

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



TİTANYUM ALAŞIMLARINDAN BİRİ OLAN Ti6Al4V'UN ANODİZASYON  
VE SOL-JEL KAPLAMA İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hulusi Kerem GÜNDÜZ

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Tezli Yüksek Lisans Programı

OCAK 2023

T.C.  
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



TİTANYUM ALAŞIMLARINDAN BİRİ OLAN Ti6Al4V'UN ANODİZASYON  
VE SOL-JEL KAPLAMA İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN  
İYİLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hulusi Kerem GÜNDÜZ  
(181202009)

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Savunma Teknolojileri Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Polat TOPUZ

OCAK 2023



**T.C.**  
**İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ**

**Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi**

Enstitümüz, Savunma Teknolojileri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı (181202009) numaralı öğrencisi Hulusi Kerem GÜNDÜZ'ün “Titanium Alaşımlarından Biri Olan Ti6Al4V'un Anodizasyon ve Sol-Jel Kaplama ile Yüzey Özelliklerinin İyileştirilebilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması 25/01/2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından *Oy Birliği ile Yüksek Lisans* tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

**Öğretim Üyesi Adı Soyadı**

**Jüri Onay Tarihi** : 25/01/2023

- 1) Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Polat TOPUZ
- 2) Jüri Üyesi: Doç. Dr. Özlem AYDIN
- 3) Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Zeynep TAŞLIÇUKUR ÖZTÜRK

## YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Titanyum Alaşımlarından Biri Olan Ti6Al4V’un Anodizasyon ve Sol-Jel Kaplama ile Yüzey Özelliklerinin İyileştirilebilirliğinin Araştırılması” adlı çalışmanın, hazırlık safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden olduğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve beyan ederim (25/01/2023).

Hulusi Kerem GÜNDÜZ



Aldığım her kararda yanımda olan ve destek veren babam Rıfat GÜNDÜZ, annem Adile GÜNDÜZ, kardeşim Eren GÜNDÜZ'e, tezin başından sonuna kadar bana yardımcı olan ve bitirmem için motivasyon kaynağım olan eşim Gamze GÜNDÜZ'e teşekkürü borç bilirim.

## ÖNSÖZ

“Kuyunun dibinde yaşayanlar, gökyüzünü kuyunun ağzı kadar sanırlar.”

Bu çalışmayı hazırlarken yol gösteren, ilgisini esirgemeyen ve tez danışmanlığını yapan İstanbul Gedik Üniversitesi Doç. Dr. Polat TOPUZ hocama, Prof. Dr. Mehmet Ali BAYKAL hocama teşekkür ederim.

Tezin yazım aşamasında destek olan Yüksek Mühendis Oğuzhan SEZER, Yüksek Mekatronik Mühendisi Alper Latif GAGA, Kalite Kontrol Yöneticisi Güven Ertan PATLAR, Yöneticim Ali Haydar ÖZCAN ve yüksek lisans süresince destek olan Kale Havacılık Operasyonlar Direktörü Yasin KARABULAK Bey’e ve Kale Havacılık Mühendislik Müdürü Bilal Yaka Bey’e, deney düzeneklerini hazırlarken destek olan Proses Mühendisi Mustafa Ozan TEKİN Bey’e, her türlü imkânı sağlayan ve destek veren Kale Havacılık şirketine teşekkür ederim.

Ocak 2023

Hulusi Kerem GÜNDÜZ

Tasarım ve İmalat Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>v</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Çalışma Konusu .....	1
1.2 Tezin Amacı.....	2
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
2.1 Titanyum Alaşımları ve Ti6Al4V Genel Özellikleri.....	4
2.2 Titanyum Alaşımlarının Yapısı ve Sınıflandırılması .....	7
2.2.1 Titanyum alaşımlarının yüzey yapısı ve özellikleri .....	11
2.2.2 Titanyum ve alaşımlarının yüzey modifikasyonunun gereksinimleri .....	12
2.3 Anodik Oksidasyon (Anodizasyon) .....	14
2.3.1 Anodizasyon yöntemleri .....	15
2.3.2 Titanyum anodizasyonu .....	15
2.3.3 Titanyum'un anodizasyon işlemiyle renklendirilmesi .....	18
2.4 Sol Jel Kaplama.....	19
2.4.1 Sol-jel yöntemi .....	20
2.4.1.1 Sol-jel yönteminin genel prensibi .....	22
2.4.1.2 Sol-jel yönteminde kullanılan bileşenler .....	22
2.4.1.2.1 Metal alkoksitler .....	22
2.4.1.2.2 Alkoller .....	23
2.4.1.2.3 Katalizörler .....	23
2.4.1.3 Sol-jel oluşumu .....	23
2.4.1.3.2 Jelleşme.....	24
2.4.2 Sol-jel film kaplama yöntemleri .....	25
2.4.2.1 Daldırma yöntemi.....	27
2.4.2.2 Döndürme yöntemi.....	29
2.4.2.3 Püskürtme yöntemi.....	30
2.4.2.4 Elektroforez yöntemi .....	30
2.4.2.5 Termoforez yöntemi .....	30
2.4.2.7 Karışık yöntem.....	31
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>32</b>
3.1 Deneyde Kullanılan Materyaller ve Uygulama Yöntemleri .....	33
3.1.1 Titanyum malzeme .....	33
3.1.2 Sol-jel kaplama kiti .....	33
3.1.3 Aşındırıcı pedler .....	34
3.1.4 Manuel kumlama .....	35

3.1.5 Sprey ile sol-jel kaplama .....	37
3.1.6 Alkali yağ alma.....	38
3.1.7 Sol-jel uygulama .....	38
3.1.8 Anodizasyon işlemi ve hazırlıkları .....	40
3.1.9 Kimyasal İşlemler Parametrelerinin Belirlenmesi.....	43
3.1.10 Yüzey pürüzlülüğü ölçümü .....	43
3.1.11 İletkenlik ölçümü .....	45
3.1.12 Direnç ölçümü .....	46
3.1.13 Kaplama kalınlığı ölçümü .....	46
3.1.14 Sertlik ölçümü.....	47
3.2 Deneysel Analizler .....	48
<b>4. DENEYSEL ANALİZLERİN SONUÇLARI.....</b>	<b>58</b>
4.1 Kaplama İşlemlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi .....	58
4.2 Kaplama İşlemlerinin Malzeme Sertliğine Etkisi .....	59
4.3 Kaplama İşlemlerinin Malzeme Kalınlığına Etkisi .....	60
4.4 Kaplama İşlemlerinin Elektriksel Özelliklere Etkisi.....	61
4.5 Kaplama İşlemlerinin Korozyon Dayanımına Etkisi .....	62
4.6 Kaplama İşlemlerinin Adezyon Performansına Etkisi .....	63
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>66</b>
5.1 Sonuçlar .....	66
5.2 Öneriler .....	68
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>70</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>73</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>91</b>

## KISALTMALAR

<b>k</b>	: Kütle Transfer Kat Sayısı
<b>pe</b>	: Yüzeyde Oluşan Basınç
<b>pi</b>	: 1 Kadar Uzakta Oluşan Basınç
<b>h</b>	: Film Kalınlığı
<b><math>\eta</math></b>	: Sol vizkositesi
<b>u</b>	: Daldırma Hızı
<b><math>\rho</math></b>	: Sol Yoğunluğu
<b><math>\gamma_{LV}</math></b>	: Sıvı Buhar Gerilmesi
<b>g</b>	: Yer Çekimi İvmesi

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1: Titanyum Özellikleri.....	6
Çizelge 2.2: Ti6Al4V Alaşımının Özellikleri.....	7
Çizelge 2.3: Titanyum ve Alaşım İmplantlarının Yüzey Modifikasyon Metodları ...	13
Çizelge 2.4: Sol-Jel Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları .....	21
Çizelge 3.1: Sol-Jel Kaplama Prosesi Kayıt Kartı .....	39
Çizelge 3.2: Tuz Testinde Kullanılan Çözelti Değerleri .....	50
Çizelge 4.1: Titanyum Kuponlarının Farklı Kaplamalarla Elde Edilen Sonuçlar .....	58

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Kaplamalı Bir Uçak Yapısal Parçası .....	2
Şekil 2.1: Titanyum Faz Diyagramının Bazı Alaşım Elementlerine Göre Değişimi	7
Şekil 2.2: Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması İçin Sınıflandırmak Üzere Vanadyum (V) Ve Alüminyum (Al) Elementlerinin Kullanımı İle Oluşan Faz Diyagramı	9
Şekil 2.3: Ti6Al4V Alaşımını Atomik Yapısı	10
Şekil 2.4: Saf Ti Yüzeyinde Oluşan Oksit Filmin Şematik Gösterimi	12
Şekil 2.5: Sulu Çözeltilerinin Elektrolizindeki Elektrot Prosesi	16
Şekil 2.6: Titanyum Dioksit/Elektrolit Ara Yüzeyindeki Elektriksel Çift Tabakanın Şematik Yapısı	18
Şekil 2.7: TiO2 Film Kalınlığına Bağlı Olarak Numune Üzerinde Oluşan Renklerin Şematik Gösterimi	19
Şekil 2.8: Sol-Jel Yöntemleri ve Ürünleri	20
Şekil 2.9: Sol-Jel Tekniği İle Kaplanan İnce Film Üretimi	21
Şekil 2.10: Sol-Jel Yönteminde Kullanılan Katalizörler	23
Şekil 2.11: Jelleşme Mekanizmaları	25
Şekil 2.12: İnce Film Hazırlama Yöntemleri	26
Şekil 2.13: Daldırma Kaplama Yönteminin Aşamaları	28
Şekil 2.14: Döndürme Kaplama Yönteminin Aşamaları	29
Şekil 3.1: Deney düzeneği akış diyagramı	32
Şekil 3.2: Titanyum kupon görünüşü	33
Şekil 3.3: Sol-jel Kaplama Kiti Arka ve Ön Görünüşü	34
Şekil 3.4: Bear-TEX, Norton Co., Worcester M	35
Şekil 3.5: Scotch-Brite, Type A, 3M Co., St. Paul MN	35
Şekil 3.6: Ferro ECOblast Manuel Kumlama Tezgahı	36
Şekil 3.7: 180 Grit Alüminyum Oksit Kum	36
Şekil 3.8: Sol-jel Kaplama Yapılan Boya Atölyesi	37
Şekil 3.9: Alkali Yağ Alma İşleminde Kullanılan Havuz ve Kimyasalın Bilgileri	38
Şekil 3.10: Su Kırılımı Testi Uygulaması	38
Şekil 3.11: Dağlama İşleminde Kullanılan Havuz ve Kimyasalın Bilgileri	40
Şekil 3.12: Saf Su İle Yıkama İşleminde Kullanılan Havuz ve Bilgileri	41
Şekil 3.13: Titanyum Anodizasyonu Banyosu ve Kimyasal Bigileri	41
Şekil 3.14: Akar Yıkama Havuzu ve İşlem Bilgileri	42
Şekil 3.15: Kurutma İşlemi İçin Kullanılan Tank	42
Şekil 3.16: Kimyasal Havuzların Kontrol Paneli	42
Şekil 3.17: Sol-Jel İşlem Parametreleri	43
Şekil 3.18: Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı	44
Şekil 3.19: Yüzey Pürüzlülüğü Cihazı Ölçüm Bölümü	44
Şekil 3.20: Yüzey Pürüzlülüğü Cihazının Parça Üzerinde Çalışma Görüntüsü	45
Şekil 3.21: İletkenlik Ölçüm Cihazı	45
Şekil 3.22: Elektrik Direnci Ölçüm Cihazı	46

<b>Şekil 3.23:</b> Test Kuponunun Ölçümü	46
<b>Şekil 3.24:</b> Kaplama Kalınlığı Ölçüm Cihazı	47
<b>Şekil 3.25:</b> Sertlik Ölçüm Cihazı	47
<b>Şekil 3.26:</b> Tuz Testi İçin Kullanılan Cihaz	48
<b>Şekil 3.27:</b> Tuz Testi Kontrol Paneli	49
<b>Şekil 3.28:</b> Numunelerin Test Kabinine Yerleştirilmesi	50
<b>Şekil 3.29:</b> Çözeltilerin Hazırlanması İçin Kullanılan Titrator	51
<b>Şekil 3.30:</b> Çözeltilerin Hazırlanması İçin Kullanılan Ph/Kondüktometre	52
<b>Şekil 3.31:</b> Parça Üzerindeki Yüzey Pürüzlülüklerinin Tespit Edilmesi	53
<b>Şekil 3.32:</b> Test Parçasının Yüzey Pürüzlülüğünün Okunması	53
<b>Şekil 3.33:</b> Test Parçasının Mikro Sertliğinin Tespit Edilmesi	54
<b>Şekil 3.34:</b> Test Parçasının Mikro Sertliğinin Okunması	54
<b>Şekil 3.35:</b> Test Parçasının Görüntüleri Clemex Optik Mikroskop ile Alınmıştır	55
<b>Şekil 3.36:</b> Adezyon Testinde Çizik Atmak İçin Kullanılan Cross Cut Aleti	55
<b>Şekil 3.37:</b> Astar Atılmış ve 90° Çizilmiş Test Parçası	56
<b>Şekil 3.38:</b> Scotch Düz Maskleme ve Adezyon Bantı	56
<b>Şekil 3.39:</b> Scotch Düz Maskleme ve Adezyon Bantı	57
<b>Şekil 3.40:</b> Saf Suda Bekletilen Test Kuponları	57
<b>Şekil 4.1:</b> Kaplama Çeşidine Bağlı Yüzey Pürüzlülüğünün Karşılaştırılması	59
<b>Şekil 4.2:</b> Kaplama Cinsine Bağlı Mikro Sertliklerin Grafik İle Karşılaştırılması	60
<b>Şekil 4.3:</b> Kaplama Cinsine Göre Kaplama Kalınlığı Grafik Karşılaştırılması	61
<b>Şekil 4.4:</b> Kaplama Cinsine Göre Direnç Grafik Karşılaştırılması	61
<b>Şekil 4.5:</b> Sol-Jel-Kaplamasız-Anodizasyon Tuz Testi Karşılaştırılması	62
<b>Şekil 4.6:</b> Çizikli Kaplamasız Numunede Görülen Çok Az Kalkma	63
<b>Şekil 4.7:</b> Çizikli Kaplamasız Numunenin Sınıflandırma Seçimi	63
<b>Şekil 4.8:</b> Kaplamasız Numunenin Yaş Çizikli Adezyon Testi Sonrası Görüntüsü	64
<b>Şekil 4.9:</b> Çizikli Kaplamasız Numunenin Islak Adezyon Testi Sınıflandırma Seçimi	64
<b>Şekil 4.10:</b> Kaplamasız Numuneden Çekilen Bant Üzerinde Kalan Astar Artıkları	64
<b>Şekil 4.11:</b> Sol-Jel Kaplamalı Numuneden Çekilen Bant Üzerinde Kalan Astar Artıkları	65
<b>Şekil 4.12:</b> Anodizasyon Kaplamalı Numuneden Çekilen Bant Üzerinde Kalan Astar Artıkları	65
<b>Şekil A.1:</b> Sol-Jel Kaplamalı Kupon Tuz Testi Öncesi	73
<b>Şekil A.2:</b> Anodizasyon Kaplamalı Kupon Tuz Testi Öncesi	73
<b>Şekil A.3:</b> İşlemsiz Kupon Tuz Testi Öncesi	74
<b>Şekil A.4:</b> Sol-Jel Kaplamalı Kupon Tuz Testi Sonrası	74
<b>Şekil A.5:</b> Sol-Jel Kaplamalı Kupon Tuz Testi Sonrası	74
<b>Şekil A.6:</b> Anodizasyon Kaplamalı Kupon Tuz Testi Sonrası	75
<b>Şekil B.1:</b> 5,6mm Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Grafiği	76
<b>Şekil B.2:</b> 10mm Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Grafiği	76
<b>Şekil B.3:</b> 10mm Yüzey Pürüzlülüğü 2. Ölçüm Grafiği	76
<b>Şekil B.4:</b> Mikro Sertlik Karşılaştırması 1. Ölçüm Grafiği	77
<b>Şekil B.5:</b> Mikro Sertlik Karşılaştırması 2. Ölçüm Grafiği	77
<b>Şekil B.6:</b> Sertlik Karşılaştırması 1. Ölçüm Grafiği	77
<b>Şekil B.7:</b> Kaplama Kalınlığı Karşılaştırması 1. Ölçüm Grafiği	78
<b>Şekil B.8:</b> Kaplama Kalınlığı Karşılaştırması 2. Ölçüm Grafiği	78
<b>Şekil B.9:</b> Elektrik Direnci Karşılaştırması 1. Ölçüm Grafiği	78
<b>Şekil C.1:</b> Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü	79
<b>Şekil C.2:</b> Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü	79

<b>Şekil C.3:</b> Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü	80
<b>Şekil C.4:</b> Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü	80
<b>Şekil C.5:</b> Sol-Jel malzeme yüzey görüntüsü	81
<b>Şekil C.6:</b> Sol-Jel malzeme yüzey görüntüsü	81
<b>Şekil C.7:</b> Sol-Jel Malzeme Yüzey Görüntüsü	82
<b>Şekil C.8:</b> Sol-Jel Malzeme Yüzey Görüntüsü	82
<b>Şekil C.9:</b> Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü	83
<b>Şekil C.10:</b> Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü	83
<b>Şekil C.11:</b> Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü	84
<b>Şekil C.12:</b> Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü	84
<b>Şekil D.1:</b> Sol-Jel Kaplamalı Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü Görüntüsü	85
<b>Şekil D.2:</b> Kaplamasız Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü Görüntüsü	85
<b>Şekil D.3:</b> Anodizasyon kaplamalı malzeme yüzey pürüzlülüğü görüntüsü	86
<b>Şekil E.1:</b> Anodizasyon Kaplamalı Malzeme Mikro Sertlik Görüntüsü.....	87
<b>Şekil E.2:</b> Sol-Jel Kaplamalı Malzeme Mikro Sertlik Görüntüsü.....	87
<b>Şekil E.3:</b> Kaplamasız Malzeme Mikro Sertlik Görüntüsü.....	88
<b>Şekil F.1:</b> Sol-Jel Kaplamalı Kuponun Adezyon Testi Sonrası Görüntüsü.....	89
<b>Şekil F.2:</b> Kaplamasız Kuponun Adezyon Testi Sonrası Görüntüsü.....	89
<b>Şekil F.3:</b> Anodizasyon Kaplamalı.....	90

# TİTANYUM ALAŞIMLARINDAN BİRİ OLAN Ti6Al4V'UN ANODİZASYON VE SOL-JEL KAPLAMA İLE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Havacılık sanayisinde ve tıp sektöründe oldukça yaygın kullanılan metalik malzemelerden biri titanyum alaşımıdır. (Ti-4Al-6V) Bu malzemenin insan ile biouyumlu olmasının yanı sıra hafif, korozyona karşı dirençli olması, mukavemet özgül ağırlık oranı nedeniyle yüksek hızla çalışan titreşimli parçalarda oldukça tercih edilir. Fakat her ne kadar istenilen ihtiyaçlara karşılık versede zamanla üzerinde yüzeysel aşınmalar, titreşimler ve kimyasal tepkimeler sonucu istenmeyen hasarlara maruz kalmaktadır. İşte bu nedenle çeşitli yüzeysel koruyucular, yüzey işlemleri ve yüzey kaplama işlemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada Boeing ve benzeri uçakların dış iskelet parçalarında ve bazı titreşime maruz kalan kısımlarında kullanılan titanyum alaşım malzemesinin (Ti-4Al-6V) belirli parametreler sabit tutularak anodizasyon ve sol-jel kaplama yapılması ve kaplamalar sonrasındaki numunelerin sabit değerler ile tuz banyosu korozyon testi yapılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada iki farklı kimyasal yüzey kaplama işlemi ile hazırlanan titanyum malzemelerin yüzey özelliklerinde oluşturduğu etki gözlenmektedir. Hazırlanan üç adet titanyum kupona (Ti-4Al-6V) anodizasyon, kaplamasız ve sol-jel kaplama sonrasında sertlik, yüzey pürüzlülük testi, tuz banyosu testi yapılmış olup kaplama yüzeyi optik mikroskop ve elektron mikroskobu ile incelenip karşılaştırılmıştır.

Malzemeler Kale Havacılık Sanayi A.Ş. Ambarından özel test kuponlarından standart ölçülerde seçilmiştir. Kale Havacılık Sanayi A.Ş. Kalite Güvence ve Kontrol bölümü ve Özel Prosesler bölümünde özel kimyasal işlemler, kumlama ve kaplamaları yapılmış olup testleri ve inceleme görüntüleri yine bu bölümlerde tamamlanmıştır. Bu tez yapılırken deneysel çalışmalarda iş sağlığı ve güvenliği kurallarına uyulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** *Havacılık, Anodizasyon, Kaplama, Sol-Jel, Aşınma, Yüzey Pürüzlülüğü, Ti6Al4V*

**INVESTIGATION OF THE IMPROVEMENT OF THE SURFACE  
PROPERTIES OF Ti6Al4V, ONE OF THE TITANIUM ALLOY, WITH  
THE ANODIZATION AND SOL-JEL**

**ABSTRACT**

One of the metallic materials used quite widely in the aerospace industry and the medical sector is titanium alloy (Ti-4Al-6V). In addition to being biocompatible with humans, this material is highly preferred in vibrating parts operating at high speed due to its lightweight, corrosion resistance, and strength specific gravity ratio. However, although they meet the desired needs, they are exposed to unwanted damage as a result of superficial abrasions, vibrations and chemical reactions over time. That is why various surface preservatives, surface treatments, and surface coating processes have been developed. In this study, it was aimed to make anodizing and sol-jel coating of titanium intake material (Ti-4Al-6V) used in exoskeleton parts and some vibration-exposed parts of Boeing and similar aircraft by keeping certain parameters constant and to perform salt bath corrosion tests with fixed values of samples in the question of coatings.

In this study, the effect of titanium materials prepared by two different chemical surface coating processes on the surface properties is observed. After anodization, uncoated and Sol-jel after coating hardness, surface roughness test, and salt bath test were performed on three prepared titanium coupons (Ti-4Al-6V), and the surface coating was examined and compared with an electron and optical microscope.

Materials were selected in standard sizes from special test coupons from the warehouse in Kale Aerospace Industry Inc. Kale Aerospace Industry Inc. Special chemical treatments, sandblasting and coatings have been made in the Quality Assurance and Control department and Special Processes department, and their tests and inspection images have been completed in these departments. In the experimental studies of this thesis, occupational health and safety rules were followed.

**Keywords:** *Aerospace, Anodization, Coating, Sol-jel, Abrasion, Surface Roughness, Ti6Al4V*

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Çalışma Konusu

İlk motorlu uçağı Wright kardeşler 1903 yılında tasarlamış ve üretmişlerdir. Tahtadan ve kanvas kumaştan imal edilen uçaklarda uçarken verimin artırılması gerekliliği, dayanıklılık gereksinimleri, uçağın ağırlığının azalması, bu hava araçlarında kullanılabilecek yeni malzeme ihtiyaçları doğurmuştur. Bu uçaklarda kullanılan kanvas kumaşların yerine vernikli kumaşlar ve tahtaların yerine ise çelik borular kullanılmaya başlandı. Verimliliği artırmak için ağırlığın düşürülmesi gerekliliğinden ilk olarak 1940'lı yılların başından itibaren alüminyum monokok kullanılmaya başlandı. Ağırlık ve direnç, halâ hava araçları için en ciddi sorundur. Bu sorunu bütünüyle çözmek imkânsız olsada, mevcut malzemeleri belirli ihtiyaçlara göre kaplamak bu sorunların önüne geçebilmek için kullanılabilecek en uygun yöntemlerdir. Kaplama işlemi, bir malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini yüzeysel olarak değiştirmek için yapılır. Kaplama ve ana malzemenin tasarımını bir arada tutar ve her ikisinde tek başlarına sağlayamayacağı özellikleri ekonomik olarak sağlar. Yüzey kaplama işlemleri geçtiğimiz yüzyılda elde edilen ekonomik ve teknik anlamda sağladığı avantajlar göz ardı edilemez derecede sık kullanılmaya başlanmıştır. Günümüz teknolojisinde değişen teknolojik ihtiyaçlara yanıt verebilecek ürünler ve ürünlerin üretimi yalnızca kaplama işlemleri ile yapılabilmekte ya da yine bu yollarla istenilen kaliteye ekonomik bir şekilde ulaşılmaktadır. Bir diğer taraftan sektörde ileri malzeme teknolojileri ihtiyacı duyan kurumlar performans önemi açısından değişiklik göstermektedir. Örneğin askerî havacılıkta, performans ihtiyaçları korozyon, ısıl dayanım ve buna benzer niteliklerde istenirken, sağlık sektöründe optik amaçlı bir kaplama istenildiği tespit edilmiştir. Kaplama işlemleri optik amaçlı, elektrik-elektronik sanayide kullanılan, aşınmaya karşı kullanılan, korozyondan korunmak amacıyla yapılan, dekoratif amaçlarla yapılan bir çok kullanım alanı vardır. Kaplama ile yapılan malzemelerin bu avantajlı durumları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışma içerisinde titanyum alaşımlarının genel özellikleri, kullanım alanları, havacılıktaki yerleri, avantajları ve dezavantajları üzerine bilgiler verilip genel kaplama yöntemleri ve

titanyum malzemelerin anodizasyon ve sol-jel kaplama yöntemleri üzerine bilgiler verilmiştir. Bununla birlikte titanyum malzemelerin farklı kaplama yöntemleri ile nasıl yüzey özelliklerinin geliştirileceği araştırılmıştır. Kaplama deneyleri sonucunda numunenin yüzey pürüzlülüğü değerleri alınmıştır ve tuz testi değerleri hesaplanmıştır.



**Şekil 1.1:** Kaplamalı Bir Uçak Yapısal Parçası

**Kaynak:** (Url-1, 2020)

## 1.2 Tezin Amacı

Teknolojinin gelişmesi ve yeni ihtiyaçlar ile havacılık ve savunma sektöründe kullanılan malzeme sayısı ve özellikleri artmaktadır. Metalik malzemelerin havacılık sektöründeki kullanım alanlarının artışı dışında sağlık sektörü gibi diğer sektörlerde de kullanılır olmuştur. Bu durum kaplanan malzemelerin çeşitli mekanik özelliklerinin ve dış şartlara gösterdiği direncin artmasıyla mümkün kılınmıştır. Hava araçlarında da önceleri istenilen şartlara göre malzeme belirlenirken ve ekstra malzeme ihtiyacı duyarken artık kaplamalar yardımıyla malzeme geometrisini koruyarak istenilen ihtiyaca özel kaplamalar ile gerekli yüzeysel özellikler ekonomik bir biçimde kazandırılmaktadır . Günümüze gelindiğinde hava araçlarında hemen hemen her bölüm içerisinde kullanılan parçalar çeşitli kaplama işlemlerinden

geçmektedir. Çeşitli kimyasal kaplama yöntemleri ile özellikleri geliştirilen bu parçalar uçakların önemli kısımlarında kullanılmak için hazır hale gelmektedirler. Yapılan bu kimyasal kaplama işlemlerinde malzemeler için en uygun kaplama yöntemleri seçilmesi gerekmektedir. Bu yöntemler malzemenin işlem uygulanan bölgelerinde inklüzyon oluşmaması ve kaplamanın doğru şekilde sonuç vermesi için gerekli önlemler alınması gerekmektedir. Bu önlemler; doğru kimyasal seçimi, doğru yöntem seçimi, doğru akım ile çalışılması, doğru ekipman kullanımı gibi önlemlerdir. Bu çalışma içerisinde titanyum bir malzemenin farklı kaplama yöntemleri ile yüzeysel özelliklerinin değerlendirilmesi üzerine deneyler yapılacaktır. Havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan Ti6Al4V malzemesinden üç kupon anodizasyon, sol-jel kaplamalı ve kaplamasız olarak işleme tabî tutulmuş ve sonuçlar incelenmiştir. Belirli standart ve spesifikasyonlardan yararlanılarak oluşturulan deney düzeneğinde, yüzey pürüzlülük değerlerinin nasıl değiştiği, deformasyon faktörü değerinin nasıl etkilendiği üzerine çalışma yapılmıştır. Bulunan değerler ile birlikte grafikler oluşturulmuş ve kullanılan yöntemlere göre istenen kaplama kalitesinin yakalanması için öneriler sunulmuştur.



**Şekil 1.1:** Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesici Takımların Hemen Hemen Hepsinde Kaplama Kullanılır

**Kaynak:** (Url-2, 2020)

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde literatürler hakkında bilgilendirme yapılacaktır.

### 2.1 Titanyum Alaşımları ve Ti6Al4V Genel Özellikleri

21. yüzyılda, geçtiğimiz birkaç yüzyıl ile karşılaştırıldığında, malzeme teknolojisi ve geleneksel metal malzemelerin gelişimi, endüstriyel ve tıbbî uygulamalardaki performans gereksinimlerini karşılamamış ve malzeme bilimi alanında mükemmel malzeme arayışına daha fazla önem verilmiştir. Bu öneme yanıt olarak, malzeme bilimiyle ilgilenen bilim adamları ve endüstriyel üreticiler günümüzün en popüler ve yüksek performanslı titanyum ve alaşımlarını keşfedip üretmeye başlamışlardır. Korozyon direnci, mekanik özellikler ve tıbbî alanda kullanılabilirlik açısından bu metal malzeme en çok tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir.

Titanyum malzemesi, ilk olarak İngiltere'de 1790 yılında William Gregor tarafından oksit formunda keşfedilmiştir. Alman kimyacı Klaproth 1795 yılında Macaristan'da titanyum dioksitin analizini yaparak titanyum elementinin oksidini de keşfetmiştir. Klaproth bu elemente Yunan mitolojisinde üstün güç ve dayanıklılıkları ile bilinen Titanlardan esinlenerek titanyum adını vermiştir (Coşkun, 2011).

Yerkabuğunun %0,6'sını oluşturan titanyum, metal sıralamasında demir, alüminyum, magnezyumun ardından dördüncü sırada gelmektedir. (İçdem, 2007; Leyens ve Peters, 2003). Titanyum yeryüzünde fazlaca bulunmasına rağmen üretimi zor olduğu için piyasa değeri yüksektir. Saf halde bulunmayan titanyum, yüksek konsantrasyon değerlerinde de az bulunmaktadır (Leyens ve Peters, 2003; Sıcakyüz, 2007).

Saf titanyum malzemesi 1950 yıllarından beri havacılık ve uçak sanayisinde paslanmaz çelikten hafif, alüminyumdan daha yüksek ısı dirence sahip olması tercih edilebilir hale gelmesinin baş sebeplerinden birisidir. Ayrıca tercih sebeplerinden biride yüksek korozyon direnci ve kaynaklanabilirliktir. Bu özelliklere sahip olması ile üzerine çalışmaların ve üretiminin artmasına sebep olmuştur (Duman, 2010).

Titanyum metalinin endüstriyel olarak ilk kullanım denemesi, 1952 yılında DC-7 tipi

bir uçağın motorundaki uçak bağlantı noktalarında ve motor içerisindeki kanatçıklardaki yanma odalarında kullanılmıştır (İçdem,2007).

Bir geçiş elementi olan titanyumun atom numarası 22'dir ve allotropiktir. Atom ağırlığı ise 47,90'dır. 882 °C altında olan sıcaklık koşullarında  $\alpha$  fazında kararlıdır. Yapısı sıkı paket hekzagonal (SPH) yapı olup, erime sıcaklığı 1668 °C'dir. Hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki  $\beta$  faz için 882 °C ile 1668 °C arasında kararlıdır (İçdem, 2007, Brown,1996).

Titanyum dayanımının yoğunluğa oranı yüksek olmaktadır ve maliyeti yüksek olduğu için kullanım alanı sınırlıdır. Oksijenle etkileşime girme eğilimi, maliyeti arttırmaktadır. Titanyumun tercih edilme nedeni, bir yapı bileşeni olarak hafif kullanımın gerektiği uygulamalar ve 150 °C üstündeki uygulamalarda, erime sıcaklığının alüminyumdan daha yüksek olmasıdır. Oksijenle reaksiyon içerisine girme eğiliminden dolayı, kullanım sıcaklığı ortalama 600 °C'dir. 600 °C'nin üstündeki durumlarda oksijende bulunan oksit tabakasının difüzyonunu hızlandırıp oksit tabakasını kalınlaştırmakta, sınırda bulunan oksijen ile yoğun bölgeyi gevrekletmektedir (Balaban, 2007; Lütjering ve Williams, 2003).

Titanyum ve alaşımları fiziksel ve kimyasal özellikleri göz önünde bulundurularak, yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Bu özellikleri ile savunma sanayisinde uçak, uzay ve deniz sektörlerinde kullanılmaktadır. Metalin ve alaşımlarının kuvvetli ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve göreceli olarak hafif oluşu, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci kullanım alanlarının yaygınlaşmasına neden olmuştur. Bu özelliklerle savunma sanayisi dışında medikal sektörde de kullanımı yaygınlaşmakta olup özellikle kemik ve diş protez yapımlarında kullanılmaktadır. (Duman, 2010, Yue, 1984)

Titanyum alaşımları, iki farklı birim kafes yapıya sahiptir. Bu yapılar allotropik dönüşümü etkilediği için, kullanım alanlarında etkilenmektedir. Titanyum ve alaşımların kristal yapısı, ayrıca difüzyon ve plastik deformasyon üzerinde de etkiye sahiptir. SPH kristal yapı,  $\alpha$  titanyumun sahip olduğu mekanik özelliklerin üzerinde anizotropinin belirgin bir şekilde görülmesine yol açmaktadır. Young Modülü, SPH kristal yapıdaki tek titanyum kristalidir. Kristalin taban düzlemine paralel yönde 100 GPa, dik yönde 145 GPa etki etmektedir (Leyens ve Peters, 2003; Akdaş, 2006).

Kristal bir kafes yapısı içerisinde metallerin plastik deformasyon yatkınlığı en fazla yüzey merkezli kübik kristal (YMK) yapıda, en az ise SPH kristalde gerçekleşmektedir. Bu nedenle HMK kristal yapısındaki  $\beta$  titanyum malzemelere kıyasla SPH'deki  $\alpha$  titanyum, plastik deformasyonda daha düşük bir performansa sahiptir (Akdaş, 2006).

Birim kafeste  $\alpha$  titanyum atomları yoğun bir şekilde paketlenmiş için SPH kristal yapıda görülen difüzyon, HMK kristal yapısında bulunan  $\beta$  titanyum malzemelere kıyasla daha zor gerçekleşmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  arasındaki bu difüzyon katsayısı farklılığının nedeni, mikro yapılarındaki farklılıktır. Süper plastisite ve sıcak işlenebilirlik gibi özellikler, iki ayrı faz yapısı tarafından belirlenmektedir. Limitli hacimsel difüzyonun olduğu  $\alpha$  titanyum ve alaşımlarındaki sürtünme dayanımı,  $\beta$  alaşımlarına oranla daha yüksektir. Yüksek hızlarının sonucunda ince lamel yapıya sahip taneler oluşmakta, yavaş soğutma hızı ise kaba taneli lamel yapıya sahip taneler oluşturmaktadır. Soğuma sürecinde yeterince zaman verildiği zaman oluşan lamelli yapılar, daha önceden oluşmuş lamelli tanelerini etkileyerek, boyutlarını büyütmektedir (Akdaş, 2006).

Titanyum elementinin genel özellikleri aşağıdaki Çizelge 2.1'deki özelliklerdir.

**Çizelge 2.1:** Titanyum Özellikleri

<b>Ti elementinin özellikleri</b>	<b>Değer</b>
Ergime Noktası ( $^{\circ}\text{C}$ )	1670
Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	4.51
Atom numarası	22
Atomik ağırlık (g)	47.90
Kristal yapısı	<882.5 $^{\circ}\text{C}$ SPH >882.5 $^{\circ}\text{C}$ HMK
Elastisite Modülü (GPa)	120
Isıl İletkenlik ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )	11.4 (oda sıcaklığında)
Elektrik İletkenliği	%3 (bakıra göre)
Renk	Koyu gri

Endüstriyel kullanımda uçak, uzay ve medikal kullanımda kullanıldığı bilinen Ti6Al4V alaşımı Titanyum alaşımları üretiminin yıllık üretiminin %50 sini kaplamaktadır. Bu üretim sonrasında alaşımın %80 ni uçak uzay sanayisinde, %3 nü ise medikal sektör kapsamaktadır. Denizcilik, otomotiv ve kimya endüstrileri ise geri

kalan dağılımda ise yüzdeler değişkenlik göstererek üretimi kapsamaktadır (Akdaş,2006).

Ti6Al4V alaşımının özelliklerini Çizelge 1.2 de görülmektedir

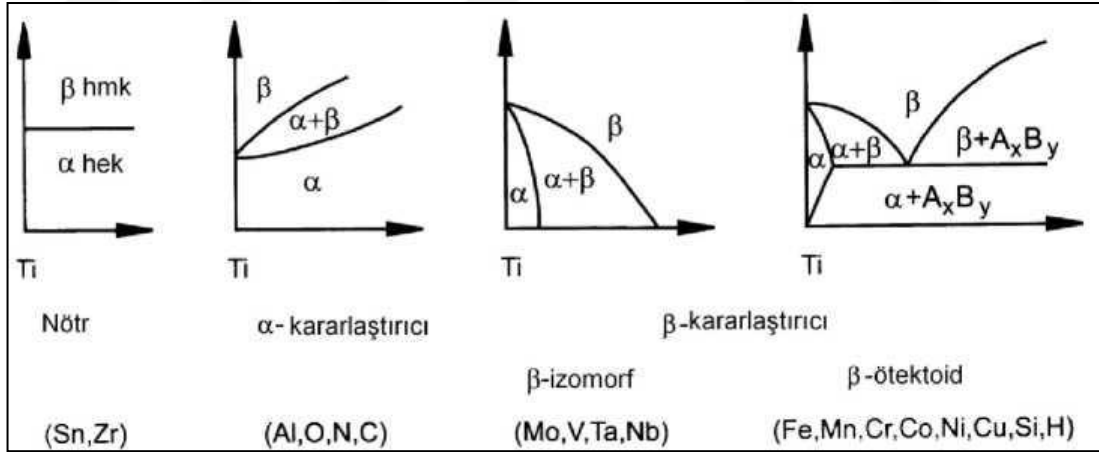
**Çizelge 2.2:** Ti6Al4V Alaşımının Özellikleri

Özellik	Değer
Ergime Sıcaklığı	1649°C
Dönüşüm Sıcaklığı	980-990°C
Yoğunluk	4,43 g/cm <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı	890-1000 MPa
Sertliği (HRB)	36
Poisson Oranı	0.33

**Kaynak:** (Yurtkuran, 2011).

## 2.2 Titanyum Alaşımlarının Yapısı ve Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları elde edilmiş biçimlerine göre üç kategoride sınıflandırılırlar. Bu kategoriler  $\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  ve  $\beta$  dir. Tıp ve endüstri alanında en çok kullanılan Ti6Al4V alaşımı  $\alpha+\beta$  alaşımlarından biridir (Sıcakyüz, 2007).



**Şekil 2.1:** Titanyum Faz Diyagramının Bazı Alaşım Elementlerine Göre Değişimi

**Kaynak:** (Leyens ve Peters, 2003; Balaban, 2007)

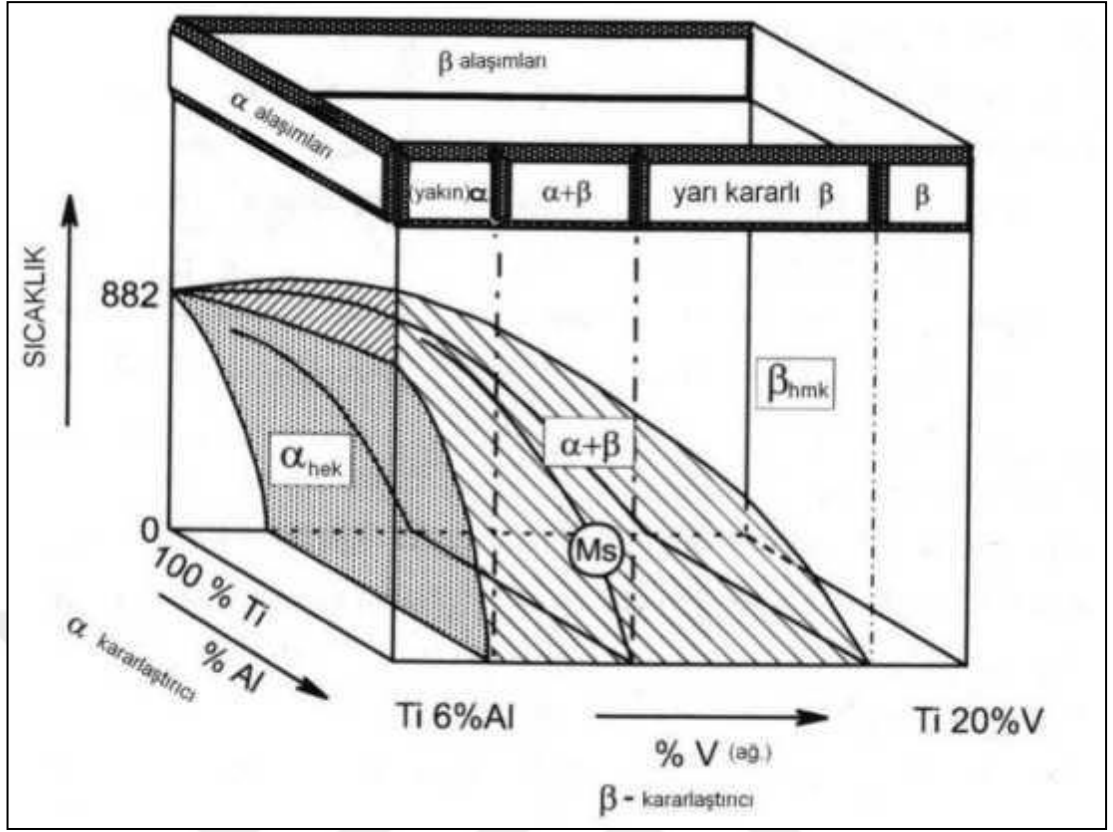
Titanyumun 882 °C olan  $\alpha \rightarrow \beta$  dönüşüm sıcaklığını değiştirici etki yaratan element katkıları ile alaşımlama yapılmaktadır. Alaşım elementleri ise  $\alpha$  ya da  $\beta$  kararlaştırıcı elementler şeklinde ikiye ayrılmaktadırlar (Balaban, 2007). Bu alaşım elementleri,  $\beta$  geçiş sıcaklığına etki etmekte; nötr,  $\alpha$  ya da  $\beta$  kararlaştırıcı şeklinde sınıflandırılmaktadırlar (Akdaş, 2006).

$\beta$  fazı bölgesi sıcaklığı  $\beta$  titanyum kararlaştırıcı elementler tarafından düşürülürken,  $\alpha$  fazı bölgesi sıcaklığı  $\alpha$  titanyum kararlaştırıcı elementlerce artırılmaktadır. Bu elementlerden başka, mikro yapıda 100 ppm gibi bir oranda yer alan ametalik elementler, faz yapısını empürite biçiminde etkilemektedir (Akdaş, 2006).

$\alpha$  fazı alüminyum, oksijen, karbon ve azotun da katkısı ile en etkin biçimde kararlaştırılmaktadır. Tp sıcaklığını yükselten alüminyum,  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarını da ayrı ayrı ayrıştırabilmektedir ve titanyum alaşımlandırmasında en fazla seçilen element niteliğindedir. Ti-Al faz diyagramında,  $\alpha$  +Ti<sub>3</sub>Al bölgesi çift fazlı bir bölgedir ve bölge, yaklaşık 500 °C'de ve %5 Al bileşiminde başlamakta, artan alüminyum miktarıyla da Ti<sub>3</sub>Al fazı oluşmaktadır. Alüminyum ile alaşımlandırılan  $\alpha$  fazında Ti<sub>3</sub>Al çökeltileri yaşanmasından kaçınmak için alüminyum miktarının %6'yla sınırlandırılması gerekmektedir (Balaban, 2007; Ensarioğlu ve Çakır, 2005). Oksijen, titanyumun imalat yeteneğini ve mukavemetinin artmasını sağlamaktadır (Balaban, 2007; Ensarioğlu ve Çakır, 2005).

$\beta$  titanyum kararlaştırıcı elementleri,  $\beta$  ötektik ve  $\beta$  izomorf olmak üzere iki element sınıfından oluşmaktadır. Nb, Mo ve V, en çok tercih edilen; Re ve Ta ise nadiren kullanılan  $\beta$  izomorf kararlaştırıcı elementlerdir. Bu kararlaştırıcılar belli miktarda kullanıldığında  $\beta$  fazı oda sıcaklığında kararlı hale gelmektedir. Si, Fe ve Cr en çok tercih edilen; Bi, Pd, W, Mn, Cu ve Ni ise daha az kullanılan  $\beta$  ötektik kararlaştırıcı elementlerdir. Nötr etkiye sahip elementlerse Sn ve Zr'dir (Balaban, 2007; Lütjering ve Williams, 2003).

Titanyum ve alaşımlarının sınıflandırmasında yaygın olarak  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\alpha$ + $\beta$  kullanılmakta olup; yarı kararlı  $\beta$  ve  $\alpha$ 'ya yakın fazlarda detaylı sınıflandırmalarda yer almaktadır. Aşağıdaki şekilde 3 boyutlu faz diyagramı gösterilmektedir (Akdaş, 2007, Levens, 2003).



**Şekil 2.2:** Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması İçin Sınıflandırmak Üzere Vanadyum (V) Ve Alüminyum (Al) Elementlerinin Kullanımı İle Oluşan Faz Diyagramı

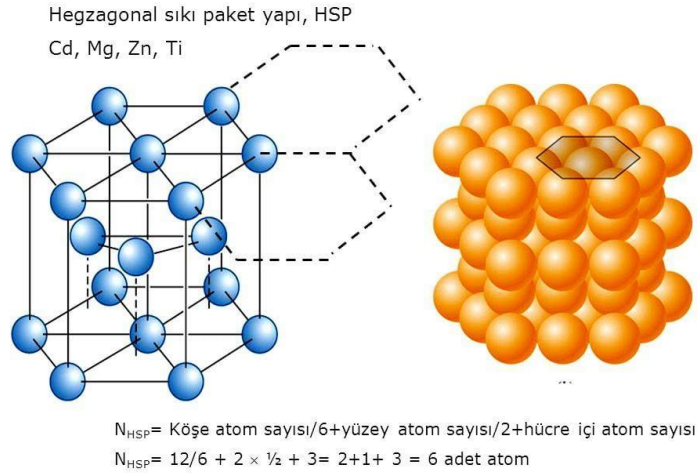
**Kaynak:** (Leyens ve Peters, 2003; Akdaş, 2006).

$\alpha$  alaşımlarının, nötr ya da  $\alpha$  titanyum kararlaştırıcı elementlerin de katkısıyla alaşımı yapılmaktadır.  $\beta$ 'nin az bir miktarda da olsa alaşıma ilave olmasıyla,  $\alpha$  titanyuma yakın alaşımlar oluşmaktadır.  $\alpha+\beta$  alaşımları, en çok tercih edilen titanyum alaşımıdır. Bu alaşımı elde etmek için daha fazla  $\beta$  kullanılmaktadır. Bu birleşik alaşım, oda sıcaklığında ve %5-%40 hacimlerinde  $\beta$  fazından meydana gelmektedir.  $\beta$  belli bir miktarda eklendiği zaman,  $\beta$  fazına su verilmekte ve Widmanstatten yapısına dönüşmesi engellenmektedir. Bu noktada alaşımların iki fazlılığı sürmektedir ve bu yapıya kararlı  $\beta$  faz adı verilmektedir. Tek fazlı  $\beta$  fazı, alaşımlandırma diyagramının son sırasındadır (Akdaş, 2007, Levens, 2003).

Titanyum alaşımlarının farklı yapı ve özellikler göstermesinin nedeni,  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\alpha+\beta$  titanyum fazları ve bunların mikro yapıda farklı hacimsel miktara sahip olmasıdır. Ayrıca bu faz yapılarındaki kristal kafesler de mekanik ve fiziksel özellikleri etkilemektedir (İçdem, 2007; Leyens ve Peters, 2003).

Tek fazlı  $\alpha$  titanyum alaşımlarının mukavemet değeri kabul edilebilir ölçülerdedir. Yarı kararlı  $\beta$  alaşımları ve iki fazlı  $\alpha+\beta$  titanyum alaşımlarının sertleştirilmesi için yüksek seviyelerde kuvvet değeri gerekmektedir. Yarı kararlı yapıdaki  $\beta$  alaşımlarının sertlik değeri yüksek olduğu için, süneklik özellikleri düşüktür.  $\beta$  titanyum alaşımları üzerinde yaşlandırma sertleştirme işlemi yapılırsa  $\alpha$  ve  $\alpha+\beta$  düzeyinde süneklik özelliği göstermesi mümkündür. Yorulma tokluğu özelliği, mikro yapılardan etkilenmektedir. Lamelli ve iri bir mikro yapıya sahip titanyum alaşımları, bu açıdan yüksek özelliğe sahiptir. Alaşımın oksijen ile etkileşime girme eğilimi ve korozyon direnci arasında bağlantı bulunmakta olup; yüksek tepkime eğilimli olan alaşımların yüzeyinde yoğun ve ince bir oksijen tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka sayesinde Ti6Al4V, korozyona karşı daha dirençli bir hale gelmektedir (Akyol, 2007, Brooks, 1982).

Ti6Al4V alaşımı atomik yapı açısından hegzagonal sıkı paket yapıdadır. Şekil 2.3 de görülmektedir.



**Şekil 2.3:** Ti6Al4V Alaşımı Atomik Yapısı

**Kaynak:**(Akyol, 2007; Brooks, 1982)

Titanyum ve alaşımlarının hem kimyasal hem de fiziksel özellikleri oldukça güçlüdür (<http://www.mta.gov.tr>). Isıl direnç, yüksek özgül mukavemet ve korozyon direnci gibi özellikleri sayesinde çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Akyol, 2007; Brooks, 1982). Fakat işlenmesi maliyetli ve zor olduğu için, daha çok özel alanlarda kullanılmaktadır. Titanyum, dioksit pigmentinin önemli bir hammaddesidir. Elektrokimya ve kimya endüstrileri, askeri uygulamalar, uçak ve uzay sanayisi, kâğıt, plastik ve boya endüstrileri gibi pek çok alanda, yaygın bir şekilde

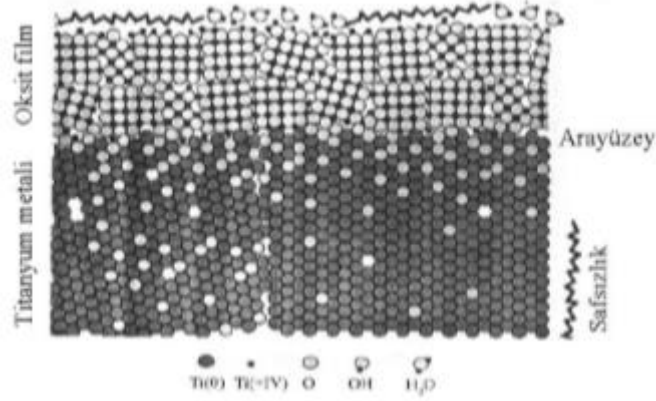
kullanılmaktadır (<http://www.mta.gov.tr>). Dünyadaki pek çok ülkede titanyum, rezerv şeklinde bulunmaktadır. Rezerv miktarıyla ilgili veriler sınırlıdır ve en çok şu ülkelerde görülmektedir; Ukrayna, Norveç, Güney Afrika, Hindistan, Kanada, Avustralya, Çin, Sri Lanka, Mozambik, Vietnam, ABD ve Brezilya.

Titanyum cevheri işlendiğinde,  $TiO_2$  bileşimini kolayca elde etmek mümkündür. Mevcut rezerv miktarı, gerekli ihtiyacı uzun bir süre karşılayabilecek miktardadır ancak günümüzdeki üretim teknolojileri ve proseslerinin yapısının karmaşık olması nedeniyle üretim maliyeti, dolayısıyla da titanyumun fiyatı artmaktadır (<http://www.mta.gov.tr>). Yarı mamul maliyetinin yüksek olması, ticari uygulamalardaki en büyük dezavantajdır. Maliyetinin yüksek olmasının sebebi; cevher çıkarılırken ve ayrıştırılırken çok karmaşık proseslerin uygulanması, cevher yoğun olarak bulunmadığı için tesis yatırımlarını karşılamada problemler yaşanması, ürünü işleme maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Akyol, 2007; Çakır ve Ensarioğlu, 2005).

Türkiye'ye bakıldığında Hakkari'deki kuvarsitlerde, Karadeniz plajlarındaki kumlarda, Uşak, İzmir ve Manisa'daki plaselere titanyum bulunduğu saptanmıştır. Türkiye'deki titanyum minerallerinin tenor miktarı %1'in üzerine çıkmamaktadır (İçdem, 2007; T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 1996). Bu yüzden Türkiye'nin titanyum ihtiyacını karşılamak için ithalat yapılmaktadır. Türkiye'de titanyumun pigment olarak en fazla kullanıldığı alanlar seramik, plastik ve boya sanayileridir (<http://www.mta.gov.tr>).

### **2.2.1 Titanyum alaşımlarının yüzey yapısı ve özellikleri**

Titanyum yapısı, bileşenleri, kullanım alanları ve özellikleri ile ilgili fazlasıyla bilimsel ve teknik makale yazılmıştır. Bu araştırmalardan yola çıkarak açık atmosferde titanyum yüzeyinde kendiliğinden oluşan oksit bir film tabakası sayesinde faydalı özellikler kazandığı bilinmektedir. Ti ve Ti alaşımlarının yüzeyinde oluşan yalnızca birkaç nm kalınlığındaki bu oksit filmin yapısı ve kimyasal bileşenleri sayesinde korozyon direnci, kimyasal inertlik, biyouyumluluk ve yeniden pasivize olabilirlilik gibi özellikler kazanır. Saf titanyum yüzeyinde oda sıcaklığında oluşan filmin yapısı şematik olarak Şekil 2.4'de verilmiştir.



**Şekil 2.4:** Saf Ti Yüzeyinde Oluşan Oksit Filmin Şematik Gösterimi

Amorf veya nanokristalin oksit film genel olarak 3-7 nm kalınlığındadır ve çoğunluğu stabil  $TiO_2$ 'den oluşmuştur.  $TiO_2/Ti$  arayüzeyindeki O-Ti konsantrasyon oranı 2 ila 1 arasında değişiklik gösterir. Hidroksit ve soğurulmuş su Ti kanyonlarına bağlanır (Arslan,2013, Xuanyong,2004).

### 2.2.2 Titanyum ve alaşımlarının yüzey modifikasyonunun gereksinimleri

Biomedikal uygulamalar için kullanılan biomalzemelerin seçimi non-toksiste, korozyon direnci veya kontrollü parçalanabilirlik, elastik modül ve yorulma mukavemeti gibi özellikleriyle bağlantılı olduğu bilinmektedir. Biyolojik ortamın implant yapılan yapay medikal cihaza etkisinde malzeme yüzeyi önemli rol oynar. İmplantın yüzeyi tek başına biomedikal uygulamalar için yeterli gelmez ve yüzey geliştirme işlemleri gerekir. Titanyum medikal parçalara yüzey modifikasyonu uygulanmasının önemli sebeplerinden biri bulk malzemeden farklı yüzey özelliklerinin istenmesidir. Örneğin, biyolojik bütünleşmeyi tamamlamak için işlenebilirlik ve şekil alabilme gereklidir. Yapay kalp kapakçıkları gibi cihazlarda kan uyumluluğu en önemli etmendir. Farklı ihtiyaçlara göre yüksek aşınma ve korozyon direnci gerekebilmektedir. İhtiyaçlar doğrultusunda belirlenen yüzey modifikasyon teknikleri titanyum ve alaşımlarının yorulma mukavemeti, şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik gibi bulk niteliklerini korumakla kalmaz aynı zamanda da farklı biyomedikal uygulamaların gerektirdiği spesifik yüzey özelliklerini iyileştirmek için de kullanılır.

Titanyum malzemelere belirli ihtiyaçlara göre, çeşitli yüzey modifikasyon teknikleri uygulanmaktadır (Arslan,2013, Xuanyong,2004).

**Çizelge 2.3:** Titanyum ve Alaşım İmplantlarının Yüzey Modifikasyon Metodları

Yüzey Modifikasyon metodları	Modifiye tabaka özellikleri	Amaç
<b>A) Mekanik metodlar</b>		
Talaşlı imalat	Pürüzlü ya da pürüzsüz yüzey	Spesifik yüzey topografileri elde etmek, temiz ve pürüzlü yüzey elde etmek, adhezyonu iyileştirmek
Taşlama		
Parlatma		
Kumlama		
<b>B) Kimyasal metodlar</b>		
<b>a) Kimyasal işlemler</b>		
Asit ile muamele	<10 nm kalınlığında yüzey oksit tabakası	Oksit pullarını ve safsızlıkları kaldırmak
Alkalin ile muamele	~ 1 µm kalınlığında sodium titanat jel	Biouyumluluk, biyoaktivite veya kemik iletkenliğini (ses vb.) iyileştirmek
Hidrojenperoksit ile muamele	~5 nm kalınlığında yoğun iç oksit ve poroz dış oksit tabaka	Biouyumluluk, biyoaktivite veya kemik iletkenliğini iyileştirmek
<b>b) Sol-jel</b>	~10 µm kalınlığında ince film (kalsiyum fosfat, TiO <sub>2</sub> ve silika gibi)	Biouyumluluk, biyoaktivite veya kemik iletkenliğini iyileştirmek
<b>c) Anodizasyon</b>	~10 nm-40 µm kalınlığında TiO <sub>2</sub> tabakası, elektrolitin anyonlarıyla adsorbsiyon ve birleşme	Spesifik yüzey topoğrafileri elde etmek, korozyon direncini iyileştirmek, biouyumluluk, biyoaktivite veya kemik iletkenliğini iyileştirmek
<b>d) CVD</b>	~1 µm kalınlığında TiN, TiC, TiCN, elmas ve elmas benzeri ince karbon film	Aşınma direncini, korozyon direncini ve kan uyumluluğunu iyileştirmek
<b>e) Biokimyasal metodlar</b>	Silanlanmış titanya, fotokimya, protein direnci vb ile modifikasyon	Spesifik hücre ve doku yanıtını teşvik etmek
<b>C) Fiziksel metodlar</b>		
<b>a) Termal sprey</b>		
Alev sprey	~30-200 µm kalınlığında kaplamalar (Ti, hidroksi apatit, kalsiyum silikat, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> gibi)	Aşınma direncini, korozyon direncini ve biyolojik özellikleri iyileştirmek
Plazma sprey		
HVOF		
DGUN		
<b>b) PVD</b>		
Buharlaştırma	~1 µm kalınlığında TiN, TiC, TiCN, elmas ve elmas benzeri ince karbon film	Aşınma direncini, korozyon direncini ve kan uyumluluğunu iyileştirmek
İyon kaplama		
Sputtering (Sıçratma)		

**Çizelge 2.3:** (Devamı) Titanyum ve Alaşım İmplantlarının Yüzey Modifikasyon Metodları

<b>Yüzey Modifikasyon metodları</b>	<b>Modifiye tabaka özellikleri</b>	<b>Amaç</b>
Sputtering (Sıçratma)		
İyon implantasyon ve biriktirme	~10 nm kalınlığında modifiye edilmiş yüzey tabakası ve/veya ~10 µm kalınlığında ince film	Yüzey kompozisyonunu modifiye etmek; aşınma direncini, korozyon direncini ve biouyumluluğu iyileştirmek
Plazma boşalması ısıl işlemi	~1-100 nm kalınlığında modifiye edilmiş yüzey tabakası	Yüzeyi sterilize etmek ve doğal oksit tabakasını yüzeyden kaldırmak

### 2.3 Anodik Oksidasyon (Anodizasyon)

Elektrolitik iletken ortamda elektrotlar yardımı ile oluşan kimyasal reaksiyonlar neticesinde, anot yüzeyinde oksit filminin oluşmasına Anodik oksidasyon denir. Oluşturulan elektrik alanla birlikte anot yüzeyinde yayılımı gerçekleşen metal ve oksijen iyonları sayesinde oksit tabakası oluşur. Anodizasyon, metal parçaların yüzeylerinde koruyucu bir film oluşturmak amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır. Anodizasyon işlemi yapılırken, seyreltik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, asetik asit vb.) çözeltileri elektrolit olarak kullanılmaktadır. Anodizasyonun en önemli avantajlarından birisi titanyum yüzeyinde oluşan oksitin yüzeye kuvvetli bir bağ oluşturmasıdır. Anodizasyon, korozyon direncini artırmak, kozmetik olarak metali renklendirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Oluşan filmlerin yapısal ve kimyasal özellikleri potansiyel, akım, elektrolit bileşimi ve sıcaklık gibi işlem parametreleri yardımıyla ayarlanabilmektedir.

Alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır benzeri metaller uygun bir elektrolitte anot olarak kullanıldığında oksit filmi oluşur. (Baykut ve Atun 1989). Metaller yapılı anodik işlemlere oksidasyon denirken; yüzeyde katı oksidin ya da katı hidroksitin oluşumuna anodik oksidasyon denir (Berkem 1993).

Farklı metallerden yapılmış anotlar ile elektroliz yapıldığında anodun davranışı kullanılan metale ve elektrolite göre farklılık gösterir. Bu açıdan bakıldığında metaller iki gruba incelenir. Birinci grupta pasif metaller olarak adlandırılan elektroliz uygulanırken anot olarak çözünmeyen metaller vardır. Bunların arasında en çok pasiflik özellikleri gösteren metal platindir. Tamamen pasif bir metalin

polarizasyon eğrisi çizildiğinde  $i=f(V)$  eğri üzerinde anyonun deşarjını ifade eden kırık bir nokta görünür sülfürik asit çözeltisinde bu durum oksijenin çıkışının göstergesidir. İkinci grupta ise anot olarak çözünen aktif metaller yer alır. Bu metallere elektrokimyasal sınıflandırmada dizisinde bulunan Na, K, Mg, Al, Zn örnek olarak verilebilir. Ama metallere kesin olarak pasif veya aktif denilemez çünkü uygulama şartlarına bağlı olarak özellikleri değişkenlik gösterir. Çözeltide bulunan anyonların türüne, çözeltinin pH derecesine, sıcaklığa ve akım yoğunluğuna göre etki şiddeti belirlenir.

Uygun şatlarda Al, Ta, Nb, Hf, Zr, Ti gibi metaller üzerinde oluşan oksit tabakası yarı iletken özellik gösterir. Bunlara akım doğrutlma (redresörlük) özellikleri nedeniyle 'valv' metalleri denir (Berkem 1993).

Anodizasyon sırasında oksit oluşumunun yanı sıra farklı reaksiyonlarda meydana gelir. İyonların deşarjı neticesinde ya metal ( $M^{+2} + ze \rightarrow M$ ), ya da hidrojen ( $H^+ + e \rightarrow 1/2 H_2$ ) olup genel olarak kararlıdır. Bu nedenle katottaki elektrokimyasal olaylar anottakine göre karmaşık değildir. (Berkem 1993).

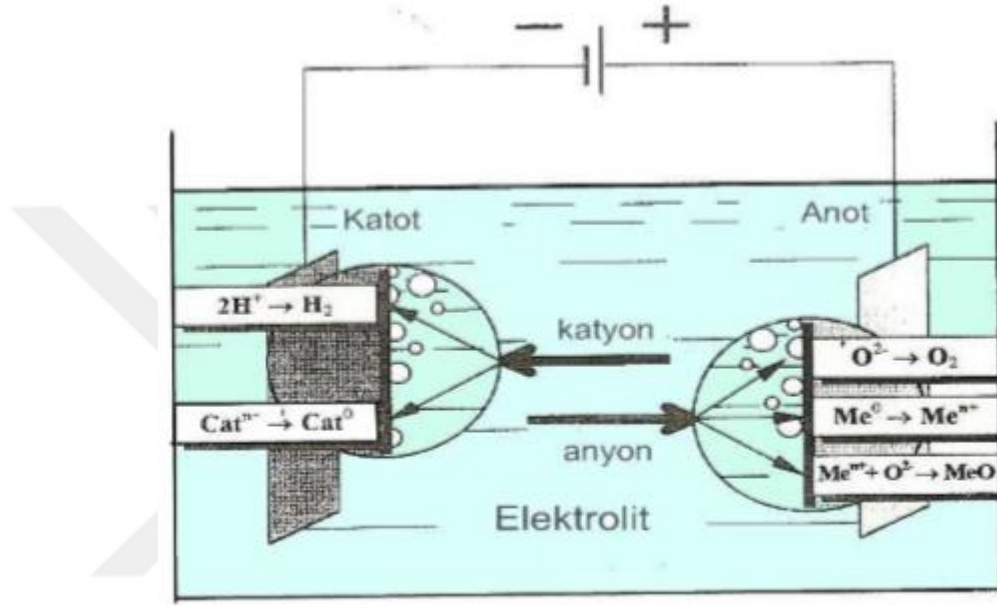
### **2.3.1 Anodizasyon yöntemleri**

Anodik oksidasyonun, sabit akımla (galvanostatik), sabit potansiyelle (potansiyostatik) ve bir de anodik filmin kombine yöntemle (potansiyodinamik) büyümesi olmak üzere 3 temel uygulanış şekli vardır. Potansiyodinamik uygulamalarda anot potansiyeli istenilen değere gelene kadar sabit akım kullanılır. İstenilen potansiyele ulaştığında potansiyelde bekletilerek anodizasyon işlemi gerçekleştirilir (Albayrak, 2008; Albu, 2012).

### **2.3.2 Titanyum anodizasyonu**

Anodizasyon 1930 yılında keşfedildikten 30 yıl kadar sonra titanyum implantların osseintegrasyonunu geliştirmek amacıyla araştırmalar yapılmıştır (Chiesa et al. 2003). Elektroliz için kullanılacak olan anot kaplanacak titanyumun kendisidir. Anodizasyon işleminde genellikle doğru akım (DA) kullanılır. Bu akım isterlere göre şiddet ve süre belirlenerek kaplanacak iş parçası ve katot arasında geçirilir. İstenilen titanyum oksit tabakasının kalınlığına ve özelliklerine göre akımın süresi ayarlanır. Şekil 2,3'de ki sulu çözeltilerin elektrolizine elektrot işlemleri de eşlik eder.

En önemlisi oksijenin salınımıyla anotta oksit tabakasının oluşması, elektrolitin metalle arasındaki aktivitesine bağlı olarak, yüzeyin çözünmesine veya oksit filminin oluşumuna etki edebilir. Aynı şekilde hidrojen gazının salınımıyla katyon redüksiyonu da katot yüzeyinde meydana gelir. Bu taslakda elektrot/elektrolit ara yüzeyi, iki faz sistemle tek faz çift yüklü sınır tabakadan oluşan bir işlemi bize göstermektedir (Yerokhi et al. 1999). Şekil 2.5 Titanyumun anodizasyonu sırasında meydana gelen reaksiyonlar gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Sulu Çözeltilerinin Elektrolizindeki Elektrot Prosesi

Anotta işlem esnasında en kolay enerji salınım yolu oksijen gazının açığa çıkarak anodu kaplamasıdır. Salınan bu oksijenin titanyum ile tepkimeye girmesiyle yüzeyde TiO<sub>2</sub> kaplama oluşur. Kaplama içinde bulunduğu elektriksel alanda yalıtkan bir görev görür. Bununla birlikte kapalama zamanla tamamlanırken akım şiddeti sıfıra yaklaşarak azalır.

Oluşan ilk ince film tabakasının yoğun ve yalıtıcı olması nedeniyle bariyer film denir. Oksit tabakasının kalınlaşabilmesi için filmi delerek ya da çözündürerek filmin oluşumunu sürdürecektir ek işlemlere gerek duyulur. Yani prosesin devamlılığı için istenilen, bir taraftan oksit tabakası oluştuğu sırada bu oksit tabakasının yeterince çözünmesine neden olacak bir elektrolitin seçilmesidir. Oluşumun yapılanma hızı çözünme hızını geçtiği sürece oksit tabakasının kalınlığı artmaya devam eder. Bu prosesde izlenen süreç iki ileri-bir geri tekniğindedir. Prosesde kaplama giderek daha kalınlaşacağından korozyona uğrayacak titanyuma ulaşmak zorlaşıp iyonların

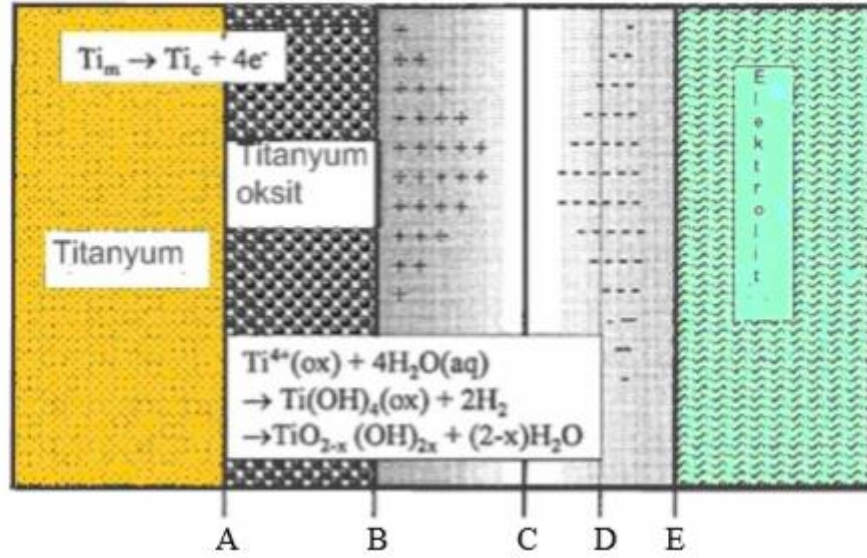
yayımla hızı azalarak durur. Bütün bu işlemler elektrolitin seçimi ile ilgilidir. Titanyum okside etkisi az bir elektrolit seçilirse sıkı ve ince film delinir. Öte yandan hidroklorik asit benzeri agresif bir elektrolit kullanılırsa titanyum korozyona uğrayarak çözünür ve film oluşum hızı azalır. Bunun gibi durumlarda da bir ileri-iki geri döngü sırası oluşturularak titanyum yitirilir.(Berkem 1993; Brace 2000)

Her iki çeşit arasında kullanılan çok çeşit elektrolit vardır . Bu nedenle de elektrolit için çok sayıda patent alınmıştır.

Genellikle elektrolitin konsantrasyonu arttıkça potansiyel düşmektedir. Bu duruma “elektriksel çift tabaka” denilmektedir. Şekil 2.6’deki tabloda “elektriksel çift tabaka” gösterilmektedir.

Genellikle elektrokimyasal anodizasyon sırasında oksit filmi ile elektrolit ara yüzeyinde elektriksel çift tabaka oluşturulması amaçlanır. Bu yüzey metal tarafında ya da elektrolit tarafında elektronların fazlalığı veya azlığından oluşmaktadır. Anodizasyon işlemi sırasında elektron ve iyon çiftleri elektrolit/oksit filmi ara yüzeyinde elektrolitin konsantrasyon dağılımının sonucunda oluşur. Başka bir deyişle daha düşük konsantrasyonlu iç tabakanın ve daha yüksek konsantrasyonlu dış tabakanın oluşumu kesindir. Eğer elektrolit konsantrasyon artırılır ve iç tabakanın düşük konsantrasyonu yükselirse, ara yüzeydeki elektrokimyasal reaksiyonlar hızlanır ve sonra elektriksel direnç azalmış olur. Bunun sonucu olarak anodik oluşum voltajı elektrolitin konsantrasyonunun artırılmasıyla düşürülmüş olur. (Sul et al.2001; Sato 1971; Young 1961).

Sulu çözeltilerin elektrolizinde anot kısmındaki oksijen çıkışı önemli bir konudur. Ama oksijen çıkış reaksiyonu halâ anlaşılabilmiş değildir. Oksijen aşırı gerilimine dair kanıtlayıcı bilgilerin bulunamamasının başlıca nedenleri; anotta oksijen çıkışının karmaşıklığından ve engellenemeyen yan reaksiyonların açığa çıkmasındandır. Oksijen direkt olarak metal üzerinden değil metal oksidin üzerinden çıkar (Berkem 1993).



**Şekil 2.6:** Titanyum Dioksit/Elektrolit Ara Yüzeyindeki Elektriksel Çift Tabakanın Şematik Yapısı

A-B: Metal/metal oksit ara yüzey

B-C: Elektronların az olduğu tabaka

C: Oksit /elektrolit ara yüzeyi

D: Konsantrasyon dağıtım eğilim çizgisi

D-E: Anyonların fazla olduğu tabaka

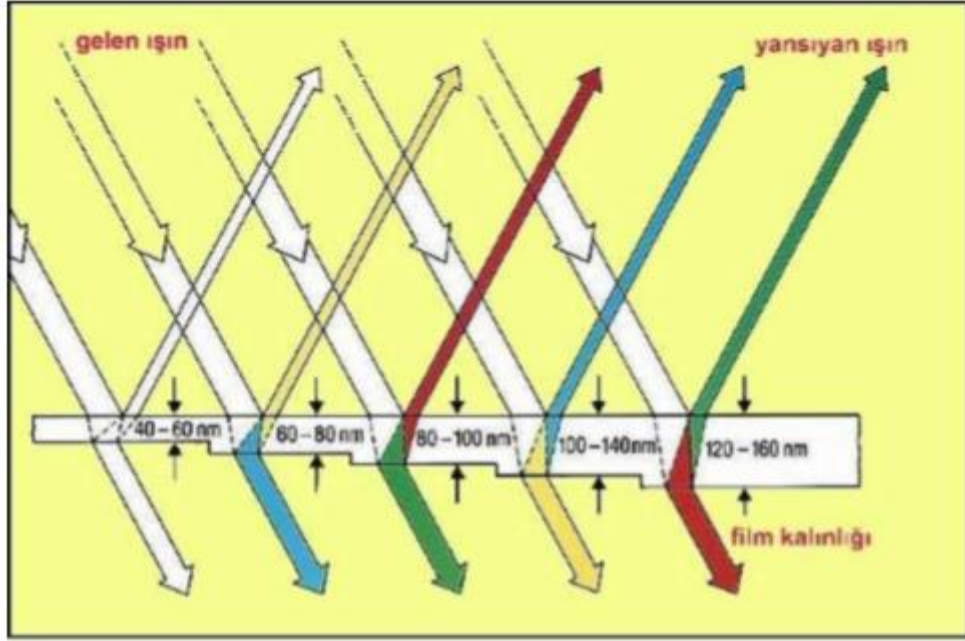
m: metal c: kation

Anodizasyon kaplanmış titanyum alaşımının yorulma dayanımı kayıp olurken korozyon, aşınma ve sürtme dayanımlarında artış gözlemlenir.

### 2.3.3 Titanyum'un anodizasyon işlemiyle renklendirilmesi

Anodizasyon titanyumun kozmetik amaçla renklendirilmesi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir (Suzuki 2000). Titanyum doğal olarak oda sıcaklığında transparan bir oksit film oluşturur. Bu transparan filmin kalınlığı genellikle 1-10 nm kadardır. (Delplanckle ve Degrez 1982). Anodizasyon işlemiyle oluşturulan oksit kalınlığının bir sonucu olarak renklenme oluşur. Metalin rengi, filmin kalınlığına göre ışık girişimi olayı sonucu oluşmaktadır. Işık oksit film tabakasının içinden kısmen yansıtılır, kırılır ve soğrulur. Farklı fazlarda yansıyan ışınlar titanyuma rengini veren ışık girişimini meydana getirir. Renkler film kalınlığına bağlı olarak tayf renkleri arasında değişir. Titanyum oksidin yüzeyine bakıldığında görünen oksit

tabakasının ışık dalgalarına etkisidir. Renklerin algılanması bakış açısına ve kullanılan ışık kaynağına göre farklı algılanır (Matsusato 1999).



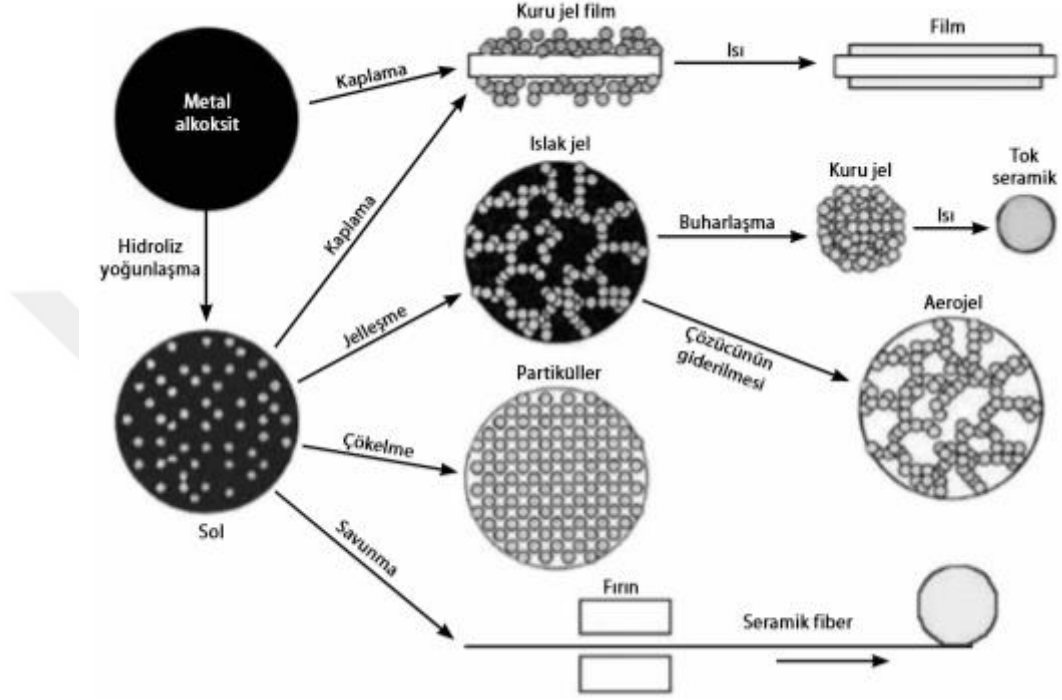
Şekil 2.7: TiO2 Film Kalınlığına Bağlı Olarak Numune Üzerinde Oluşan Renklerin Şematik Gösterimi

## 2.4 Sol Jel Kaplama

Koloidal Sıvıdan (“sol”) katı fazına (“jel”) geçişi içeren bu işlem ile farklı özelliklere sahip malzemeler elde edilebilmektedir. Sol-jel uygulamaları ve ürünleri Şekil 2.8’de verilmiştir. Sol-jel kaplama prosesleriyle ince oksit filmler oluşturulmaktadır. Bu nedenle sıvı fazındaki malzeme bir altlık üzerinde biriktirilir ve düşük sıcaklıklarda ısıtılarak kuru jel filmi elde edilir. Kurutmadan sonra filmin yoğunluğunu arttırmak için yüksek sıcaklıklar uygulanır (Brinker, 1990; The Sol-Gel Gateway,2007).

- Daldırma gibi kaplama yöntemleri yardımıyla altlık üzerine kuru jel film oluşturulur. Sonrasında ısıtılarak uygulanarak kristalleşme sağlanır ve ince filmler elde edilir (Brinker, 1990, Chemat).
- Islak jel elde etmek için sol bir kalba dökülür. Bu ıslak jele uygulanan ısıtma işlemi ve kurutma gibi yöntemlerle yüksek kalitede cam ve seramik parçaları elde edilir. Eğer ıslak jel içindeki sıvı faz kritik koşullarda giderilirse fazla gözenekli ve düşük yoğunluklu aerojel oluşturulur. Jelin düşük sıcaklıklarda kurutulması (25–100 °C) sonucunda ise gözenekli katı matrise sahip kuru jeller üretilir (Brinker, 1990, Chemat).

- Solün viskozitesi uygun düzeyde sabitlendiğinde fiber optik sensörler ve termal yalıtım sistemleri yapımında kullanılan optik ve refrakter seramik fiberler oluşturulur (Brinker, 1990, Chemat).
- Çökeltme işlemiyle biyomedikal alanlarda kullanılan çok ince ve düzgün seramik tozları oluşturulur (Brinker, 1990, Chemat).

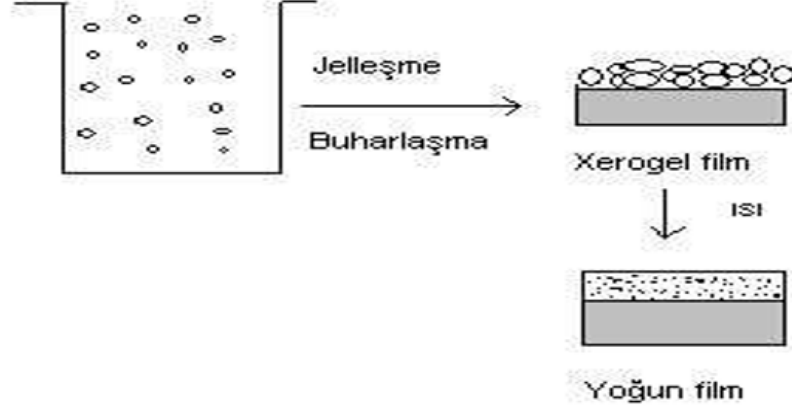


**Şekil 2.8:** Sol-Jel Yöntemleri ve Ürünleri

**Kaynak:** <http://www.chemat.com/html/solgel>

#### 2.4.1 Sol-jel yöntemi

Çözelti formundan yola çıkılarak farklı uygulama alanlarına yönelik cam, seramik ve kompozit malzemeler üretme yöntemine sol-jel işlemi adı verilir. Genellikle sol-jel sürecinde çözelti sıvı fazdan (sol) katı faza (jel) geçer. Bu uygulamada ilk aşama metal organik bileşiklerin alkol bazlı çözeltilerle çözünmesi sonucu öncü çözeltilerin hidrolize edilmesidir. Sonrasında polimerleşmeyle oluşan çözelti dehidrolize edilir. Bunun sonucunda oluşan çözelti ince filmlerin üretiminde kullanılan altlıklar üzerine spreyle, daldırma gibi yöntemlerle kaplanır. Bu yöntemlerle amorf film genel olarak 500-800 °C'de tavlansarak kristalleşir ve yoğunlaştırılır. Bunun sonucunda homojen filmler üretilmiş olur (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9:** Sol-Jel Tekniği İle Kaplanan İnce Film Üretimi

**Kaynak:** (Menşur 2002)

Sol-jel prosesinin avantajları saymakla bitmez. Bu işlemlerde kullanılan alet ve malzemeler çok basittir. Bu teknikle kaplanarak elde edilmiş filmlerin kalınlığı homojendir ve saf bir kaplama elde edilir. Enerji tasarrufu sağlar, dış ortamla etkileşime geçmez ve karmaşık geometrik şekle sahip malzemeler de bu yöntemle kaplanabilir. Bunların yanı sıra bazı dezavantajları da vardır. Bunlardan bazıları; hazır çözeltinin açıldığında bitmesi gerektiği için malzeme kaybı fazla olur ve malzemesi pahalıdır. Ayrıca kullanılan kimyasallar gerekli iş sağlığı ve güvenliği önlemleri alınmadığı takdirde sağlığa zararlı olabilir.

**Çizelge 2.4:** Sol-Jel Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Kaplanan filmin mikro yapısının kolaylıkla kontrol edilmesine olanak sağlar.	Malzeme maaliyeti fazladır.
Gerekli alet ve malzeme çok basittir.	Filmlerde karbon çökeltisi kalır.
Kaplanan malzemenin her yerinde aynı kalınlık elde edilebilir.	Kullanılan malzemeler sağlığa zararlıdır.
Saf kaplama elde edilebilir.	İşleme sırasında malzeme kaybı fazladır.
Düşük işleme ısısı gerektirir.	
Hava kirliliğine sebep olmaz.	
Enerji tasarrufu sağlar.	
Hazırlanan ortamla etkileşimde bulunmaz.	
Yeni malzemelerin bulunabilmesi için uygun bir yöntemdir.	
Gözenekli yapı oluşur.	
Her türlü geometriye sahip malzemeye uygulanabilir.	

**Kaynak:** (Turhan 2000).

### **2.4.1.1 Sol-jel yönteminin genel prensibi**

Metal olmayan cam ve seramik gibi inorganik maddeler yüksek sıcaklık gerektiren ısı işlemlerle oluşturulurlar. Bunun gibi malzemelerin elde edilmesi için sol-jel benzeri yeni işlemler kullanılmaktadır (Brinker, 1990, Türhan, 2000).

Katı haldeki maddelerin sıvı süspansiyonu içindeki haline sol denir. Yer çekimi kuvvetine oranla moleküller arasındaki elektriksel itme kuvvetinin ve Van Der Waals etkisinin fazla olmasından dolayı solü oluşturan malzemeler dibe çökmez. Bu moleküller çözelti içinde genişleyerek büyük boyutlara ulaşırsa jel oluşur. (Brinker, 1990, Türhan, 2000, Jones, 1989).

Sol-jel prosesi, 1846 yılında Jean-Jacques Ebelmen isimli bir kimyager tarafından  $\text{SiCl}_4$  ve alkol karışımının havaya maruz kalarak jelleşmesi neticesinde keşfedilmiştir. Geffcken 1939 yılında  $\text{SiO}_2$  ile film hazırlanabileceğini bulmuştur. 1953'den sonra otomobil dikiz aynalarında sol-jel yöntemi kullanılmaya başlamıştır. (Brinker, 1990, Jones, 1989).

Sol-jel prosesi metallerin korozyon dayanımının artırılmasında; porselen, plastik gibi malzemelerin kimyasal dayanıklılığının yükseltilmesinde ve nem dayanımının artırılmasında; yüzey sertliği ve dayanıklılığının iyileştirilmesi;  $\text{CO}_2$  ve  $\text{O}_2$  geçirgenliğinin azaltılması; camların buğulanma ve buzlanmaya karşı muhafazası ve antistatik özellikler kazandırmak için havacılık, biyomedikal, beyaz eşya, cam, seramik, otomotiv, telekomünikasyon ve kaplama sanayinde kullanılır.

### **2.4.1.2 Sol-jel yönteminde kullanılan bileşenler**

Sol-jel işleminde sol hazırlığı için başlangıç malzemesi (metal alkoksitler), çözücü (alkoller) ve katalizörler kullanılır (Klein, 1988).

#### **2.4.1.2.1 Metal alkoksitler**

Metalorganik bileşenler biri olan Metal Alkoksitler, Metal-oksijen-karbon bağı içerirler. Genel olarak metal alkoksitlerin formülünü  $\text{M(OR)}_x$  şeklinde gösterebiliriz. Bu bileşende; oksijeni O, kaplanacak metal malzemeyi M, herhangi bir alkil grubunu R ( $\text{CH}_3$ -metil,  $\text{C}_2\text{H}_5$ -etil gibi), metal değerine göre değişen valans durumunu X temsil etmektedir. Metal alkoksitlerin reaksiyona katılımının fazla olmasının nedeni yüksek elektro negaif OR grubu içermeleridir. En çok kullanılan başlangıç bileşikleri

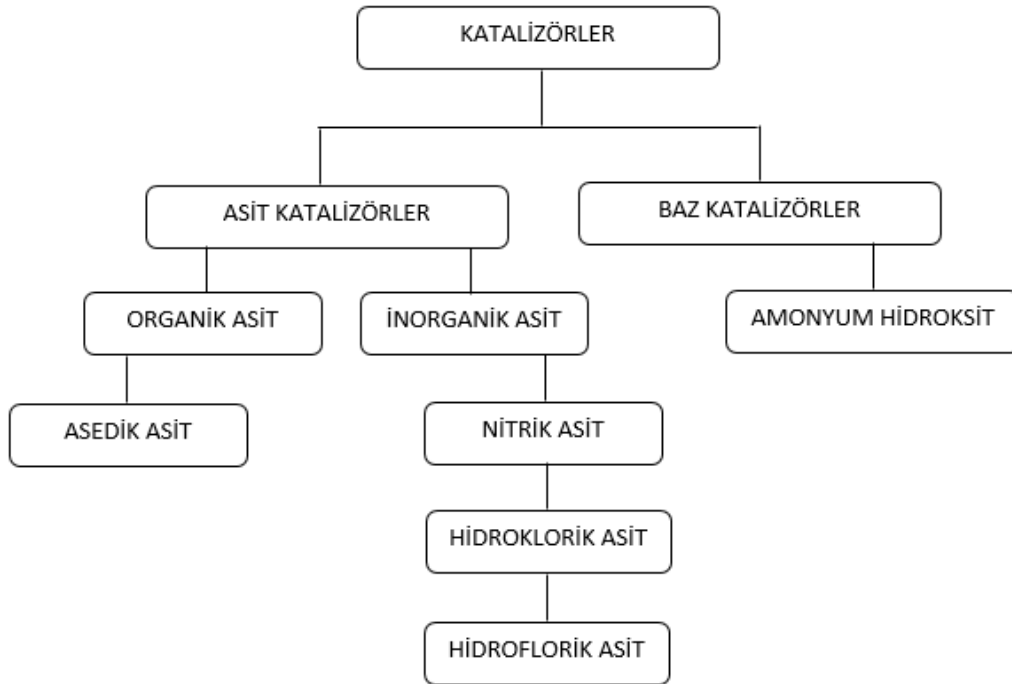
olmasının sebebi metal alkoksitlerin suyla kolay reaksiyona girmeleridir. (Brinker, 1990, Türhan, 2000, Jones, 1989, Klein, 1988).

#### 2.4.1.2.2 Alkoller

Alkil ya da başka moleküle hidroksit ekleyerek elde edilen moleküllere alkol denir. Genel olarak formülleri  $C_nH_{2n+1}OH$  olup 'n' değişkeni ile farklı alkoller oluşur. n'nin değeri 1 olduğunda  $CH_3OH$  metanol (metil alkol), 2 olduğunda  $C_2H_5OH$  etanol (etil alkol) ve 3 olduğunda  $C_3H_7OH$  propanol (propil alkol) olarak isimlendirilir. Alkoller sol-jel işleminde çözücü olarak metal oksitlerle reaksiyona girerler (Brinker, 1990, Türhan, 2000, Klein 1988).

#### 2.4.1.2.3 Katalizörler

Katalizörler, reaksiyon hızını arttıran fakat hiçbir reaksiyona katılmayan malzemelerdir. Sol-jel yönteminde katalizör olarak asitler ve bazlar kullanılırlar. Katalizörlerin sınıflandırılması Şekil 2.10'de gösterilmiştir



Şekil 2.10: Sol-Jel Yönteminde Kullanılan Katalizörler

Kaynak: (Özler, 2007)

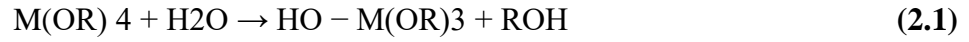
#### 2.4.1.3 Sol-jel oluşumu

Solün hazırlanmasında hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları oluşur. Jel üretiminde kimyasal temeli metal alkoksitlerin hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları oluşturur.

Jelleşme aşamasında farklı polimer yapılarına neden olan hidroliz ve yoğunlaşma hızlarındaki farklılıklardır.. PH, su oranı, sıcaklık, katalizör cinsi ve konsantrasyonu hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonlarının hızlarını etkileyen en önemli faktörlerden bazılarıdır. (Chemat, Türhan, 2000, Jones, 1989).

#### 2.4.1.3.1 Hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları

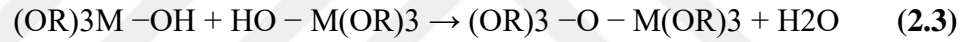
Hidroliz reaksiyonu ile hidroksil (OH) iyonu metal atomu ile bağ oluşturur (Brinker, 1990, Jones, 1989):



Alkol grubunun bileşiklerinden biri ROH'dir. hidroliz reaksiyonu Su ve katalizör miktarıyla ilgili olarak sona erer. Daha sonra tüm OR grupları OH gruplarına dönüşür;



Ya da metalin bir bölümü hidrolize olduğunda sona erer. Bir bölümü hidrolize olmuş iki molekül ile Yoğunlaşma reaksiyonu oksijen köprüsü ile birbirine bağlanır:



Ya da



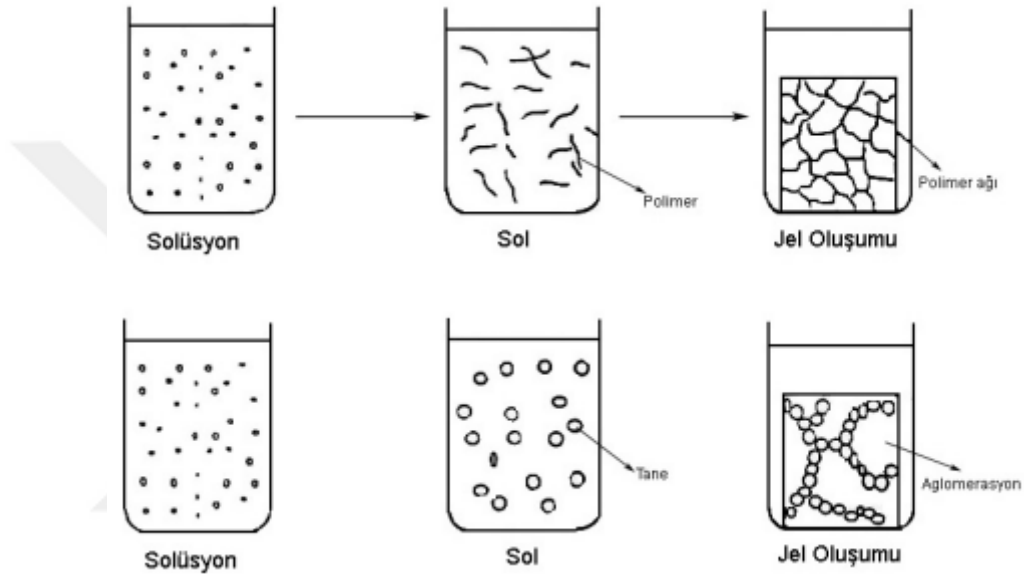
Özet olarak, su veya alkol gibi küçük moleküller yoğunlaşma reaksiyonunda serbest bırakılır. büyük silikon bazlı moleküller bu tip reaksiyonlar ile elde edilebilir. Bu olaya polimerizasyon adı verilir. monomerden oluşan ve genelde büyük çaplı olan moleküle Polimer denir (The Sol-Gel Gateway, 2007, Brinker, 1990, Klein, 1988).

#### 2.4.1.3.2 Jelleşme

Makro-partikülleri oluşturmak için geniş demetler şeklinde birbirlerine bağlanan kolloidal partiküller ve yoğunlaşan metal türleri büyür. Bu nokta, çözeltinin jelle dönüşümünü gösterir ve çözeltinin viskozitesindeki ani yükseliş bunun en belirgin göstergesidir (Brinker, 1990, Klein, 1988).

Şekil 2.11'de jelleşmenin oluşması sol-jel yöntemiyle gösterilmektedir. Hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonları ile jelleşme, oluşur.

Sol fazdan, jel faza geçiş iki farklı yolla gerçekleşir: bunlardan biri polimerik molekülerin büyüyerek üç boyutla çapraz bağlı yapı oluşturmaları bir diğeri ise birbirinden ayrı partiküller genişleyerek beraber büyürler. Genel olarak sistemde meydana gelen reaksiyonlar daha kompleks olup, aynı zamanda çeşitli reaksiyonlar görülebilmektedir. Jelleşme olayının kontrolü, sol-jel prosesinde oluşan reaksiyonların kontrol edilmesiyle mümkün olmaktadır. Jellerin ve oluşan son ürünün mikroyapısı reaksiyon hızına ve şekline bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. (Brinker, 1990; Jones, 1989; Klein, 1988).



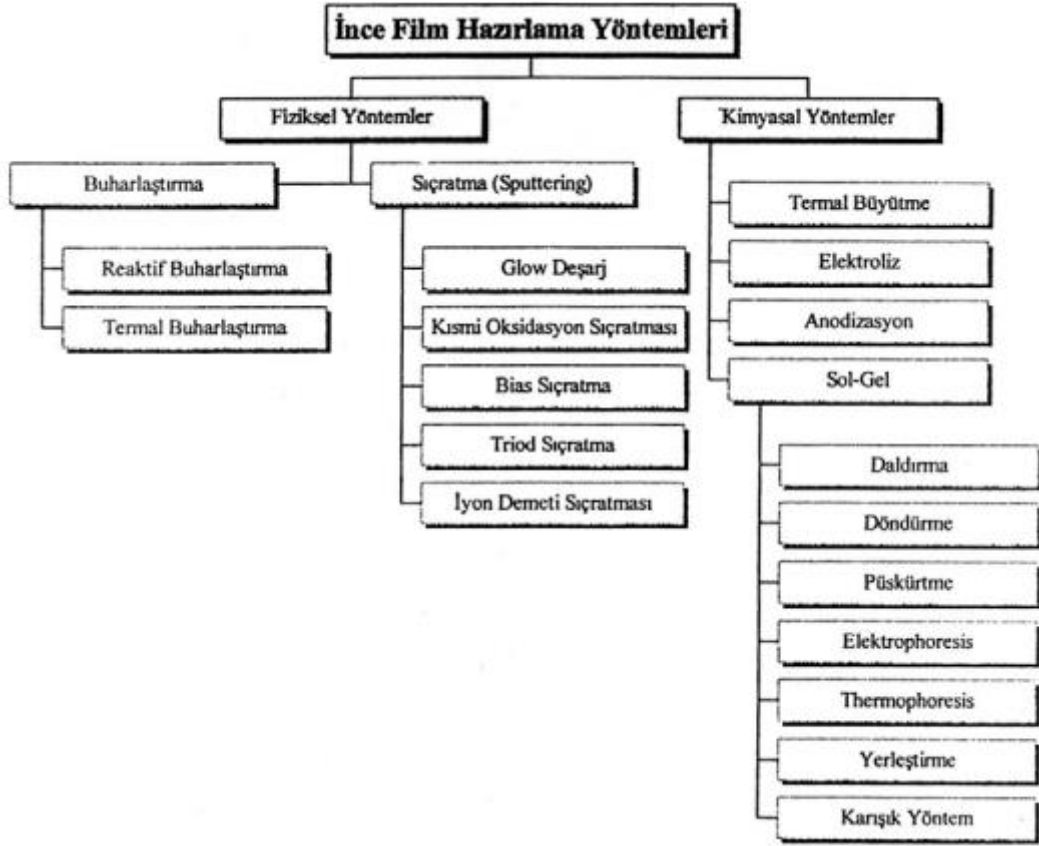
**Şekil 2.11:** Jelleşme Mekanizmaları

**Kaynak:** (Özler, 2007)

#### 2.4.2 Sol-jel film kaplama yöntemleri

İnce filmler, sol-jel film kaplama yöntemleri ile oluşturulur. İnce filmler, "üç boyutlu malzemenin kalınlık boyutu sıfıra yaklaşırken ortaya çıkan iki boyutlu limit hali" olarak tanımlanabilir. Filmlerin özellikleri, elde edilmiş şekli ve şartlarına, malzeme cinsine ve film kalınlığına göre de kütle halinden farklıdır. Film kalınlaştıkça özelliklerinin kütle özelliklerine yaklaşacağı beklenilmesi her zaman doğru değildir. Başta filmin yoğunluğu olmak üzere diğer özelliklerini de etkilen faktörlerden biri, filmin hazırlanma aşamasında oluşacak "iç gerilmeler"dir. 50-300 Å kalınlık aralığındaki malzemeler, süreksiz yapıda çok ince filmlerdir. 300-3000 Å kalınlık aralığında olan ve kütsel özelliğe daha yakın özellikte olan malzemeler orta kalınlıktaki filmlerdir. Dayanaksız, buğulu görünümde, mekanik dayanıklılığı azalan, boşluklu yapıdaki malzemeler ise kalın filmlerdir. Film özellikleri sadece film

kalınlığının değil, seçilen kaplama yönteminin, film oluşumu sırasındaki yöntem şartlarının ve film malzemesinin de fonksiyonudur. (Koh, 1997). Şekil 2.12’de İnce film hazırlama yöntemlerinin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.12: İnce Film Hazırlama Yöntemleri

Kaynak: (Özler,2007)

Fiziksel yöntemler kullanılırken bir malzemenin buharlaştırılması esası dikkate alınarak uygulanır. Kimyasal yöntemler kullanılırken ise, elektrik akımı, termal etki ya da kimyasal reaksiyonlar esas alınarak yapılır. Sol-jel film kaplama yöntemi kimyasal bir prosestir. Sol-jel kaplama proseslerinde yaygın olarak daldırma kaplama, döndürme kaplama ve püskürte yöntemleri kullanılır. Bu yöntem ile oluşturulan film kalınlıkları 500-1000 Å kadardır. Kaplama parametreleri ve sıvı viskozitesi değiştirilerek daha kalın filmler de elde edilebilir (Zhang, 2006,Chemat; Brinker, 1990; Jones,1989). Sıvı fazdaki malzemenin filmi altlık üzerinde sol-jel film kaplama yöntemi ile oluşturulur. Kuru jel film, düşük sıcaklıkta ısıtılarak altlık üzerinde elde edilir. film yoğunluğunu arttırmak için kurutma işleminden sonra sıcaklık artırılır. Hemen hemen her tür oksit film sol-jel kaplama yöntemi ile elde edilebilir. Sol-jel kaplama, endüstriyel ve teknolojiye uygulama kolaylığı açısından

önemli bir kaplama yöntemi olarak ön plana çıkar. Bu yöntemin avantajları şöyle sıralanabilir (Brinker, 1990, Klein, 1988):

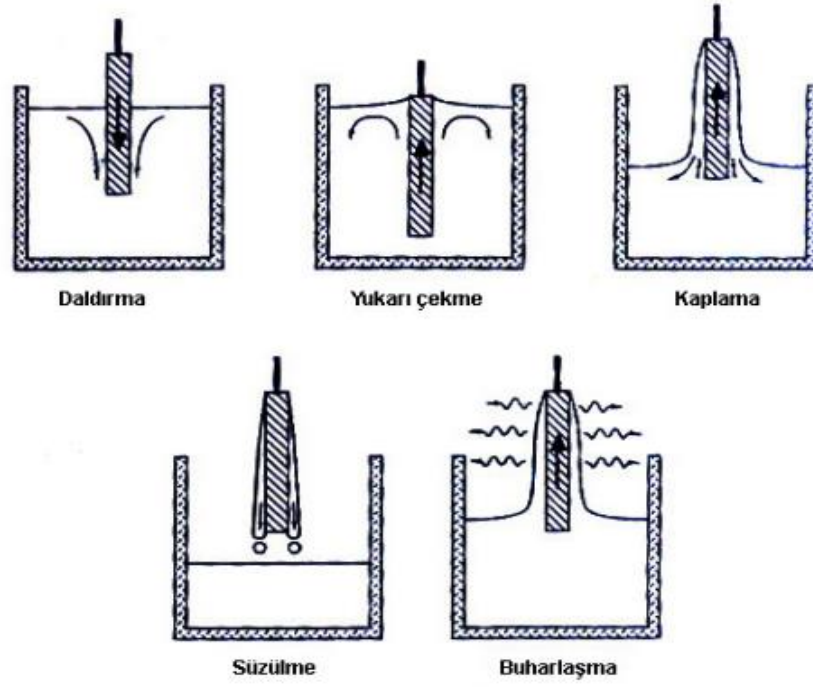
1. Filmler homojendir.
2. Düşük sıcaklıklarda çalışılır.
3. Kaplanan filmin mikroyapısı kolaylıkla kontrol edilebilir.
4. Kalınlık kontrol edilebilir.
5. Gözenekli yapı oluşur.
6. Her türlü geometriye sahip malzemeye uygulanabilir. Farklı geometrili cisimlerde aynı özellikler elde edilir.
7. Kullanılan kimyasal zararsız olduğu müddetçe yöntem tehlikesizdir.
8. Diğer film kaplama yöntemlerine göre daha kolay uygulanır.

Sol-jel yönteminin avantajları olduğu kadar bazı dezavantajları da mevcuttur: Bu yöntemin dezavantajları; Kullanılan malzemelerin temin edilmesinin zor ve pahalı olması maliyeti olumsuz yönde etkiler, film kaplama esnasında malzeme kaybı fazladır, hazırlanan filmlerde karbon çökeltisi kalır; kullanılan kimyasallar sağlığa zararlı olabilmektedir şeklinde açıklanabilir. (Brinker, 1990; Klein, 1988).

Sol-jel yönteminde, daldırarak, döndürerek, püskürtme, elektroforez, termoforez, karışık ve yerleştirme gibi çeşitli kaplama yöntemleri vardır.

#### **2.4.2.1 Daldırma yöntemi**

Daldırma, sol-jel kaplamanın en önemli kaplama yöntemlerinden biridir. Hazırlanan sole, altlığın hızla daldırılması ve aynı hızla çıkarılması esasına dayanmaktadır (Brinker, 1990, Türhan, 2000). Daldırma ile kaplama yönteminin beş aşaması vardır. Daldırma, yukarı çekme, kaplama, süzülme ve buharlaşma. Şekil 2.13'de yöntemin aşamaları detaylı olarak gösterilmiştir. Altlık sabit bir hızla sole daldırma aşamasında batırılır. Kısa bir süre solün içinde bekletilir. Daha sonra aynı hızla altlık daldırıldığı solden yukarı çekilir. Solden çıkan altlığın kısımları kaplama aşamasında, sol ile kaplanmış olur., altlığın üstüne kaplanan sol süzülme aşamasında damla damla süzülür. Taşıyıcıdan süzilemeyen fazla sol buharlaşma aşamasında buharlaşarak uçar. Altlık üzerinde kuru jel elde edilir. Taşıyıcının üstünde oluşan kuru jel fırınlama işleminden sonra film olur (Brinker, 1990; Türhan, 2000).



**Şekil 2.13:** Daldırma Kaplama Yönteminin Aşamaları

**Kaynak:** (Brunette, 2001)

Daldırma yönteminde taşıyıcının çekildiği yönde uygulanan viskozite kuvveti, yerçekimi kuvveti, altlığın üst yüzeyinde oluşan solün yarattığı yüzey gerilmesi, sınır tabakadaki yüzey etkileşimleri, yüzey gerilimi değişimi, birleşme ve ayrılma basıncı ve son olarak bunlara etki eden hava basıncı film kalınlığında etkili olan kuvvetler olarak sayılır. Film kalınlığı, altlığın daldırılma hızının ve sol viskozitesinin yüksek olmadığı kaplama işlemlerinde Landau-Levich bağıntısı ile belirlenir:

$$h = 0,94 \left( \frac{\eta u}{\gamma_{LV}} \right)^{1/6} \left( \frac{\eta u}{\rho g} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Yukarıda kalınlığı hesaplamak için kullanılan denklemin uygulanabilirliği konusunda yapılan çeşitli deneyler sonucu uygulanabilirliğin zayıf olduğunu göstermektedir.

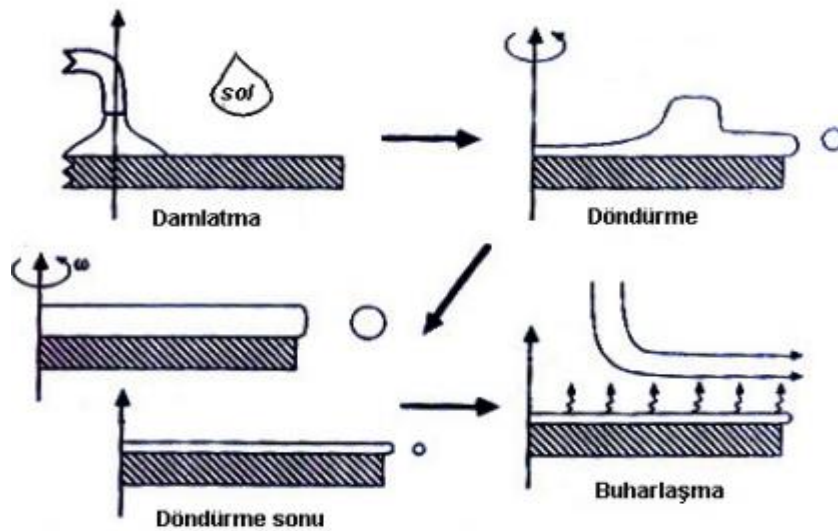
Kalınlık hesaplama denklemi uygulanabilirliğinin zayıf olması konusundaki sorunun başlıca sebepleri şöyle sıralanabilir: her sıvının Newton sıvısı olmaması, pH etkisi, vizkositenin sabit olmaması, ve en önemlisi buharlaşma etkisinin bu formülde gösterilmemesidir. Bütün bu etkiler filmlerin gerçekte daha kalın olması ile sonuçlanır. Buharlaşma oranı, daldırma işlemi ile kaplanan filmlerde film yüzeyindeki gaz fazının yüzeyin dışına doğru yayılma oranı ile orantılıdır. Difüzyon yaklaşık 1 mm kalınlığındaki (l) bir tabakada oluşur. Buharlaşma oranı (m) aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$m = k(p_e - p_i) \quad (2.6)$$

Buharlaşma oranı, sıvının derinliğinden bağımsızdır. Altlık hareketi, daldırma işlemi boyunca buharlaşma oranı üzerinde etkili olsada, pratikte ihmal edilebilir. Düzgün kalınlık elde edilmesi, çoklu katmanların yapılabilmesi, kalınlığın daldırma hızıyla kontrol edilmesi ve tüp, çubuk, boru gibi farklı geometriye sahip numunelerin kolaylıkla kaplanabilmesi bu uygulama işleminde önemli avantajlar olarak sayılmaktadır.

#### 2.4.2.2 Döndürme yöntemi

Bu uygulama işleminde, taşıyıcının yatay olarak bir eksen etrafında döndürülürken üzerine sol damlatılması ve solün merkezkaç kuvvetinin etkisiyle taşıyıcı yüzeyine yayılması prensibine dayanmaktadır. Döndürerek kaplama yöntemi beş evreden oluşur. Damlatma kısmında, kaplanacak olan taşıyıcı, dönecek olan yüzeye sabitlenir ve üzerine sol damlatılır. Taşıyıcı döndürülerek en kısa sürede belirlenen hıza ulaşması sağlanır. Dönme hızının değişkenliği film kalınlığının düzgün yayılmasını olumsuz yönde etkiler. Dönme esnasında damlatılan sol merkezkaç kuvvetinin etkisiyle taşıyıcı yüzeyine eşit miktarda yayılır. Fazla damlatılmış sol taşıyıcı üzerinden savrulur. Dönme sırasında kalınlığı azalan filmin, dönme işlemi bittiğinde kalınlığı taşıyıcının her yüzeyinde eşit oranda olur. Sonrasında buharlaşma aşamasına gelinir ve taşıyıcı bu işlemin ardından fırınlanır. (Brinker, 1990; Türhan, 2000).



Şekil 2.14: Döndürme Kaplama Yönteminin Aşamaları

Kaynak: (Brunette, 2001)

Filmin inceliği taşıyıcının ne kadar hızlı döndürüldüğü ile doğru orantılıdır. Aynı şekilde dönme hızı ne kadar büyük olursa, taşıyıcı üzerine damlatılan sole etki eden merkezkaç kuvveti o oranda büyük olur ve sol damlacıkları bu kuvvetin etkisiyle savrulur ve taşıyıcıyı terk eder. Kaplama, taşıyıcı üzerinde kalabilen sol damlacıklarıyla meydana geleceği için film kalınlığı daha ince olur (Brinker, 1990).

#### **2.4.2.3 Püskürtme yöntemi**

Bir püskürtme tabancası ile malzemenin altlık üzerine püskürtülmesi prensibine dayanır. Kaplamanın niteliğini belirleyen en önemli etkenler püskürtme tabancasının ucundaki deliklerin sayısı, deliklerin çapları, çözeltiyi püskürtme hızı, püskürtme uzaklığı olarak sıralanır. Seri imalat için uygundur (Brinker, 1990).

#### **2.4.2.4 Elektroforez yöntemi**

Bir elektrik alan oluşturulan soldeki, yüklü parçacıkların yüklerine göre dağılımına bağlı bir uygulamadır. Yüklerine göre katot veya anotta toplanan yüklü parçacıklar elektril alana göre hareket ederler. Sadece iletkenler için kullanılabilen bu yöntemde film kalınlığı, potansiyelin uygulandığı süreye göre ayarlanır (Brinker, 1990).

#### **2.4.2.5 Termoforez yöntemi**

Bu uygulamada sıcaklık grandyantı etkisiyle hareket eden sol parçacıkları sıcaklığın azalma yönünde net bir kuvvete maruz kalır. Tanecikler termal enerji alarak, kazandıkları hızla kaplanacak yüzeye çarpışıp birleşirler. Bu yöntemle hazırlanan filmlerin daldırma ile hazırlananlara göre avantajı daha büyük bir yoğunluğa sahip olmasıdır. Ayrıca bu yöntemin elektroforezde olduğu gibi iletkenlik gereksinimi yoktur (Brinker, 1990).

#### **2.4.2.6 Yerleştirme Yöntemi**

Parçacıklı sistemlere uygulanan ve parçacıkların yatay duran alt malzeme üzerine serildiği bir yöntemdir. Çözücüler buharlaşırken, konveksiyon ve gravitasyon etkisi ile parçacıklar, taşıyıcı üzerine çökerler. Bunun etkisiyle büyük parçacıklar taşıyıcı üzerinde küçük parçacıklardan önce yerini almış olur. Bu uygulamanın elektrofeze göre avantajı parçacıkların bpyutlarına göre sırlanmasıdır. Daldırma ve döndürme kaplama yöntemlerinden farkı ise film kalınlığının kurutma ile incelmesidir (Brinker, 1990).

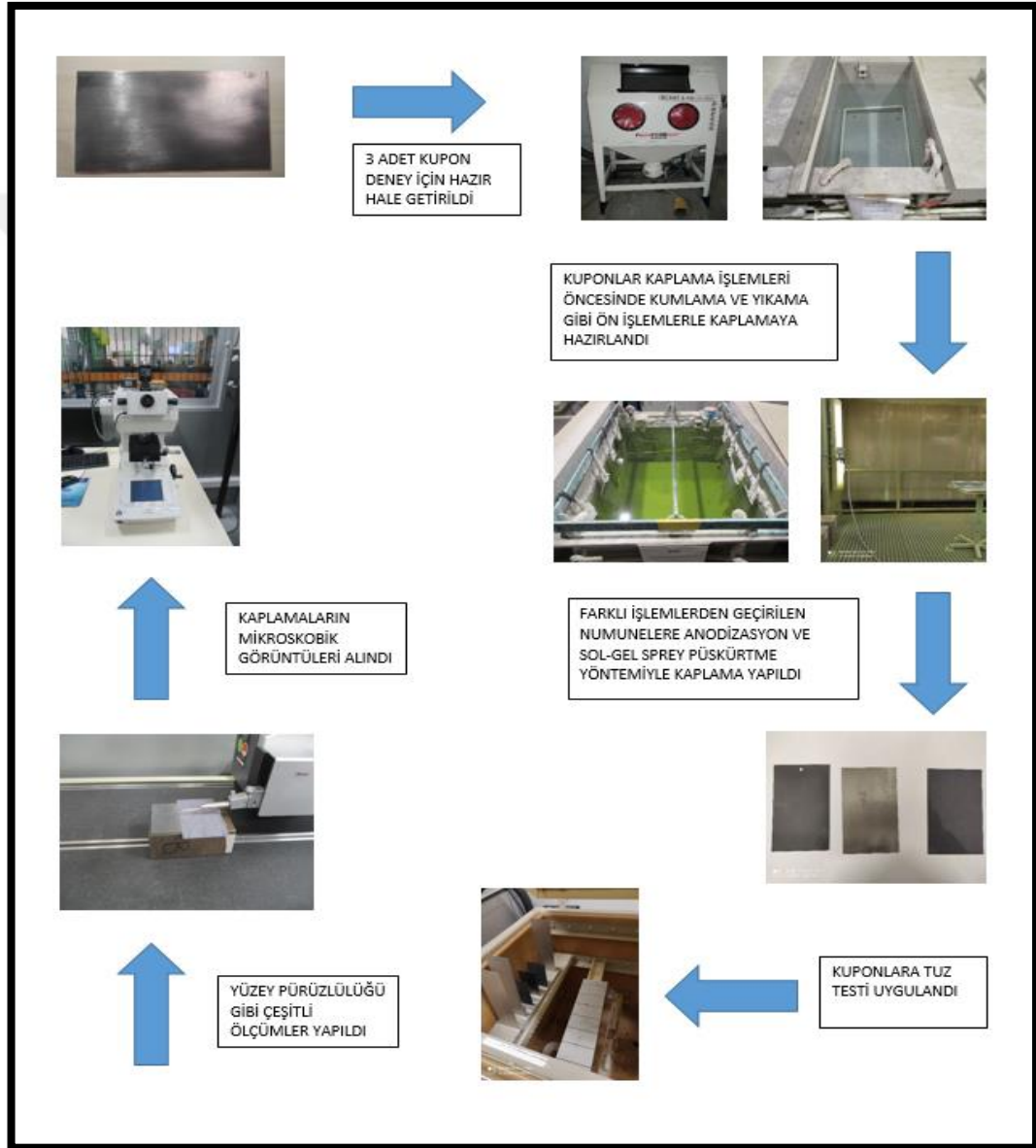
### **2.4.2.7 Karışık yöntem**

Bu uygulamada her tabaka farklı işlem uygulanarak kaplanır. Örneğin; daladılarak kaplama yapılmış bir katmanın üstüne yerleştirme yöntemi ile kaplama yapılabilir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Aşağıda Şekil 3.1’de Titantum alışım kuponlarının kaplama ve analiz işlemlerinin akış diyagramı verilmiştir.

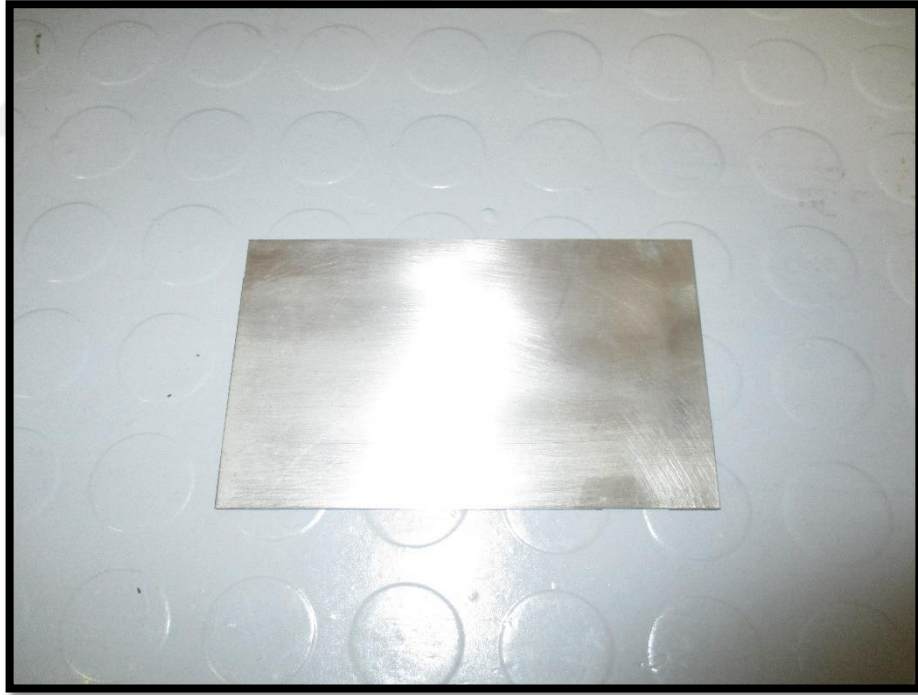


Şekil 3.1: Deneş düzeneği akış diyagramı

### 3.1 Deneyde Kullanılan Materyaller ve Uygulama Yöntemleri

#### 3.1.1 Titanyum malzeme

Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayisinde çok sık kullanıldığı için kaplama işlemlerinde titanyum alaşım malzemesi tercih edilmiştir. Seçilen titanyum kuponlar için özellikler üretim yöntemine göre farklılık göstermektedir. Temin edilen malzeme için özellikler üreten firmanın verdiği bilgilere dayanarak belirtilmiştir. AMS4911 Spesifikasyonuna göre kuponlar hazırlanmış olup  $1.60 \text{ mm} \pm 0.15 \text{ mm}$  kalınlık, 19 mm genişlik ve 76 mm uzunluk gerekmiştir. Şekil 3.2 de kaplama işlemlerinde kullanılan titanyum kuponunun görüntüsü verilmiştir. Titanyum malzemelerde kaplama işlemleri için spesifikasyonlar ve standartlardan yararlanılarak 3 farklı numune hazırlanacaktır ve malzeme yüzeyindeki yüzey pürüzlülükleri, deformasyon miktarları hesaplanacaktır. Kuponların 2 farklı kaplama ve kaplamasız olarak yüzey parametreleri ölçülecek ve sonucunda nasıl tepki verdiği araştırılacaktır.

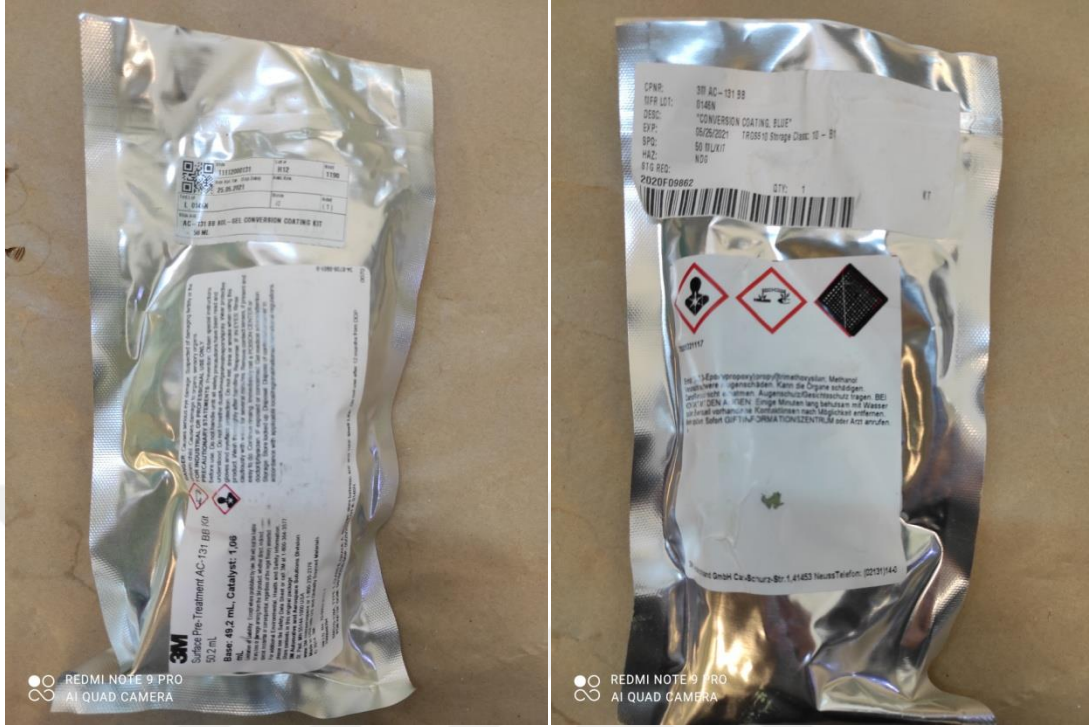


Şekil 3.2: Titanyum kupon görüntüsü

#### 3.1.2 Sol-jel kaplama kiti

Deneyde 3M AC-131 talimat ve spesifikasyonlarına göre AC-131 BB Sol-Jel kaplama kiti kullanılmıştır. Bu kaplama kiti nikel, paslanmaz çelik, alüminyum,

magnezyum ve titanyum alaşımları üzerinde kullanılabilir. Uygulama yöntemi olarak; Daldırma, fırça veya sprej tercih edilebilir.



**Şekil 3.3:** Sol-jel Kaplama Kiti Arka ve Ön Görünüşü

Bir pakette 50 ml karışım bulunup açıldığında hepsinin kullanılması gerekmektedir. Durulama veya ovalama gerektirmez. Su bazlı olup kromat içermez aynı zamanda yüzeye işleme sırasına kromatları ortadan kaldırır. Kitler tek seferlik olup talimatlara göre hazırlanmalıdır. Sol-jel solüsyonu 30 dakikalık bekleme süresi dolduktan sonra 10 saatlik kap ömrü dolmadan uygulanmalıdır.

### 3.1.3 Aşındırıcı pedler

Anodizasyon veya Sol-jel öncesinde kullanılan aşındırıcı pedler veya kağıtlar alüminyum oksit kullanılmalıdır.



**Şekil 3.4:** Bear-TeX, Norton Co., Worcester M



**Şekil 3.5:** Scotch-Brite, Type A, 3M Co., St. Paul MN

İşlem görecek yüzeyleri Bear-TeX ya da istenilen özelliklerde Scotch-Brite kullanarak aşındırılması gerekmektedir. Bu Sol-jel uygulamasına geçilmeden önce yapılması gereken işlemlerden birisidir. Buradaki amaç işlem yapılacak yüzeyleri temizlemek ve Sol-jel tutunmasını güçlendirmek için adezyonu arttırmaktır.

Aşındırılan yüzeyde kalan kalıntılar basınçlı hava püskürtülerek temizlenebilir.

#### **3.1.4 Manuel kumlama**

Aşağıdaki görsellerde Sol-jel öncesi işlem görecek yüzeyler için gerekli olan alüminyum oksit 180 grit veya daha ince kumla yapılan kumlama tezgahı ve kum yer almaktadır.



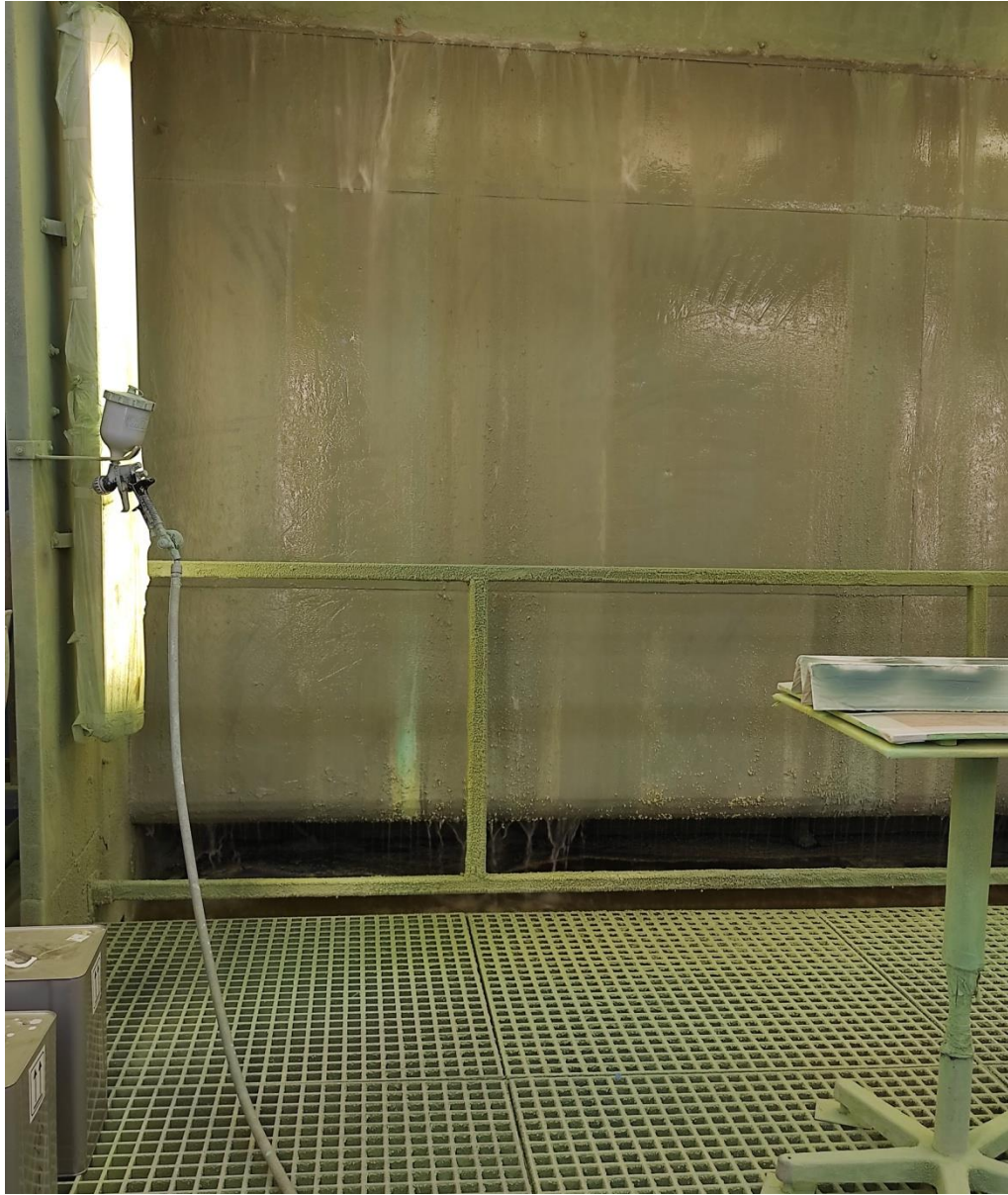
Şekil 3.6: Ferro ECOBlast Manuel Kumlama Tezgahı



Şekil 3.7: 180 Grit Aluminyum Oksit Kum

### 3.1.5 Sprey ile sol-jel kaplama

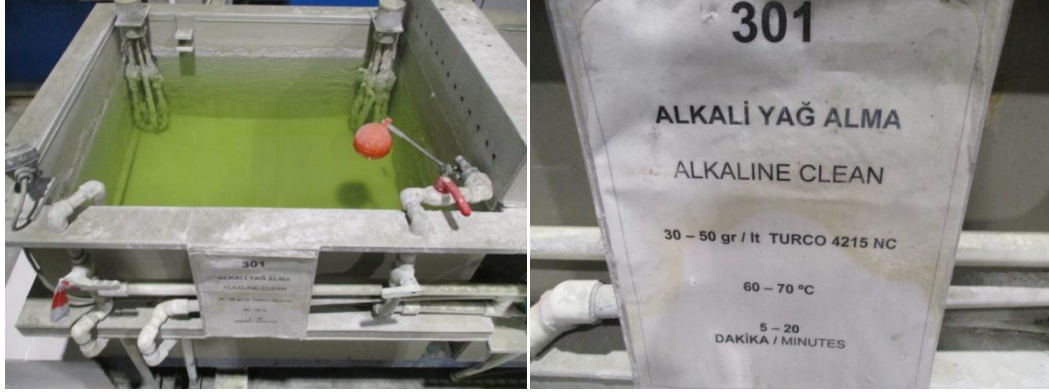
Sol-jel kaplamanın, sprey şeklinde uygulanmasına karar verilmiş ve bu yöntemde uygun hortum - tabanca seti seçilmiştir. Spreyleme işlemi öncesi, tabancanın içerisinde yağ veya su bulunup bulunmadığı kontrol edildikten sonra, uygulama yapılacak ortam, sürekli olarak sıcaklık ve nem cihazıyla kontrol edilerek, maksimum %85 bağıl nemde ve 13 ila 37 °C sıcaklıkta olmasına dikkat edilmiştir. Spreyleme işleminde direkt olarak sıkıştırılmış hava kullanılmıştır. Spreyleme işlemleri sonrasında, sprey ekipmanları izopropil alkol ile temizlendikten sonra kurutulmuştur. Bu prosedür, her deney öncesi tekrarlanmıştır.



Şekil 3.8: Sol-jel Kaplama Yapılan Boya Atölyesi

### 3.1.6 Alkali yağ alma

Kumlama prosesi uygulanmadan önce aşındırılmış yüzeyde istenilmeyen kirlilik, yağ kalıntısı vb kalmaması için alkali yağ alma yapılmıştır.



Şekil 3.9: Alkali Yağ Alma İşleminde Kullanılan Havuz ve Kimyasalın Bilgileri

### 3.1.7 Sol-jel uygulama

Sol-jel prosesi uygulanmadan önce kumlama ön işlemi yapılmıştır. Kumlama ön işlemi yapılırken numunemiz önce alkali yağ alma işlemi ile temizlenmiştir. Ardından kumlama yapıp yüzeyde kalıntı barındırmaması için basınçlı hava ile temizlenmiştir. Akabinde numunede su kırılımı olmadığı en az 30 saniye süreyle gözlemlenmiştir.



Şekil 3.10: Su Kırılımı Testi Uygulaması

Sol-Jel uygulamasından önce kullanılacak olan su saf su olup iletkenliği maksimum 25 microsiemens/cm'dir. Sol-jel solüsyonu hazırlanıp bekleme süresi dolduktan sonra kap ömrü dolmadan numuneye sprey yardımıyla sürekli bir tabaka oluşturacak şekilde dik olarak yukarıdan aşağıya doğru uygulama yapılmıştır. Ardından numune maksimum 82 °C 'de 60 dakika kadar fırınlanarak kurutulmuştur.

Çizelge 3.1: Sol-Jel Kaplama Prosesi Kayıt Kartı

**SOL-JEL KAPLAMA PROSESİ KAYIT KARTI**

<b>TARİH / DATE</b>					
<b>PDK NO / TRAVELLER NO</b>					
<b>PARÇA NO / PART NO</b>					
<b>ADET / QUANTITY</b>					
<b>KIT LOT NUMARASI KIT LOT NUMBER</b>					
<b>ANA KOMPONENT ORANI BASE COMPONENT RATIO</b> <i>[Hacimce / Volume 49,2]</i>					
<b>AKTİVATÖR ORANI ACTIVATOR RATIO</b> <i>[Hacimce / Volume 1,06]</i>					
<b>ÖN İŞLEM PRE-TREATMENT</b>					
<b>KARIŞTIRMA BAŞLANGIÇ ZAMANI MIX START TIME</b>					
<b>POT ÖMRÜ BİTİŞ END OF POT LIFE</b> <i>[MAX. 10 Saat/Hours]</i>					
<b>BEKLEME SÜRESİ INDUCTION TIME</b> <i>[Minimum 30 Dak. / Minute.]</i>					
<b>SICAKLIK [°C] TEMPERATURE [°C]</b> <i>[13 - 37 °C]</i>					
<b>NEM / HUMIDITY [%] [MAX. 85 %]</b>					
<b>SPRAY BAŞLAMA ZAMANI SPRAY START TIME</b>					
<b>FLUSH OFF</b> <i>[3-10 Dak./Minute.]</i>					
<b>FIRIN SICAKLIĞI [°C] CURE TEMPERATURE [°C]</b> <i>[Maximum 80 °C]</i>					
<b>KURUTMA BAŞLANGIÇ CURE START</b>					
<b>KURUTMA BİTİŞ CURE END</b>					
<b>GÖZLE MUAYENE VISUAL INSPECTION</b>					

### 3.1.8 Anodizasyon işlemi ve hazırlıkları

İlk önce numuneye alkali yağ alma işlemi yapılmıştır. Bunun amacı numune önceden talaşlı işlem görmüşse veya üzerinde herhangi bir kalıntı oluştuysa temizlemek aynı zamanda sonraki aşamada numunenin asitle reaksiyona girme verimliliğini arttırabilmek için önemlidir. Yüzeyde istenmeyen yağlar ve kirlilik kalırsa kimyasal işlem verimsiz olur. Alaşım yüzeye istenilen şekilde ulaşmadığı için yeterli şekilde nüfuz edemez ve akıma engel olur. Aynı zamanda yağ alma işleminden sonra yapılan dağlama işleminin sorunsuz bir şekilde tepkimeye girmesi için alkali yağ alma önemlidir. Bu işlemde 30-50 gr/lt Turco 4215 NC isimli dağlama solüsyonu kullanılmıştır. 60-70 °C'de 20 dakika bekletilmiştir. Alkali yağ almadan sonra %40-50 Nitrik Asit %0.5 Hidroflorik asit ile oda sıcaklığında 30-60 saniye arası dağlama yapılmıştır. Dağlama işlemi yüzeyde inklüzyon varsa onları yok etmek için yapılır. Yüzeysel bir şekilde metal aşındırma yaparak yüzeyde kalan takım izleri, artıklar, çapaklar gibi istenilmeyen süreksizlik ve kalıntıları temizler. Böylece tamamen titanyum alaşımından oluşan ve kaplama yapıldığında kaplama altında inklüzyon oluşturmayacak bir yüzey elde edilmiş olur.



**Şekil 3.11:** Dağlama İşleminde Kullanılan Havuz ve Kimyasalın Bilgileri

Dağlamada kullanılan çözeltinin yüzeyde kalmaması için saf su ile yıkama yapılmıştır.

Ardından numune anodizasyon için hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 3.12:** Saf Su İle Yıkama İşleminde Kullanılan Havuz ve Bilgileri

Daha sonra anodizasyon banyosuna alınmıştır. Parça anot olur katotlarla kurulan banyo içerisinde ilgili asit kimyasalına alınır. Bu asit kimyasal reaksiyon verdiğinde yüzeyde bir oksitlenme yaratır. Fakat kontrollü bir oksit tabakası oluşur. Yüzeyde stabil bir metal oksit tabakası oluşur. Bu tabaka kontrolsüz korozyonu engellemiş olur.



**Şekil 3.13:** Titanyum Anodizasyonu Banyosu ve Kimyasal Bilgileri

Bu işlem bittikten sonra parça üzerindeki anodizasyon asit çözeltisini yüzeyden arındırmak için akar yıkamaya alınmıştır. Akar yıkama yüzeydeki kirleri ve asit çözeltisini yıkamak için yapılır. Ardından yüzeyde herhangi bir leke kalmaması için hava ile kurutma yapılmış ve su lekesi oluşumu önlenmiştir.



**Şekil 3.14:** Akar Yıkama Havuzu ve İşlem Bilgileri



**Şekil 3.15:** Kurutma İşlemi İçin Kullanılan Tank

Böylece parçanın anodizasyon işlemleri tamamlanmıştır. Bütün bu işlemlerde kullanılan kimyasal havuzların kontrol işlemleri için ayarlamalar kontrol paneli aracılığıyla yapılmıştır.



**Şekil 3.16:** Kimyasal Havuzların Kontrol Paneli

### 3.1.9 Kimyasal İşlemler Parametrelerinin Belirlenmesi

Parçanın anodizasyon işlemi AMS2488E standartları ile yapılmıştır. Sol-jel işlemleri ise 3M AC-131 kullanım talimatlarına göre yapılmıştır. Bilgiler ve fotoğraflar; standartlar ve spesifikasyonlar kapsamı, Kale Havacılık ve Savunma Sanayi bilgi gizliliği nedeniyle kısıtlanmıştır.

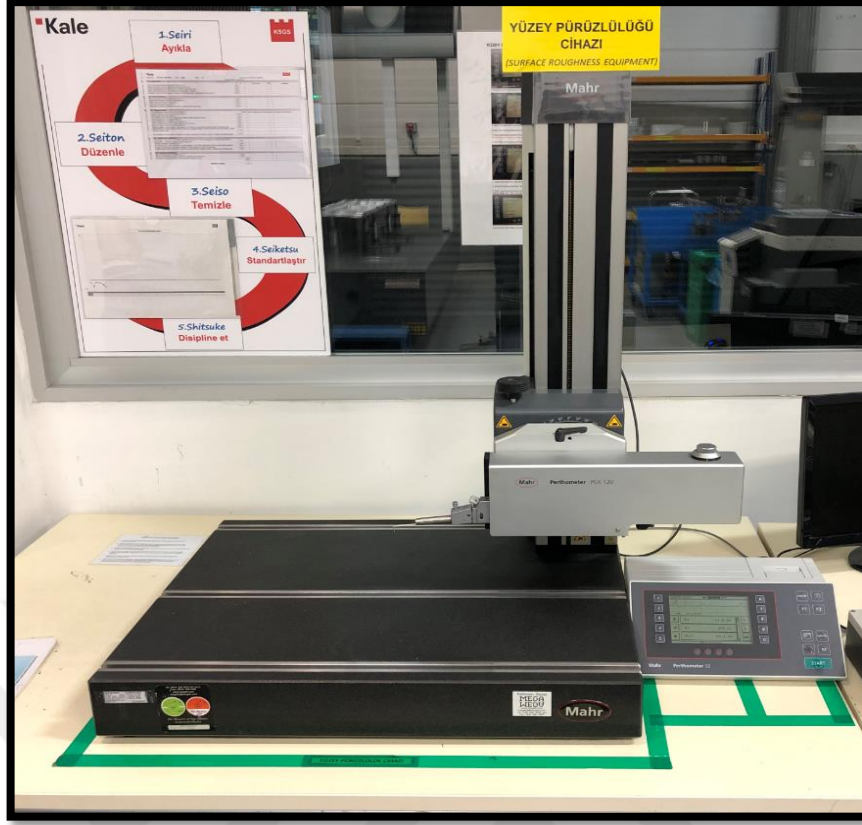
#### Sol-Jel Kaplama Prosesi Parametreleri;

Process Parameters	REQUIREMENT	OBSERVED
Thinning Solvent	<a href="#">Per manufacturer instructions</a>	<a href="#">Full kit mixing</a>
Viscosity/Ratio	<a href="#">49,2 ml / 1,06 ml</a>	<a href="#">49,2 ml / 1,06 ml</a>
Mixing Time		
Induction Time	<a href="#">Minimum 30 minutes</a>	
Pot Life	<a href="#">10 hours</a>	
Temperature	<a href="#">13-37 C</a>	
Relative Humidity	<a href="#">Max 85 %</a>	
Cure time between coats	<a href="#">N/A</a>	
Time before final cure time	<a href="#">3-10 minutes</a>	
Time of final cure	<a href="#">60 minutes</a>	
Final cure temperature		

Şekil 3.17: Sol-Jel İşlem Parametreleri

### 3.1.10 Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

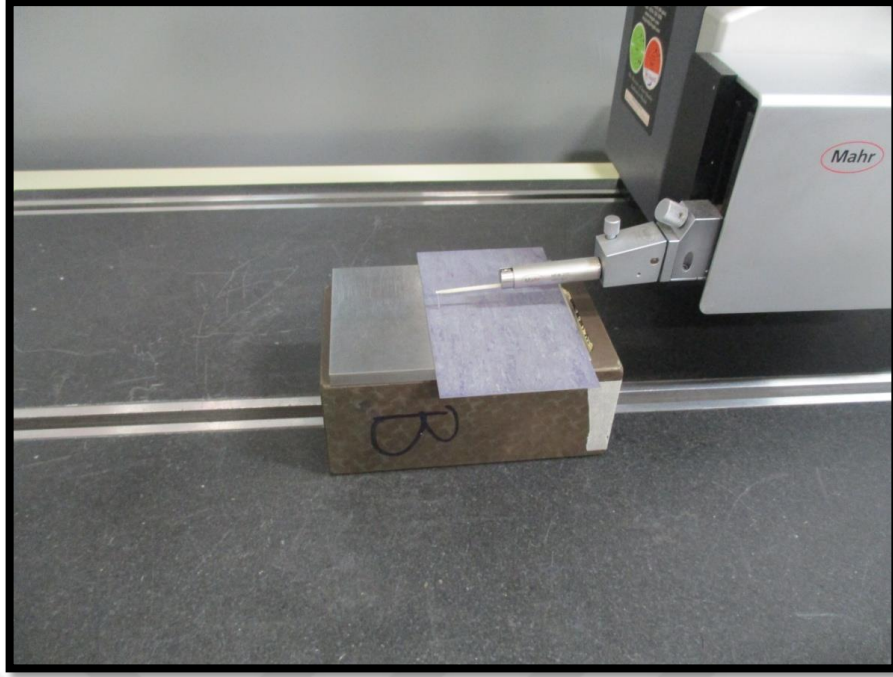
Yapılan yüzey kaplamaları sonrasında anodizasyon yapılmış, sol-jel kaplanmış ve kaplamasız olmak üzere üç numune üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için Kale Havacılık bünyesinde bulunan Mahr Perthometer PGK 120 Yüzey Pürüzlülük Ölçer cihazı kullanılmıştır. Cihaz için uzunluk, genişlik ve yükseklik bilgileri; 330 mm x 60 mm x 120 mm' dir. Cihaz yüzeyler üzerinde 5.6 mm ilerleyerek çalışmıştır.



Şekil 3.18: Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı



Şekil 3.19: Yüzey Pürüzlülüğü Cihazı Ölçüm Bölümü



**Şekil 3.20:** Yüzey Pürüzlülüğü Cihazının Parça Üzerinde Çalışma Görüntüsü

### 3.1.11 İletkenlik ölçümü

Uluslararası bakır standartına göre bakırın yüzde yüz iletken olduğu var sayılarak LMA-PC009 İletkenlik ve Sertlik Spesifikasyonuna göre ölçülüp değerlendirilmiştir. Ölçümler için Kale Havacılık bünyesinde bulunan Verimet M4900C İletkenlik Ölçer cihazı kullanılmıştır. Birimi %I.A.C.S. 'dir.



**Şekil 3.21:** İletkenlik Ölçüm Cihazı

### 3.1.12 Direnç ölçümü

Ölçümler için Kale Havacılık bünyesinde bulunan M1 Milliohm Meter DC002074 cihazı kullanılmıştır. Cihaz iki kanallıdır.



Şekil 3.22: Elektrik Direnci Ölçüm Cihazı



Şekil 3.23: Test Kuponunun Ölçümü

### 3.1.13 Kaplama kalınlığı ölçümü

Ölçümler için Kale Havacılık bünyesinde bulunan PosiTector 6000 cihazı kullanılmıştır. Cihaz ISO 9001 Sertifikalıdır.



**Şekil 3.24:** Kaplama Kalınlığı Ölçüm Cihazı

### 3.1.14 Sertlik ölçümü

Ölçümler için Kale Havacılık bünyesinde bulunan Mitutoyo Wizhard Sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik cihazı ölçüm özellikleri HR 15TW ; Sertlik Rockwell, 15T skala, 1/16" tungsten karbür uç kullanılmıştır. ASTM E18 Standartına göre 3 saniye boyunca 15 kg yük uygulanmıştır.



**Şekil 3.25:** Sertlik Ölçüm Cihazı

### 3.2 Deneysel Analizler

Titanyum kuponların kaplamasız, Sol-Jel kaplamalı, anodizasyon kaplamalı kimyasal kaplama işlemlerinde; kaplama sertliği, yüzey pürüzlülüğü, elektrik direnci, iletkenlik ve korozyon üzerine etkilerini belirlemek için tuz testi gibi bir dizi deney işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için deneyin gerçekleştirildiği özel prosesler laboratuvarında her bir kaplama için farklı şekilde tanımlanan spesifikasyonlar ile yapılmıştır. Standartlar ve spesifikasyonlar şirket tarafından satın alınmış olup yine Kale Havacılık bünyesinde kullanılmıştır ve hakları gizlidir. Kaplamalarda titanyuma ve kaplama cinsine göre AMS2488E, 3M AC-131 standart ve spesifikasyonları tercih edilmiştir. Kale Havacılık özel işlemler bünyesinde yapılan bu işlemlerde kullanılan kimyasallar ve verilen değerleri somut bir şekilde kaplama ve işlemleri üzerine yansıtılmıştır.

Titanyum malzemenin kaplama işlemlerini tamamladıktan sonra tuz testi yapmak üzere C+W SF/450 Korozyon test cihazına getirilmiştir. Malzemenin her numunesi için ölçümler yapılmış ve kayıt edilmiştir.

Cihazın sıcaklık ve basınç göstergeleri yılda en az bir kez kalibre edilmiştir.

Kabin tavanında veya kapağında biriken çözelti damlaları teste tabi tutulan numunelerin üzerine düşmemesi için her testten önce ve sonra temizlenmiştir.



Şekil 3.26: Tuz Testi İçin Kullanılan Cihaz

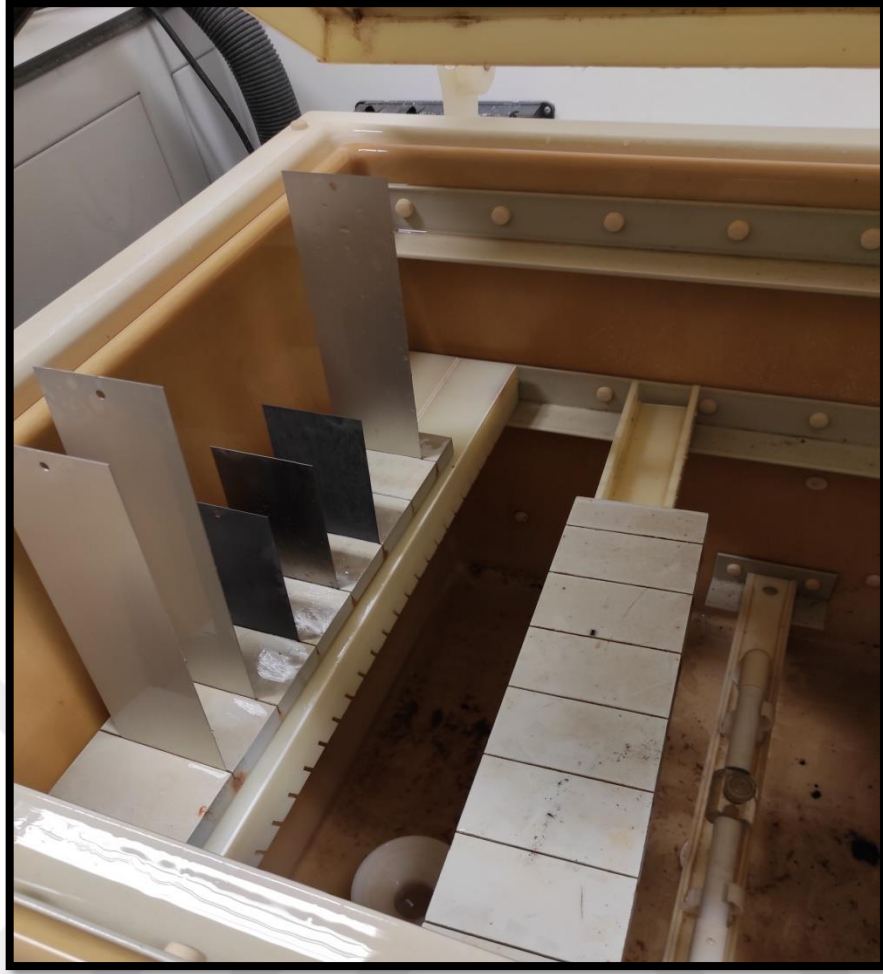


**Şekil 3.27:** Tuz Testi Kontrol Paneli

Tuz testi için gerekli aparatlar: sis kabini, tuz çözeltisi rezervuarı, sıkıştırılmış hava kaynağı, atomizasyon nozülü, numune destekleri, kabin ısıtma sistemi ve gerekli kontrol sistemleri hazırlanmıştır.

ASTM D609 Gerekliliklerine göre hazırlanmış kaplamalı ve kaplamasız test numuneleri yine bu standartlardaki prosedürlere göre temizlenmiş ve eldiven kullanılarak test için uygun hale getirilmiştir.

Numuneler test edilecek yüzeyler baz alınarak; test kabine 15 ila 30 derecelik açıyla, birbirlerine temas etmeyecek şekilde korozif olmayan nesnelere sabitlenmiştir. Yatay sis akışına paralel olacak ve her yüzeyi homojen olarak etkilenecek şekilde yerleştirilmiştir.



**Şekil 3.28:** Numunelerin Test Kabinine Yerleştirilmesi

Tuz çözeltisi ASTM D1193 Type IV'e uygun, maksimum 5  $\mu\text{s}/\text{cm}$  iletlenliğe sahip % 95'lik su ve ağırlıkça %  $5 \pm 0,5$  sodyum klorür içerecek şekilde hazırlanmıştır. Kullanılacak tuz ağırlıkça % 0.3'den fazla toplam kirlilik içermeyecek şekilde hazırlanmıştır. Klorür'den farklı halitler (bromür, florür, iyodür); tuz içeriğinin ağırlıkça % 0.1'i kadar kullanılmamıştır. Bakır içeriği ağırlıkça 0.3 ppm'den az eklenmiştir. Kirlilik kısıtlamaları için Çizelge 3.2'ye bakınız.

**Çizelge 3.2:** Tuz Testinde Kullanılan Çözelti Değerleri

<b>Kirlilik Açıklaması</b>	<b>İstenilen Değer</b>
Toplam Kirlilik	$\leq 0.3\%$
Klorür Harici Halidler	$< 0.1\%$
Bakır	$< 0.3 \text{ ppm}$
Topaklaşma Önleyiciler	% 0

Çizelge 3.2'de verilen bilgilere göre hesaplamalar aşağıdaki gibi olmaktadır;

%5'lik tuz çözeltisi hazırlamak için aşağıdaki formül kullanılacaktır.

$0.053 \times \text{Su Ağırlığı} = \text{Gerekli NaCl Ağırlığı}$  99.9% 'dan daha saf olan tuzlar, halojen içeriği hakkında test edilmeyebilir.

Çözelti hazırlanması için Kale Havacılık özel prosesler bünyesinde bulunan Metrohm 916 Ti-Touch marka titratör kullanılmıştır. Aynı şekilde çözeltinin istenilen değerlerde hazırlanması için Metrohm 914 pH/Kondüktometre kullanılmıştır.



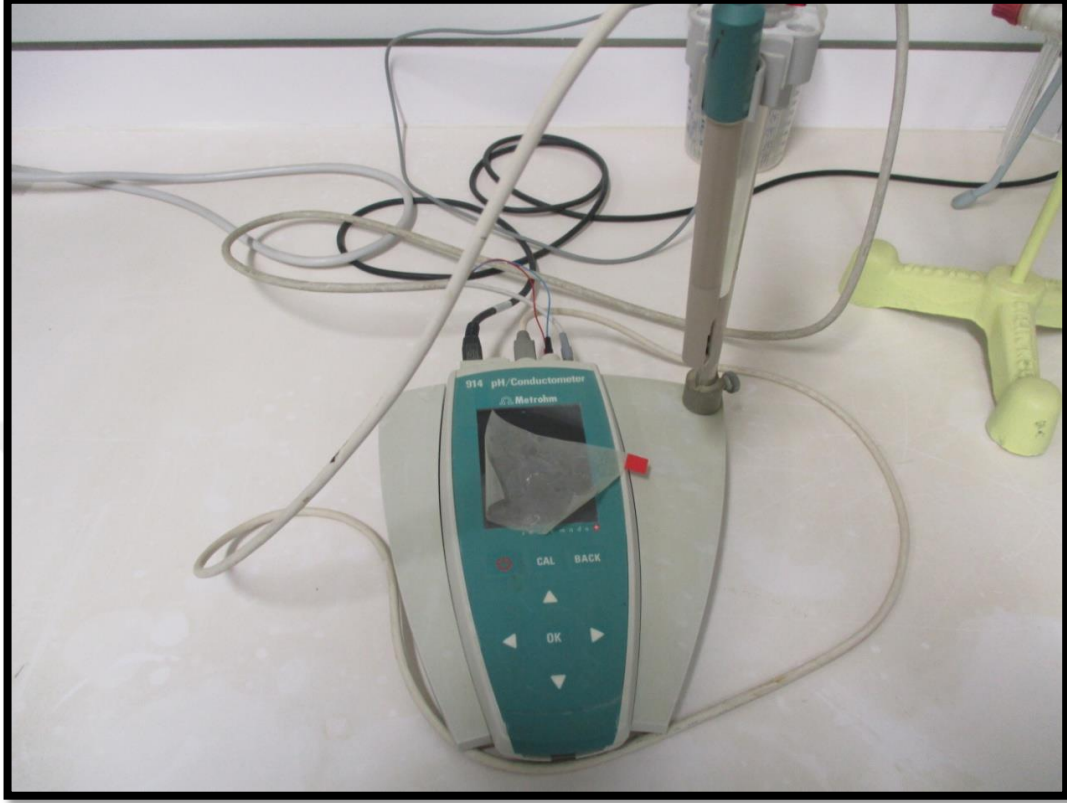
**Şekil 3.29:** Çözeltinin Hazırlanması İçin Kullanılan Titratör

Tuz solüsyonu 35 C°'de , Ph değeri 6.5 ila 7.2 arasında olacak şekilde püskürtülmüştür. Solüsyon püskürtülmeden önce katı maddelerden arındırılmıştır.

Tuz solüsyonunun püskürmesi için nozula gelen sıkıştırılmış hava yağdan ve kirden yoksun olacak şekilde ve hava basıncı 0,7 ile 1,4 bar arasında ayarlanmıştır.

Tuz testi kabini açık alanı  $35 \pm 2$  C° olacak şekilde ayarlanmıştır. Duraklama süreleri günlük 60 dakikayı geçirmeyecek şekilde numuneler kontrol edilmiştir.

Tuz testi kabineine iki adet sis toplayıcı beher yerleştirilmiştir. Beherler aracılığıyla toplanan solüsyonlar refraktometre cihazı ile konsantrasyon değerleri kontrol edilmiştir. PH ölçümleri yine bu solüsyonlarla ölçülerek kontrolleri yapılmıştır.

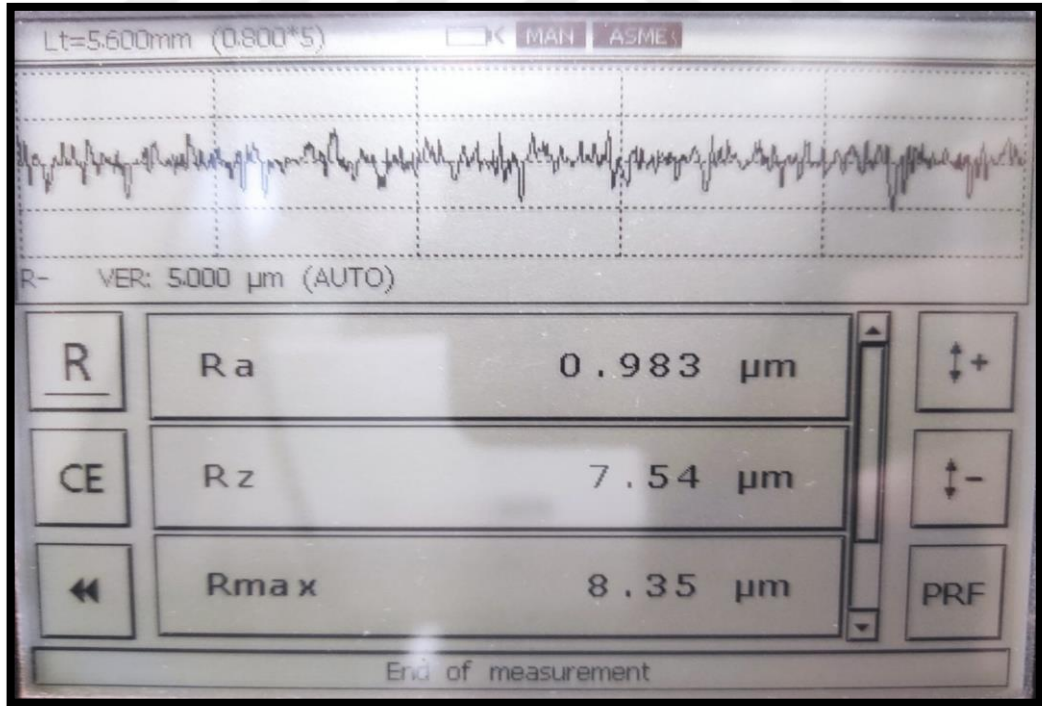


**Şekil 3.30:** Çözeltinin Hazırlanması İçin Kullanılan Ph/Kondüktometre

Titanyum malzemenin tuz testi işlemlerini tamamladıktan sonra yüzey pürüzlülüğü ölçümlerini yapmak üzere Mahr Perthometer PGK120 tezgahına getirilmiştir. Malzemenin her numunesi için ölçümler yapılmış ve kayıt edilmiştir. Sonuçlar beklenildiği gibi kaplamanın yüzeye tutunması için yapılan işlemler arttıkça artan yüzey pürüzlülüğü değeri ile sonuçlanmıştır. Kumlama, Shotpeen gibi işlemlerde tane boyutu azaldıkça yüzey pürüzlülüğünü azaltan bir diğer faktör olmuştur.



Şekil 3.31: Parça Üzerindeki YüzeY Pürüzlülüklerinin Tespit Edilmesi



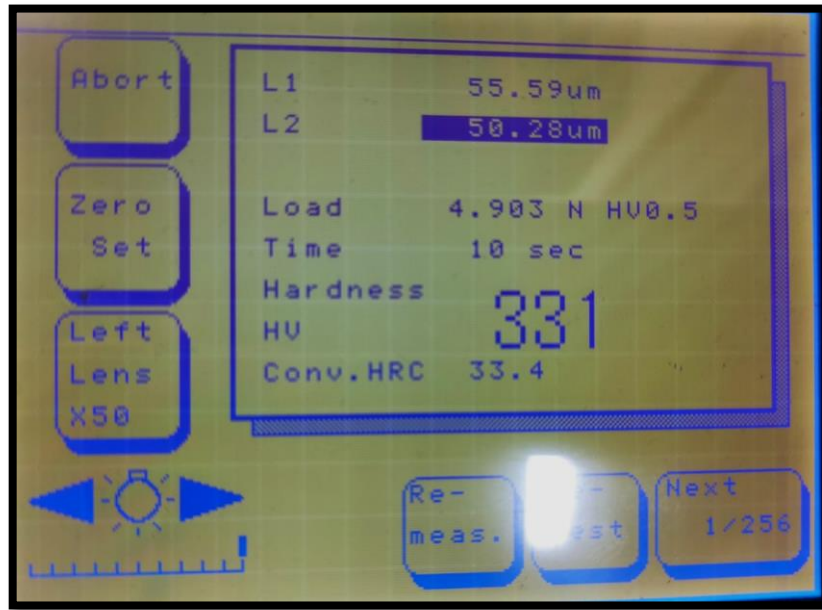
Şekil 3.32: Test Parçasının YüzeY Pürüzlülüğünün Okunması

Test kuponları üzerinde yüzeY pürüzlülüğü ölçümleri tamamlandıktan sonra numunelerin üzerinde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin mikro sertlik ölçümlümleri tamamlandıktan sonra her biri ayrı ayrı değerlendirilip tabloya

yansıtılmıştır. Ölçümler için Shimadzu HMV Mikro sertlik cihazı kullanılmıştır. 0,5 kg yük, 10 sn uygulanmıştır.



Şekil 3.33: Test Parçasının Mikro Sertliğinin Tespit Edilmesi



Şekil 3.34: Test Parçasının Mikro Sertliğinin Okunması

Numunelerde kaplamanın yapıldığı bölgeler üzerinde mikroskop ile görüntüler alınmıştır. Yapılan tespitler görüntülenmiştir.



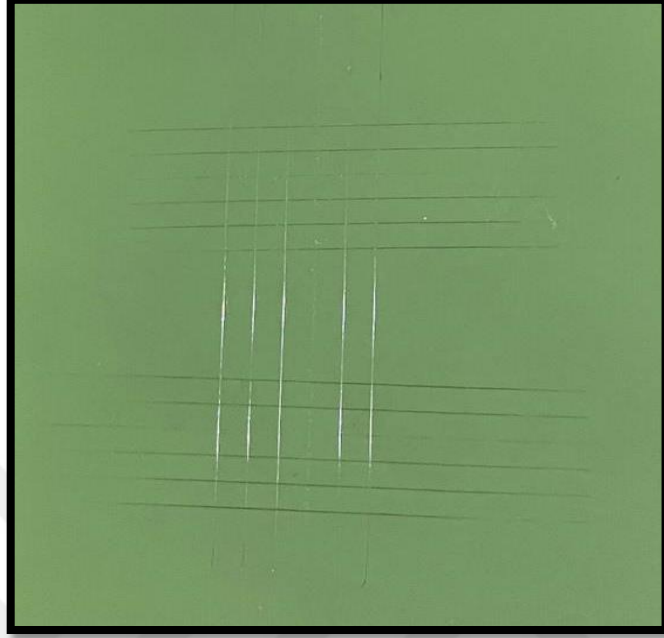
**Şekil 3.35:** Test Parçasının Görüntüleri Clemex Optik Mikroskop ile Alınmıştır

Astar öncesi hazırlanan üç farklı test kuponu yüzeyinin adezyon performansı için bant testi yapılmıştır. Deneyde akzonobel astar kullanılmıştır. 10P4-2NF kullanım talimatları doğrultusunda astar sprej tabancası ile yaklaşık 20 mikron kalınlığında püskürtülmüştür.



**Şekil 3.36:** Adezyon Testinde Çizik Atmak İçin Kullanılan Cross Cut Aleti

Ardından 80 °C 'de 1 saat fırında kürlenmiştir. Test çizikli yaş, çizikli kuru, yaş ve kuru olmak üzere her numune için 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Test yapılırken astardan sonra numuneye 90 ° çizik atılmıştır.

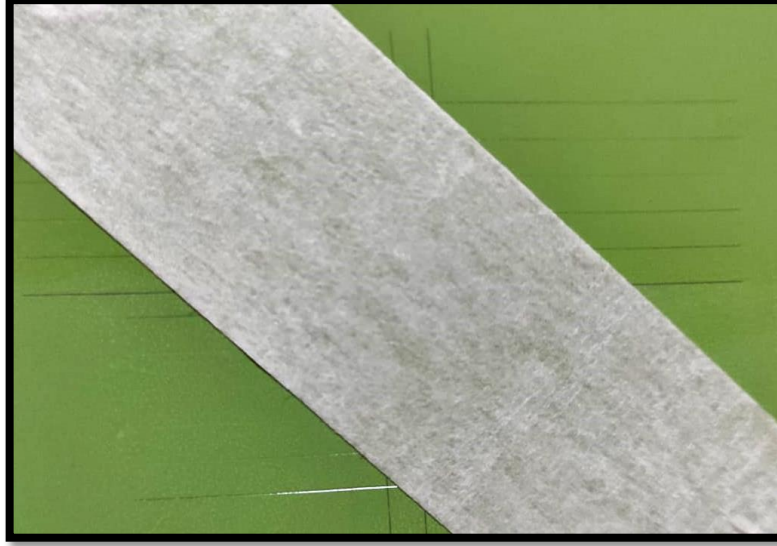


**Şekil 3.37:** Astar Atılmış ve 90° Çizilmiş Test Parçası

Çizikler Atıldıktan Sonra Bant 90 ° Atılan Çiziklere 45 ° Açıyla yapıştırılmıştır. Adezyon bantı test yapılacak yüzeye iyice yapıştırılıp sert bir şekilde çekilmiştir.

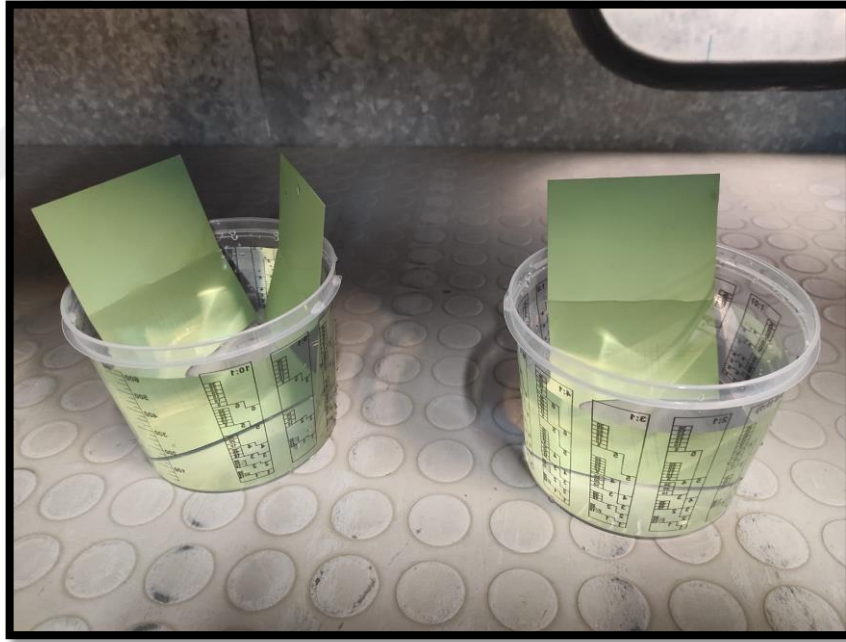


**Şekil 3.38:** Scotch Düz Maskleme ve Adezyon Bantı



**Şekil 3.39:** Scotch Düz Maskleme ve Adezyon Bantı

Yaş adezyon testi için numuneler saf su içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Şekil 3.40'da numunelerin test içinde beklemesi gösterilmiştir.



**Şekil 3.40:** Saf Suda Bekletilen Test Kuponları

#### 4. DENEYSEL ANALİZLERİN SONUÇLARI

Yüzey kaplama işlemlerinde, işlem aşamasında kimyasal kaplamada kullanılan bileşen ile iş parçası arasında gerçekleşen tutunma için bir pürüzlü yüzey meydana getirmek gerekmektedir. Bu yüzeyi elde ederken kullanılan kumlama işlemi, iş parçasının yüzey sertliği, malzemenin kalınlığının artması, yüzey pürüzlülüğünün artması gibi birçok parametreyi etkilemektedir. Seçilen bu parametrelerin yanlış belirlenmiş olması malzemelerin kullanımında sorunlara sebep olur. Bu olumsuz durum iş parçasından beklenen kalitenin düşmesine sebep olur. Titanyum deney kuponlarının sol-jel ve anodizasyon ile kaplanmasının yüzey pürüzlülüğü, sertlik, adezyon, mikrosertlik ve korozyon faktörü üzerine etkileri araştırılmış ve sonuçları değerlendirmek üzere Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1:** Titanyum Kuponlarının Farklı Kaplamalarla Elde Edilen Sonuçlar

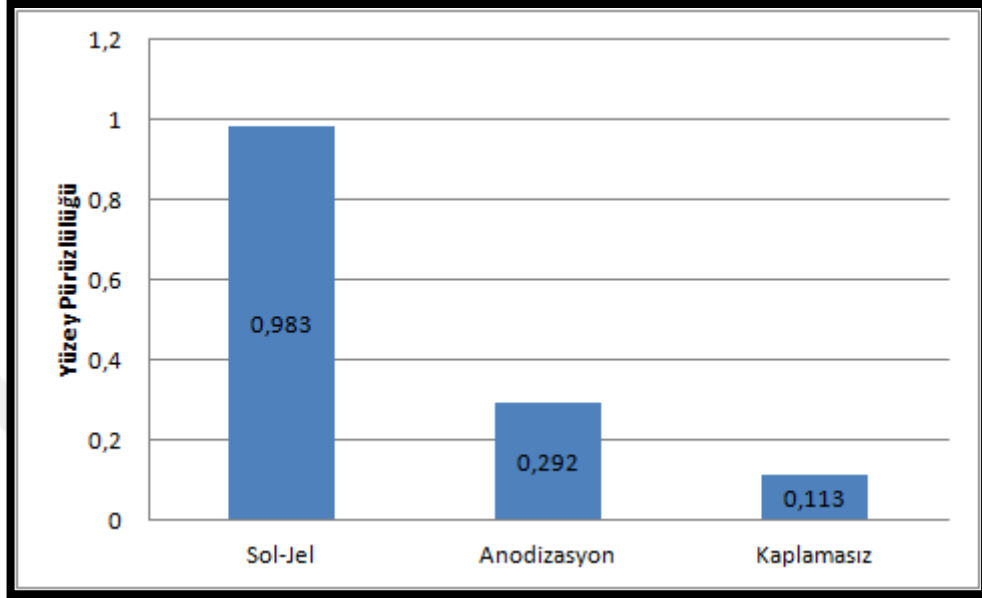
Kaplama	Deney No	Direnç (mohm)	Kaplama Kalınlığı (mikron)	Sertlik (HR15T)	Mikro Sertlik (HV 0,5)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)
Sol-Jel	1	3,74	4	93,4	467	0,983
Anodizasyon	2	3,78	3	94,2	311	0,292
Kaplamasız	3	4,38	0	94,2	353	0,113

##### 4.1 Kaplama İşlemlerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Kaplama özelliklerine bağlı iş parçasının kalite özelliklerini belirleyen en önemli unsurlardan biri yüzey pürüzlülüğüdür. İmalatı tamamlanmış bir iş parçasının kalitesi, parçanın performans kalitesi ile belirlenir. Yüzey pürüzlülüğünün istenen değerlerde yakalanamamış olması parçanın mekanik özelliklerindeki negatif yönde etkileyebilir ve imal edilmiş olan parçanın kullanım ömrünü azaltabilir. Titanyum malzemelerin imalatı yapılırken yüzey pürüzlülük değerinin belirli bir kalitede olması beklenir. Titanyum malzemelerin mekanik özellikleri, kaplama cinsi, kumlama yapılması, kullanım yerleri gibi seçeneklerin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkileri vardır. Bu seçeneklerin birbiri ile uyumlu olması kaplama

işlemlerinin verimli olmasını ve yüzey pürüzlülüğünün talep edilen toleranslar dahilinde gerçekleşmesini sağlar.

Titanyum kuponlar için farklı kaplamalardan elde edilen yüzey pürüzlülük değeri(Ra) grafiği karşılaştırması Şekil 4.1’de verilmiştir.

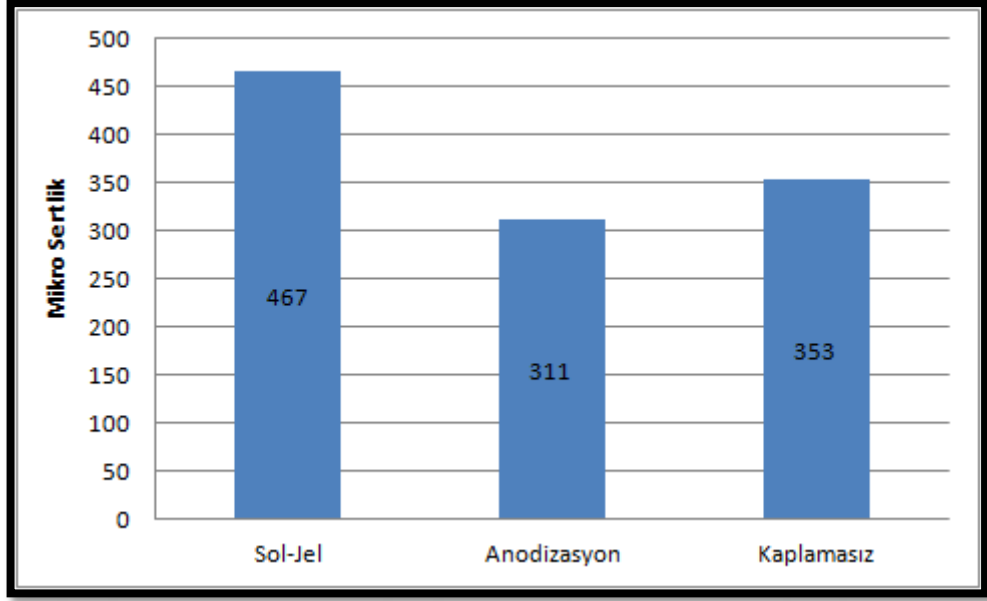


Şekil 4.1: Kaplama Çeşidine Bağlı Yüzey Pürüzlülüğünün Karşılaştırılması

#### 4.2 Kaplama İşlemlerinin Malzeme Sertliğine Etkisi

Kaplama işlemlerinde iş parçasına etki eden en önemli özelliklerden biri de sertliktir. Yüzey sertliği malzemenin çizilme, aşınma, kesilme gibi fiziksel dış kuvvetlere karşı gösterdiği direnci belirler. Çeşitli yöntemler ile malzemenin yüzeyinde, malzemeyi koruyan bir tabaka oluşturan bu kaplamalar; mikroyapısına, malzemesine, sertliğine etki ederek dış etmenlere karşı korumaya alır. Deney kuponlarının sertlik ölçümleri de yapılmış olup okunan değerlerin birbirine yakın çıkması yüzeye uygulanan kuvvetin büyük olup kaplamayı delerek direkt olarak malzemeye etki ettiği gözlemlenmektedir. Bu nedenle mikro sertlik ölçümleri de yapılmış olup bilgiler doğrultusunda mikro sertlik değerleri dikkate alınarak grafik oluşturulmuştur.

Her numune üç kez ölçülmüş olup, kaplama cinsinin oluşturduğu etkinin grafik ile karşılaştırması Şekil 4.2’de verilmiştir.



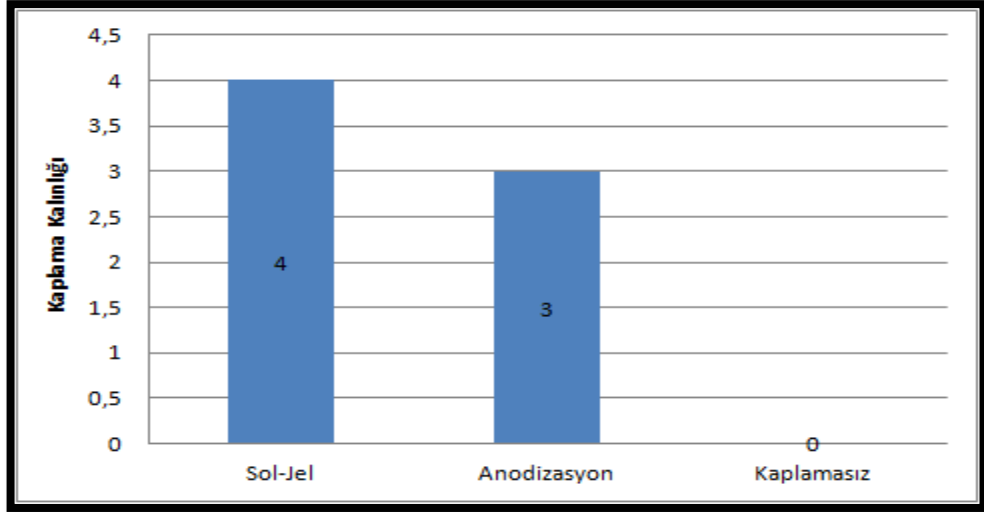
Şekil 4.2: Kaplama Cinsine Bağlı Mikro Sertliklerin Grafik İle Karşılaştırılması

#### 4.3 Kaplama İşlemlerinin Malzeme Kalınlığına Etkisi

Genel olarak malzemeler kaplandıktan sonra mikron boyutlarında olsa da malzemenin kalınlığında değişim gözlemlenir. Bu değişim özellikle havacılık gibi dar tolerans istenilen parçalarda isterlerin karşılanması adına önem arz eder. Ayrıca malzemede oluşan kaplama kalınlığı korozyon performansı ile doğrudan orantılıdır.

Malzemede oluşan kaplama kalınlıkları, malzemenin kalınlığına ve kütlesine kimyasal kompozisyonuna, yüzey pürüzlülüğüne kimyasal işlem süresine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yapılan kalınlık ölçümleri sayesinde kaplanan malzemenin korozyona, mekanik aşındırıcılara, kimyasallara karşı kullanım ömrü belirlenir. Aynı zamanda kaplama kalınlığının elektriksel ve ısıl iletkenliğe de etkisi vardır.

Kaplama cinsine göre kaplama kalınlığının grafik karşılaştırması Şekil 4.3'de verilmiştir.



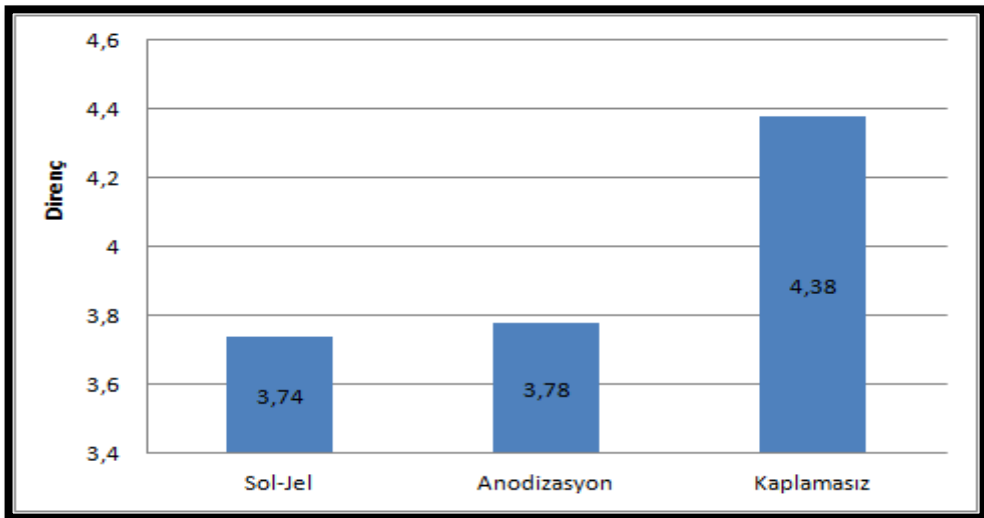
Şekil 4.3: Kaplama Cinsine Göre Kaplama Kalınlığı Grafik Karşılaştırılması

#### 4.4 Kaplama İşlemlerinin Elektriksel Özelliklere Etkisi

Titanyum elektriksel özellikleri bakımından, zayıf bir iletken ve elektrik direnci yüksektir. Bizim uyguladığımız kaplama çeşitlerine göre iletkenliği ölçüldüğünde bütün kaplamaların tamamen yalıtkan olduğu gözlemlendi.

Malzemede oluşan direnç, malzemenin kalınlığına ve kaplama cinsine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yapılan direnç ölçümleri sayesinde kaplanan malzemenin elektriksel direnci belirlenir. Aynı zamanda kaplama cinsinin elektriksel iletkenliğe de etkisi vardır.

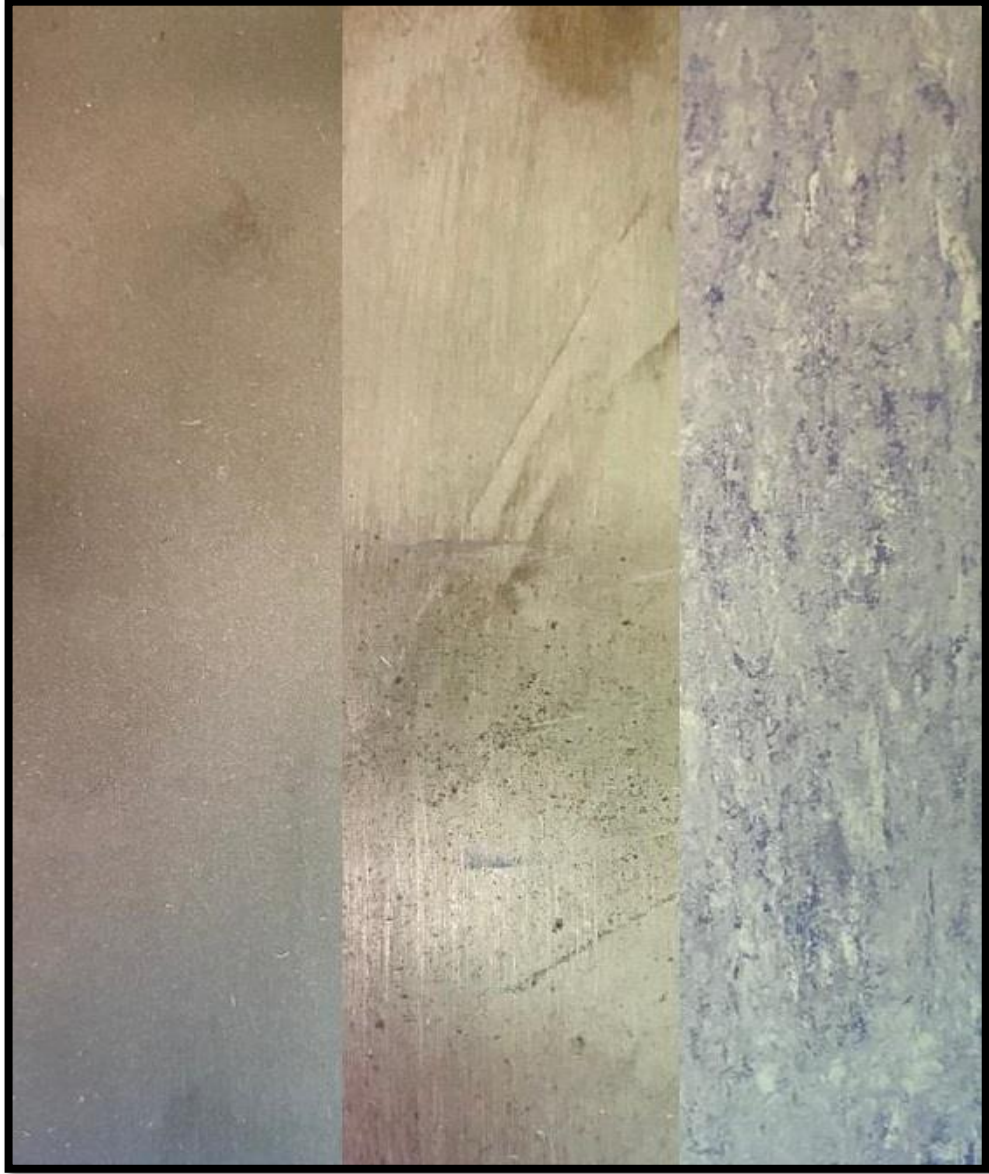
Kaplama cinsine göre kaplama direncinin grafik karşılaştırması Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4: Kaplama Cinsine Göre Direnç Grafik Karşılaştırılması

#### 4.5 Kaplama İşlemlerinin Korozyon Dayanımına Etkisi

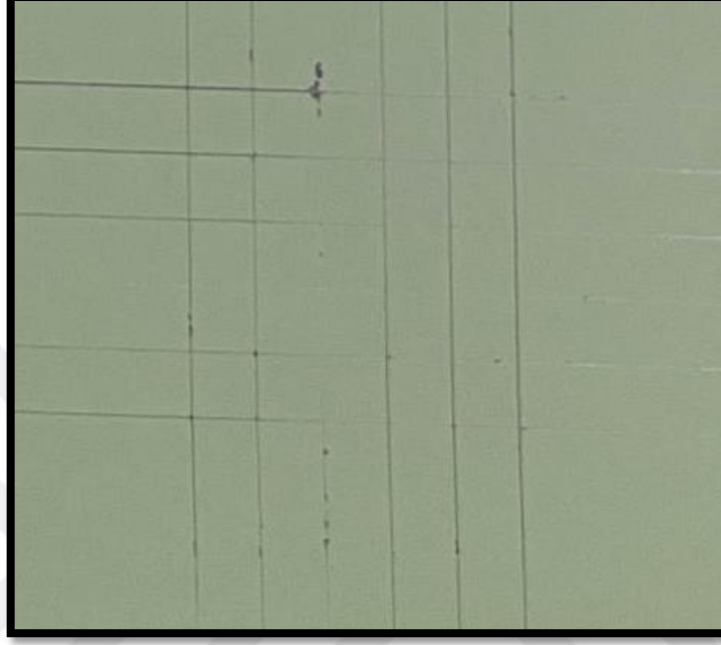
Titanyum malzemelerin korozyon direnci diğer metallere nazaran yüksektir. Ancak yinede Havacılık sektörü gibi imalat parçalarının, korozyona sık maruz kalan bölgelerinde korozyon dayanımını arttırmak için kaplamalar kullanılır. Korozyon direnci tespiti için bu çalışmada tuz testi yapılmıştır. Tuz testi yaklaşık 1200 saat sürmüştür ve sonuçlar karşılaştırılması için görüntüler alınmıştır. Kaplama cinsine göre tuz direnci karşılaştırması Şekil 4.5’de verilmiştir.



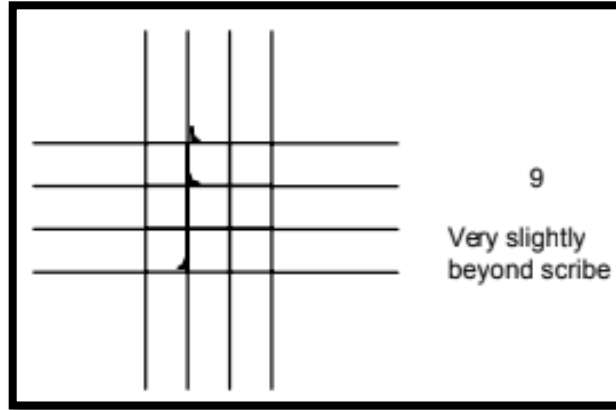
Şekil 4.5: Sol-Jel-Kaplamasız-Anodizasyon Tuz Testi Karşılaştırılması

#### 4.6 Kaplama İşlemlerinin Adezyon Performansına Etkisi

Kuru ve çizikli kuru olarak yapılan adezyon testinde bant çekildikten sonra kaplamalı numunelerde herhangi bir kalkma gözlemlenmemiştir. Kaplamasız yüzeyde çizikli kuru yapılan testte bir miktar kalkma gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6: Çizikli Kaplamasız Numunede Görülen Çok Az Kalkma

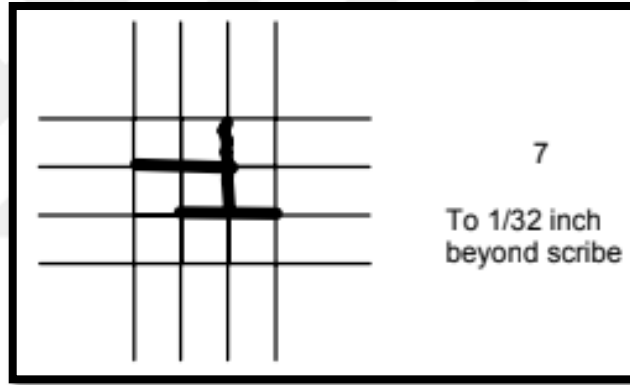


Şekil 4.7: Çizikli Kaplamasız Numunenin Sınıflandırma Seçimi

Çizikli yaş ve yaş adezyon testi için en çok kalkma olan numune sınıflandırılması ve resimi aşağıda verilmiştir;



**Şekil 4.8:** Kaplamasız Numunenin Yaş Çizikli Adezyon Testi Sonrası Görüntüsü



**Şekil 4.9:** Çizikli Kaplamasız Numunenin Islak Adezyon Testi Sınıflandırma Seçimi  
Çizikli yaş adezyon testine göre bantta kalan astar artıklarının görüntüsü aşağıda verilmiştir;



**Şekil 4.10:** Kaplamasız Numuneden Çekilen Bant Üzerinde Kalan Astar Artıkları



**Şekil 4.11:** Sol-Jel Kaplamalı Numuneden Çekilen Bant Üzerinde Kalan Astar Artıkları



**Şekil 4.12:** Anodizasyon Kaplamalı Numuneden Çekilen Bant Üzerinde Kalan Astar Artıkları

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada titanyum test kuponlarının anodizasyon, sol-jel yöntemleri ile kaplanmasında, kaplamasız bir numuneye göre korozyon dayanımı, mekaniksel özellikleri, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertliği üzerinde nasıl sonuçlar ortaya çıkardığı deneyler ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda ulaşılan veriler aşağıda verilmiştir.

Kaplamanın korozyon üzerindeki etkileri;

- Titanyum malzemenin kaplamasız olanı 1200 saat sonunda tuz testinden etkilenmeye başlamıştır.
- Titanyum numunelerin hiçbirinde test boyu paslanma gözlemlenmemiştir.
- Test numunelerinin kaplamalı olanlarında herhangi bir pullanma, çatlama veya paslanma görülmemiş olup testi başarıyla geçmiştir. Dolayısıyla her iki kaplamanın da korozyon direncinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- Titanyum malzemenin kaplamasız olanı tuz testinden etkilenmeye başladığı anda test sona erdirilmiş olup , diğer numunelerde herhangi bir korozyon belirtisine rastlanmamıştır.
- ASTM B 117'ye göre yapılan bu testten sonra, test kuponları oda sıcaklığında saf su ile yıkanıp, tuz belirtileri giderilmiş ve ardından hava ile kurutulmuştur. Tespit edilen bulgulara göre korozyon direnci zaten yüksek olan titanyum numuneler kaplama ile korozyon direnci ciddi derecede arttırılmıştır.

Kaplamaların mikro sertlik üzerindeki etkileri;

- Sol-Jel ile kaplanan numunenin sertliği diğerlerine nazaran büyük ölçüde etkilenmiştir.
- Anodizasyonda azalan kaplama sertliği, sol-jel kaplamada artmıştır.
- Yapılan deneyler sonucunda en yüksek değerdeki mikro sertliğe kumlama işleminde etki ettiği düşünülmüştür.

- Deneyleer sonucunda kaplama işleminin değışmesine bağlı olarak en yüksek ve en düşük mikro sertlik değeri; Anodizasyonlu numune için 291 HV 0,5 ve 331 HV 0,5 , Sol-Jel için 464 HV 0,5 ve 470 HV 0,5 , kaplamasız için 350 HV 0,5 ve 355 HV 0,5' dir.

Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri;

- Yapılan kaplama işlemleri sonucunda yüzey pürüzlülüğü sol-jel kaplamadan doğrudan etkilenmiştir.
- Deneyleerde ölçüm aralığının artması ile birlikte hata payını azaltmak için üç değeri alınmıştır. Bu değeriğe göre anodizasyonun yüzey pürüzlülüğüne etkisi önemsizken sol-jel kaplamada bu etki artmıştır.
- Deneyleerde sol-jel uygulanmadan önce sol-jel kaplamanın numuneye etki edebilmesi için kullanılan kumlama ve shot peen gibi yöntemler yüzey pürüzlülüğüne öneli ölçüde etki etmektedir.
- Kaplama işlemlerinde anodizasyon kaplamaya göre sol-jel kaplamanın yüzey pürüzlülüğüne etkisi daha çok hissedilmiştir.
- Belirlenen kaplama işlemleri sonucunda numunelerden alınan en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla sol-jel kaplamalı test kuponunda 0,772  $\mu\text{m}$  ve 0,983  $\mu\text{m}$ , anodizasyon kaplamalı test kuponunda 0,305  $\mu\text{m}$  ve 0,292  $\mu\text{m}$ , kaplamasız test kuponunda 0,120  $\mu\text{m}$  ve 0,113  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

Kaplamaların elektriksel özellikler üzerindeki etkileri;

- Yapılan ölçüm işlemleri sonucunda tamamen yalıtkan bir kaplama elde edilmiştir.
- Titanyumun elektrik iletkenliği düşük olduğu için yarı iletken olarak kabul edilirse numunelerimiz için yalıtkan dileyebiliriz.
- Direnç değeri sol-jel ve anodizasyon için düştüğü gözlemlenip 3,74 m $\Omega$  ve 3,78 m $\Omega$  ölçülürken kaplamasız numunede 4,38 m $\Omega$  olarak ölçülmüştür.

Kaplamaların adezyon performansı üzerindeki etkileri;

- Kuru ve çizikli kuru olarak yapılan bant testine göre kaplamalı numunelerde herhangi bir kalkma gözlemlenmemiştir. Buradan da anlaşıldığına göre yapılan kaplamalar adezyon performansına olumlu yönde etki etmiştir.

- Yaş ve çizikli yaş adezyon testine göre çekilen bantlar incelendiğinde adezyon performansı en düşük olan kaplamasız olup çok fazla astar kaldırdığı görülmektedir. Sol-jel kaplamalı numuneden anodizasyon kaplamalı numuneye göre daha az astar kalkmıştır. En yüksek adezyon performansı sol-jel kaplamada olduğu tespit edilmiştir.
- Sol-jel kaplamada kaplamadan önce yapılan kumlama işlemleri sayesinde tutunma yüzey alanı artmış aynı zamanda sol-jel oluşumunda yüzeyde parçacıklı bir kaplama olduğu için adezyon performansına olumlu yönde etkisi olmuştur.
- Anodizasyon kaplamada yüzeyde porlu tüp şeklinde bir yapı oluştuğu için adezyon performansı kuvvetli şekilde artmıştır.

## 5.2 Öneriler

Havacılık sektöründe en fazla kullanılan malzemelerden biri olan titanyum malzemelerin kullanımında karşılaşılan sorunların başında yüzey pürüzlülüğünün istenen değerlerde olmaması, korozyon dayanımı faktörünün yüksek olması, dar toleranslar, malzemenin hafif olması gibi çeşitli müşteri isterlerine yanıt verilmesi gelmektedir. Talaşlı imalatı yapılmış titanyum malzemenin fizyolojisine bağlı değerlerinin önemli bilgiler verdiği görülse de malzemenin müşteri kriterlerinde ve kullanılacak olan bölgeye göre uygun kaplama çeşidinin yapılmış olması, imalat sonucunda kaliteyi arttıracak diğer etmenlerdir. Kaplama yapılırken bulunabilecek inkluzyonlar, delaminasyonlar, çatlamlar gibi kaplama hatalarından kaynaklı oluşabilecek uygunsuzlukların kaliteyi oldukça etkileyeceği kesindir. Bu sebep ile kaplama yapılacak malzemenin öncelikli olarak belirli standartlar altında işlemlere tabî tutmak gerekmektedir. Bununla birlikte kaplamanın yapılacağı kimyasal havuzlar ve kullanılacak diğer ekipmanların da kaplama yapılacak malzemeye uygun seçilmesi önemlidir. Kullanılacağı alana uygun kaplama yöntemleri ile kaplanmış titanyum malzemenin uygun spesifikasyon ve standartlarda çok iyi sonuçlar alınabilir. Çeşitli kaplama işlemlerinde birçok kaplama methodu kullanılabilme olanağı olması da kaliteyi arttıracak bir diğer etmendir. Parça ve kaplama arasındaki bağ hem malzeme ömrünü uzatacaktır hem de yüzey pürüzlülüğü ve korozyon faktörünü iyileştirecektir. Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere kaplama çeşitlerine göre titanyum malzemenin kalite değerleri istenilen doğrultuda iyileşmiştir. Bu durumda kaplamalarda önemli olan malzemenin kullanılacağı yerlere ve müşteri

kriterlerine göre uygun standart ve kaplama yönteminin belirlenmesi bir diğerk önemli etmen olacaktır. Bu durum şöyle açıklanabilir; kozmetik bir değişiklik isteniyorsa ve korozyon dayanımı artırılması isteniyorsa anodizasyon yapılması uygun bir yöntemdir. Ancak bunun yanı sıra yüzey tamamen titanyumdan bağımsız organik bir kaplama olması ve ardından astar atılması gerekiyorsa sol-jel kaplama yapılması gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- Aktaş, Y.F.**, (2006). Termal Oksidasyon Yöntemi İle CP-Ti ve Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Modifikasyonu
- Akyol, Sedat.**, (2007). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması
- Arslan, Hale.**, (2013). Titanyum Yüzeyinde Anodizasyon Yöntemi İle TiO<sub>2</sub> Nanotüp Eldesi ve Nanotüplere Ag Katkısı
- Albayrak, Çiğdem.**, (2008). CP-Titanyumun Anodizasyonu
- Albu, S.P.**, (2012) Morphology and Growth of Titania Nanotubes Nanostructuring and Applications ( Morphology und Wachstum von Titandioxid Nanoröhren Nanostrukturierung und Anwendungen), Der Technischen Fakulted der Universited Erlange Nürnberg Dissertation,
- Brown, S.A. And Lemons, J.E.**, (1996). Medical Applications of Titanium and its Alloys.
- Brunette, D.M., Tengwall, B., Textor, M. and Thomsen, P.**, (2001). Titanium in medicine, Springer Verlag, Heidelberg.
- Balaban, Nuray.**, Titanyum ve Alaşımalarının Biyouyumluluklarının İncelenmesi
- Boyer, R., Welsch, G., and Collings, E.W.**, (1994). Meterials Properties Handbook: Titanium Alloys, Asm International, Ohio..
- Balaban, Nuray.**, (2012). Anabilim DALı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- Balaban, Nuray.**, (2007). Titanyum ve Alaşımalarının Biyouyumluluklarının İncelenmesi.
- Brooks, R.C.**, (1982). Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, ASM International, Metals Park, USA
- Baykut, S., Altun, G.**, (1989). Endüstriyel Elektrokimya, İstanbul Üniversitesi Yay. 151-157 İstanbul ,Türkiye.
- Berkem, A.R.**, (1993). Anod Olayları, Elektrokimya, İstanbul Üniversitesi Yay., 499-527, İsanbul.
- Brace, A.W.**, (2000) The Technology of Anodizing Aluminium. Metal Finishing Publications, Elsevier science Inc. Vol, 3
- Coşkun M.K.**, (2011). Biomalzeme Amaçlı Tİ-6AL-4V Alaşım Tozlarının SPS ile Sinterlenmesi ve Karakterizasyonu
- Çakir, M. C., Ensarioğlu, C.**, (2005). Titanyum ve Alaşımalarının İşlenebilirlik Etüdü, Mühendis ve Makine, Cilt: 46, Sayı: 546-547.
- Chiesa, R., Sandrini, E., Santin, M., Rondelli, G., Cigada, A.**, (2003) J. Applied Biomaterials and Biomechannics, (1), p91

- Duman, Dilek.,** (2010). Titanyum Talaşından Titanyum Karbüe Üretimi ve Sert Metal Üretiminde Kullanımı
- Duman, Dilek.,** (2010). Metalurji ve Mekanik Mühendisliği
- Delplanckle, J.L., Degrez, M.,** (1982). Surface Technology. (16) 153.
- Ensarioğlu, C., Çakır, M.C.,** (2005) Titanyum ve Alaşımalarının işlenebilirlik Etüdü, Mühendis ve Makine, 46,36-46
- Günyüz, M.,** (2007) Titanyum Alaşımalarının Mikroark Oksidasyonu, Y. Lİsans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Garcia, C., Cere, S., Duran, A.,** (2006). Bioactive coatings deposited on titanium alloys, Journal of Non-Crystalline Solids, 352, 3488-3495
- İçdem, C.,** (2007) Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımalarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu
- Jones, R.W.,** (1989). Fundamental Principles of Sol-Gel Technology, Institute of Metals, London
- Klein, L.C.,** (1988). Sol-Gel Technology For Thin Films, Fibers, Preforms, Electronics, and Specialty Shapes, Park Ridge : Noyes Publications
- Koh, W., Ku, S., Kim, Y.,** (1997). Thin Solid Films, 304, 222-224
- Levens, C., Peters, M.,** (2003) Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications, Wiley-VCH, Darmstadt.
- Lutjering, G. and Williams, C.,** (2003) Titanium, Springer- Verlag, Heidelberg.
- Levens, C., Peters, M.,** (2003) Titanium and Titanium Alloys, Wiley -VCH, Weinheim, Germany
- Matsusato, I.,** (1999) The Use of Titanium as Architectural for Constructed Buildings, (47),4.
- Putlayev, V.I.,** (2006). "Calcium phosphates - Different micromorphology, different bioactivity?", Inorganic Materials Lab Department of Chemistry Moscow State University,
- Sicakyüz, Özgür.,** (2007) Titanyum ve Titanyum Alaşımalarının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu
- Suzuki, A.,** (2000) Jpn. App. Phys., (39), 1295
- Sul, Y.T., Albrektsson, T.,** (2001) The Electrochemical Oxide Growth Behaviour on Titanium in Acid and Alcaline Electrolystes, Medical Engineering. (23), 329-346
- Surowska, B., Bienias, J., Walczak, M., Sangwal, K., Stoch, A.,** (2004). Microstructure and mechanical properties of ceramic coatings on Ti and Ti-based alloy, Applied Surface Science, 238, 288-294
- Thim, G.P., Oliveria, M.A.S., Oliveria, E.D.A., Melo, F.C.L.,** (2000), Sol-gel silica film preparation from aqueous solutions for corrosion protection, Journal of Non-Crystalline Solids, 273, 124-128
- Türhan, İ.,** (2000). TiO<sub>2</sub> ve Katkılı TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 45

- Yue, R.P. and Weatherly, G.,** (1984) The Fatigue Strength of Porous Coated Ti-6Al-4V Implant Alloy, J Biomed Mater Res, 18, pp. 1043-1058
- Yerokhi, A. L., Nie, X., Leyland A., Dowey, S. J.,** (1999) Plasma Electrolysis of Surface Engineering Surface and Coating Technology, (122), 73-93
- Zhang, W., Wang, C., Liu, W.,** (2006). Characterization and tribological investigation of sol-gel ceramic films on Ti-6Al-4V, Wear, 260, 379-386
- Xuanyong, L., Paul, KC., Chuanxian, D.,** (2004) Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys and Related Materials For Biomedical Applications, Materials Science and Engineering R 47 49-121

### **İnternet**

**Url-1** CHEMAT, <<http://www.chemat.com/html/solgel.html>>, alındığı tarih: 18.08.2021

**Url-2** TUBITAK, Bilim ve Teknik Dergisi, <<http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/biyomalzemeler.pdf>> alındığı tarih : 25.10.2021

**Url-3** <[www.yapi.com.tr/V\\_Images/arastirma/278mimaridetitanyum.pdf](http://www.yapi.com.tr/V_Images/arastirma/278mimaridetitanyum.pdf)> alındığı tarih : 08.01.2022

**Url-4** <<http://www.mta.gov.tr>> alındığı tarih: 10.02.2022

## EKLER

### Ek A: Titanyum Kuponların Tuz Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri



Şekil A.1: Sol-Jel Kaplamalı Kupon Tuz Testi Öncesi



Şekil A.2: Anodizasyon Kaplamalı Kupon Tuz Testi Öncesi



**Şekil A.3:** İşlemsiz Kupon Tuz Testi Öncesi



**Şekil A.4:** Sol-Jel Kaplamalı Kupon Tuz Testi Sonrası

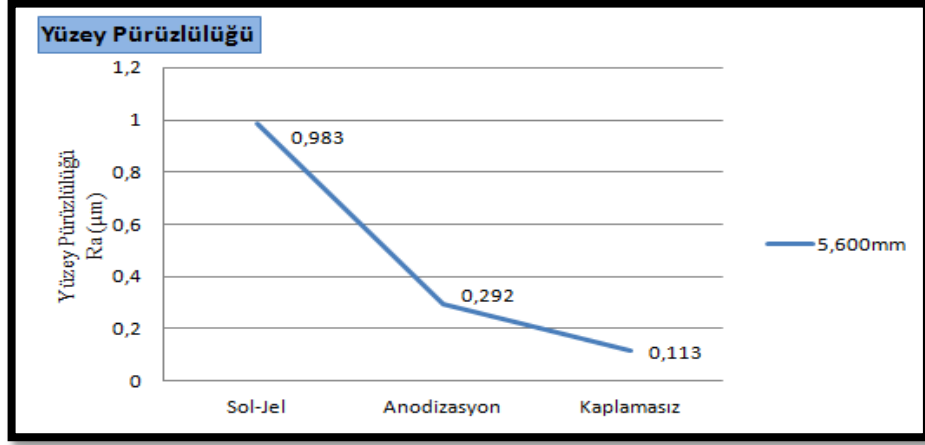


**Şekil A.5:** Sol-Jel Kaplamalı Kupon Tuz Testi Sonrası

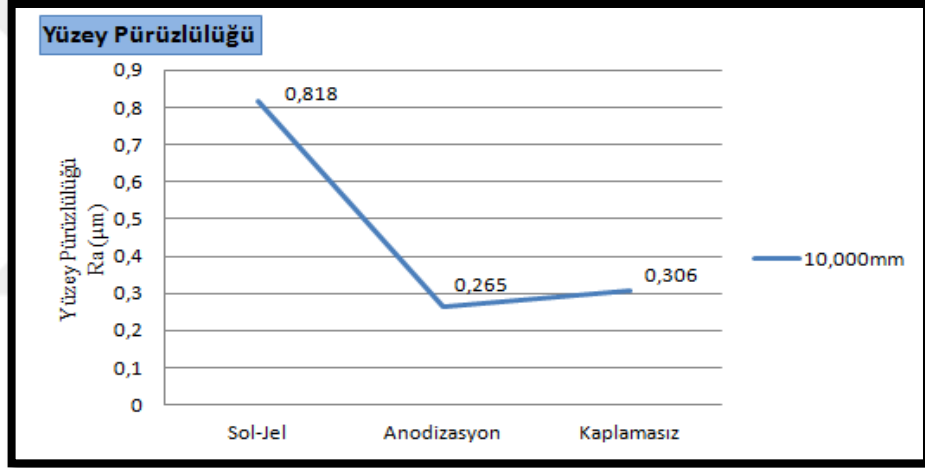


**Şekil A.6:** Anodizasyon Kaplamalı Kupon Tuz Testi Sonrası

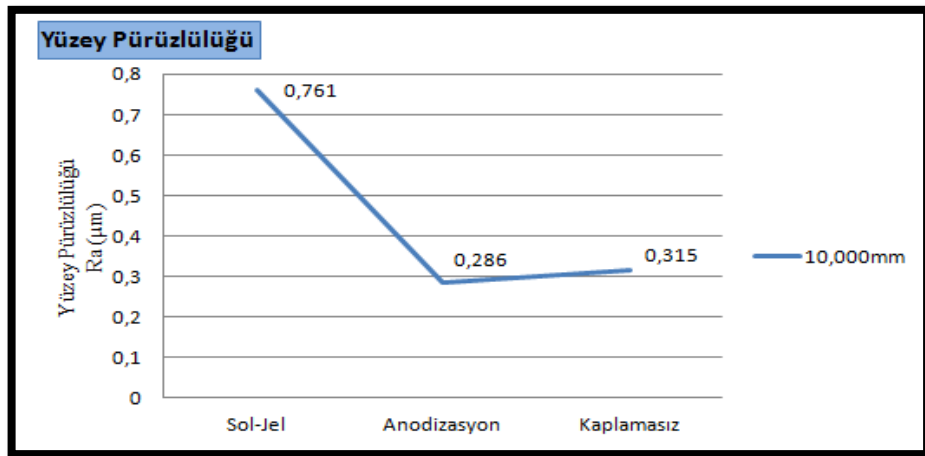
**Ek B:** Titanyum Malzemenin Kaplanması Sonra Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük, Mikro Sertlik, Sertlik, Kaplama Kalınlığı Ve Direnç Grafikleri



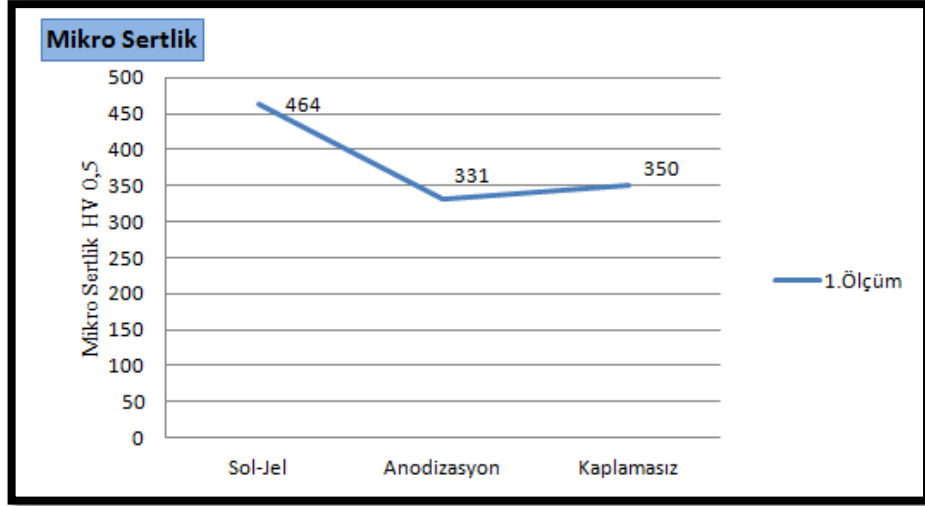
**Şekil B.1:** 5,6mm Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Grafiği



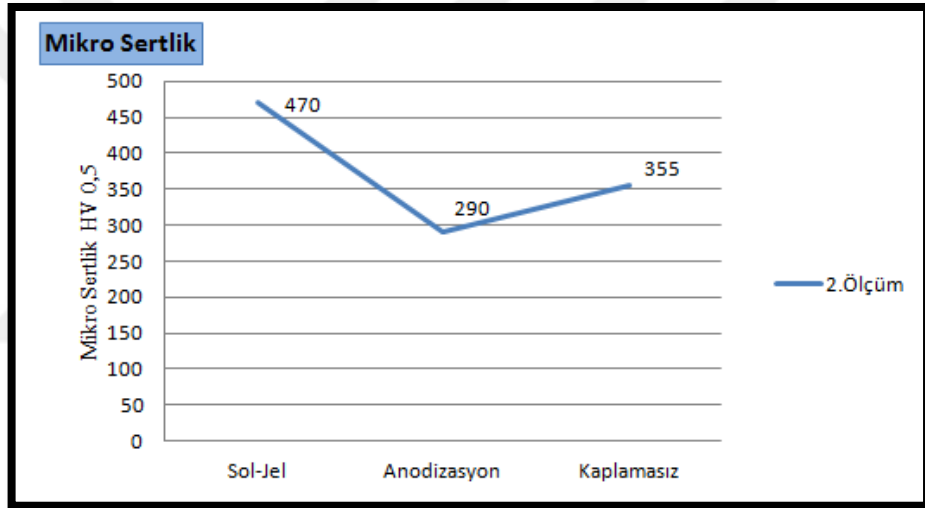
**Şekil B.2:** 10mm Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Grafiği



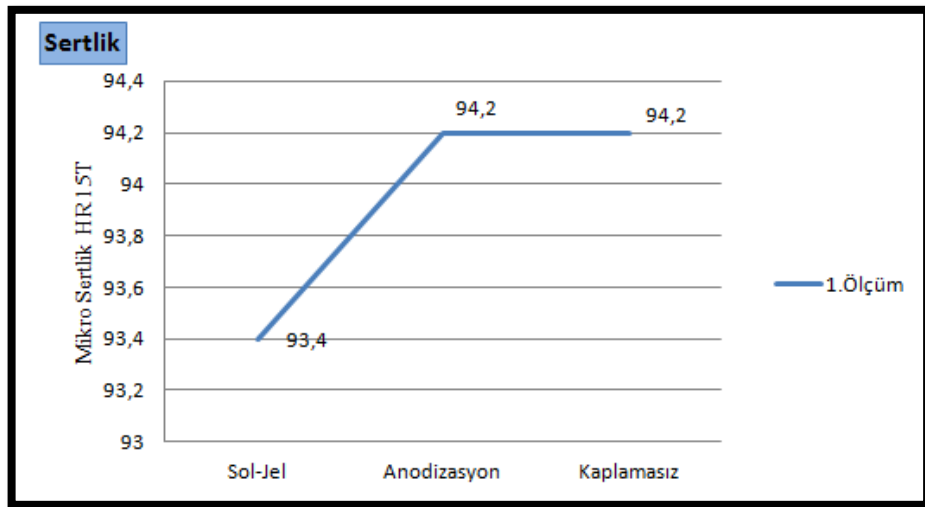
**Şekil B.3:** 10mm Yüzey Pürüzlülüğü 2. Ölçüm Grafiği



Şekil B.4: Mikro Sertlik Karşılaştırması 1.Ölçüm Grafiği



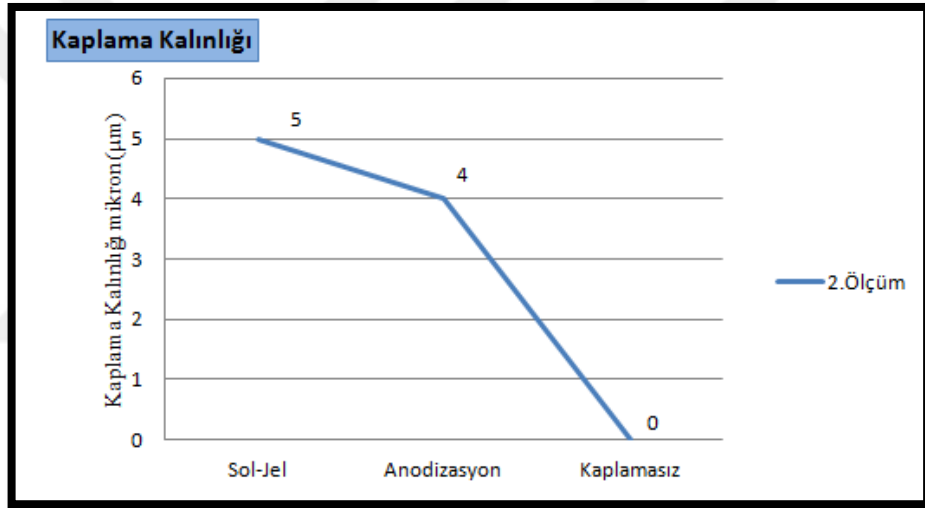
Şekil B.5: Mikro Sertlik Karşılaştırması 2.Ölçüm Grafiği



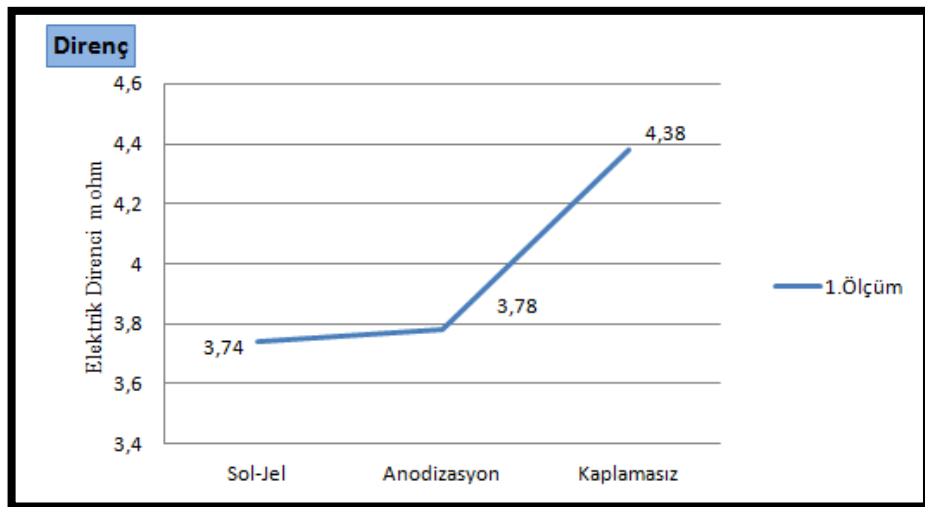
Şekil B.6: Sertlik Karşılaştırması 1.Ölçüm Grafiği



Şekil B.7: Kaplama Kalınlığı Karşılaştırması 1.Ölçüm Grafiği



Şekil B.8: Kaplama Kalınlığı Karşılaştırması 2.Ölçüm Grafiği

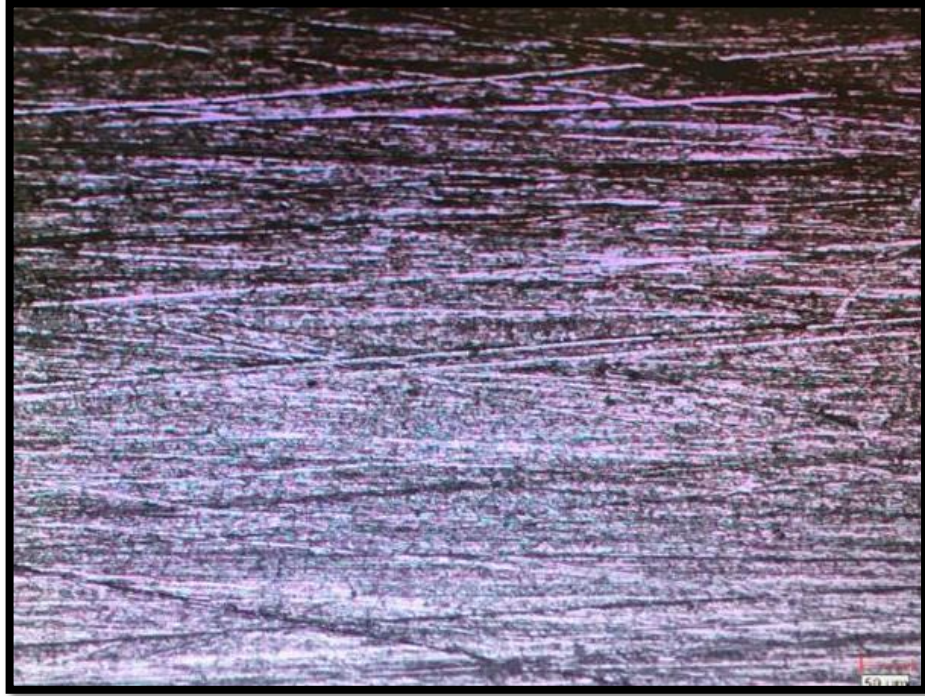


Şekil B.9: Elektrik Direnci Karşılaştırması 1.Ölçüm Grafiği

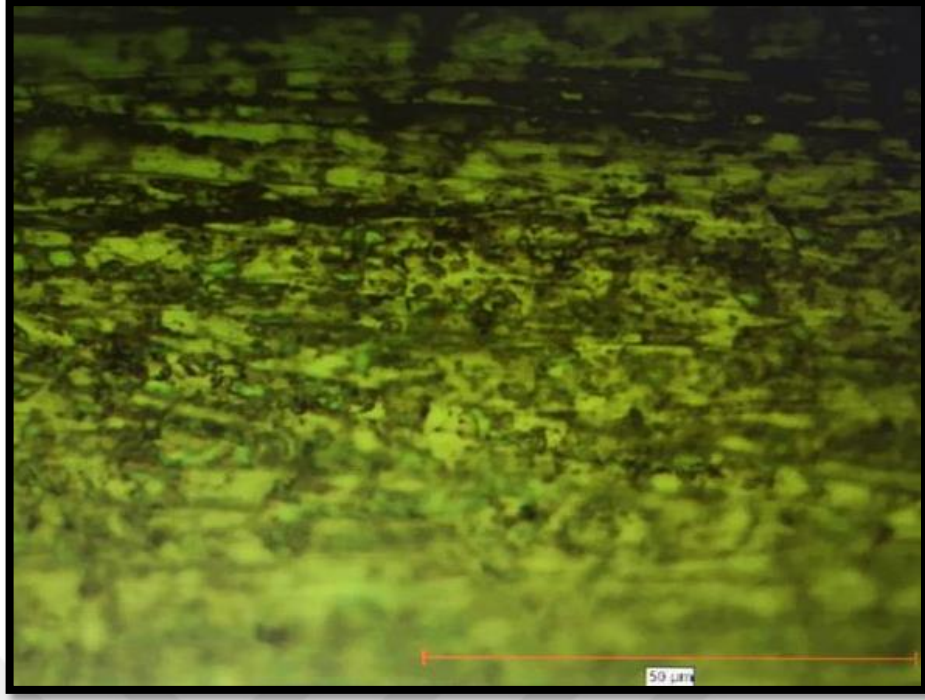
**Ek C: Titanyum kuponların Kaplanmasından Sonra Yüzeyin Son Hali İçin  
Alınan Makro Görüntüleri**



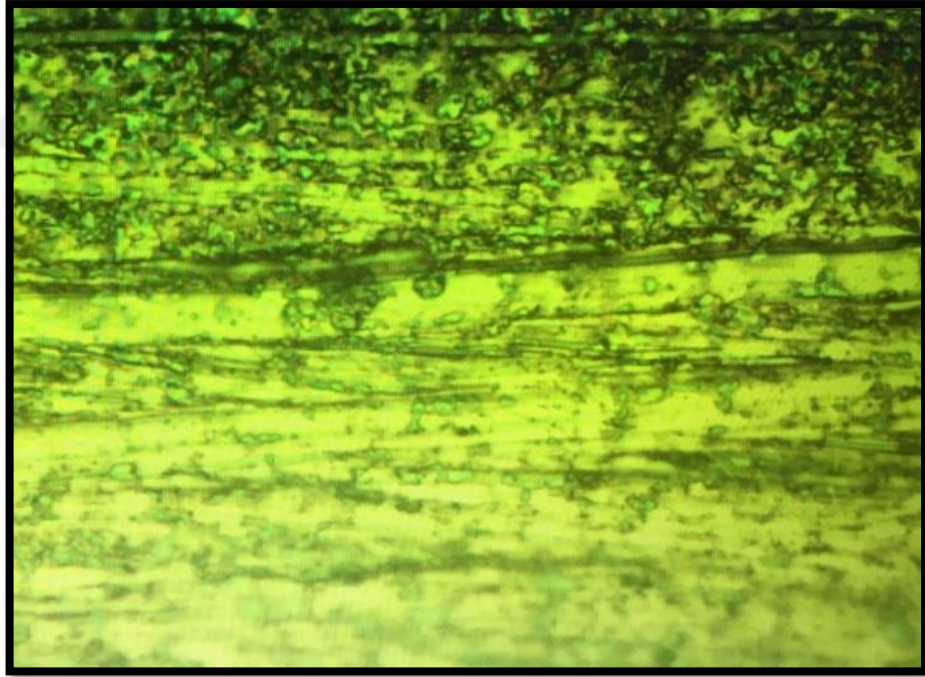
**Şekil C.1:** Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü



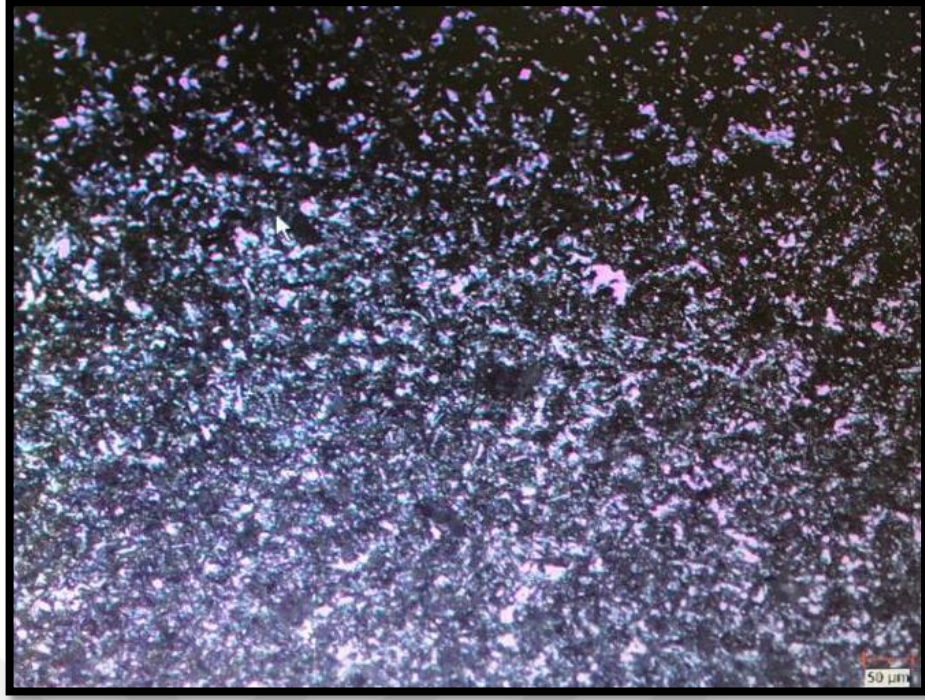
**Şekil C.2:** Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü



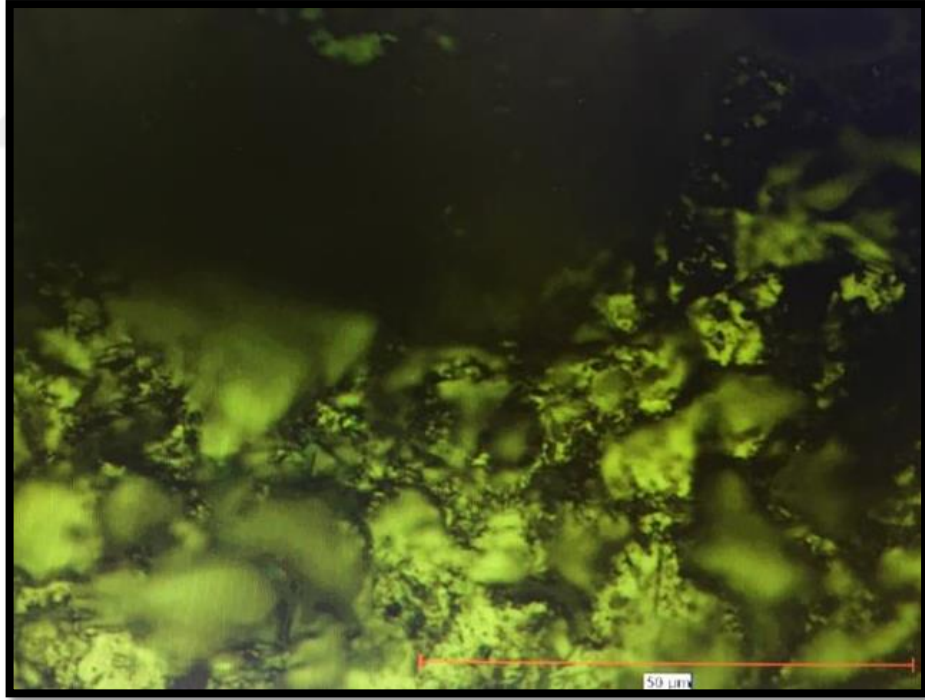
**Şekil C.3:** Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü



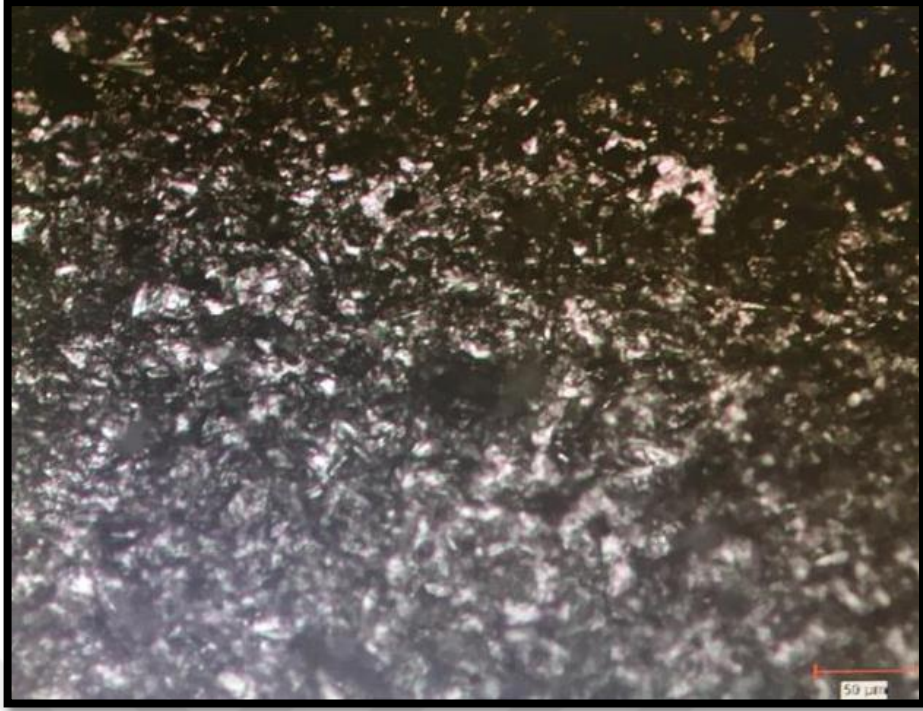
**Şekil C.4:** Kaplamasız Malzeme Yüzey Görüntüsü



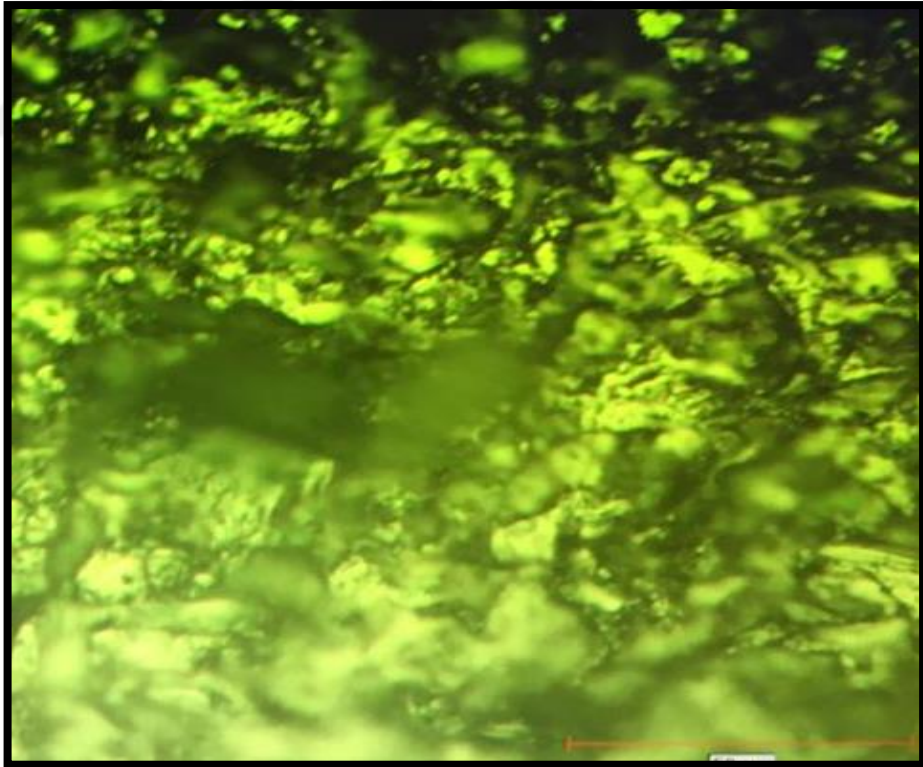
**Şekil C.5:** Sol-Jel malzeme yüzey görüntüsü



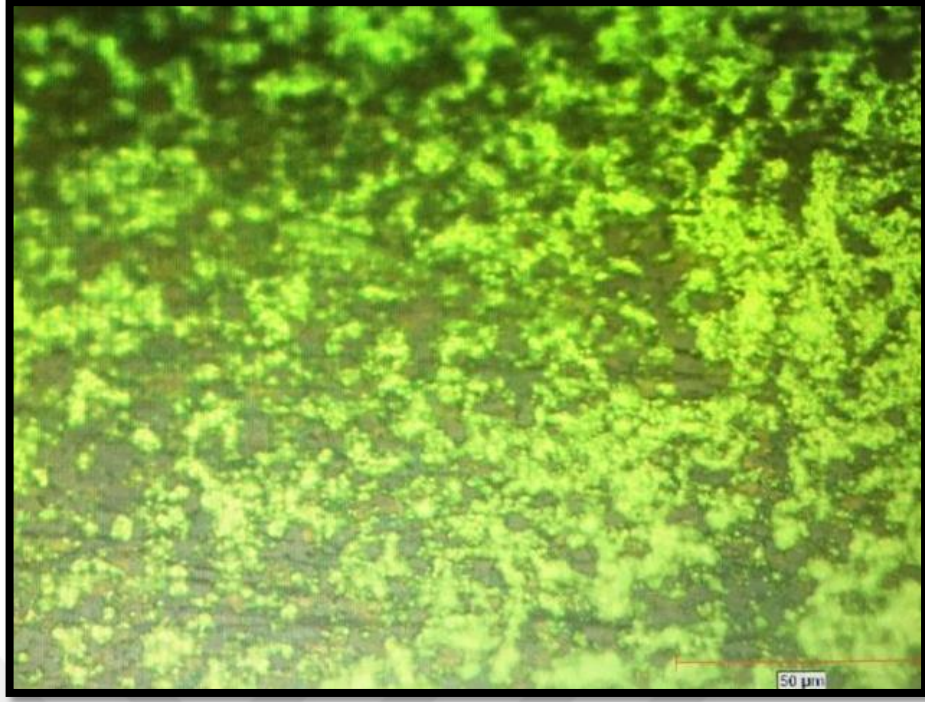
**Şekil C.6:** Sol-Jel malzeme yüzey görüntüsü



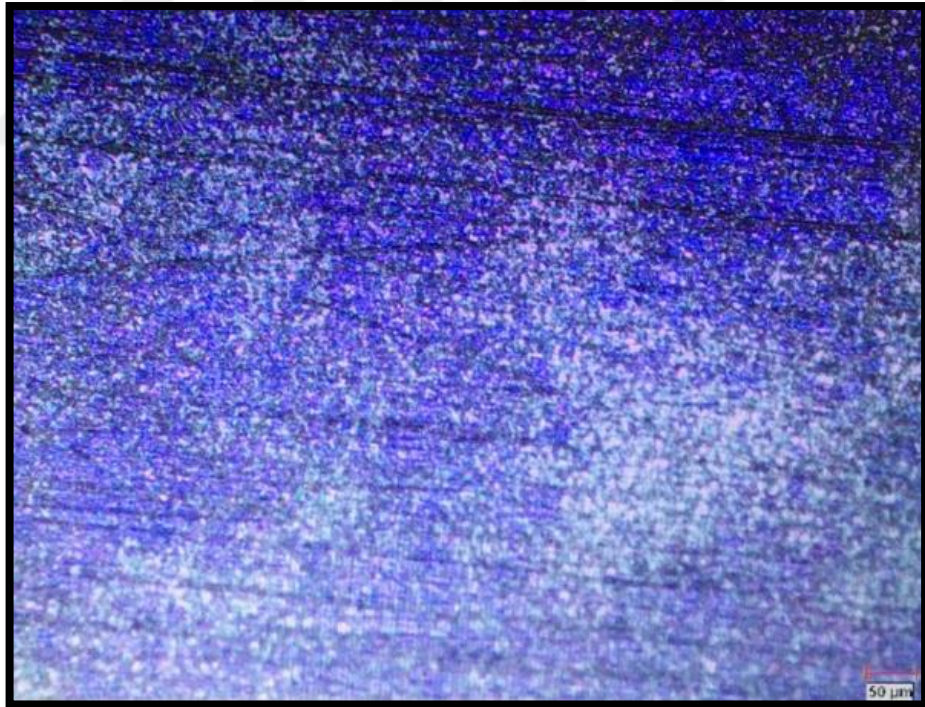
**Şekil C.7:** Sol-Jel Malzeme Yüzey Görüntüsü



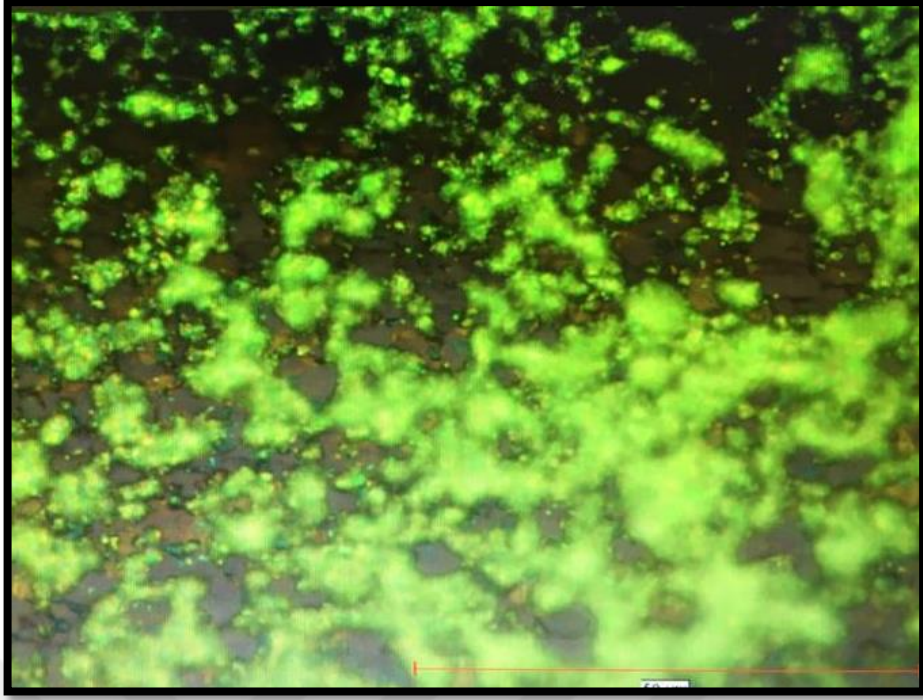
**Şekil C.8:** Sol-Jel Malzeme Yüzey Görüntüsü



**Şekil C.9:** Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü



**Şekil C.10:** Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü

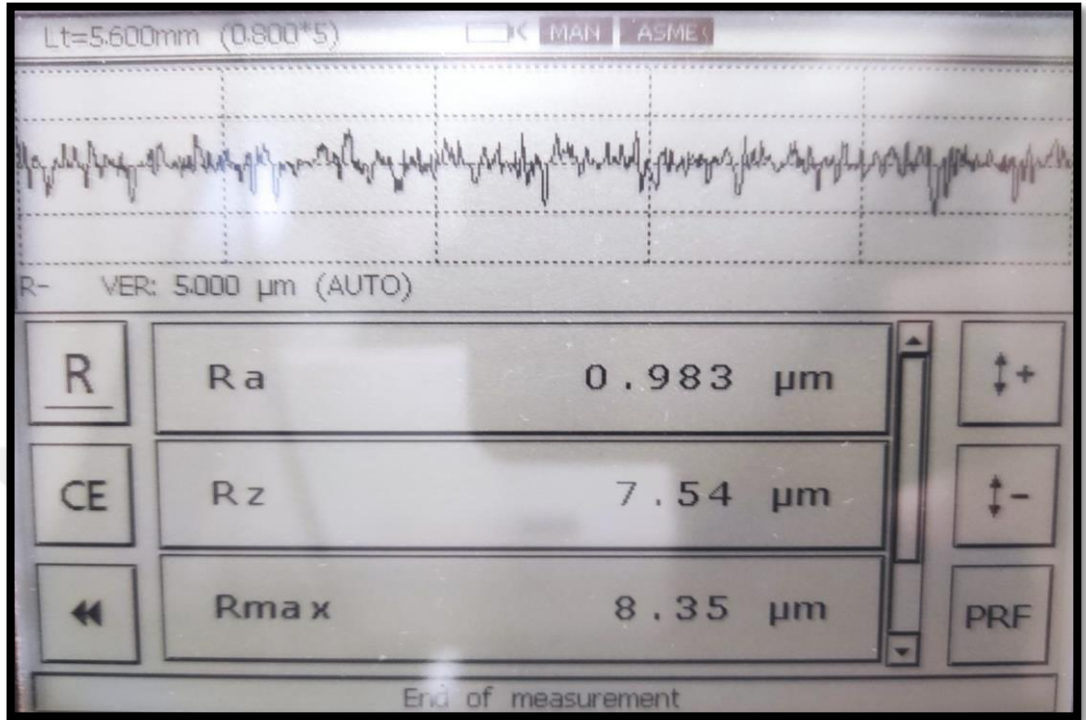


**Şekil C.11:** Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü

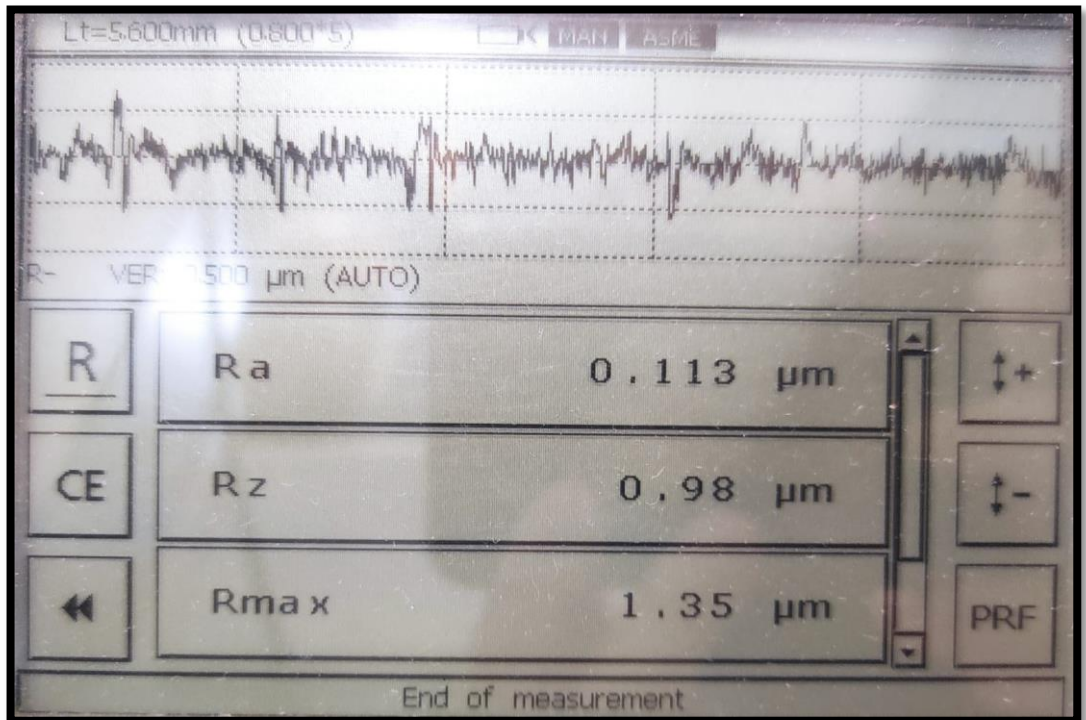


**Şekil C.12:** Anodizasyon Malzeme Yüzey Görüntüsü

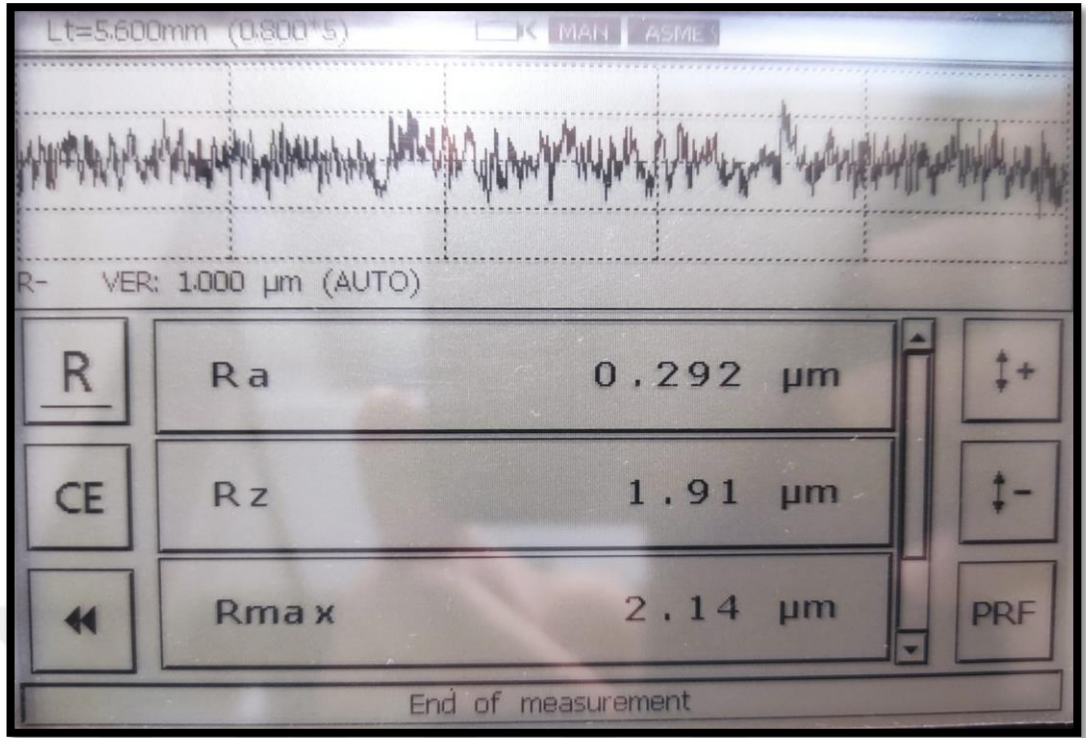
**EK D: Titanyum Kuponların Kaplanması Sonra Oluşan Yüzey Pürüzlülüğü Cihazı Ekran Görüntüleri**



**Şekil D.1:** Sol-Jel Kaplamalı Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü Görüntüsü

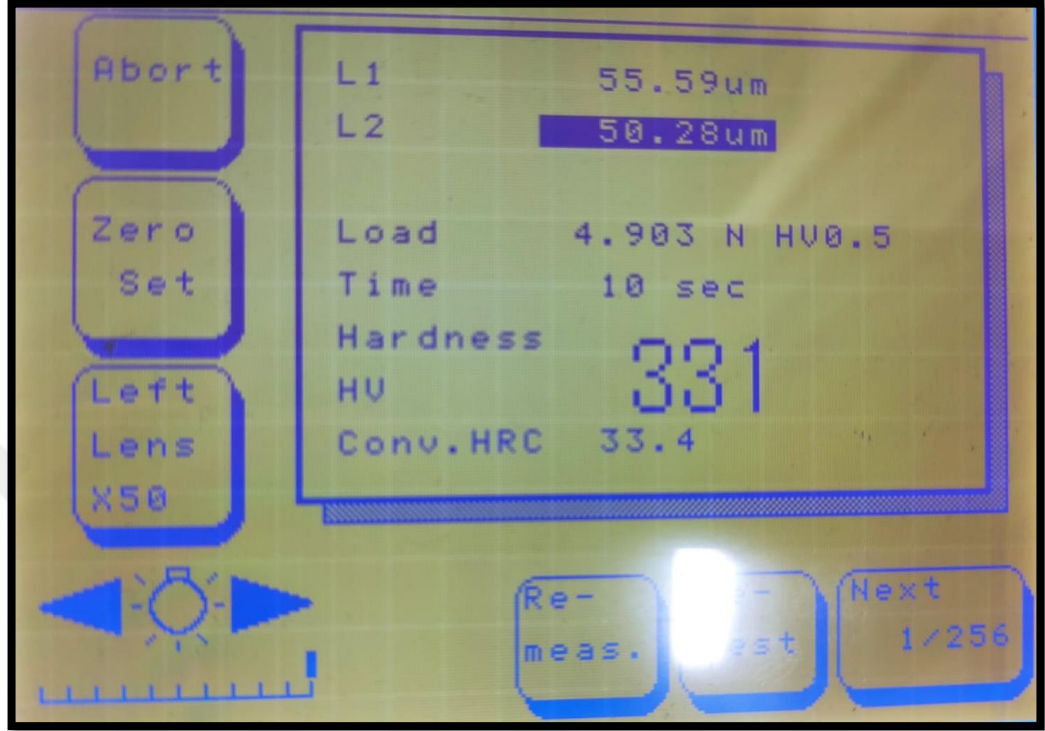


**Şekil D.2:** Kaplamasız Malzeme Yüzey Pürüzlülüğü Görüntüsü

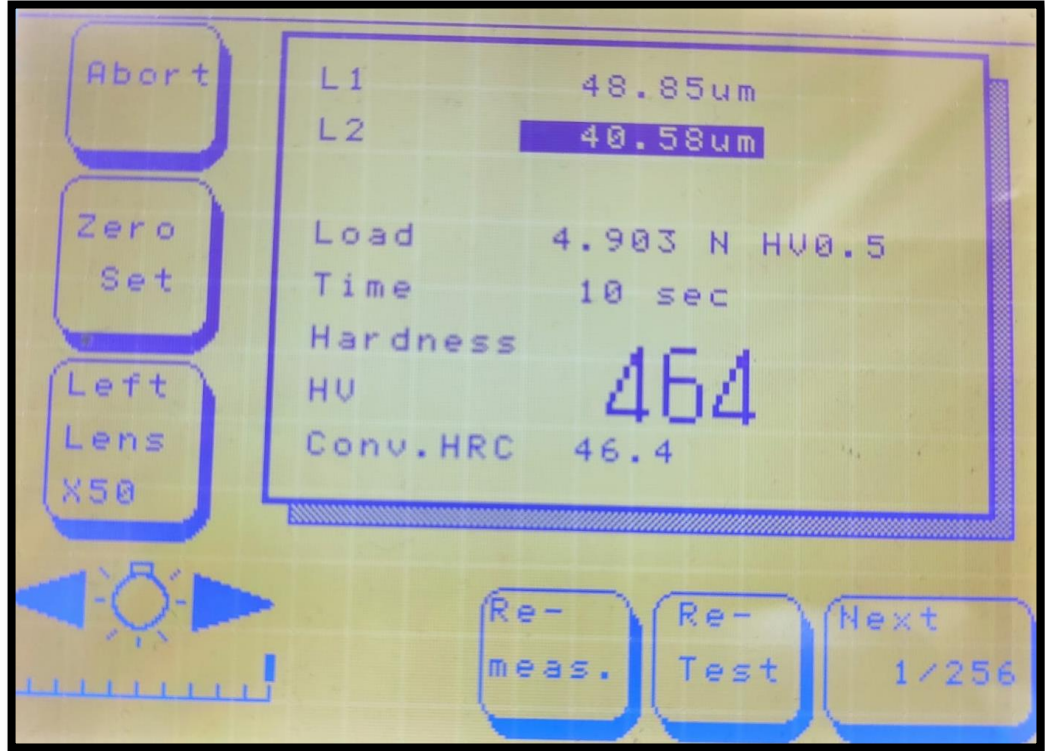


Şekil D.3: Anodizasyon kaplamalı malzeme yüzey pürüzlülüğü görüntüsü

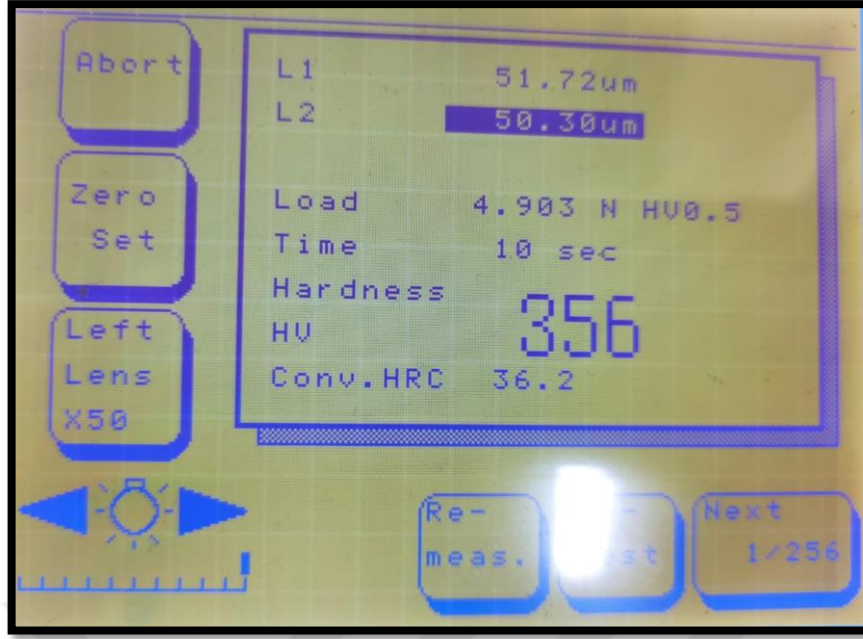
**Ek E: Titanyum Kuponların Kaplanması Sonra Oluşan Mikro Sertlik Cihazı Ekran Görüntüleri**



**Şekil E.1:** Anodizasyon Kaplamalı Malzeme Mikro Sertlik Görüntüsü

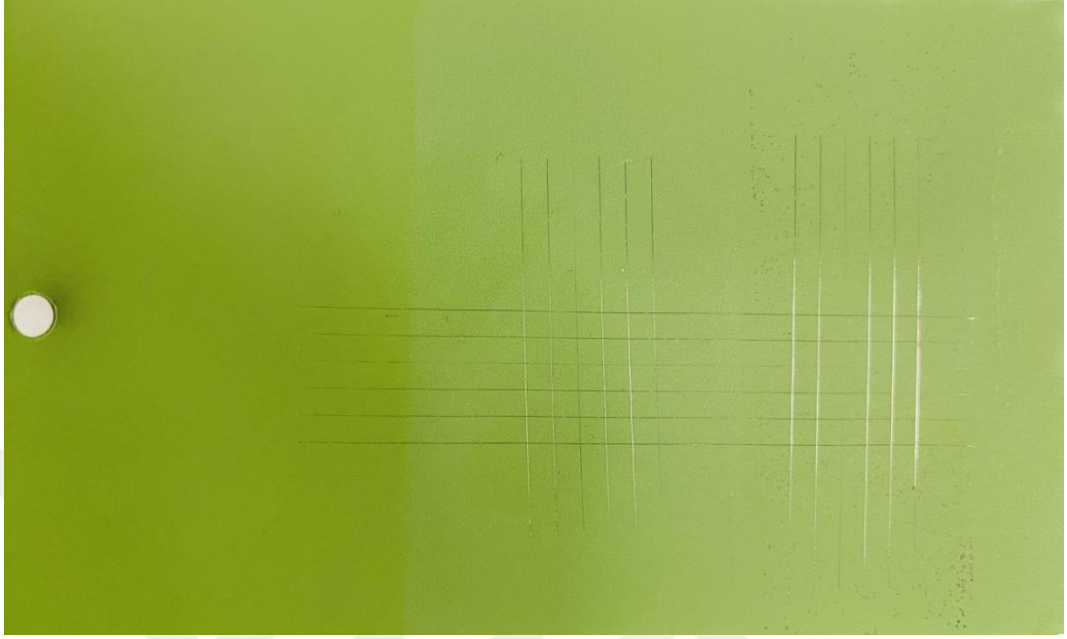


**Şekil E.2:** Sol-Jel Kaplamalı Malzeme Mikro Sertlik Görüntüsü



**Şekil E.3:** Kaplamasız Malzeme Mikro Sertlik Görüntüsü

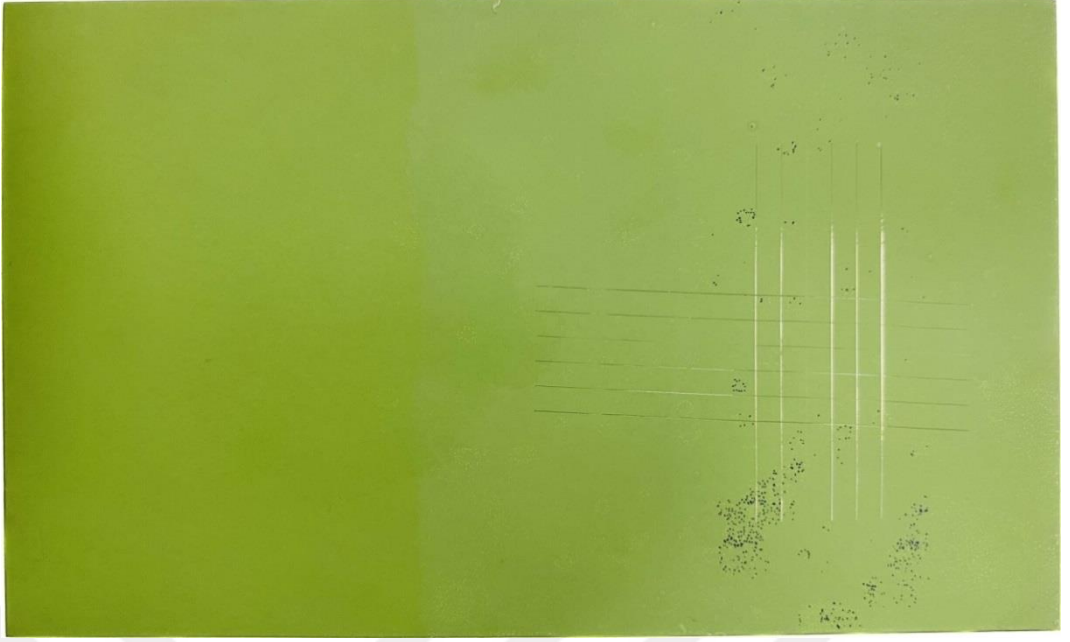
**Ek F: Titanyum Kuponların Adezyon Testinden Sonra Oluşan Yüzey Ekran Görüntüleri**



**Şekil F.1:** Sol-Jel Kaplamalı Kuponun Adezyon Testi Sonrası Görüntüsü



**Şekil F.2:** Kaplamasız Kuponun Adezyon Testi Sonrası Görüntüsü



**Şekil F.3:** Anodizasyon Kaplamalı

## ÖZGEÇMİŞ

Hulusi Kerem Gündüz

### ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : 2015, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İmalat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2020, İstanbul Gedik Üniversitesi, Savunma Teknolojileri Yüksek Lisans Programı

### İŞ DENEYİMLERİ

- 2015-2016, MP Yener Övünç Asansör İmalat Mühendisi
- 2016-2018, Kale Havacılık, NC Programlama Mühendisi
- 2018- Devam Ediyor, Kale Havacılık, Fikstür Tasarım ve İmalat Mühendisi

### YABANCI DİLLER

İngilizce