



**ESD TEKNİĞİ İLE DEĞİŞİK ALAŞIM VE ELEMENTLERLE KAPLANMIŞ  
ÇELİK LEVHALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğçe KISIKÇILAR

Danışman

Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

METALURJİ ve MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 18.FEN.BİL.51 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ESD TEKNİĞİ İLE DEĞİŞİK ALAŞIM VE ELEMENTLERLE  
KAPLANMIŞ ÇELİK LEVHALARIN BALİSTİK  
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

**Tuğçe KISIKÇILAR**

**Danışman**  
**Prof. Dr. Şükrü TALAŞ**

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran 2019**

## TEZ ONAY SAYFASI

Tuğçe KISIKCILAR tarafından hazırlanan "ESD Tekniği ile Değişik Alaşım ve Elementlerle Kaplanmış Çelik Levhaların Balistik Performanslarının İncelenmesi" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 18/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Şükrü TALAS

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TALAS  
A.Kocatepe Üniv., Teknoloji. Fak.  
Üye : Doç. Dr. Yusuf KAYALI  
A.Kocatepe Üniv., Teknoloji. Fak.  
Üye : Öğr. Grv. Dr. Rıza KARA  
Uşak Üniv., Tekn. Bil. M.Y.O.

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

11/09/2019



**Tuğçe KISIKÇILAR**

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

ESD TEKNİĞİ İLE DEĞİŞİK ALAŞIM VE ELEMENTLERLE  
KAPLANMIŞ ÇELİK LEVHALARIN BALİSTİK  
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Tuğçe KISIKÇILAR

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Şükrü TALAŞ

Bu araştırmanın amacı, ESD (Elektro-spark Deposition) yöntemi ile Tungsten, Tungsten alaşımları ve paslanmaz çelik kullanılarak çelik plakaların kaplanması sağlanacak ve balistik altı hızlarda delinme kapasitesinin ölçülmesi sağlamaktır. Deneysel verilerin işlenmesi sonucunda kapama malzemesi olarak kullanılacak olan alaşım veya elementin balistik altı hızlarda kullanımının ortaya çıkarılması ve gerek balistik amaçlı ve gerekse sert partikül çarpmasına karşı olan malzeme davranışlarının gözlemlenmesi ve bu davranışların karakterize edilmesi önemlidir.

Bu çalışmada, X42 çeliklerinden hazırlanmış çelik plakalar W, W-Th ve 306 paslanmaz çeliklerle SZ3000 ESD kaplama cihazı ile 3 değişik frekans ve 2 farklı güç ayarlarında yapılmıştır. Bu kaplama işleminin ardından, serbest düşme yapan yaklaşık 1Kg'lık çekiç vasıtasıyla kaplanan malzemelerin delinme performansı araştırılmıştır. Bu aşamadan sonra, kaplama işlemi ve test edilen numunelerin performans analizleri yapılmış ve kaplama kalınlıklarının tesbit edilmesi için optik ve elektron mikroskopunda inceleme yapılmıştır. Ayrıca, kaplama tabakasının elementel ve yapısal karakterizasyonunda yapılmıştır. Kaplama yapılmış malzemelerin serbest düşme cihazında testinin ardından karakterizasyonu yapılacak ve en son aşama olarak deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

**2019, x + 51 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** ESD Kaplama, Balistik İnceleme, W, WC ve Paslanmaz Çelik

**ABSTRACT**  
M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF BALLISTIC PERFORMANCE OF STEEL PLATES COATED  
WITH DIFFERENT ALLOYS AND ELEMENTS BY ESD TECHNIQUE

Tuğçe KISIKÇILAR

Afyon Kocatepe University

Institute of Natural Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

**Supervisor:** Prof. Şükrü TALAŞ

The aim of this research is to use steel Tungsten and Tungsten alloys and stainless steel with ESD (Electro-spark Deposition) method to cover the steel plates and to measure the perforation capacity at ballistic speeds. It is important to reveal the use of the alloy or element to be used as the closing material at the ballistic speed and to observe the behavior of the material against ballistic and hard particle impacts and to characterize these behaviors as a result of the experimental data processing.

In this study, steel plates prepared in M42 steels were made with W, W-Th and 306 stainless steel SZ3000 ESD coating machine with 3 different frequencies and 2 different power settings. After this coating process, the puncture performance of materials coated with was investigated with a free fall weight of about 1 Kg hammer. After this stage, the performance of the plating process and the samples were tested and examined in optical and electron microscopy to determine the thickness of the coating. In addition, elemental and structural characterization of the coating layer was made. After the test, the characterization of the coated materials on the free fall impact device will be carried out and the results of the test have been evaluated as the last step.

**2019, x + 51 pages**

**Keywords:** ESD Coating, Ballistic performance, WC, W and Stainless Steel

## TEŐEKKÖR

Bu araştırmanın konusun belirlenmesinde, deneysel alışmaların ynlendirilmesinde, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın, Prof. Dr. Şükrü TALAŞ, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teŐekkr ederim.

Proje kapsamında sağladığı maddi imkanlar nedeniyle Afyon Kocatepe Üniversitesi, 18.Fen.Bil.51 numaralı projeyi desteklediği için Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna,

Bu araştırma boyunca manevi desteklerinden dolayı aileme teŐekkr ederim.

Tuğçe KISIKÇILAR  
AFYONKARAHİSAR, 2019

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
RESİMLER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	3
2.1 Elektro-Kıvılcım Yığılma (ESD) Kaplama Metodu .....	3
2.1.1 ESD Kaplama İşleminin Tarihçesi .....	3
2.1.2 Elektro- Kıvılcım Yöntemi ve Uygulanma Şekli .....	5
2.1.3 ESD Yönteminin Uygulama Avantajları.....	8
2.1.4 ESD Yönteminin Kullanılan Alanları.....	9
2.2 Balistik Bilimi ve Tarihçesi .....	10
2.3 Balistik Türleri.....	11
2.3.1 İç Balistik(İnternal Balistik), Dış Balistik, Adli Balistik ve Terminal Balistik .....	11
2.4 Zırh Konfigürasyonları .....	12
2.4.1 Pasif Zırhlar .....	12
2.4.2. Reaktif Zırhlar.....	14
2.4.3 Penetrasyon - Perforasyon Teorisi ve Mekanizması.....	15
2.5 Düşük Enerjili Darbe Testleri .....	15
2.5.1 Sarkaç Testleri (Izod ve Charpy).....	15
2.5.2 Ağırlık Düşürme Testleri(Serbest Düşme Testleri).....	16
3. MATERYAL METOT.....	18
3.1 Kullanılan Malzeme ve İşlemler .....	18
3.1.1 ESD Yöntemi ile M42 Numunelerinin Kaplanması İşlemi.....	19
3.1.2 Kaplanan M42 Numunelerinin Mikro Sertliklerinin Ölçülmesi.....	20

3.1.3 Kaplanan Numunelerin Ağırlık Düşürme Testleri .....	21
3.1.4 ESD ile Kaplanan Numunelerin Metalografik İşlemleri .....	23
3.1.5 Yüzey ve Yapısal Karakterizasyon İşlemleri .....	24
4. BULGULAR.....	26
4.1 ESD ile Yapılan Kaplamaların Makro Optik Görüntüleri .....	26
4.2 Kaplama Sertliklerinin Analizi .....	28
4.3 W, W-Th ve Paslanmaz Çelik Kaplama Kalınlıklarının Analizi .....	30
4.4 M42 Altlık Malzemesi Üzerine yapılan Kaplamaların Karakterizasyonu.....	35
4.6 M42 Altlık Üzerine Tungsten Toryum (W-Th) Kaplama Karakterizasyonu ....	38
4.7 Kaplama Numunelerin Ağırlık Düşürme Test Analizleri.....	40
4.8 Balistik Serbest Düşme Çarpma Deneyinin Kinetik Analizi.....	45
5. SONUÇLAR.....	48
6. KAYNAKLAR .....	49
ÖZGEÇMİŞ .....	51

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

A	Amper (Akım)
C	Karbon
Cr	Krom
°C	Derece (Santigrat)
dk	Dakika
gr	Gram
Hz	Hertz (Frekans)
J	Joule
K	Kelvin
Kg	Kilo Gram
Kj	Kilo Joule
nm	Nanometre
μ	Mikrometre
sn	Saniye
Si	Silisyum
T	Sıcaklık
V	Volt
W	Tungsten
W-Th	Tungsten Toryum
%	Yüzde
α	Alfa

### Kısaltmalar

---

AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
EDX	X-Ray Analizi
ESD	Electro Kıvılcım Biriktirme
HV	Vickers Sertlik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
S.S.C.B.	Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
OM	Optik Mikroskop
XRD	X-ışını Difraksiyonu

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 2.1</b> ESD Kaplama Yöntemi ile Kaplamanın Şematik Gösterimi .....	6
<b>Şekil 2.2</b> ESD Kaplama Sisteminin Devre Şematik Gösterimi .....	7
<b>Şekil 2.3</b> ESD’de Kaplanacak Yüzeye Malzeme Kütle Transferi.....	7
<b>Şekil 2.4</b> Yüksek Hızlı Balistik Objelerin Çarpma Durumlarındaki Muhtemel Hedef Zırhın Kırılma Şekilleri .....	13
<b>Şekil 2.5</b> İstatiksel Hızın İfadesi.....	13
<b>Şekil 3.1</b> Tez Çalışmasındaki İş Akış Şeması .....	18
<b>Şekil 4.1</b> Frekansları 900Hz Voltajları Farklı Olan Numunelerin Kaplama Kalınlıkları .....	30
<b>Şekil 4.2</b> Frekansları 1600 Hz Voltajları Farklı Olan Numunelerin Kaplama Kalınlıkları .....	31
<b>Şekil 4.3</b> Frekansları 1600 Hz Voltajları Farklı Olan Numunelerin Kaplama Kalınlıkları .....	35
<b>Şekil 4.4</b> 150V ve 1600Hz de Paslanmaz Çelik Kaplama Tabakasının EDX Sonucu...36	
<b>Şekil 4.5</b> Yüzeyi 150V ve 900 Hz ile Tungsten Kaplanan Alaşımın XRD Sonucu .....	37
<b>Şekil 4.6</b> 150V ve 900Hz de Tungsten Kaplanan Alaşımının EDX Sonucu.....37	
<b>Şekil 4.7</b> 150V ve 900 Hz de Yapılan Tungsten Toryum Kaplamanın XRD Sonucu.....39	
<b>Şekil 4.8</b> Yüzeyi 150V ve 900Hz ile Tungsten Kaplanan Alaşımının EDX Sonucu .....	39

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Çizelge 3.1</b> M42 Çeliği üzerine ESD kaplama sırasında kullanılan numune sayıları....	19
<b>Çizelge 3.2</b> M42 Çeliğinin W, W – Th ve Paslanmaz Çelik Elektrodlarla Elektro Kırılcım kaplama sırasında kullanılan güç ve frekans değerleri.....	19
<b>Çizelge 3.3</b> M42 Alaşımli Çelik Kaplama Elektrodun Kimyasal Özellikleri.....	19
<b>Çizelge 4.1</b> Kaplama Sonrası Sertlik Değerleri.....	29
<b>Çizelge 4.2</b> Frekans ve Voltajları Farklı Olan W, W - Th ve Alaşımli Çelik Elektrodla Kaplanan Numunelerin 500x Büyütmeye Ölçülen Kaplama Kalınlıkları.....	30
<b>Çizelge 4.3</b> M42 Çelik Plaka Üzerine 150 volt ve 1600Hz'de Kaplanan Paslanmaz Çelik, Tungsten(W) ve Tungsten Taryum (W-Th) Numunelerinin 1Kg Yükte İz Genişliği, İz İndent Genişliği ve İz İndent Derinlikleri (mm) .....	44

## RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
<b>Resim 2.1</b> Elektro Kıvılcım Yöntemi (ESD) ile onarım yapılabilmektedir .....	5
<b>Resim 2.2</b> Farklı Geometriye Sahip Darbe Test Uçları (a) Düz, (b) Yarı Küresel, (c) Ogival, (d) Konik.....	17
<b>Resim 3.1</b> Kullanılan Deney Düzeneği ve Elektro Kıvılcım biriktirme Cihazı (ESD) ..	20
<b>Resim 3.2</b> Numunelerin Sertliklerinin Ölçüldüğü Mikro Sertlik Cihazı, Shimadzu HMV2.....	21
<b>Resim 3.3</b> Ağırlık Düşürme Test Cihazı .....	21
<b>Resim 3.4</b> Serbest Ağırlık Düşürme Test Cihazının Makara Sistemi .....	22
<b>Resim 3.5</b> Numune Tutucu Plaka Üzerindeki Sabitleme Silindirin Yandan Görünümü .....	22
<b>Resim 3.6</b> Tornada İşlenmiş Sertleştirilmiş Uçlar .....	23
<b>Resim 3.7</b> Numunelerin Soğuk Kalıplanmış Hali .....	23
<b>Resim 3.8</b> Mikro Yapı Analizi İçin Zımparalama İşleminin yapıldığı GRİPO 2V Cihazı .....	24
<b>Resim 3.9</b> LEO 1430 VP Model Taramalı Elektron Mikroskobu.....	25
<b>Resim 3.10</b> XRD Analizi için Kullanılan Bruker XRD Cihazı.....	25
<b>Resim 4.1</b> Yüzeyleri W ile Kaplanan Numuneler .....	26
<b>Resim 4.2</b> Yüzeyleri W-Th ile Kaplanan Numuneler .....	27
<b>Resim 4.3</b> Yüzeyleri Paslanmaz Çelik ile Kaplanan Numuneler .....	27
<b>Resim 4.4</b> Tungsten (W) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 900Hz 500x Tabaka Mikroyapısı .....	32
<b>Resim 4.5</b> Tungsten (W) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 1600Hz 500x Tabaka Mikroyapısı .....	33
<b>Resim 4.6</b> Tungsten-Toryum (W-Th) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 900Hz 500x Tabaka Mikroyapısı.....	33
<b>Resim 4.7</b> Tungsten-Toryum (W-Th) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 1600Hz 500x Tabaka Mikroyapısı.....	33
<b>Resim 4.8</b> Paslanmaz Çelik (P.Ç.) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 900Hz 500x Tabaka Mikroyapısı .....	33
<b>Resim 4.9</b> Paslanmaz Çelik (P.Ç.) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve	

150V, 1600Hz 500x Tabaka Mikroyapısı .....	34
<b>Resim 4.10</b> 150V ve 1600 Hz Paslanmaz Çelik Kaplama Tabakasının SEM Görüntüsü .....	35
<b>Resim 4.11</b> 150V ve 900 Hz Tungsten Kaplanan Alaşımının SEM Görüntüsü .....	37
<b>Resim 4.12</b> 150V ve 900 Hz Tungsten Toryum Kaplamanın SEM Görüntüsü .....	39
<b>Resim 4.13</b> 150 V 1600 Hz Kaplanan Numuneler a) W, b) W-Th ve c) Paslanmaz Çelik .....	41
<b>Resim 4.14</b> Kaplamasız M42 Çeliği Üzerindeki Serbest Düşme Deformasyon İzi .....	41
<b>Resim 4.15</b> Paslanmaz Çelik Kaplamalı M42 Çeliği Üzerindeki Deformasyon İzi .....	42
<b>Resim 4.16</b> W Kaplanmış M42 Çeliği Üzerindeki Deformasyon İzi. ....	42
<b>Resim 4.17</b> W-Th Kaplanmış M42 Çeliği Üzerindeki Deformasyon İzi .....	43
<b>Resim 4.18</b> M42 Çeliği Üzerine Yapılan Bir Kaplamanın Deformasyon İndent Genişliğinin Ölçülmesi.....	43
<b>Resim 4.19</b> M42 Çeliği Deformasyon İz Yüksekliğinin Ölçümü .....	44
<b>Resim 4.20</b> M42 Çeliği Deformasyon İndent Derinliğinin Ölçümü .....	44

## 1. GİRİŞ

Günümüzde endüstrisinde kullanılan makine, cihaz ve ekipmanlarına ait parçaların çalışma prensipleri incelendiğinde büyük çoğunluğunda makinelerin sadece yüzeylerinin genelde çalıştığını bu sebeple en çok çalışan yüzeylerin yorulduğunu görmekteyiz. Yıpranan bu yüzeylerin, makinenin diğer ekipmanlarına bütününe göre düşük veya yüksek sürtünme katsayısına sahip, çalışma alanına göre ısıya, aşınmaya ve korozyona daha mukavemetli, daha sert v.s. olması gerektirdiğini fark etmekteyiz. Gerekli koşulların yerine getirilmesi yani malzeme yüzeyinde istenilen özellikleri taşıyan kimyasal ve fiziksel özelliklerin sağlanması değişik teknolojik proseslere dayanmaktadır. Bunlar mekanik, kimyasal, fiziksel, termal v.s. yöntemlerdir. Bu yöntemler bağımsız bir şekilde kullanılabilirdiği gibi bir birleri ile komplike halinde de kullanılmaktadır. Bir kaplama prosesi ile yüzey özellikleri artırılmış olan metalik alaşımlar veya metal matrisli kompozitler geliştirilen yüzey işlemleri sayesinde birçok alanda yaygın olarak kullanılabilirler. Ana malzememizin yüzeyi değişik özelliklere sahip malzemelerle kaplanır bu şekilde yeni geliştirilen yüzey direk olarak çalışırken, asıl ana malzemenin yapısının fiziksel ve kimyasal özellikleri büyük bir ölçüde değişikliğe uğramamaktadır.

ESD ile kaplama yönteminde; alaşımı sağlayan anot malzemesi ile alaşımlanan diğer bir ifadeyle kaplanacak olan numune katot yüzeyi arasında sağlam bir şekilde yapışan bir kaplama tabakası meydana gelmektedir. Bu kaplama iki yüzey arasında belirli bir sınır oluşturmaz ve anot malzemesinin katot malzemesine karışımı gerçekleşir. Kaplama tabakasının kimyasal yapısı incelendiğinde tabakanın üst kısmı tamamen anot elektrotun kimyasal yapısına sahiptir. Yüzeyden katot ana malzemeye doğru inildikçe anot malzemesinin yüzdesi sifira yaklaşmakta ve kaplama tabakası optik mikroskopta açıkça görülmektedir. ESD kaplama yönteminde sistem mikro hacim gerçekleşmekte ve hızlı yapılmaktadır. Bu nedenle altlık malzememizin yüzeyinde yani katotta ısı birikimi gerçekleşmez. Kaplama esnasında meydana gelen her bir spark çok kısa süre içerisinde olduğu için ergiyik halde bulunan anot elektrot, katot olan ana malzememizi ısıtırmaz. Bu nedenle ısı altında özellikleri değişebilen malzemelerin Elektro-Spark yöntemi ile kaplanması daha elverişlidir. Ayrıca kaplama yüzeyinde önemli bir temizlik

ihtiyacına gerek duyulmaz. ESD yönteminde elektrik iletkenliği olan metal ve alaşımlar rahatlıkla kaplanabilmektedir. ESD kaplama yöntemi ile elde edilen sert yüzey kaplamalar, aşınmaya tabi yüzeylerde, yüksek sıcaklıklarda, oksitlenmeye ve korozyona tabi tutulan şartlar altında çalışan büyük parçalara uygulandığı gibi küçük parçalarda da aşınma dirençlerini arttırmak ve malzeme yüzeylerini korumak ve malzemenin kullanım ömrünü artırmak amacıyla da yapılmaktadır.

Bu çalışmamızda, düşük karbonlu 148 HV sertliğe sahip AISI 1008 çeliği üzerine Elektro-Kıvılcım Alaşım biriktirme yöntemi ile farklı frekans ve voltlarda Tungsten(W), Tungsten Karbür(WC) ve Alaşımlı Elektrot ile kaplama yapılarak bu kaplamaların malzeme yüzeyinde meydana getirdiği sertlik değerlerinin darbe direnci karşısında balistik özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi üzerine yapılan teori ve uygulamaları sunulacaktır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Elektro-Kıvılcım Yığma (ESD) Kaplama Metodu

#### 2.1.1 ESD Kaplama İşleminin Tarihçesi

Yunanlı filozoflarının çok eski çağlarda kehribar ve metal objenin sürtünmesiyle oluşan elektriksel kıvılcımları gözlemledikleri tarihten itibaren elektriksel yük boşalması olan kıvılcım atlaması yani elektrik kaynaklı kıvılcım olayı bilinmektedir. Elektro- Kıvılcım veya elektrik kaynaklı kıvılcım ifadesi birbirine çok yakın olan ve elektrikle yüklü cisimler arasındaki elektriksel potansiyel farkın atlama eşik değerini aşması sonucu sahip oldukları elektrik yükünün cisimler arasında yer değiştirmesinin meydana gelmesidir. Bu olayı, kısaca, elektronların transferinin mikro boyutta gerçekleşmesi olarak da ifade edebiliriz (Topaç 2014). Elektro kıvılcım ile kaplama (ESD) yönteminde, malzeme yüzeyinde meydana gelen ve servis hizmeti sırasında kullanımdan kaynaklanan yüzeysel yıpranma, yüzey aşınma ve şekilsel ve boyutsal değişiklikleri düzeltmek için belirlenen özellikler doğrultusunda arzu edilen iletken elektrod malzemesi ile metalik veya iletken altlık yüzey üzerine homojen bir tabaka olarak biriktirmek için değişken frekans ve güç değerleri ile birlikte kullanılır (Bozkurt 2018).

İngiliz bilim adamı Joseph Priestley 1867 yılında yaptığı çalışmalarda elektro-kıvılcımın özellikle metallerin üzerinde elektro-erozif bir etki meydana getirdiğini gözlemlemiş, ve daha sonra ise Priestly'in bu gözleminin ardından bu elektor-erozif sürecin malzemenin yüzey karakteristiğini olumlu etkilediğini 1924 yılında H. S. Rawdon'un gerçekleştirdiği çalışmalarla tespit edilmiştir (Yılmaz 2012).

H. S. Rawdon yaptığı çalışmada, demir esaslı bir kütle ile yine daha ince bir demir elektrod çubuk kullanarak aralarına yüksek gerilim uygulamış ve elektriğin boşalmasıyla meydana gelen elektrik kıvılcımlarının, demir kütlenin yüzeyine damlalar halinde yapışarak daha sert bir tabakanın meydana geldiğini gözlemlemiştir. Ortaya çıkan bu sertlik artışını, elektrik kıvılcımları ergiten yüksek ısınının, damlacıkların

çarptığı bölgenin ani bir şekilde soğuması neticesinde, demir kütle yüzeyinde martenzitik dönüşümün gerçekleşmesiyle olduğunu belirtmiştir (Korkmaz 2008).

N.C.Welsh ise 1957 yılında, çelik malzemelerin yüzeyinde elektriksel sürtünme ile ortaya çıkan yüksek ısının sürtünen yüzeyler üzerindeki etkilerini araştırırken Rawdon'un daha önce tespit ettiği benzer bulgularla karşılaşmıştır. Welsh daha sonraki araştırmalarında da N ve C'un yüzeyden kolayca emilebildiği indükleyici atmosfer veya çeşitli yağlayıcıların bulunduğu ortamlarda elektro kıvılcımın yapılması durumunda ise yüzey sertliğinde de önemli bir miktarda artış meydana geldiğini gözlemlemiştir. Yapılan diğer araştırmalarda, yağlayıcı içerisinde titanyum malzemeler yüzeyi üzerinde elektro-kıvılcım oluşturularak, TiC içeriği yüksek yüzeyler elde edilmiş ve aşınma direnci düşük, daha mukavemetli, yüzeyi daha dayanıklı bir malzeme haline getirilmiştir (Korkmaz 2008).

ESD yani elektro-kıvılcım kaplama yöntemi ile ilk defa metalik takımların yüzeylerinin işlenmesi süreçlerini ve yeni ve bileşim olarak farklı bir tabaka oluşumunu sağlayarak kaplama çalışmalarını, Lazarenko ve çalışma arkadaşları 1943 yılında gerçekleştirmiştir. Bu şekilde elektro-kıvılcım yönteminin bilinen ilk temellerini atmışlardır. İkinci dünya savaşı sürecinde ve sonrasında özellikle Rusya da elektro-kıvılcımla kaplama prosesi hakkında ciddi ilerleme gerçekleştirilmiş ve aşınmaya maruz kalan makine elamanlarının yüzeylerinin kaplanarak sertleştirilmesi ve kaplanmış makine elamanlarının kullanım ömürlerinin uzatılması hakkında kayda değer çalışmalar sağlanmıştır.

Demir ve alaşımlarının örneğin çeliğin kullanıldığı yerlerde, hem çeliğin yapısal yani mekanik özelliklerini artırmak ve yüzey özelliklerini iyileştirmek için çelik iş parçası yüzeyine kendi bileşiminde ve ayrıca iç yapısından farklı elektrod malzemesi kullanılarak Elektro Kıvılcım yöntemi ile kaplamalar gerçekleştirilmiş ve bu kaplamaların özellikleri örneğin yapısal ve mekanik özellikleri, farklı test yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. AISI316 paslanmaz çelik yüzeyine WC, Cr C gibi sertliği artıran veya oldukça yüksek sertliğe sahip bileşik veya alaşımlarla, Co içeren orta sertlikteki alaşımlar ve Ag ve Ni gibi daha yumuşak metal elektrodlarla kaplama

yapılmıştır. Bu elektrodlar ile paslanmaz çelik yüzeylerine gerçekleştirilen kaplamalar, yüksek yoğunluklu aşınma ve burulma testlerine tabi tutulmuş, yüzeyi kaplanan paslanmaz çelik numunelerin bu aşınma ve burulmaya karşı oldukça iyi direnç gösterdikleri tespit edilmiştir (Korkmaz 2008).



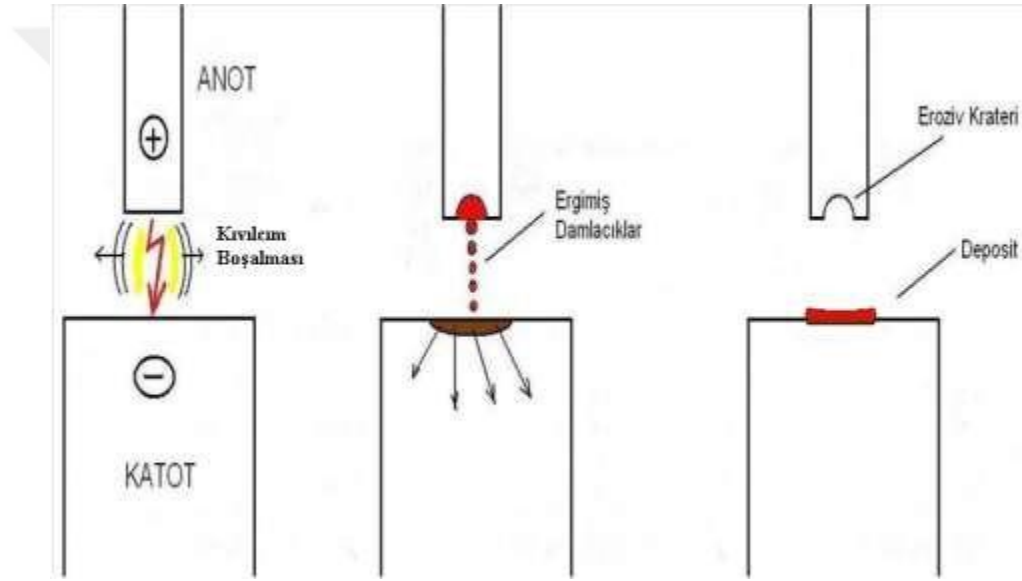
**Resim 2.1** Elektro Kıvılcım Yöntemi (ESD) ile onarım yapılabilir.

Elektro Kıvılcım Yığılma veya Biriktirme (ESD) yöntemi ile ilgili araştırmaların büyük bir oranı S.S.C.B. (Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği) zamanında gerçekleştirilmiş olup, Sovyet kaynaklı akademik yayınlarının bir çoğunda ESD kaplama yönteminin aşınmaya maruz kalan makine elemanlarında (türbin bıçakları, torna takımları, miller, kalıplar, matkap uçları gibi) aşınmış kısımlarda kullanılarak söz konusu parçaların tamir, servis ve ticari kullanım ömürlerinin artırılması ve diğer özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda başarılı ve yaygınlaşması muhtemel bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Mısırlıoğlu 2006).

### **2.1.2 Elektro- Kıvılcım Yöntemi ve Uygulanma Şekli**

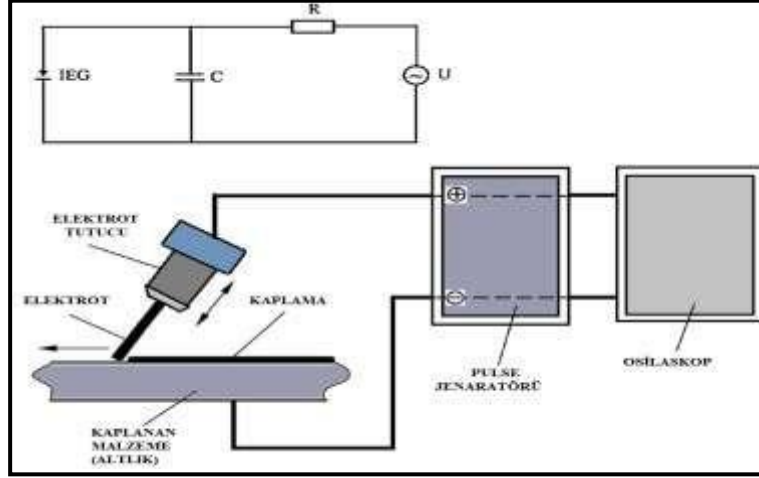
Elektro- Kıvılcım Biriktirme (ESD) yöntemi metal veya iletken olan metalik karakterdeki yüzeylerin özelliklerini gerek koruyucu veya korumasız atmosfer

ortamında, birbirlerine belirli temas mesafesinde duran kaplama malzemesi anot elektrod ile kaplanacak malzeme katot iletken altlık malzeme yüzeyi arasında RC(Direnç Kapasitör Esaslı Frekans Jeneratörü) tarafından belirlenen bir frekansta kısa süreli yüksek akımlı kare veya sinüsoydal şekilli dalgaların oluşturmuş olduğu elektro-kıvılcımların yarattığı mikron ve altı boyuttaki damlalar formunda madde transferini sağlayan bir yöntemdir. Elektrot ucundan koparak ayrılan damlacıklar, ergimiş halde olup, altlık numune yüzeyine ark kuvvetleri vasıtasıyla yönelerek sahip olduğu ısının etkisiyle altlık malzemenin yüzeyini de ertirir ve yüzeye yapışarak bir katman oluşturur (Talaş 2019).



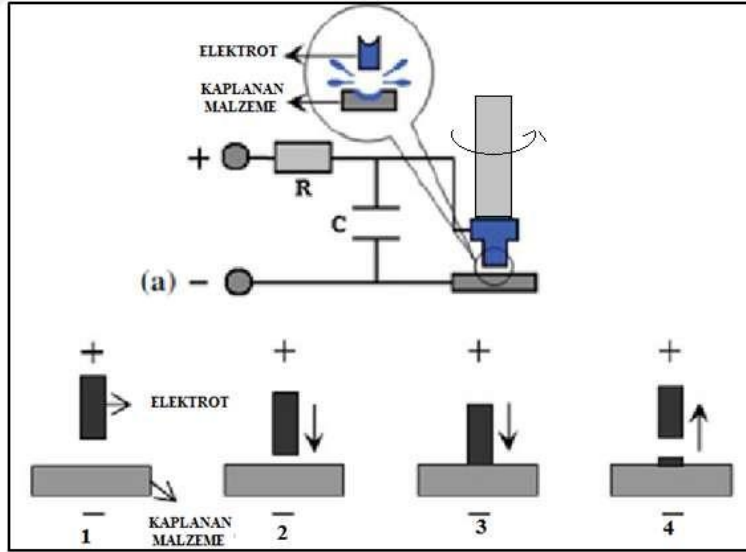
**Şekil 2.1** ESD Kaplama Yöntemi ile Kaplamanın Şematik Gösterimi (Korkmaz 2008).

Yani, ESD kaplama yöntemi çok kısa sürede (mikro saniyeler içinde) ark atlamasını veya elektrik kıvılcım atlamasını, elektriksel potansiyel farkından dolayı altlık malzeme ile elektrot malzemesi arasında oluşmasına yol açar. Meydana gelen bu mikro elektrik kıvılcımları sayesinde elektrot malzemesinin bir kısmı, mikro boyuttaki damlacıkların yerçekimi, statik ve dinamik kuvvetlerin tesiriyle altlık malzeme yüzeyine yapışması ya da transfer olmasından ibarettir (Topaç 2014).



Şekil 2.2 ESD Kaplama Sisteminin Devre Şematik Gösterimi (Bozkurt 2018).

ESD işlemi için en basit olarak kullanılan güç kaynağı sistemi bir doğru akım (DC) doğrultucu ve deşarj devresinden oluşur. Kaplama voltajı ve kaplama frekansına ait parametreler genellikle, güç kaynağı üzerinde kolayca ayarlanabilmektedir. Elektrik yüklü kondansatörleri boşaltmak için güç kaynağı ya bir direnç-kondansatör devresi (R-C) ya da mikroişlemci kontrollü bir boşaltma devresinden yararlanır (Şekil 2.2).



Şekil 2.3 ESD'de Kaplanacak Yüze Malzeme Kütle Transferi (Bozkurt 2018).

Kaplama esnasında darbeler şeklinde uygulanan yüksek elektrik akımı ana malzeme ve elektrot malzemesi arasındaki küçük boşluktan geçerken temas alanında erime meydana getirecek kadar ısı oluşmasına neden olur. Fakat gerçekleşen akımın çok kısa sürede

cereyan etmesi nedeniyle ergime tamamlanır ve ani soğuma meydana gelir. Bu sebeple ana malzemeye geçen ısının yayılmasına imkan tanınmış olur. Altlık malzemesinin ısısında önemli bir oranda değişimin olmaması ısıdan etkilenen bölgenin minimize olmasını sağlayarak kaplama tabakası dışındaki mikro yapıda bir değişikliğin olmasını engeller (Topaç 2014).

Arkın meydana gelmesini sağlayan dielektrik ortam (hava, argon vb.) sayesinde enerjinin boşaldığı tabaka plazma da elektrot ve altlık arasında iyonize bir kanal meydana getirerek boşalan akımı sürdürür. ESD işleminin yapıldığı ortam gazı kütle transferi işleyişini ciddi bir şekilde etkiler. Hava ve nitrojen gibi gazlar aşırı termal iletkenliğe sahip bir plazma meydana getirerek damlacık şeklinde kütle akışına sebep olurlar (Kou 2002). Bu sayede elektrotun uç kısmında erimiş damlacıklar meydana gelir ve plazmanın hareketlendirmesiyle altlığa düşer. Altlığa düşen damlacıklar yüzeye çarptıktan sonra dağılarak ve yayılarak pürüzlü ve kalın bir kaplama yüzeyinin oluşmasına sebep olur. Fakat ark ortamında kullanılan argon gazı kolayca iyonize olarak daha düşük termal iletkenliğe sahip bir plazma meydana getirerek ve ark sırasında iletken etrafında oluşan manyetik sıkıştırma etkisi ile de eriyik metal damlacıklarının ince partiküller şeklinde yüzeye doğru fırlamasını sağlayacaktır. Temel olarak ark sırasında kullanılan ortam gazlarının etkisi, damlanın yüzey enerjisini etkileyerek transfer modlarını değiştirmektir (Kou 2002, Lancaster 1980). Kütle taşınımının ilk tabakaları elektrot ve altlığın ilk önce erimiş ve daha sonra katılmış olan kısmından meydana gelir. Kütle transferi ile ilk katman üzerine yeni katmanlar meydana getirilince kaplama bölgesinin kimyasal yapısı kullandığımız elektrotun kimyasal yapısına ulaşır buda hedefimiz olan koruyucu kaplama tabakamızın oluşumunun tamamlandığını bize gösterir (Mısırlıoğlu 2006).

### **2.1.3 ESD Yönteminin Uygulama Avantajları**

ESD yönteminin kaplama yöntemi olarak kullanılması, bu yöntemin diğer kaplama yöntemlerine göre bazı avantajlara sahip olmasından ileri gelmektedir. (Başargan 2010); bu avantajlar şunlardır:

- Her bir kıvılcımdaki enerji miktarı çok düşük olup katotda oluşan ısı miktarı düşüktür ve ana malzemede ciddi bir mikro yapı değişimi ve çarpılmalar oluşmaz. Ana malzeme ince ise, kaplama tabakası dışında ana malzemenin sıcaklığı işlem esnasında çok az değişir, eğer kütle büyükse o zaman ortam sıcaklığında kalır (Mısırlıoğlu 2006).
- Yüksek hızlı soğumadan kaynaklı ince taneli yapılar ve nano yapılar ve hatta amorf yapılar oluşabilmektedir.
- ESD yöntemi kimyasal esaslı diğer yüzey kaplamalara göre, yüksek yapışma mukavemetini sahip olduğu metalürjik bağ sayesinde oluşturur, ve bundan dolayı oldukça iyi bir aşınma ve erozyon özellikleri sergiler.
- Bu yöntemde yüzey hazırlıkları, minimum düzeydedir; temiz ve düzgün metalik olan yüzeylere hazırlıksız uygulanır.
- Elektriksel iletken ve ergiyebilen bir çok malzeme, metalik esaslı ana malzeme üzerine biriktirilebilmektedir.
- Uygulanan yöntem gayet basit ve kolaylıkla öğrenilebilir ki, kullanıcının el becerisine bağlı olarak kaplamaların değişik yüzeylere veya karmaşık şekilli yüzeylere uygulanması sağlanabilir. Bu ayrıca, çalışılan elektrodun boyutunun küçük olması ile de alakalıdır (Başargan 2010).
- ESD ile kaplama işlemi tekrar edilebilirdir ve parametreleri kolaylıkla ayarlanır ve kontrol edilebilir.
- ESD kaplama ekipmanları kolaylıkla taşınır ve kaplama sırasında işlem için çok özel atmosferik şartların ve gaz karışımlarının kullanılmasına gerek yoktur (Topaç 2014).
- Elektrod ark, MIG ve MAG ve diğer eark kaynak teknikleri gibi, kullanıcının rahatını sınırlayan veya tehlikeli ve zararlı unsurlar içermez (Mısırlıoğlu 2006).

#### **2.1.4 ESD Yönteminin Kullanım Alanları**

ESD yöntemi uygulanarak yapılan kaplamalar oldukça sert aşınmaya dayanıklı yüzeylerde kullanılırken, kullanılan elektrodun türüne göre değişen, çeşitli metal ve alaşım ve faydalanılan kompozit kaplamalar ise yüksek sıcaklık korozyonuna, yüksek sıcaklıkta oksitlenmeye ve kimyasal korozyona maruz ortamlarda işleyen iş parçalarının

yüzeylerini korumak için uygulanmaktadır. Belli başlı küçük komponentler; mil yatakları, blade (kanatçık), torna ve matkap aynalarında, dişlilerde, pompalar, shaft tertibatında, araç-gereçlerde, kalıp ve lokmalarda, valf yatakları, enjektör uçları vs olup bunların yanında döküm kalıpcılığında veya girintili çıkıntılı küçük yüzeylerde hataların giderilmesi, tamir onarım gibi birçok maksatla kullanılmaktadır. ESD kaplama yönetimi ile AISI 1020 ve 1018 karbon çelik numuneler üzerinde TiB<sub>2</sub> kaplaması yapılarak ultra sert yüzeyler elde edilmiştir (Agarwal, Dahotre1998). HSS takım çelikler üzerinde yapılan ESD kaplamalarında da takım çeliklerin çalışma süresi % 2000 arttırılmıştır (Topaç 2014). Çelik haricinde yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımlarında veya nikel esaslı süperalaşımlarada da daha iyi özellikler kazandırmak amacıyla saf nikel elektrot kullanılarak ESD ile kaplama yöntemiyle çatlaksız Ni-Ti alaşımı özellikli bir homojen tabaka elde edilmiştir (Topaç 2014, Mısırlıoğlu 2006).

## **2.2 Balistik Bilimi ve Tarihçesi**

Balistique Fransızca bir sözcük olup, uzaya belirli bir itici kuvvetle fırlatılan cisimlerin, özellikle mermi çekirdeklerinin, gerek bir silahın namlusu içindeki gerekse namlu dışındaki davranışlarını ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bilim dalıdır. Balistik bilim dalı, mermilerin çekirdeğinin itme kuvvetinin etkisi, uçuşu ile ilgili davranışlarını ve hedefe çarpma sırasında ve sonrasındaki etkisini inceleyen bir bilimdir (Alim 2009). Balistik bilimi ilk kez barut kullanımı ile başlamaktadır. Barut'un kullanımı hakkında, 10. Yüzyıl bilinen en yakın kayıta sahip olup Çinlilerin bu tarihlerde ve öncesinde kolayca tutuşan barut kullandıkları, Müslüman olan Endülüslerin ise 12 YY.da barutu araştırdıkları veya kolayca tutuşabilen tozlarla uğraştıkları bilinmektedir. 13. Yüzyılda da Hindistan'da barut kullanılmış olduğuna dair bulgular mevcuttur. Ancak barutun ilk önce kimler tarafından bulunduğu ve hangi amaç doğrultusunda kullanıldığı tam olarak netlik kazanmamıştır (Çelikel 2008). Modern balistik biliminin temelleri 1800'lü yılların ortalarında ortaya çıkmış ve zamanla ortaya konulan prensipler ilerleyen yıllarda artarak geliştirilmiş ve 20. yüzyılın başlarında ise balistik bir bilim olarak literatürde kendisine yer edinmiştir (Alim 2009).

## 2.3 Balistik Türleri

### 2.3.1 İç Balistik(İnternal Balistik), Dış Balistik, Adli Balistik ve Terminal Balistik

Ateşli silah mekanizmalarında ateşlemeyi başlatan iğne hareketinden mermi çekirdeğinin namlu ağzını terk edinceye kadar geçen zaman içinde, mermi kovanı ve çekirdeği üzerinde yapılan incelemedir. Bu şekilde iç balistik kısmında kapsül ve kapsülün ateşlenmesi, barut ve barutun yanma hızı, yiv sayıları, namlu uzunluğu ve çekirdeğin silahı terk ediş hızı ile ilgili yapılan çalışmalar incelenir. Dış balistik ise, merminin çekirdeğinin tabanca ateşlendikten sonra, namluyu ani olarak terk etmesiyle beraber, hedefe çarpma süresine kadar geçen süre içerisinde meydana gelen doğrudal veya eğik atış yörüngesindeki hareketi, anlık hava direnci, yörüngeden sapma açısı, yerçekiminin çekirdeğin hareketine olan etkilerinin araştırılmasını kapsar. Eğer, çekirdek seyahat süresi sonunda, hedef noktaya çarptıktan sonra hedefte bir hasar meydana getiriyorsa, bu meydana gelen hasar veya delme gücü, seyahat sırasındaki kinteik enerjisini çarptığı cisme ne oranda aktardığı ve sonucunda meydana getirdiği çarpmaya bağlı etki alanı ile ilgilenir. Ayrıca, terminal balistiğin bir parçası olan yaralama balistiğide, insan ve hayvanlarda meydana gelen ateşli silahlarla ilgili yaralanmalarla akademik çalışmayı kapsar. Terminal balistik çalışmalarının ana teması zırh veya hedef malzemesinin kalınlığıdır. Çoğu literatürde, yarı sonsuz, orta kalınlıkta ve ince sınıflandırmasından oluşur. Yarı sonsuz kalınlığa sahip olan hedef malzeme, arka kısmı, ateşli silah çekirdeğinden etkilenmeyecek büyüklüğe sahip olan zırh malzemesidir, dolayısıyla zırh malzemesinin arka kısmında herhangi bir şekilsel değişim olmaz. Şekilsel değişiklikler, mermi çekirdeğinin meydana getirdiği ilk çarpma derinliği, çukurcuğun boyutu ve hacimsel buyot değişimidir. Yarı sonsuz kalınlıkta yapılan çalışmalarda, genel olarak, mermi çekirdeği ile kaplamamalzemesi arasındaki fiziksel ve mekanik özellikler araştırılır. Yapılan çalışmalarda, hedef ile merminin çıktığı ateşleyici arasındaki açı arttıkça, balistik limit hızın da arttığı görülmüştür. (Binay 2016). Adli balistik bilimi ise ise, ateşli silahlarla ilgili bir bilim dalıdır. Özellikle, ateşli silahların yaygınlaşması ile beraber ortaya çıkmıştır. Silindirik namlulu silahlardaki mermi kovanlarının ve çekirdeklerinin kullanm sonrası incelenmesi ile olayda kullanılan silahın türünün belirlenmesi bu blimin temelini oluşturur. Çekirdeğin üzerindeki izlerin, yada tüfekten yayılan saçma tanelerinin hedef üzerindeki dağılım şekillerinden, silahın ateşlenme mesafesi ve yönü hakkında bilgi edinilebilir. Bu şekilde,

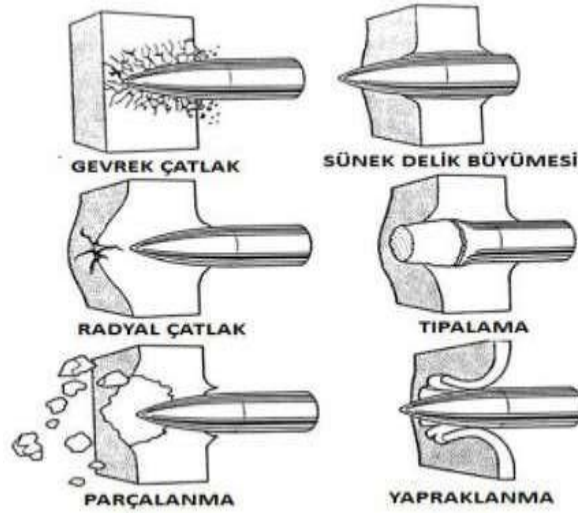
meydana gelen adli olayın kazara veya kasten işlenip işlenmediğinin tespit edilebilmesi kolayca anlaşılabilir. Ayrıca olaya karışmış olabileceği düşünülen diğer silahların belirlenebilmeside adli balistiğin konuları arasındadır (Backman 1976, Çelikel 2008).

## **2.4 Zırh Konfigürasyonları**

Zırh konfigürasyonları, tedavi şekillerine göre üç ana grupta sınıflandırılabilir. tehdit. Bu gruplar pasif, reaktif ve aktif zırhlardır.

### **2.4.1 Pasif Zırhlar**

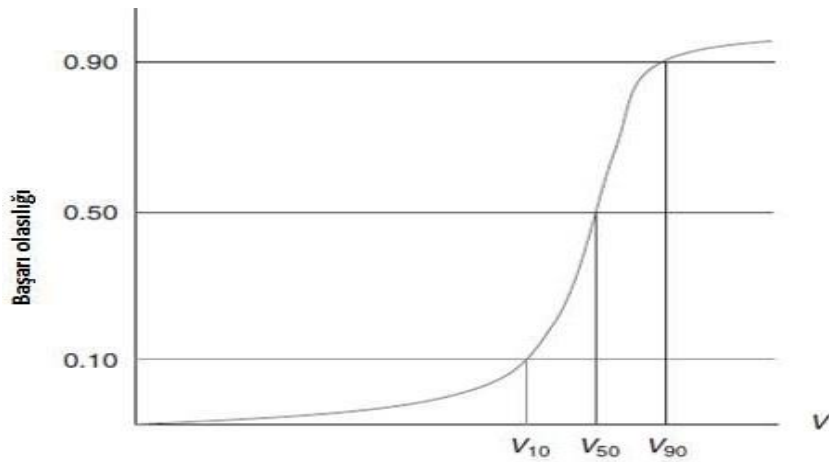
Yukarıda da belirtildiği gibi, Terminal balistik çalışmalarının ana teması zırh veya hedef malzemesinin kalınlığıdır. Yarı sonsuz, orta kalınlıkta ve ince sınıflandırılan zırhlar veya koruma plakaları ateşli silah mermisinden etkilenen veya etkilenmeyen olarak sınıflandırılabilir. İnce kalınlıktaki zırh malzemelerinde, mermi çekirdeği koruma zırhını boydan boya delerek geçer ve zırh malzemesinin çekirdek üzerindeki etkileri örneğin yavaşlatma etkisi veya saptırma etkisi araştırılır. Yarı sonsuz ve orta kalınlık zırhlar, ki bu ikisi etkilenmez, yaygın olarak bulunurlar ancak bunların üretimi ve koruyuculuğunu artırması zordur. Orta kalınlıktaki zırhlarda, mermi çekirdeği zırh malzemesini tamamen delerek geçemez, fakat zırh tabakasının arkası veya arka yüzeyi çarpmadan etkilenir. Zırh tasarımı bir bilim dalıdır ve bilim insanları, mermi çekirdeği türüne ve orta kalınlıktaki zırhların ve malzemelerinin birbirleri ile ilişkilerini araştırarak gerçek bir zırh tasarımını sağlayabilirler. Şekil 2.4 orta kalınlıktaki zırh hedef-mermi çekirdeği ilişkisini ve kırılma mekanizmaları göstermektedir. Bu şekil incelenirse, zırh malzemesinin mermi üzerindeki etkileşimi iyi bir şekilde irdelenebilir ve koruyucu zırh olarak kullanılacak malzeme tasarımı rahat bir şekilde gerçekleştirilebilir.



**Şekil 2.4** Yüksek Hızlı Balistik Objelerin Çarpma Durumlarındaki Muhtemel Hedef Zırhın Kırılma Şekilleri (Binay 2016).

Malzemelerin balistik ve mekanik özelliklerinin birbirleri ile doğru orantılı olduğu yapılan çalışmalarla bilinmektedir. Kısacası, malzemelerin mekanik özelliklerinin atması ile balistik özelliklerin de genel olarak arttığı ortaya çıkartılmıştır(Ogorkiewicz 1991, Robertson 2004).

Terminal balistik ifade edilirken sayısal bilgilerde önemlidir Örneğin,  $V_{10}$  ifadesi ile ateşli silahın yada farklı bir başka balistik ile ilgili aracın sözkonusu hedefi %10 oranında delerek geçtiği veya perfore ettiği,  $V_{50}$  ise hedefi % 50 oranında delerek geçtiğini, buna karşın,  $V_{90}$  da hedefin ise %90 oranında delindiği düşünülmektedir. Bu birimler Şekil 2.5’de görülmektedir (Carlucci and Jacobson 2008, Binay 2016).



**Şekil 2.5** İstatiksel Hızın Grafikselsel İfadesi.

Çarpma etkisini azaltan sistemlere ise zırh adı verilir. Pasif zırhlar, kinetik enerjili bir merminin kinetik enerjisini veya şekilli bir şarj jetini emmek için tasarlanmıştır. Yüksek mukavemetli malzemelerin ve geometrik tasarımların özel kombinasyonları yukarıda belirtilen tehditlere karşı istenen mekanizmaları elde etmek için kullanılır. Bilinen pasif zırh tipleri aşağıda listelenmiştir (Moss 1995, Ogorkiewicz 1991, Held 1970).

**Eğimli Zırh :**Bu zırhlar dikey bir yüzeye sahip olmak yerine eğik olarak yerleştirilmiştir. Bu şekilde zırhın kalınlığı arttırılabilir. İkinci amaç, gelen KE tehditlerini yeniden sarmak veya saptırmaktır.

**Aralıklı Zırh:** Genellikle mesafeyi artırarak şekilli şarj jetleri yenmek için kullanılır. jet zırh konfigürasyonuna nüfuz etmek için hareket etmek zorundadır. Dahası, iç tabakalar gelen KE tehditlerini taklit etmek ve engellemek için tasarlanabilir.

**Çıta zırh:** Şekillendirilmiş şarj cihazını aracın derisinden tutarak çalışır ve durma etkisinin oluşması için jetin hareket etme şeklini arttırır.

**Kompozit Zırh:** Bu zırhlar, tehdidin neden olduğu hasarı emmek ve yaymak için özel çelikler, seramikler ve diğer malzemelerin kombinasyonlarını kullanır.

#### 2.4.2. Reaktif Zırhlar

Reaktif zırhlar, iki metal plaka arasında zımparalanan elementlerden yararlanır. Bir tehdidin etkisine tepki gösterirler ve tehdidi yenmek için özel mekanizmalar kullanırlar. Bu zırhlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

**Patlayıcı Reaktif Zırh :** Genellikle saldırı yönüne açılı olarak düzenlenmiş aralarında yüksek patlayıcı bir tabaka bulunan, aynı veya farklı kalınlıkta ve aynı veya farklı malzemelerden oluşan bir ön ve arka plakalı bir sandviçten oluşur [6]. Yeterli kinetik enerjili bir mermi çarptığında, reaktif eleman başlatılacak ve plakalar dışa doğru hızlandırılacaktır.

**Patlayıcı Olmayan Reaktif Zırh:** Patlayıcı reaktif zırhlara çok benzer, ancak yüksek patlayıcı yerine enerjik bir malzeme içerir. Bu enerjik malzeme bir tepkimeye girer. Düşük seviyeli bir patlama ile, daha küçük basınçlar üretilir.

**Enerjik Olmayan Reaktif Zırh:** Enerjik malzemeler yerine, elastomerler gibi enerjik olmayan malzemeler kullanır. Bu malzemeler çarpma enerjisini emer ve çarpılmaya neden olur.

**Elektromanyetik Reaktif Zırh:** Çarpan memiyi engellemek ve yok etmek için gelen mermiden elektrik akımı geçirir ve tehlikeyi bertaraf eder..

### **2.4.3 Penetrasyon - Perforasyon Teorisi ve Mekanizması**

Penetrasyon genel olarak delinme olarak ifade edileir ve farklı büyüklük ve boyuttaki objelerin zırh tabakası üzerinde meydana getirdiği etkidir. Yüksek hızda ilerleyen çelik yada diğer metal içeren zırh delici malzemelerin sivri olan uç kısımlarının zırh tabakası tarafından enerjisinin sönmülmesi esasına dayanır. Penetrasyon işleminde zırh tabakası delinmez ve karşı tarafa geçmez, yani, diğer bir deyişle, tehdit unsuru olan mermi çekirdeğinin, hedef malzeme içerisinde belirli bir miktar ilerledikten sonra durmasıdır.

Perforasyon sürecinde ise tehdit unsuru mermi çekirdeği, hedef malzemesinin et kalınlığı boyunca hareketini sürdürmesi ve hedef malzemeyi delerek karşı tarafa geçmesi olarak tanımlanır. Tehdit unsurunun hızı ve hedef malzemenin, geometrik yapıları ve zırhın yapısal ve mekanik özellikleri Penetrasyon ve Perforasyon mekanizmalarında farklılık göstermektedir. Bu bilim zırh malzemesinin seçiminde en temel olarak seçim noktasıdır (Binay 2016).

## **2.5 Düşük Enerjili Darbe Testleri**

### **2.5.1 Sarkaç Testleri (Izod ve Charpy)**

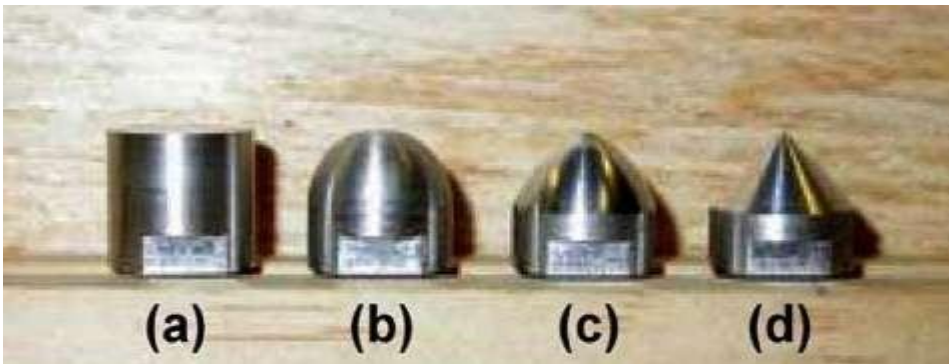
Charpy ve Izod düşük darbeli test sistemlerinde, üzerinde çentik oluşturulmuş numune, belirli bir yükseklikten serbest olarak bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbe işleminden sonra sarkacıntırmandığı yükseklik ölçülerek sarkacın ilk ve sondurumundaki meydana gelen enerji farkı numune tarafından emilen darbe enerjisi olarak değerlendirilir. Darbemeysanageldikten sonra sarkacın çıktığı yükseklik ne kadar düşük ise, emilen darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci ve malzemenin tokluğunun da o derece yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Charpy veya Izod test sistemleri birbirleri arasında numunelerin desteklenme yöntemi ve çentiğın darbe

noktalarına göre konumu olarak ufak farklılıklar göstermektedir (Ceyhun ve Turan 2003). Bu test yöntemleri ile elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılabilmektedir.

### 2.5.2 Ağırlık Düşürme Testleri(Serbest Düşme Testleri)

Serbest ağırlık düşürme testleri, sabit bir yükseklikten miktarı bilinen bir ağırlığı düşürerek, etki ettiği alanın değişik fiziksel ve profil özelliklerinin incelenmesini kapsar. Ağırlık düşürme testleriyle çok sayıda kontrol edilebilen test parametreleri incelenebilir ve test veya deney sonuçları basit ve kolay bir şekilde analiz edilir. Kaplamaları zırh özelliği taşıyan numunelerin bu test yöntemi ile balistik ölçümleri basit test düzenekleri kullanılarak incelenebilmektedir. Yüze atılan farklı malzemeden yapılmış kaplama tabakasının ağırlığın sağladığı kinetik enerjiyi deformasyona ve bu enerjinin bir kısmını absorbe edebilmesi balistik açıdan önemli olup, balistik özellik hakkında detaylı bir bilgi sağlayabilir (Malik 1990).

Kompozit oluşumlarda darbe sonucu meydana gelen hasar dokusu darbeyi oluşturan ucun geometrik şekli ile beraber hedefin geometrik şekli ve özellikleri, darbe hızı ve darbe enerjisine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Mitrevski ve ark. karbon-epoksi ince dokuma yapısından oluşan bir kompozit malzemenin farklı profil geometriye sahip olan 12mm çapındaki silindirik balistik uçlar ile çarpma anındaki deformasyon karakteristiklerini detaylı bir şekilde araştırmışlardır (Resim 2.2). Çarpma sonucunda oluşan darbenin şiddeti ve malzeme üzerindeki meydana getirdiği deformasyon miktarı ve darbeye kadar geçen seyahat süresini içeren bilgiler ağırlık düşürme testlerinde kayıt altına alınmaktadır (Mitrevski *et al.* 2006).



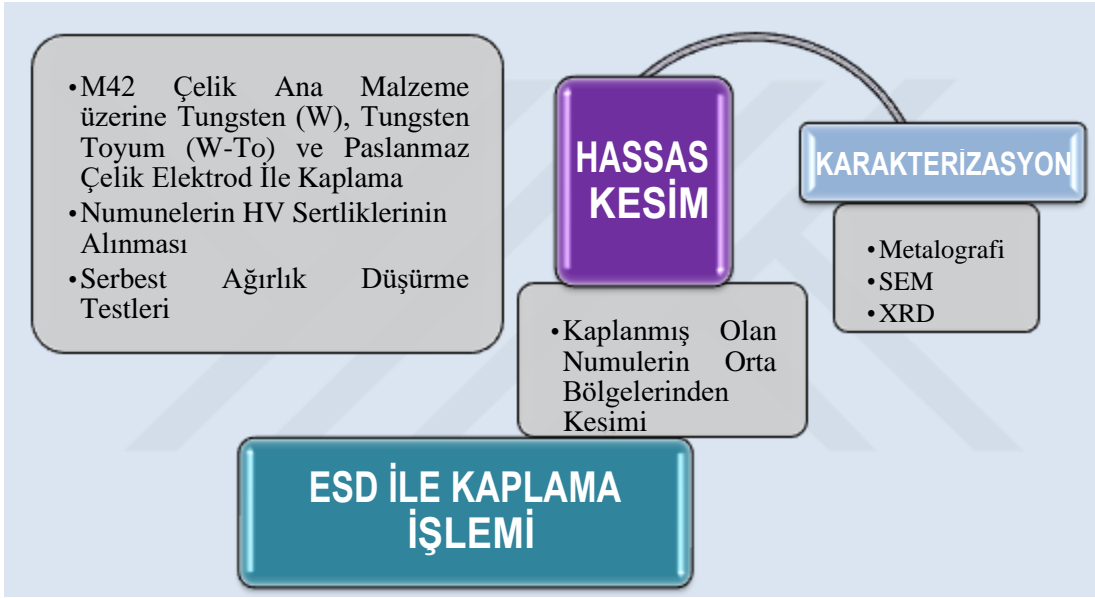
**Resim 2.2** Farklı Geometriye Sahip Darbe Test Uçları (a) Düz, (b) Yarı Küresel, (c) Ogival, (d) Konik (Coşkun 2019).

Ateşli silahlardan çıkan mermi çekirdeğinin uç geometrisi sonuç balistik performans açısından önemlidir. Yüksek balistik hızlardaki mermi çekirdek uç profili, her iki mermi çekirdeği ve uygun zırh tasarımı için önemli bir parametredir. Mermi çekirdeğinin ucu yüksek hızlarda ortaya çıkan hava sürtünme kuvveti veya direnci ile ortaya çıkan ısınma problemini azaltıcı veya bazı durumlarda artıcı etki göstermesi beklenir (REF). Çok yüksek hızlarda mermi çekirdeğinin darbe etki alanında, oldukça kısa bir zaman içerisinde küçük bir alanda oluşan darbe davranışı tespit edilirken, düşük hızlarda ise malzemenin darbeye karşı daha uzun bir zamanda ve daha geniş bir alanda etki meydana getirdiği, kırılma hareketlerinde ve meydana gelen hasar yapılarında da hıza bağlı olarak farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir (Aratman 2018).



### 3. MATERYAL METOT

Alaşımli M42 çeliğinden kesilen 25x25x0.8 mm kalınlığında kaplanacak olan altlık malzeme parçası, dönen bir eksen etrafında mandrele bağlanmakta, daha sonra parçaların orta kısımlarına, yaklaşık 15 mm çapında ESD yöntemi ile W, W-Th ve paslanmaz çelik elektrotlarla kaplama yapılmıştır. Yapılan kaplama işlemi ve sonrasındaki mikro yapı incelemesi için gerekli metalografik işlemlerin iş akış şeması aşağıda Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1 Tez çalışmasındaki İş Akış Şeması.

Alaşımli M42 çeliğinin W, W-Th ve Paslanmaz Çelik elektrotlar kullanılarak ESD yöntemi ile kaplanmış olup, takibinde gerekli metalografik işlemler kullanılarak kaplanmış olduğumuz plakaların balistik özellikleri sabit bir ağırlık kullanılarak karakterize edilmiştir. Çekicinin düşme hızı sabit olarak 17.7 m/s alınmıştır.

#### 3.1 Kullanılan Malzeme ve İşlemler

ESD yöntemi ile kaplanacak ve balistik amaçlı olarak test edilecek 0.8 mm kalınlığındaki M42 plakadan giyotin ile yaklaşık 25mm-25mm boyutlarında hazırlanan altlık numuneler üzerine Tungsten Toryum (W-Th), Tungsten (W) ve paslanmaz çelik

elektrotlar ile kaplamalar yapılmıştır. M42 Altlık malzemelerinin en iyi kaplama performansı vermesi için yüzeyi kaba temizleme işleminden geçirilmiştir.

### 3.1.1 ESD Yöntemi ile M42 Numunelerinin Kaplanması İşlemi

Yüzeyine Elektro-kıvılcım ile kaplama işlemi yapılan M42 çeliğinin Tungsten-To (W-Th), Tungsten (W) ve paslanmaz çelik elektrotlarla kaplanmaları için kullanılan güç, frekans ve kullanılan numune sayıları ve M42 alaşımlı çeliğin nominal kimyasal yapısı Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** M42 Çeliği üzerine ESD kaplama sırasında kullanılan numune sayıları.

Kaplama/ Altlık malzemesi	W-Th	W	P. Çelik
M42	6 tane	6 tane	6 tane

**Çizelge 3.2** M42 Çeliğinin W, W-Th ve Paslanmaz Çelik elektrotlarla Elektro Kıvılcım kaplama sırasında kullanılan güç ve frekans değerleri.

Numune Numaraları	Güç (V)	Frekans (Hz)
1	50 V	900 Hz
2	100 V	900 Hz
3	150 V	900 Hz
4	50 V	1600 Hz
5	100 V	1600 Hz
6	150 V	1600 Hz

**Çizelge 3.3** M42 Alaşımlı Çelik altlık, W, W-Th ve Paslanmaz Çelik elektrotların kimyasal özellikleri.

Kaplama Malzemesi	C	Si	Mn	Mo	Ni	W	Th	Cr
M42Alaşımlı Çelik	% 0.42	%0.31	% 1.09	% 1.03	%3.6	-	-	%5
W	-	-	-	-	-	99.9	--	-
W-Th	-	-	-	-	-	99	1	-
Paslanmaz Çelik (304)	0.08	0.84	1.6	-	8.82	-	-	18.5

Kaplama makinası olarak da 3000 W gücünde, 20V-160V aralığında güç ve en az 40 Hz ile en fazla 2.1 kHz frekans aralığında çıkış verebilen SZ-3000 marka ESD kaplama makinası kullanılmıştır. Kaplama işlemi sırasında, havanın etkisinden korumak

amacıyla ayrıca koruyucu atmosfer olarak Ar gazı manuel olarak uygulanmış ve yaklaşık 2dk boyunca kaplama işlemleri mümkün olduğu kadar homojen olarak gerçekleştirilmiştir. Kaplamanın yapılması sırasında akım transferini sağlayan kablo ve iletim sistemi ve kaplanacak malzemenin sabit bir hızda dönmesinin sağlayan deney düzeneği ve kullanılan kaplama makinasına ait görüntüler Resim 3.1’de verilmiştir.



**Resim 3.1** Kullanılan Deney Düzeneği ve Elektro Kıvılcım Biriktirme Cihazı (ESD).

### **3.1.2 Kaplanan M42 Numunelerinin Mikro Sertliklerinin Ölçülmesi**

Mikrosertlik ölçme işlemi, özellikle çok küçük numunelerin ve ince saçların sertliklerini ölçmede elverişlidir. Genellikle, yüzeyi karbon emdirilmiş, veya ısıl işlem sırasında dekarbürize olmuş ve / veya Azot emdirilmiş ve sertleştirilmiş yüzeylerle, elektrolitik olarak kaplanmış metalik malzemelerin yüzey mikrosertlikleri de tespit edilebilir. Ayrıca, alaşımlarda bulunan fazların noktasal sertliklerinin tespitinde, oluşan segregasyonların sertliğinin ölçümünde ve cam, porselen, metalik karbürler gibi çok sert ve kırılğan malzemelerin sertliklerini ölçmede de kullanılır.

Mikro Sertlik cihazının Vickers ucu numune yüzeyine yaklaşık 15s boyunca 4.903N (veya  $HV_{0.5}$ ) yük uygulamaktadır. Ölçüm yapıldıktan sonra, otomatik olarak geriye döner, daha sonra numune üzerinde pramit şeklinde bir iz elde edilir. Bu izin boyutlarını

ölçerek ölçüm gerçekleştirilir. Elde edilen değerler girildikten sonra cihaz üzerindeki ayarlardan ve ekrandan numunenin mikro sertlik değeri ortaya çıkar (Resim3.2).



**Resim 3.2** Numunelerin Sertliklerinin Ölçüldüğü Mikro Sertlik Cihazı, Shimadzu HMV2.

### 3.1.3 Kaplanan Numunelerin Ağırlık Düşürme Testleri

Elektro-kıvılcım ile W, W-Th ve paslanmaz çelik elektrotlarla kaplama işlemi yapılan M42 çeliğin malzemesinin, elde edilen bazı numuneler ağırlık düşme testlerine tabi tutularak, düşük hızlı darbe dirençlerinin yani düşük hızlı balistik özellikleri incelenmiştir. Deney cihazına ait görüntü Resim 3.3’de verilmektedir (Aratman 2018).



**Resim 3.3** Ağırlık Düşürme Test Cihazı.



**Resim 3.4** Serbest Ağırlık Düşürme Test Cihazının Makara Sistemi.

Düşük hızlı ağırlık düşürme test cihazı 30 mm çapında çelik borudan üretilmiş ve toplam 2,5 metre uzunluğundadır. Ayrıca, cihazın üst kısmına makara sistemi yapılmıştır (Resim 3.4). Cihazın alt kısmında ise darbenin numune yüzeyine uygulanacağı numune sabitleyicisi de mevcut olup, numunelerin sabitleneceği kısım 50mm çapında 70mm uzunluğundadır (Resim 3.3- 3.7), (Aratman 2018).



**Resim 3.5** Numune Tutucu Plaka Üzerindeki Sabitleme Silindirin Yandan Görünümü.



**Resim 3.6** Tornada İşlenmiş Sertleştirilmiş Uçlar (Aratman 2018).

Ağırlık olarak AISI/SAE 1040 çeliğinden 150 mm uzunluğunda yaklaşık 26 mm çapında 1Kg ağırlığında sertleştirilmiş uçların takılabileceği kısım ve iple bağlanması için halka kısmı içeren bir silindirik ağırlık kullanılmıştır. Deney cihazının elektronik kısmı, darbe kuvveti ölçümü için 50 kg'lık 4 adet yük hücresi HX-711 yük hücresi adaptörü içermektedir. İlk önce yük hücresi kalibrasyonu elle yapılmış ve daha sonra kullanılmıştır. (Aratman 2018).

### 3.1.4 ESD ile Kaplanan Numunelerin Metalografik İşlemleri

Sabit mandrel dönme hızında (yaklaşık olarak 295 rpm) ve farklı kaplama frekans ve güç çıkış değerlerinde kaplanmış olduğumuz plaka numunelerde mikro yapı analizi yapabilmek için numuneleri yaklaşık yüzey hassasiyetini sağlayarak hassas testere cihazı ile kesilmiştir. Dilimleme sonucunda kesilen numunelerin boyutlarının küçük olması, zımparalama işlemini zorlaştırmıştır, homojen bir parlatmayı sağlamak içinse sıcak kalıplama işlemine yapılmıştır (Resim 3.7).



**Resim 3.7** Numunelerin Soğuk Kalıplanmış Hali.

Mikroyapıların incelenmesi için sıcak kalıplama yöntemi ile hazırlanmış olan numuneler metalografik olarak zımparalama işlemine tabii tutulmuştur. Yüzey zımparalama ve yüzey parlatma işlemleri Metkon, Gripon2V model zımpara parlatma cihazı ile ortalama 295 rpm hızında, sırasıyla 250'lük zımpara kâğıdından başlamak suretiyle, 1200G'lik zımparaya kadar gerçekleştirilmiştir (Resim 3.8).



**Resim 3.8** Mikro Yapı Analizi İçin Zımparalama İşleminin Yapıldığı GRİPO 2V Cihazı.

1, 3 ve 6 mikron boyutlarındaki alimüna pasta kullanılarak parlatılan numuneler etilalkol ile temizlenip dah sonra basınçlı hava ile kurutulur, ve sonra son olarak %1 Nitrik Asit içeren Nital dağılayıcı yaklaşık olarak 3 sn numune yüzeyinde tutulur ve tekrar basınçlı hava ile kurutulup mikro yapı tayini için optik mikroskopta incelemeye alınır. Parlatma ve dağılama işlemini başarılı bir şekilde uygulandıktan sonra numunenin yüzeyinden mikro yapı analizi için farklı büyütme oranlarında resimler alınmıştır.

### **3.1.5 Yüzey ve Yapısal Karakterizasyon İşlemleri**

Kesim sonrası yapılan karakterizasyon işleri aşağıdaki gibidir :

- SEM Analizi
- XRD Analizi

#### **SEM Analizi**

LEO 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde SE ikincil elektron dedektörü (Secondary Electron Dedector), BSE veya

BSEM geri yansıyan elektron (Backscattered Electron Dedector) ve karakteristik X ışınları (EDX- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörleri bulunmaktadır. Cihaz ekran üzerindeki görüntüde noktasal, çizgisel, alansal ve elementel haritalama yöntemleri ile kalitatif ve semi-kantitatif olarak analizleri yapar (Resim 3.9).



**Resim 3.9** LEO 1430 VP Model Taramalı Elektron Mikroskobu

### **XRD Analizleri**

XRD analizleri numune yüzeyinde üretim veya deneys sonrasında oluşan fazların türüne ısıtma işlemi aşamasından sonrasındaki oluşan fazların tespiti için kullanılır. XRD analizi için Bruker model cihaz, Cu-K $\alpha$  (1.54 Angström) monolitik ışın radyasyonu ile yapılan incelemeden önce optik ve SEM ile mikroyapıları incelenmiş olan malzeme yüzeyleri yeniden temizlenerek bu analizler yapılmıştır. XRD ile Tarama işlemi ( $2\theta$ )  $20^\circ$ - $90^\circ$  arasında,  $0,02^\circ$ 'lik adımlarla 0.6 sn/adım hızıyla uygulanmıştır (Resim 3.10).



**Resim 3.10** XRD Analizi için Kullanılan Bruker XRD Cihazı.

## 4. BULGULAR

Giyotin kesme yöntemi ile 25 x 25 x 0.8mm ebatlarında kesilmiş olan M42 alaşımlı çeliği üzerine yaklaşık 15mm çapında Tungsten(W), Tungsten-To (W-Th) ve Paslanmaz Çelik çubuk elektrotlarla farklı güç ve çıkış frekanslarda yapılan kaplamalarına tabaka sertlikleri ve yapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

### 4.1 ESD ile Yapılan Kaplamaların Makro Optik Görüntüleri

Kaplama sonrasında görüntü almak için makro görüntüleme cihazı olarak el tipi bir mikroskop olan Celestron marka MicroCapturePro (yazılımlı) kullanılmıştır. Bu cihaz ile kaplama işlemi sonrasında numune yüzeyindeki oluşumları ve kullanılan farklı frekanslarda ortaya çıkan metal damlaları rahatlıkla görülür. Kaplamaların yüzeyde oluşturduğu değişime ait görüntüler Resim 4.1, Resim 4.2 ve Resim 4.3’de gösterilmektedir. Numuneler üzerindeki yazılı rakamlar kullanılan güç ve çıkış frekanslarını belirtmektedir (Çizelge 3.2).



**Resim 4.1** Yüzeyleri W ile Kaplanan Numuneler.



**Resim 4.2** Yüzeyleri W-Th ile Kaplanan Numuneler.



**Resim 4.3** Yüzeyleri Paslanmaz Çelik ile Kaplanan Numuneler.

Yüzeyleri ESD yardımıyla W-Th ile kaplanan numuneler sırasıyla Resim 4.1’de, yüzeyleri Paslanmaz Çelik ile kaplanan numuneler sırasıyla Resim 4.2’de ve yüzeyleri W ile kaplanan numuneler Resim 4.3’de gösterilmektedir. Bir numaralı numunelerden dokuz numaralı numunelere sırası ile gidildikçe artan güç ve kaplama frekanslarının kaplanan metal parça yüzeyinde meydana getirdiği pürüzler bütün resimlerde gözükmemektedir. Her üç numune grubunda da farklı güç ve kaplama frekanslarında yapılan yüzey kaplamaları da incelediğimizde kaplama frekansı ve güç değeri arttıkça kaplama tabakasının da kalınlığının arttığını görmekteyiz. Bu olay, kullanılan frekans ve güç değerlerinin yanında yapılan kaplama tekrarı ile de ilişkilidir. Ancak, bu çalışmada, kullanılan tekrar sayısı 4 olmaktadır bu nedenle bütün numunelerde, kullanılan tekrar sayısı aynı olduğu için, kaplama kalınlıklarındaki değişimlerde ortak veya standard bir hata olduğu düşünülebilir.

Elektrik ark kaynaklarında, kaynak voltajı ve kaynak akımı kaynak havuzuna veya ITAB da dahil olmak üzere, kaynak bölgesine transfer edilen ısı miktarını ve dolaylı olarak ta madde miktarını temsil eder. Elektrik ark kaynaklarında kullanılan elektrik devresi, eğer gelişmiş bir makina değilse, frekans değeri ya önemsizdir veya sabittir eğer Alüminyum veya ince parçaların kaynağı söz konusu değilse. ESD işleminde ise gücün artması, ark kaynağındaki kütle transferine benzer olarak, daha fazla ısı enerjisinin üretilmesine ve ısının kaynak plazmasına transfer edilmesi yani, ESD işleminde ark havuzuna transfer edilen ortalama damlacıkların büyüklüğüne ve sayısına etki edecektir. Kaplama frekansı ise bu ark sırasında oluşan bu damlacıkların ortalama sayısını bize ifade eder ki, hem gücün ve hemde kaplama frekansının artması ile beraber ortalama kaplama kalınlığının da doğru orantılı bir şekilde artacağı ve birim uzunluk başına damla sayısının artacağını gösterir. Bulguların gösterdiği şekilde, açıklamayla beraber, artan güç değerleri ve artan kaplama frekansı ile kaplama kalınlığının ve/veya kaplama yüzey pürüzlülüğünün orantılı olarak değiştiğini görmekteyiz. Kaplamanın nüfuziyeti ve tabii ki kalınlığı, artan güç ile alakalı olup ısı girdisi ile beraber düzenli bir şekilde artmaktadır. Kaplama frekansı, bu koşullar altında, sadece kaplamanın kalınlığına etki ettiği görülmektedir.

## **4.2 Kaplama Sertliklerinin Analizi**

Resim 4.1- Resim 4.3 farklı güç ve kaplama frekanslarında yapılan kaplamaların, ilk yüzey resimlerini gösterirken, kaplamaların, Resim 3.2 deki mikro sertlik cihazında yapılan ölçümlerinde her bir kaplanmış numuneden üç'er adet olmak üzere, sertlik ölçüme süresi olan 15 saniye boyunca, 4.903 Newton ( $HV_{0,5}$ ) yük altında elde edilen ortalama sertlik değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere, genellikle normalize edilmiş şekilde satılan ana malzemenin sertliği 348 HV iken, Paslanmaz Çelik Elektrodla yapılan kaplama sonrasında yüzey sertliği 483 HV olmuş ve M42 çeliği üzerindeki sertlik değeri yaklaşık olarak ana malzemenin 1.3 katı olarak artmıştır. Aynı şekilde, Tungsten (W) Elektrotla yapılan kaplama sonrası kaplama yüzeyi sertliği yaklaşık olarak altlık malzemenin yaklaşık iki katı olan 673HV'e ulaşmıştır.

**Çizelge 4.1** Kaplama Sonrası Sertlik Değerleri.

<b>Malzeme türü</b>	<b>Genel Ort.(HV)</b>
Tungsten (HV)	673,2
Tungsten Toryum (HV)	877,9
Paslanmaz Çelik (HV)	483.0
Kaplama Yapılan Ana Malzeme	
M42 Çeliği (HV)	348.4

Benzer şekilde, Tungsten Toryum (W-Th) elektrodla yapılan kaplama sonrası malzemenin yüzeyindeki sertlik değeri altlık malzemenin yine yaklaşık olarak iki katı gibi bir değere, yani 878 HV'e ulaşmıştır. Genel olarak, bir metalik yüzeyi veya malzeme yüzeyini kaplamanın asıl gerekçesi, ilgili malzemenin yüzey sertliğini başlangıç sertliğinden daha yüksek bir değere ulaştırmak ve ilgili malzemenin hizmet koşullarından dolayı abrazyon ve erozyon aşınmaya, kimyasal ve elektrolitik korozyona, belirli bir hıza sahip üçüncü bir cisimden kaynaklanan darbeye karşı genel darbe dayanımını veya mukavemetini artırmaktır. Sadece, yüzey sertliğini artırmak amacıyla değil aynı zamanda bazı durumlarda, estetik görüntü vermesi içinde yüzey kaplamaların yapıldığıda bilinmektedir. Yüksek dayanımlı malzemelerle yapılan yüzey kaplamaların, düşük mukavemetli malzemelerin kaplamalarında kullanılması, kaplama sonrası daha sert bir yüzeye sahip olmasına ve daha uzun kullanım ömrü sunmasına sebep olur.

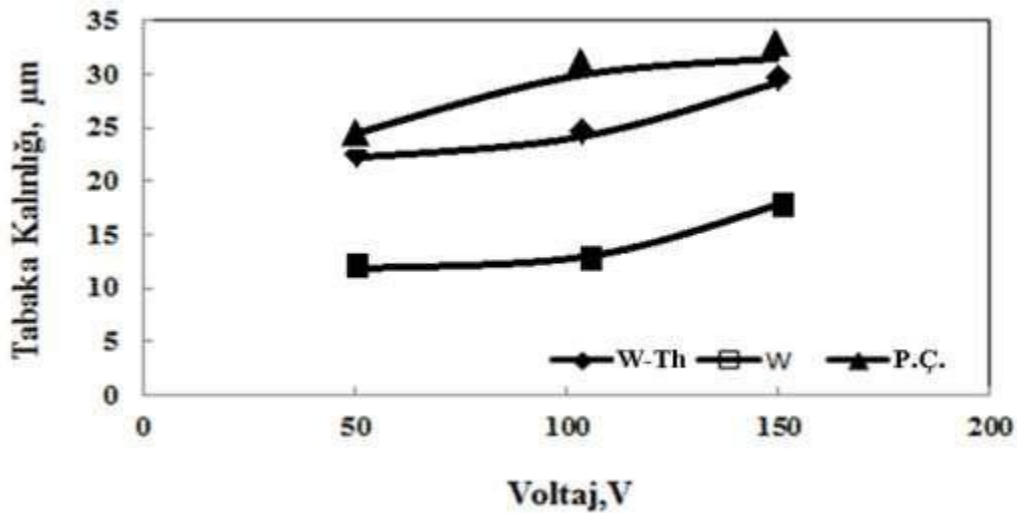
Bu çalışmada elde edilen sertlik değerleri karşılaştırıldığında, kaplama malzemesinin homojen bir yapıda olduğunu veya yüzey pürüzlülüğünün önemli bir seviyede olduğuna işaret etmektedir. Değişen yüzey pürüzlülüğü hem kaplamanın kalınlığının homojenliğini etkiler aynı zamanda sertliğini de etkilemektedir. Tungsten Toryum elektrodla yapılan kaplamaların sahip olduğu yüksek sertlik değeri, bu elektrodun kaplama malzemesi olarak kullanılmasının yolunu açmaktadır ancak kaplama sırasında karşılaşılan zorluklar örneğin ark atlama zorluğu, sertlik değerinin yüksek çıkmasına rağmen, kaplama kalitesinin veya kaplama yüzey pürüzlülüğünün diğer yapılardan farklı olması nedeniyle kabulünü zorlaştırmaktadır.

### 4.3 W, W-Th ve Paslanmaz Çelik Kaplama Kalınlıklarının Analizi

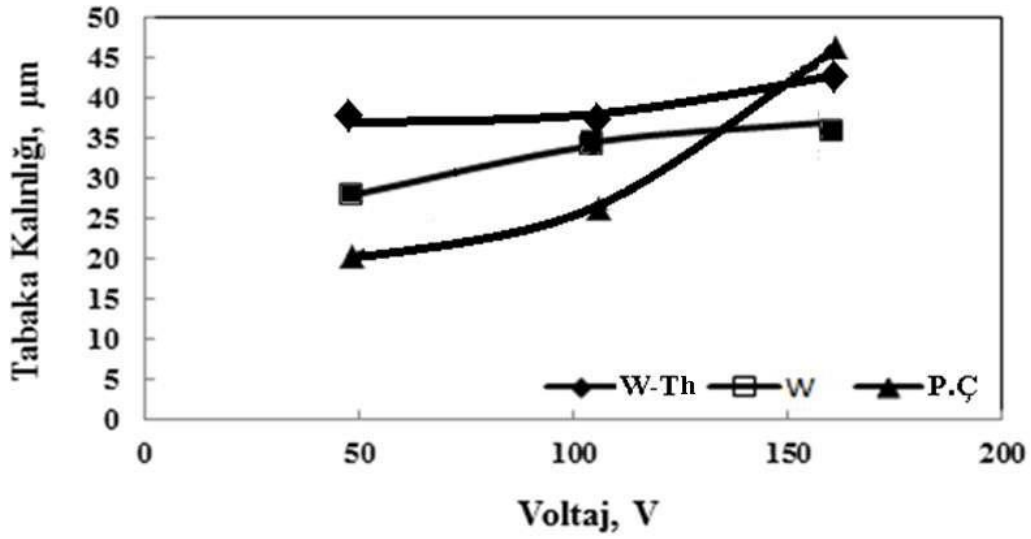
Kaplama kalınlıklarına ait değerleri Çizelge 4.2. de verilmiştir. Kaplama işleminin ardından, numuneler kesitten metalografik olarak hazırlanmış ve optik mikroskopla analiz edilmiştir. Resim 4.4- Resim 4.12 arasında, 200x ve 500x büyütmelerde çekilen mikroyapı resimleri, kaplama kalınlıklarının nasıl değiştiğini göstermektedir ve Çizelge 4.2’de verilen ortalama kaplama kalınlıkları ve Şekil 4.1- Şekil 4.3 arasında verilen grafikler incelendiğinde, genel olarak kaplama gücünün ve kaplama frekansının artması ile beraber kaplama tabakasının kalınlığının da artmasına sebep olmaktadır. Bu daha önce 4.2. de yapılan açıklama ile uyusmaktadır. Benzer şekilde, tabaka kalınlıklarının ana artış sebebi ise kaplamada kullanılan güç çıkış yani voltaj miktarı ve kaplama frekansıdır. Kısacası, artan güç değeri ana sebep olmasına karşın, kaplama oluşturma sayısında, yani, kaç katlı kaplama yapıldığıda oldukça önemlidir.

**Çizelge 4.2** Frekans ve Voltajları Farklı Olan W, W-Th ve Paslanmaz Çelik Elektrotla Kaplanan Numunelerin 500x Büyütmeye Ölçülen Kaplama Kalınlıkları

Malzeme türü	Kalınlık Ortalaması $\mu\text{m}$
W	21,18
W-Th	29,58
Paslanmaz Çelik	42,76



**Şekil 4.1** Frekansları 900 Hz ve Voltajları Farklı Olan Numunelerin Kaplama Kalınlıkları.



Şekil 4.2 Frekansları 1600 Hz ve Voltajları Farklı Olan Numunelerin Kaplama Kalınlıkları.

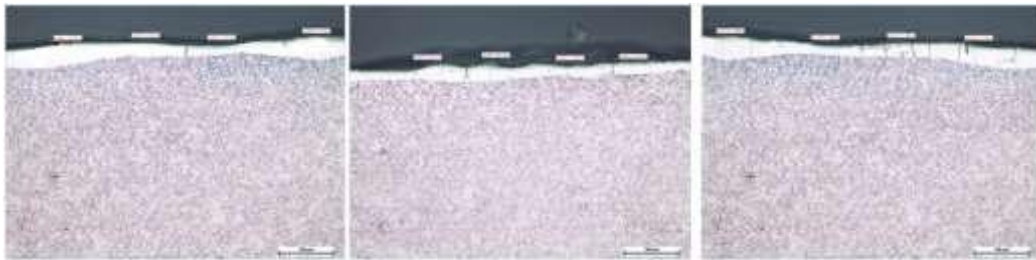
Şekil 4.1 - 4.2 de görüldüğü gibi, artan kaplama frekansı ve artan kaplama güç değerleri (Voltaj) genel olarak yüzey kaplama kalınlıklarının artmasına sebep olmaktadır. Kaplama voltajı ve kaplama gücü haricinde ise frekanslarda dikkate alındığında, Tungsten (W) ve Tungsten Toryum (W-Th) alaşımından üretilen elektrod ile yapılan yüzey kaplamalarının tabaka kalınlıkları, diğer kaplama elektrodlarla yapılan yüzey kaplamalarının kalınlıklarına göre daha az tabaka kalınlığı oluşmasına sebep olmuştur. Tabaka kalınlığının daha az olması bu elektrodalarda beklenen bir davranıştır. Bununla beraber, kaplamada elektrod malzemesi olarak kullanılan metal ve alaşımlarının içerisindeki katkı veya alaşım elementlerin, kaynak arkı sırasındaki buharlaşma potansiyel enerjileri ve matris malzeme ile alaşım yapma kapasiteleride kaplama kalınlıklarının değerlerini de etkilemektedir.

Tungsten ve Tungsten Toryum kaplamalarda güç veya voltaj ve frekansa genellikle lineer bir etki gösterilirken buna karşın paslanmaz çelik kaplamada yüksek voltajların kaplama kalınlığının artmasında ve tabaka oluşumunda daha etkili olduğunu göstermektedir. Tabaka kalınlığının paslanmaz çelikte daha iyi olması tamamıyla, alaşım elementlerinin sahip olduğu ergime ve buharlaşma potansiyeller ile etkilidir. Paslanmaz çelikte orta ve yüksek voltaj daha homojen kaplama vermekte ve frekans ise kaplama kalınlıklarının daha da artmasına sebep olmaktadır. Ortalama değerler genellikle Tungsten ve Tungsten Toryum alaşımı ile kaplamanın daha ince

olduğunu göstermektedir. Ancak kullanılan elektrotlarda en incisi Tungsten ve Tungsten Toryum elektrotlardır. Bu elektrotlar kaplama sırasında diğer yüksek dirençli elektrotlar gibi kısa bağlanmış ve buna rağmen yeterince iyi veya beklenen değerde kaplama performansı göstermediği görülmektedir. Tungstenin ve Tungsten–Toryum alaşımlarının özgül iletkenlik direnci paslanmaz çelik elektroda göre biraz daha fazla olup ve kesitinde daha ince olmasında direncin yüksek olmasında önemli bir etkidir. Yüzey kaplama sırasında Tungsten elektrotların hızlı bir şekilde kızarmasının sebebi ise, özgül iletkenlik, kesite bağımlı direncin artan sıcaklıkla beraber artan direnç değeri olduğu için daha da artmasına sebep olmakta ve damlacık oluşumuna ters etki etmektedir.

Resim 4.4 ve Resim 4.9’de Tungsten kaplamalara ait optik mikroskop mikroyapı resimleri gösterilmektedir. Yüzey kaplama tabakalarının kalınlıklarının artan güç/voltaj ve kaplama frekanslarıyla beraber homojen bir şekilde değişirken, düşük kaplama gücü veya voltajlarında ise kaplama tabakasının bir miktar boşluk veya gaz boşluğu hatası ve çatlakla beraber delaminasyon hatası içerdiği görülmektedir. Ancak, artan kaplama gücünün veya voltajın bu değerleri değiştirdiği ve bu hataların kısmen ortadan kalktığı görülmektedir. Bu durumda artan ısı girdisinin ark sırasında ortama aktarılan veya ortamda bulunan havanın kaynak kavuzuna arkla taşındığı ve damla içerisinde de bulunan Azot ve Oksijen gibi bazı gazların artan damla oluşturma frekansı ile beraber ortama giremediği görülmektedir.

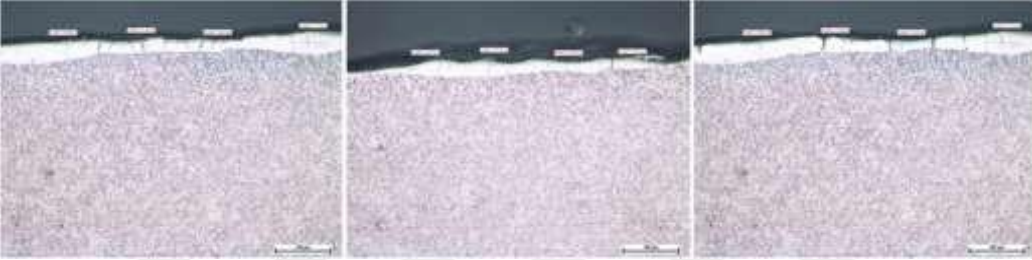
Ayrıca, artan ısı girdisi ile beraber ergiyik damlaların daha sıcak düştüğüne de işaret etmektedir. Bu ark plazmasında yapılan toplam seyahat süresinin kısılaması ve ark plazma sıcaklığının yüksek olması ile ilişkilidir.



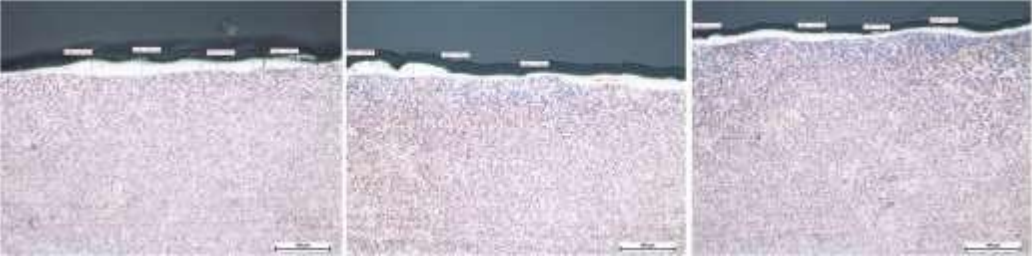
**Resim 4.4** Tungsten (W) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 900Hz 100x Tabaka Mikroyapısı.



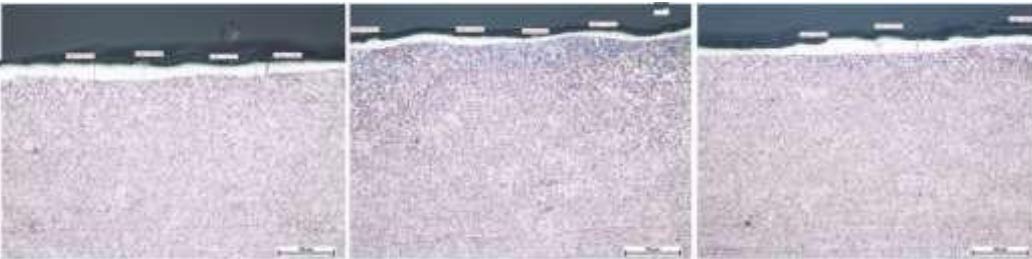
**Resim 4.5** Tungsten (W) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 1600Hz 100x Tabaka Mikroyapısı.



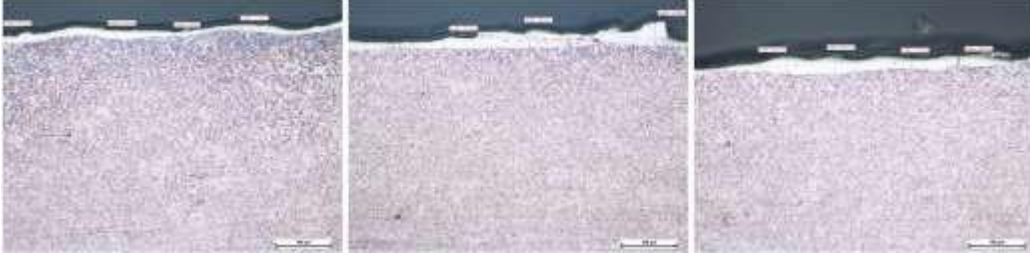
**Resim 4.6** Tungsten-Toryum (W-Th) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 900Hz 100x Tabaka Mikroyapısı.



**Resim 4.7** Tungsten-Toryum (W-Th) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 1600Hz 100x Tabaka Mikroyapısı.



**Resim 4.8** Paslanmaz Çelik (P.Ç.) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 900Hz 100x Tabaka Mikroyapısı.



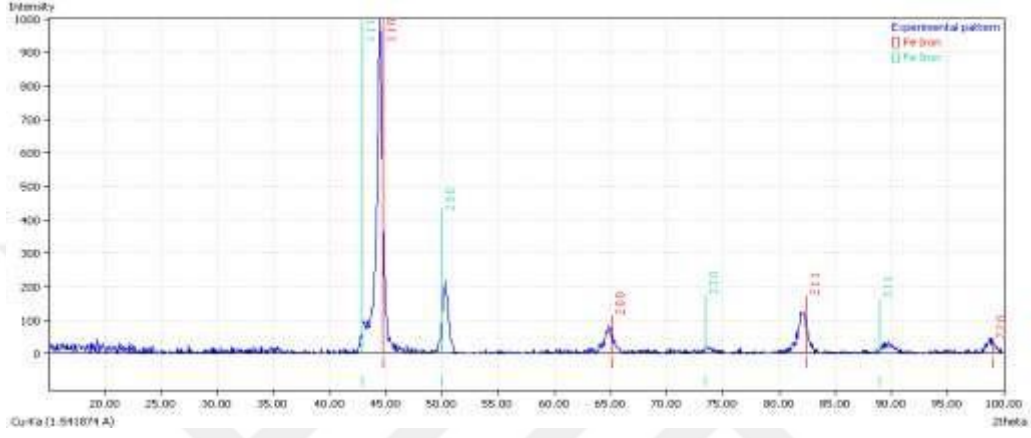
**Resim 4.9** Paslanmaz Çelik (P.Ç.) Kaplanan Numuneler, Soldan Sağa, 50V, 100V ve 150V, 1600Hz 100x Tabaka Mikroyapısı.

W-Th kaplamalarda Tungsten kaplamaya benzer şekilde düşük voltajlarda boşluk oluşumu ve yeterince yığılma olmadığı görülmektedir. bütün voltajlarda yapılan kaplamalarda kaplama yönüne dik çatlaklar oluşmuş ancak delaminasyon kısmen oluşmuştur. genel olarak, kaplama tabakasındaki dikine çatlaklar, matrisle tabaka malzemesi arasındaki ısı genleşme katsayıları farklı olan malzemelerde ortaya çıkan bir hatadır ki bu durumda matris ile kaplama aynı oranda genleşemezler ve kaplama tabakasında yatay çekmeye bağlı iç gerilmeleri oluşur. Kaplamalarda delaminasyon veya tabaka ayrışmasının olmaması da kaplama sırasında damlaların alt tabakadaki henüz oluşmuş damlaların üzerine sıcak bir şekilde düştüğüne ve iyi karıştığına işaret etmektedir. Bununla birlikte yüksek güç değerlerinde ve fekansta ortaya çıkan damlacıkların sıçraması veya dağılması, yapılan kaplamanın genel pürüzlülüğüne negatif olarak etki etmektedir.

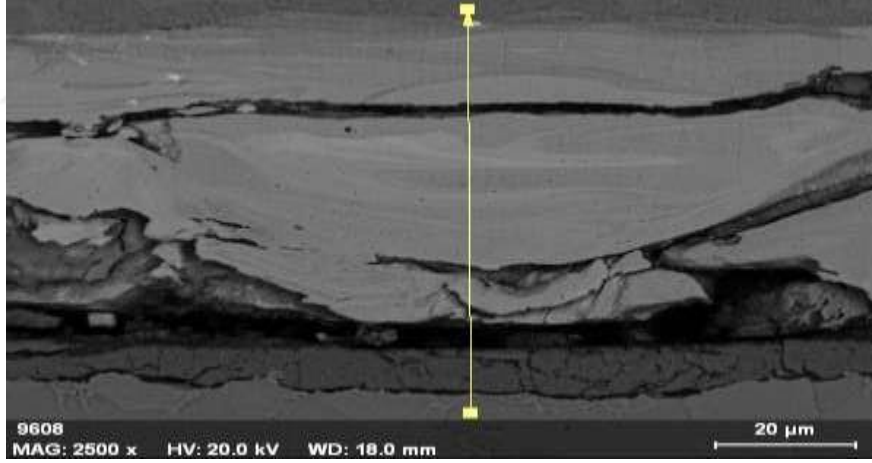
Paslanmaz Çelik ile yapılan kaplamalarda düşük kaplama voltajlarında veya güçlerinde, düşük kaplama frekanslarında oldukça ince bir kaplama görülürken, düşük güç değerlerinde tabaka porozitesi, yani hacimsel olarak gaz boşluklarının varlığı; tabakalaşmaya bağlı olarak yığılma hatları ortaya çıkmıştır. İlâveten, kaplama sırasındaki tabakalaşmanın paslanmaz çelik elektrod ile yapılan kaplamaların genelinde bir problem teşkil ederken, kaplamaların optik mikro yapı resimlerinden düşük voltajlarda matrisle alaşımlandırmanın kısmen gerçekleştiği farkedilmiştir. Düşük ve orta frekanslı, 50 ve 100 voltaj değerlerinde yapılan kaplamalarda ise alaşımlandırmadan dolayı metalik karbür oluşumu gözlemlenmemiştir. Yüksek sıcaklıklarda karbon çözme kapasitesi artan demirin hızlı soğumayla beraber karbürlerin çökmesine engel olamadığı ve bu karbürlerin özellikle matris kaplama ara yüzeyinde ortaya çıktığı görülmektedir.

#### 4.4 M42 Aıtlık Malzemesi Üzerine yapılan Kaplamaların Karakterizasyonu

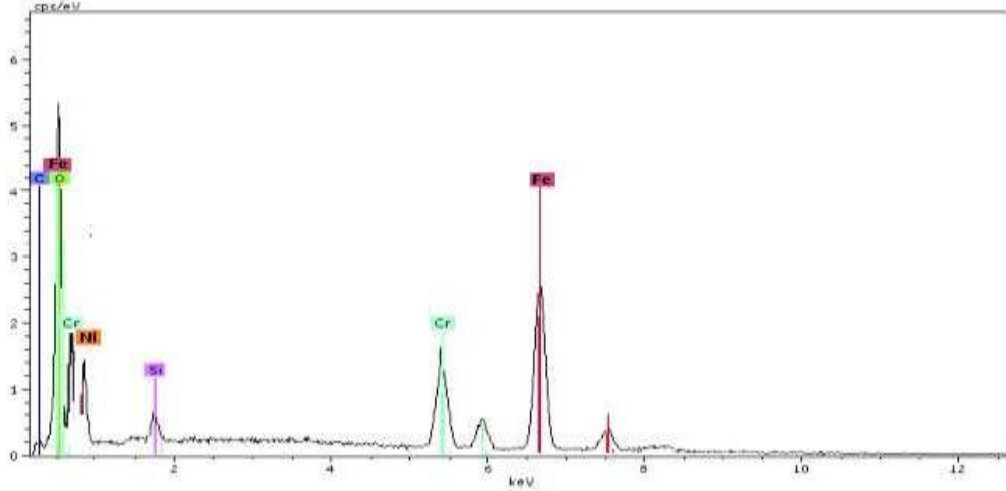
Bu bölümde yapılan kaplamalara ait analizlerin sonuçları gösterilmektedir. Analizlerin incelenmesi, kaplama yapılan malzemenin türüne göre yapılmış ve analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.3 150V ve 1600 Hz de Yapılan Paslanmaz Çelik Kaplam Tabakasının XRD Sonucu.



Resim 4.10 150V ve 1600 Hz Paslanmaz Çelik Kaplama Tabakasının SEM Görüntüsü.



**Şekil 4.4** 150V ve 1600 Hz de Paslanmaz Çelik Kaplama Tabakasının EDX Sonucu.

150 V ve 1600Hz ile kaplanmış olan çelik yüzeyinden alınan XRD sonucuna göre yüzeyde veya kaplama içerisinde en az iki farklı fazın bulunduğu işaret etmektedir. HMK ve YMK yapılar paslanmaz çeliğin yapısında olduğu için kaplama tabakasında ortaya çıkmaktadır. Ancak, matris fazın da HMK olması sonuçlarda matristen gelen bir fazın olup olmadığını açıklayamamıştır ve her iki kısmında HMK yapısı olması sadece alaşım elementlerinin analiz ile mümkündür. SEM görüntüsünde iki farklı bölgenin ortaya çıktığı görülmektedir.

Kaplamanın BSE görüntüsü alaşım elementlerinin farklılıklarını daha net bir şekilde göstermektedir. Kaplamanın daha açık bir tona sahip olması alaşım elementleri bakımından daha zengin olduğu ve altlık malzemesine göre daha yüksek atom numaralı elementler içerdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle kaplamanın altlıkla iyi karıştığını ancak kesme sırasında kaplamanın koparak döküldüğü ve aynı zamanda tabakanın çatlamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Yatay çatlakların varlığı kesme sırasında oluşan açılma kuvvetlerin tabakayı zorlayarak kopardığı ve çatlak ilerlemesine sebep oluşturduğu görülmektedir. Matris ile tabaka görüntülerinin aslında homojen bir yapı oluşturduğu ve karışımın çok iyi sağlandığı görülmektedir. EDX analiz sonuçları Şekil 4.5’de verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre alaşım malzemesinde yaklaşık olarak %18 Cr ve %1 civarında da Si bulunmaktadır. Ancak ana malzeme veya altlık malzeme ile karışımından dolayı küçük miktarlarda bulunan alaşım elementlerinin miktarları çok azaldığı için EDX analizinde görülmemektedir. Si ve C çoğunlukla termoplastik ara tabakadan gelmektedir.



100V ve 150 V değerlerinde, 900 Hz kaplama frekansında yapılan W ve W-Th kaplamalarının XRD sonucu Şekil 4.7 verilmiştir. XRD sonucunda ana malzemeden  $\alpha$  ve demirin pikleri ortaya çıkmıştır. W kaplamanın Resim 4.14 ve Şekil 4.8 de SEM görüntüsü ve EDX sonuçları da verilmiştir. Şekil 4.7 de görüldüğü gibi altlık malzeme ile Tungstenin homojen bir karışım sergilediği, Tungsten bakımından zengin bölgelerin az olmasının bu karışımın ve alaşım yapma ile ilgili olduğu düşünülmektedir. XRD sonuçlarında Tungstenin tek başına görülmesinin bu nedenle gerçekleşmediği düşünülmektedir. Buna karşın Tungstenin altlık malzemenin kaplama sırasında alaşımlandırması ile beraber Fe-W faz diyagramına göre WC fazlarında oluşturabileceği görülmüştür. Bu nedenle XRD sonucunda Tungsten tespit edilememiştir.

Kaplama sırasında kaplanan ilk tabakanın W'ce fakir olması ancak ana malzemeye göre daha sert olması tolere edilebilmektedir. Ancak bu tabakanın üzerine bir sonraki aşamada yapılan Tungsten kaplama hem daha sert olmakta hem de alaşımlandırma miktarı azalmaktadır. Bu nedenle kaplama sırasında ark atlama zorluğu ve oluşan ısı bölgelerin hızlı soğuması ile çatlak başlangıcı ve ilerlemesi kolaylaşmaktadır. Buna rağmen çatlak sayısı oldukça sınırlıdır.

SEM EDX analizinde kaplama bölgesinden alınan çizgi analizinde ise kaplamanın yapıldığı bölgede Tungsten miktarının yükseldiği ve demir miktarının ise azaldığı görülmektedir. EDX analizinde, XRD de görülemeyen Tungstenin varlığı SEM'de rahatlıkla tespit edilebilmiştir.

#### **4.6 M42 Altlık Üzerine Tungsten Toryum (W-Th) Kaplama Karakterizasyonu**

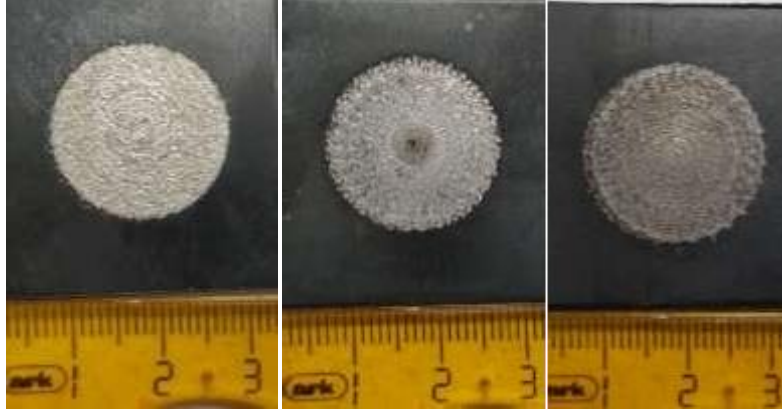
W-Th kaplanmış numunelerinden alınan XRD analiz sonucu Şekil 4.9'da verilmiştir. Bu XRD sonucuna göre, dört farklı fazın kalamada olduğu görülmektedir. Bu fazların  $W_2$ , C(grafit), WC,  $\alpha$ - Fe ve Gama Fe fazları olduğu ancak Toryumun pikinin oluşmadığı XRD analizinde görülmektedir. W ait piklerin şiddetinin değeri zayıf olması nedeniyle ve dolayısıyla bunun kaplamanın üst tabakasından geldiği düşünülmektedir.



Resim 4.13’de görüldüğü gibi W-Th kaplaması oldukça homojen bir kalınlığa sahip olup, içerisinde çok az çatlak içermektedir. Bu gerilim çatlakları, damlaların arasındaki dekohezyon sınırların oluşturduğu bir bölgeyi veya bu kısımda oluşan bir artefak veya obje olarak düşünülebilir. Bu ihtimallerin dışında ise kaplamanın ortasındaki porozitenin, düşen damlalar arasındaki bölgede yeterince kaynaşamaması veya birleşmemesinden kaynaklanan boşluk veya porozite olarak düşünülebilir. Altlık malzemeye yakın bir bölgede ortaya çıkan bu çatlakların kaplama sırasında alaşımlandırma ile Tungstence veya alaşım elementi ile zenginleşmesi sonucu ısıl gerilmelere daha az dayanıklı olduğunda düşünülmektedir. EDX sonucunda W’nin ve diğer alaşım elementlerinin homojen bir şekilde karıştığını göstermektedir. EDS ile yapılan çizgi analizinin kaplama tabakası bölgesinde ise W’nin miktarının ciddi oranda arttığını ve buna karşın Fe’in miktarının azaldığına işaret etmektedir.

#### **4.7 Kaplama Numunelerin Ağırlık Düşürme Test Analizleri**

Kaplamaların delinme performanslarının ölçülmesi için yapılan ağırlık düşürme testleri, 25mm-25mm ebatlarında kesilmiş olan M42 çelik plakalar üzerine yaklaşık 20 mm çapında Tungsten(W), Tungsten -Toryum (W-Th) ve Paslanmaz Çelik elektrodlar kullanarak yapılmıştır. kullanılan güç değeri 150 Volt ve kaplama frekansı ise 1600Hz dir. Malzeme yüzeyine yapılan 3 ayrı kaplamaya ait görüntüler Resim 4.16’da verilmiştir. Kaplanmamış M42 çeliğine ait resim Resim 4.17 de ve kaplanmış numunelere ait resimlerde Resim 4.18 ve Resim 4.23 arasında gösterilmektedir. Kaplanmış numunelerin testlerinin ardından yapılan ölçümlere ait bilgilendirme ve ölçüm yapma teknikleri bu resimlerde açıklanmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız numunelere ait ve çarpma sonucunda üzerinde oluşan deformasyon izinin genişlikleri, izin indent genişlikleri ve izin indent derinlikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.



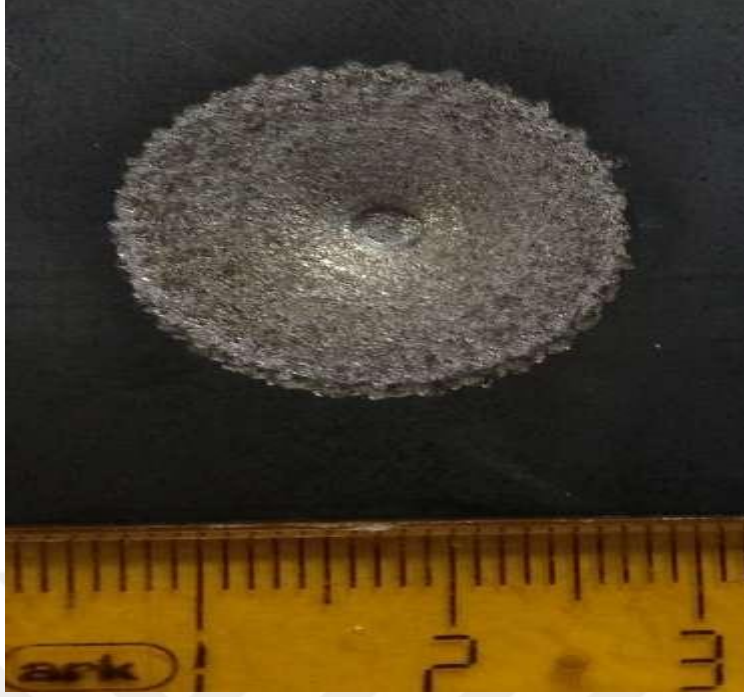
(a) Tungsten

(b) Tungsten-Toryum (c) Paslanmaz Çelik

**Resim 4.13** 150 V 1600 Hz Kaplanan Numuneler. a) W, b) W-Th ve c) Paslanmaz Çelik



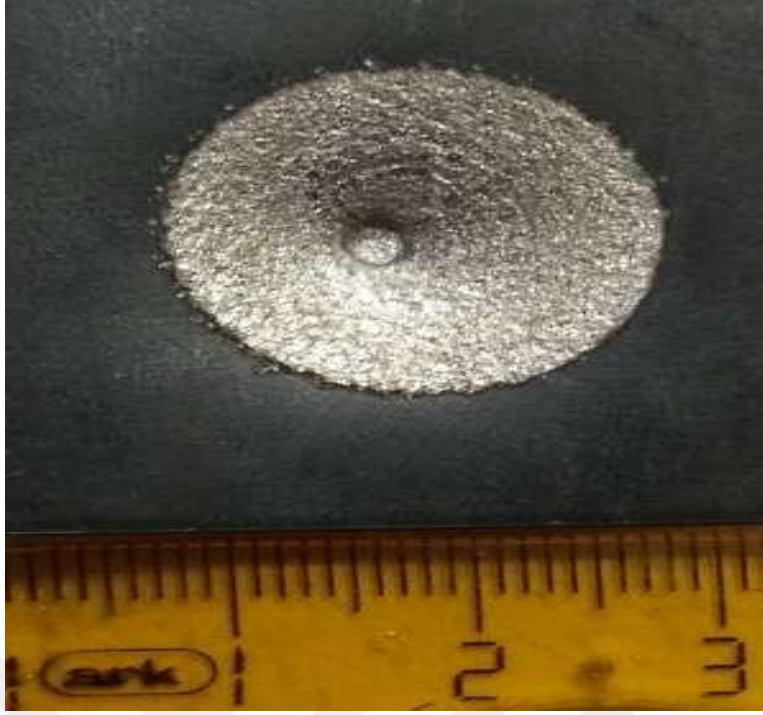
**Resim 4.14** Kaplamasız M42 Çeliği Üzerindeki Serbest Düşme Deformasyon İzi.



**Resim 4.15** Paslanmaz Çelik Kaplamalı M42 Çeliği Üzerindeki Deformasyon İzi.



**Resim 4.16** W Kaplanmış M42 Çeliği Üzerindeki Deformasyon İzi.



**Resim 4.17** W-Th Kaplanmış M42 Çeliği Üzerindeki Deformasyon İzi.



**Resim 4.18** M42 Çeliği Üzerine Yapılan Bir Kaplamanın Deformasyon İndent Genişliğinin Ölçülmesi.



**Resim 4.19** M42 Çeliği Deformasyon İz Yüksekliğinin Ölçümü.



**Resim 4.20** M42 Çeliği Deformasyon İndent Derinliğinin Ölçümü.

**Çizelge 4.3** M42 Çelik Plaka Üzerine 150 volt ve 1600Hz'de Kaplanan Paslanmaz Çelik, Tungsten (W) ve Tungsten Toryum (W-Th) Numunelerinin 1Kg Yükte İz Genişliği, İz İndent Genişliği ve İz İndent Derinlikleri (mm).

Malzeme Türü	İz Genişliği (mm)	İndent Genişliği (mm)	İndent Derinliği (mm)
M42	2,1	2,84	2,10
Paslanmaz Çelik	2,1	2,91	2,19
W	2,1	2,30	2,01
W-Th	1,94	2,04	1,91

Yapılan ölçümler sonucunda M42 çeliğinin değerlerine göre paslanmaz çeliğin indent genişliğinin diğerlerine göre çok daha fazla olduğu ve bununda M42 çeliğinin yüzey tabakasının kaplama sonrasında daha fazla yumuşamaya işaret etmektedir.

Alaşımlandırma sonucunda daha az sertlikte alaşım elementi ile kaplanan bu bölgenin daha kolaylıkla deforme edilebildiğini göstermektedir. W ve W-Th kaplamaların buna karşın, tabaka kalınlıklarının diğerlerine göre daha az olması nedeniyle düşen ağırlık darbesinin emilme kapasitesinide azaltmıştır. Paslanmaz çelik'in ve hem W-Th ve hemde W kaplamadan daha iyi performansı gösterdiği rahatlıkla görülebilmektedir. Eğer, darbe enerjisinin değerlendirilmesi kriteri olarak indent derinliği dikkate alınırsa, çok daha anlamlı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. M42 çeliğinin daha az iz indent derinliğine sahip olması da normaldir. Bununla beraber, Tungsten'nin yapılan XRD ve SEM - EDS sonuçlarında görüldüğu gibi, kaplama tabakasındaki bantlaşma özelliğini göstermesi, her bir damlacığın üst üste düşmesi sırasında yoğunluk farkından dolayı paslanmaz çeliklere göre daha hızlı bir şekilde transfer edilmesine sebep olmaktadır. Kısacası damlacıkların düşme hızı Tungsten de daha fazla olabilir. Ve bu nedenle, deforme edilebilen bir sıvı durumundaki bu damlacıkların daha ince profile sahip olduğu ve tabakalaşmasının daha az belirgin olduğu düşünölemektedir. Bir sonraki performans en iyi paslanmaz çelikte görölmüştür ki altlık malzeme ile aynı matris malzemeye sahip olması nedeniyle çok iyi alaşımlandırma yapısı ortaya çıkmış ve sahip olduğu alaşım elementleri katı hal sertleşme ile hem tokluğunu hem de sertliğini artırarak indentin ilerleyişine karşı direnç göstermiştir.

Paslanmaz çelik kaplamanın, en yakın en iyi performans gösteren kaplamadan yaklaşık olarak % 20 daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Burada kullandığımız ana malzemenin M42 çeliği olması ve sert bir altlık olması, bu malzeme üzerine yapılan elementel kaplamanın sertlik değerini daha da artırması ve maliyet bakımından önemlidir. Altlık malzemesi olarak daha fazla alaşımlı bir malzeme kullanılması durumunda kaplama sertliğinin artmasına rağmen ekonomik olarak fizibil olmayacaktır.

#### **4.8 Balistik Serbest Düşme Çarpma Deneyinin Kinetik Analizi**

Deney setimizde kullanılan ağırlık miktarı 1000gr çekic ağırlığıdır. Bu ağırlık değerine delici uç ağırlığı ve diğer aparatların ağırlığıda dahildir. Ağırlığımızın serbest düşme mesafesi ise veya deney seti yüksekliğimiz ise 2.5 metredir. Serbest düşme kurallarına göre aktif olarak kinetik enerji değerini ise,

$$- \quad (4.1)$$

olup buradan ise hız denkleminin yükseklik ve enerji ile ilişkisin, ifade edecek olursak,

$$- \quad (4.2)$$

$$\text{---} \quad (4.3)$$

olarak bulabiliriz.

Burada mesafeleri ve yerçekimi ivmesini, t seyahat süresini ve kütleyi yerine koyarsak, enerjinin de sabit olduğunu varsayarsak, yaklaşık olarak 7 m/sn veya 13.6 km/s elde ederiz. Ancak bu hız ölçmüş olduğumuz hızın çok altında kalmaktadır. Bu hızda obje üzerine serbest düşen ağırlığın plaka üzerine olan etkisini bulmak içinse, klasik enerji denklemlerinden aşağıdaki denklemi çıkartabiliriz:

$$(4.4)$$

m ler birbirini ortadan kaldırır,

$$(4.5)$$

formülü elde edilir. Buradan, olması gereken yükseklik değerinin 5m olduğu görülmektedir. Ancak, bu potansiyel enerjinin kinetik enerjiye çevrimidir (Deniz 2010). Bu hız değeri ulaşacağı maksimum değerdir.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (4.6)$$

Cisim sabit bir hızda ilerlerken, çarpma anında, sahip olduğu potansiyel yükseklikten dolayı vereceği kinetik enerji değeri ve yaratacağı etki malzemenin E, elastisite modülü ile doğru orantılı olacaktır. Bu koşullar altında, hedefin ağırlığı ve çarpma kütesinin ağırlığı, dikkate alınır, ve yükseklikten (h) bağımsız olursa,

$$E + W_b + \frac{1}{2} m_p \cdot V_r^2 = \frac{1}{2} m_p \cdot V_0^2 \quad (4.7)$$

denklemini elde edilir. “mp” değeri, mermi kütlesi, Kg, Vr mermi hızı, rp ise mermi uç yarıçapıdır. M<sub>hdf</sub> Kg olarak ise hedefin kütlesidir. Bu denklemden, hız limit kaybı olan W<sub>b</sub> nin 0 olması durumunda ise, serbest düşme ile elde edilen enerji kaybının yaklaşık olarak,

$$E_{\text{lost}} = \frac{1}{2} m_p \cdot V_0^2 \quad (4.8)$$

elde edilir. Hız ve kütle yerine konacak olursa, 48.6 Joule luk bir enerji kaybı vardır. Bunun dışında, potansiyel enerji kinetik enerji çevriminden hızı değerinin, elastik modülünden çevrimi ile tanımlarsak, delmek için gerekli olan enerji Thomson modeline göre,

$$E = \pi r_p^2 t (0.5 \sigma_y + A_p \left(\frac{V_0}{c}\right)^2) \quad (4.9)$$

Burada, A obje şekli için sabit bir değerdir, konik için 1 ve küresel için 1.86 alınır. Lm ise mermi uzunluğudur. Buradaki denklem 8 (Deniz 2010) de ilgili parametreleri yerine koyarsak, akma dayanımı 450MPa alınır, t kalınlık m, r ise metre olarak mermi ucu yarıçapıdır. Vo çarpma hızı (m/sn) 7 m/sn olarak alınır, yaklaşık olarak 101.3 Joule değerinde bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır ki, defromasyon için yeterli olup delmek için yeterli değildir. Bu çalışmadaki deney sonuçlarında da elde edilen sonuçlar bu sonuçları desteklemektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ESD kaplama yöntemi kullanılarak M42 çelik plakaların yüzeyleri Tungsten(W), Tungsten Toryum (W-Th) ve Paslanmaz Çelik elektrodlarla kaplanmıştır. Yüzey kaplamaları farklı voltaj/güç ve kaplama frekansı kullanılarak yapılmıştır. W, W-Th ve Paslanmaz Çelik kaplanan plaka şeklindeki numunelerin balistik özellikleri serbest düşen ağırlık yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca, kaplanan numuneler serbest düşme deneyine tabi tutularak kaplama bölgesinden meydana gelen ize ait fiziksel özellikler örneğin iz genişliği, iz indent derinliği ve iz indent genişlikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Aşağıdaki sonuçlar bu araştırmanın sonucudur:

- Yüzeyleri Paslanmaz Çelik, Tungsten ve Tungsten Toryum elektrodlarla kaplanmış olan M42 çeliğinin gerek makroyapı ve gerekse mikroyapı incelemesinde voltaj/güç ve kaplama frekanslarının artırılması ile Tungsten ve Tungsten toryum alaşımının iyi sonuç vermediği görülmüştür.
- Yapılan ESD kaplamalarının damlacık üretme kapasitesi yani, kaplama frekansı arttıkça, kaplama kalınlıkları artış göstermiştir.
- Kaplama Frekansı ve kaplama voltajı değiştirilerek M42 çelik plakası üzerine Tungsten, Tungsten Toryum ve Paslanmaz Çelik elektrod kullanılarak ESD yöntemi ile yapılan kaplamalarda ana malzememizin HV vickers sertlik değerinden en az iki veya daha fazla oranda sertlik artışı sağlanmıştır.
- W, W-Th ve Paslanmaz Çelik ile kaplanan numunelere ağırlık düşürme cihazında 1Kg. yük altında gerçekleştirilen serbest deformasyona maruz kalan numunelerin iz özellikleri incelendiğinde en iyi performans paslanmaz çelikte görülmüş olup, SEM analizinden de görüldüğü gibi yapılan kaplamanın homojen olması ve tabakalardaki alaşımlandırmanın iyi bir şekilde sağlanması iyi bir darbe performansına yol açmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Agarwal, A., Dahotre, N.B. (1998)., Pulse Elektrode Deposition of Superhard Boride Coatings an Ferrous Alloy, *Surface and Coatings Technology*, **106**: 2-3.
- Alim, Y. (2009). Aynı Marka Farklı Seri Numaralı Tabancalardan Çıkan Mermi Çekirdeğinin Hangi Tabancaya Ait Olduğunun Saptanması İçin Yapılan Balistik Analizler, Yüksek Lisans Tezi Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aratman, G. (2018). Delinme Performansı Deney Cihazı Yapımı ve Alüminyum Malzemelerin ESD ile Sert Bir Fazla Kaplanıp Delinme Performansının İncelenmesi. Lisans Bitirme Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyon.
- Backman M.E. Terminal Ballistics, (1976). Naval Weapons Center Technical Publication 5780, China Lake, California, February.
- Başargan, A. (2010). Bakırın Elektrosparc Mikroalaşımlandırma Yöntemi İle Gümüşle Kaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Binay, H. (2016). CTP Destekli AA-6082 T6 Levhalarda Terminal Balistik Özelliklerinin İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Programı, İstanbul.
- Bozkurt, A. (2018). ESD İle Sert Faz Kaplanmış Titanyum Alaşımlarının ve Çeliklerin Lazer ile İşlenmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.
- Carlucci, D. E. and Jacobson, B. (2008). Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition, New York, CRP Press.
- Ceyhun,V.,Turan,M. (2003). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı, *Mühendis ve Makine*, **516**: 2-6.
- Çelikel, A. (2008). Av Tüfeği Namlu Uzunluğunun Saçma Dağılımına Etkisi ve Atış Mesafesinin Belirlenmesine Önemi. Adli Tıp Anabilim Dalı Tıpta Uzmanlık Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Tıp Fakültesi, Eskişehir.

- Deniz, T. (2010). Ballistic Penetration of Hardened Steel Plates, Yüksek Lisans Tezi, ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Held M. Schutzeinrichtung Gegen Geschosse. Deutsche Patentschrift 2 008 156, 21.02.1970 (Patent).
- Korkmaz, K. (2008). Elektrosпарк Biriktirme Yöntemiyle Mikro Alaşımli Çeliklerin Tungsten Karbür ile Kaplanması. Doktora Tezi, Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Kou, S. (2002). Welding Metallurgy, 2nd Edition, Wiley and Sons, NewYork.
- Lancaster, J.F. (1980). Metallurgy of Welding, Brazing and Soldering, 1986 Pergamon Press, 2nd Edition, Springer-Netherlands.
- Malik, P.K. (1990). Fiber Reinforced Composites; Materials, Manufacturing and Design, Marcel Dekker, New York.
- Mısırlıoğlu, E. (2006). Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze.
- Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R. (2006). The Influence of Impactor Shape on the Damage to Composite Laminates. *Composite Structures*, **76**: 116-122.
- Moss, G.M., Leeming, D.W. and Farrar, C.L. (1995). Military Ballistics: A basic manual. *Brassey's Land Warfare*, **13**: 77-80.
- Ogorkiewicz R.M. (1991). Advances in armour materials, *International Defence Review*, **4**: 1-15.
- Roberson C., Ceramic materials for Lightweight Armour Applications. In *Proceedings of the Combat Vehicle Survivability Symposium*, Cranfield University, RMCS, Shrivenham, UK, 8-10 December 2004.
- Topaç, H. (2014). Çelik Yüzeylerin Elektrosпарк Alaşımli Yöntemi Kullanılarak Kromkarbür- Nikelkrom İle Kaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze.
- Yılmaz, M. S. (2012). Saf Titanyum Malzeme Yüzeyinde Titanyum Alüminyum İntermetalik Tabakasının Oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tekirdağ

Doğum Yeri ve Tarihi : 01.01.1994

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta) : 530 737 01 41 / [tugcekisikcilar@gmail.com](mailto:tugcekisikcilar@gmail.com)

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Tekirdağ Lisesi (2007-2011)

Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji  
Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, (2012 - 2016)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı,  
(2016 - 2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : HMY Teknogon (2017 – Devam ediyor)