerinin balistik performansının iyileştirilmesinde öne çıkan iki husus vardır; metal ağırlığının düşürülmesi ve darbe dayanımlarının artırılması. Metal ağırlığının düşürülmesine yönelik araştırmalarda kritik olan malzeme temin süreci, kimi zaman uzun ve maliyetli olabilmekle birlikte; uçak, tank, otomobil motoru geliştirme projelerinde ithalatın azaltılması kapsamında bilhassa önceliklendirilen konulardan biridir. Öte yandan, bütçesel olarak malzeme temin ve geliştirme sürecindeki teknolojiye sahip olmayan firmalarda ve araştırma merkezlerinde genellikle malzeme darbe dayanımı artırma çalışmalarına odaklanılmaktadır. Bu ikinci çalışma alanı, hem yaratıcılığın sergilenebildiği hem de titiz bir literatür araştırması sonucu tespit edilen dayanımı yüksek malzemelerin farklı şekillerde bir araya getirildiği bir kulvardır. Bu noktada kompozit malzemeler gündeme gelmektedir. Zırh çeliklerinin dayanımını artırmada kompozit malzemelerin geliştirilmesi, farklı pozisyonlarda birleştirilen malzemelerin mermi durdurma üzerindeki etkisinin incelenmesi, malzemelerin kaynak, yapıştırıcı, gibi yöntemlerle bir arada tutulmasının dayanım performansına etkisinin incelenmesi konularındaki araştırmalar süregelmektedir. Bu faaliyetlerde öne çıkan husus, malzeme seçimi ve malzemelerin bir arada tutulması için tercih edilen yöntemler olmaktadır. Örneğin, geliştirilen bir kompozit malzemenin mermi çarpması sonrası dağılması ve kopması hususu aslında kompozit malzemeyi (balistik yelek, balistik kurşun geçirmez kalkan vb.) taşıyan personele ve personelin çevresinde bulunan varlıklara tehlike unsuru oluşturmaktadır. Bu nedenle

birleştirme yönteminin kompozit malzeme dayanımı üzerindeki etkisi kayda değer düzeydedir.

En az iki farklı malzemenin, belirli bir amaca yönelik, bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni yapılara kompozit denilmektedir. Kompozit yapı geliştirilirken gözetilen husus, malzemelerin tek başına sergileyemediği olumlu özelliklerin bir arada kullanımları ile elde edilmesidir. Örneğin; askeri alanda geliştirilen kompozit malzemelerde amaç; metallere eş dayanıma sahip ancak daha hafif olan balistik yelek ve benzeri koruma malzemelerinin elde edilmesi olmaktadır. Farklı yapılarda, yüksek mekanik özelliklere sahip ve hafif olan cam fiberlerin kullanılması ise kompozit malzemelerin geliştirilmesi sürecinin başlangıcı kabul edilmektedir. Kompozit malzemelerin metal ve alüminyuma kıyasla üstün özellikleri Şekil 3.3'te verilmiştir.



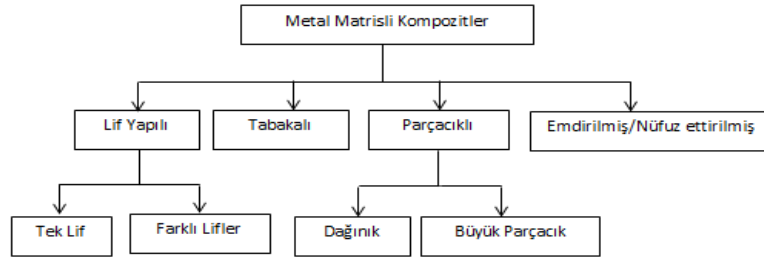
Şekil 3.3: Kompozit Malzemelerin Çelik ve Alüminyum ile Karşılaştırılması.

Karasu'nun çalışmasından (2014) uyarlanmıştır.

Kompozit yapı ifadesi yerine çok fazlı malzeme, pekiştirilmiş malzeme, donatılı malzeme veya çok bileşenli malzeme gibi ifadeler de kullanılmaktadır (Broutman ve Krock, 1967). Kompozit malzeme geliştirilmesi sürecinde metal, seramik, polimer ve Karbon sınıflarından takviye eleman ve matris malzeme olarak yararlanılmaktadır. Nitekim 1939'lu yıllarda baş gösteren 2. Dünya Savaşı nedeniyle önem kazanan askeri araçların yüksek mukavemet ancak hafif yapıda olma isteri, uçak helikopter ve roketlere yönelik talebin artması ve benzeri konular, aynı dönemde hızlı bir büyüme

gösteren polimer endüstrisinden özellikle girdi alınması gerektiği düşüncesini de beraberinde getirmiştir.

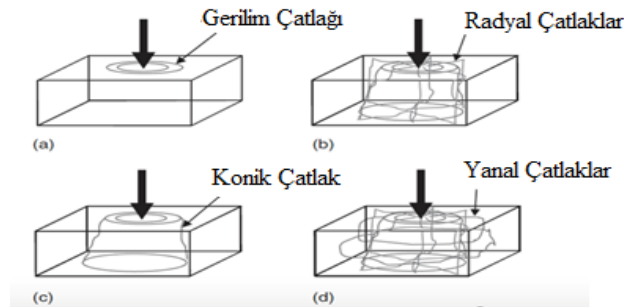
Kompozit yapılar çok farklı şekillerde sınıflandırılmaktadırlar. Bunlardan bir tanesi takviye malzemesine göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıfta: Metal Matris Kompozitler (MMK), Seramik Matris Kompozitler (SMK) ve Polimer Matris Kompozitler (PMK) yer almaktadır. Metal Matrisli Kompozitler (MMK), esneyebilen metal matrisin takviye malzemeleriyle bir arada kullanılması sonucu geliştirilmektedir. Alevlenmeyen bu yapıların işlenme koşullarının zor oluşu iyileştirilmeye açık bir alandır. Kullanım alanları olarak sınıflandırma sistemi Şekil 3.4'te verilmiştir:



Şekil 3.4: Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması.

Çelik'in çalışmasından (2010) uyarlanmıştır.

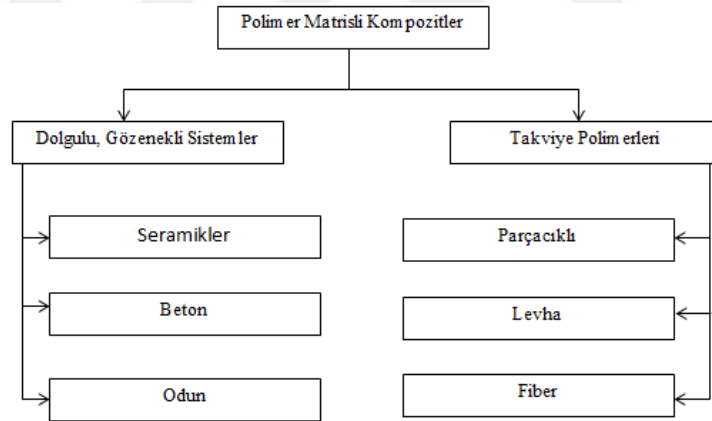
Sertliklerinden dolayı tercih sebebi olan seramik malzemelerin kırılganlıkları, darbe cevapları (Şekil 3.5) ise ikinci bir iyileştirilme konusu olmaktadır. SMK'ler yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerdir. Ergime noktaları ve elastisite modülleri yüksektir. Atomik hareketliliği düşük, çok sert, kayma direnci yüksek ve kırılgandırlar.



Şekil 3.5: Seramik Malzemelerin Darbe Cevabı.

Aydinel ve diğerlerinin (2005) çalışmasından uyarlanmıştır.

SMK'ler askeri, ticari ve uzay çalışmalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük yoğunluk, yüksek modül, yüksek kuvvet, yüksek dayanım ve yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliklerine sahiptir. PMK, fabrikasyon süreçlerinin kolay oluşu nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir ancak PMK'lerin yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri direnç MMK'lere kıyasla daha düşüktür. Kırılma dayanımı ve kuvveti düşük olan polimerler mikro, nano boyutlarda, yapılan karbon nanotüp gibi organik parçacık takviyesi ile çatlama dayanıklılığı, aşınmaya, korozyona, ve delinmeye karşı direnci, gerilme kuvveti ve kırılma dayanıklılığı yüksek malzemelere dönüştürülebilmektedir. Kompozitler geliştirilirken, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi ve maliyetlerin düşürülmesi öncelikli konulardır. PMK'lerin kullanım alanları olarak savunma sanayi, uçak ve uzay çalışmaları, elektronik malzemeler, sağlık, akıllı ev aletleri örnek olarak gösterilebilir. Doğal yollarla elde edilen polimerik kompozitler de mevcuttur. Örneğin: Selüloz liflerini içeren odun doğal bir kompozittir. PMK'lerin sınıflandırma sistemi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Polimer Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırması.

Tekinbüğrü'nün çalışmasından (2013) uyarlanmıştır.

PMK'ler arasında literatürde en sık rastlanan sınıf fiberlerdir. PMK'ler sahip oldukları takviye malzemesine göre dört sınıfa ayrılmaktadır: Cam Fiber Takviyeli Polimerler (GMRP), Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP), Aramid Fiber Takviyeli Polimerler (AFRP) ve diğer Fiber Takviyeli Polimerler.

Polimerler genellikle sürekli fiber malzemeler ile kullanılmaktadır ve davranışlarına göre termoplastik ve termoset olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bir diğer kompozit

malzeme sınıflandırma türü ise takviye yapısına göre yapılmaktadır; hibrit kompozitler, taneli kompozitler, lifli kompozitler ve tabakalı kompozitler. Kompozit malzemelerin sağladığı olumlu özelliklere karşın sahip oldukları düşük üretim oranları ve geliştirme aşamasında olmaları sebebiyle diğer malzemelere kıyasla görece pahalıdırlar.

3.4. Zırh Çeliği, Zırh Tasarımı, Kompozit Zırhlar

Bir tümün yapısal özellikleri anlatılırken kullanılan **doku** kelimesi (tarihi doku, sosyal doku, kas doku vb.) yaygın olarak; hayvanlarda organları, bitkilerde gövdeyi meydana getiren en küçük birim olan **hücre**, göze, **bütününü** ifade etmektedir. Görevleri ve yapıları açısından benzer olan hücre toplulukları, dokular, hayvansal ve bitkisel olabilmektedirler ki bunlar da kendi içlerinde farklı başlıklar altında detaylandırılabilir (bağ doku, sinir doku; bölünür doku, bölünmez doku vb.). Bu özelliklere sahip olmayan, içyapısında canlı hücre bulundurmayan, bir bütünün sahip olduğu tüm parçalarıyla birlikte aldığı isim ise **inorganik madde** olmaktadır. Oda sıcaklığında katı durumda bulunan; çeşitli maddelerle kimyasal olarak oluşturulan ve eski haline getirilebilen **bileşik** ile fiziksel yollarla ortaya çıkan ve eski haline getirilemeyen **karışım formundaki inorganik maddelere** ise **mineral** denilmektedir.

Maden terimi: Yer bilim açısından, çeşitli doğa olayları sonucu yerkabuğunun birtakım bölgelerinde bulunan ve ekonomik değer taşıyan **mineraller** olarak belirtilirken; kimya alanında ise genellikle **metal** olarak isimlendirilmektedir. Diğer yandan: Metal, ısı-elektrik iletkenliği yüksek olan maddelere verilen isimdir. Malzemeler, atomların çeşitli düzen ve yapıda birbirlerine bağlanması nedeniyle, farklı sınıflandırmalara sahip olmakla birlikte mühendislikte kabul gören sınıflandırma: Metaller, Yarı İletkenler, Seramikler, Polimerler ve Kompozitler şeklindedir (Aran, 2008).

Metaller ve alaşımları temelde iki gruba ayrılmaktadır: Demir Esaslı Metaller ve Demir Dışı Metaller. **Demir dışı metallere;** elektronikte Bakır, havacılıkta ve hafif yapılarda Alüminyum, korozyon ve ısıya dayanıklı alaşımlarda Nikel, korozyona karşı koruma sağlayan kaplamalar arasında Çinko, konserve kutular için teneke üretiminde ise Kalay örnek olarak verilebilir (Çelik, 2010).

Metalin belirli bir oranda bir veya daha fazla metal bazen de karbon gibi bir ametal ile birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni metale **alaşım** denilmektedir. Doğada en sık rastlanılan metal olan **Demir Elementi (Fe) ile Karbon Elementinin (C) alaşımına çelik** denilmektedir. Alaşıma dâhil edilen elementlerin oranına bağlı olarak farklılaşan yüzlerce çelik tipi mevcuttur. Alaşımlı çelikler, talep edilen özellikler ve kullanım alanlarına göre yüksek ve düşük alaşımlı olmak üzere iki ayrı grupta imal edilmektedirler. En yaygın kullanılan **alaşım elementleri: Mn, Ni, Cr, Mo, V, Si, B** olmakla birlikte az kullanılanlar: **Al, Co, Cu, Ce, Nb, Ti, W, Sn, Zn, Pb ve Zr**'dir. Geliştirilen alaşımların formu ile çeliklerin; sertlik, tokluk, yüksek mukavemet gibi özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bu nedenle çelikler, jet motorlarda yer alan türbin kanatçıklarında ve uzay mekiği gibi ağır koşullara dayanabilme kabiliyeti gerektiren ortamlarda da tercih edilmektedirler.

Geliştirilen veya mercek altına alınmış olan çeliğin istenen ortama uygun malzeme olup olmadığı ise **metalografik incelemelerle** tespit edilmektedir. **Metalbilim (Metalürji)**, metallerin insan müdahalesiyle istenilen amaca hizmet etmesine yönelik ayrıştırılması, zenginleştirilmesi ve işlenmesiyle ilgilenen bilim dalıdır. Bu başlığın altında oluşan **Metalografi** ise; madenlerin (başta metal olmak üzere seramik, polimer ve yarı iletkenler) mikroskop altında incelendiği ve bu mikro yapı incelemeleri ile malzeme özelliklerinin tespit edilmesinin mümkün kılındığı bilim dalıdır. **Metalografik incelemeler, muayeneler** ise incelenen numunenin hangi koşullara ne kadar maruz kalabileceği konusunda çıkarımlara ortam hazırlayarak imalatı, malzemenin işlenme süreçlerini ve kullanım alanlarını yönlendirebilen sistematik bir metottur. Örneğin; alaşımlı çeliklerin metalografik incelemelere tabi tutulmasıyla; tane boyutu, içyapı hataları, malzemenin daha önce maruz kaldığı işlemlerin bilgisi, malzemeye ne tür işlemlerin uygulanabileceği, sertleşme derinliği, çatlak, tahrip miktarı, malzeme ömrü ve çalışma şartları gibi özellikler tespit edilmektedir.

Zırh Çeliği

Metalografik muayenelerde yapılan içyapı incelemeleri sonucu, **yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı** olduğu tespit edilen malzemelerle genellikle otomotiv sektöründe karşılaşılmakta ve bunlara kısaca **HSLA çelikleri** denilmektedir. Bu çeliklerin kalınlığına göre tiplerini belirten iki adet şartname mevcuttur. 6 mm'den ince saclar ASTM A1008 ve A1008M spesifikasyonları ile 6

mm'den kalın levhalar ise ASTM A656 ve A656M spesifikasyonları ile tanımlanmıştır. Bu çelikler, köprü ve bina inşaatı, deniz platformları, petrol ve doğalgaz boru hattı ve **zırh çeliği** geliştirilmesi gibi ürün ve alanlarda kullanılmaktadır.

Zırh çelikleri, temel olarak **düşük karbonlu alaşımlı çelik sınıfına** girmekte olup; başlıca alaşım elementleri Cr, Ni, Mo ve Mn'dir. Karagöz ve Atapek (2010b), tarafından geliştirilen zırh çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 3.1'de verilmiştir:

Tablo 3.1: Zırh Çeliği Genel Kimyasal Kompozisyonu.

Element	Kimyasal (Ağırlık- %)
Karbon	0,2-0,4
Mangan	0,1-0,2
Silisyum	0,1-0,3
Nikel	-
Krom	1,4-1,8
Molibden	0,4-0,7
Kobalt	1,0-5,0
Nb+V+Ti	0,15-0,20
Bor	0,002-0,3

Zırh çeliklerinin iki temel kabiliyet beklenmektedir: **Yüksek mukavemet ve tokluk**. Buradan hareketle zırhın, mermiyi durdurabilme özelliğinin yanında kişiye, etrafındaki varlıklara, zırhın kullanıldığı araca veya karargâha zarar vermeden tehditi bertaraf etme yeteneğine sahip olması gerektiği söylenebilir.

Zırh konusunda çalışan araştırmacılar, ülkelerinin savunma sistemlerindeki yetkinliğini artırma hedefi doğrultusunda, teknolojik gelişmelere bağlı olarak güçlenen silah sistemlerine karşı koyabilecek ve uluslararası ortamlarda kabul gören standartlara uyum sağlayabilecek yeni malzemeler geliştirmeye ve **zırh tasarımına** yönelmiştir.

Zırh tasarımına; malzeme özellikleri kadar, mermiyi güvenli kabul edilen darbe enerjisi sönmüleme sınırları çerçevesinde durdurabilme konuları da girdi sağlamaktadır. Örneğin; mermi ve şarapnele karşı korumada kullanılan kompozit

malzemelere uygulanan standartlar, genellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen NIJ Standart 0101.03'e uygun olarak yapılmaktadır. Bu standart ile istenilen koruma düzeyine göre test düzeneği kurulmakta ve malzemede oluşan çöküntü miktarının azami 44 mm olması beklenmektedir.

Zırh Tasarımı

Genel olarak zırh tasarımında göz önünde bulundurulması gereken başlıca dört özellik mevcuttur (Yüksel, 2019):

- Balistik olarak hasar oluşturu darbelere karşı yüksek mukavemet göstermesi.
- Seri üretim ve kolay imal edilebilirlik özellikleri içermesi (kesme, kaynak edilebilirlik, şekil verilebilirlik).
- Yüksek yorulma dayanımına sahip olarak uzun yıllar kullanılabilmesi.
- Manevra sırasında zırh yüzeylerinde oluşan çekme ve gerilme kuvvetlerini emmesi ve şekil bozukluğuna uğramaması.

Kompozit Zırh

Zırh tasarımını çerçeveleyen ve genel kabul görmüş **altı tip zırh çeşidi** mevcuttur: Homojen Zırh, Tepkisel (Reaktif) Zırh, Boşluklu (Sandviç) Zırh, Aktif Zırh, Modüler Zırh, Bileşik (Kompozit) Zırh. Bu sıralama aynı zamanda geçmişten günümüze bu alanda yapılan çalışmaların teknolojik gelişim silsilesini de göstermektedir.

Homojen Zırh: Zırh teknolojileri arasındaki en eski çeşittir. Tankın manevra kabiliyetini etkilemeyecek şekilde homojen zırh ile koruma sağlanmak istendiğinde en yüksek kalınlık 35 cm civarında olmaktadır. Bununla birlikte, günümüz teknolojisinde tanksavar silahları ile bu zırhın 130 cm'ye kadar delindiği tespit edilmiştir ve ülkemizde de bulunan M-48, M-60 tankları bu tür zırha sahiptir.

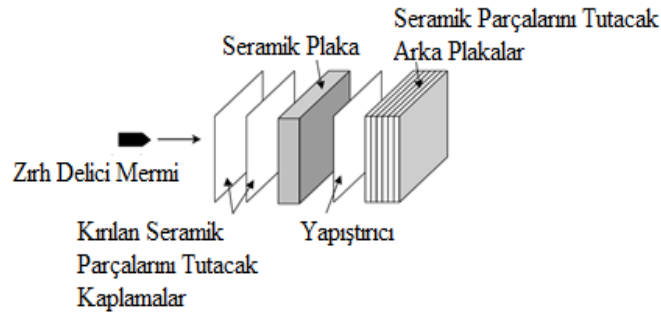
Tepkisel Zırh: Geliştirilen tüm zırhlara uygulanabilen bir kaplama niteliği taşımaktadır ancak, uygulandığı araca yaklaşık iki tonluk yük bindirmektedir. Tanksavar mermisinin bu zırha teması sonucu, levha içerisinde yer alan patlayıcının infilak etmesiyle mermi saptırılmaktadır. İlk olarak Arap-İsrail savaşlarında İsrail tarafından Merkava tanklarına uygulandığı daha sonra Sovyetler Birliği envanterinde de yer alan T-72, T-80 ve T-84 tank modellerinde kullanıldığı bilinmektedir.

Boşluklu Zırh: İki parçadan oluşması nedeniyle boşluklu veya sandviç zırh olarak

isimlendirilmiştir. Dışarıda ince zırh yer alırken içeride kalın, ana, zırh bulunmaktadır ve bu iki zırh arasında yanıcı olmayan herhangi bir sıvı, su veya sadece hava boşluğu bulundurulur. Temel hedef, ince zırha çarpan merminin taban zırha gelinceye kadar sahip olduğu enerjinin düşürülmesi böylece taban zırhın delinmemesidir. İki zırh arasında yer alan boşlukta bilye benzeri malzemelerin kullanımı ve mermi yönünün saptırılmak suretiyle enerjisinin düşürülmesine yönelik çalışmalar da yürütülmektedir. M-1, T-80, Leopard 1 A1 tanklarında bu zırh modeli kullanılmaktadır.

Aktif Zırh: Aktif koruma Sistemi (AKS) uygulamalarında, tehditlere karşı fiziksel imha ve işlevsel imha olarak iki farklı karşı tedbir yöntemi kullanılmaktadır (Tekinbüğrü, 2013). İşlevsel imha karşı tedbir yönteminde amaç, tehdidi fiziksel olarak tahrip etmeksizin sisleme ve karıştırma ile füze güdüm işaretlerini önleyerek, tehdidin platforma ulaşmasını engellemektir ve prensip olarak güdümlü bir mühimmat öncelikle güdüm işaretine karşı işlevsel imha uygulanarak bertaraf edilmeye çalışılır. Bunda başarı sağlanamaması halinde ise mühimmata fiziksel imha uygulanmaktadır (Aytaç ve diğ., 2019). Önceleri T-80 ve T-84 tank modellerinde tercih edilen ve sadece fiziksel imha uygulayabilen bu zırh modelleri, tanklara işlevsel imha özelliği kazandırılması ile tekrar gündeme alınmıştır. ASELSAN'ın geliştirdiği AKKOR ve PULAT da bu alandaki ülkemiz yetkinliklerini başarıyla sergilemektedir. PULAT; yüzlerce roket, güdümlü f zeye karşı test edilerek doğrulanmıştır ve Türk Silahlı Kuvvetlerinin modernizasyon projesi kapsamında M60T tanklarındaki yerini almıştır. **Modüler Zırh:** Zırh  eliğinin **seyreltilmiş uranyum** ile güçlendirilmesiyle elde edilen zırh modelidir. Burada zırhın güçlendirilmesi temin edilmiş olsa da zırhın kazandığı radyoaktif özellik aracın çevresindeki canlı varlıklar açısından büyük tehdit oluşurmaktadır ki bu durum zırhın insan hakları uyarınca kullanımını sınırlandırmaktadır. Seyreltilmiş uranyum, doğal uranyuma kıyasla daha az radyoaktif olsa da; solunum yolu ile vücuda alınabilmekte, yutulabilmekte, derideki yaralardan kana karışarak bağırsak ve akciğerde hasar meydana getirebilmektedir. Bununla birlikte, sahip olduğu ağır metalin yarattığı zehirlilik ise radyoaktif özelliği kaynaklı oluşan zarardan daha fazladır. Ağır metallerin **DNA hasarına** neden olduğu bilinmektedir. **Kompozit Zırh:** 1960'lı yıllarda İngiliz ordusu tarafından envantere alınmıştır. Bu yapılarda, bir katmanda şok dalgalarını emen alüminyum veya plastik, diğer katmanda yüksek ısıya dayanıklı seramik ve üçüncü bir katmanda yüksek dirençli  elik tabakalar

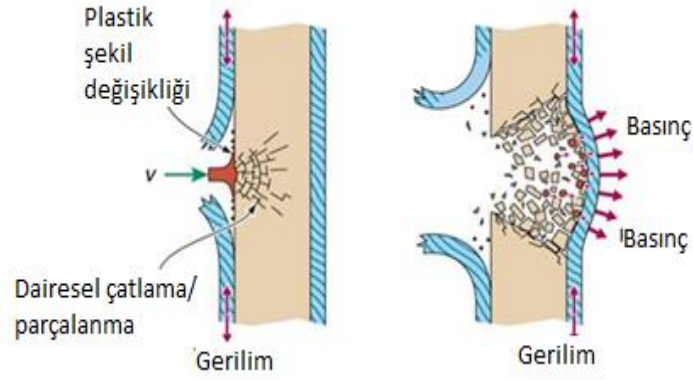
bulunmaktadır. Dünyada en yüksek zırh teknolojisi olarak kabul edilen Challenger ve Leopard tanklarında da kompozit zırhın kullanıldığı bilinmektedir. Seramik ve çelik gibi geleneksel zırhlar, kompozit zırhlara kıyasla daha ağır, manevra kabiliyeti daha düşük ve son teknoloji tanksavar mermilere karşı oldukça dayanıksızdır. Tok (kırılmaya karşı dayanıklı), düşük yoğunlukta, çok yüksek ısılara dayanabilen (merminin sahip olduğu ısı karşısında ergimeyerek mermiyi durdurabilen), maruz kaldığı enerjiyi emebilen, bölgesel olarak maruz kalınan darbe anında karşı karşıya olduğu enerjiyi malzemenin tüm yüzeyine yayarak içeri girme ve sonrasında oluşabilecek tam delinme süreçlerinin önüne geçebilen, malzemenin tek başına imal edilmesi oldukça zordur. Bu nedenle kompozit zırhların geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Örneğin; sert seramik tabakanın mermi ile teması esnasında kırılarak enerjiyi büyük oranda emmesi ve bu tabakanın arkasına koyulacak çeşitli elyaf ve rijit parçalar ile yapının desteklenmesiyle balistik kabiliyet, ağırlık ve maliyet açısından faydalı ürünler ortaya konulabilmektedir. En çok bilinen üç kompozit zırh çeşidi: Aramid elyaf, cam elyaf, Bor Karbür'dür. Zırh delici mermi etkisi düşünülmüş bir seramik kompozit yapının şematik gösterimi Şekil 3.7'de verilmiştir:



Şekil 3.7: Seramik Yapıda Tasarlanan Kompozit Zırhın Şematik Gösterimi.

Şenel ve diğerlerinin çalışmasından (2004) uyarlanmıştır.

Seramik levha ve fiber ile oluşturulan bir kompozit malzemenin çarpışma anında sergilediği davranışın şematik gösterimi Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Kompozit Yapı İçerisinde Kullanılan Seramik Levhanın Çarpışma Anındaki Davranışı.

Yılmaz'ın çalışmasından (2012) uyarlanmıştır.

Aramid Elyaf: Ticari olarak bilinen ismi ile “Kevlar” sahip olduğu düşük yoğunluk ile kompozit malzeme çalışmaların zeminini hazırlamıştır. Hafifliğinin yanı sıra; yüksek kimyasal aşınma ve darbe dayanımı ile bu malzeme ön plana çıkmaktadır.

Cam Elyaf: Isı iletimlerinin çok düşük olması nedeniyle yalıtım malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet değerleri nedeniyle farklı malzemelerle bir araya getirilerek kompozit zırh geliştirilmesine hizmet etmektedir. **Bor Karbür:** Yüksek sertlik ve hafiflik özellikleri sayesinde askeri ve sivil alanlarda kullanılan bir malzemedir. ALTAY tankında, çeşitli balistik yeleklerde, komuta kontrol merkezlerinde, Hummer ve zırhlı personel taşıyıcı gibi kara araçlarında, yeni nesil Apache ve Black Hawk benzeri helikopterlerde de bulunduğu bilinmektedir. Kompozit zırhlar konusunda; parçacık takviyeli zırh, elyaf takviyeli zırh, Spectra Shield, Dyneema gibi çeşitlerle de karşılaşılmaktadır.

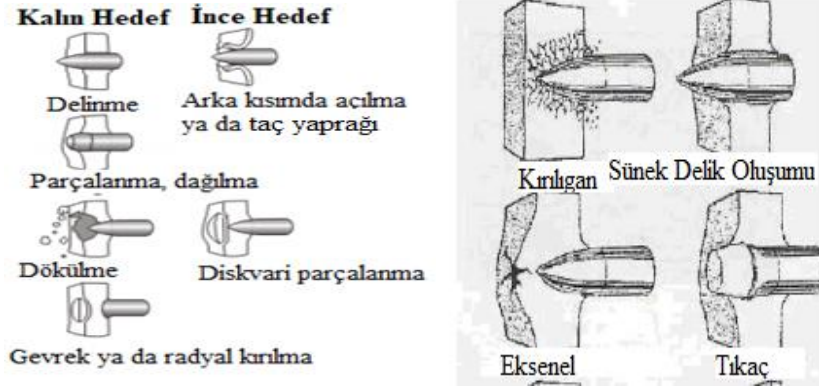
3.5. Hasar Oluşum Mekanizması

Düşük kütleli yüksek hızlı balistik çarpmalarda hasar mekanizması, darbe bölgesinin yakın çevresinde gözlenmektedir. Temelde zırh malzemesinden beklenen özelliğin, sivri uçlu zırh delici mermilerin yüksek hızlardaki darbe enerjisini sönmölemek olduğu söylenebilir (Saraçoğlu, 2016). Hedef üzerinde gözlenen hasarlar; çarpışma hızı, mermi burun şekli, mermi yörüngesi, malzeme özelliği ve atış yapılan ortam koşulları gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Zırh malzemesinin

delinme mekanizması, hedef ve tehdit özelliklerine göre farklılık gösteren üç temel kapsamda toplanabilir:

- 1- Merminin, hedefi delerek arka yüzden tamamen çıktığı durumlar: Balistik limit çalışmaları bu noktada devreye girerek merminin malzemeyi terk ettiği andaki hızının ölçümü ile ilgilenmektedir. Eğer bu çıkış hızı sıfır olursa, merminin sahip olduğu tüm enerji hedef tarafından emilmiş ise, merminin namlu çıkış hızında (balistik limit hız) malzemenin kesinlikle delineceği ve bu hızın altındaki değerlerde malzemenin delinmeyeceği yorumu yapılmaktadır. Bununla birlikte, uğradığı hasar miktarının daha detaylı çalışmalarla tespit edilmesi gerekmektedir.
- 2- Merminin, malzemeyi delerek kalan enerjisi ile belirli bir hızda dışarı çıktığı durumlar için; malzemenin emebildiği enerji miktarının, merminin sahip olduğu enerjinin altında kaldığı yorumu yapılabilir.
- 3- Mermi, malzemenin arka yüzünde bombe oluşturarak veya oluşturmayarak bir miktar hedefin içerisinde kaldığı veya malzeme üzerinden sektiği durumlar için; malzemenin enerji emme düzeyinin mermi enerjisinden yüksek olduğu söylenebilir.

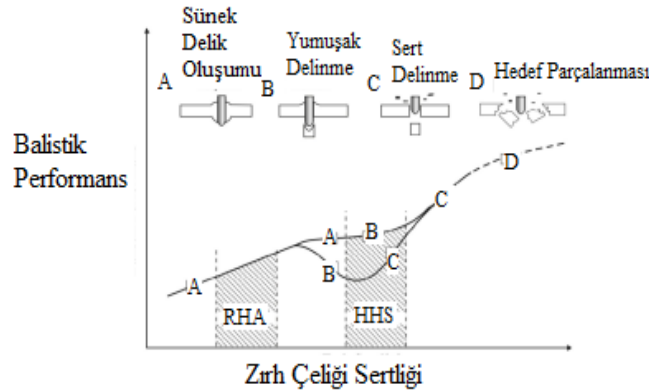
Malzeme kesitinde birim alana denk gelen ve dış kuvvetler ile momentuma karşılık oluşan iç kuvvetlere **gerilme** denilmektedir. Düşük yoğunluklu hedeflere uygulanan bir dış kuvvet sonucunda darbe anı başlangıcında oluşan gerilme değeri, malzemenin sahip olduğu en yüksek dayanım değerinin üzerinde olduğu durumlarda gevrek kırılma gözlemlendiği bilinmektedir. Gevrek hedeflerde ise merminin çarpma noktasından itibaren **radial kırılma** başlamaktadır. Bununla beraber, darbe anında şok dalgalarının gerilmeye etki etmesi malzemeden parça kopmalarına sebebiyet vermektedir. Düşük ve orta sertliğe sahip kalın levhalarda ise tipik hasar mekanizması **sünek delinme** ve **küçük parça kopması** şeklinde olduğu gözlenmektedir. Malzemede geriye doğru esneme ile gözlemlenen **taç yaprağı** oluşumu ve **sünek delik gelişimi** ise sünek malzemelerde gözlemlenen hasar şekilleridir (Naik ve diğ., 2006). Delik oluşumları plastik deformasyon sonrası büyümeye devam edebilir; yüksek tokluk ve düşük mukavemete sahip zırh çelikleri tarafından enerji emilimi yeterli düzeyde sağlanamadığı durumlarda plastik deformasyon sonucu deliğin büyüdüğü gözlenmektedir. Zırh çeliklerinin tam delinme olarak adlandırılan başlıca türleri Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9: Delinme Türleri.

Sanders (1997) ve Karagöz ve diğ., (2008)'e ait çalışmalardan uyarlanmıştır.

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, malzemenin arka yüzeyinden mermi çıktığı zaman yaklaşık olarak merminin çapına sahip bir delik, tepme nedeniyle, açılmaktadır. Malzemenin sahip olduğu mekanik özellikler ile balistik performansı arasında kurulabilen balistik performans ve hedef sertliği ilişkisi Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10: Zırh Çeliği Sertlik Değerinin Balistik Performansa Etkisi .

Akasaki ve diğerlerinin çalışmasından (2005) uyarlanmıştır.

Haddelenmiş Zırh Çeliği (RHA) ve Yüksek Hız Çeliği (HHS) sertlik değerlerine bağlı olarak delik oluşumlarının ve dolayısıyla balistik yeteneklerin değiştiği görülmektedir. Yine bu şekilden hareketle, hedef sertlik değeri, mukavemet, artışı ile **malzemenin delinmeye karşı** gevrek kırılma sergilediği görülmektedir. RHA, temelde düşük oranlarda karbon içermektedir. Bu özelliği sayesinde üretim kolaylığı, **tokluk (enerji emebilme yeteneği)**, darbe dayanımı kolay kesme, şekillendirilebilme, uzun kullanım ömrü (yüksek yorulma direnci) ve

kaynaklanabilirlik gibi niteliklere sahiptir. HHS ise seri çelik olarak bilinmektedir. Yüksek hızlarda çalışan kesici takımların yapımında kullanılan bir metal türüdür. En önemli özelliği ise 600⁰C'ye kadar olan sıcaklıklara dayanabilmesidir. Yapılarında Karbon, Krom, Wolfram esas olarak bulunurken Vanadyum, Kobalt ve Molibden de içerebilirler (Rxavier, 2005).

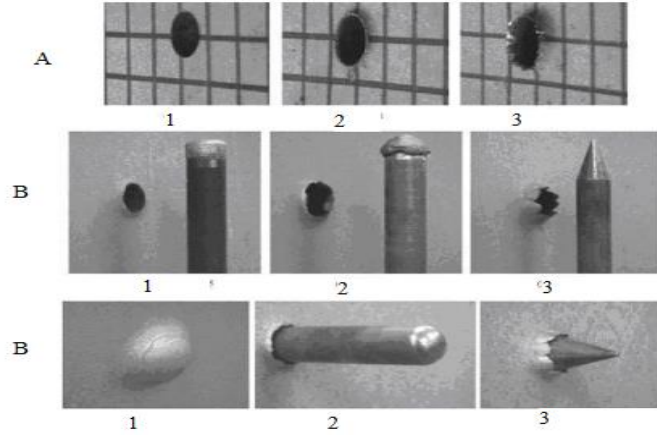
Zırh çeliği performansının, belirli sertlik değerlerine karşılık gelen kırılma şekilleri ile doğru orantıda oluşu, malzeme hasar mekanizması üzerinden malzeme niteliklerine ilişkin yorum yapılabileceğini göstermektedir. Merminin, maruz kaldığı deformasyon miktarı ne kadar fazla ise hedefin balistik performansının da o kadar fazla olacağı düşünülebilir. Malzeme sertliğinin artmasıyla merminin maruz kalacağı deformasyon miktarı artmaktadır. Bununla birlikte, malzeme sertliğinin belirlenen düzeyin üzerine çıkması malzemede düşük tokluğa neden olmaktadır ve dolayısıyla malzemenin gevrek parçalanmasına sebebiyet vererek koruma görevini eda edememesine yol açmaktadır. Merminin maruz kalacağı deformasyonun mermi hızı ile ilişkisi Şekil 3.11'de gösterilmiştir (Aydın ve Soydemir, 2018).



Şekil 3.11: Mermi Deformasyon Görüntüleri.

Gellert ve diğerlerinin çalışmasından (2000) uyarlanmıştır.

Tehdit ile hedef malzeme hasar mekanizmasının üzerinde farklı uç geometrilerinin de etkisi olduğu belirlenmiştir (Aydinel ve diğ., 2005). Bu tespiti destekler nitelikte farklı uç geometrilerine sahip mermilerle yapılan atışa ait kesit görüntüsü ve delinme sonrası üç ayrı mermi tipi kaynaklı oluşan hasar mekanizması Şenel ve diğerlerinin 2004 yılında yaptıkları çalışmadan uyarlanarak Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12: Mermi Uç Geometrisine Bağlı Hedef Giriş (A) ve Çıkışlarda (B) Gözlenen Tahribatlar.

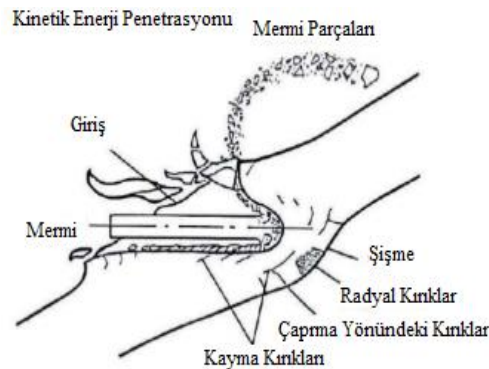
Şenel ve diğerlerinin çalışmasından (2004) uyarlanmıştır.

Mermiyi daha fazla deformasyona uğratmak ve enerjisinin malzeme tarafından emilimini artırmak amacıyla ilk darbe kuvvetinin etkisini tüm malzeme geneline yayacak şekilde mermi sivri ucunun sert seramik ön levha aracılığıyla kütleştirilmesi en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Elyaf takviyeli polimer matrise sahip yapılarda, küt uçlu mermiler ile sivri uçlu mermilerin eş balistik darbe hızında testi sonucu küt uçlu mermilerden malzemeye aktarılan momentumun sivri uçlu mermilere kıyasla dört kat büyük olduğu ve bu nedenle küt uçlu mermi enerjisinin malzeme tarafından emilimi gerçekleştirilebilirken sivri uçlu merminin sahip olduğu enerjisi ile malzemeyi delip kalan enerjisi ile bir miktar daha ilerlediği görülmüştür (Jeng ve diğ., 1992). Bununla beraber, Kevlar ve benzeri dayanıma sahip malzemeler ile yapılan deneylerde, çok yüksek hızlardaki darbe anında merminin fiberleri makas gibi kestiği ve yapının eridiği gözlenmiştir (Gellert ve diğ., 2000). Buradan hareketle, malzemede yaratılan hasar büyüklüğüne etkisi olduğu bilinen mermi uç geometrisinin malzemenin tamamen delinmesi için gerekli olan enerji miktarının tayini üzerinde de etkisi olduğu görülmektedir. Hasar mekanizmasından hareketle yorumlanan balistik performansın, mermi ve hedef kırılımında sahip olduğu parametreler Tablo 3.2’de özetlenmiştir (Yılmaz, 2012).

Tablo 3.2: Hedef ve Tehdit Açısından Balistik Performans Parametreleri.

HEDEF	Malzeme Özellikleri ve Yapısı	Elastisite Modülü
		Alansal Yoğunluk
		Kalınlık
		Tabaka Sayısı
MERMİ	Fiziksel Özellikler	Ağırlık
		Kalibre
		Uç Geometrisi
		Sertlik
		Hız
		Vuruş Açısı

Hedefin sahip olduğu malzeme özellikleri ve yapısı açısından; kompozit yapı içerisinde kullanılan lifin kopma uzaması, elastisite modülü ve kullanım şekli gibi değişkenler kompozitin alansal yoğunluğuna bağlı olarak yüksek hızlardaki darbe anında yapının gösterdiği direnci belirlemektedir (Campos ve diğ.,2003). Ek olarak, tehditin dolayısıyla hasarın, büyüklüğü **mermi hızının karesi ile, kinetik enerji** kaynaklı, orantılı olduğu söylenebilir. Şekil 3.13'te mermi hasar mekanizması verilmiştir.

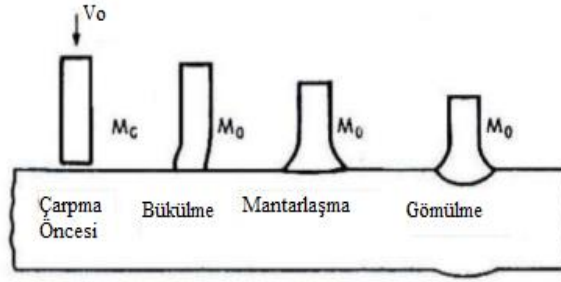


Şekil 3.13: Delinme Mekanizması.

Sanders'ın çalışmasından (1997) uyarlanmıştır.

Yüksek hızlı darbelerde gözlemlenen hasarın bölgesel olduğu bilinmektedir. Yüksek hızlı darbe anında mermilerde meydana gelen hasar mekanizmalarından farklı olarak

düşük hızlarda gerçekleşen çarpmalarda malzeme ve mermi üzerinde gözlenen üç farklı hasar mekanizması mevcuttur (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: Düşük Hızlı Çarpma Sonrası Numune ve Mermi Şekil Değişimi.

Naik ve diğerlerinin çalışmasından (2006) uyarlanmıştır.

Delme mekanizmasının analizi için ihtiyaç duyulan mermi uç geometrisi, çekirdek malzemesi, yapısal özellikleri ve hızı kadar kaplama özelliklerinin de bilinmesi hedefte oluşacak delinme ve tahrip tayini için büyük önem taşımaktadır (Cheng ve Liang, 2010). Mermi çekirdekleri çelik veya Bakır gibi malzemelerden kaplamasız veya pirinç gövdeli olarak üretilebilmektedir. Pirinç gövdeli kaplamanın üzerine ise ikincil bir işlem olarak çelik alaşım, bakır ve benzeri metal kaplama yapılarak merminin hasar etkisi artırılmaktadır.

3.6. Yüzey Kaplama Yöntemleri

Malzeme aşınmaları nedeniyle yeni malzeme satın alınması ile mevcut malzemelerin hurdaya ayrılması ve benzeri konuların ülkemiz gayri safi milli hâsılasında %5'lik kayıplara neden olduğu bilinmektedir (Sert, 1997). Bu nedenle, malzemelerin kalitesini ve ömrünü artırmak, çalışma ortamı kaynaklı olumsuz şartları en alt düzeye indirmek amacıyla metalik ve metalik olmayan yüzey kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak malzemelerden beklenen özelliklerin her geçen gün artması, değişmesi, malzemeden istenen özelliklerin düşük maliyetle nasıl elde edilme yollarının araştırılmasına sebebiyet vermektedir. Bu araştırmalar, farklı yüzey kaplamalarının geliştirilmesi sürecinde önemli rol oynamaktadır ve böylece yüksek maliyetler nedeni ile elde edilemeyen malzeme özellikleri kaplama teknolojileri yardımı ile sağlanabilmektedir. Kaplama yöntemlerinin ortak amacı, uygulanan yüzeyde ihtiyaç duyulan karakteristik özelliğe

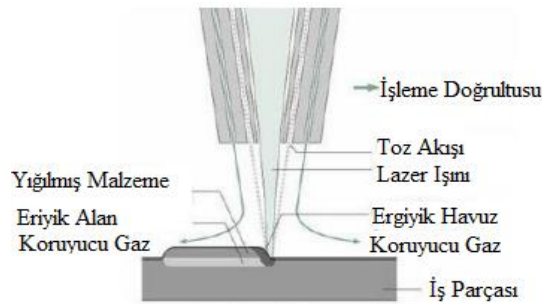
sahip tabakanın oluşturulmasıdır. Malzemenin bulunduğu fiziksel forma göre değişmekte olan yüzey kaplama yöntemleri genel olarak üç başlık altında incelenebilir: Gaz Fazı,    zelti, Sıvı, Yarı-Sıvı Fazı. Aşınma, erozyon, oksidasyon, yorulma ve yüksek sıcaklık özellikleri malzemelerin başlıca kaplama nedenleridir. Fizikokimyasal Kaplamalar, Yüksek Hızdaki Oksi-Yakıt Yöntemi (HVOF), Doğrudan Buhar Biriktirme (DBB), Plazma Sprey, İyon Işını İmplantasyonu (IBAD), Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB), Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB), yüzey kaplama yöntemlerinin başlıcalarıdır. Fizikokimyasal kaplama yöntemi ile biyolojik olarak aktif moleküllerin biyomalzemelere kaplanması işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerin dışında Elektroliz (Biyomimetrik), Sol-jel, Daldırmalı Kaplama, Döndürerek Kaplama gibi birçok kaplama yöntemi de mevcuttur. Kaplama  eşidinin tayininde uygulama sıcaklığı ve kaplama kalınlığı parametreleri büyük önem arz etmektedir. Kaplama  eşidinin tayininde uygulama sıcaklığı ve kaplama kalınlığı parametreleri büyük önem arz etmektedir.

Gaz Fazı, plazma destekli kaplama çeşidi olup FBB, KBB ve IBAD yöntemlerini içermektedir. 1857 yılında Faraday'ın metal bir teli, vakumlu bir odada, buharlaştırma yöntemi ile kaplaması FBB'nin bilinen ilk uygulamasıdır. FBB yöntemi, buharlaşma yöntemiyle yapılabildiği gibi püskürtme yolu ile de uygulanabilir ve işleme tabi tutulacak yüzey üzerine buharlaştırılan metalin kaplanması suretiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem uygulanırken vakumlu bir ortamın hazırlanması esastır. Bu yöntem geniş bir sıcaklık aralığında ger ekleştirilebilmekle birlikte, üretim hızı ve kaplamaların yüzey kalitesi oldukça yüksektir. 1888 yılında ise bu yöntem ile kaplanan ince filmlerin sahip olduğu optik  zellikler Kundt tarafından incelenmiştir. 1940'lı yıllarda kesici takımların özelliklerini iyileştirmek için kullanılan FBB yöntemi, 1970'li yıllardan sonra elektronik teknolojilerinde de kullanım alanı bulmuştur. KBB ve FBB, diğer adıyla, çöktürme, yöntemleri ile hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. KBB yöntemi, çevresel etkilerden arındırılmış ve ısı verilmiş işlem odasında reaktif bir gazın işlem uygulanacak altlığın üzerinden geçirilmesi suretiyle gerçekleştirilir. Bu yöntem; kapalı kap içerisinde, ısıtılmış olan malzeme yüzeyi ile ortamda buhar formunda bulunan taşıyıcı bir gazın kimyasal reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen katı malzeme ile kaplama sürecinden ibarettir. Bu sayede malzemenin termal şok direnci, elektriksel ve benzeri özellikleri iyileştirilerek mühendislik, havacılık, askeri, bilim ve elektronik gibi birçok alanda

kullanım imkânı oluşturulmaktadır. KBB yönteminin sağladığı en önemli özellik, metal yüzeyin hassas ölçümler ile aynı kalınlıkta kaplanabilmesidir. Bununla birlikte, kaplama parametreleri değiştirilerek söz konusu malzeme kristal yapısı ve benzeri özellikler kontrol altına alınabilmektedir ve böylelikle Tungsten, Karbon ve Tantal gibi yüksek ergime noktasına sahip elementler de kaplanabilmektedir. İyon Işını İmplantasyonu ve Elektron Demeti Destekli Biriktirme yönteminde malzemelere yüksek korozyon direnci, biyouyumluluk ve **yüksek sertlik** gibi özellikler kazandırılmaktadır. Bununla birlikte; yüzey pürüzlülüğü ve kristal yapıdaki değişiklikler kontrol altında tutulamamaktadır. **Çözelti Fazı:** Kimyasal (Akımsız Kaplama, Kimyasal Redüksiyon), Elektrokimyasal, Soljel yöntemlerinden oluşmaktadır. **Sıvı, Yarı- Sıvı Faz** plazma destekli kaplama çeşitleri olup: Lazer, Termal Sprey ve kaynak çeşitlerini içermektedir. DBB yöntemi ile buhar atomları taşıyıcı bir gaz akımında toplanarak malzeme yüzeyine uygulanmaktadır. Bu yöntem ile malzeme üzerinde çok küçük alanlara dahi kaplama uygulanabilmektedir ki bu kompozit malzeme çalışmalarında yüksek verim elde edilmesine imkân tanımaktadır (Sert ve diğ., 2002).

Kompozit malzeme geliştirme çalışmalarında malzeme seçimi kadar malzemelerin bir arada tutulması için tercih edilen reçine veya kaynak yöntemi de ürün özelliklerini büyük ölçüde etkilemesi nedeniyle önem arz etmektedir. Çünkü darbe anında malzemelerin birbirinden ayrılmaması, atomlar arası bağlar düzeyinde bütünlüşmeleri gerekmektedir. Elyaf ve seramik yerine iki çelik malzemenin birleştirilmesi söz konusu olunca ilk akla gelen geleneksel kaynak yöntemleri olmaktadır ancak bu kaynak uygulaması sonrası malzeme yapısında boşluk, yüzey kalitesinde azalma, parça ömrünün kısılması gibi hususların oluşu farklı birleştirme yöntemlerinin araştırılmasında ana gerekçeler olmuştur. Bu noktada gündeme gelen lazer kaynak çeşitleri: Katı Hal, Gaz, Diyot Lazerleri ve Sıvı Lazerler olmaktadır. **Lazer kaynak** yöntemlerindeki gibi malzemelerin birleştirilmesinin yanı sıra, malzemelerin birbiri yüzeyine tutturulması söz konusu olduğunda ise **lazer kaplama** yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle metallerin birbiri yüzeyine tutturulması ihtiyacına cevap veren yöntemler arasında karşılaşılan **lazer kaplama yöntemi**; malzemelerin dayanımını artırmanın yanında korozyondan koruma, yıpranmaya karşı önlem alma ve yüzey tamiri gibi konularda bilhassa sıklıkla tercih edilmektedir (Tarım, 2018). Bu nedenle; ısı dayanımının yüksek olması beklenen uçak motoru

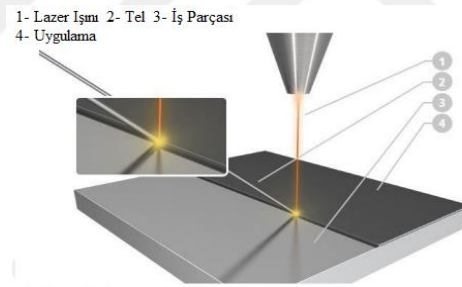
yanma odaları, içten yanmalı motor parçaları, uçak, helikopter dış yüzeyinin aşınma direnci, türbin kanatçıkları ve bu tez çalışmasına konu olan zırh çeliklerinin balistik kabiliyetinin iyileştirilmesi konularında lazer kaplama yöntemleri hem askeri hem sivil konularda tercih edilmektedir. Mevcut yöntemlerin verimliliğini artırma ve böylece ömrünü uzatma gayesi doğrultusunda geliştirilen lazer kaplama yöntemi, odaklanmış lazer ışını ile yüzey üzerine işlenmesi istenen ergitilmiş tozun bir robot kol aracılığıyla püskürtülmesi suretiyle gerçekleştirilmektedir. Lazer kaplama ile uygulanan kaynak işleminde lazer ışın iletimi ve kaynak nüfuziyeti önem verilen iki husustur. Burada işlenen malzeme ile çok düşük seviyede eriyik oluşması nedeniyle iki malzeme arasında çok güçlü bağ kurulabilmekte, mekanik dayanımı azaltan çarpılmalar ve çatlaklar çok az olmakta ve kaplama kalınlığı çok hassas boyutlarda kontrol edilebilmektedir. Diğer taraftan; bir ısı kaynağı görevi gören lazerin, sahip olduğu yoğunluk nedeniyle toz ile taban malzemesi arasında bir süreliğine 2500 °F'ın üzerinde sıcaklık görülmektedir. Metalleri bir arada tutabilmek için yüksek ısı girdisine ve dolayısıyla ilave yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulan geleneksel yöntemlerde zaman kaybı ve ek maliyet parametreleri gündeme gelmektedir. Lazer kaplama yönteminde ise taban malzemenin çok az ergimesi ve kaplamanın bütününde önemli boyutta bir değişim meydana gelmemesi sürecin olumlu sonuçlarıdır. Lazer kaplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15: Lazer Kaplama Yönteminin Şematik Gösterimi.

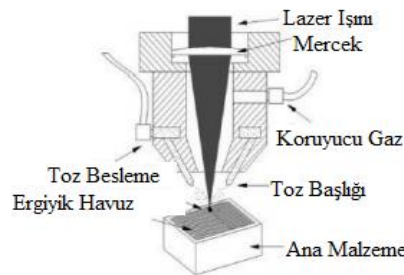
Literatürde lazer giydirme, dolgu, kaplama olarak da geçen bu kaplama yöntemi, en genel anlamda metal esaslı numunelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek ve böylelikle malzemenin yorulma, yüksek sıcaklığa direnç, aşınma ve erozyon dayanımlarını artırma gibi alanlara hizmet etmektedir. Bununla birlikte; lazer kaplamanın malzeme üzerinde hassas boyutlarda çalışma özelliği, metallere ve kompozitlere toz veya tel ile uygulanabilirliği, yüksek kaynak hızı, kaplamanın mikro yapısındaki boşluk

miktarının düşük elde edilmesi ve bilgisayar bağlantılı robot kol aracılığıyla bu işlemi gerçekleştirme imkânı sunması geleneksel yöntemlere kıyasla en önemli özellikleridir. Ek olarak, taban malzeme ile kaplama tabakası arasında gözlenen kuvvetli yapışma, termal tahrif ile çatlama gibi sorunların az görülmesi sayesinde ön plana çıkmaktadır. Lazer kaplama yöntemine ait etkinliğin ölçümünde tel-toz malzeme seçimi ile taban malzeme uyumu, malzemeye göre değişkenlik gösteren; işlem hızı, lazer gücü, beslenme oranı, lazer ışın geometrisi büyük rol oynamaktadır. **Tel beslemeli** lazer dolgu yönteminde, kaynak yapılacak malzeme üzerine işlenmesi istenen tel kaynatılmaktadır. Lazer ışını, dolgu teli ve kaplamada kullanılacak ergitilmiş tozun bir arada yüzeyde biriktirilmesi, bu yöntemin temel prensibidir. **Toz beslemeli kaplamada** ise tercih edilen metal tozu kaplama işlemine tabii tutulacak malzeme yüzeyinde biriktirilir. Her iki yöntemde de iş parçasının çarpılmaya uğramadan kaplama işlemine tabi olması, kaplamada boşluk ve çatlak oluşumunun asgari ölçüde önüne geçilmesine ve böylece daha mukavim bir yapı elde edilmesine imkân tanımaktadır. Tel beslemeli lazer kaynak yöntemi Şekil 3.16’da ve toz besleme sistemi Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.16: Tel Beslemeli Lazer Dolgu Yönteminde Kaynak İşleminin Şekilsel Gösterimi.

Uzun ve diğerlerinin çalışmasından (2012) uyarlanmıştır.



Şekil 3.17: Toz Beslemeli Lazer Kaynağı ile Uygulanan Dolgunun Şematik Gösterimi.

Uzun ve diğerlerinin çalışmasından (2012) uyarlanmıştır.

Temelde üç tip toz grubu mevcuttur: **Demir** ağırlıklı alaşım, **Kobalt** ağırlıklı alaşım ve **Nikel** ağırlıklı alaşım. Üç ana grubun sahip olduğu özellikler çerçevesinde farklı elementlerin bir araya getirilmesiyle sınırsız sayıda toz seçeneği üretilebilmektedir ve piyasada çok çeşitli tel ve toz formunda metal kompozit esaslı ve metalik malzeme bulunabilmektedir. Malzemelere uygulanan bir diğer lazer yöntemi ise lazer sertleştirme'dir: Bu yöntem ile daha mukavim bir yüzeye sahip olması istenen parça ergime sıcaklığının altında saniyede 1000 °K artış ile ısıtılır. İstenen sıcaklığa ulaşıldığında lazer, sabit hızla ilerlemeye başlar. Bu esnada sıcaklığın sabit tutulması esastır ve sistem tarafından sürekli takip edilmektedir. Robot kolun malzeme üzerinde ilerliyor oluşu ısıtılan bölgede işlem doğrultusu boyunca homojen ısı dağılımı sağlamaktadır. Lazer ışını kesildiği anda ise, sıcaklık kaynaklı kafes yapıları değişen atomlardan parçanın henüz soğuk kalmış iç kısımlarına doğru ısı transferi söz konusu olmaktadır ve bu nedenle aniden soğuma gözlenmektedir. Bu soğuma malzeme kafes yapısının ilk haline dönmesi de engellenmektedir ve böylece malzeme yüzeyinde yüksek sertlik değerine ulaşılmış olur. Burada, istenen sertlik düzeyi elde edilirken, homojen ısı dağılımı sonucu oluşan küçük taneli içyapı sayesinde malzemenin gevreklik problemi ortadan kaldırılmış olur. İşlem esnasında meydana gelen yüksek hızlardaki ısı girdisinin malzeme genelinde şekil bozukluğu görülmesi ihtimalini en alt düzeylere çektiğini belirtmekte de fayda vardır.

3.7. Balistik Standartlar ve Deneyler

Balistik zırh testlerinde kabul gören çeşitli standartlar mevcuttur. Bunlardan bazıları: Amerikan Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ), Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (North Atlantic Treaty Organization: NATO), NATO üyesi ülkelerin askeri alandaki standartlarını belirleyen bildirim (Standardization Agreement: STANAG) ve Türk Standartları Enstitüsü (TSE). Tablo 3.3'te balistik koruyuculara yönelik ulusal ve uluslararası standartlardan bazıları verilmiştir.

Tablo 3.3: Balistik Koruyucu Standartları.

Standart No	Standart Adı
TS 11164	Balistik Koruyucu Vücut Zırhı
TS 13349	Askeri Zırhlar- V50 Balistik Hız Deneyi
MIL- STD- 622 F	Zırhlar için V50 Balistik Testi
MIL-P-46199	Alüminyum Oksit Seramik Levhaların Zırhlarda Kullanımı
MIL-P-46199-A	Kırılma Davranışı Sergileyen Vücut Zırhları için Gerekli Önlemler
MIL-A-46103 C	Seramik Kaplı Hafif Zırh Prosedürü
MIL-A-46103 A	Koruyucu Zırh Prosedürü
NIJ- STD- 101.06	Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Dayanımları
NIJ- STD- 108.04	Koruyucu Malzemelerin Balistik Dayanımı
STANAG 2920	Kişisel Zırhlar için Balistik Test Metotları
PPAA STD-1989-05	Kişisel Koruyucu Zırh Birliği, Kişisel Vücut Zırhlarının Balistik Dayanım Test Standartları
DIN EN ISO 14876-2	Koruyucu Giysi- Vücut Zırhı: Bölüm 2: Mermi Dayanımı Gereksinimleri ve Test Metotları
UL 752	Balistik Dayanım Sergileyen Malzemeler

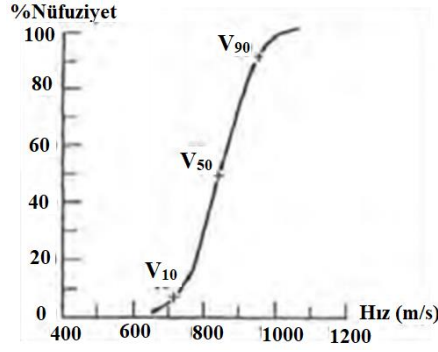
Geliştirilen malzemelerin; hangi mermi tipi ile test edileceği, kaç metreden atış yapılması gerektiği, kaç adet mermi ile bu testlerin tekrar edileceği, mermi hızı, balistik yelekler için kabul edilebilir en yüksek çöküntü miktarı gibi çok detaylı kısıtlamalar mevcuttur. Standartların çerçevesini, deney şartları ve kullanılacak malzeme özellikleri oluşturmaktadır. Tablo 3.3'teki standartlardan bir tanesi olan NIJ balistik koruma standardına ait detay bilgi Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: NIJ- STD- 101.06 Balistik Koruma Seviyeleri.

Seviye	Silah- Mermi Tipi	Çekirdek Ağırlığı (g)	Mermi Hızı (m/s)
I	Tüfek, 22 kalibre, yuvarlak başlık	2,60	329
IIA	9 mm, metal kaplama, yuvarlak başlık	8,00	341
II	9 mm, tüm metal kaplama, yuvarlak başlık	8,00	367
IIIA	9 mm, tüm metal kaplama	8,20	436
III	7,62 mm NATO tüm metal kaplama	9,60	838
IV	30 kalibre M2 zırh delici	10,8	869

Geliştirilen bir kompozit malzeme, askeri ve sivil alanlarda kullanıma sunulmadan önce tabi tutulması gereken testlerin belirlenmesi ve malzemeden beklenen özellikler çerçevesinde ilgili standart seviyesinin gerekliliklerini karşılayıp karşılamadığının araştırılması önem arz etmektedir. Balistik özelliklerin belirlenmesinde: Balistik Sınırın Belirlenmesi ve V50 hızı gibi çok sayıda yöntem mevcuttur. **Balistik Sınırın Belirlenmesi** yöntemine genellikle, geliştirilen malzemenin numune sayısında bir kısıt olmadığına başvurulmaktadır. Bu yöntemde malzemeye artan mermi hızlarında ve gerekli olursa farklı mermi özelliklerinde atışlar yapılarak durdurulabilen en büyük hız tespit edilmektedir. MIL-STD-662F standardına göre zırh çeliklerinin balistik hızı belirlenmektedir. Testler gerçekleştirilirken merminin numuneye dik olarak çarpması gerekmektedir. Böylece en yüksek darbe kuvvetine karşı malzeme dayanım miktarı elde edilebilir. **V₅₀ hızı** numunenin, %50 olasılıkla delinmeyeceği mermi hızını vermektedir. Teorik olarak bu hızdan daha yüksek hızlarda atılan mermilerin durdurulma ihtimali düşmektedir. Dolayısıyla merminin malzemeyi delme olasılığı artmaktadır. Ters yönden bakılacak olursa da, bu hız değerinden düşük hızlarda numunenin mermiyi durdurabilme ihtimali artmaktadır ve merminin numune içerisine girme, numuneyi delme ihtimali düşmektedir. Bir malzemenin V₅₀ hızının tespitinde deneye tabi tutulan malzemeye en az dört atış yapılması gerekmektedir. Değerlendirmeye alınan dört atış içerisinde ikisinin levhayı tamamen delmesi diğer ikisinin ise levhadan sekmesi veya biraz nüfuziyet göstermiş olması beklenmektedir. Bunun yanı sıra, levhayı tamamen delmeyi başaran mermi hızı ile

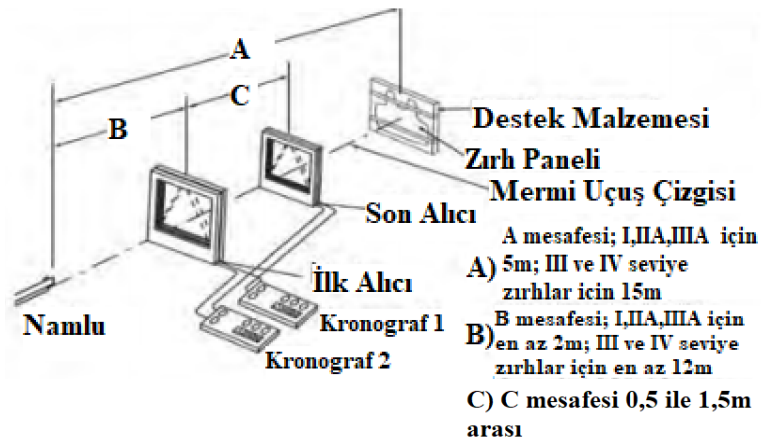
levhadan seken en düşük mermi hızı farkının en fazla 18,29 m/s olma şartı aranmaktadır. Testin sonunda ise değerlendirmeye alınan dört atışın ortalaması zırh levhasının V_{50} balistik hızı olarak belirlenmektedir. Şekil 3.18’de V_{50} hız gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.18: V50 Hızı ile Nüfuziyet Yüzdesi İlişkisi.

Bozdoğan ve diğerlerinin çalışmasından (2015) uyarlanmıştır.

Zırh amaçlı üretilen malzemelerin ulusal ve uluslararası standartlara uyumu ise balistik test laboratuvarlarında kontrol edilmektedir. Balistik test tünellerinin içerisinde yer alan sistemin şematik gösterimi Şekil 3.19’da verilmiştir. Balistik tünellerde yapılan deneyler ile hava durumu ve benzeri koşullardan etkilenen ortamlarda yapılan atış testleri arasındaki farklılıkların göz önünde bulundurulması faydalı olacaktır.



Şekil 3.19: NIJ-STD 010.04 Balistik Test Düzeneği.

Bozdoğan ve diğerlerinin çalışmasından (2015) uyarlanmıştır.

3.8. Akma Dayanımı

Akma dayanımı; akma mukavemeti veya akma gerilmesi olarak da isimlendirilmektedir. Malzemelere uygulanan çekme deneyinde, esnekliğin kalmadığı ve malzemenin plastik şekil değiştirmeye başladığı nokta malzeme akma noktası olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerin yorulma ve sürünme gibi mekanik özelliklerinden hareketle malzeme akma noktası ve bazen bu noktadan daha önce gözlemlenen kopma olayı tespit edilmektedir. Bu nedenle, akma dayanımı mühendislik tasarımları için çok önemli bir kıstastır.

3.9. Balistik Hesaplamalar

Mermi geometrisinin küt, yarım daire ve benzeri yapılarda olmasına bağlı olarak malzemelerin mermi enerjisini emebilme kabiliyetini ortaya koyan ve balistik performans tespitinde kullanılan formüller Gwaltney, Ern ve Jones tarafından geliştirilmiştir. Diğer taraftan, balistik hesaplamalar yapılırken, geliştirilen yazılım programlarının kullanılması; emek ve zaman tasarrufu ile doğru sonuçlar elde edilmesi açısından tercih sebebi olmaktadır. Çalışmalarda kullanılan yazılımlara; AKÇAY İç ve Dış Balistik Yazılımları ile PRODAS örnek olarak verilebilir.

Balistik dayanıma etki eden faktörlerin çok yönlü analizi için geliştirilen balistik hesaplama yöntemleri Penetrasyon Derinliği Test Yöntemleri kapsamında iki sınıfa ayrılmaktadır (Uslu, 2007):

- 1- Mermi, hedef malzemeye yönlendirilir (Normal Balistik Uygulamalar).
- 2- Hedef, mermi ya da yeterince kalın çubuğa yönlendirilir (Ters Balistik Uygulamalar).

Balistik Performasyon İndeksi (BPI) hesabında; mermi çarpma hızı, malzemelerin mekanik özellikleri ve malzeme tarafından emilen **enerji miktarı** gibi değişkenler göz önünde bulundurulmaktadır. Böylece; hedef, mermi geometrisinin ve mermi çarpma açısı, hızının, bir arada malzeme balistik performansına etkisi belirlenebilmektedir.

3.9.1. Balistik Performasyon İndeksi

BPI'nın önemli bir girdisi olan hız değişkenini ve dolayısıyla merminin malzemeye temas anında sahip olduğu kinetik enerjiyi belirlemede üç husus dikkate alınmaktadır:

- 1- Malzemenin Elastik Deformasyon Miktarı
- 2- Malzemenin Plastik Deformasyon Miktarı
- 3- Hedef Malzemeye Aktarılan Kinetik Enerji Miktarı

Yukarıda verilen üç başlığın bir arada gösterdiği davranış sonrası alansal yoğunluk başına emilen enerji miktarı Denklem 3.1’de yer alan formül aracılığıyla hesaplanabilmektedir:

$$\frac{\psi}{\rho d} = \pi t 2 v r 4 \left[\frac{\alpha_1}{2(1+k_b)^2} + \alpha_{II} \frac{(1+k_e)2k_v^2}{2k_j^2} + \frac{1}{k_j} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right) + \frac{1}{2k_p^2} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

v_r : Malzeme yapısı ve kalınlığından bağımsız hesaplanan ortalama mermi ilerleme hızıdır ve k değişkenlerine ait formüller hesaplanmadan önce belirlenmektedir:

$$V_r = \frac{V_0}{1.85} \quad (3.1a)$$

α : Mermi yarıçap büyüklüğünü (darbeden en çok etkilenen sınırlı alanı) ve malzemede gözlemlenen plastik şekil değişim bölgesini içermektedir. Bu formülden hareketle darbeden etkilenen tüm alanı görmek ve yorumlamak mümkün olmaktadır. Denklem 3.1’de verilen ve birimsiz olan k değişkenleri; yoğunluk (ρ), Elastisite Modülü (E), akma mukavemeti (σ_y), çekme mukavemeti (σ_T), Poisson Oranı (ν), kesit daralması/ fraksiyonel uzama (ϵ_r), çarpma hızı (v_0) değişkenlerine bağlı olarak farklılaşan formüller ile hesaplanmaktadır (Denklem 3.1b).

$$\begin{aligned} k_v &= \sqrt{\frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \\ k_e &= \frac{v_r}{k_v} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \\ k_j &= \frac{\rho v_r^2}{\sigma_y} \\ k_b &= V_r \sqrt{\frac{\rho}{K}} \text{ ve } K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ k_p &= V_r \sqrt{\frac{\rho}{E_p}} \text{ ve } E_p = \frac{\sigma_T(1+\epsilon_r) - \sigma_y}{\epsilon_r} \\ \alpha_1 &= 1 - \alpha_{II} = 1 - \sqrt{\frac{V_1}{V_0}} \text{ ve } v_1 = \frac{-k_v \sqrt{\rho E} + \sqrt{k_v^2 E \rho + 10.4 \rho \sigma_y}}{2\rho} \end{aligned} \quad (3.1b)$$

Bu hesaplamalardan hareketle bulunan BPI formülü Denklem 3.2’de verilmektedir:

$$\Phi = \left[\frac{\alpha_1}{2(1+k_b)^2} + \alpha_{II} \frac{(1+k_e)2k_v^2}{2k_j^2} + \frac{1}{k_j} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right) + \frac{1}{2k_p^2} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

3.9.2. Balistik Limit

Balistik limit hız değerinden hareketle hedef malzeme tarafından emilen enerji miktarının tespitine yönelik formüller literatürde yer almaktadır (Bozdoğan ve diğ., 2015). Zırh malzemesi tarafından sönmölen enerji miktarı (E), mermi kütlesi (m), mermi çarpma hızı (V_i), merminin zırhı terk ettiğı andaki hız (V_r) ve merminin aktardığı darbe kuvvetinin malzeme içerisinde yayılma hızı (V) olmak üzere, Şekil 3.20’de verilen kabuller çerçevesinde belirlenen balistik limit hızların üzerindeki ve altındaki hızlar için sönmölen enerji miktarı ve formülleri aşağıda verilmektedir.

Balistik limitin üzerindeki hızlarda sönmölen enerji miktarı:

$$E = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_r^2) \quad (3.3)$$

Balistik limitin altındaki hızlarda sönmölen enerji miktarı:

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (3.4)$$

Bu formüller yardımıyla ulaşılan bilgilerden hareketle malzeme mukavemetini artırma amacı doğrultusunda kompozit malzeme geliştirme çalışmalarına önemli girdiler sağlanabileceğı aşikârdır.

3.9.3. Kritik Aç

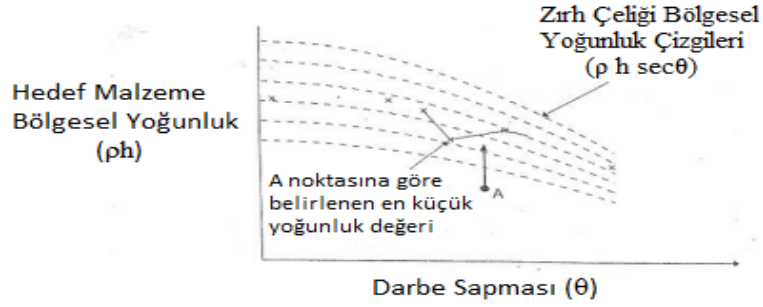
Bu yöntemde öncelikle, merminin sahip olduğu ilk hıza bağılı olarak istatistik grafikleri, standart eğrileri, hazırlanmaktadır. Sonrasında bu eğrileri aşabilecek yeterli yüzeysel zırh yoğunluğu tayini aşağıdaki formöl ile yapılmaktadır (Uslu, 2007). Mermiyi durdurabilecek zırh yoğunluğu formölü Denklem 3.5’te verilmiştir.

$$\text{Zırh Yoğunluğu} = \rho h \sec \theta_{50} \quad (3.5)$$

Kompozit malzeme geliştirme çalışmalarında, birden fazla zırh malzemesi kullanıldığı durumlarda, zırh yoğunluğu formölü her bir malzeme için ayrı ayrı hesaplanıp toplanmaktadır.

Farklı zırhlara ait çeşitli özelliklerin zırh yoğunluğu çerçevesinde kıyaslanmasını sağlayan bu yöntem ile herhangi bir A noktasına ait eğim ile atış yapıldığında zırhın bu mermiyi durdurabilmesi için sahip olması gereken yoğunluk değeri tayini yapılmaktadır: Öncelikle, hedef malzeme alansal yoğunluk ile darbe sapmalarına karşılık gelen yollar çizilir. Ardından, atış yapılan noktaya ait eğim grafik üzerinde

işaretlenir ve daha önce çizilen yolları kesen en yakın paralel nokta, yoğunluk değeri, tespit edilir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20: Hedef Malzeme Yoğunluk Değerinin Mermi Çarpma Açısına Göre Değişimi

Uslu'nun çalışmasından (2007) uyarlanmıştır.

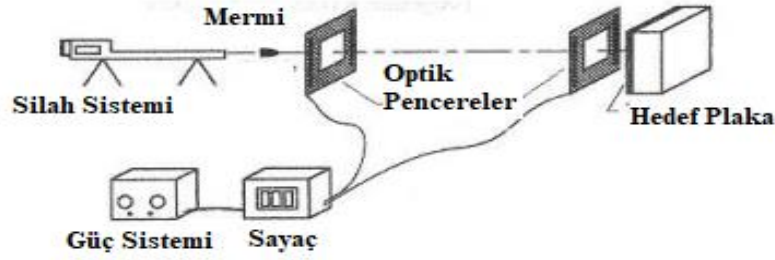
Şüphesiz bu yöntemin de balistik limit hız formüllerinden hareketle ulaşılan değerler gibi malzeme geliştirme çalışmalarına yön vereceği değerlendirilmektedir.

3.9.4. Ters Balistik

Bu yöntem, araştırmaya konu olan malzemeye uygun bir sistem aracılığıyla hız kazandırmak suretiyle malzemenin mermi ya da yeterince kalın bir çubuğa yönlendirilmesi işlemidir. Burada kullanılan çubuklar genellikle Tungsten alaşımlı malzemelerden yapılmaktadır. Normal balistik yöntemlere kıyasla daha az maliyetle gerçekleştirilebilen ters balistik yöntemleri, yavaşlatılmış kamera çekimleri ile incelenebilmektedir. Bununla birlikte, hedef malzemede yüksek balistik tahrip görüleceği unutulmamalıdır.

3.9.5. Terminal Balistik

Terminal balistik hesaplamalarında kullanılan test düzeneği Şekil 3.21'de verilmiştir. Hesaplamalara girdi sağlayan, mermi başlangıç hızı iki optik pencere aracılığıyla ölçülmektedir: Mermi birinci optik pencereyi geçtiği anda çalışmaya başlayan ve ikinci optik pencereyi geçtiği anda duran bir sayaç sisteme dâhil edilerek iki optik pencere arasında merminin geçirdiği süre tayini yapılmaktadır. Sonrasında, optik pencereler arasındaki uzaklığın bu süreye bölünmesi ile mermi hızı belirlenmektedir.



Şekil 3.21: Terminal Balistik Test Düzenegi.

3.10. Malzeme Deney ve Test Yöntemleri

3.10.1. Mikro Yapı İncelemeleri

Malzemelerin fiziksel özellikleri kadar kimyasal karakterleri de mühendislik çalışmaları için önem arz etmektedir. Özellikle hasar tespit ve kalite kontrol faaliyetleri öncesi malzeme içyapı analizi ile önemli bilgiler elde edilmektedir. Bu başlık altında, mikro yapı incelemelerine dair genel bilgi oluşturulması hedeflenmiştir. “**Metalografik Muayene**” kavramı malzeme içyapısını incelemesi nedeniyle “**Mikro yapı İncelemeleri**” kavramıyla eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Yapılan içyapı incelemelerinin 10x ve daha büyük büyütme değerlerinde yapılması halinde bu incelemelere mikroskopi denilmektedir. Mikroskobik incelemeler, 2000x ve altındaki büyütme değerlerinde optik mikroskoplarla gerçekleştirilmekteyken daha yüksek yakınlaşma değerlerindeki görüntüler için elektron mikroskopları kullanılmaktadır. Optik metal mikroskoplarında ise incelenen malzemeler yüzey hazırlama sürecinden geçirilmektedir. Bu süreç özetle; numune alma, bakalite alma (kalıplama), zımparalama ile aşağıda detaylandırılan parlatma, dağlama ve inceleme aşamalarından oluşmaktadır:

- 1- **Parlatma:** Işığın iyi yansıtılmasını sağlayacak bir malzeme yüzeyi elde etme hedefi doğrultusunda yüzey pürüzlülüğünü azaltacak ince aşındırıcıların kullanıldığı bir mekanik aşındırma işlemidir. Numune yapısındaki metal olmayan kalıntıların ve kusurların gözlenmesine imkân tanımaktadır.
- 2- **Dağlama:** İncelenen metalin mikro yapısını, kimyasal enerji verilmek suretiyle, mikroskopta görünür kılmak işlemidir. İşlemin amacı, malzeme içyapısını meydana getiren tane sınırlarının ve fazların farklı oranlarda

aşınmasını sağlayarak numunenin mikro yapısını ortaya çıkarmaktadır. Farklı oranlardaki aşınmalar numune yapısındaki çeşitli serbest enerji düzeylerine bağlı olarak elde edilmektedir. Enerji düzeyi düşük olan bölgeler az aşınma veya hiç aşınmama gösterirken enerji düzeyi yüksek olan bölgeler çok aşınmaktadır. Tüm malzemelerde en yüksek serbest enerji değeri daima tane sınırlarında gözlenmektedir. Bu nedenle tek fazlı malzemelerde tane sınırları kolaylıkla gözlenebilirken çok fazlı malzemelerde yüksek enerjili faza sahip malzemelerin de aşındığı görüntüler elde edilecektir.

3- Optik Metal Mikroskobu: İncelenen malzeme yüzeyinden yansıyan ışınlar ile malzeme içyapısına yönelik yorum yapabilme imkânı tanıyan cihazdır. Akü, aydınlatma sistemi ve objektiften oluşmaktadır.

Bu üç ana aşama tanımı ile malzemenin geçmişte gördüğü işlemler tespit edilebilmektedir. Bununla birlikte, malzemenin sahip olduğu özellikler ve bu özelliklerin nasıl değiştirilebileceği konusunda da fikir edinmek isteyen araştırmacılar mikro yapı incelemelerine başvurmaktadır. Mikro yapı incelemelerinde temel teşkil eden bu üç adımdan önce uygulanan numune kesme ve bakalite alma işlemlerini de anlatmakta fayda vardır: Mikro yapı incelemeleri kapsamında yukarıda anlatılan üç aşamada yer alan işlemlere geçmeden önce son olarak numuneye kalıplama işlemi uygulanmaktadır. Kalıplama aşamasında bakalite alma veya poliestere alma gibi yöntemler sık kullanılmaktadır. Burada yapılan temelde, küçük boyutlara sahip numunelerin mikroskop üzerine yerleştirilebilmesini teminen uygun boyutlara getirilmesi, polyester veya bakalite içerisine yerleştirilmesi işlemidir. Bakalite alma işlemi sonrasında zımparalama işlemi uygulanmaktadır. Yüzeyin uygun forma getirilmesine imkân tanıyan zımparaların adlandırılması, üzerinde yer alan aşındırıcıların birim alana düşen miktarına göre yapılmaktadır. Örneğin, 1200 adet aşındırıcıya sahip olan zımpara “1200 numara zımpara” olarak tanımlanır ve 80 numara zımparaya kıyasla 1200 numara zımpara daha çok aşındırıcı incedir, hassastır. Zımparalama işlemi sırasında en çok aşındırıcıya sahip zımpara en son kullanılmaktadır. Burada amaç, bir önceki zımpara izinin ortadan kaldırmak için daha hassas zımpara kullanılmasından ibarettir. İşlem sırasında zımpara değiştikçe, yüzey çizgilerinin daha etkin bir şekilde giderilmesi amacıyla, numuneler 90° çevrilmektedir. Son zımparalama işleminde numune yüzeyinde oluşan pürüzler ise parlatma işlemi ile giderilmektedir. Parlatma işlemi sonrasında gerçekleştirilen dağlama işleminde, incelenen metalin mikro yapısının mikroskop altında görünür

kılınması için, malzeme özelliğine bağlı olarak alkol, saf su, asit veya gliserin ile numune yüzeyi dağlanmaktadır. Bu işlemten sonra, numune yüzeyi kontrollü bir şekilde kurutulmalıdır. Mikroskop incelemelerinde malzemenin mikro yapı özellikleri tespit edilemediğinde numune tekrar dağlama işlemine tabi tutulur. Metal mikroskop incelemelerinde; numune tane sınırları, kalıntı ve çatlaklar, fazların özellikleri gibi çeşitli veriler elde edilmektedir. Stereo mikroskop ile yapılan incelemelerde ise numunenin bir bölgesi veya tamamı incelenerek imalat kaynaklı meydana gelen değişimler (yönlenmeler, ısı tesiri bölgeleri gibi), bir takım makro hatalar (boşluk, gözenek gibi) tespit edilmektedir.

Mikro yapı incelemelerinde kullanılan, lazer enerjisine maruz kalan malzemelerde gözlemlenen mekanik, mikro boyuttaki değişikliklerin teorik olarak hesaplanması için geliştirilen ve sürekli ya da kesikli lazer uygulama moduna bağlı olarak değişen yoğunluk formülleri mevcuttur (Telasang ve diğ., 2014).

$$\text{Sürekli Lazer Enerji Yoğunluğu } \left(\frac{J}{mm^2} \right) = \frac{\text{Lazer Gücü}}{\text{Işın çapı (mm)} \times \text{Hız } \left(\frac{mm}{s} \right)} \quad (3.8)$$

$$\text{Kesikli Lazer Enerji Yoğunluğu } \left(\frac{J}{mm^2} \right) = \frac{\text{En Büyük Lazer Güç Değeri (W)} \times \text{Lazer Çalışma Süresi (ms)} \times \text{Frekans (Hz)}}{\text{Işın çapı (mm)} \times \text{Hız } \left(\frac{mm}{s} \right)} \quad (3.9)$$

$$\text{Toz Yoğunluğu } \left(\frac{g}{mm^2} \right) = \frac{\text{Toz Besleme Hızı } \left(\frac{g}{min} \right)}{\text{Işın çapı (mm)} \times \text{Hız } \left(\frac{mm}{s} \right)} \quad (3.10)$$

3.10.2. Sertlik Deneyi Testi

Sertlik deneyi numunede, diğer test yöntemlerine kıyasla, daha az tahribata olanak tanımaktadır. Sertlik ölçüm sonuçlarının izafî olduğu, mutlak sonuçları vermediği unutulmamalıdır. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde tercih edilen deney olmasında az tahribat özelliğinin yanında, kolay uygulanabilir olması ve diğer mekanik özellikleri ile doğru orantıya sahip olmasının önemi büyüktür. Örneğin malzemenin yüksek sertliğe sahip olduğu tespit edildiğinde çekme mukavemetinin de yüksek olacağı yorumu yapılabilir. Sertlik ölçümü ile malzemenin aşınmaya, çizilmeye, delinmeye ve kesilmeye karşı gösterdiği direnç tespit edilmektedir ki bu durum, malzemenin plastik deformasyona karşı sergilediği direncin de bir ölçüsüdür. Bununla birlikte, malzemenin kökeni ve işlenebilirliği konularında da sertlik deneyi

yol gösterici olmaktadır. Genel kabul görmüş hali ile malzeme sertliği, işlenebilirlik ve kırılganlık özellikleri ile ters bağıntıya sahiptir. Buradan hareketle, sert malzemelerin basınç etkisi altında kırılabileceği yorumu yapılabilir. Temelde, konik veya küresel yapıya sahip bir ucun numuneye batırılmasıyla numunenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir. Çalışmaya dahil edilen **sertlik ucu**; uygulanan sertlik yöntemine göre değişen, yük altındayken malzeme üzerinde iz bırakan ve sertlik değerini ölçmeye yarayan araçtır. Bu iz büyüklüğü, belirli bir süre ve belirli bir yük altında malzeme yüzeyine uygulanan piramit şeklindeki dalıcı uç aracılığıyla oluşmaktadır. Uç, malzeme cinsine göre uygun olarak seçildiği takdirde, malzeme sertlik değerinin, bu iz büyüklüğüyle ters orantılı olması beklenir. Malzeme sertlik değerleri ölçümünde kullanılan yöntemler üç gruba ayrılabilir:

- 1- İncelenen numune yüzeyinin sert bir cisim aracılığı ile çizilmesi suretiyle yapılan deneyler.
- 2- İncelenen numune yüzeyine sert bir cismin batırılması suretiyle yapılan deneyler.
- 3- İncelenen numune yüzeyine sert bir bilyeyi sektirmek suretiyle yapılan deneyler.

İkinci başlıkta belirtilen deneyler: Statik ve dinamik yük altında yapılan deneylerdir. Statik yük altında yapılan sertlik deneyleri birbiri arasında ölçüm dönüşümleri yapılabilen: Rockwell, Brinell, Vickers ve Mikro Sertlik Yöntemi olarak sıralanabilir. Numune üzerinde belirli aralıkla birden fazla ölçüm yapılarak bunların ortalamasının alınması doğruluk açısından faydalı olacaktır. Ortalamayı büyük ölçüde etkileyen değerler hesaplara katılmayıp ayrıca belirtilmelidir. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi'nde numune yüzeyine tepe açısı 136^0 olan kare piramit tabana sahip uç belirli bir yük ile daldırılmaktadır. Yükün malzemeden uzaklaştırılması sonrası elde edilen izin köşegenleri ölçülerek yükün iz alanına bölünmesi ile sertlik değeri tayini yapılmaktadır. Dinamik yük kullanılarak uygulanan sertlik deneyleri ise Shore ve Poldi Çekici'dir.

3.10.3. Ağırlık Düşürme Testi

Herhangi bir sistem aracılığıyla cisimlere kazandırılan kinetik enerji, cismin üzerine uygulanan iş ile eşdeğerdir. Yapılan iş, cismin hareket etmesine sebebiyet verir. Fizik kanunlarına göre, kuvvet iş yaptıkça enerji elde edildiği bilinmektedir. Bu iş değeri,

kuvvet ve kuvvet ile aynı doğrultuda oluşan yer değiştirmenin çarpılması ile elde edilmektedir. Enerji, kuvvet- yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alan yapılan işi vermektedir. Bununla birlikte enerji, kuvvetin iş yapabilme kabiliyeti ile orantılıdır ve uygulanan F kuvveti cisimlere kinetik enerji olarak aktarılmaktadır. Ağırlık düşürme testi ile malzemelere uygulanan net iş incelenirken numunelerin kinetik enerji değişimi dikkate alınmaktadır. Öyle ki, hava sürtünmesi göz ardı edildiğinde, grafiklerin altında kalan alan, iş değeri, malzemenin ilk ve son enerji farkına eşittir. Bu değer ne kadar büyük olursa, malzeme dayanımının, enerji emebilme kabiliyetinin de o oranda büyük olacağı söylenebilir. Ağırlık düşürme sisteminin herhangi bir m kütlesi ile doğrusal artan V hızında hareket ettiği varsayımı ile malzeme üzerinde gözlenecek kinetik enerji yer değiştirme grafiğinin parabolik olacağı bilinmektedir. Bunun sebebi, hızın arttığı bir durumda kinetik enerjinin hızın karesi ile orantılı olarak artmasıdır. Malzeme üzerinde uygulanan kuvvetin sabit olup olmayışının tespiti ise grafik eğimlerinden hareketle yapılmaktadır. Kuvvet değişiminin sabit olmaması; enerji değişiminin de doğrusal olmayacağı, artan veya azalan parabollerin elde edileceği anlamına gelmektedir. Azalan parabollerde kuvvetin de azaldığı, artan parabol eğimlerinde ise kuvvetin de arttığı söylenebilir. Malzeme kesitinde, birim alana denk gelen ve dış kuvvetler ile nesnelerin kütle ve hız çarpımı sonucu elde edilen momentuma karşılık oluşan iç kuvvetlere gerilme denilmektedir. Malzemenin en yüksek dayanım değerinin, darbe anı başlangıcında ortaya çıkan bu gerilme değerinden aşağıda kaldığı durumlarda gevrek kırılma gözlenmektedir. Bununla birlikte, malzeme kırılma davranışlarının düşük sıcaklıklarda gevrek, yüksek sıcaklıklarda sünek olarak elde edilmesi beklenmektedir.

Vurucu kütlenin ucunda yer alan kuvvet sensörü aracılığıyla temas kuvveti $F(t)$ ölçülmektedir. Veri toplama sistemi; hız detektörü, darbe sinyali konumlandırma sistemi ve darbe kuvveti algılayıcısı bölümlerinden oluşmaktadır. Çıktı olarak, aşağıda yer alan formüller hesaplanarak ulaşılan hız-zaman, enerji-zaman, kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafiklerini sunmaktadır (Yağbasan, 2019).

Temas kuvveti $F(T)$ 'nin, vurucu kafanın ağırlığına, m , bölünmesi ile ivme $a(t)$ elde edilmektedir (Denklemler 3.8):

$$a(t) = \frac{F(t)}{m} \quad (3.8)$$

Hız detektörü tarafından belirlenen ilk hız değeri, V_i , ile integrali alınan ivmenin toplanmasıyla hız değerleri, $V(t)$, belirlenmektedir (Denklem 3.9):

$$V(t) = V_i + \int_0^t a(t) dt \quad (3.9)$$

Hız değerlerinin, $V(t)$, integrali alınarak yer değiştirme, $\partial(t)$, değeri bulunur (Denklem 3.10):

$$\partial(t) = \int_0^t V(t) dt \quad (3.10)$$

Kuvvet ile yer değiştirme ilişkisi $F(\partial)$ işleviyle bulunmaktadır. Bu işlevin integrali ile absorbe edilen enerji miktarı elde edilir (Denklem 3.11):

$$E_a = \int_0^{\partial t} F(\partial) d\partial \quad (3.11)$$

Elastik enerji değeri, $E_{elastik}$, numune kaynaklı açığa çıkmaktadır ve geri sekme esnasındaki ivme ile kuvvet-yer değiştirme değerlerine göre hesaplanmaktadır. Absorbe edilen, emilen, enerji değeri, E_a , elastik enerji ve darbe enerjisi, E_d , farkına eşittir (Denklem 3.12):

$$E_a = E_d - E_{elastik} \quad (3.12)$$

4. MALZEME VE METOT

Bu çalışma; üç farklı zırh çeliğine üç farklı toz malzemesinin lazer yöntemiyle kaplanması neticesinde elde edilen kompozit yapının mermi enerjisini sönümleme, delinme derinliğini azaltma gibi balistik kabiliyet iyileşmelerinin taban malzeme olan zırh çeliklerine kıyasla tespiti amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, güvenlik sektöründe tercih edilen 15 mm kalınlığındaki MIL 46100, WELDOX 700 ve HARDOX 500 zırh çelikleri 15x20 cm boyutlarında Kara Kuvvetleri Komutanlığı (KKK) 4. Ana Bakım Merkez Komutanlığı'nda kesilmiş olup 10x10 cm'lik orta bölgeleri; Wolfram Karbür ve takım çeliklerinden M2 ve H13 tozlarıyla 3 mm kalınlığında olacak şekilde, lazer yöntemi ile Kocaeli'de bulunan UniqueTech Firması'nda kaplanmıştır. Üç ayrı metal kaynaklı tabakaya sahip zırh çeliklerinin balistik performansı, atış ve ağırlık düşürme testlerine tabi tutularak SEM ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Atış testleri, Gazi Fişek Fabrikası atış poligonunda çıkış hızı aynı uç yapısı farklı olan 7,62 mm M80 kurşun ve M61 çelik zırh delici mermi çekirdekleri NATO standardında yer alan modüler keskin nişancı tüfeği kullanılarak 50 metreden taban ve kompozit malzemelere birer kere atış yapılmak suretiyle her fişek türünde 10 atış olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Atış testlerinde ana malzemeler 18 mm, kaplamalı malzemeler 15 mm ana malzeme 3 mm kaplama olacak şekilde çalışmaya dahil edilmiştir ve meydana gelen terminal balistik hasarları ve penetrasyon miktarları incelenmiştir. Metal kompozit malzemeye yönelik standart bulunmaması nedeniyle ağırlık düşürme cihazı kalibre edilerek numune bağlama donanımı eklenmiştir ve standart dışı bir uç kalibre edilerek parametreleri cihaza tanımlanmıştır. Gerçek ortama yakın sonuçlar elde etmek amacıyla mermi geometrisine sahip, yanal yüzeyleri kavisli uç kullanılarak düşük hızlardaki hasar altında tüm kompozit malzemelerin davranışı incelenmiştir. Çalışmada, 1 mm ana malzeme 2 mm kaplama olmak üzere toplam 3 mm kalınlığındaki yapılara 400 J darbe enerjisi, 2 mm ana malzeme ve 2 mm kaplama olmak üzere toplam 4 mm kalınlığındaki HRX-M2 kompozit malzemesine 400 J darbe enerjisi ve 2 mm HRX zırh çeliğine 200 J darbe enerjisi uygulanarak numunelerin enerji sönümleme

yeteneği grafik kıyaslamaları ile elde edilmiştir. Lazer kaplama yöntemiyle: M2 tozu işlenen HARDOX 500 ile sıcak iş takım çeliği H13 tozu işlenen MIL 46100 kompozit zırh çeliklerinde yakın dayanım değerlerine ulaşıldığı, H13 tozu işlenen HARDOX 500 ile WC işlenen MIL 46100 kompozit zırh çeliklerinde de benzer değerlerin elde edildiği hem laboratuvar hem de atış testi sonuçlarıyla tespit edilmiştir. Sıralanan yapılar başta olmak üzere geliştirilen kompozit zırh çeliklerinin kırılma enerjisi, yüksek ve düşük hızlardaki darbe dayanımı ve sertlik değerlerinin taban malzemelere kıyasla arttığı tespit edilmiştir.

4.1. Numunelerin Hazırlanması

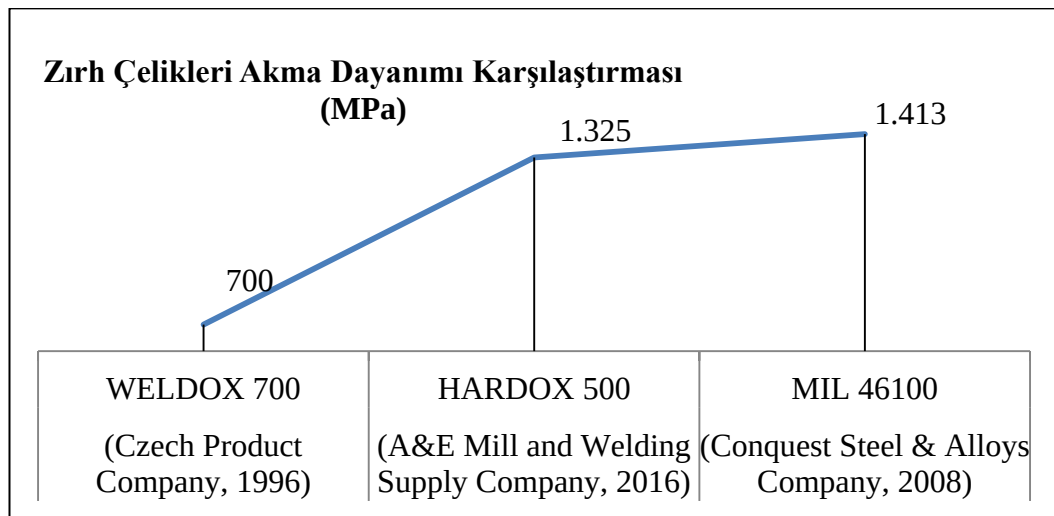
4.1.1 Zırh Çelikleri ve Kaplama Tozları

HARDOX 500 ve MIL 46100 tek parça olarak, WELDOX 700 zırh çeliği ise ikişerli plakalar halinde çalışmaya dâhil edilmiştir (Ek 1). WELDOX 700 zırh çeliği çok sert ve yüksek mukavemetli yapıya sahip yapı çeliğidir. Araçlarda, görece hafif olması nedeniyle güç kazanımı sağlamaktadır. Kolay kaynak edilebilirlik özelliğine sahiptir ve binalarda taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. HARDOX 500 zırh çeliği, yüksek seviyelerdeki aşınmalara dayanıklıdır. Sahip olduğu darbe tokluğu, iyi işlenebilir ve kolay bükülebilir ve kaynaklanabilirlik gibi nitelikler tercih edilmesine yol açmaktadır. MIL 46100 zırh çeliğinin 150 mm kalınlık değerine kadar, ticari amaçlar için üretildiği bilinmektedir. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri Tablo 4.1’de, akma dayanımlarının karşılaştımını içeren grafik şekil 4.1’de ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Zırh Çeliklerinin Mekanik Özellikleri.

Zırh Çeliklerinin Mekanik Kompozisyonu	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (En düşük %)	Sertlik (HB)	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
HARDOX 500 ^a A&E Mill ve Welding Supply Company, 2016. ^b Sergejev ve Petrov, 2012.	1580 ^b	10 ^b	450-540 ^a	8 ^b	210 ^b
WELDOX 700 ^a Czech Product Company, 1996. ^b MTL Company 2013. ^c Budiwantoro ve diğ. 2019 ^d Mansur, 2011.	780-930 ^a	14 ^a	240-310 ^b	7,850 ^c	210 ^d
MIL 46100 ^a Conquest Steel & Alloys Company, 2008. ^b Grujicic ve diğerleri, 2013.	1690 ^a	10 ^a	477-534 ^a	7,84 ^b	205-215 ^b

Elastisite modülü ile malzemenin elastik şekil değişimine karşı koyabileceği kuvvet değeri doğru orantıya sahiptir (“[Elastiklik Modülü](#)”, <https://www.metalurjik.com/tag/elastiklik-modulu-nedir> [Erişim tarihi: 02 Ağustos 2020].)



Şekil 4.1: Zırh Çelikleri Akma Dayanımı Karşılaştırması (MPa).

Tablo 4.2: Zırh Çeliklerinin Kimyasal Kompozisyonu (%'sel Ağırlık).

Zırh Çeliklerinin Kimyasal Kompozisyonu (%'sel Ağırlık)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B	Nb	Ti
HARDOX 500 (A&E Mill ve Welding Supply Company, 2016)	0,3	0,7	1,6	0,02	0,01	1,5	0	1,5	0,6	0,005	0	0
WELDOX 700 (Czech Product Company, 1996)	0,2	0,6	1,6	0,02	0,01	0,7	0,3	2,0	0,7	0,005	0,04	0,04
MIL 46100 (Astralloy Nucor Company 2018)	0,32	0,6	1,0	0,02	0,005	0,70	0	0,6	0,3	0	0	0

Kimyasal içerikleri verilen, ithal zırh çeliklerinin, belirli kalınlıklarına eşdeğer dayanımı sergileyen kompozit yapıların belirlenmesi tank zırhı, savaş uçağı balistik kalkan geliştirilmesi gibi sonraki aşama çalışmalarına da yol gösterici nitelikte olacaktır.

Demir ağırlıklı ve aşınmaya dayanıklı tozlar ile yapılan kaplamalarda yoğunluğu düşük, sertlik değeri yüksek ve işlenebilen malzemelerin elde edilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu nedenle çalışmaya dahil edilen tozlardan ikisi demir ağırlıklı bir tanesi ise seramik kaplama olarak seçilmiştir. Çalışmaya dahil edilen kaplama tozlarına ait kimyasal kompozisyonlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Tozların Yoğunluk, Sertlik Değerleri ile Kimyasal Kompozisyonu (%)

Tozların Kimyasal Kompozisyonu	Yoğunluk	Sertlik (HB)	C	Si	Cr	Mo	Mn	V	W
H13 ^a Sıcak İş Çeliği Katalog Bilgileri", 2020. ^b Zeyveli, 2010. ^c Sağlam Metal: 1.3343 (DMO5) HS6-5-2C Yüksek Hız Çeliği", 2020.	7.80 ^a g/cm ³	229 ^c	0,36 ^b	1,1 ^b	4,88 ^b	1,22 ^b	0,45 ^b	1,03 ^b	0 ^b
M2 ^a Sağlam Metal: 1.3343 (DMO5) HS6-5-2C Yüksek Hız Çeliği", 2020. ^b Chaus, 2014.	7,85 ^a g/cm ³	269 ^a	0,87 ^b	0,26 ^b	3,99 ^b	5.34 ^b	0,29 ^b	1,84 ^b	5,39 ^b
WC ^a "Wikipedia: Tungsten Karbür", 2020. ^b Khmyrov ve diğ. 2017. ^c Coşkun ve Talaş, 2019.	15.63 ^a g/cm ³	755 ^c	6,1 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	93,9 ^b

Çalışma kapsamında uygulanan lazer kaplama işlemi Uniquetech Firması'nda gerçekleştirilmiştir. Tercih edilen tozların lazer kaplamada yüksek sertliğe sebebiyet vermesi ve aşınma kabiliyetlerinin diğer tozlara göre yüksek olması tercih sebepleri arasındadır. Örneğin: H13 tozunun kesme, aşınma ve termal dayanım özellikleri diğer tozlara kıyasla iyidir. M2 tozu yüksek hız çeliği, soğuk iş çeliği olarak piyasada yer almaktadır. C toz çeşidi yüksek sertlik, sıcaklık dayanımı, yüksek aşınma, şekil verme ve delme gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Çayan, 2013).

4.1.2 Lazer Kaplama Uygulaması

Lazer kaplama uygulaması için, 4,4 kilovat (kW) güce ve fiber lazer kaplama uygulayabilen altı eksene sahip KR120 Kuka marka robot kullanılmıştır. Bu yöntemde; lazer güç, hız ve toz besleme oranı ile sistemin sahip olduğu basınç değerlerine dair parametrelerin değiştirilmesi ile farklı malzeme dayanım özelliklerinin elde edileceği unutulmamalıdır. Kaplama sonrası elde edilen tüm kompozit zırh çeliklerine ait fotoğraflar Ek 2'de yer almaktadır. Tablo 4.14'te lazer kaplama uygulamasında kullanılan koruyucu ve taşıyıcı gaz elementine ait

değişkenler verilmiştir: Robot kolun sahip olduğu diğer parametreler Tablo 4.4'te özetlenmiştir.

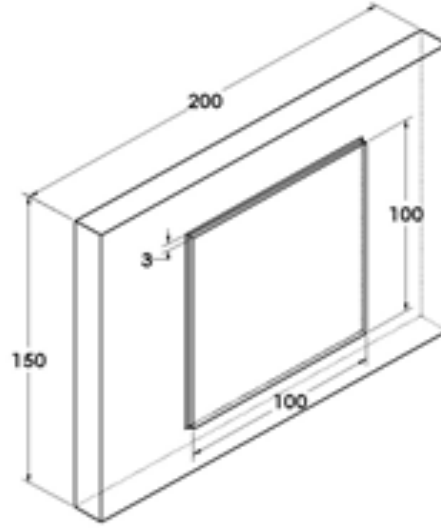
Tablo 4.4: Lazer Kaplama İşlemini Parametreleri

Koruyucu ve Taşıyıcı Gaz Elementi	Argon
Basınç (Koruyucu ve Taşıyıcı Gaz için)	3,0 bar
İlerleme Hızı	8,0 1/ dk
Akış Hızı	4,0 1/ dk
Lazer Tipi	LDF 4000-100
Lazer Gücü	4400 W
Lazer Dalga boyu	980-1920 +- 10 nm
Yedek Lazer Dalga boyu	650 nm
En yüksek Güç Tüketim Değeri	10,3 KW
Şebeke Gerilimi	380- 480 V

Lazer kaplama tabakası, taban malzeme ile sıkı tutunma kabiliyeti açısından bilinen en sağlam kaplama türüdür. Toz metalürjisi yardımı ile robot kontrollü olarak homojen bir şekilde gerçekleştirilen kaplama işleminde kaynakta görülen boşluk ve iç yapı kusurları gibi olumsuz durumlar gözlenmemektedir “Lazer Dolgu”, <http://uniquetech.com.tr/laser-dolgu/> [Erişim tarihi: 02 Ağustos 2020].

TOPLAS 3D NC Programı'na girilen kaplama uygulanacak alan ve kalınlık bilgileri, Tablo 4.15'te yer alan parametreler ile birlikte sisteme tanımlanmıştır. Robot kolun başlangıç noktasına yönlendirilmesi ile lazer kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Lazer kaplama uygulaması sonrası elde edilen kompozit yapıların boyutları mm cinsinden Şekil 4.2'de verilmiştir. Ek 3'te lazer kaplama işlemi esnasında çekilen fotoğraflar yer almaktadır.

Lazer kaplama işlemi öncesinde yüzey pürüzlüğünü gidermek amaçlı olmasa da kaplama yapılacak bölge el taşlamasıyla standart temizleme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.2: Atış Testi Kompozit Yapı Boyut Bilgisi.

WC, H13 ve M2 alaşım olmak üzere üç ayrı toz her metalde ikişer parçaya 10x10 cm boyutunda 3 mm kaplanmıştır. Kaplama kalınlıkları her bir kompozit yapı üzerinde 3 ayrı noktadan komparatörle 1/100 mm hassasiyetli ölçülmüştür. Bu doğrultuda ortalama kalınlık değerleri HRX: 2,885 mikron, WLX: 2,733 mikron, MIL: 2,525 mikron olarak elde edilmiştir. Her üç zırh çeliğine ait ortalama kalınlık değeri ise 2,714 mikron hesaplanmıştır. Böylece her bir metal üzerinde üç ayrı kaplama ile taban malzeme hazırlanarak atış ve laboratuvar testlerine (ağırlık düşürme, mikro yapı özelliklerinin incelenmesi; SEM ve sertlik ölçümleri) zemin hazırlanmıştır.

Lazer spotu 5 mm'lik çap şeklindedir. Dikiş yolları aralıkları 2 mm'dir. Kaplama uygulamasında tek dikiş şeklinde 2 mm genişlik 0.7 mm yükseklik elde edilebilmektedir. Lazer kaplama uygulaması 8-20 mm/s aralığında değişebilmektedir. Ortalama olarak 12 mm/s olarak gerçekleşmektedir. Bu çalışmada, 100x100 mm'lik alana uygulanan 3 kat kaplama yaklaşık 30 dakikada tamamlanmıştır. Kaplama hızı kullanılan tozun özelliğine göre değişmektedir. Hızı etkileyen diğer değişkenler: Malzeme ön sıcaklığı, hacmi ve form yüzeyidir. Genellikle küçük ve ısınma işlemi tabi tutulabilecek parçalarda süre hızlandırılabilir. Ön ısıtma yapılan sert malzemelerde ise hızlı soğuma gerçekleşmemesi, malzemelerin mekanik özelliklerinde değişikliğe neden olmamak için hız düşürülmektedir.

4.1.3 Lazer Kesim ve Tel Erozyon

Lazer kesim yöntemine yönelik parametreler deneme yanılma yolu ile tespit edilmektedir. Bu çalışmada yeterli numune sayısının olmaması, malzeme içeriğinin literatürde ve işlemi uygulayan fabrikada daha önce çalışılmamış olması sebebiyle kaplamalı bölgelerin mikro yapı incelemelerine tabi tutulacak boyutlara getirilme işlemi tel erozyon yöntemi ile yapılmıştır. Tel erozyon işlemi uygulayan cihaza ait fotoğraf Ek 4'te verilmiştir. Bu yöntem ile tüm zırh çelikleri altı eşit parçaya ayrılmıştır.

Lazer kesim yöntemi için gerekli parametrelerin belirlenmesinin ardından zaman tasarrufu sağlanması amacıyla iki ayrı kesim yöntemi de çalışmaya dâhil edilmiştir. Zırh çelikleri lazer kesim tezgâhının içerisine yerleştirilerek programa girilen referans noktası ile kesim işlemi başlatılmıştır. Bu yöntem ile laboratuvar testleri için taban malzeme ve kaplamalı bölgelerden alınan silindirik örnekler elde edilmiştir. Ek 5'te lazer kesim cihazının iç ve dış fotoğrafı yer almaktadır.

4.2. Mikro Yapı İncelemeleri

Numunelerin mikro yapı incelemelerine uygun boyutlara getirilmesi amacıyla tel erozyon yöntemiyle elde edilen silindirik parçalar Ek 6'da gösterildiği gibi ikişerli parçalara ayrılarak gruplandırılmıştır. Akabinde, PENTA 5000 model cihaz ile sırasıyla: 240, 360, 800 ve 1200 adet aşındırıcıya sahip zımparalar uygulanarak parlatma işlemine geçilmiştir. 1 ve 6 µm boyutlarındaki parlatma solüsyonlarının keçeyle emdirilmesi ve keçenin numune yüzeyine temas ettirilmesi suretiyle tamamlanan bu aşama sonrasında son olarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiş olup incelenen metalin mikro yapısının mikroskop altında görünür kılınması hedefi doğrultusunda, numune yüzeyine hidroflorik asit ve saf su karışımı uygulanmıştır. Dağlama işleminde kullanılan bu çözelti ve özellikleri ise Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: Çalışmada Kullanılan Dağlacıyı Özellikleri.

Dağlayıcı İçeriği	Dağlama Süresi
%5 Hidroflorik asit	15-30 sn.
%95 saf su	

Mikro yapı incelemelerinde 800x büyütme özelliğine sahip, Nikon ECLIPSE MA200 markalı optik mikroskop kullanılmıştır. Optik mikroskop incelemesi ile birlikte, malzemenin kesme ve kırılma yüzeyleri için xy eksenini boyunca 50x50 µm tarama alanına sahip ve çözünürlük değeri 0,02 nm olan JEOL JMC-6000 markalı SEM cihazı (Ek 7) kullanılmıştır.

4.3. Sertlik Deneyi Testi

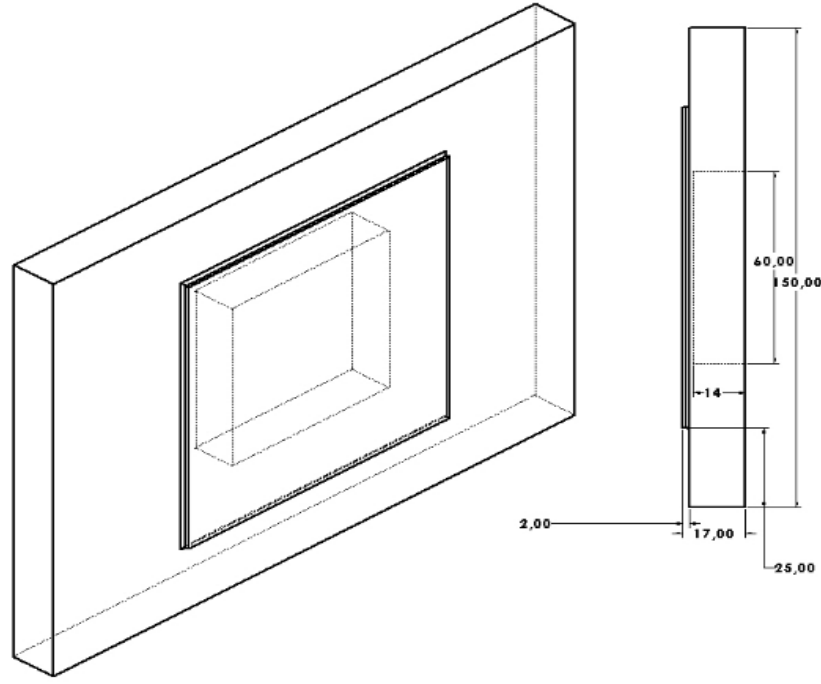
Çalışmada kullanılan malzemelerin çok sert parçalar olması nedeniyle, hassas tahribatlı deney yöntemlerinden mikro sertlik (mikro-batırma) metodu kullanılarak taban ve kaplamalı malzemelerin mukavemet değerleri elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında mikro-sertlik değerlerinin ölçümü Milli Savunma Üniversitesi (MSÜ) Kara Harp Okulu (KHO) Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında (MMBML) bulunan FutureTech marka FM 700 model mikro sertlik cihazında (Ek 8) gerçekleştirilmiştir. Kesitten; kaplama yüzeyi, geçiş bölgesi ve taban malzeme sertlik değerleri, 300 g yüke sahip konik uç ile 10 saniye uygulanarak piramit ucun bıraktığı izdeki iki köşegen uzunluğundan hareketle tayin edilmiştir. Sertlik deneyinin doğruluğunu artırmak amacıyla iz merkezi seçimi, numune kenarından ve bir önceki iz merkezinden uygun uzaklıkta olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında sonuçlar Vickers Sertlik Değerleri ($HV_{0.3}$) olarak elde edilmiştir.

4.4. Ağırlık Düşürme Testi

Malzemelerin, deformasyon hızına bağlı olarak farklı dayanım değerleri sergilediği bilinmektedir (Özlü, 2003). Atış testleri öncesinde (yüksek deformasyon hızı) ağırlık düşürme testi (düşük darbe hızı) gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.3'te bir örneği verilen boyutlandırma çerçevesinde 2 mm taban malzeme ile 2 mm kaplama malzemesinden oluşan HRX-M2 kompozit yapıya 400 J ve 1 mm taban malzeme ile 2 mm kaplama malzemesinden oluşan dokuz farklı kompozit yapıya 400 J darbe enerjisi uygulanmıştır.



Şekil 4.3: Ağırlık Düşürme Testinde Kullanılan Numunelere Ait Boyut Bilgisi.

Ağırlık düşürme testi, MSÜ MMBML’de Instron marka CEAST 9350 Droptower Impact System test cihazında (Ek 9) ve Şekil 4.4’te yer alan yanal yüzeyleri kavisli ve sivri uçlu geometriye sahip darbe ucu ile gerçekleştirilmiştir (Ek 10). Cihaz, uç uzunluğuna ve ağırlığına göre kalibre edilmiştir. Ucun uzunluğuna ve ağırlığına göre numunenin yerleştiği bölgede kullanılmak üzere KHO’da üretilen bir sabitleyici kullanılmıştır (Ek 11).



Şekil 4.4: Darbe Ucuna Ait Boyutlar.

Yağbasan’ın çalışmasından (2019) uyarlanmıştır.

Cihazın çalışma prensibi, serbest düşme yapan ağırlık aracılığıyla numunenin kırılmadan önce absorbe edebileceği en yüksek enerji miktarının tespiti üzerinedir.

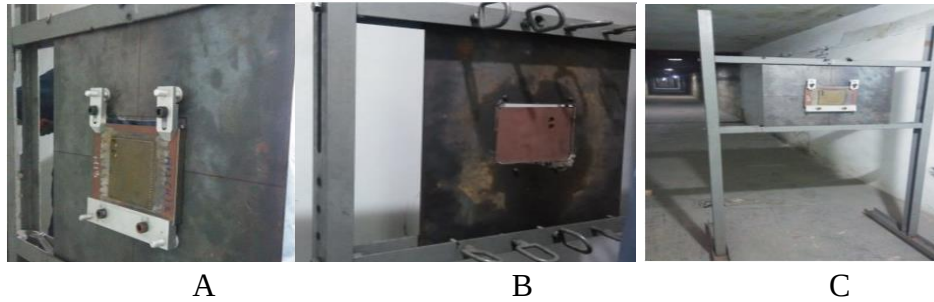
Düşürülen kütlenin, numune yüzeyine çarpmadan hemen önce sahip olduğu hız (vurucu hız) değeri, veri toplama programına girdi sağlayan sensörler tarafından ölçülmektedir. Bu sayede, malzemenin zorlanma altında kırılma davranışı göstermesi için gereken enerji değeri tayini ile malzemenin darbe direnci hakkında yorum yapılabilmektedir. Cihazın literatürde yer alan standartlar dâhilinde sahip olduğu özellikler Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6: Ağırlık Düşürme Cihazı Standartları.

Enerji Aralığı (J)	Darbe Hızı (m/s)	Ağırlık düşürme Yüksekliği (m)	Düşürülen Ağırlığın Büyüklüğü (kg)
0.59 - 1800	0.77 – 24.0	0.03 - 29.4	2.0 - 70.0
0.44 - 1330	2.53 – 78.7	1.18 - 1160	4.41 - 154

4.5. Atış Testi

Atış testlerinin gerçekleştirildiği Gazi Fişek Fabrikası’nda hâlihazırda, en küçük 50x50 cm’lik levhalara atış yapılmasına imkân tanıyan düzeneklerin olması ve bu çalışma kapsamında atış yapılması gereken levhaların 15x20 cm boyutlarında olması nedeniyle Şekil 4.5’te verilen 50x50 cm’lik bir levha orta bölgesinde 15x20 cm boyutlarında bir boşluk bırakılarak KHO’da üretilmiştir. Atış yapılacak levhanın sisteme, her atış sonrası el ile müdahale yapılarak, sabitlenmesi sağlanmış olup atışlar başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.



Şekil 4.5: A- Düzeneğe Sabitlenen Levha Ön Yüzü, B- Düzeneğe Sabitlenen Levha Arka Yüzü ve C- Atış Tüneli.

Atış testi öncesi, silah namlusu başlangıç noktası tayini amacıyla levha konum tespiti yapılmıştır. Atışlar 50 metreden gerçekleştirilmiş olup atış yapılan silah sistemi Ek 12’de yer alan NATO standartları çerçevesinde kurulmuştur ve güvenlik nedeniyle fotoğraflandırılmamıştır. Atış testi, NATO standartlarına sahip 7,62 mm merminin iki farklı çekirdeği M80 ve M61 ile gerçekleştirilmiştir. Gazi Fişek Fabrikası tarafından üretilen 7,62 x 51 mm M61 zırh delici fişegin teknik özelliklerini içeren detaylı tablo Ek 13’te ve M80 normal fişegin teknik özellikleri Ek 14’te verilmiştir. Çalışma kapsamında, malzemelere 12 adet M80, 12 adet M61 olmak üzere toplam 24 mermi atılmıştır. Farklı çekirdekler ile gerçekleştirilen atışlardan rastgele 10’ar tanesine ait Fişek Hız Basınç Test Raporu M80 için Ek 15’te, M61 için Ek 16’da verilmiştir. Fişek Hız Basınç Test Raporlarında iki fişek tipinde öne çıkan farklılıklar Tablo 4.7’de özetlenmiştir.

Tablo 4.7: 7,62 mm X 51 M61 ve M80 Fişek Karşılaştırması.

FİŞEK CİNSİ	M80	M61
Barut Ağırlığı (gr)	2,71	2,94
Mermi Ağırlığı (gr)	9,550	9,450
Kovan ağzı en yüksek - düşük basınç (bar)	3625 - 3296	4008-3793
Namlu en yüksek - en düşük basınç (bar)	768 - 742	746-732
Namluyu terk ettikten sonra 25 metrede sahip olduğu en yüksek ve en düşük hız (m/s)	842- 828	843,8-829,8
Hedefe en erken - geç ulaşma süresi (ms)	1,552- 1,776	1,280- 1,480

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Atış Testi Sonuçları

Çalışma kapsamında farklı barut ağırlıklarına sahip iki fişğin malzemeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Levhaların atış testi sonrası çekilen fotoğrafları Ek 17’de, atış testi sonrası kesitten alınan fotoğrafları Ek 18’de verilmiş, elde edilen sonuçlar Tablo 5.1’de sunulmuştur. Tabloda verilen penetrasyon derinliklerine ait sonuçlar kompratör ile ölçülmüştür.

Tablo 5.1: Atış Testi Sonuçları.

Malzeme	M61		M80	
	Deformasyon Tipi	Penetrasyon Derinliği	Deformasyon Tipi	Penetrasyon Derinliği
HRX	Delip Geçme (Perforasyon)	18 mm	Sekme	1 mm
HRX-A	Bölgesel Hasar	12 mm	Sekme	1 mm
HRX-B	Bölgesel Hasar	3 mm	Sekme	1 mm
HRX-C	Geniş Çaplı Kopma	12 mm	Geniş Çaplı Kopma	2 mm
MIL	Delip Geçme (Perforasyon)	12 mm	Hasar Görülmedi	2 mm
MIL-A	Bölgesel Hasar	11 mm	Sekme	1 mm
MIL-B	Bölgesel Hasar	10 mm	Sekme	1 mm
MIL-C	Kaplama Hasarı	12 mm	Kaplama Hasarı	4 mm
WLX	Delip Geçme (Perforasyon)	18 mm	Bombe Oluşumu	7 mm çukur + 3 mm bombe
WLX-A	Bölgesel Hasar	12 mm	Sekme	1 mm
WLX-B	Bölgesel Hasar	18 mm	Sekme, Geniş Çaplı Kopma	3 mm
WLX-C	Bölgesel Hasar	18 mm	Geri Sekme, Geniş Çaplı Kopma	4 mm

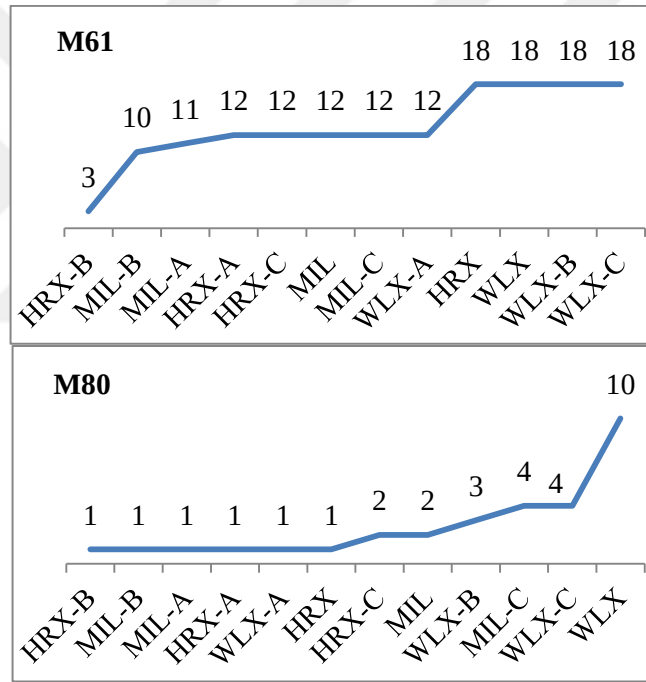
Sekme: Merminin malzeme üzerinde yüzeysel iz bırakarak geri sektiği durumlardır.

Bölgesel Hasar: Merminin malzemeye değdiği noktanın yakın çevresinde kaplamanın attığı durumlardır.

Kaplama Hasarı: Kaplamanın bütün olarak taban malzemeden ayrıldığı durumlardır.

Geniş Çaplı Kopma: Merminin malzemeye değdiği noktanın çevresinde geniş çaplı kaplamanın attığı durumlardır.

Tablo 5.1’de yer alan atış testi sonuçlarından hareketle hazırlanan malzemelerin delinme derinliği karşılaştırması M61 ve M80 için Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Penetrasyon Derinliği Karşılaştırması.

Atış testi sonuçlarına bağlı olarak yapılan yorumlar aşağıda sunulmaktadır:

WC seramik kaplamaya uygulanan atış testlerinde kaplamanın attığı, taban metal ile kaplama malzemesinin uyum sağlayamadığı görülmüştür.

M61 fişeginin barut ağırlığı 2,94 gr, kovan ağzı basınç değeri 3767 bar iken M80 fişeginin barut ağırlığı 2,71 gr, kovan ağzı basınç değeri 3380 bar'dır. 0,23 gr'lık barut ağırlığının fazladan 387 bar değerinde kovan ağzı basınç farkına neden olduğu

ve mermi delme gücünü artırdığı görülmüştür. M80 Kurşun çekirdek mermisinin M61 Bakır kaplanmış çelik çekirdek mermisine kıyasla yumuşak olmasından dolayı hem orjinal hem de kompozit malzemeleri delemeyi ancak, WLX zırh çeliğinin arka kısmında bombe oluşumuna sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. M80 mermisine karşı tüm malzemelerin başarılı sonuç verdiği ve bu nedenle bu fişğin ayırt edici bir özellik oluşturmadığı söylenebilir.

M61 mermisinin HRX, WLX, WLX-M2 ve WLX-WC metallerini deldiği, HRX-WC ve MIL çeliklerinde ise bombe oluşumuna sebebiyet verdiği görülmüştür. Taban malzemelerden MIL zırh çeliklerinin başarılı olduğu, kompozit malzemelerde ise HRX-M2 ve WLX-H13'nın başarılı olduğu, diğer yapılara kıyasla daha düşük delinme derinliğine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Atış testi sonrasında ulaşılan sonuçlardan hareketle kompozit zırh çeliklerinin zırh delici fişek cinsi kırılımında sergiledikleri dayanımlara yönelik aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

Ana malzeme M61 penetrasyon derinliği karşılaştırması: MIL = 12 mm, HRX ve WLX = 18 mm.

Ana malzeme M80 karşılaştırması: HRX = 1 mm, MIL = 2 mm, WLX = 7 mm çukur ve 3 mm bombe.

Kompozit zırh çeliklerinin kendi içinde M61 karşılaştırması:

HRX-M2 = 3 mm, HRX-H13 ve HRX-WC = 12 mm, HRX = 18 mm.

MIL-M2 = 10 mm, MIL-H13 = 11 mm, MIL ve MIL-WC = 12 mm.

WLX-H13 = 12 mm, WLX, WLX-M2 ve WLX-WC, = 18 mm.

Kompozit zırh çeliklerinin kendi içinde M80 karşılaştırması:

HRX, HRX-H13, HRX-M2 = 1 mm, HRX-WC = 2 mm.

MIL-H13 = 1 mm, MIL-M2 = 1 mm, MIL = 2 mm, MIL-WC = 4 mm.

WLX-H13 = 1 mm, WLX-M2 = 3 mm, WLX-WC = 4 mm, WLX = 7 mm çukur ve 3 mm bombe.

Delinmeyen zırh çeliklerinde mermi enerjisinin tamamının malzemede sönmüldüğü söylenebilir. Atış testi sonuçları incelendiğinde, taban malzeme olan zırh çeliğinin

delinip kompozit zırh çeliğinin delinmediği durumlar başarılı test olarak değerlendirilmiş olup her iki fişek türü de göz önünde bulundurularak yapılan kıyaslama sonucunda en iyi dayanımı sergileyen yapıların:

- H13 kaplamasının üç zırh çeliği türünde de zırh çeliği balistik özelliklerini iyileştirici etkiye sahip olduğu ancak gözle görülür iyileştirmeyi HRX ve WLX metallerinde gerçekleştirdiği (delinen taban malzemedeki delinmemesi ve bomba dahi oluşmaması durumları) görülmüştür.
- M2 kaplamasının HRX ve MIL zırh çeliklerinde balistik özellikleri iyileştirici rol üstlendiği görülmüştür. Şekil 5.2’de M61 fişeklerinin HRX taban malzemesini delmediği ancak M2 kaplı HRX çeliğini delmediği ve arka yüzde bomba dahi oluşturmadığı görülmüştür.

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
HRX-M2			

Şekil 5.2: M2 Tozu Kaplı HRX’e Ait Atış Testi Sonrası Fotoğraflar.

- WC kaplamasının penetrasyon derinliği konusunda üç zırh çeliği arasında en iyi sonucu MIL ile oluşturulan kompozit yapıda verdiği görülmüştür. Ancak kaplamanın bütün halinde atmış olması sebebiyle ortaya çıkabilecek sorunların

(etraftaki dost unsurlara zarar vermesi, mermi etkisinin yanında kaplama kaynaklı basıncın taban malzemeye aktarılması vb.) çözülmesi önem arz etmektedir.

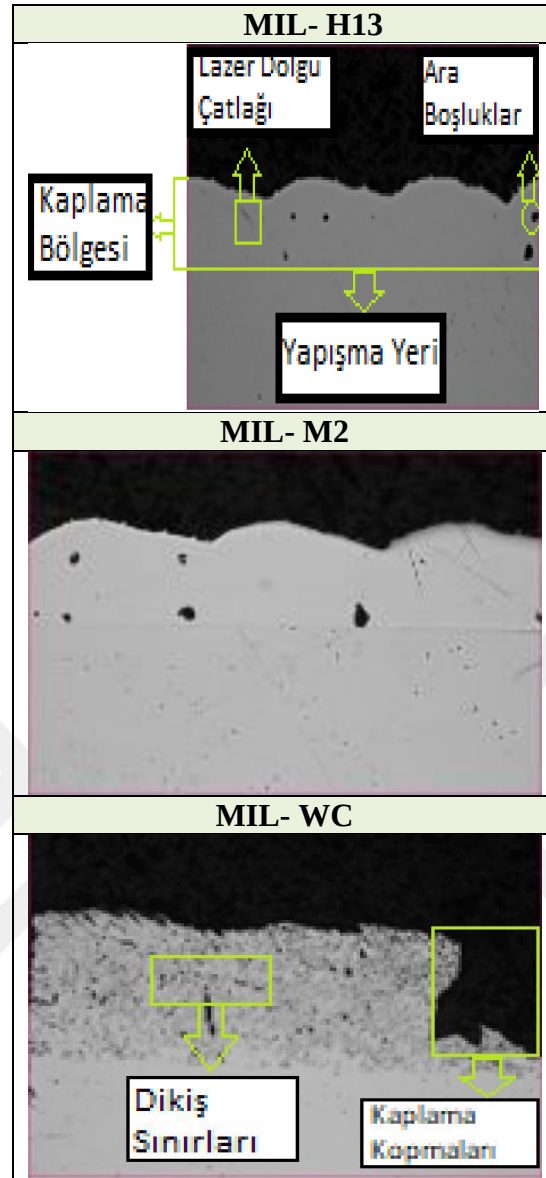
Atış testi sonuçlarından hareketle üstün performans gösteren malzemelerin: HRX-H13, M2; WLX-H13, MIL-M2, H13 tarafından sağlandığı görülmüştür. Bu noktada, EK-17’de yer alan, atış sonrası malzeme fotoğraflarından hareketle aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

HRX-M2 ve MIL-WC kompozit metallerin ön yüzlerinde ve kaplama bölgesinde kaplamanın geniş bölgede attığı, kalktığı, görülmüştür. Sırasıyla: WC ve H13 ve bu iki kaplamanın M2 kaplamasına, kıyasla daha sert olmaları nedeniyle kaplamanın yüksek hızlı darbe altında attığı yorumu yapılabilir. Bu durumda, alt malzemenin ve etraftaki canlı veya cansız yapıların zarar görebileceği gibi nedenlerle bu iki kompozit türü iyi sonuçlar arasında üçüncü sıraya alınmıştır.

HRX-H13 ve MIL-M2 kompozit zırh çelikleri WLX-H13 kompozit zırh çeliği ile kıyaslandığı, darbe tesiri altında kalan bölgelerinin çevresinde bölgesel olarak kaplamanın attığı gözlenerek HRX-M2 ve MIL-WC ile benzer sebeplerle iyi sonuçlar arasında ikinci sıraya alınmıştır.

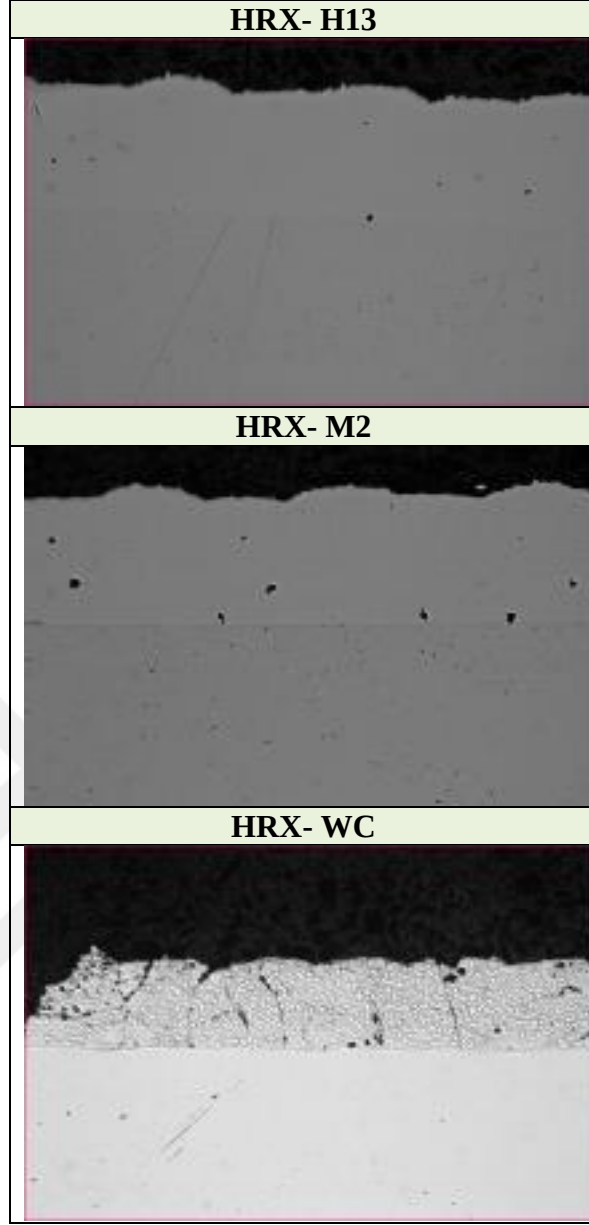
5.2. Mikro Yapı ve Sertlik Deneyi Sonuçları

Metalografik muayenelere tabi tutulan farklı kaplamaların görüntüleri Şekil 5.3, 5.4 ve 5.5’te verilmiştir. Malzemelerin net görüntülerini almak amacıyla farklı yaklaştırma ve aydınlatma koşulları çalışmaya dâhil edilmiştir.



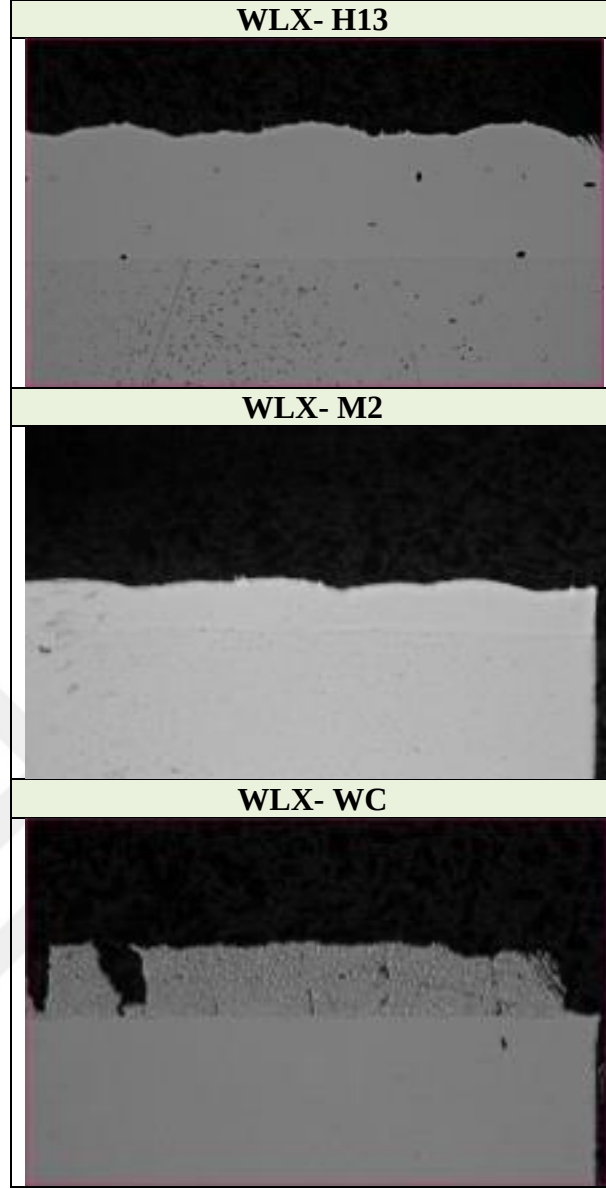
Şekil 5.3: MIL Zırh Çeliğine Lazer Kaplama ile Uygulanan Üç Farklı Kaplamaya ait Optik Mikroskop Görüntüleri.

Bölgesel ısınma sonucu kaplamalarda boşluklar gözlemlenmiştir. En düzensiz, çatlaklı ve boşluklu kaplama yapısının WC çeşidi ve MIL zırh çeliğinde olduğu ve bu hataların boşlukların sertlik deneyi tutarlılığını olumsuz yönde etkileyeceği değerlendirilmiştir. H13 kaplamasında fazların dağlama kaynaklı netleştiği ancak, boşluk hatalarının olduğu görülmüştür. MIL taban malzemesi ile WC kaplaması arasında alaşım olduğu, bu iki malzemenin yüksek ısıda birbiri içinde çözünebilir olduğu ve bu nedenle daha iyi bir kaplamanın elde edilebileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 5.4: HRX Zırh Çeliğine Lazer Kaplama ile Uygulanan Üç Farklı Kaplamaya ait Optik Mikroskop Görüntüleri.

HRX-WC kompozit çeliğinde Karbon 'un çökelti oluşturduğu ve çatlakların karbon kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir. WC kaplamasının; MIL ve HRX zırh çeliklerinde gözle görülür, WLX zırh çeliğinde ise diğer iki taban malzemeye göre daha az oranda çözünmediği belirlenmiştir. Boşluk sayısının büyükten küçüğe doğru sırasıyla: WC, M2, H13 kaplamalarında olduğu görülmüştür. WC kaplamasında, lazer kaplama yöntemi kaynaklı, ısıyı çabuk atması nedeniyle, ikinci dikiş atılırken kalan ara boşlukların, çizgisel boşlukların, olduğu görülmüştür.



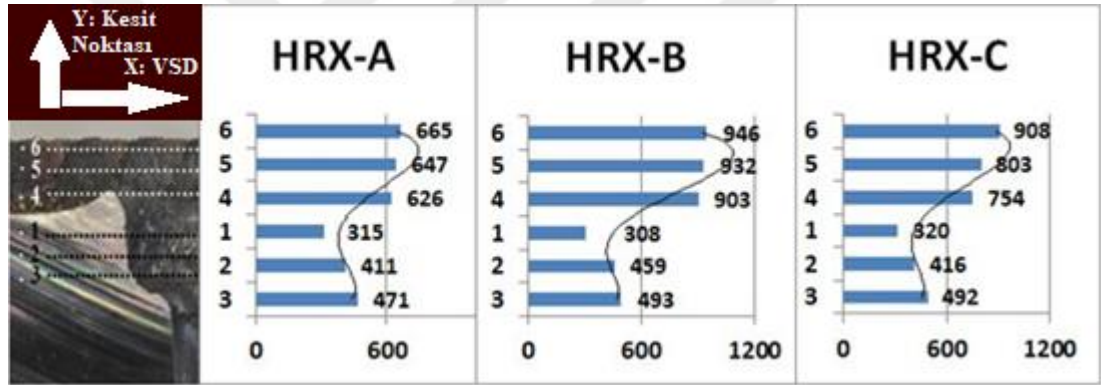
Şekil 5.5: WLX Zırh Çeliğine Lazer Kaplama ile Uygulanan Üç Farklı Kaplamaya ait Optik Mikroskop Görüntüleri.

Üç kaplama ve zırh çeliği türü arasında en düzenli yapıların WLX zırh çeliğinde elde edildiği tespit edilmiştir. Kaplama malzemelerinin her üç kaplamada da taban malzemeye difüze olmadığı, yapışma bölgesinin süreklilik arz etmediği görülmektedir. Sürekli bir çizgisellik mevcudiyetinin atış testinde kopmalara neden olduğu değerlendirilmiştir. Ara boşluklar nedeniyle mikrosertlik testinde kullanılan sertlik ucunun malzeme içerisinde rahat ve derin ilerlediği ve bu nedenle WC kaplamasının sertlik değerinin M2'den düşük olduğu değerlendirilmiştir.

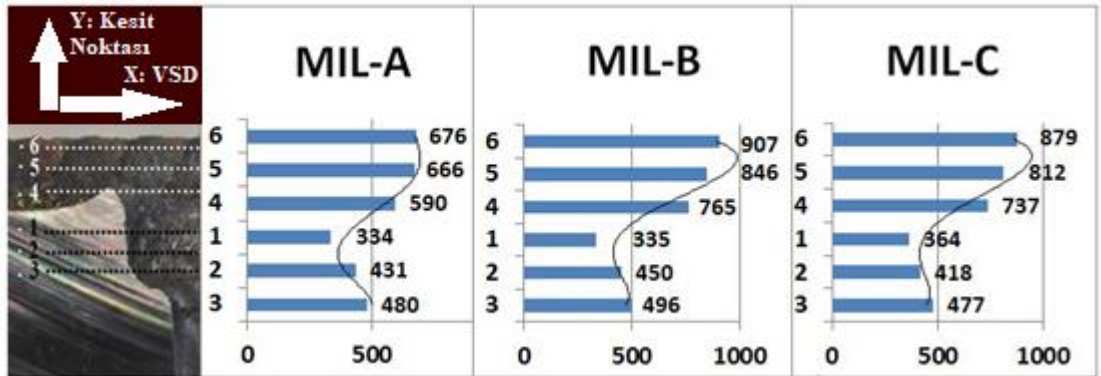
Kaplama, geçiş bölgesi ve taban malzeme sertlik değerleri 0,5 mm aralıklarla ölçölmüştür. 1., 2. ve 3. ölçömler taban malzeme üzerinden elde edilirken 4., 5. ve 6. ölçömler kaplama üzerinden alınmıştır.

Ana malzemeler ile kompozit zırh çeliklerine ait mikro sertlik değerleri, 3 kesit noktası taban malzeme üzerinde 3 kesit noktası ise kaplama üzerinde olmak üzere toplam 6 noktadan, Şekil 5.6’da Vickers Sertlik Değeri cinsinde, elde edilmiştir. Tüm kompozit yapılar incelendiğinde geçiş bölgelerinde hem taban malzeme hem de kaplamaya doğru sertlik değerlerinin arttığı, yapışma bölgesinde lazer kaplama kaynaklı oluşan ısı nedeniyle sertlik değerlerinde düşme olduğu görölmüştür. Aşağıdaki grafikte A: H13, B: M2, C:WC tozlarını temsil etmektedir.

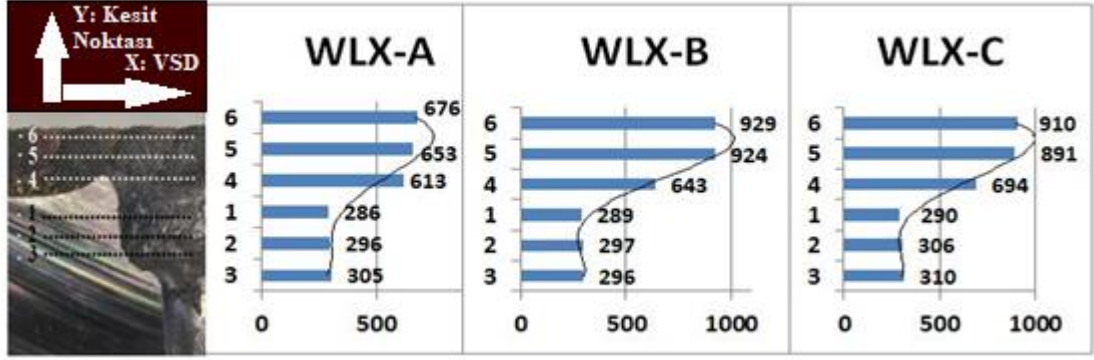
HRX= 485 HV_{0.3}



MIL=465 HV_{0.3}



$$WLX=410 \text{ HV}_{0.3}$$

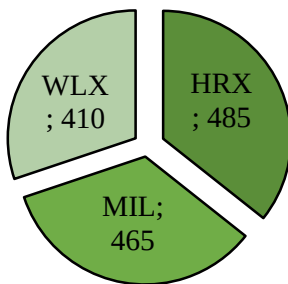


Şekil 5.6: HRX, MIL ve WLX Zırh Çelikleri ile Kompozit Yapılarının Sertlik Değerleri.

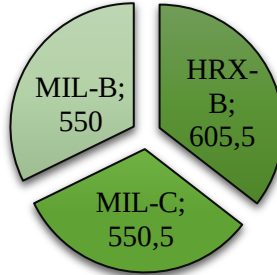
1 ve 4 numaralı kesit noktaları arasında kalan yapışma bölgelerinde lazer kaplama kaynaklı ortaya çıkan ısı nedeniyle 3 numaralı taban malzeme kesit noktasına kıyasla 1. ve 2. kesit noktalarında taban malzeme sertlik değerinin düşük olduğu görülmüştür (WLX-B'deki yakın değerlere sahip olan 2. ve 3. kesit noktası hariç). Bu durum, Telasang ve diğerlerinin 2014'te gerçekleştirdiği çalışmada belirttiği gibi lazer kaplama sonrası mikrosertlikte düşüş olduğu bilgisi ile uyum sağlamaktadır.

Şekil 5.6'dan hareketle hazırlanan taban malzemelerin, geçiş bölgesinin ve kaplamaların en yüksek mikrosertlik değerleri özeti Şekil 5.7'de verilmiştir.

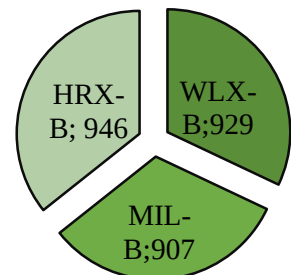
Ana Malzemelerin En Yüksek Mikrosertlik Değerleri



Geçiş Bölgesinin En Yüksek Mikrosertlik Değerleri



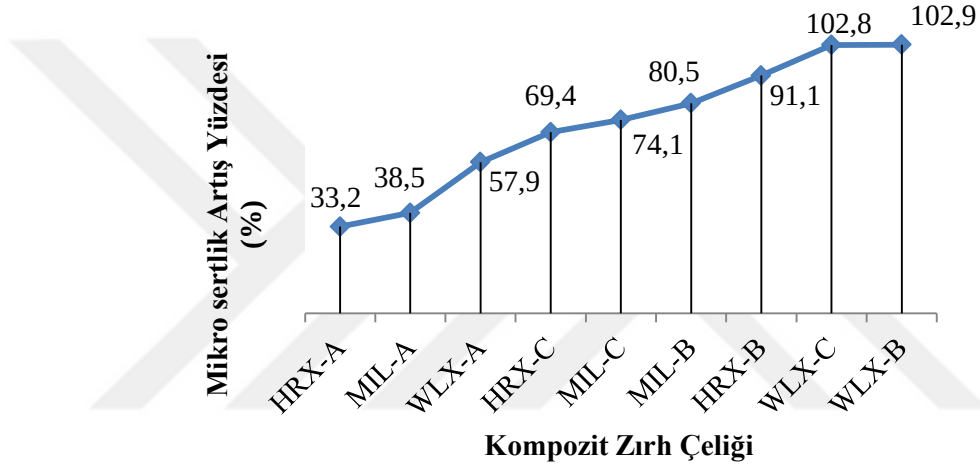
Kaplamaların En Yüksek Mikrosertlik Değeri



Şekil 5.7: Kompozit Zırh Çeliklerine ait Mikro Sertlik Değerlerinin Kıyaslanması.

Üç zırh çeliği türünün üç kaplama altında sahip olduğu mikro sertlik değerleri büyükten küçüğe M2, WC, H13 sıralamasında elde edilmiştir. Diğer taraftan, deney öncesinde, en yüksek sertlik değerinin WC kaplamasında olması öngörülmüştür. Ancak, lazer kaplama yöntemi nedeniyle ara boşlukların fazla oluşu, ikinci ve üçüncü sıra kaplama dikişlerinin kendi arasında yapışmaması ve taban malzeme ile kaplama malzemesinin yapışma kabiliyetinin düşük olması nedeniyle mikro sertlik değerinin düşük çıktığı değerlendirilmektedir.

Kaplama kaynaklı taban malzemelerin mikro sertlik artış yüzdeleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8: Taban Malzemelere Kıyasla Kompozit Metallerinde Elde Edilen Mikro Sertlik Artış Yüzdeleri.

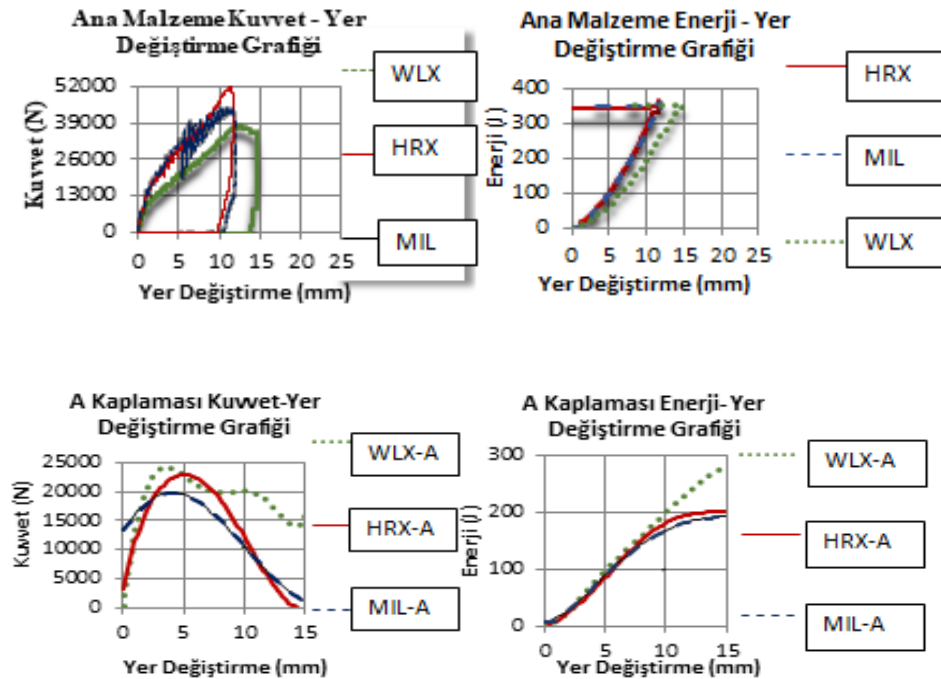
Zırh çeliklerinin mikro sertlik artış yüzdeleri büyükten küçüğe M2, WC, H13 kaplamalarında elde edilmiştir. M2 ve WC değerleri birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Özetle, taban malzemesinin sertlik değerini en yüksek oranda artıran kaplamanın, WLX- M2, sahip olduğu mikro sertlik değerinin tüm kompozit zırh çelikleri kıyaslandığında en iyi ikinci değer olduğu görülmüştür. Diğer bir deyişle, en yüksek artış yüzdesi en yüksek mikro sertlik değeri anlamına gelmemektedir. Kaplamaların taban malzeme mikro sertlik değerlerini artırma yüzdeleri ise ortalama: H13= %19, WC= %47, M2= %52 olarak elde edilmiştir. Bu çalışma koşulları altında, lazer kaplama uygulaması nedeniyle tozlara ait mikro sertlik değeri sıralamasının mekanik özellikleriyle doğru orantılı olmadığı görülmüştür.

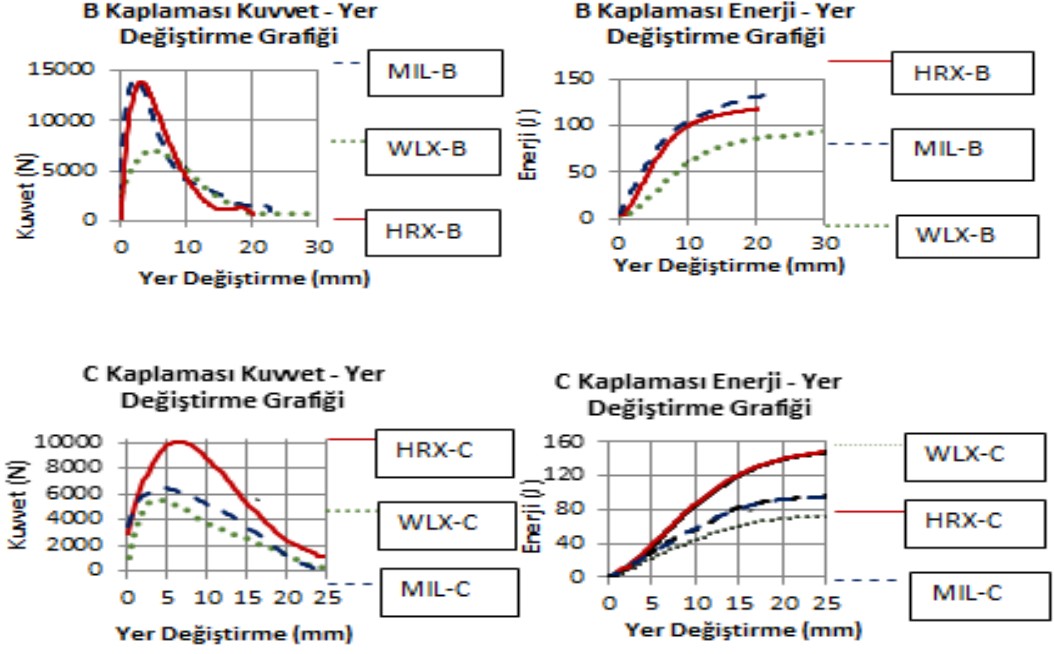
5.3. Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları

Malzemelerin kırılkan, sünek davranışlarının, geri dönüşü olmayan şekil bozukluklarının ve tokluk özelliklerinin bir göstergesi olan enerji değerleri, kuvvet ve konum bilgileri Şekil 5.6, 5.7’de verilmiştir: Tablo 5.5’te yansıtılan değerler 400 J 2 mm kaplama, 1 mm taban malzeme ve kaplamasız 3 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Ağırlık düşürme cihazından alınan verilerden hareketle oluşturulan grafiklerde malzeme davranışına ilişkin veriler özet halinde ve kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

Her bir malzeme çeşidine yönelik elde edilen enerji ve kuvvet yer değiştirme grafiklerinin düzgün veriler ve özet tablolar halinde sunulması amacıyla belirli noktalardaki verilerin ortalamasını alan farklı periyot değerlerinde ve polinom formlarında dağılımlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, malzemelerin sert yapısı ve vurucu başlığın sürtünmesinden kaynaklı oluşan titreşimlerden en az düzeyde etkilenilmesi için grafiklerde polinom değerler kullanılmıştır. Taban malzemelerden numuneler 3 mm kalınlığında, ana malzemeye kaplama uygulanan numuneler ise 1 mm taban malzeme ve 2 mm kaplama olmak üzere toplam 3 mm kalınlığında olacak şekilde 400 Joule darbe enerjisi altında davranışları incelenmiştir. Şekil 5.9’da A: H13, B: M2, C:WC tozlarını temsil etmektedir.





Şekil 5.9: Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları.

Ağırlık düşürme testi sonuçlarına yönelik çıkarımlar aşağıda sıralanmıştır.

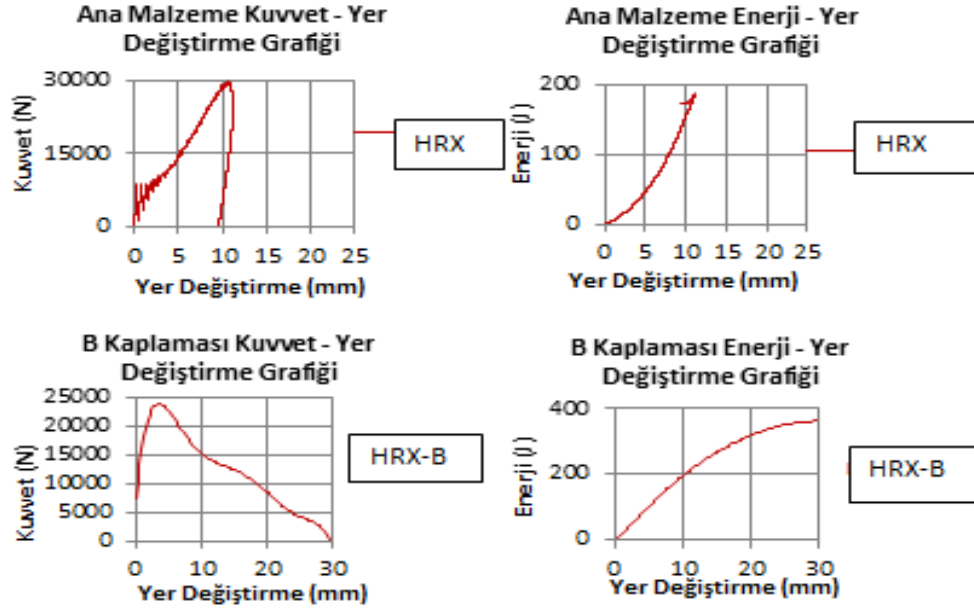
Ana malzeme enerji-yer değiştirme grafiği incelendiğinde 3 mm kalınlığındaki taban malzemede malzemenin esnememesinden dolayı penetrasyon olduğu ve 15 mm’de ise malzemenin esneyerek sönümlendiği enerji miktarının yaklaşık 350 J olduğu görülmüştür. Diğer zırh çeliklerinde de taban malzemelerin 1 mm olmasından dolayı taban malzemenin bu yükü taşıyamadığı ve mermi geometrisindeki uç altında delinmeye devam ettiği görülmüştür. Buradan hareketle, taban malzemesinin esneme özelliğine sahip olmasının ve kalınlığının artırılarak testlere tabi tutulmasının ve böylece amaca hizmet eden en iyi kalınlık değerinin belirlenmesinin başka çalışmalara yol açması beklenmektedir.

Çalışılan numuneler, NATO standardında yer alan keskin nişancı tüfeklerinde kullanılan M80 ve zırh delici mermi M61 fişeklerine karşı zırh görevi üstlenebilecektir. Taban malzemenin 1 mm alınması, ağırlık düşürmede 400J’de tüm numunelerin delinmesi ile sonuçlandığı görülmüştür (Ek 19). Şekil 5.5. ve 5.6 ağırlık düşürme testi verilerinden hareketle elde edilen kuvvet- yer değiştirme grafiğinde taban malzemeler 3 mm 400 J için HRX’in, MIL ve WLX zırh çeliklerine kıyasla kırılmadan, kopmadan, önce sahip olduğu darbe direncinin en yüksek olduğu görülmüştür. Kırılma, kopma, öncesi metallerin karşı koyabileceği ortalama kuvvet

değerleri: HRX: 52.000 N, MIL: 40.000 N, WLX: 39.000 N olarak elde edilmiştir. Grafik üzerinde okunan kuvvet değerinin sıfıra düşmemesinin sürtünme kaynaklı olduğu söylenebilir.

3 mm kalınlıkta olan tüm malzemeler kıyaslandığında 10 mm’de enerji sönümlemesi en yüksek olan kaplamanın H13 olarak elde edildiği görülmüştür. H13 kaplamasının yüksek sıcaklıklarda diğer tozlara kıyasla daha iyi akma dayanımı gösterdiği ve darbe testlerinde daha iyi enerji sönümlendiği bilinmektedir (Mashes, 2017). Diğer taraftan, taban malzemenin ince alınması nedeniyle taban malzemeye kıyasla performansı düşük çıkmıştır. Taban malzemenin ince, kaplamanın sert olmasından dolayı çabuk kırılma gözlemlenmiştir. Buradan hareketle 1 mm’lik taban malzeme kalınlığının ölçümler için yeterli olmadığı yorumu yapılarak taban malzemenin enerji sönümleme üzerindeki etkisini ölçmek için ikinci ağırlık düşürme testi yapılmıştır (Şekil 5.6). Bu doğrultuda, kaplama durumu iyi olan iki malzeme seçilerek sonuçlar incelenmiştir: HRX: 200, J 2 mm taban malzeme, HRX-M2: 400 J 2 mm taban malzeme-2 mm kaplama. Taban malzeme kalınlığı 1 mm iken HRX-M2 için 130 J enerji absorbe etme değeri elde ediliyorken taban malzeme kalınlığı 1 mm artırıldığında bu değer yaklaşık 380 J değerine yükseldiği görülmüştür.

Grafiklerde, farklı Joule değerlerinde darbe deneyine tabi tutulan bu iki malzemenin aynı yer değiştirme için sönümlendiği enerji miktarlarından hareketle taban malzeme kalınlığının önemli bir parametre olduğu ve bu kalınlığa bağlı olarak darbe direnci dayanımının üstel olarak arttığı görülmüştür. Şekil 5.10’da B: M2 tozunu temsil etmektedir.



Şekil 5.10: Farklı Kalınlıklarda ve Enerji Değerlerinde Uygulanan Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları.

2 mm kaplama 1 mm taban malzeme ile 2 mm kaplama 2 mm taban malzeme testlerinin her ikisinin de 400 J altında gerçekleştirildiği göz önünde bulundurulduğunda 4 mm kalınlığa ait test sonuçlarının beklenen şekilde daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle taban malzeme kalınlığının yüksek tutulmasının faydalı olacağı yorumu yapılabilir. Ek olarak, artan kaplama kalınlıklarındaki malzeme dayanımlarının da ölçülmesi çalışmanın doğruluğunu artıracaktır. Kaplama yapılan bölgeyi taşıyabilecek esneklikte ve kaplamanın kırılmasına mücadele etmeyecek dayanımda taban malzeme kalınlığının tespit edilmesi önem arz etmektedir.

2 mm kaplama 1 mm taban malzemeye uygulan 400 J ile 2 mm kaplama 2 mm taban malzemeye uygulanan 200 J sonuçlarının da yine beklenen şekilde 4 mm 200 J uygulamasında daha düşük akma dayanımı olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. Ağırlık düşürme testi sonrasında WLX-WC'ye ait fotoğraflar Şekil 5.11'de verilmiştir.

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
WLX-WC		

Şekil 5.11: WC Tozu Kahl WLX'e Ait Ağırlık Düşürme Testi Sonrası Fotoğraflar.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek sertliği ile şok direnci sayesinde yapılara dayanım katacağı öngörülen ve toz metalürjisi tekniğiyle üretilmiş olup ticari olarak temin edilen üç farklı zırh çeliği kullanılmıştır. Bu çelikler üç farklı toz çeşiti kullanılarak lazer yöntemiyle kaplanmıştır. Bu çalışma, elde edilen kompozit yapılardaki mermi enerjisini sönmleme, delinme derinliğini düşürme gibi balistik kabiliyet iyileşmelerinin tespit edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, güvenlik güçlerinde tahsis edilen araçlarda bulunan MIL 46100, WELDOX 700 ve HARDOX 500 zırh çelikleri 15 mm kalınlığında çalışmaya dahil edilip ayrı ayrı WC, M2 ve H13 tozları 3 mm kalınlığında olacak şekilde lazer yöntemi ile kaplanmıştır. Üç ayrı tozun zırh çeliklerinin balistik performansına etkisi atış ve ağırlık düşürme testi, SEM ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Daha hafif malzemelerin lazer kaplama yöntemi ile elde edilmesi amacıyla NATO standardında yer alan modüler keskin nişancı tüfeği kullanılarak çıkış hızı aynı uç yapısı farklı olan 7,62 M80 kurşun ve M61 çelik zırh delici mermi çekirdekleri ile aynı şartlarda taban malzeme ve kompozit zırh çelikleri üzerine 50 metreden birer kere atış yapılmak suretiyle meydana gelen terminal balistik hasarları ve penetrasyon miktarları incelenmiştir. Literatürde polimer esaslı kompozit malzemelerden olan kumaşlar için mevcut olan standartlardan farklı olarak metal kompozit malzemeye yönelik standart bulunmaması nedeniyle ağırlık düşürme cihazı kalibre edilmiş, numune bağlama donanımı eklenmiş ve standart dışı bir uç kalibre edilerek parametreleri cihaza tanımlanmıştır. Gerçek ortama yakın sonuçlar elde etmek amacıyla mermi geometrisindeki yanal yüzeyleri kavisli uç ile düşük hızlardaki hasar altında kompozit malzemelerin, 200 J ve 400 J darbe enerjilerini sönmleme yeteneği grafik kıyaslamaları ile incelenmiştir. Böylece, daha önce çalışmamış olan bu malzemelere ait veriler ile literatüre katkı sağlanmıştır. Geliştirilen zırh çeliklerine kıyasla balistik özellikleri iyileştirilen özgün kompozit zırh çeliklerinin Türk Silahlı Kuvvetlerince çeşitli alanlarda kullanılması (malzeme dayanımının artırılması, metal ile eş

dayanımının daha hafif malzeme ile edilmesi vb.) çalışmanın ana gayesidir. Çalışma kapsamında geliştirilen kompozit yapılara yönelik gerçekleştirilen tüm testler ortak süzgeçten geçirilip literatüre yapılan katkılar aşağıda sıralanmıştır:

- Kompozit yapı geliştirme çalışmalarında farklı katmanların bir arada nasıl tutulacağının belirlenmesi ağırlık düşürme, atış, mikro yapı ve mikro sertlik değerlerine doğrudan etki etmektedir.
- Mikro yapı incelemeleri sonucunda boşluk yapısı ve hatalar göz önünde bulundurularak tercih edilmesi gereken kaplama sıralamasının H13, M2, WC şeklinde olması gerektiği tespit edilmiştir.
- Zırh çelikleri kıyaslandığında, taban malzeme sertlik değerleri ($HV_{0.3}$)\ plastik deformasyon direnci sırasıyla: HRX: 485, MIL:465, WLX: 410 iken kompozit zırh çeliklerine ait değerlerin sırasıyla: HRX-M2: 946, WLX-M2: 929, MIL- M2: 907 olarak elde edildiği görülmüştür. Mikro sertlik incelemeleri sonucunda üç zırh çeşidi ve üç kaplama çeşidi içerinden HRX-M2 kompozit zırh malzemesinden numunelerin en iyi dayanımı sergilediği görülmüştür.
- Ağırlık düşürme sonuçlarından hareketle 5 mm'lik yer değiştirme için kompozit zırh çeliklerinin kırılma enerjisi değerleri kıyaslandığında büyükten küçüğe sırasıyla: H13, M2, WC tozları elde edilmiştir. H13 kaplaması ise kendi içinde incelendiğinde zırh metali sıralamasının kırılma enerjisi değeri için büyükten küçüğe; WLX, HRX, MIL olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan hareketle WLX- H13 kompozit zırh çeliğinin ön plana çıktığı yorumu yapılabilir. Kompozit zırh çeliğinden yüksek kırılma enerjisi değeri beklendiği durumlarda bu yapının tercih edilmesi gerektiği değerlendirilmiştir.
- Kaplamanın taban malzemeye difüzyonunun WC tozunda hiç olmadığı diğer tozlar altında bölgesel olduğu görülmüştür.
- Zırh delici mermi çekirdeği altında düşük penetrasyon derinliğine sahip kompozit metal tercih edilmek istendiğinde HRX- M2 önerilmektedir.
- Mikro yapı (boşluk, hatalar), ağırlık düşürme (kırılma enerjisi değerleri) ve atış testi sonuçlarının (penetrasyon derinliği) birbiri ile tutarlı olduğu ve zırh çeliklerinin balistik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik lazer kaplama uygulamasında önerilen tozların sırasıyla H13, M2 ve WC olduğu görülmüştür.
- Mikro sertlik incelemelerinde, çalışma dâhilinde gerçekleştirilen diğer inceleme ve testlerden farklı olarak, en iyi tozların sırasıyla: M2, WC, H13 ve M2

kaplaması altında en yüksek sertlik değerini veren zırh çeliklerinin sırasıyla HRX, WLX ve MIL olduğu tespit edilmiştir. Bu noktada sertlik- tokluk ilişkisi dikkate alınmalıdır. Malzemelerin belirli bir düzeyin üzerinde sertliğe sahip olmalarının dayanımları üzerinde beklenenin aksine düşük tokluk seviyesi gibi olumsuz sonuçlar doğurabileceği bu nedenle ağırlık düşürme testi sonucu elde edilen kırılma enerjisi değerleri ve darbe direnci kuvvetleri, sertlik değerleri ve ulaşılacak tüm veriler eş zamanlı düşünülerek planlamaların yapılması mühendislik çalışmaları, tasarımları, için çok önemlidir. Nitekim atış testi sonuçlarında da sertlik testi sonuçlarında en iyi değerlerin elde edildiği gözükten M2 ve WC kaplamalarında meydana gelen atmalar, kopmalar, ile aslında bu kaplamaların ikinci, üçüncü seviyede tercih edilmesi gerektiğinin birer göstergesidir.

- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm inceleme, deney, testlerden hareketle, araştırmanın konusu olan lazer kaplama yöntemi ile zırh çeliklerinin balistik kabiliyetlerinin iyileştirilmesi hedefine ulaşılmış olup en iyi sonucun M2 tozu kaplanan HARDOX 500 kompozit zırh metali ile elde edildiği görülmüştür.

İleride yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur;

- Araştırmalara başlamadan önce; TÜBİTAK Hızlı Destek, Teknofest gibi özel konulu yarışmalar ve benzeri programlara başvurularak, elde edilecek maddi imkân ile, test altyapısı bulunan firma, üniversite, aracılığıyla hassas deneyler yaptırılarak uluslararası standartlarda sonuçlar ve bilimsel verilerle desteklenen içerikteki çalışmalar ortaya konulabilir. Örneğin geliştirilen kompozit yapılar dünyaca kabul gören atış testi koşullarında (atış sayısı, malzeme kalınlığı vb.) gerçekleştirilerek malzeme dayanımı ve koruma seviyesine (TSE, STANAG, NIJ, MIL) dair doğruluk ve kabul edilebilirlik artırılabilir.
- Atış testlerinde yüksek performans gösteren seramik kaplamanın, WC, testlerde kopmasını engelleyen tedbirler alınarak yeni çalışmalar yapılabilir.
- Kaplama ve taban malzeme yapışmasının daha sağlıklı neticelendirilmesi için taban malzemenin ön ısıtma ile çalışılması faydalı olabilir.

KAYNAKÇA

- Ade, F. Ballistic Qualification of Armor Steel Weldments. Welding Journal.70 (1991). ss. 53-58.
- Akasaki J.L., Tashima M.M., Silva E.J., Paya J. Comparative studies between the rice husk ash (RHA) amorphous and crystalline. Journal of Materiales Compuestos 05 (2005).
- Alarçin, S. *Savunma Sanayiinde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon (2014).
- Akçay, M. Balistik (1.Basım), İstanbul: Kazmaz Matbaacılık (2010).
- Aran, A. Malzeme Bilgisi Ders Notları Dokümanı. İTÜ Makina Fakültesi. İstanbul (2008).
- Astralloy Nucor Company. MIL-DTL-46100E. USA (2018).
- Aydın, M., Soydemir M. Serbest Parçacıklı Modüler Zırh Tasarımı.Kırklareli University Journal of Engineering and Science 4-2 (2018). ss. 176-188.
- Aydinel, A., Ögel, B., Yıldırım, O. CTP Art Plakalı Zırhlarda Seramik Ön Plaka Kalınlığının Merminin Son Hızına Etkisi, Zırh Teknolojileri Semineri, MSARGE ve Tekno.D.Bşk.lığı (2005). ss. 176-189. Ankara.
- Aytaç, A., Aslan,B., Çakır,U. Aktif ve Pasif Koruma Sistemlerindeki Yetkinliğin İncelenmesi ve Bu Alandaki Teknolojik Gelişmelerin Gelecekteki Harp Alanına Etkilerinin Değerlendirilmesi. Azerbaijan Republic Ministry of Defence War College of the Armed Forces/ National Security and Military Sciences, Scientific- Practical Journal.ISSN 2521-1331(2019).
- A&E Mill and Welding Supply Company. Data sheet 152uk Hardox 500 plate. Sweden (2016).
- Baptista, R., Mendão, A., Rodrigues, F., Figueiredo-Pina, C.G., Guedes, M., MaratMendes, R. Effect of high graphite filler contents on the mechanical and tribological failure behavior of epoxy matrix composites”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 85 (2016). ss.113–124.

Barényi I. Secondary processing of UHSLA Armox 500 steel with heat based Technologies, University Review, Vol. 6, No. 2 ISSN 1337-6047 (2012).

Bogdan, A., Marszałek, A., Majchrzycka, K., Brochocka, A., Luczak, A. Aspects of Applying Ergonomic Tests in The Evaluation of Ballistic Body Armours Using the Example of Ballistic Vests, Textile Science & Engineering, Volume 2, Issue 7 (2012), ss. 2-7.

Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E., Mengüç, G.S. Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri, Tekstil ve Mühendis, 22: 98 (2015), ss. 84-103.

Broutman, L. J., Krock, R. H. Modern Composite Materials. Addison Wesley Publisher Company, Reading, Massachusetts (1967).

Budiwantoro, B., Raditya, Y.D., Harjandi, Y.A. Strength Analysis of Metro Kapsul Knuckle Plate and Tie Rod using Finite Element Method. Materials Science and Engineering: 694 (2019).

Campos, R., Bechtold, T., Rohrer, C. Fiber friction in yarn a fundamental property of fibers. Textile Research Journal, 73 (2003), ss. 716-721.

Carlucci D. E. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition, Taylor & Francis Group (2008), New York.

Chang, W. Principles Of Lasers and Optics, Cambridge University Press, England (2005).

Chaus, A. S. Microstructural and properties evaluation of M2 high speed steel after inoculating addition of powder W and WC. Materials Science and Technology, 30:9, (2014), ss. 1105-1115.

Cheng-Kun, C., Yu-Liang, C. Ballistic-proof effects of various woven constructions. Fibers & Textiles in Eastern Europe, 18:6 (2010). ss. 63-67.

Chow W., Koch S. Semiconductor Laser Fundamentals, Springer-Verlag, Deutschland (1999).

Conquest Steel & Alloys Company. MIL–A 46100 PLATES. Mumbai, India (2008).

- Coşkun, A., Talaş, Ş. ESD Yöntemi ile W, WC ve Alaşımli Çelik Kaplanan AISI 1008 Çelik Plakaların Düşük Hız Balistik Performansları. AKU J. Sci. Eng. 19 (2019) 025701 (419-428).
- Cotell, M., James S., A., Fred S., A. ASM Handbook 10th Edition Volume 5. Surface Engineering (1994).
- Czech Product Company. Weldox 700: Extra High Strength Structural Plate. SSAB: Oxelösund (1996).
- Çalışkan, M. *Katodik Ark Yöntemiyle ZrN ve Zr/ZrN Kaplamaların Biriktirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul (2008).
- Çayan, M.E. *Tungsten Karbonitrür (WCN) İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretimi Ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology. İstanbul (2013).
- Çelik, S. Demirdışı Metaller Ders Notları. Balıkesir Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü. Balıkesir (2010).
- Çerkez, İ. *Kolloidal Silika Dispersiyonunun Polietilen Kumaşların Balistik Performansına Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi), Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa (2007).
- Dağ, M. *PVD Yöntemi ile TiN Kaplanmış AISI 304 Çeliğinin Aşınma Deneyleri ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2002).
- Dahotre N., Harimkar B. Laser Fabrication and Machining of Materials, Springer Science, ABD (2008).
- Das, A., Satapathy B.K. Structural, thermal, mechanical and dynamic mechanical properties of cenosphere filled polypropylene composites”, Materials and Design, 32. (2011), ss. 1477–1484 .
- Dekkers, M.E.J., Heikens, D. The effect of interfacial adhesion on the tensile behavior of polystyrene–glass-bead composites. J Appl Polym Sci: 28 (1983), ss. 3809–3815.

- Demirkol, M., Özlü, E. *Mechanical Behavior of Materials under High Strain Rate* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology. İstanbul (2003).
- Deniz, H. *Çift Fazlı Bir Çeliğin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2009).
- DiMelfi, R.J., Sanders, P.G., Hunter, B., Eastman, J.A., Sawley, K.J., Leong, K.H. and Kramer, J.M. Mitigation of subsurface crack propagation in railroad rails by laser surface modification, *Surface and Coatings Technology*: 106 (1998), ss. 38-43.
- Dittanet, P., Pearson, R. A. Effect of bimodal particle size distributions on the toughening mechanisms in silica nanoparticle filled epoxy resin. *Polymer*: 54 (2013), ss. 1832-1845.
- Fu, S.Y., Lauke, B. Analysis of mechanical properties of injection molded short glass fibre (SGF)/calcite/ABS composites", *J Mater Sci Technol*: 13 (1997), ss. 389-396.
- Fu, S.Y., Lauke, B. Characterization of tensile behaviour of hybrid short glass fibre calcite particle ABS composites", *Composite Part A*, 29A (1998), ss. 575-583.
- Gellert, E.P., Cimpoeru, S.J., Woodward, R.L. A study of the effect oh the target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre reinforced plastic composites. *Elsevier International Journal of Impact Engineering*: 24 (2000), ss. 445- 456.
- Gibson R. F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. *Composite Structures*, 92: 12 (2010), ss. 2793-2810.
- Grujicic, M., Ramaswami, S., Snipes, J.S., Yen, C.F., Cheeseman, B.A. and Montgomery, J.S. Multiphysics Modeling and Simulations of Mil A46100 Armor-Grade Martensitic Steel Gas Metal Arc Welding Process. *Journal of Materials Engineering and Performance* (2013).
- Hu, C. J., Lee, P. Y., Chen, J. S.. Ballistic Performance and Microstructure of Modified Rolled Homogenous Armor Steel. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*: 25: 1 (2002), ss. 99-107.

Ingalls, C. Interior Ballistics; A Text Book for the Use of Student Officers at the US Artillery School, Read Books (2008).

İnçal, E. *PVD Yöntemiyle Kaplanan HSS Takım Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2007).

Jacobi, H., Batinmann, H. J., Gronsfeld, J. New Method of Determining the Macrocleaness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel. Stahl Eisen: 108: 20 (1988), ss. 54-66.

Jena, P.K., Senthil, P.P., and Kumar, K.S. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel. J. Appl. Res. Technol: 14: 1 (2016). ss. 47–53.

Jeng, S.T., Wang, S.B., Sheu, L.T. A model for predicting the the residual strength of GFRP laminates subjected to ballistic impact. Journal of Reinforced Plastic Composites: 11 (1992), ss. 1127-1141.

Kagan, V., Bray, R. Advantages and Limitations of Laser Welding Technology for Semi-Crystalline Reinforced Plastic. Proceedings of the Laser Materials Processing Conference and Laser Microfabrication Conference (2001).

Kara, S., ve Korkut, M.H. Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan zırh plakalarında kaynak sonrası ısıtıl işlemin birleşim mukavemetine etkisinin araştırılması. Savunma Bilgileri Dergisi: 11: 2 (2012). ss. 159-171.

Karagöz, Ş., Atapek, H. Ş., Yılmaz, A.. Zırh Çeliklerinde Perforasyon ve Balistik Korumanın Anlaşılması Açısından Fraktografik Etüd. Metal Dünyası: 182 (2008), ss. 102- 107.

Karagöz, Ş., ve Atapek, H.Ş. Fiziksel metalurjik esaslarla geliştirilen bor katkılı zırh çeliğinin kaynaklanabilirliği 1. Uluslararası Kaynak Teknolojisi Konferansı (2009), ss. 840-849.

Karagöz, Ş., Atapek, H.Ş., Yılmaz, A. Su Verilmiş ve Temperlenmiş Beynitik Bir Zırh Çeliklerinin Balistik Davranışı: Hasar Üzerine Modelleme ve İncelemeler, Savunma teknolojileri dergisi, Sayı: 053 (2010), ss. 62-66.

Karagöz, Ş. , Atapek, H.Ş , Yılmaz, A. “Microstructural and fractographical studies on quenched and tempered armor steel”, MP Materials Testing, 52 (5) (2010), ss. 316-322.

- Karasu, H.F. *Kompozit Disk Yayların Tasarımı ve Analizi* (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir (2014).
- Khmyrov, R.S., Shevchukov, A.P., Gusarov, A.V., Tarasova T.V. Phase composition and microstructure of WC–Co alloys obtained by selective laser melting. *Mechanics & Industry* 18 (2017), ss. 714
- Kulmann, N.A. Metallurgical characterization of armor alloys for the development and optimization of induction bending procedures. The Ohio State University, USA (2011).
- Kurt, S. *Farklı kaynak ağzı açısı ve geometrilerinde gerçekleştirilen kaynakların MILA 46100 zırh çeliği mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). T.C. Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü Teknoloji Yönetimi Ana Bilim Dalı (2015).
- Lange, F.F. The interaction of a crack front with a second phase dispersion. *Philos Mag*, 22. (1970). ss. 983–992.
- Lauke, B. Effect of particle size distribution on fracture toughness of polymer composites considering plastic void growth after particle debonding. *Mechanics Research Communications*, 66 (2015). ss. 1–6.
- Manganello, S. J., Wilson, A. D. Direct Quenching and its Effects on HighStrength Armor Plate. *Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90's*. The Minerals, Metals & Materials Society (1993), ss. 235-241.
- Mansur, A. Modeling Of Mechanical Properties Of Ceramic-Metal Composites For Armor Applications. Ottawa-Carleton Institute for Mechanical and Aerospace Engineering. University of Ottawa. Canada (2011).
- MAShES Project. Multimodal Spectral Control of Laser Processing with Cognitive Abilities. Grant Agreement n° 637081 – H2020 – FoF – 14 (2017).
- Matsubara, H., Osuka, T., Kozasu, I., Tsukada, K.. Optimization of Metallurgical Factors for Production of High Strength. High Toughness Steel Plate by Controlled Rolling. *Transactions ISIJ*, 12 (1972), ss. 435-443.
- McGrath, L.M., Parnas, R.S., King, S.H, Schroeder, J.L., Fischer, D.A., Lenhart, J.L.. Investigation of the thermal, mechanical, and fracture properties of alumina epoxy composites. *Polymer*, 49 (2008) ss. 999-1014.

Merzalı, C.E. *Zırh Çeliklerinde Kaynak Sonrası Isı Tesiri Altında Kalan Bölgenin Özelliklerinin Isıl İşlem İle İyileştirilmesi*(Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2013).

MTL Company. High Strenght Steel: Weldom 700. Data Sheet 107en Weldom 700 (2013).

Naik, N. K., Shrirao, P., Reddy, B. C. K. Ballistic Impact Behaviour Of Woven Fabric Composites: Formulation, International Journal of Impact Engineering , 32 (2006). ss. 1521-1552.

Okay, F. *PVD Yöntemi ile TiN Kaplı Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Adhesiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2006).

Özkan, C, Ulu S., Güneş İ. Çelik Diğlilerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Isıl Ğğlem Rejimlerinin Etkisi.6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs, Elazığ (2011).

Özlü, E. *Mechanical Behavior Of Materials Under High Strain Rate* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (2003).

Pawlowicz, W. Hardening with High-Power Diode Laser, Welding International,28 (2011), ss. 679-682.

Pukanszky, B., Voros, G. Mechanism of interfacial interactions in particulate filled composites. Compos Interf, 1 (1993), ss. 411–427.

Rxavier, R. Successful Strategy for HSS Rolls Implementation. Article in Materials Science and Technology (2005).

Reddy, G.M., and Mohandas, T. Ballistic performance of highstrength low-alloy steel weldments. J Mater Process Technol 57 (1996). ss. 23–30.

Sanders TA. Penetration of composite laminates by conical indenters and projectiles. Masters thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia (1997).

Saraçoğlu, M. Nato'nun Bariyerleri: Terörizmle Mücadelede Yaşanan Dönüşüm Ve İttifakın Etkinliğini Azaltan Faktörler. Güvenlik Bilimleri Dergisi , 5 (1) (2016), ss. 75-108.

- Sert, H. *PVD ile TiN kaplanmış alüminyum ekstrüzyon kalıplarının yüzey özellikleri ve aşınma performanslarının deneysel incelenmesi*(Doktora Tezi), Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri (1997), ss. 147.
- Sert, H., Samtaş, G., Toprak, H. Doğrudan Buhar Biriktirme Tekniği (DVD), ekipmanları ve kullanımı. 10. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat kongresi, Nevşehir (2002).
- Şen, H. *AlMg3/SiCp Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne (2013).
- Şenel F., Balya B., Parnas L. İleri Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Analizi. İleri kompozit zırh malzemelerin balistik analizi, Savunma Teknolojileri Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 24-25 Haziran, ss. 1-10. Ankara (2004).
- Shi, G., Zhang, M.Q., Ronga, M.Z., Wetzel, B., Friedrich, K. Friction and wear of low nanometer Si3N4 filled epoxy composites. *Wear*, 254 (2003), ss. 784–796.
- Spanoudakis, J., Young, R.J. Crack propagation in a glass particle filled epoxy–resin. 1. Effect of particle-volume fraction and size. *J Mater Sci*, 19 (1984), ss. 473–86.
- Syed, B., Halder, A., Shariff, S.M., Padmanabham, G. and Manna, I. Proc. International Conference on “Automotive Materials & Manufacturing, Pune, India 6 – 8 October (2010), ss. 105.
- Tabiei, A. and Nilakantan, G. Ballistic Impact of Dry Woven Fabric Composites: A Review, *Applied Mechanics Reviews*, 61 (2008), 010801-12.
- Tarım, M. *Armoz 500T Çeliğine Metco 42C ile Lazer Cladding Uygulanması* (Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği (2018).
- Tekinbüğrü, C.M. Kompozit Zırh Malzemeleri Bilgi Notu. Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü (2013).
- Telasang, G., Dutta Majumdar, J., Padmanabham, G., Tak, M. and Manna, I. Effect of laser parameters on microstructure and hardness of laser clad and tempered. AISI H13 tool steel. *Surface & Coatings Technology*. 258 (2014) 1108–1118.

- Temiz, S. *Balistik Kumaş ve Test Yöntemleri Üzerine Bir Araştırma* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir (2005).
- Toprak, H. *Borlanmış ve PVD ile TiN Kaplanmış KGDD Kam Milleri ile Kaplamasız ve Sertleştirilmiş Çelik Dövme Kam Millerinin Çalışma 109 Performanslarının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2002).
- Türküz, C. *Ark PVD Yöntemi ile TiN Kaplanmış Kesici Takımların Karakterizasyonu ve Performanslarının İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (1997).
- Uslu, M. *DOCOL 22MnB5 Çeliğinin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2007).
- Uzun R., Keleş Ö. Lazerle Kaynak İşleminde kaynak Parametrelerinin Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakülte Dergisi, 2012, Cilt 27, No 3 (2012), ss. 509-512.
- Yağbasan, M. *Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Plakaların Çarpma Açısına Bağlı Olarak Düşük Hızlı Darbe Davranışının Ve Darbe Sonrası Basma Mukavemetinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2019).
- Yılmaz, H. *Üç Fazlı Elyaf Tabakalı Karma Kompozit Yapının Balistik Özelliklerinin İncelenmesi* (Doktora Tezi). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta (2012).
- Yesgat, A.L., Kitey, R. Effect of filler geometry on fracture mechanisms in glass particle filled epoxy composites. Engineering Fracture Mechanics, 160 (2016), ss. 22–41.
- Yüksel, C. *Hibrit Plazma Ark Kaynağı (Hpak), Gaz Metal Ark Kaynağı (Gmak) Ve Soğuk Metal Transfer Kaynağı (Cmt) Yöntemleri İle Armox 500t Zırh Çeliğinin Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İskenderun Teknik Üniversitesi. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü. İleri Metalurji ve Malzeme Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı. Hatay (2019).
- Zeyveli, M. AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin işlenmesinde yüzey Pürüzlülüğünün araştırılması ve istatistiksel proses kontrol metodunun uygulanması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 26 (4) (2010). ss. 379-386.

Wang. Y., Cao. G. Developments in nanostructured cathode materials for high-performance lithium-ion batteries”, Advanced Materials, 20 (12) (2008), ss. 2251- 2269.

Wang, WJ., Guo, J., Liu, QY., Zhu, MH. Effect of laser quenching on wear and damage of heavy-haul wheel/rail materials, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228 (2013), ss. 114-122.

“Akma Sınırı ve Akma Dayanımı Nedir?”, Alındığı yer: <https://insapedia.com/akma-siniri-ve-akma-dayanimi-nedir/> [Erişim tarihi: 02 Ağustos 2020].

“Elastiklik Modülü”, Alındığı yer: <https://www.metalurjik.com/tag/elastiklik-modulu-nedir> [Erişim tarihi: 02 Ağustos 2020].

“Lazer Dolgu”, Alındığı yer: <http://uniquetech.com.tr/laser-dolgu/> [Erişim tarihi: 02 Ağustos 2020].

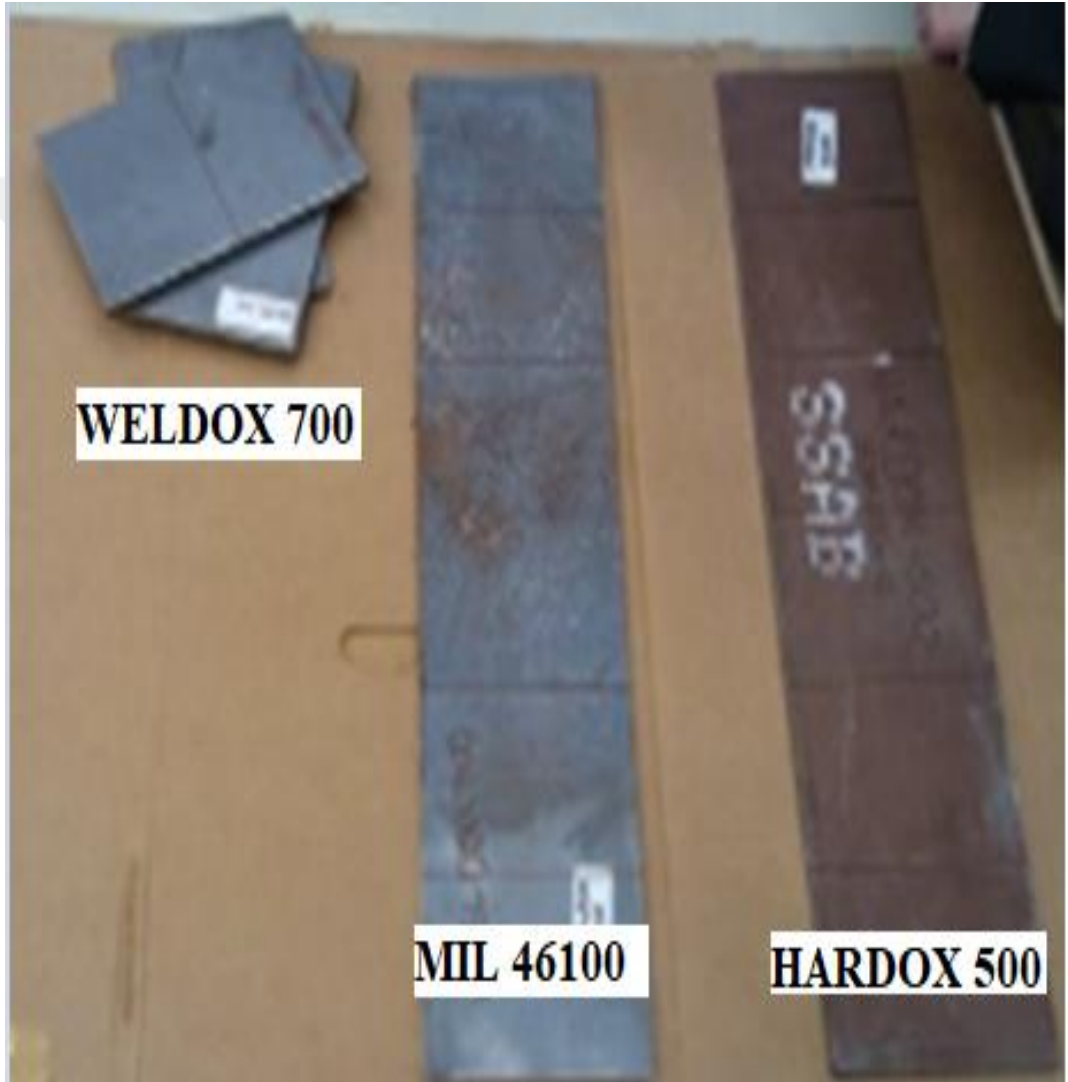
"Kalite Çelik Şirketi: Sıcak İş Çeliği Katalog Bilgileri", [http://www.kalite-celik.com/default.asp?altkatid=1448&katadi=B%D6HLER%20W302%20-%20\(1.2344\)%20&kapak=altsayfakategori](http://www.kalite-celik.com/default.asp?altkatid=1448&katadi=B%D6HLER%20W302%20-%20(1.2344)%20&kapak=altsayfakategori) [Erişim tarihi: 08 Ağustos 2020].

“Sağlam Metal Şirketi: 1.3343 (DMO5) HS6-5-2C Yüksek Hız Çeliği”, <https://www.saglammetal.com/tr/urun-detay/takim-celikleri/yuksek-hiz-celigi/13343-dmo5-yuksek-hiz-celigi> [Erişim tarihi: 08 Ağustos 2020].

“Wikipedia: Tungsten Karbür”, https://tr.wikipedia.org/wiki/Tungsten_karb%C3%BCr [Erişim tarihi: 08 Ağustos 2020].

EKLER

Ek 1: Çalışma Başlangıcında Temin Edilen Zırh Çelikleri.



Ek 2: Lazer Kaplama Sonrası Elde Edilen Kompozit Zırh Çelikleri.

Malzeme Türü/ Kaplama	HRX	WLX	MIL
H13 Kaplaması	 A square composite armor plate with a fine, woven texture. It has two circular mounting holes at the bottom left. Handwritten in blue ink at the top is "H13 (H) 2".	 A square composite armor plate with a fine, woven texture. It has two circular mounting holes at the top right. Handwritten in blue ink at the top is "H13 (W) 1".	 A square composite armor plate with a fine, woven texture. It has two circular mounting holes at the top right. Handwritten in blue ink at the top is "H13 (M) 1".

Ek 2 – devam.

M2 Kaplaması



Ek 2- devam.

WC Kaplamaşı	 A photograph of a rectangular, textured metal plate with two circular holes at the bottom. The plate is labeled "WC(H)1" in blue ink at the top. It is placed on a brown surface.	 A photograph of a rectangular, textured metal plate with two circular holes at the top and two at the bottom. The plate is labeled "WC(W)2" in blue ink at the top. It is placed on a dark surface.	 A photograph of a rectangular, textured metal plate with two circular holes at the bottom. The plate is labeled "WC(M)2" in blue ink at the top. It is placed on a dark surface.
-------------------------	---	---	--

Ek 3: Lazer Kaplama İşlemi.



Ek 3- devam.



Ek 4: Tel Erozyon Cihazı.



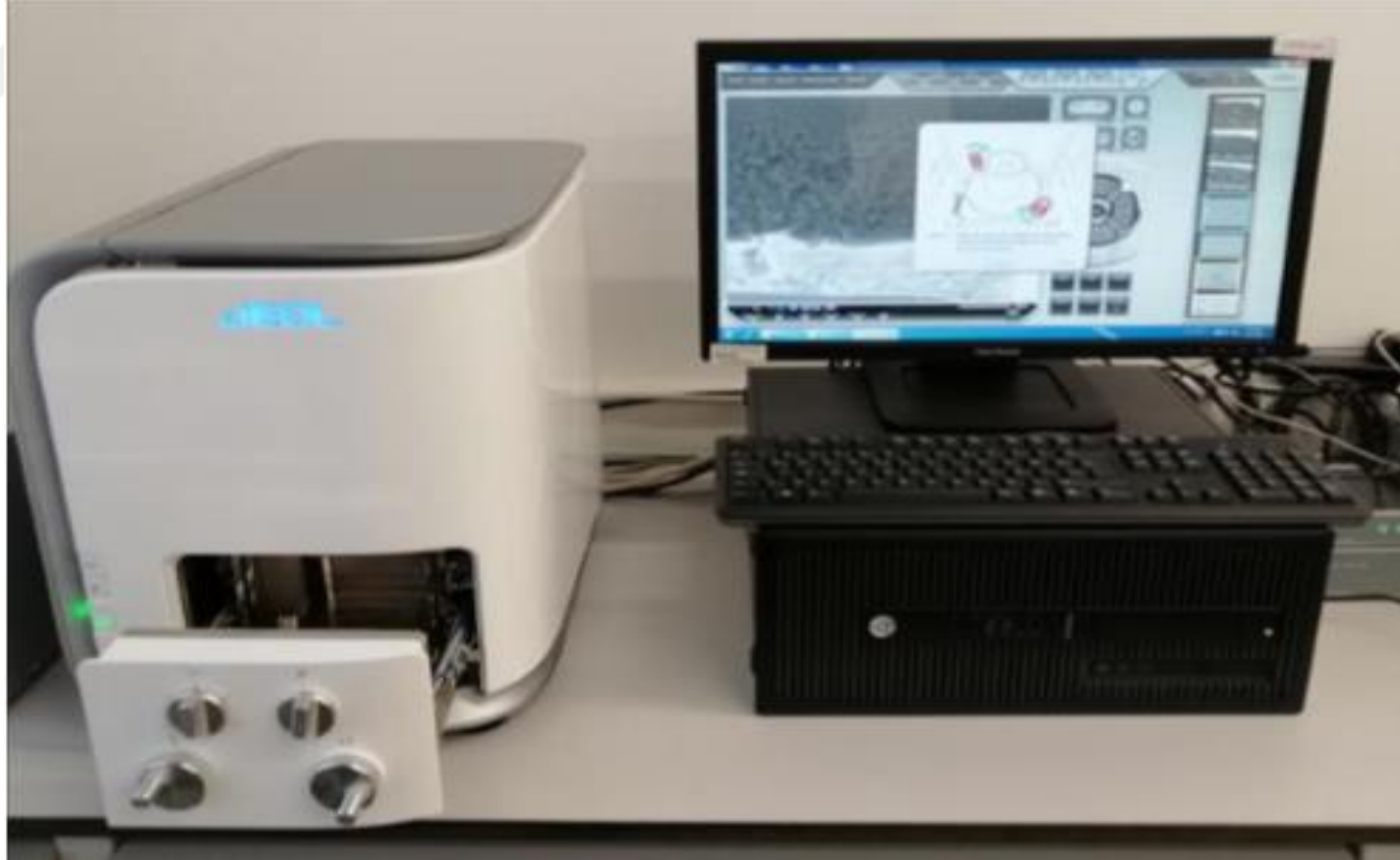
Ek 5: Lazer Kesim Cihazı.



Ek 6: Mikro Yapı İncelemelerine Uygun Boyutlara Getirilen ve Gruplandırılan Parçalar.



Ek 7: JEOL JCM 6000 PLUS Model Taramalı Elektron Mikroskobu Cihazı.



Ek 8: FutureTech Marka FM 700 Mikro Sertlik Cihazı.



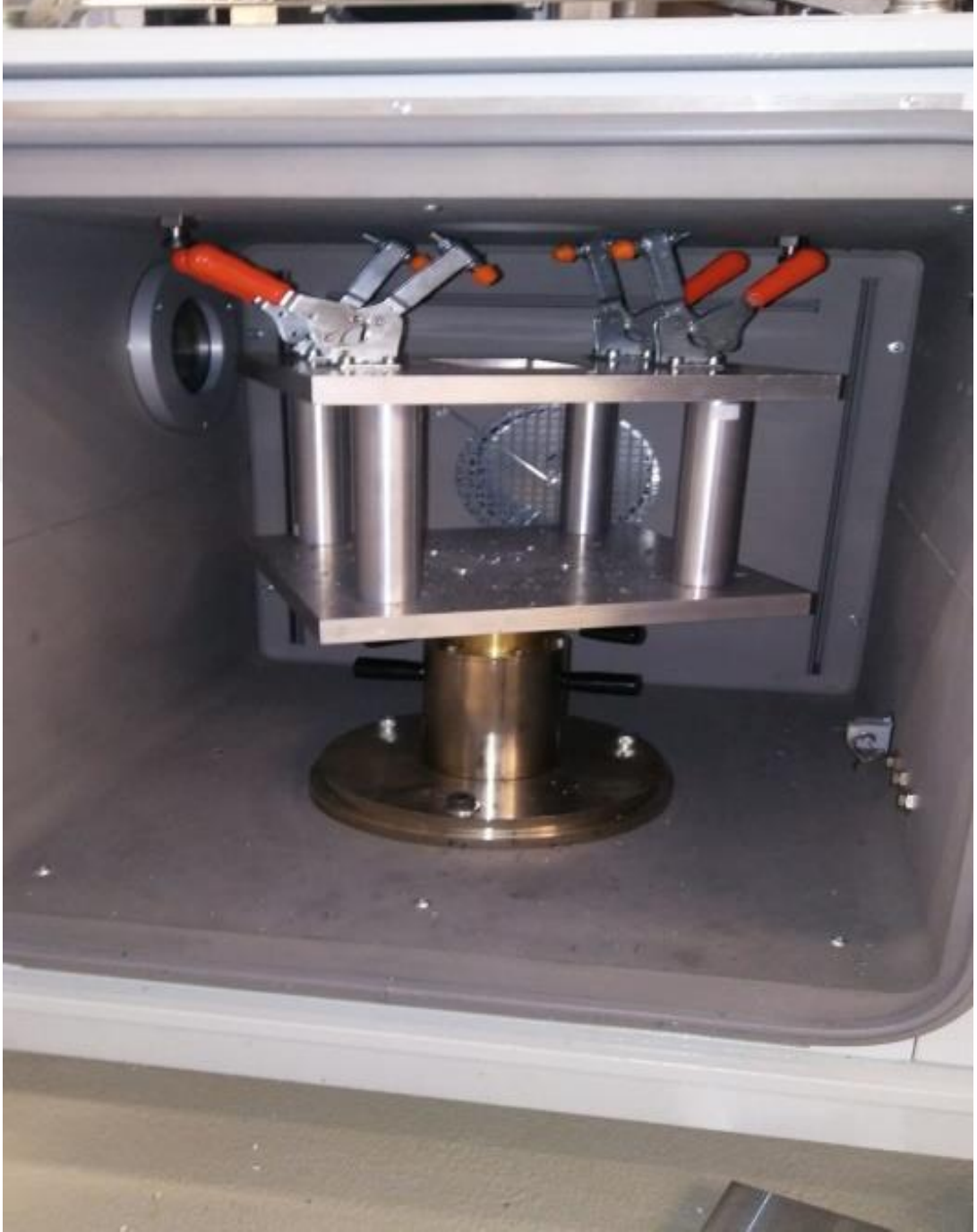
Ek 9: Instron CEAST 9350 Droptower Impact System Ağırlık Düşürme Test Cihazı.



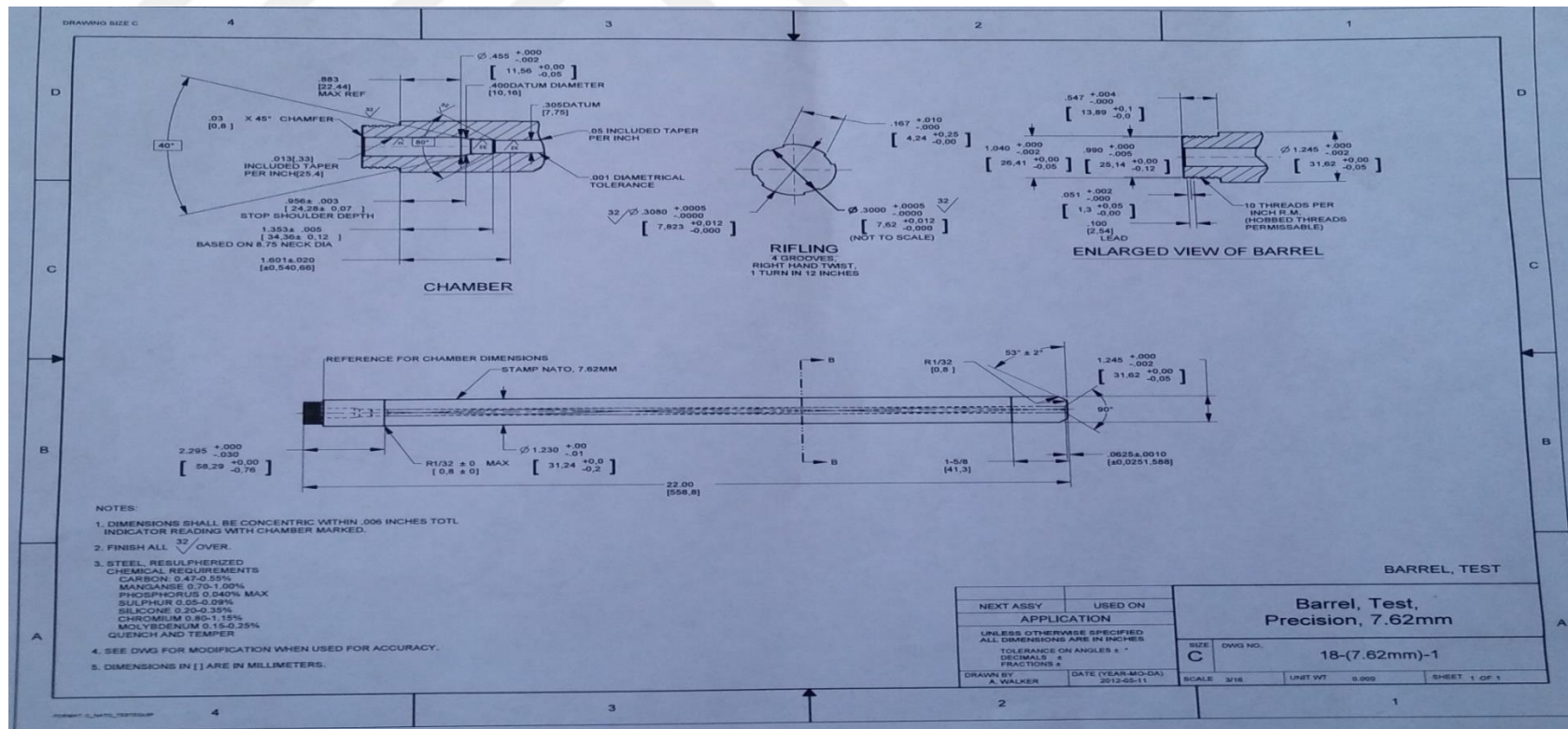
Ek 10: Ağırlık Düşürme Testinde Kullanılan Yanal Yüzeyleri Kavisli Uç.



Ek 11: Ağırlık Düşürme Cihazı Sabitleyicisi.



Ek 12: Atış Yapılan Silah Sisteminin NATO Standartlarındaki Teknik Resmi.



Ek 13: 7,62 mm X 51 (M61) Normal Fişek Teknik Özellikleri.

Mermi İrtibat Kuvveti:	En küçük 27 Kgf (265 N)
Mermi Malzemesi:	Bakır Kaplanmış Çelik Gömlek, Çelik Çekirdek Ve Kurşun Çekirdek (Kurşun-Antimon Alaşımı)
Barut:	Küresel Barut
Ambalaj:	20 Fişek Bir Mukavva Kutuda,10 Mukavva Kutu Bir Pvc Poşette, 5 Pvc Poşet Bir Tahta Sandıkta Ve 30 Tahta Sandık Bir Palette (Toplam 30000 Fişek)
Nato Stok Numarası:	1305 27 043 1816 (Mukavva Kutulu)...1305 27 054 1235 (M13 Mayonlu)
Balistik Katsayı:	0,43 (G1)
Şartname:	KKKTEKŞ-F-399 Ç (Mart 2017), Stanag 2310, Aep-97 Edition A (Multi Calibre Mopı)
Fişek Ağırlığı:	~ 24 g
Fişek Boyu:	71,12 mm
Zırh Delme:	Mermilerin En Az %80'İ 91 Metre Mesafede 10 mm Kalınlığındaki Çelik Levhayı (Sae 1010 veya 1020) Tamamen Delmektedir
Dağılım(100 m):	Ortalama Dağılım Yarıçapı En Fazla. 3,1 cm
Kullanıldığı Silah:	MPT-76, JMK BORA-12, G3, FAL, MG3, L7A2, M60
Hız (23,7 m):	838 ± 9,1 m/s
Kapsül:	7,62 mm Kapsül, Boxer
Kovan Boyu:	51,18-0,30 mm
Kovan Malzemesi:	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)
Kovan Model Numarası:	7.62 mmx51 Kovan
Mermi Ağırlığı:	9,45 ± 0,15 g
Merminin Harekete Geçme Zamanı:	En fazla 4 ms
Ortalama Namlu Basıncı:	En az 550 bar
Ortalama Kovan Ağız Basıncı:	En fazla 3800 bar

Ek 14: 7,62 mm X 51 (M80) Normal Fişek Teknik Özellikleri.

Kovan Malzemesi:	Pirinç (Cu ₂ Sn ₂₈ Veya Cu ₂ Sn ₃₀)
Mermi Malzemesi:	Tombak, Kurşun Çekirdek (Kurşun-Antimon Alaşımı)
Barut:	Küresel Barut
Nato Stok Numarası:	1305 27 043 1741 (Mukavva Kutulu) 1305 27 053 9288 (M13 Mayonlu)
Mayon Tipi:	M13 Mayon
Şartname:	KKKTEKŞ-F-553-E (Mart 2017), STANAG 2310, AEP-97 EDITION A (MULTI CALIBRE MOPI)
Fişek Boyu:	71,12 mm
Hız (23,7 m):	838 ± 9,1 m/s
Mermi İrtibat Kuvveti:	En az 27 kgf (265 N)
Kovan Model Numarası:	7,62 mmx51 Kovan
Kapsül:	7,62 mm Kapsül, Boxer
Ambalaj:	20 Fişek 1 Karton Kutuda, 10 Karton Kutu 1 Pvc Poşette, 5 Pvc Poşet 1 Tahta Sandıkta, 30 Tahta Sandık Palette (Toplam 30000 Fişek)
Dağılım(100 m):	Ortalama Dağılım Yarıçapı En Fazla. 3,5 cm
Merminin Harekete Geçme Zamanı:	En fazla 4 ms
Mermi Ağırlığı:	9,65 - 0,20 g
Nato Tasarım Numarası:	AC/116-43A
Fişek Ağırlığı:	~ 24 g
Kullanıldığı Silah:	MPT-76, JMK BORA-12, G3, FAL, MG3, L7A2, M60
Ortalama Kovan Ağız Basıncı:	En fazla 3800 kg/cm ²
Ortalama Namlu Basıncı:	En az 550 kg/cm ²
Ambalaj (Alternatif):	M13 Mayonlu: 500 Fişek (M13 Mayonlu) M2A1 Metal Kutuda, 2 M2A1 Metal Kutu 1 Tel Sarılı Sandıkta ve 45 Adet Tel Sarılı Sandık 1 Palette (Toplam 45000 Adet Fişek)

Ek 15: 7,62 mm M80 Fişegi Hız Basınç Test Raporu.

FİŞEK HIZ BASINÇ TEST RAPORU

Fişek Cinsi : 7.62 mm M 80	Tarih : 10/09/2019
Kafile No :	Kovan Kafile No :
Kafile Miktarı:	Mermi Kafile No :
Silah No : 1	Kapsül Kafile No:
Namlu No : 06/19	Barut Kafile No :
Uzaklık : 23.77 m	Barut Ağırlığı : 2.71 gr.
Seri Miktarı : 1	Mermi Ağırlığı : 9.55 gr.
Atılan Fiş.Mik: 10 Adet	Şartname No :

Ölçüm Mesafesi 23.77 m, Faktör 0.75 m/s/m, Mermi Ağ. <u>9.550 g</u>					
Sıra No	Kovan Ağzı [bar]	Namlu Bas [bar]	HIZ 23.77 [m/s]	V 0.0 [m/s]	Action Time [ms]
1	3608	755	836.4		1.736
2	3462	768	831.6		1.648
3	3600	764	843.0		1.728
4	3606	756	841.0		1.568
5	3604	750	841.0		1.616
6	3446	761	832.0		1.776
7	3296	765	828.8		1.768
8	3483	751	833.6		1.552
9	3625	742	842.7		1.600
10	3538	755	837.4		1.632
Ort	3527	757	836.7		1.662
Faktr	-147	8	4.0		
Fk.lu	<u>3380</u>	765	<u>840.7</u>		
E.Var	329	26	14.2		0.224
S.Dev	105	8	5.09		0.083
SRT.D	Max 3800 bar	Min 550 bar	838+-9.1m/sn		Max 4 ms

Enerji: 3520 J

Ek 16: 7,62 mm M61 Fişegi Hız Basınç Test Raporu.

FİŞEK HIZ BASINÇ TEST RAPORU

Fişek Cinsi : 7.62 mm M61	Tarih : 10/09/2019
Kafile No :	Kovan Kafile No :
Kafile Miktarı:	Mermi Kafile No :
Silah No : 1	Kapsül Kafile No:
Namlu No : 1KR34323	Barut Kafile No : LOT 91/11
Uzaklık : 23.77 m	Barut Ağırlığı : 2.94
Seri Miktarı : 1	Mermi Ağırlığı :
Atılan Fiş.Mik: 10	Şartname No :

Ölçüm Mesafesi 23.77 m, Faktör 0.75 m/s/m, Mermi Ağ. 9.450 g

Sıra No	Kovan Ağzı [bar]	Namlu Bas [bar]	HIZ 23.77 [m/s]	V 0.0 [m/s]	Action Time [ms]
1	4008	740	843.8		1.384
2	3967	732	843.5		1.432
3	3872	739	835.3		1.424
4	3908	740	839.2		1.352
5	3978	736	837.5		1.480
6	3838	746	832.7		1.432
7	3946	735	842.3		1.280
8	3912	739	836.3		1.448
9	3919	743	835.5		1.352
10	3793	742	829.8		1.384
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
Ort	3914	739	837.6		1.397
Faktr	-147	8	4.0		
Fk.lu	<u>3767</u>	747	<u>841.6</u>		0.200
E.Var	215	14	13.9		0.058
S.Dev	66	4	4.63		
SRT.D	Max 3800 bar	Min:560	838+-9.1m/sn		Max: 4 ms

Enerji: 3490 J

Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları.

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
MIL-H13			

Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
MIL-M2			

Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
MIL-WC			

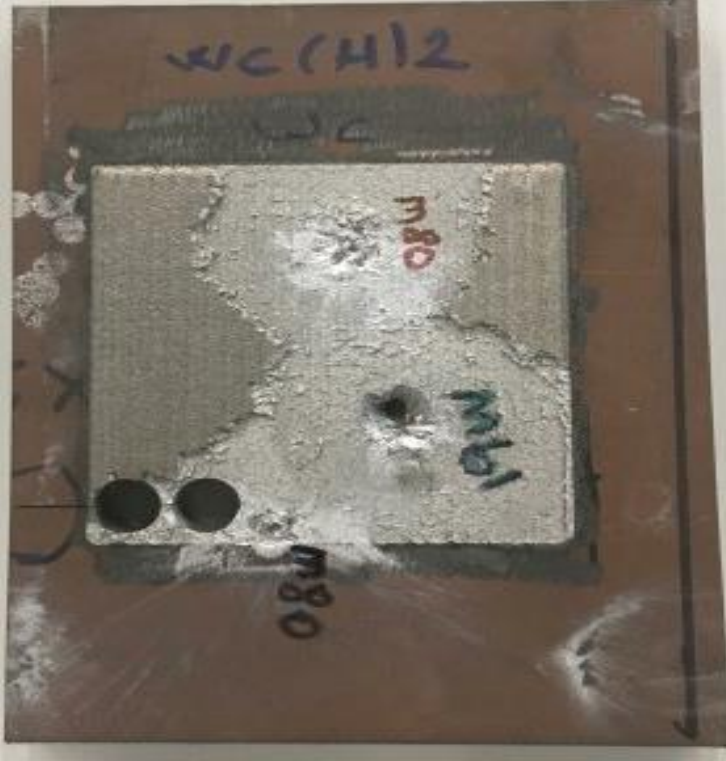
Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
HRX-H13			

Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
HRX-M2			

Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
HRX-WC			

Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
WLX-H13			

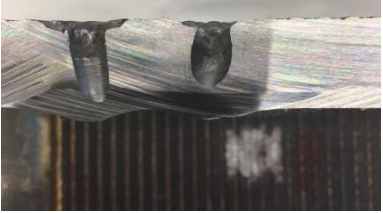
Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
WLX-M2			

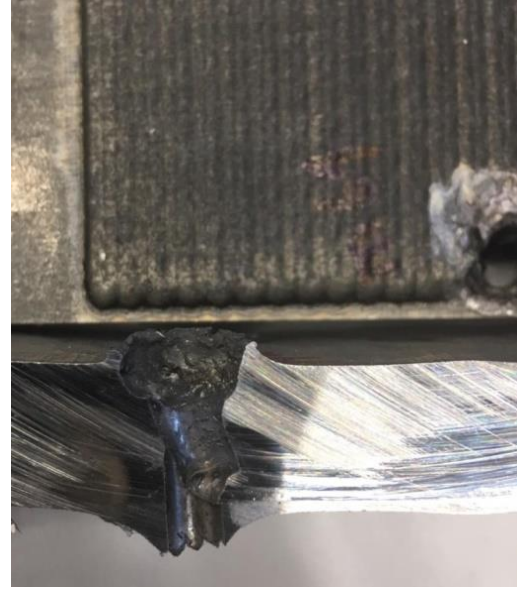
Ek 17: Numunelerin Atış Testi Sonrası Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Darbe Ön Yüzeyi	Darbe Arka Yüzeyi	Darbe Yan Görünüş
WLX-WC			

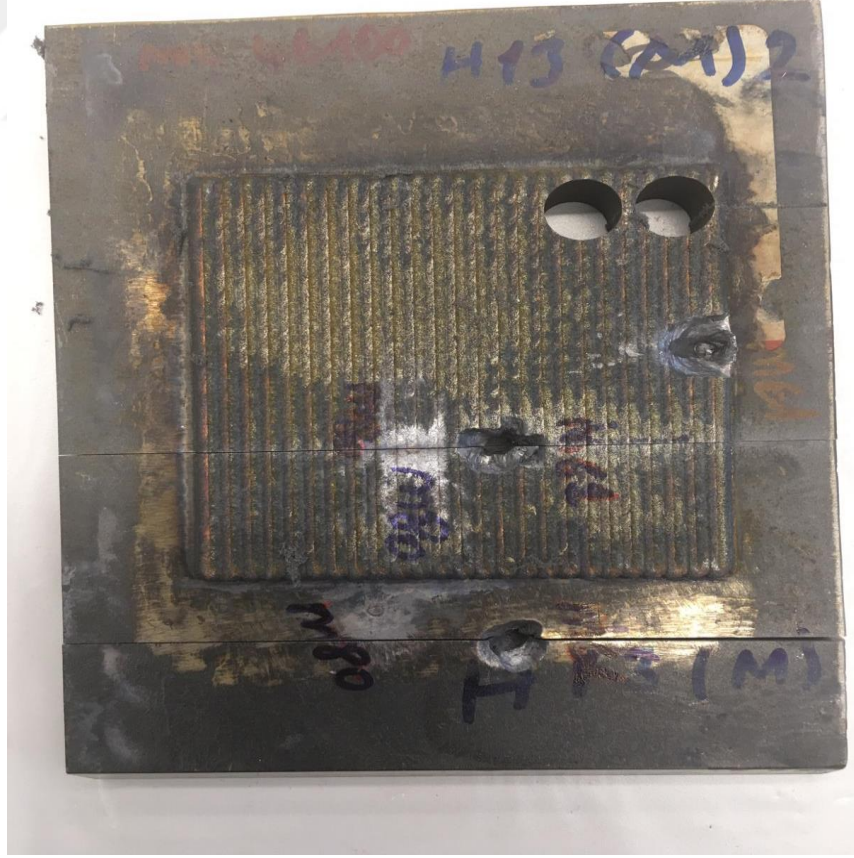
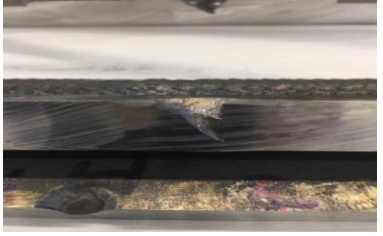
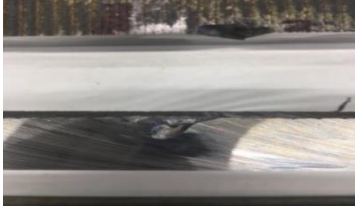
Ek 18: Atış Testi Sonrası Delinen Numunelerin Dilimlenme Fotoğrafları.

Malzeme Türü	Zırh Çeliğinin Kesilen Bölgeleri	Mermi Darbesi Alan Kesit Görüntüleri
WLX-H13		Kaplama   Ana Malzeme 

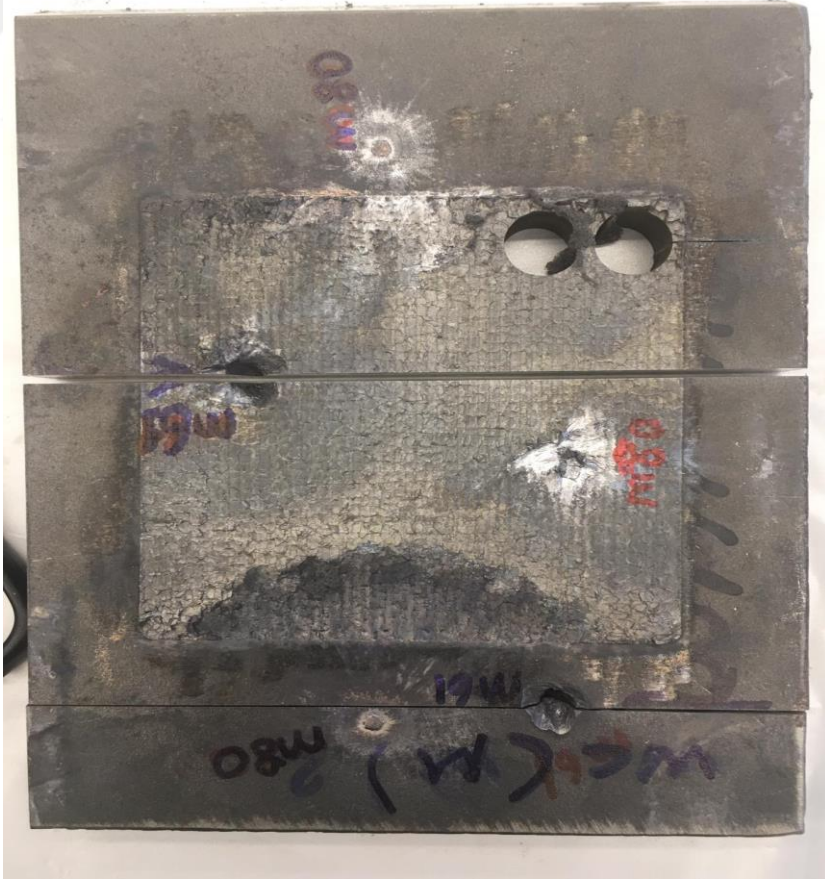
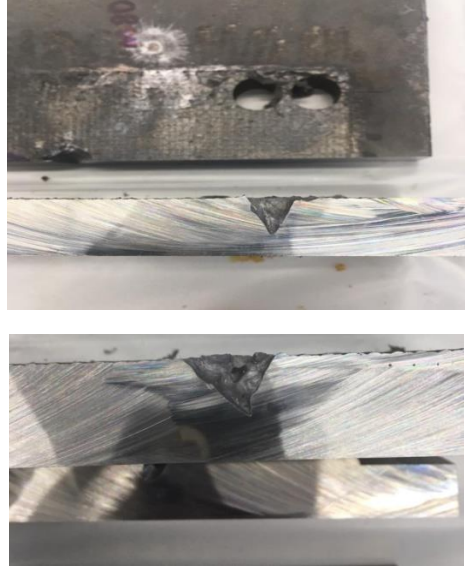
Ek 18: Atış Testi Sonrası Delinen Numunelerin Dilimlenme Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Zırh Çeliğinin Kesilen Bölgeleri	Mermi Darbesi Alan Kesit Görüntüleri
WLX-M2		Ana Malzeme 

Ek 18: Atış Testi Sonrası Delinen Numunelerin Dilimlenme Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Zırh Çeliğinin Kesilen Bölgeleri	Mermi Darbesi Alan Kesit Görüntüleri
MIL-H13		Ana Malzeme   Kaplama  

Ek 18: Atış Testi Sonrası Delinen Numunelerin Dilimlenme Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Zırh Çeliğinin Kesilen Bölgeleri	Mermi Darbesi Alan Kesit Görüntüleri
MIL-WC		Kaplama  Ana Malzeme 

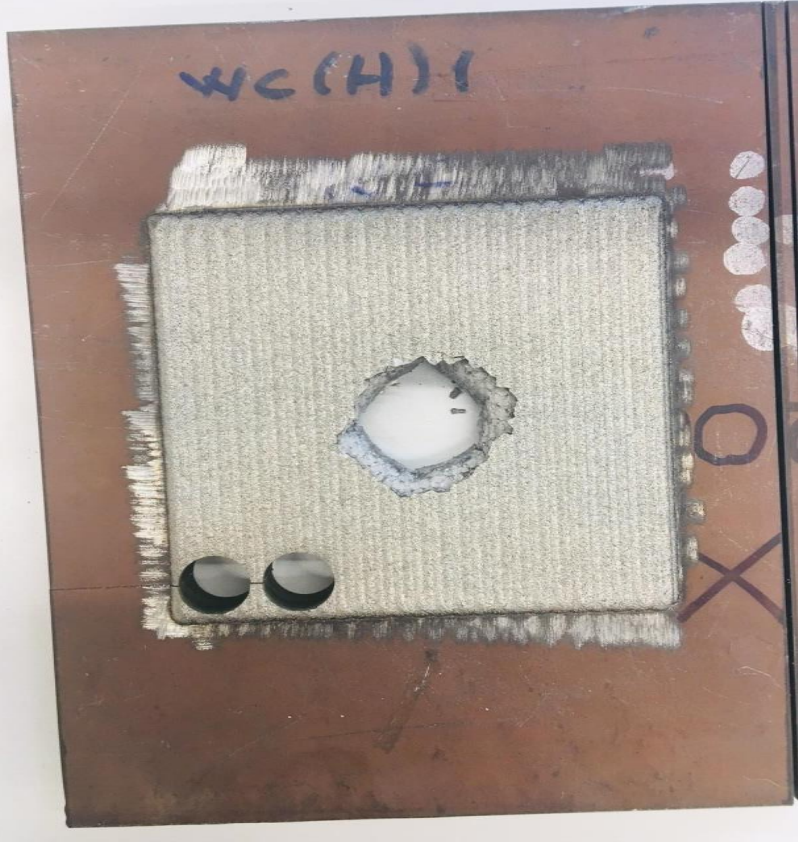
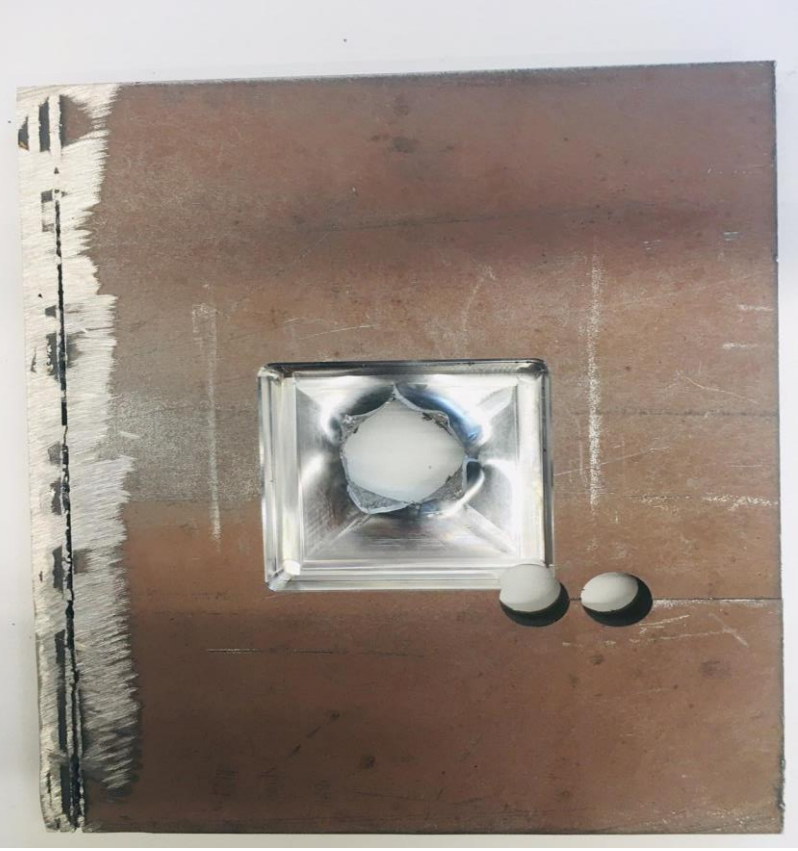
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları.

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
HRX-H13		

Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
HRX-M2		

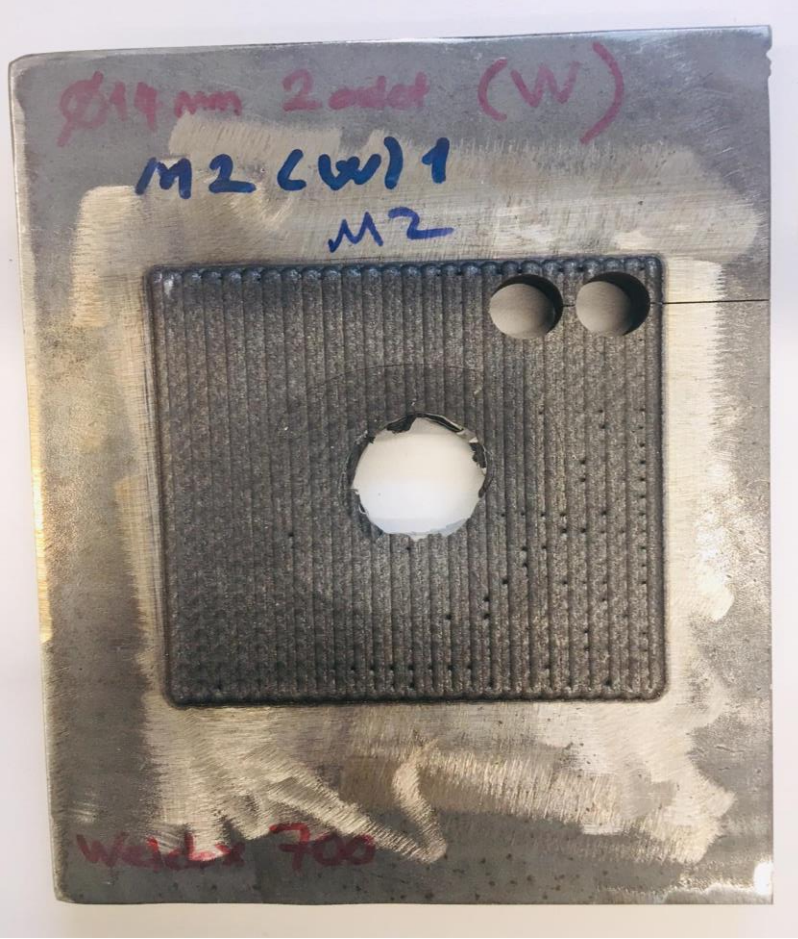
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
HRX-WC		

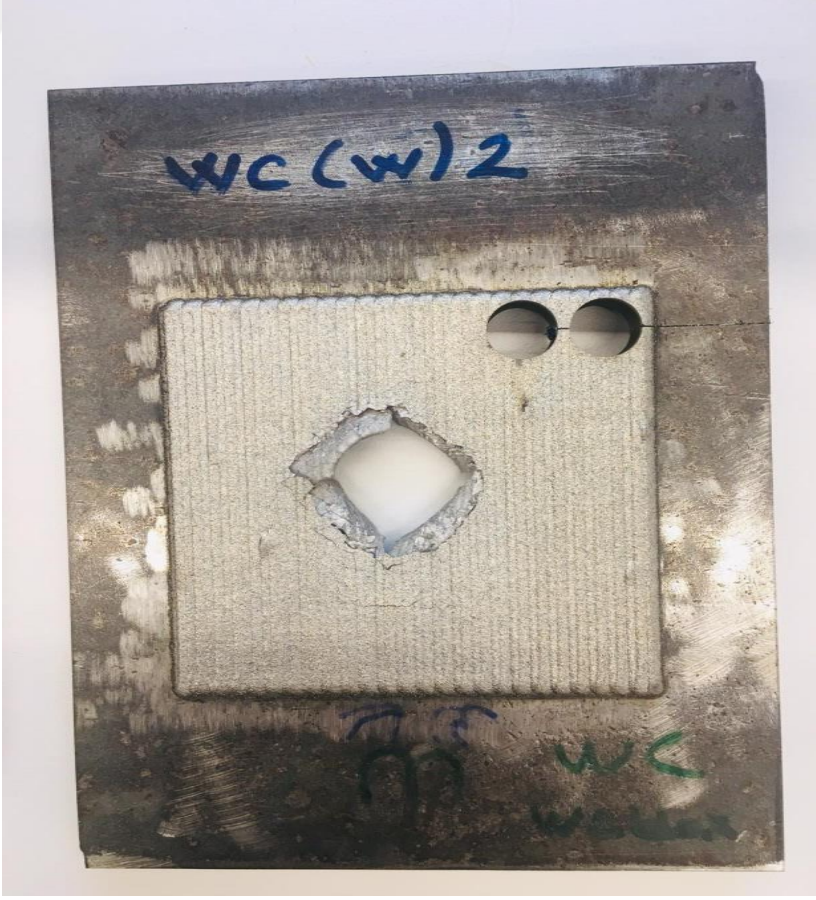
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
WLX-H13		

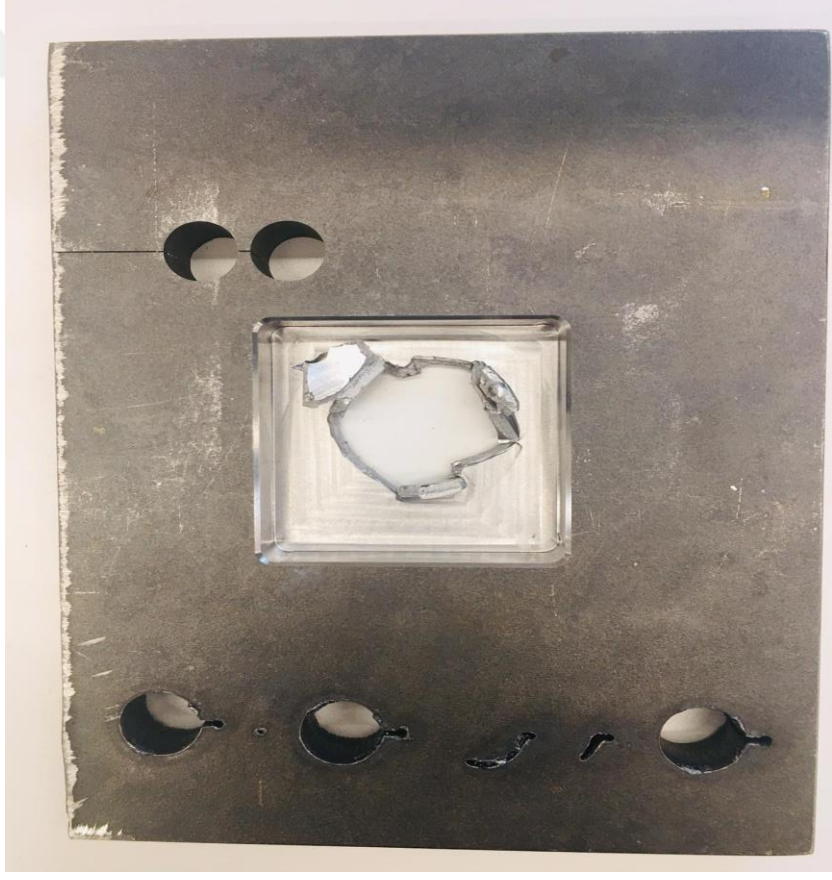
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
WLX-M2		

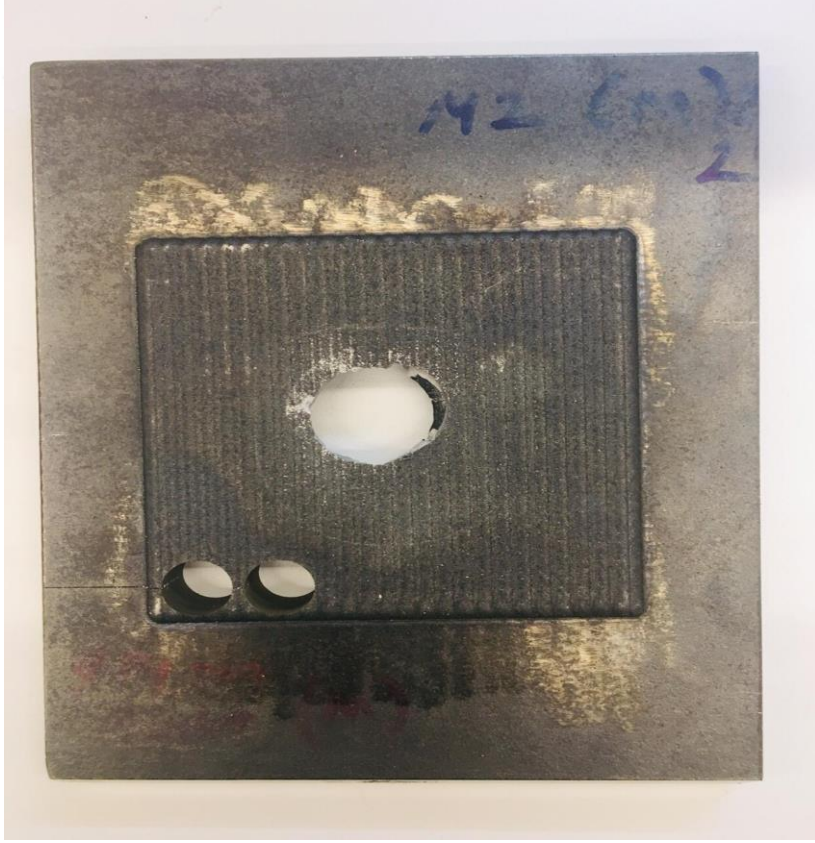
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
WLX-WC		

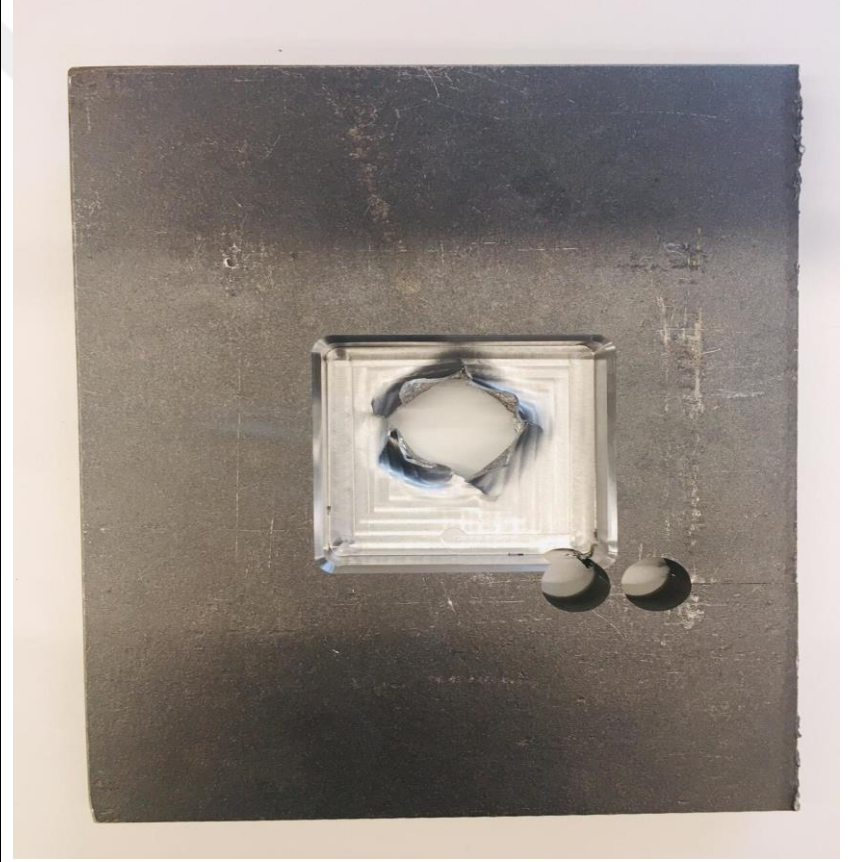
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
MIL-H13		

Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
MIL-M2		

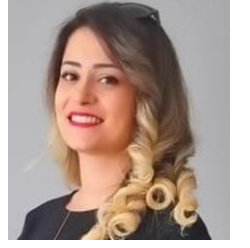
Ek 19: Ağırlık Düşürme Testinden Sonra Numunelerin Fotoğrafları (Devamı).

Malzeme Türü	Ağırlık Düşürme Ön Yüzey	Ağırlık Düşürme Arka Yüzey
MIL-WC		

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ASLAN, Büşra
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.07.1993, Ankara
e-mail : busraa.aslaan@gmail.com



Eğitim

Derece	Üniversite ve Bölüm	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği	Haziran, 2016
	Krakow Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği	Haziran, 2015
Lise	Darüşşafaka Lisesi Fen-Matematik	Haziran, 2012
İlkokul	Şehit Polis Bülent ASLAN İÖO	Haziran, 2002

Meslekî Deneyim

Yıl	Yer	Görev
2019 – devam	TUSAŞ Motor Sanayi A.Ş. (TEI)	Proje Mühendisi
2017 – 2019	T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	Endüstri Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınları

- Aytaç, A., Aslan, B. (2019). Causes of Helicopter Vibrations and Vibration Reduction Techniques. 3th International Multidisciplinary Academic Studies Symposium.
- Aslan, B. (2018). Today's Technologies that will Shape the Future. Ministry of Industry and Technology. 4th Industrial Revolution Department. Journal of Productivity.

Çalışmaları

Developing a Decision Support System Including Investment Prioritization by TOPSIS Method in Defence Industry Areas.

Tezden Türetilen Yayınları

- Aytaç, A., Aztekin K., Aytav, E., Aslan, B. (2019). Performance Improvement in Ballistic Vests. New Horizons in the Defence Engineering. Gece Akademi.
- Aytaç, A., Aslan, B., Çakır, U. (2019). Aktif ve Pasif Koruma Sistemlerindeki Yetkinliğin İncelenmesi ve Bu Alandaki Teknolojik Gelişmelerin Gelecekteki Harp Alanına Etkilerinin Değerlendirilmesi. Azerbaijan Republic Ministry of Defence War College of the Armed Forces/ National Security and Military Sciences, Scientific- Practical Journal. ISSN 2521-1331.
- Aytaç, A., Aslan, B. (2018). Investigation of Technological Improvements and Performance Improvement in Wearable Ballistic Vest Design and Production. 3th International Symposium on New Trends in Science, Engineering and Technologies.