

Çağlar Ceylan\* Bahtiyar Duran Osman Furkan Koçyiğit Cem Koçer Berkay Doğan Tuğçe Hacaloğlu Cemal Merih Şengönül Bilgin Kaftanoğlu ATILIM Üniversitesi  
İmalat Mühendisliği Bölümü Ankara**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 22-11-2020

Kabul: 26-04-2021

\*Sorumlu Yazar: Çağlar Ceylan

Email: caglarceylan19@gmail.com

# Havacılık Endüstrisinde Kullanılmak Üzere Alüminyum Malzemelerin Korozyon Direncinin Arttırılması Amacıyla Yüzey Kaplaması Geliştirilmesi

Havacılık endüstrisinde yüksek oranda kullanılan alüminyum alaşımlarını korozyona karşı korumak üzere genellikle kromat (krom VI bazlı) dönüşümlü kaplama (CCC) yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak altı değerlikli kromun doğada oluşturduğu zararlı etkilerden dolayı, AB'nin REACH düzenlemeleri ile kullanımı kısıtlanmıştır. Bu çalışma ile krom +6 dönüşümlü kaplamalara alternatif olarak PVD, anodizasyon gibi yöntemlerin de olduğu kaplama çeşitleri araştırılmış ve kaplamaların korozyon dayanımıyla mekanik performansları incelenmiştir.

*Anahtar Kelimeler:* Korozyon; Alüminyum, Havacılık, Anodizasyon, PVD, Yüzey Kaplama, Yüzey Karakterizasyonu

## 1. GİRİŐ

Bu çalışmada, havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarına, altı değerlikli krom içermeyen kaplama yöntemleri ile korozyon direnci sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla gerekli literatür taramaları yapılmış ve çalışmaya yön verebilecek uygun araştırmalar baz alınarak deney planları hazırlanmıştır. Bu araştırmalardan bazı örnekler şöyledir:

Batuhan Özakin'ın yaptığı çalışmada üç farklı alüminyum alaşımının (AA 2024, AA 6061, AA 7075), üç farklı korozif ortamda gerilmeli korozyon dirençleri belirlenmiştir. Alaşımlara klor iyonları içeren asidik, bazik ve nötr ortamlarda gerilmeli korozyon deneyleri uygulanmış ve hava ortamındaki

değerlerle karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen araştırma bulgularına göre en iyi gerilmeli korozyon direnci bazik ortamda iken en düşük gerilmeli korozyon direnci asidik ortamdadır [1]. Serap Çatal tarafından yapılan çalışmadan elde edilen bilgilere göre, yapılan kaplamalarda ölçülen  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{NaCl}$ 'nin EIS diyagramları ve akım-potansiyel eğrileri incelendiğinde, 0,2 M  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  içinde 4 saat boyunca tutulan kaplamaların korunmasının, %3,5  $\text{NaCl}$ 'de 2 saat tutulan numunelerin korunmasından üstün olduğu belirlenmiştir [2]. Bu çalışmada yer alan deneysel çalışmalar, havacılık sektörü prosedürlerine ve uluslararası standartlara uygun olarak planlanmıştır. Kaplanan malzemeler ve test programı TUSAŞ'ın ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmiştir. Deneysel

çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilmiş ve Cr VI'nın yerini alabilecek en uygun kaplama yöntemi önerilmiştir.

## 2. YÖNTEMLER

Bu çalışmada, aşağıda belirtilen farklı kaplama teknikleri kullanılmıştır. Kaplanacak malzemeler TUSAŞ ile birlikte belirlenmiştir. Seçilen malzemeye aşağıdaki yöntemler uygulanmıştır.

### a) Bor Nitrür (BN) Kaplama

Korozyona karşı koruma sağlamak için sac alüminyum malzemeye bor nitrür kaplama uygulanmıştır. Bor Nitrür'ün 7 farklı allotropu bulunmaktadır. Hekzagonal bor nitrür ve kübik bor nitrür en yaygın fazlardır. Hekzagonal bor nitrür (h-BN) düşük sürtünme katsayısı, yalıtım, termal iletkenlik ve yağlama özelliklerine sahip bir malzemedir. Öte yandan, kübik bor nitrür (c-BN), üstün mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle havacılık endüstrisindeki alüminyum parçaların Cr VI kaplama uygulamaları yerine uygun bir kaplama malzemesi olarak kullanılabilir [3].

### b) Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi

Kaplama yöntemleri arasında, saçırma tekniği – bir Fiziksel Buharlaştırma Yöntemiyle Büyütme (FBYB) işlemi – düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi, çok ince kaplamalar elde edebilme imkânı, keskin köşelerde ve karmaşık geometriler üzerinde büyütme yapılabildiği için daha çok tercih edilmektedir [3]. Teknolojisi, tasarımı ve imalatı yerli olarak yapılan bu kaplama sistemi ile sanayi kuruluşlarından gelen kesici takımlar, kalıplar ve makine parçaları bu teknik ile kaplanmıştır [3].

TUSAŞ tarafından hazırlanan 2, 6 ve 7 serisi Alüminyum plakaların 3 adet farklı BN kaplama ile kaplanarak, karakterizasyon incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, karakterizasyon yöntemleri açıklanarak anlatılmıştır. 2, 6 ve 7 serisinden 3'er adet plaka bulunmaktadır.

Her seriden 1 adet plaka vakum kazanına yerleştirilmiştir. Kaplama öncesi her seriden üçer adet numune 3 farklı deney için numaralandırılmıştır ve Şekil 1'de gösterilmiştir. Alüminyum plakaların nitelikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Numaralandırılmış Al Numuneleri

Daha sonra Bor Nitrür (BN) kaplama için plakalar vakum kazanına yüklenmiştir. Kaplama öncesi görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: BN Kaplama Makinasına Al numunelerin Yerleştirilmesi

### c) Akımsız Nikel Kaplama

Akımsız nikel kaplama, herhangi bir elektrik kaynağı uygulanmadan bir alt tabaka üzerine nikel bor veya fosfor alaşımı tabakasının biriktirildiği oto katalitik reaksiyon işlemidir. Sulu bir çözelti içinde birkaç eşzamanlı reaksiyon içerir ve harici bir elektrik kaynağı gerektirmez. Metal iyonlarını serbest bırakmak için çözeltiye indirgeme ajanı eklenir ve son olarak çökelme oksidasyonla değiştirilir. Bu işlem yüzey özelliklerini geliştirdiği için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kabul görmektedir [4].

### d) Kalay Kaplama

Kalay kaplama aslında eloksal kaplama yöntemi ile yapılır. Yeni metal parçaların yüzeyindeki doğal oksit tabakasının kalınlığını arttırmak için kullanılan elektrolitik bir pasivasyon işlemidir. İyi iletkenlik ve korozyon direncine sahiptir. Ayrıca sağlığa zararlı değildir.

Kalay kaplamadan önce, alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasını temizlemek ve kaplamanın yapışmasını arttırmak için çinkolama işlemi gerçekleştirilir. Çinkolama işleminden sonra alüminyum kısım, sülfürik asit ve kalay içeren banyoya daldırılır ve kaplama uygulanır. Kaplama hızı ve kalınlığı verilen akışa göre değişir. Yaklaşık 2 adet kalay plaka 1A / s elektrik akımı ile kaplanır [5].

### e) Nikel Kaplama

Nikel elektro kaplama, ince bir nikel tabakasını metal bir nesneye elektro kaplama tekniğidir. Korozyon direnci, kaplamanın kalınlığına ve kaplamadan önceki yüzeyin durumu dâhil olmak üzere diğer faktörlere bağlıdır. Minimum kalınlık gereksinimleri, nikelin altın veya diğer kaplamalardan önce alt kaplama olarak kullanıldığı 5 µm'den, uzun süreli koruma veya şiddetli korozif koşulları içeren uygulamalar için 125 µm veya daha fazlasına kadar değişebilir. [6].

### 3. KARAKTERİZASYON SONUÇLARI

#### 1. BN KAPLAMALARIN KALINLIK ÖLÇÜMÜ SONUCU

Kalınlık ölçümleri tamamen optik ölçüm yapan, Filmetrics F20 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir numune üzerinden 10 ölçüm alınmış olup, ortalamaları Tablo 1'de verilmiştir. Cihazın ölçüm hassasiyeti 15nm-70µm'dir.

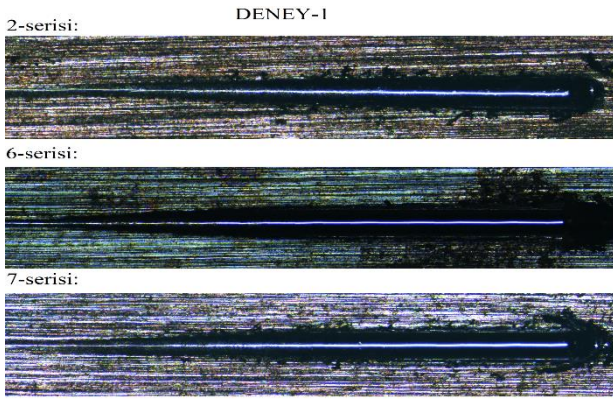
Tablo 1: Optik Kalınlık Ölçüm Sonuçları

	AISI D2	2024-serisi	6061-serisi	7075-serisi
DENEY-1	149,4nm	1496nm	1405,3nm	841,1nm
DENEY-2	861nm	1667,7nm	1445,5nm	1038,7nm
DENEY-3	699,9nm	1165,4nm	1310,9nm	853,5nm

#### 2. YAPIŞKANLIK TESTİ SONUCU

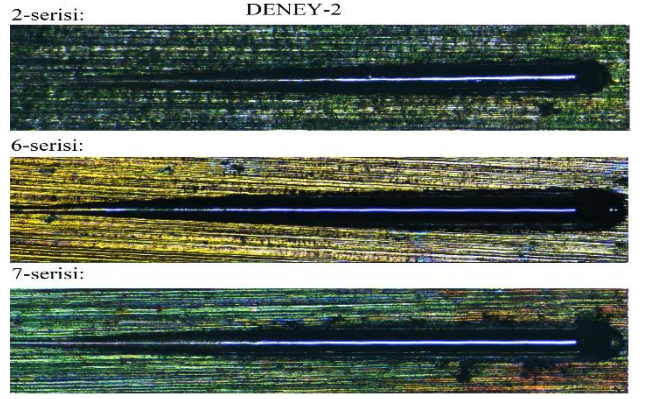
##### 2.1. BN Kaplamaların Yapışkanlık Testi Sonuçları

Yapışkanlık testleri CSM Macro Scratch Device (CSM Çizik Testi) ile yapılmıştır. Çizik testi boyunca uygulanan yük 0,5N'dan başlayıp 150N'a kadar çıkmaktadır. Çizik testi için 200 µm yarıçapında, Rockwell elmas uç kullanılmaktadır. Numune üzerinde oluşan çizik 3mm olup, elmas uç 6mm/dk. hızla ilerlemektedir. BN kaplamalı alüminyum örnekler için 0,5N'dan başlayarak 30N'a kadar yük uygulanmıştır. Her deney için yapılan çizik testi görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir [7].

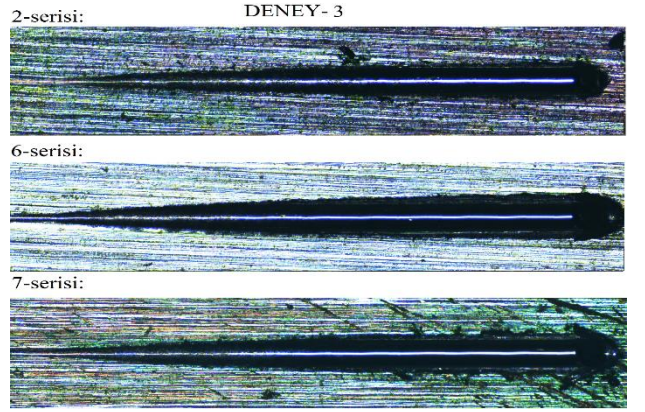


Şekil 3: 1.Parametre BN kaplamaların çizik test görüntüsü

Çizik testi sonucunda Deney-1'de 6 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir. Deney-2'de daha temiz bir çizik testi sonucu elde edilmiş olup, 7 serisinde biraz çatlama olmuştur. Deney-3'te ise, 2 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir.



Şekil 4: 2.Parametre BN kaplamaların çizik test görüntüsü

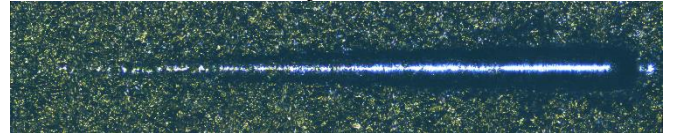


Şekil 5: 3.Parametre BN kaplamaların çizik test görüntüsü

##### 2.2. Diğer Metalik Kaplamaların Yapışkanlık Testi Sonuçları

2,4, ve 6 serisi Alüminyum üzerine çeşitli metalik kaplamalar yapılmıştır. Bunlar; Akımsız nikel, Kalay, Nikel ve Titanyum Nitrür (TiN)'dir.

##### 2024-Akımsız Nikel+Kalay:



Şekil 6: Al 2024 Akımsız Nikel+Kalay Çizik Testi Görüntüsü

Bu katmanlı kaplama örneğinde çizik testi altışı geç çizmiştir. Kaplamada yük arttıkça çatlaklar gözlemlenmiştir.

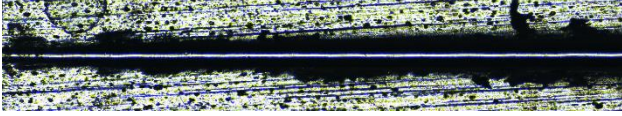
Nikel kaplama yapışkanlık testi sonucu hadde yönünde olması sebebiyle daha düzgündür.

## 2024-Nikel



Şekil 7: Al 2024 Nikel Çizik Testi Görüntüsü

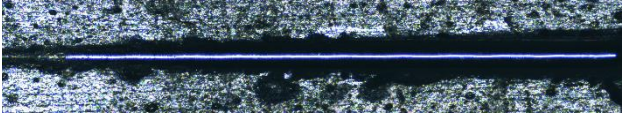
## 2024-Kalay



Şekil 8: Al 2024 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

2024 kalay. Kaplamalı örnekte kaplama yapışkanlığı son derece düşüktür. Çizik testinin başlaması ile birlikte çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

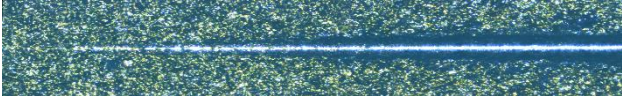
## 6061-Kalay



Şekil 9: Al 6061 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

6061 Kalay örneğinde yapılan yapışkanlık testi sonucunda çok fazla çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir.

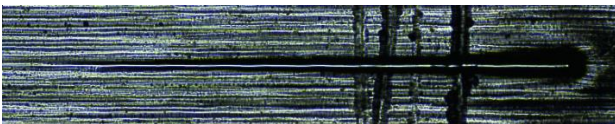
## 7075-Alaşsız Nikel Kalay



Şekil 10: Al 7075 Akımsız Nikel+Kalay Çizik Testi Görüntüsü

7075 Akımsız nikel + Kalay kaplama iyi tutunma kalitesine sahiptir.

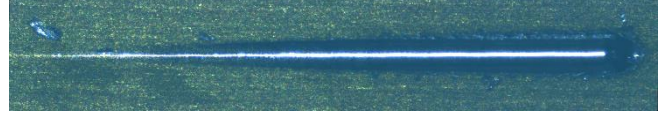
## 7075-Nikel



Şekil 11: Al 7075 Nikel Çizik Testi Görüntüsü

7075 nikel kaplamada, kaplama yapışkanlığı iyi olup altta oluşmuş yüzey bozukluğu çizik testine denk gelmiştir.

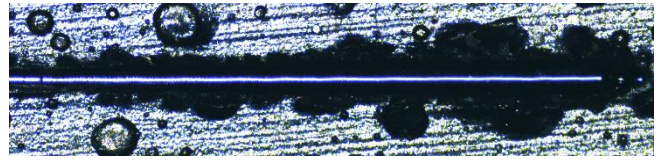
## 7075-Kalay



Şekil 12: Al 7075 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

7075 Kalay kaplama da yapılan çizik testi sonucunda kaplamada çatlaklar meydana gelmiştir. İyi bir yapıştırıcı kalitesine sahiptir. Uygulanan kuvvet yükseldiğinde, çatlaklar 2024 Kalay kaplamadaki gibi büyümmez.

## 7075-Kalay



Şekil 13: Al 7075 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

7075 Kalay kaplamada çok sayıda çatlak meydana gelmiştir.

## 4. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI

### 4.1. BN Kaplamalı Örneklerin Korozyon Testi Sonuçları

Boyutları 320x120 mm olan numunelere, tuz püskürtme ünitesinde sabit durması için 2,5mm çapında delikler açılmıştır. Hazırlanan test numuneleri ASTM B117'ye göre Korozyon Testine tabi tutulmuştur [8]. Bu test ile numuneler 4 saat, 16 saat ve 24 saat tuzlu çözeltiye maruz bırakılarak korozyon direncine verdiği tepkiler incelenmiştir.

BN kaplamaların 4, 16 ve 24 saatlik korozyon test sonucunda numunelerde çok sayıda çukur ve korozyon çatlakları meydana gelmiştir. Testler, 35° 6.5'lik pH aralığında %5'lik NaCl çözeltisi ortamında gerçekleştirilmiştir [8]. Testten sonra numuneler çeşme suyu ile durulanmıştır.

Tablo 2: BN kaplamaların korozyon test sonuçları

Malzeme	Kaplama Türü	Kod	4 saat	16 saat	24 saat
7075-T6	Bor Nitrür-1.parametre	7-1B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Bor Nitrür-2.parametre	7-2B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Bor Nitrür-3.parametre	7-3B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Bor Nitrür-1.parametre	6-1B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Bor Nitrür-2.parametre	6-2B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Bor Nitrür-3.parametre	6-3B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Bor Nitrür-1.parametre	2-1B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Bor Nitrür-2.parametre	2-2B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Bor Nitrür-3.parametre	2-3B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi

Örneğin: Malzeme: 7075-T6, Kod adı: 7-1B

Tablo 3: Metalik kaplamaların korozyon test sonuçları

Malzeme	Kaplama Türü	Kod	4 saat	16 saat	24 saat
6061-T6	Titanyum Nitrür(PVD)	6-TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Akımsız Nikel+ Titanyum Nitrür (PVD)	7 AN+ TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Akımsız Nikel+ Titanyum Nitrür (PVD)	2- AN+TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Akımsız Nikel	7-AN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Titanyum Nitrür	2-TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi

Tablo 4: Metalik kaplamaların korozyon test sonuçları

Malzeme	Kaplama Türü	Kod	4 saat	16 saat	24 saat
7075-T6	Titanyum Nitrür(PVD)	7-TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Nikel Kaplama	2-N	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Nikel Kaplama	6-N	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Nikel Kaplama	7-N	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Kalay Kaplama	2-Tin	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Kalay Kaplama	7-Tin	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi

## 5. SONUÇ

Havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarında görülen korozyon türleri araştırılmış ve kullanılan kaplamalar çerçevesinde korozyonu önlemek için alınan önlemler değerlendirilmiştir. Yapılan çizik testlerine göre; BN kapamalar için Yapışkanlık testi sonucunda Deney-1'de 6 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir. Şekil 3'te verilmiştir. Deney-2'de daha temiz bir çizik testi sonucu elde edilmiş olup, 7 serisinde hafif çatlama olmuştur. Şekil 4'te verilmiştir. Deney-3'te ise, 2 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir. Şekil 5'te verilmiştir. Metalik kaplamalar için 2 Serisi Alüminyum üzerine yapılan kaplamaların yapışkanlığı çizik testi ile ölçülmüştür. 7 serisi Alüminyum üzerine yapılan kaplamaların çizik testleri sonucunda en kötü yapışkanlığa sahip kaplama Kalay iken, Nikel ve Kalay kaplamaların çizik testleri hemen başlamasına rağmen mikroskop görüntülerinde çizimin çok dar ve temiz bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Çizik görüntüleri Şekil 11, 12, 13 'te verilmiştir. TUSAŞ ile birlikte Korozyon Testleri deneyleri yapılmış ve uygun olan kaplama çeşitleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar; havacılık endüstrisi yöntemlerine ve uluslararası standartlara uygun olarak BN kaplamaların korozyon testine dayanıklı olmadığını göstermiştir. Diğer metalik kaplamaların 4 saatlik korozyon testinden sonra 16 saatlik bir test sonucunda üzerlerinde korozyon çatlakları meydana geldiğini, Al 7075 üzeri Kalay Kaplama 16 saatlik deney sonucunda korozyon direnci göstermiş fakat 24 saatlik test sonucunda üzerinde korozyon çatlakları ve çukurları

meydana geldiğini göstermiştir. Kalay kaplama numuneye tutunma konusunda başarılı değildir ancak korozyon direncinde 16 saatlik bir başarı elde etmiştir.

## **SURFACE COATING DEVELOPMENT FOR INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM MATERIALS FOR AVIATION INDUSTRY**

Aluminum alloys are one of the highly used materials in aviation industry and their treatment against corrosion generally includes a chromate (Cr VI-based) conversion coatings (CCC). However due to their negative effect on environment, hexavalent chromium use is limited by REACH regulations of EU. In this study, we explore alternative coating methods like PVD, anodization and others which do not contain Cr VI. In this study as an alternative to Cr IV coatings we explored different coating methods like PVD and anodization techniques to protect the aluminum alloys against corrosion and various tests are conducted to evaluate the performance of coatings and their resistance against corrosion.

**Keywords:** Corosion; Aluminum; Aviation; Anodization; PVD; Coating Surface, Surface Characterization.

## **TEŞEKKÜR**

Yazarlar, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., ATILIM Üniversitesi BOREN Bor Kaplamaları Yetkinlik Merkezi'ne ve Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne, deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve öğretim görevlisi Dr. Şakir BAYTAROĞLU'na sağladığı destek için teşekkür ederler.

## **KAYNAKÇA**

1. Özakın, B. Alüminyum Alaşımlarının Farklı Ortamlarda Gerilme Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Makina Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014), 36-53.
2. Çatal, S. Fosforik Asit Eloksal Yöntemi İle Alüminyum Yüzeyinde Oksit Tabakasının Geliştirilmesi, Kimya Bölümü, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007), 66-68
3. Şengönül M, Durgun İ, Dökmetaş N, Kalkan H, Kaftanoğlu B. Bor Nitrür Kaplamanın Kaynak Çapaklarının Metal Aparat Yüzeylerine Yapışma Davranışına Etkisi, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, 2018, 25-30.
4. A. McL. Aitken, Electroless Nickel Plating Processes, Paper 4 — Symposium on Nickel Deposition in the Engineering Industries, London, (1963).
5. A. F. Carreira, A. M. Alternative corrosion protection pretreatments for aluminum alloys, *CrosMark*, 2017.
6. Rose I., Whittington C., *Nickel Plating Handbook*, Nickel Institute, Brussels, 2014
7. Metal Forming Center of Excellence-Atılım University, Ankara, TURKEY.
8. ASTM B117-19, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019,