

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIMSIZ NİKEL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY YANIT
METODU YARDIMIYLA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem DİNÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AKIMSIZ NİKEL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN
KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY YANIT
METODU YARDIMIYLA İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem DİNÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Hasan ALGÜL

ŞUBAT 2025

İrem DİNÇ tarafından hazırlanan “AKIMSIZ NİKEL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY YANIT METODU YARDIMIYLA İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 03.02.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : **Doç.Dr. Harun GÜL**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Dr.Öğr.Üyesi. Hasan ALGÜL (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr. Mehmet UYSAL**
Sakarya Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “AKIMSIZ NİKEL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY YANIT METODU YARDIMIYLA İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(03/02/2025).

İrem DİNÇ





Aileme ve sevdiklerime ithafen...



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım süresince daima bana destek olup yol gösteren ve süreç boyunca bana hep sabır ve anlayışla yaklaşan danışman hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Hasan Algül'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezde yapılan çalışmalarda beni gerek maddi gerek manevi desteklediklerinden dolayı TÜBİTAK ve TÜBİTAK BİDEB'e teşekkür ederim.

Araştırmacı bursiyer olarak görev aldığım TÜBİTAK 122M023 nolu Akımsız Nikel Kompozit Kaplamaların Yapay Zekâ Yöntemleri Kullanılarak Hedeflenen Kaplama Özelliklerine Dayalı Banyo Türü ve Parametrelerinin Belirlenmesine Yönelik Hibrit Model Geliştirilmesi" başlıklı projeye katkılarından ötürü teşekkür ederim. Benim bu projede görev almamı destekleyen Sayın hocalarım Prof. Dr. Ahmet ALP'e, Doç.Dr. Mehmet UYSAL'a ve Arş.Gör. Sezer TAN'a teşekkürü borç bilirim.

Laboratuvar olanakları konusunda yardımlarından dolayı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü ile Sakarya Üniversitesi Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi (SARGEM) yönetici ve araştırmacılarına teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim ve proje çalışmalarım boyunca benden manevi desteklerini eksik etmeyen değerli dostlarım ve aynı zamanda meslektaşlarım Y. Müh. Fatma Sena TUNCA'ya, Ahmet Talha SEVİNÇ'e, Seda EĞRİ'ye, Arş.Gör. Ayşe Betül DEMİR'e ve Y.Müh. Figen ALGÜL'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında gerek maddi gerek manevi desteklerini esirgemedi bana her zaman güvenen canım annem Aytül DİNÇ'e, babam İsmail DİNÇ'e ve kardeşim Ecrin DİNÇ'e gönülden teşekkür ederim.

İrem DİNÇ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
1. GİRİŞ	1
2. METAL KAPLAMA YÖNTEMLERİ	7
2.1. Difüzyonla Kaplama	7
2.2. Galvanizleme	8
2.3. Emaye Kaplama	8
2.4. Termal Sprey Kaplama	9
2.5. Sol-jel Kaplama	10
2.6. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)	10
2.7. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	11
2.8. Akımlı Kaplama	11
2.9. Akımsız Kaplama	12
3. AKIMSIZ NİKEL ALAŞIM VE KOMPOZİT KAPLAMALAR	15
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
4.1. Kaplama Öncesi Yüzey Hazırlama İşlemleri	25
4.2. Farklı Parametrelere Sahip Ni-B-P-TiO ₂ Kaplamaların Üretimi	26
4.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)	30
4.4. X-ışını Kırınımı Difraktometresi (XRD)	30
4.5. Kaplamanın Sertlik Ölçümleri	32
4.6. Korozyon Testleri	33
4.7. Taguchi ve Yüzey Yanıt Metodu (RSM)	34
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	39
5.1. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ Kaplamalara Ait Kesit Ve Sem Görüntüleri	40
5.2. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ Kaplamalara Ait Xrd Grafikleri	42
5.3. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ Kaplamalara ait Sertlik Grafikleri	43
5.4. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ Kaplamalara Ait Korozyon Grafikleri	44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	59



KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
CCD	: Merkezi Kompozit Tasarım
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DMAB	: Dimetilamino Boran
EDS	: X ışını spektroskopisi
FSP	: Sürtünme Karıştırma İşlemi
HRC	: Rockwell sertlik değeri
HV	: Vickers sertlik değeri
OCP	: Açık devre potansiyeli
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
RSM	: Yanıt Yüzey Metodolojisi
SDS	: Sodyum dodesil sülfat
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-ışını Kırınımı Difraktometresi
YYY	: Yanıt Yüzey Metodolojisi



SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat
$\text{\AA}$	: Armstrong
Cm^3	: Santimetre küp
I_{cor}	: Akım yoğunluğu
L	: Litre
mg	: miligram
mL	: mililitre
mV	: Milivolt
R^2	: Güvenirlik katsayısı
t	: Zaman [dakika]
θ	: Saçılan düzlemler arasındaki açı
μm	: mikrometre



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Akımsız kompozit nikel kaplamaların korozyon direnci karakteristikleri [60].	21
Tablo 4.1. Akımsız NiBPT kaplamalarda kaplama banyosundaki farklı parametrelerin etkisinin incelendiği banyoların bileşenleri ve çalışma koşulları.	28
Tablo 4.2. Akımsız NiBPT kompozit kaplamalarda kullanılan parametreler ve seviyeleri.	28
Tablo 5.1. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kompozit kaplamalarda gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçları.	39
Tablo 5.2. Üçüncü dereceden model için yanıt değişkenlerinin ANOVA sonuçları.	46
Tablo 5.3. İndirgenmiş ikinci dereceden model için yanıt değişkenlerinin ANOVA sonuçları.	47
Tablo 5.4. Modellerin uyum istatistikleri.	47



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Akımsız nikelde akımlı nikelde göre uniform kaplama. [12].	4
Şekil 2.1. Akımsız nikel kaplamanın mekanizması [36].	13
Şekil 4.1. Akımsız kaplama öncesi Alüminyum numuneye yapılan ön işlemler.	25
Şekil 4.2. Kesilmiş(A) ve zımparalanmış(B) 6XXX serisi alüminyum altlık.	26
Şekil 4.3. Ön kaplama(zinkatlama) işlemi yapılmış olan alüminyum altlık.	26
Şekil 4.4. Akımsız NiBPT kaplama işlemleri akım şeması.	27
Şekil 4.5. Ultrasonik Karıştırıcı.	29
Şekil 4.6. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kaplama banyosu.	29
Şekil 4.7. JEOL marka JSM 6060 LV model SEM cihazının görüntüsü.	30
Şekil 4.8. X-ışını Kırınımının Çalışma Prensipleri Üzerine Şematik Gösterimi [74].	31
Şekil 4.9. XRD cihazının görüntüsü.	32
Şekil 4.10. Sertlik cihazının görüntüsü.	33
Şekil 4.11. Gamry Paracell elektrokimyasal korozyon hücresi.	34
Şekil 5.1. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kompozit kaplamalara ait SEM görüntüleri.	41
Şekil 5.2. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kaplamalara ait SEM kesit görüntüleri, a)NiBPT3, b)NiBPT5 ve c) NiBT12.	41
Şekil 5.3. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kompozit kaplamalara ait XRD analizleri.	42
Şekil 5.4. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kompozit kaplamalara ait sertlik değerleri.	43
Şekil 5.5. Akımsız Ni-B-P-TiO ₂ kompozit kaplamalara ait TAFEL eğrileri.	45



AKIMSIZ NİKEL ESASLI KOMPOZİT KAPLAMALARIN KOROZYON VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YÜZEY YANIT METODU YARDIMIYLA İNCELENMESİ

ÖZET

Birçok metal üretilebilmesine rağmen kullanıma ve işlenmeye uygun değildir. Örneğin çelik, alüminyum, bakır gibi metallerin yüzeyleri üretildikleri haliyle korozyona uğramaya müsait olup, hedeflenen amaçlar için kullanılmalarında yüzeylerinin hazır hale getirilmesi ve modifiye işlemi uygulanması gerekir. Metal kaplama endüstrisi bahsedilen hazırlama işlemlerinin uygulanmasını ve geliştirilmesini sağlar. Kaplama yöntemi olarak düşük maliyetli olması, tüm yüzeyleri dahil olmak üzere geniş ve farklı geometrik şekillerdeki malzemeleri eşit oranda kaplayabilmesi ve kullanılan diğer yöntemlere kıyasla daha basit olması gibi avantajlarından dolayı genellikle akımsız kaplama yöntemi tercih edilir.

Bu çalışma, 6xxx serisi alüminyum altlıklar üzerine şeklinde akımsız kaplama yöntemi kullanılarak Ni-B-P-TiO₂ kaplamaların geliştirilmesi ve özelliklerinin incelenmesini amaçlamaktadır.

Alüminyum alaşımları, modern endüstride oldukça büyük bir kullanım alanı kaplayan ve farklı sektörlerin ihtiyaçlarını karşılayan kritik malzemelerdir. Hafiflik, dayanıklılık, yüksek korozyon direnci ve mükemmel işlenebilirlik gibi üstün özellikleri, bu alaşımları hem maliyet olarak avantaj sağlar hem de performans açısından vazgeçilmez kılar. Alüminyum malzemeler düşük sertliğe ve düşük aşınma direncine sahip malzemelerdir. Alüminyum malzemelerinin yüzeyinde oluşan alüminyum oksit tabakaları ne kadar koruyucu olsa da bu koruyucu tabaka yetersiz kalabilmektedir. Bu tez çalışmasında akımsız kaplama yöntemi kullanılarak malzemelerin dezavantajlı bu özelliklerini geliştirmek hedeflenmiştir.

Literatür incelemesinde, çok alaşımlı nikel kaplamalar üzerine birçok çalışma bulunduğu görülürken, bor ve fosforun bir arada yer aldığı akımsız kaplamalara ilişkin çalışmaların daha sınırlı olduğu dikkat çekmektedir.

Akımsız kaplama yöntemi, elektrik akımı gerektirmeyen bir süreç olarak, üniform kaplama kalınlığı, karmaşık geometrilere uygulanabilme kabiliyeti ve yüksek korozyon direnci gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Birçok metal alaşım kaplamaya nazaran, nikel alaşımları yüksek sertlik ve aşınma dirençleri gibi avantajları sayesinde hem bilimsel hem de endüstriyel alanlar için önemli bir yere sahiptir. Yapılan çalışmada, Ni-B-P kaplamalara TiO₂ partikülleri eklenerek, kaplamanın sertlik, aşınma direnci ve korozyon performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ni-B-P akımsız kaplamalar elektronik, otomotiv, havacılık ve imalat gibi çok çeşitli sektörlerde uygulama alanı bulmaktadır. Aşınmaya karşı da üstün özelliği nedeniyle koruyucu katmanlar olarak hizmet ederek, kritik bileşenlerin ve makinelerin uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlarlar.

Kaplama proses parametrelerinin etkilerini anlamak ve optimizasyon sağlamak için Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) kullanılmıştır. RSM, proses parametrelerini belirli

bir aralıkta değiştirerek bir dizi deney gerçekleştirmeyi içerir. Bu deneylerden elde edilen veriler, daha sonra yanıt yüzeylerini temsil eden matematiksel modeller oluşturmak amacıyla kullanılır. Kullanılan modeller, faktörlerin etkileşimini ve bu etkileşimlerin sonuçlar yzerindeki etkisini görsel olarak sunar. Ayrıca, model katsayıları analiz edilerek, her bir faktörün ve etkileşimlerinin ne kadar önemli olduğu belirlenebilir.

Yapılan deneyler sonucunda, Ni-B-P-TiO₂ kaplamaların yüzey sertliği, kalınlık ve korozyon direnci açısından üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, RSM ile elde edilen matematiksel modeller, proses parametrelerinin kaplama özellikleri yzerindeki etkilerini anlamada ve ideal koşulları belirlemede başarılı bir yöntem olarak değerlendirilmiştir. Bu alışma, akımsız kaplama teknolojilerinin ileri malzeme tasarımında potansiyelini vurgulamakta ve Ni-B-P-TiO₂ kaplamaların endüstriyel uygulamalarda kullanımına ynelik yeni bilgiler sunmaktadır.



INVESTIGATION OF THE CORROSION AND MECHANICAL PROPERTIES OF ELECTROLESS NICKEL-BASED COMPOSITE COATINGS USING THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

SUMMARY

Although many metals are produced, not all of these metals have properties suitable for direct use or processing. For example, the surfaces of metals such as steel, aluminum and copper are susceptible to corrosion as their manufactured forms. In order for these metals to be used for their intended purposes, their surfaces need to be properly prepared and subjected to various modification processes. In this context, the metal coating industry plays an important role in these preparation and development processes. The electroless plating method stands out among the plating methods due to its advantages such as its low cost, its ability to coat even materials with complex geometries with uniform thickness and being a simpler process compared to other methods.

Aluminum alloys have a wide range of applications in modern industry and are among the critical materials that meet the needs of different sectors. Properties such as light weight, high strength, superior corrosion resistance and easy machinability make these materials offer significant advantages in terms of cost and performance. However, aluminum materials have disadvantages such as low hardness and low wear resistance. The choice of aluminum and its alloys as an alternative to heavier materials such as steel and copper offers significant weight savings, especially in the machinery manufacturing and construction sectors. However, although the natural aluminum oxide layers formed on the aluminum surface act as a protective barrier, in some cases this layer may be insufficient. Deterioration and corrosion of aluminum surfaces are usually caused by chemical contamination, physical factors or electrochemical reactions. These factors cause the aluminum oxide layer to be damaged and deformations to start on the surface.

In this thesis, it is aimed to improve these disadvantageous properties of aluminum materials by applying electroless coating method. Today, with technological advances, the performance criteria expected from materials have also diversified. Some of these requirements can only be met by coating methods or these methods offer more economically efficient solutions.

Within the scope of the studies, it is aimed to develop Ni-B-P-TiO₂ coatings on 6XXX series aluminum alloys using electroless coating method and to investigate the properties of these coatings in detail. 6XXX series aluminum alloys are widely preferred in engineering applications due to their superior properties such as high strength, easy formability and good castability. These properties make the use of these alloys attractive, especially in parts where durability and performance requirements are at the forefront.

Electroless plating is a process that does not require electric current and offers significant advantages such as uniform coating thickness, the ability to be applied to

complex geometries and high corrosion resistance. This method, which is widely used in industrial applications, is preferred to protect the surfaces of parts from corrosion, abrasion and other chemical effects. Electroless coating has a wide range of applications thanks to its applicability to all kinds of material surfaces. Especially coatings that offer superior wear and corrosion resistance have an important place in the industry. While the coating thickness varies depending on the immersion time, the part leaves the solution when the reaction is complete. The plating bath can be reused; the process can be continued by adding as the components of the solution decrease.

Nickel alloys are of great importance in scientific and industrial fields thanks to their advantages such as high hardness and wear resistance. The effect of the reductant used in electroless nickel coatings on the coating properties is quite significant. In this context, electroless nickel coatings are generally classified according to the type of reductant used. In coatings where hypophosphite is used as a reducing agent, phosphorus accumulation occurs in the nickel matrix and these coatings are called Ni-P coatings. When boron-containing reductants (for example, boron hydrides and amino borons) are used, boron is also reduced in the nickel matrix and Ni-B alloys are formed. Although there are many studies on multi-alloy nickel platings in the literature, studies on electroless platings where boron and phosphorus coexist are limited.

In addition, within the scope of the studies, it was aimed to improve the hardness, wear resistance and corrosion performance of the coatings by adding TiO_2 particles to Ni-B-P coatings. Ni-B-P electroless coatings have a wide range of applications in various industries such as electronics, automotive, aerospace and manufacturing. These coatings act as protective layers and increase the durability of critical components thanks to their superior wear-resistant properties. In addition, by simultaneously depositing boron and phosphorus in the nickel matrix, a ternary alloy system is formed to simultaneously improve corrosion and wear resistance. In this context, the Ni-B-P- TiO_2 coatings developed in this study are expected to contribute to engineering applications by exhibiting superior mechanical and corrosion properties.

Response Surface Methodology (RSM) was used to understand and optimize the effects of coating process parameters. RSM involves the design and execution of a series of experiments by varying the process parameters within certain ranges. The data obtained from these experiments are used to construct mathematical models representing response surfaces. These models provide a visual representation of the interactions of process factors and the effects of these interactions on the results.

Furthermore, the analysis of the model coefficients provides important information to determine the level of importance of each factor and interactions between factors on the results. Response Surface Methodology is an approach consisting of statistical and mathematical techniques used to reveal functional relationships between one or more response variables and multiple independent variables. This methodology provides a systematic evaluation process, facilitating both process optimization and the identification of effective parameters.

In this study, TiO_2 concentration, stirring speed and surfactant (SDS) concentration were selected as bath parameters for the development of electroless Ni-B-P- TiO_2 composite coatings. The fixed parameters included nickel sulfate, sodium hypophosphite, sodium acetate, lactic acid, DMAB, thiourea, coating time and temperature. Based on these parameters, 20 different experimental designs were performed using Response Surface Methodology (RSM).

Within the scope of characterization studies, the best performing samples were selected and their surface morphology (SEM), crystal structures (XRD), cross-sectional images (SEM), hardness values (HV) and corrosion resistance (Tafel analysis) were examined. NiBPT3 was selected for the best corrosion resistance, NiBPT5 for the best hardness and NiBPT12 for the best thickness.

For obtain cross-sectional SEM figures, the samples were bakalited and then sanding and polishing processes were applied. The hardness of each of these samples was measured at 5 different points of the coating and the final hardness was determined by averaging these 5 values. The hardness values of the selected NiBPT3- NiBPT5- NiBPT12 coatings were 752 HV, 768 HV and 748 HV, respectively. In NiBPT5 coating, 20 g/L TiO₂, 400 rpm mixing speed and 0.01 g/L surfactant concentration were used and a hardness value of 768 HV was obtained. It was observed that the hardness value increased as the amount of surfactant concentration, which is one of the variable parameters, decreased, while the hardness value of the coating increased as the stirring speed increased.

In order to determine the crystallographic structure of the coatings obtained within the scope of the studies, X-ray diffraction analysis was performed using CuK α ($\lambda = 1.54050 \text{ \AA}$) radiation in the range of 10-90°. According to the results of XRD analysis, with the increase in the amount of TiO₂, the ratio of TiO₂ in the coating increased and the intensity of the diffraction peaks of TiO₂ increased accordingly.

The thickness values of NiBPT3- NiBPT5- NiBPT12 were measured as 24.8 μm , 23.7 μm and 26.5 μm , respectively. While the TiO₂ powder concentration in the samples was kept constant, the stirring speed was applied at two different values, namely 200 and 400 rpm. The investigations revealed that the change in stirring speed affected the coating thickness.

When SEM images are examined, it is seen that the NiBPT5 coating is more homogeneous and uniform, which means that SDS provides more homogeneous and uniform coatings by balancing surface roughness and agglomeration in composite coatings.

In addition, platinum counter electrode and saturated calomel electrode were used as reference electrodes and Ni-B-P-TiO₂ based coating samples were used as working electrodes in potentiodynamic polarization analysis. Before the Tafel extrapolation tests, all samples were immersed in 3.5 wt% NaCl solution for 30 minutes to stabilize the open circuit potential (OCP). Tafel extrapolation tests were performed at a potential range of 100 mV to 100 mV and a scan rate of 1 mV/s. The Tafel curves and SEM images showed that TiO₂ particles with surface movement made a significant contribution to the improvement in corrosion protection.

The TiO₂ concentration ratio of experiments NiBPT12- NiBPT14- NiBPT17 are different and are 20, 5, 10 g/L respectively. Mixing speeds and SDS powder concentrations are constant. The hardness values of NiBPT12- NiBPT14- NiBPT17 were measured as 748 HV, 619 HV, 639 HV respectively and the coating thicknesses of NiBPT12- NiBPT14- NiBPT17 were 26.5mm, 14.4mm and 16mm respectively. Based on these data, it is observed that the hardness values and coating thicknesses of the materials increase as the TiO₂ powder concentration increases within the scope of this thesis.

As a result of the experiments, it was determined that Ni-B-P-TiO₂ coatings exhibited superior performance in terms of surface hardness, coating thickness and corrosion

resistance. In addition, mathematical models generated by Response Surface Methodology (RSM) were evaluated as an effective method to understand the effects of process parameters on coating properties and to determine the ideal process conditions. This study highlights the potential of electroless coating technologies in advanced material design and offers important contributions towards the use of Ni-B-P-TiO₂ coatings in industrial applications.

The electroless coating method provides a homogeneous coating of materials and offers an economical solution as the coating baths can be used more than once. Aluminum, which has limitations such as low hardness and low melting temperature, is frequently preferred in sectors such as automotive, aerospace and defense industries due to its light weight. In order to improve the properties of such materials, high hardness and high melting temperature Coating processes using TiO₂, a ceramic material with superior qualities, are considered as an effective method in terms of performance improvement.



1. GİRİŞ

Malzemelerin yüzeyleri, bulundukları ortamlarda mekanik ya da kimyasal etkileşimler sonucu aşınma ve korozyon gibi tehditlerle karşı karşıya kalmaktadır. Ayrıca, yüzeyde meydana gelen deformasyonlar kontrol altına alınmadığında, oluşan hasarlar zamanla artarak önemli ekonomik kayıplara neden olabilmektedir. Bu sebeple, kaplama teknolojilerinde yüzeyi çevresel etkilerden korumak ve malzemenin kullanım ömrünü artırmak oldukça önemlidir. Bu süreçte, uygun malzeme seçimi, daha az malzeme kullanımı, enerji tasarrufu ve yüzey mühendisliği uygulamaları öncelikli faktörler arasında yer almaktadır [1].

Alüminyum ve alaşımlarının metal ve ürün üretimi alanlarında tercih edilmesinin ardında, bu malzemelerin sağladığı üstün özellikler yatmaktadır. Hafifliği sayesinde alüminyum, özellikle havacılık endüstrisinde ve diğer ulaşım araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, çelik ve bakır gibi daha ağır malzemelerin yerine alüminyum ve alaşımlarının tercih edilmesi, makine üretimi ve inşaat sektörlerinde önemli bir ağırlık tasarrufu sağlamaktadır. Bu özellikler, alüminyumun sadece havacılık ve ulaşım alanlarında değil, aynı zamanda inşaat sektöründe de geniş bir kullanım yelpazesi bulmasını ve bu sektörlerin vazgeçilmez malzemesi haline gelmesini mümkün kılmaktadır [2].

Alüminyum, korozyona karşı yüksek direnç gösteren bir malzeme olduğu kadar hafif ve dayanıklı bir malzemedir ve bu sebeple birçok endüstriyel uygulamada yaygın şekilde tercih edilir. Alüminyum, havadaki oksijenle reaksiyona girerek yüzeyinde koruyucu bir alüminyum oksit (Al_2O_3) tabakası oluşturur. Bu tabaka, malzemenin paslanmasını engellerken aynı zamanda çevresel etkilere karşı korunmasını da sağlar. Ancak, bazı durumlarda alüminyum yüzeyinde bozulmalar ya da paslanmalar meydana gelebilir. Bu tür hasarlar genellikle kimyasal kirlenme, fiziksel etkiler veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Bu etmenler, alüminyum oksit tabakasının zarar görmesine ve yüzeyde deformasyonların başlamasına neden olur. Alüminyum malzemenin ömrünü uzatmak, çevresel koşullardan korunmasını

sağlamak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için alüminyum yüzeylerine metal kaplama işlemleri uygulanmaktadır [3,4].

Teknolojinin sürekli olarak gelişmesiyle birlikte, malzemelerden beklenen performans kriterleri de çeşitlenmiştir. Bu özelliklerin bir kısmı yalnızca kaplama yöntemleriyle sağlanabilmekte ya da bu yöntemler ekonomik açıdan daha verimli bir seçenek sunmaktadır. Kaplamalar, parçaların tokluk ve elastikiyetini kaybetmeden termal ve korozyon gibi dış etkenlere karşı korunmasına olanak tanırken, aynı zamanda yüzeyde sertlik ve aşınma direncini artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Bunun yanı sıra, kaplama işlemleri estetik ve dekoratif amaçlar için de tercih edilmektedir [5].

Akımsız metalik kaplama, metal tuzlarının çözeltisinde gerçekleşen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarıyla uygulanan, elektrik akımına ihtiyaç duymadan yapılan bir kaplama yöntemidir. Bu işlemde, yüzeyin aktif hale getirilmesinin ardından metal veya metal olmayan altlıklar, nikel tuzları içeren bir çözelti banyosuna daldırılır. Elektrik akımı kullanılmadığı için, karmaşık şekillere sahip parçalar da dahil olmak üzere tüm yüzeyler, tutarlı ve homojen kalınlıklarla kaplanabilir. Akımsız kaplama yöntemi, endüstriyel uygulamalarda, parçaların yüzeylerini korozyon, aşınma ve diğer kimyasal etkilerden koruma amacıyla yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, bu kaplamalar, yağlayıcılık, süneklik, aşınma ve korozyon direnci gibi avantajlar sağlarken, elektriksel ve manyetik özellikleri de geliştirebilir [6].

Akımsız kaplama, her türlü malzeme yüzeyine uygulanabilme özelliği sayesinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu kaplamalar, özellikle üstün aşınma ve korozyon direnci sundukları için yaygın şekilde tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, lehimleme ve sert lehimleme işlemlerinde de etkili bir çözüm sunmaktadır. Isıl işlem sonrası meydana gelen intermetalik fazlar, geleneksel elektrolitik nikel kaplamalara oranla çok daha yüksek sertlik ve direnç değerleri sunarak, korozyon ve aşınma gibi olumsuz etkilere karşı daha dayanıklı yüzeyler elde edilmesini sağlar [7].

Akımsız kaplama yöntemleri, elektrokimyasal kaplama tekniklerinden ayrılan pek çok avantaj sunmaktadır. Özellikle, karmaşık geometrilere ve keskin köşelere sahip yüzeylerde bile eşit kalınlıkta, tutarlı bir kaplama sağlama kabiliyetiyle öne çıkar. Ayrıca, akımsız kaplamalar, fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından yüksek kalite sunarak elektroliz yöntemlerine kıyasla üstün performans göstermektedir. Bununla birlikte, kaplama işlemi sırasında pH değeri, sıcaklık ve banyo bileşenlerinin kontrollü

bir şekilde değiştirilmesiyle, kaplamanın özellikleri ihtiyaca uygun şekilde optimize edilebilmektedir [7].

Akımsız nikel kaplama, metal yüzeylerine nikel iyonlarının indirgenmesi yoluyla nikel metalinin birikmesini sağlayan bir kaplama metodudur. Elektrik akımı kullanılmayan bu yöntemde, nikel iyonları otokatalitik bir kimyasal reaksiyonla metal yüzeyine kaplanır. Akımsız nikel kaplama, %88-95 oranında nikel içerir ve bu süreçte metal olmayan elementler de kaplama yapısına katılır. Fosfor gibi metal olmayan bileşenler, nikel iyonlarıyla birlikte kaplama tabakasına dahil olur ve sonuçta amorf yapıya sahip, “metalik cam” olarak adlandırılan bir tabaka oluşur. Mikro yapısına bakıldığında, geleneksel metallerde görülen taneler ve tane sınırlarının bulunmadığı görülür. Bu özelliği, akımsız nikel kaplamanın kristal yapılarındaki boşluklardan kaynaklanacak galvanik hücrelerin oluşumunu engeller. Ayrıca, elektrolitik kaplamaların aksine, akımsız nikel kaplama kendi kendini kurban eden bir kaplama değildir. Bunun yerine, yüzeyi dış etkenlere karşı tamamen izole eden bir bariyer işlevi görür. Sonuç olarak, akımsız nikel kaplamalar, dayanıklı, sert, düşük sürtünme katsayısına sahip ve korozyona karşı yüksek direnç gösteren yüzeyler oluşturur. Aynı zamanda, lehimlenebilirlik gibi ek avantajlar da sunar. Bu kaplama türü, sunduğu benzersiz faydalar nedeniyle endüstriyel alanda oldukça yaygın olarak kullanılmakta ve diğer kaplama türlerine göre birçok avantaj sağlamaktadır [8].

Akımsız nikel kaplama yöntemi, malzeme yüzeylerinde 500-600 HV (48-52 HRC) sertlik değerlerine ulaşmayı mümkün kılmaktadır. Bu kaplama türünde, yaklaşık 350°C’de uygulanan bir ısı işlem sayesinde sertlik seviyesi 1000-1100 HV (58-60 HRC) aralığına kadar çıkarılabilmektedir. Sertlik açısından sert krom kaplamayla benzer özelliklere sahip olan akımsız nikel kaplama, aynı zamanda sürtünmeyi azaltıcı doğal bir kayganlık da sağlamaktadır. Korozyon direnci gereken uygulamalarda 20-30 mikrometre kalınlık yeterli olurken, yüksek sertlik istenen parçalar için 30-40 mikrometre kaplama kalınlığı tercih edilmektedir [9].

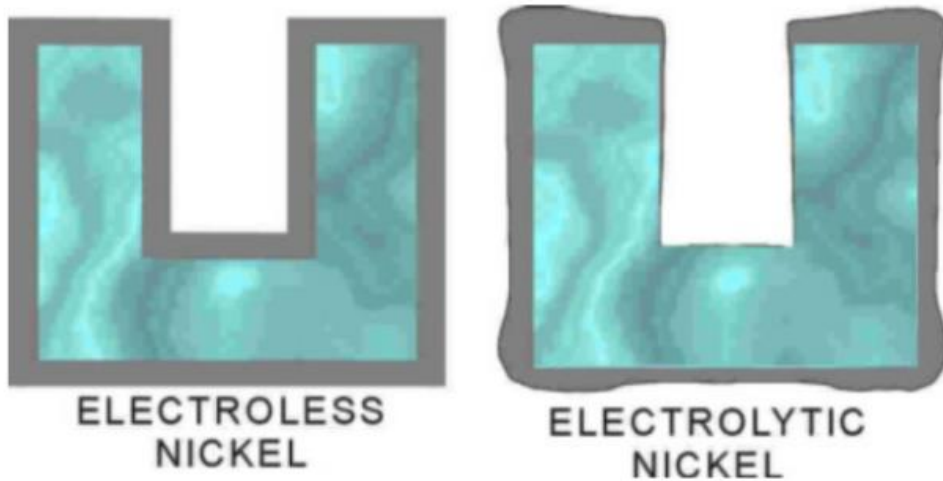
Hipofosfit ile indirgenmiş akımsız nikel kaplama prosesi, uygun maliyeti, işlem kontrolündeki kolaylık ve yüksek korozyon direnci gibi avantajları sayesinde yaygın şekilde tercih edilmektedir. Akımsız nikel-bor (Ni-B) kaplamaların tribolojik performansı, sodyum hipofosfit ile indirgenmiş çöktürelere göre genellikle daha üstündür. Ni-B kaplamalar, takım çeliği ve sert krom kaplamalara göre daha yüksek aşınma dayanımına sahip olup, elektronik sanayisinde altın kullanımının yerine

geçebilecek özellikler sunmaktadır. Ni-B kaplamaların sütunsal mikroyapısı, güçlü yapışma özellikleri ve yağlayıcıların yüzeyde etkili bir şekilde tutulması, bu kaplamaların aşındırıcı ve yıpratıcı ortamlarda oldukça verimli olmalarını sağlar [10].

Metal tuzları ekleyerek, ikili nikel kaplamaların (örneğin Ni-P, Ni-B) performansını artırmak amacıyla üçlü nikel esaslı alaşım kaplamalar geliştirilmiştir. Ni-W-P, Ni-W-B, Ni-Cu-P ve Ni-Mo-P gibi üçlü nikel kaplamalar, bu üçüncü elementlerin kaplamaların korozyon ve aşınma dayanımını artırmasıyla kimyasal kaplama süreçleriyle üretilmektedir.

Literatürde, akımsız Ni-B-P kaplamalarının üretimi ve özellikleri üzerine yapılan çalışmaların sayısının sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Ancak mevcut araştırmalar, Ni-B ve Ni-P kaplamalarına oranla Ni-B-P kaplamalarının üstün aşınma ve korozyon direncine sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Ayrıca, SiC, TiN, TiO₂, SiO₂, WC, Al₂O₃, B₄C, hBN ve elmas gibi seramik parçacıkların, nikel matrisli kompozit kaplamalarda kullanıldığını gösteren pek çok çalışma literatürde yer almaktadır. Bu araştırmalar, seramik takviyelerinin kaplamaların kimyasal ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır [11].



Şekil 1.1. Akımsız nikelde akımlı nikelde göre uniform kaplama. [12]

Akımsız kaplamalar, metal iyonları içeren bir metal tuzu, indirgenme reaksiyonlarını sağlayacak bir indirgeyici madde, kaplama hızını ve pH dengesini düzenlemek için kompleks yapıcılar, stabilizörler, tamponlayıcılar ve ıslatıcı maddeler içerir. Bu süreçler, sıcaklık ve pH koşullarının dikkatlice kontrol edilerek gerçekleştirilir [13].

Çözelti, belirli oranlarda hazırlanıp ısıtıldıktan sonra kaplanacak yüzey bu çözeltiye daldırılır. Kaplama kalınlığı, daldırma süresine göre değişir. Reaksiyonun sona erdirilmesi için parça çözeltiyi terk eder. Banyo, yeniden kullanılabilir ve çözeltinin bileşenleri azaldıkça ilave yapılarak kullanılmaya devam edilebilir [6].

Akımsız kaplama yalnızca metalik malzemelerle sınırlı olmayıp, cam ve plastik gibi malzemeler üzerinde de uygulanabilir. Ancak, bu malzemeler üzerinde yüksek kaliteli kaplamalar elde edebilmek için yüzey hazırlığı son derece önemlidir. Yüzeyin uygun şekilde hazırlanmadığı durumlarda, kaplama malzemeye tutunamayabilir veya zamanla soyulabilir. Yüzey hazırlığının türü, kaplamanın yapısını etkileyerek, dolayısıyla kaplamanın özelliklerini de değiştirebilir [14].





2. METAL KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Yüzey kaplama yöntemleri genellikle kaplanacak malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak sınıflandırılır. Ayrıca, kaplama kalınlığı ve işlem sırasında kullanılan sıcaklık aralığı gibi faktörlere göre de farklı sınıflandırmalar yapılabilmektedir. Kaplama işlemleri, elektrolitik kaplama, sıcak daldırma, sıvı metal püskürtme ve metal giydirme gibi çeşitli tekniklerle gerçekleştirilir. Endüstride genellikle kullanılan parçalar, krom ve çinko başta olmak üzere alüminyum, kobalt, bakır nikel, kalay kadmiyum ve kurşun gibi saf metaller veya bu metallerin alaşımları ile kaplanmaktadır. Bu çalışmada akımsız kaplama yöntemi ele alındığı için, diğer kaplama tekniklerine dair kısa tanımlar aşağıda verilmiştir [15]. Yüzey kaplama teknikleri ile bir malzemenin sadece yüzeyini değil kaplanacak malzemenin bileşenlerini de çevreden gelecek saldırılara karşı korunabileceği ve bu sayede yüzey kaplama tekniklerinin malzemelerin ömrünü uzatılabileceğinin farkına varılması önemli gelişmelerden biri olmuştur. Bu gelişme ile birlikte kullanılacak malzemelerin daha ucuz bir malzeme olarak seçilebilir olması ile ekonomik açıdan olumlu sonuçlar doğurmuştur. Yüzey kaplama teknolojileri sayesinde büyük oranda enerji tasarrufları da sağlanmaktadır.

2.1. Difüzyonla Kaplama

Difüzyon kaplama yöntemi, aslında tam manasıyla bir kaplama yöntemi değil yüzey modifikasyon işlemini içermektedir. Bu yöntem ile metallerin korozyon ve özellikle oksidasyon direncini artırmak amacıyla, korunacak metalin başka bir metal ile alaşımlandırılması sağlanır. Bu işlemde, kaplanacak parçalar kaplama malzemesini toz formunda içeren bir karışımın içine yerleştirilir ve oksijen girişini engelleyecek şekilde kapatılır. Üst yüzeyin alaşımlandırılması, katı hal difüzyonu yoluyla gerçekleştiği için sistem, kaplama malzemesinin ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa değin ısıtılır. Kaplama süreci, kullanılan sıcaklık ve ısıtma süresi gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

2.2. Galvanizleme

Metallerin yüzeyini çevresel etkenlere karşı koruma amacıyla en sık kullanılan yöntemlerden biri, yüzeyin başka bir metalle kaplanmasıdır. Bu işlem için çinko, bakır, kalay, krom, nikel, altın, gümüş ve alüminyum gibi metaller tercih edilmektedir. Özellikle çinko, yüksek kimyasal aktivitesi sayesinde metalleri korozyona karşı etkili bir şekilde koruduğu için en çok kullanılan kaplama malzemesidir. Çinko ile yüzey kaplama işlemi, "galvanizleme" olarak adlandırılır ve iki temel yöntemle uygulanır: sıcak daldırma galvaniz ve elektro galvaniz. Sıcak daldırma galvaniz yönteminde, demir esaslı bir malzeme sıvı çinko banyosuna daldırılarak yüzeyinde koruyucu bir çinko tabakası elde edilir. Bu süreçte, uzun daldırma süreleri ya da alaşımlama tavlı sırasında demir ve çinko arasında gerçekleşen reaksiyonlar, Fe-Zn faz diyagramında tanımlanan fazların kaplama yapısında oluşmasına neden olur [16].

Sıcak daldırma galvaniz yönteminde, ana metal yaklaşık 460 °C sıcaklıkta ergimiş çinko banyosuna daldırılarak kaplanır. Bu yöntem, homojen ve kalın bir kaplama tabakası sağlayarak malzemelere uzun ömürlü bir koruma kazandırır. Sıcak daldırma galvaniz işlemi, genel olarak kuru galvaniz ve ıslak galvaniz olmak üzere iki farklı şekilde uygulanır.

Kuru galvaniz yönteminde, metalin yüzeyindeki yağlar temizlenir, ardından asitle dağlama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemi takiben metal, sulu flaks çözeltisine daldırılır, kurutulur ve son olarak ergimiş çinko banyosuna daldırılarak kaplama tamamlanır. Islak galvaniz yönteminde ise metal, yağ alma ve dağlama işlemlerinin ardından kurutma aşamasına geçmeden, doğrudan flaks katmanından geçirilerek ergimiş çinko banyosuna daldırılır. Bu yöntem, yüzeyde oksidasyon oluşumunu engeller ve metallerin havayla temasını keserek paslanmayı önler.

Kaplama kalınlığı, galvaniz kaplamanın dayanıklılığını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Daha kalın kaplama tabakaları genellikle daha uzun süreli koruma sağlarken, daha ince kaplamalar daha kısa ömürlü olabilir [17–19].

2.3. Emaye Kaplama

Emaye kaplamalar, çeşitli oksitlerin ötektik sıcaklıkta ergimesiyle oluşan ve sürekli, rastgele bir bağ ağına sahip benzersiz bir amorf mikro yapıya sahiptir. Bu yapı, tane sınırları, mikro gözenekler ve mikro çatlaklar gibi kusurların azaltılmasını sağlar ve

yüksek bir kompaktlık sunarak mükemmel oksidasyon direncine katkıda bulunur. Ayrıca, emaye kaplamalar, nikel bazlı alaşımlar ile kimyasal bağlar oluşturarak üstün arayüzey özellikleri sergiler. Bu benzersiz mikro yapı ve arayüzey bağlanma mekanizmaları, emaye kaplamaları diğer koruyucu kaplama türlerinin sınırlamalarını aşabilecek umut verici bir seçenek haline getirmektedir. Özellikle nikel bazlı süper alaşımlar için, emaye kaplamalar yüksek sıcaklık ve zorlu çevresel koşullarda etkili oksidasyon koruması sunar.

Tarihsel olarak "porselen camsı emaye" olarak bilinen bu kaplama türü, insan uygarlığının en eski dönemlerine kadar uzanan köklü bir geçmişe sahiptir. İlk zamanlarda tamamen dekoratif amaçlarla kullanılan porselen emayeler, sanayi öncesi dönemden itibaren ev aletleri ve endüstriyel kaplar gibi pek çok sektörde yaygınlaşarak işlevsel bir malzeme haline gelmiştir. Kimyasal bileşimi, porselen camsı emayeyi hem geleneksel camlardan hem de seramiklerden ayıran özellikler kazandırır. Porselen emayeler, korozyon ve hava koşullarına karşı üstün koruma sağlarken aynı zamanda estetik bir görünüm sunar. Bu özellikler, metaller ve cam gibi farklı yüzeylerin korunmasında emaye kaplamaları ideal bir çözüm haline getirmiştir [20,21].

2.4. Termal Sprey Kaplama

Termal sprej kaplama yöntemleri, malzemelerin yüzeyine, belirli ısı kaynakları (plazma, ark, alev) aracılığıyla, tel, toz veya çubuk şeklindeki kaplama malzemelerinin, ergiyik veya yarı ergiyik (damlacık) hâlde püskürtülmesi ile uygulanan bir kaplama tekniğidir. Kaplama malzemesi, yüzeye hızlı bir şekilde püskürtülerek, soğuma sürecinde katılaşır ve lamel yapılar halinde birikir. Bu süreç, kullanılan ısı kaynağı ve püskürtme koşullarına bağlı olarak kaplamanın mekanik ve kimyasal özelliklerini etkiler. Metalik, seramik ve kompozit malzemeler gibi çeşitli materyaller, termal sprej yöntemleriyle farklı yüzeylere uygulanabilmektedir. Püskürtme parametrelerine göre kaplama dayanımı, aşınma direnci ve diğer fiziksel özellikler değişiklik gösterebilir. Termal sprej kaplama yöntemleri arasında en yaygın olanlar plazma sprej, ark sprej ve alev sprej olup, özellikle aşınma, korozyon direnci ve termal bariyer uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir.

Atmosferik plazma sprej kaplama yöntemi, yüksek sıcaklıklar altında yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılan, aynı zamanda ekonomik ve uygulama

açısından avantajlı bir kaplama teknolojisidir. Bu yöntem, malzemenin doğal özelliklerini koruyarak, istenilen diğer özelliklerin de kazandırılmasına olanak tanır. Kaplama, genellikle ince tabakalar halinde yapılır ve bu sayede hedeflenen özellikler malzeme yüzeyine entegre edilir. Plazma, yüksek basınç altında argon, azot, helyum, hidrojen gibi inert gazların kullanılmasıyla oluşturulur. Elektriksel enerji verilerek bu gazlar plazma formuna dönüştürülür. Plazma oluşumu, mekanik, manyetik, elektriksel ve ısı enerjilerden faydalanarak sağlanır. Bu yöntemin en yaygın kullanılan şekli, gaz kütlesine elektrik akımı vererek enerji üretmektir. Böylece katı malzemeler sıvı hale dönüştürülebilir. Sistemde gaz kaynağı, kontrol ünitesi, nozul, toz besleme ünitesi ve güç kaynağı gibi ana bileşenler yer almaktadır. Plazma sprej, yüksek sıcaklıklarla etkili kaplamalar yaparak, birçok endüstriyel uygulamada üstün performans sunmaktadır [22,23].

2.5. Sol-jel Kaplama

Sol-jel yöntemi, metal alkoksit, su ve alkol içeren çözeltilerle çalışan kimyasal bir proses olup, seramik, cam ve kompozit malzeme üretiminde kullanılan etkili bir tekniktir. Adını "solüsyon-jelleşme" (solution-gelation) terimlerinden alan bu yöntem, özellikle son yirmi yıldır yoğun olarak araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Süreç, koloidal süspansiyonların (sol) oluşumu ve ardından sürekli bir sıvı faz içinde üç boyutlu inorganik katı ağ yapılarının (jel) oluşmasını içermektedir. Jel, katı ve sıvı fazlar arasında geçiş özelliği taşıyan bir ara fazdır. Sol-jel prosesi, kimyasal reaksiyonların kinetik kontrolü sayesinde malzemelerin alt yapısını etkileme imkanı sunar. Bu yöntem, por morfolojisinin ve moleküler yapının değiştirilmesine olanak tanıyarak yüksek sıcaklık reaksiyonlarından kaçınılmasını sağlar ve yeni malzeme sentezine imkan tanır. Sol-jel teknolojisiyle üretilen yüksek performanslı polikristalin seramikler, çok ince taneli, sıkı yapılı ve yüksek saflıkta olmalarıyla öne çıkar. Bu özellikler, malzemelere üstün mekanik dayanım ve mükemmel fonksiyonel nitelikler kazandırır [24].

2.6. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) yöntemi, kapalı bir sistem içinde katı fazdan gaz faza geçen kimyasal bileşiklerin taşıyıcı bir gaz yardımıyla taşınarak, ısıtılmış ana malzeme yüzeyinde ısı destekli kimyasal reaksiyonlarla katı bir tabaka oluşturmasını

esas alır. Bu yöntemle elde edilen kaplama kalınlıkları genellikle 10 mikrometreden daha incedir ve işlem sıcaklığı, malzeme türüne bağlı olarak 1100 °C'ye kadar ulaşabilir. Kaplama süresi, istenen kaplama kalınlığına göre değişirken, malzemenin stokiyometrisi, yüzey morfolojisi ve kristal yapısı kaplama parametreleriyle kontrol edilebilir. CVD'nin en önemli avantajlarından biri, tungsten, tantal ve karbon gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip elementlerin yüzeylere kaplanmasını mümkün kılmasıdır [25].

2.7. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplamaları, mikron seviyesinde bir kalınlığa sahiptir ve malzeme ömrünü ve performansını önemli ölçüde iyileştirir. Yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla, PVD yöntemleri arasında en çok tercih edilen iki temel işlem ark ve sıçratma (püskürtme) yöntemleridir. Bu yöntem, metalik malzemelerin azot gibi gazlarla etkileşime girerek yoğunlaşması sonucu kaplama oluşturulmasını sağlar. Malzemeler, katı fazdan gaz fazına geçiş sürecinde ark yönteminde termal enerji veya sıçratma yönteminde kinetik enerji kullanılarak iyonize edilir.

Sert malzemelerin biriktirilmesi, genellikle 200 °C ile 650 °C arasındaki sıcaklıklarda, vakum ortamında gerçekleştirilir. Sıçratma yöntemiyle üretilen kaplamalar, son derece pürüzsüz yüzeyler sunarken; ark yöntemiyle yapılan kaplamalar, üstün yapışma özellikleri ve yüksek yüzey sertliği ile öne çıkar. PVD kaplamaları, düşük sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve oksidasyon dayanımı gibi özellikleriyle, aynı zamanda soğuk kaynağın önlenmesi gibi avantajlar sunarak şekillendirme endüstrisinin temel ihtiyaçlarını karşılar [26,27].

2.8. Akımlı Kaplama

Akımlı kaplama, belirlenen bir altlık malzemenin görüntüsünü veya özelliklerini geliştirmek için kaplama banyosunda elektrokimyasal bir proses ile yapılan yüzey işlemidir. Akımlı kaplamanın gözeneksiz ve homojen kaplama yapma, hızlı üretim sağlama, düşük maliyet ve birçok endüstriyel alanda uygulanabilir olması gibi avantajları mevcuttur. Banyo bileşiminin saflığı akımlı kaplamalarda zordur bu sebeple kaplama banyolarına birden fazla inorganik tuz kullanılmaktadır [28].

Akımlı kaplama yöntemi iki elektrot arasından elektrik akımı geçirilerek sulu çözelti içerisindeki metal tuzların indirgenmesidir. Akımsız kaplama sisteminde akım regülatörünün negatif terminaline bağlanan elektrot katot, pozitif terminaline bağlanan elektrot ise anot adı verilir. Katot kaplama yapılması istenilen altlık iken anot çözeltiyi besler [29].

Mühendislik uygulamalarında 20. yüzyıldan beri akımlı kaplamaların en çok tercih edilen kaplama yöntemi akımlı nikel kaplamalardır. Akımlı kaplamalar yüzeyin fonksiyonel kaplanmasında ve dekoratif görüntü sağlanmasında en fazla tercih edilen yöntemlerdendir [30].

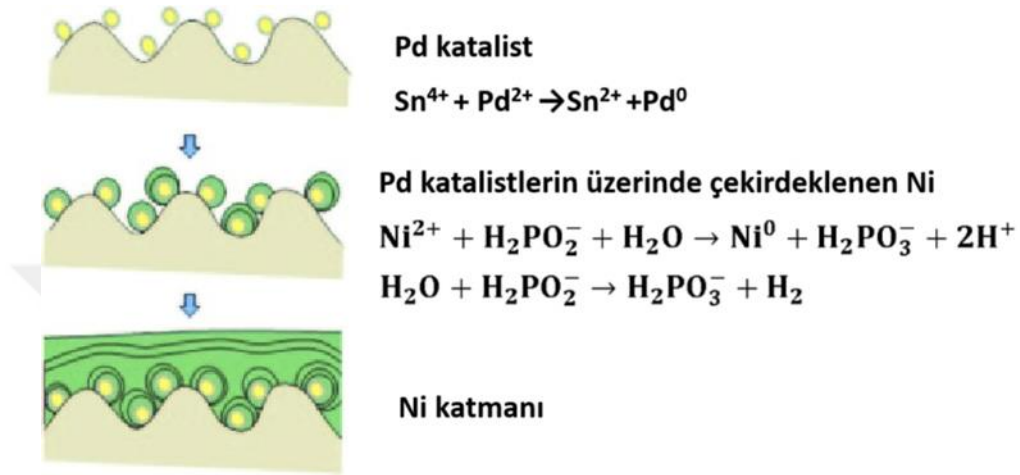
Akımlı kaplamaların en önemli avantajı, farklı çeşitlerde alaşım, metal, iletken polimerler ve kompozit malzemeler üretmede kullanışlı olmasıdır. Malzemelere uygulanan kaplamanın görüntüsü ve özelliklerini kaplama banyosunun koşulları ve bileşimi değiştirilerek değiştirilebilir [31].

2.9. Akımsız Kaplama

Yirminci yüzyılın ortalarında, Brenner ve Riddell tarafından geliştirilen devrim niteliğindeki bir kaplama yöntemi, "Akımsız Kaplama" adıyla tanınmış ve elektrik kullanımını gerektirmemesiyle dikkat çekmiştir. Bu yöntem, geniş uygulama alanı sayesinde günümüzde olgunlaşmış bir araştırma ve geliştirme alanı haline gelmiştir. Akımsız nikel kaplamalar, sahip oldukları belirgin özellikler nedeniyle akımsız kaplama yöntemleri arasında daha yaygın bir tercih haline gelmiştir. Akımsız kaplamalar, hemen hemen tüm sektörlerde kullanım alanı olarak, uygulama çeşitliliğini sürekli artırmaktadır [32]. Özellikle son yirmi yılda ise akımsız kaplamaların özellikleri ve bu kaplamaların uygulamaları üzerindeki çalışmalar ön plana çıkmaktadır [10].

Akımsız kaplama indirgeyici madde, metal tuzları ve diğer kimyasalları içeren banyoda elektrik akımı kullanılmadan altlık üzerine uygulanan bir kaplama türüdür [33]. Akımsız kaplama yöntemi akımlı kaplama yöntemine kıyasla bileşenlere akım uygulanmadığı için karmaşık şekillere sahip malzemelere homojen kaplama sağlamaktadır [33]. Akımsız kaplamaların en önemli uygulama alanları aşınma ve korozyon direncine dayanmaktadır [10]. Akımsız kaplama yönteminin diğer kaplama yöntemlerinden üstün olması, kaplanan nikel tabakasının amorf bir yapıya sahip

olmasıdır. Bu özellik, kristal yapılarında zamanla oluşabilecek boşlukların neden olduğu galvanik hücrelerin oluşumunu engeller [34]. Endüstride en yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri akımsız kaplama yöntemidir. Bunun başlıca nedenleri, farklı ve karmaşık geometrilere sahip malzemelere iyi bir yapışma sağlaması, parlak bir yüzey elde edilmesi ve çevre dostu bir çözeltide makul maliyetlerle uygulanabilmesidir [35].



Şekil 2.1. Akımsız nikel kaplamanın mekanizması [36].

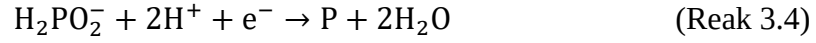
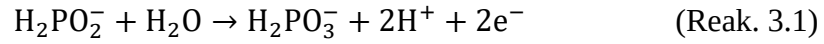


3. AKIMSIZ NİKEL ALAŞIM VE KOMPOZİT KAPLAMALAR

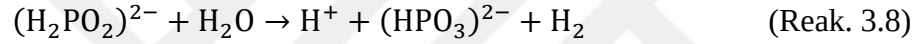
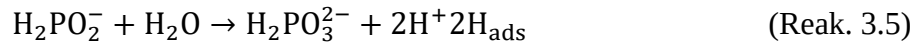
Akımsız kaplamalar ilk olarak 1946'da Abner Brenner ve Grace E. Riddel tarafından elektrolitik nikel kaplama banyosuna sodyum hipofosfit eklenerek kaplama işlemi sonucunda katot verimini %100'den fazla bulmalarıyla kazara keşfedilmiştir [37]. Bu keşiften sonra kaplama mekanizmaları anlamak ve aynı zamanda akımsız kaplamaları geliştirmek adına birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Akımsız kaplamaların ana oluşum mekanizması çözeltide bulunan metal iyonlarının redüksiyon ile indirgenmesi ve yüzeyde bir tabaka oluşturmaktır. Redüksiyonu sağlayabilmek için belli indirgeyicilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu indirgeyicilerden hidrazin, sodyum borhidrür, sodyum hipofosfit ve dimetilamino boran en sık kullanılanların başında gelirler [6]. Kullanılan indirgeyiciler, kaplamanın bileşimine göre değişebilmekte olup akımsız kaplamanın türü ve özelliklerini de değiştirmektedir [38].

Akımsız nikel esaslı kaplamalarda kullanılan kaplama banyosunun bileşimi, pH'ı, kaplama sıcaklığı gibi birçok kaplama prosesini etkileyen parametre mevcuttur. Örneğin, kaplama banyosunun pH'ına göre kaplama banyoları asidik ve alkali şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bir başka sınıflandırma için kullanılan banyo bileşeni ise indirgeyicinin türüdür. Akımsız nikel kaplamalarda kullanılan indirgeyici türünün doğrudan kaplama türü özelliklerine etkisi bulunduğu için en fazla kullanılan sınıflandırma türü indirgeyici esaslıdır. Akımsız nikel kaplamalarda indirgeyici olarak hipofosfit kullanıldığında kaplama matrisi içerisinde nikel ile birlikte fosfor da birikmektedir. Bu sebepten dolayı bu kaplamalar Ni-P kaplamalar olarak adlandırılmaktadır. Ni-P kaplamalar kendi içerisinde fosfor içeriğine ve kaplama banyosunun pH'ına göre farklı sınıflandırmalara sokulmaktadır. Fosfor içeriğine göre düşük fosforlu (at.% 4. P), orta fosforlu (at.% 6.9) ve yüksek fosforlu (at.% 13.8 at. P) olarak sınıflandırılmaktadır [39]. Kaplama içerisindeki fosfor oranı kaplamanın kristalinitesinden, mekanik ve korozyon özellikleri gibi birçok farklı kaplama özelliklerini etkilemektedir. Hipofosfitin indirgeyici olarak kullanılmasında ve meydana gelen kaplamalarda birçok farklı reaksiyon mekanizmaları öne sürülmüştür. En fazla kabul gören mekanizma ise kaplama banyosunda hipofosfitin öncelikle

ortofosfite yükseltgenerek açığa elektron çıkarması ve açığa çıkan bu elektronların nikel ve fosforun otokatalitik bir yüzeyde indirgenmesi reaksiyonlarıdır [40]:

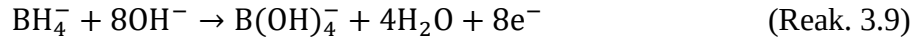


Atomik hidrojen mekanizması, katalitik olarak hidrojenin giderilmesi yoluyla hidrojen atomlarının hipofosfitten ayrılmasını içermektedir.

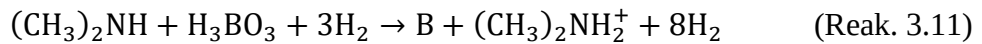
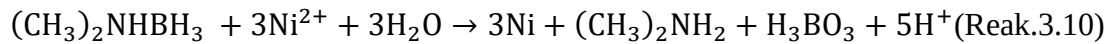


Katalitik yüzeyde biriken az miktardaki hipofosfit, suya, hidroksil iyonlarına ve fosfora eş zamanlı olarak indirgenirken (Reak. 3.7), hipofosfitin büyük bir kısmı katalitik reaksiyonlarla ortofosfite ve gaz halindeki hidrojene oksitlenmektedir (Reak. 3.8). Bu durum, nikel ve fosfor birikimi devam ederken akımsız nikel kaplama çözeltilerinin verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Hipofosfit tüketim miktarı, tampon madde türüne bağlı olarak değişmektedir; sodyum asetat içeren çözeltilerde en yüksek seviyede kullanılırken, sodyum sitrat içeren banyolarda en düşük seviyededir. Sürecin en önemli özelliği, kaplama banyosundaki bileşim değişikliğidir. Kaplama sırasında nikel tuzunun ve hipofosfitin konsantrasyonu azalırken, asit miktarı artmaktadır. Bu durum, biriktirme hızının yavaşlamasına yol açmaktadır [41].

Akımsız nikel kaplamalarda kullanılan diğer indirgeyicilerden bor içerikli olanlar bor hidrürler ve amino borlardır. Bu indirgeyicilerin kullanılmasıyla birlikte nikel matrisi içerisine nikel ile birlikte bor da indirgenmekte ve oluşan alaşım yapısı Ni-B şeklinde oluşmaktadır. Borhidrürler genellikle alkali banyolarda etkili olan indirgeyici maddelerdir [42]. Nötr ve asidik banyolarda, ortamın pH'ından dolayı borhidrürler hidrolize olup banyodaki nikel iyonları ile reaksiyona girerek nikelborür oluşturma eğilimindedirler. Ancak, alkali banyolarda (13'ten yüksek pH'larda) borhidrürler katalitik olarak bozunarak nikelin indirgenmesi için gerekli olan elektronu sağlarlar:



Akımsız Ni-B kaplamalar için kullanılan bir diğer indirgeyici madde ise N-dimetil amino boran (DMAB)'dır. DMAB, bor hidrürlerle nazaran daha geniş bir pH yelpazesinde kullanılabilmektedirler [43]. Bu sebepten dolayı hem asidik hem de alkali banyolarda kullanılabilmektedirler. DMAB'ın kullanılmasıyla birlikte meydana gelen reaksiyonlar ve nikel ile borun indirgenmesi aşağıdaki reaksiyonlarda gösterilmiştir [44].



Akımsız nikel kaplamanın tatmin edici birçok avantajı vardır. Çözelti içinde indirgeyicinin homojen bir şekilde dağılabilmesi, kaplama yüzeyinin banyoya temas ettiği her alanda şekil farklılıkları gözetmeksizin eşit kalınlıkta, homojen ve kalınlığın kontrol edilebilir olmasını sağlar. Akımsız nikel kaplamalar, düşük sıcaklıklarda çalışılabilirliği sayesinde kaplanacak malzemenin yüksek sıcaklık maruziyetine bağlı oluşabilecek zararlardan korunmasını sağlar. Aynı zamanda lehimlenebilir olması, birçok malzeme türüne kaplanabilmesi ve işçilik maliyetinin diğerlerine nispeten düşük olması da önemli ayrıcalıklardandır [45].

Korozyona karşı dirençleri, sürtünmeyi azaltıcı yüzey oluşturmaları ve parçalar arasında yapışmaları önleyebilmeleri akımsız nikel kaplamaları otomotiv sektöründe kullanılmaya elverişli yapmaktadır. Manyetik özellikler barındırması ve lehimlenebilirliği ise bilgisayarların depolama komponentlerinin kaplanması için kullanılabildiğini sağlar [10],[45]. En önemli kullanım alanlarından biri de kimyasal uygulamalardır. Kimyasal uygulamalar için korozyon direnci, kalınlık ve saflık kritik parametreler olduğundan akımsız nikel kaplamalar bu uygulama alanı için oldukça uygun ve önemlidir [46]. Nikel-fosfor ve nikel-bor kaplamalar aşınma ve korozyon uygulamaları için en önemli kaplamalardır. Akımsız Ni-B kaplamalar tamamen amorf olmamaları sebebiyle korozyona açıktır ancak aşınmaya karşı mükemmel dirençleri vardır. Bunun yanı sıra Ni-B kaplamaların maliyeti Ni-P kaplamaların maliyetinden çok daha yüksektir. Ni-B kaplamalar sert kroma alternatif kaplamalardır [33].

Akımsız kaplama yöntemi, yalnızca ikili alaşımlar değil, aynı zamanda üçlü ve dörtlü alaşımların elde edilmesi için de en uygun yöntemlerden biridir. Literatürde bu tür

alaşım sistemleri genellikle “çoklu alaşım” olarak adlandırılmaktadır. Örneğin, Ni-Co-P, Ni-Fe-P ve Ni-Co-Fe-P gibi alaşımlar, üstün manyetik özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Örneğin, üçlü Ni-Cu-P alaşımları (at. %1 Cu), Ni-P alaşımları ile karşılaştırıldıklarında daha iyi korozyon direnci ve daha yüksek süneklik sergilemektedir [47]. Molibden içeren üçlü Ni-Mo-B alaşımları (at. %17 Mo, at. %0,3 B) ise iyi lehimlenebilirlik özellikleri ve ferromanyetik olmama özelliği nedeniyle elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tungsten içeren üçlü alaşımlar (at. %10 W), tungstenin yüksek ergime noktası ve yüksek sertlik gibi benzersiz özelliklerinden dolayı, Ni-W-P kaplamalar Ni-P kaplamalara göre daha yüksek sertlik ve korozyon direnci oluşturmanın yanı sıra korozyon direncini de önemli ölçülerde artırmaktadır [48]. Bunun yanı sıra, %40’a kadar kalay içeren alaşımlar da üstün korozyon direnci göstermektedir. Genel olarak, çoklu alaşımlar, yüksek kimyasal direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, elektriksel ve manyetik özellikleri gibi belirli uygulama gereksinimlerine göre tasarlanabilmekte ve bu sayede geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Üçlü alaşım, dördü alaşımlı gibi çok alaşımlı kaplamaların sertlik, aşınma ve korozyon özelliklerini geliştirmesine benzer bir yaklaşımla çok katmalı dubleks kaplamalar da gerçekleştirilmektedir. Kullanılan yapılarda genel olarak iç katmanın korozyona daha dirençli olan Ni-P kaplamalar tercih edilmektedir. Esasında Ni-B kaplamalar da iyi korozyon direnci göstermektedirler. Ancak Ni-P kaplamalar Ni-B kaplamalara göre daha yüksek korozyon direnci gösterdikleri bilinen bir gerçektir[49].Ancak Ni-B kaplamaların ise sertliği ve aşınma direnci Ni-P kaplamalara kıyasla daha yüksektir. İçindeki bor miktarının artması sonucunda uygun ısıtım şartlarında ısıtım işlem ile birlikte oldukça yüksek sertlik değerlerine ulaşmaktadır [50]. Bu sebeplerden dolayı iç katman Ni-P, dış katman Ni-B olacak şekilde Ni-P/Ni-B, ya da Ni-P/ Ni-M-B (M: W, Mo) dubleks kaplama uygulamaları malzemeyi hem korozyondan hem de aşınma ve sürtünmeden korumak adına uygulanmaktadır.

Kaplamalardaki bir diğer farklı yaklaşım ise B ve P’ın aynı anda nikel matrisinde biriktirilerek hem üçlü alaşım sistemi meydana getirmek, hem de dubleks kaplamalara benzer şekilde korozyon ve aşınma direncini bir arada iyileştirmeye çalışmaktadır. Akımsız nikel kaplama yöntemi üzerine pek çok araştırma yapılmasına rağmen, bor ve fosforun birlikte kullanıldığı kaplamalarla ilgili çalışmalar sınırlıdır. Venkatakrishnan ve arkadaşları, farklı fosfor ve bor içeriklerine sahip nikel çoklu

alaşımların morfolojisi ve sertliğini incelemiştir [51]. Bu çalışma, çift indirgeyici ajan kullanılarak Ni-B-P kaplamaların üretilebileceğini ve çift indirgeyici ajanların eşzamanlı etkisinin kaplamaların morfolojisi ve sertliği üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Birkaç yıl sonra, Stremsdoerfer ve ekibi, dinamik kimyasal kaplama yöntemiyle bakır altlıklar üzerine Ni-B-P kaplamaları üretmiş [52]. Bu kaplamaların, NiP kaplamalarına kıyasla üstün korozyon direncine sahip olduğu ortaya konmuştur. Algul ve arkadaşları, kıyaslamalı olarak Ni-P, Ni-B ve Ni-B-P kaplamaları incelemiştir. Ni-B-P kaplamaların, Ni-P ve Ni-B kaplamalara göre daha iyi aşınma direnci sergileyerek üstün tribolojik özellikler gösterdiğini ve sertlik değerleri daha düşük olsa bile, elastik modül ve sertlik oranının etkisiyle aşınma davranışında Ni-B-P kaplamalar daha yüksek performans sunduğunu göstermişlerdir [53].

Kaplama özelliklerini geliştirmek için yapılan üçlü alaşım sistemleri, dubleks kaplamalar belirli başlı bazı uygulamalarda yeterli gelmemektedir. Bundan dolayı kompozit kaplama yaklaşımı malzemeye daha üstün özellikler katabilmek adına birçok kaplama sisteminde uygulanmaktadır. Sert partiküller veya metal olmayan malzemelerin akımsız kaplamalarla bir arada biriktirilmesi, "akımsız kompozit kaplamalar" olarak adlandırılır. Aşınmaya karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla, bu kaplamalar ince partiküllerin takviye edilmesiyle üretilmektedirler. Örneğin, elmas, silisyum karbür ve alüminyum oksit gibi sert partiküller; politetrafloroetilen (PTFE) gibi katı yağlayıcılarla birlikte biriktirilebilir. Ayrıca, küçük intermetalik bileşikler ve florokarbon partikülleri de akımsız Ni-P (nikel-fosfor) ve Ni-B (nikel-bor) matrisine entegre edilebilir. İlk başlarda, akımsız kompozit kaplamalar istenen başarıyı yakalayamamış ve sıklıkla banyonun kararlılığını yitirmesiyle sonuçlanmıştır. Bu durumun temel sebebi, ince partiküllerin varlığı nedeniyle akımsız banyonun yüzey alanı yükünün yaklaşık 700-800 kat artması ve bu artışın banyonun dengesizleşmesine yol açmasıdır. Ancak, uygun dengeleyicilerin geliştirilmesiyle, akımsız nikel kompozit kaplamalar başarıyla hazırlanabilmiştir [54].

Akımsız kompozit kaplamaların uygulanmasındaki başlıca nedenlerden biri, kaplamaların kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirmektir. Bu özellikler arasında özellikle kaplamaların korozyon direnci öne çıkmaktadır. Akımsız kompozit kaplamaların korozyon direnci, takviye partiküllerinin doğasına büyük ölçüde bağlıdır. Geliştirilmiş korozyon direnci, SiC, CeO₂, TiO₂ ve SiO₂ gibi partiküllerin kaplamalara eklenmesiyle elde edilebilir. Nano boyutta TiO₂ nanopartikülleri

eklenmiş Ni-P kaplamaların deniz suyu ortamındaki korozyon direnci, sıradan Ni-P kaplamalara kıyasla daha yüksek bulunmuştur [55]. Hosseini'nin bir çalışmasında, saf bakır ile Ni-P-TiO₂ akımsız kompozit kaplamaların korozyon direnci karşılaştırılmış ve kompozit kaplamaların bakırın korozyon direncini 15 kat artırdığı ifade edilmiştir [56]. Ni-P matrisine Al₂O₃ eklenmesiyle elde edilen kompozit kaplamaların, kaplama yüzeyinde hızlı bir nikel hidroksit pasif tabakası oluşumu sayesinde korozyon direncini artırdığı düşünülmektedir [57]. Yuan'ın çalışmasında, SiO₂ ve CeO₂ nano partikülleri takviye edilmiş Ni-P kaplamaların güçlü bir korozyon direnci sergilediği gözlemlenmiştir [58]. Nano partiküllerin metal matristeki yerleşimi, gözenek yoğunluğunu azaltarak korozyon direncinin artmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, nano boyutlardaki elmas partiküllerinin Ni-P yapısına takviye edilmesi, nano partiküllerin varlığında kararlı bir pasif tabaka oluşumuyla en yüksek şarj transfer direncini sağladığı belirtilmiştir [59]. Korozyon direnci için akımsız nikel kompozit kaplamalara eklenen partiküllerin etkisi çeşitli araştırmalarda incelenmiştir. Tablo 3.1, nikel matrisindeki farklı takviyelerin korozyon direncine dair Pancrecious ve arkadaşları tarafından hazırlanan genel bir anlayış sunulmuştur [60]. Yapılan incelemeye bakıldığında, takiye elamanı içermeyen kaplamalarla karşılaştırıldığında, her bir kompozit kaplamanın daha yüksek korozyon potansiyeli (E_{kor}), polarizasyon direnci (R_p) ve daha düşük korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) değerleri sergilemesi, antikoroziv etkinliğini açıkça göstermektedir. Bununla birlikte, bazı kompozit kaplamalar üstün özellikler sunarken, diğerleri, kullanılan parçacıkların türü ve kaplamanın stabilitesine bağlı olarak daha düşük performans gösterebilmektedir. Ayrıca, farklı araştırma grupları tarafından üretilen aynı kompozit kaplamalarda, uygulama koşulları ve tercih edilen alt tabaka malzemesindeki değişikliklerden kaynaklanan farklılıklar gözlenebilmektedir.

Tablo 3.1. Akımsız kompozit nikel kaplamaların korozyon direnci karakteristikleri [60].

Kaplama	Optimum takviye elemanı konsantrasyonu	Ekor (V)	Ikor ($\mu\text{A.cm}^{-2}$)	Rp (Ohm.cm^2)
Ni-P	-	-0,662	2,51	29455
Ni-P-SiC	2g/L	-0,512	0,56	59784
Ni-P-TiO ₂	10 g/L	-0,26	0,34	-
Ni-P	-	-0,838	6,36	-
Ni-P-TiO ₂	10 g/L	-0,654	4,87	-
Ni-P-CNT	10 g/L	-0,514	2,95	-
Ni-P-SiO ₂	2 g/L	-	-	3,14x10 ⁸
Ni-P/Ni-P-ZrO ₂	25 mL/L çözelti	-0,321	0,37	-
Ni-P-ZrO ₂	ağ. %5	-0,361	0,967	61593
Ni-P-Al ₂ O ₃ (1 μm)	6 g/L	-0,354	0,595	32920
Ni-P-nano elmas	100 mg/L	-0,38	0,85 $\pm$ 0,005	12650+75
Ni-P-CeO ₂	ağ. %8,10	-	0,37	90700
Ni-P-Si ₃ N ₄	ağ. %7,44	-	0,33	90525
Ni-P-TiO ₂	ağ. %5,42	-	0,66	58991
Ni-P	-	-0,5	7,9	-
Ni-P-PTFE	6-8 g/L	-0,384	3,7	-
Ni-P-MoS ₂	6-8 g/L	-0,555	25,8	-
Ni-P-PTFE-MoS ₂	6-8 g/L (her biri)	-0,681	85,8	-
Ni-P-B ₄ C	4 g/L	-1,031	84	-
Ni-B	-	-0,469	19	-
Ni-B-SiC	1 g/L	-0,386	8,3	-

Kompozit kaplamaların yapılmasındaki bir başka amaç ise kaplamaların sertliklerini ve sürtünme davranışlarını geliştirmektir. Kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerinde yapılacak iyileştirilmeler, takviye yapılan partiküllerin niteliğine bağlıdır. Yüzey tekstürü, kaplama kalınlığı, takviye elemanları ve altlık malzemeye yapışma gibi faktörler, kaplamaların özelliklerine katkıda bulunur. Aşınma direnci, genellikle sertlik, mukavemet ve sürtünme katsayısıyla ilişkilidir ve bu nedenle kaplamaların sertliği ile aşınma direnci arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı, aşınma direncini artırmada önemli rol oynar. Yüzey sertliği, pratik uygulamalarda aşınma sürecini kontrol etmek için önemli bir faktördür. Akımsız nikel, tribolojik uygulamalar için sert bir kaplama olarak kabul edilir. Ni-P ve Ni-B kaplamaları, fosfor ve bor içeriği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve etkisi de iyi bilinmektedir. Akımsız Ni-P kaplamalarında nikel atomları ile birlikte fosfor birikmektedir ve bu birikim hızı, kaplamanın kristallliğini belirler ve dolayısıyla mikrosertliğini etkiler [61]. Yüksek fosfor ve bor miktarı, amorf yapıların oluşmasına yol açar, ancak amorf yapılar, kristalin yapılara göre daha düşük aşınma direncine sahiptir. Isıl işlemle birlikte amorf

yapılar kristalin fazlara dönüşerek sertliği artırır. Ancak, belirli bir sıcaklıkta yapılan ısıtma işlemi, sertliği artırırken, aşırı yüksek sıcaklıklar sertliği azaltabilir [62]. Yüksek sıcaklıkta yapılan ısıtma işlemleri, kaplamanın bozulmasına yol açabilir [63].

Kaplama malzemelerinin sertliği hem takviye hem de ısıtma işlemi elemanlarının özelliklerinden etkilenir. Akımsız kaplamalara sert partiküller eklemek, daha sert ve aşınma direnci yüksek kaplamalar elde edilmesini sağlar. Bu özellikler, partikül boyutu, şekli ve konsantrasyonuna bağlı şekilde değişir. Örneğin, farklı tavlama sıcaklıklarında elmas partiküllerinin boyutlarıyla yapılan çalışmalar, daha ince elmas partiküllerinin takviyesiyle daha iyi aşınma direnci sağlandığını göstermektedir [64]. TiO_2 partiküllerinin Ni-P kaplamalarındaki tribolojik etkileri de incelenmiş ve TiO_2 ile takviyeli Ni-P kaplamaların, takviyesiz Ni-P kaplamalara göre daha düşük aşınma hızı gösterdiği bulunmuştur [65]. Akımsız Ni-B kaplamaların mekanik özellikleri, TiO_2 partiküllerinin eklenmesiyle iyileşmekte, ancak fazla TiO_2 partikülü eklenmesi kaplama bütünlüğünü bozarak mekanik özelliklerde azalmaya neden olmaktadır [66]. SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ve CuO nano partiküllerinin Ni-B kaplamalara eklenmesi, yüzey nodüllerini artırmaktadır ve bu da kaplamaların mikro sertliğini yükseltmektedir [67].

Sürtünme ve aşınma, bir tribo-sistemdeki iki malzemenin etkileşimi sonucu ortaya çıkar, lakim aralarında basit bir ilişki yoktur [68]. Eklenen partiküllerin yüzdesi ve dağılımı, sürtünme davranışını iyileştirmede kritik faktörlerdir. Magnezyum alaşımı üzerine Si_3N_4 nano tel takviyeli Ni-P- Si_3N_4 kompozit kaplama, geleneksel Ni-P kaplamaya göre daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma hızı göstermektedir [69]. Bir başka çalışmada ise Ni-B banyosuna 10 g/L bir konsantrasyonda TiO_2 eklenmesiyle birlikte Ni-B kaplama ile karşılaştırıldığında sertliğinin neredeyse 2 kat; elastik modülün ise yaklaşık 1,5 kat arttığı raporlanmıştır [70]. WS_2 partiküllerinin kullanımı, Ni-P kaplamada sertliği düşürmekte ve aşınma davranışını değiştirmektedir. WS_2 'nin varlığı, kompozit kaplamada hafif abrasif aşınmayı sağlayarak sürtünme katsayısını düşürmektedir [71].

Akımsız metal ve kompozit kaplamalar, altlık geometrisinden bağımsız olarak tek tip kalınlıkta kaplama sağladığından, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, korozyon koruması, aşınma direnci, sertlik gibi avantajlar sağlamak için birçok mühendislik bileşeninde kullanılmaktadır. Akımsız nikel kompozit kaplamalar, takviyelerle uyumlu olup, mekanik özelliklerini, aşınma direncini ve antikorozyon özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Bu kaplamalar,

elektriksel iletkenlik, kataliz, elektromanyetik girişim koruması gibi gelişmiş özelliklere sahip uygulamalara da sahiplerdir.

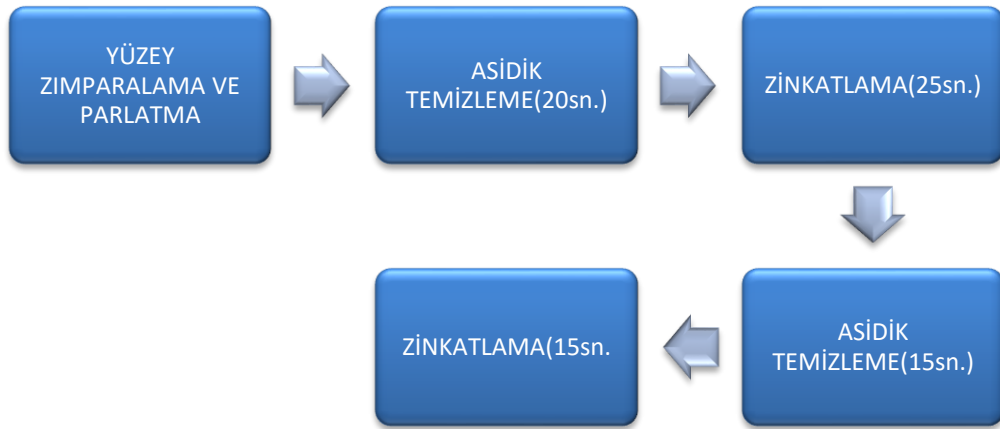




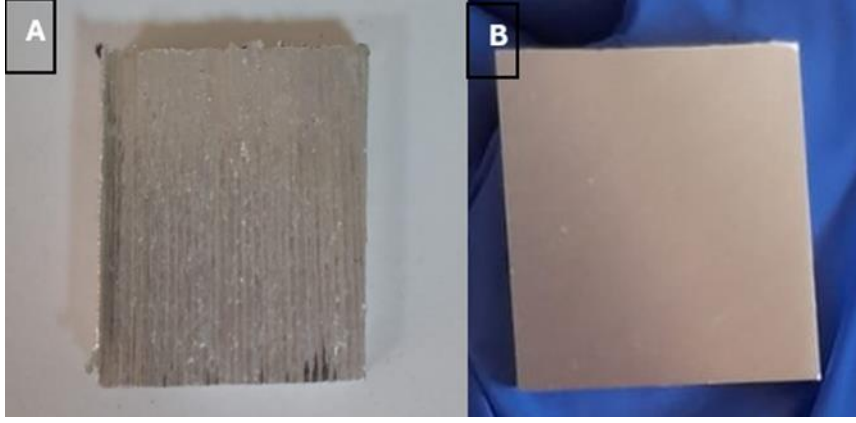
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kaplama Öncesi Yüzey Hazırlama İşlemleri

Bu tezin deneysel çalışmalarında altlık olarak $3 \times 3 \times 1 \text{ cm}^3$ boyutlarında 6XXX serisi alüminyum altlıklar kullanılmıştır. 6XXX serisi alüminyum alaşımları, yüksek mukavemeti, kolay şekillendirilebilirlik ve iyi dökülebilirlik gibi olumlu özellikleri nedeniyle çeşitli mühendislik parçalarında sıklıkla kullanılır [72]. Bu alüminyum altlık yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi ve temizlenmesi için 240,400,800 ve 1200'lük SiC zımparalar yardımıyla zımparalanmıştır. Ancak alüminyum altlıklar kolayca oksijen ile tepkimeye girip yüzeylerinde ince bir Al_2O_3 tabakası oluştururlar [3]. Kolayca oluşan bu tabaka kaplama banyosunda bulunan kimyasalların alüminyumun yüzeyine yapışmasını zorlaştırır. Bu sebeple hazırlanan altlık kaplama banyosuna daldırılmadan önce bir çeşit ön kaplama işlemine tabi tutulur. Bu deneyde aşağıdaki Şekil 4.1'de gösterildiği gibi zinkatlama yöntemi kullanılmıştır. Zinkatlama işleminde alüminyumun yüzeyinde oluşan Al_2O_3 tabakası çinko ile yer değiştirerek daha zayıf bağlı yeni kaplama oluşturur. Kaplama sırasında çinko anodik davranış göstererek çözünür [73]. Zinkatlama işlemi yapılmadan önce ise yüzeydeki oksit tabakasının giderilmesi için asidik temizleme işlemine maruz bırakılmıştır.



Şekil 4.1. Akımsız kaplama öncesi Alüminyum numuneye yapılan ön işlemler.



Şekil 4.2. Kesilmiş(A) ve zımparalanmış(B) 6XXX serisi alüminyum altlık.



Şekil 4.3. Ön kaplama(zinkatlama) işlemi yapılmış olan alüminyum altlık.

4.2. Farklı Parametrelere Sahip Ni-B-P-TiO₂ Kaplamaların Üretimi

Deneylerde kullanıldığımız 6XXX serisi alüminyum altlıklar yukarıda bahsedildiği gibi önce yüzey temizleme işlemi yapılarak daha sonra zinkatlama işlemleri uygulanmıştır. Ardından farklı parametrelere sahip banyolarda Ni-B-P esaslı akımsız kaplamalar yapılmıştır. Banyolar 100 mL'lik cam beherlerde hazırlanmıştır. Akımsız kaplama yönteminde banyo bir metal tuzu, indirgenme reaksiyonları için indirgeyici ajan, kompleks yapıcı ve stabilizör içerir. Kaplama sırasında sıcaklık değerleri ve pH oranı kontrol edilir [13]. İstenilen oranlarda eklenen kimyasallarla hazırlanan bu çözeltiler belirlenmiş sıcaklığa getirildikten sonra alüminyum altlıklar bu çözeltiye daldırılır. Daldırma süresi kaplama kalınlığını belirlemektedir ve bundan dolayı tüm kaplamalar eşit sürelerde yapılmıştır. Belirlenen süre tamamlandığında parça banyo çözeltisinden alınarak reaksiyon durdurulmuştur. Akımsız kaplama banyoları yeni bir kaplama için tekrar kullanıma uygundur, ancak parametrik çalışmalarda her parametre ve konsantrasyonun öneminden kaynaklı olarak her kaplama için tez kapsamında farklı

banyolar hazırlanmıştır [6]. Banyolar 100 mL’lik cam beherlerde hazırlanmıştır. Nikel sülfat, sodyum hipofosfit, sodyum ssetat, laktik ssit, DMAB, tioüre, pH, süre ve sıcaklık aynı tutulup değişken parametreler TiO_2 , sodyum didesil sülfat (SDS) konsantrasyonları ve karıştırma hızı olarak belirlenmiştir. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplama işlemleri akım şeması Şekil 4.4’te ve bu banyolarda kullanılan kimyasal parametreler ve çalışma koşulları Tablo 4.1’te, bu banyolardaki değişken parametrelerin seviyeleri ise Tablo 4.2’de verilmiştir. Banyolar hazırlanırken kompozit malzeme olan TiO_2 ve SDS ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılıp diğer kimyasallar ile hazırlanan banyoya ilave edilmiştir. Banyo ısıtıcı karıştırıcı ile 80 °C’ye kadar ısıtılmış bu süreçte de belli aralıklarla pH değeri kontrol edilmiştir. Sıcaklığı 80 °C’ye ulaşan banyoya ön kaplama yapılan altlık daldırılıp 1 saat kaplama işlemi uygulanmıştır. Sıcaklık referans aralığı ± 5 °C olarak alınmıştır. Kaplama süresince banyonun sıcaklığı belirli aralıklar ile ölçülüp kontrol edilmiştir. Şekil 4.6’da akımsız Ni-B-P-TiO₂ kaplamanın yapıldığı kaplama çözeltisinin banyo düzeneği gösterilmiştir.



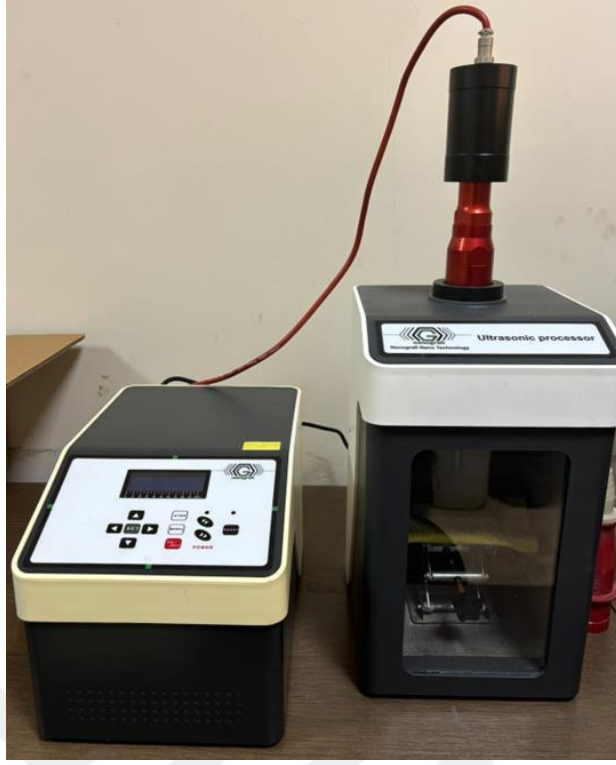
Şekil 4.4. Akımsız NiBPT kaplama işlemleri akım şeması.

Tablo 4.1. Akımsız NiBPT kaplamalarda kaplama banyosundaki farklı parametrelerin etkisinin incelendiği banyoların bileşenleri ve çalışma koşulları.

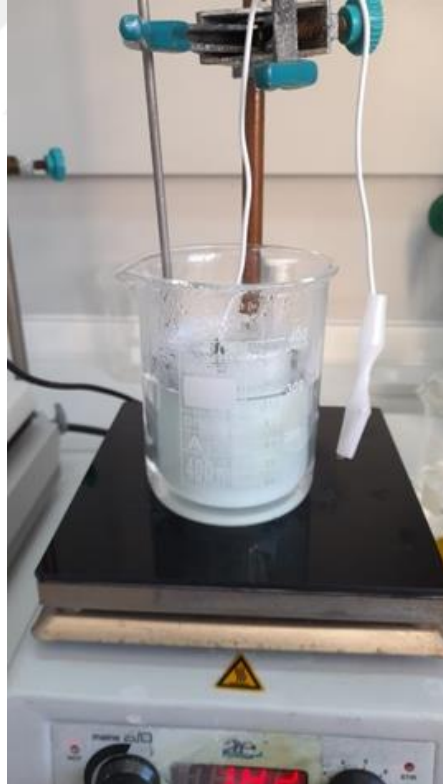
Banyo Kimyasalları ve Kaplama Koşulları	
Nikel Sülfat(g/L)	33
Sodyum Hipofosfit(g/L)	20
Sodyum Asetat (g/L)	16
Laktik Asit(ml/L)	28
Dmab(g/L)	2
Titanyum Dioksit(g/L)	5-20
Tioüre(mg/L)	0,001
SDS(mg/L)	0,01-0,5
pH	5,5-6
T(dk)	60
Sıcaklık(°C)	85
Karıştırma Hızı(d/dk)	200-400-600

Tablo 4.2. Akımsız NiBPT kompozit kaplamalarda kullanılan parametreler ve seviyeleri.

Faktör	Birim	Seviyeler			
		1	2	3	4
Titanyum Dioksit	g/L	5	10	15	20
Karıştırma Hızı	d/dk	200	400	600	-
Yüzey Aktif Madde Konsantrasyonu	g/L	0,01	0,1	0,5	-



Şekil 4.5. Ultrasonik Karıştırıcı.



Şekil 4.6. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kaplama banyosu.

4.3. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

Bu tez kapsamında üretilen kaplamaların yüzey morfolojilerini incelemek ve kesit kalınlıklarını ölçmek amacıyla JEOL Marka JSM 6060 LV model taramalı elektron mikroskopu kullanılmış olup şekil 4.7’de bu cihaz gösterilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzemelerin yüzeyini incelemek için yüksek enerjili elektron demeti kullanan bir cihazdır. Elektron demeti malzeme yüzeyiyle etkileşime girdiğinde, ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar ve karakteristik X-ışınları gibi çeşitli sinyaller oluşur. Bu sinyaller, malzemenin yüzey topografyası, kimyasal bileşimi ve mikro yapısı hakkında detaylı bilgi sağlar. Gelişmiş SEM sistemlerinde bu sinyaller dijitalleştirilerek bilgisayar ekranına aktarılır ve analiz edilir. Ayrıca, elektron demeti ile malzeme atomları arasındaki elastik olmayan çarpışmalar sonucunda karakteristik X-ışını yayılımı gerçekleşir. Bu yayılım, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile malzemenin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılır. SEM, 50.000 kata kadar büyütme yapabilmesiyle yüzeydeki en küçük detayları bile incelemeye olanak tanır. Bu özellikleri sayesinde faz dağılımı, element analizi, tane yapısı gibi birçok mikro yapısal çözümleme yapılabilir. SEM, malzeme bilimi, nanoteknoloji ve mühendislik gibi alanlarda vazgeçilmez bir analiz aracıdır.



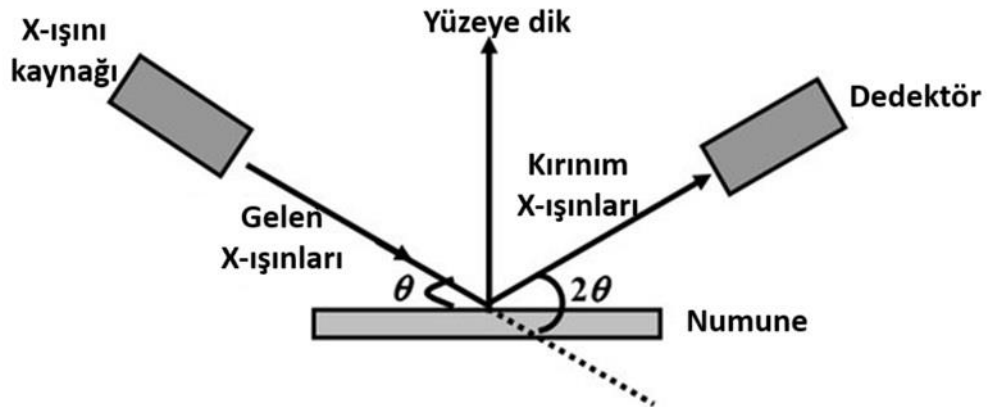
Şekil 4.7. JEOL marka JSM 6060 LV model SEM cihazının görüntüsü.

4.4. X-ışını Kırınımı Difraktometresi (XRD)

Bu tez kapsamında kaplamaların kristal yapılarını incelemek amacıyla XRD analizi yapılmış olup Rigaku marka D/MAX/2200/PC model XRD cihazı Şekil 4.8’de

verilmiştir. X-ışını kırınımı, kristal malzemelerin iç yapılarının ve atomik aralıkların incelenmesi ve anlaşılması için en sık kullanılan tekniklerden biridir. X-ışınları bir katot ışını tüpü tarafından üretilir ve malzemeye yönlendirilir. Kristal yapıya sahip malzemeye gönderilen X-ışınları, 2θ açısında geri saçılır. Malzemenin açısını koruyan cihaza gonyometre denir. X-ışını kırınımı, bilinmeyen kristal yapılı malzemelerin (örneğin, mineraller, inorganik bileşikler) ayırd edilmesinde de yaygın olarak kullanılır. Bilinmeyen katıların belirlenmesi, jeoloji, çevre bilimi, malzeme bilimi ve mühendislik alanlarındaki çalışmalar için oldukça önemli olmakla beraber diğer uygulamalar arasında kristal malzemelerin karakterizasyonu, kil ve optik olarak belirlenmesi zor olan karışık tabaka killer gibi ince taneli minerallerin tanımlanması, birim hücre boyutlarının belirlenmesi ve numune saflığının ölçülmesi yer alır.

Bu tez kapsamında elde edilen kaplamaların kristalografik yapısını belirlemek için $10-90^\circ$ aralığında $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54050 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak X-ışını kırınımı analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. X-ışını Kırınımının Çalışma Prensipleri Üzerine Şematik Gösterimi [74].



Şekil 4.9. XRD cihazının görüntüsü.

4.5. Kaplamanın Sertlik Ölçümleri

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir ve bu özellik, çeşitli sertlik testleri aracılığıyla ölçülmektedir. Sertlik ölçümlerinde, genellikle konik, piramit veya küresel geometriye sahip standart uçlar kullanılmaktadır. Test sırasında sert bir uç, belirli bir yük altında malzeme yüzeyine uygulanır ve malzemenin bu yük etkisine karşı gösterdiği direnç, sertlik değeri olarak ifade edilir. Uygulama sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan izin boyutları, kullanılan ucun geometrik özellikleri ve uygulanan yük dikkate alınarak sertlik değeri hesaplanmaktadır.

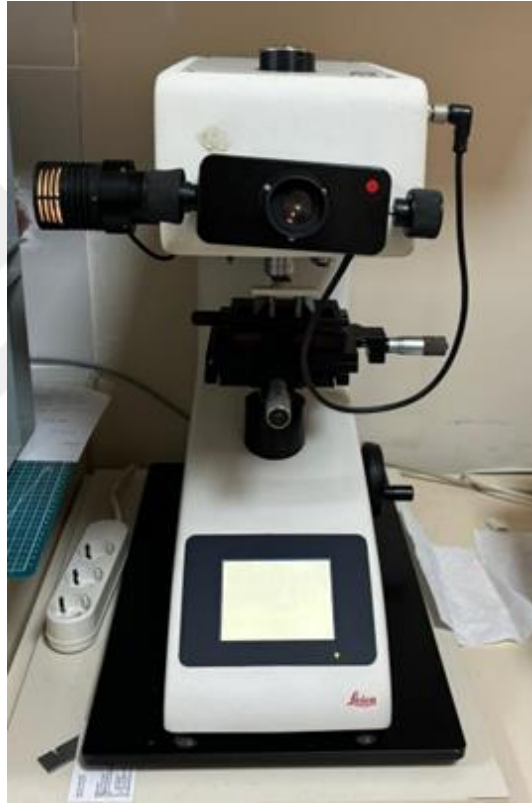
Vickers sertlik testi (HV), özellikle ince malzemelerin ve kaplamaların sertliklerinin ölçümünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, piramit şeklinde bir elmas uç, sabit bir kuvvet ile malzeme yüzeyine bastırılmakta ve belirli bir süre boyunca uygulanmaktadır. Test sonucunda oluşan iz, mikroskop altında iki çapraz çapı ölçülerek değerlendirilmekte ve sertlik değeri şu formül ile hesaplanmaktadır:

$$HV = \frac{1,854 \times F}{d^2} \quad (4.1)$$

Burada F, uygulanan yükü (kgf), d ise oluşan izin çapraz boyutlarının ortalamasını (mm) temsil etmektedir. Vickers sertlik testi, küçük boyutlu örnekler üzerinde yüksek hassasiyetle ölçüm yapılmasına olanak tanıyan bir yöntemdir.

Sertlik testlerinde malzeme yüzeyinde kalıcı bir bozulma oluşmaması durumunda, bu test tahribatsız muayene kategorisine girmektedir. Bu nedenle, Vickers sertlik testi gibi yöntemler sanayi ortamında kalite kontrol süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve malzemelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır.

Bu tez çalışmasında belirlene 20 adet kaplama bakalite alınıp zımpara ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Hazırlanan bu numuneler her birinin kaplama kısmının 5 farklı noktasından Leica VMHT Microhardness Testersertlik cihazı ile sertlikleri ölçülüp bu 5 değerin ortalaması alınarak sertlikleri belirlenmiştir. Kullanılan sertlik cihazı aşağıdaki Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Sertlik cihazının görüntüsü.

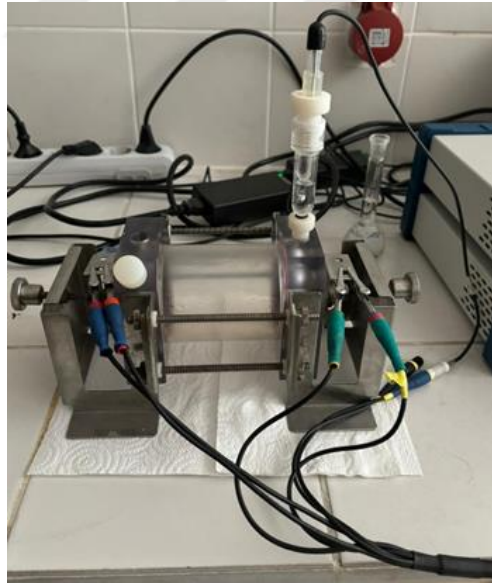
4.6. Korozyon Testleri

Bu tez kapsamında korozyon testleri Gamry Paracell elektrokimyasal korozyon hücresi ve bir Gamry Reference 3000 potansiyostat/galvanostat kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.11’de elektrokimyasal korozyon hücresi gösterilmiştir. Korozyon, malzemelerin çevresel etkilerle kimyasal veya elektro-kimyasal reaksiyonlar sonucu bozunması olarak tanımlanabilir ve bu süreç, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek kullanım ömrünü kısaltır. Korozyon hızlarının belirlenmesi

amacıyla çeşitli elektro-kimyasal test yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) analizi, hızlı ve güvenilir sonuçlar elde etmesi nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

Potansiyodinamik polarizasyon analizi, malzemenin elektrot yüzeyindeki anodik ve katodik tepkimelerin kinetik bilgilerini sağlayarak korozyon hızının hesaplanmasına olanak tanımaktadır. Bu analizde, elektrot yüzeyine uygulanan potansiyel kontrollü bir şekilde değiştirilmekte ve buna bağlı olarak oluşan akım yoğunluğu ölçülmektedir. Akım-potansiyel eğrisinin Tafel bölgelerinde doğrusal bir analiz yapılarak korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}) ve buna bağlı olarak korozyon hızı hesaplanmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan potansiyodinamik polarizasyon analizlerinde, platin karşıt elektrot ve doymuş kalomel elektrot referans olarak, elde edilen Ni-B-P-TiO₂ esaslı kaplama numuneleri ise çalışma elektrodu olarak kullanıldı. Tafel ekstrapolasyon testlerinden önce, tüm numuneler açık devre potansiyelini (OCP) stabilize etmek için 30 dakika boyunca %3,5 ağırlık NaCl çözeltisine daldırılmıştır. Tafel ekstrapolasyon testleri potansiyel aralığı 100 mV ila 100 mV aralığında ve 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11. Gamry Paracell elektrokimyasal korozyon hücresi.

4.7. Taguchi ve Yüzey Yanıt Metodu (RSM)

Akımsız kaplamaları optimize ederken genellikle daha fazla sayıda deney gerektiren ve karmaşık değişken etkileşimlerini yakalayamayan geleneksel tek uygulamada tek değişken yaklaşımıyla ilgili zorluklar mevcuttur. Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM)

bu sınırlamaları daha verimli bir tekniğe döndürmektedir. George E. P. Box ve K. B. Wilson tarafından geliştirilen istatistiksel ve matematiksel bir teknik olan RSM, karmaşık süreçleri keşfetmemizi ve optimize etmemizi sağlar. Süreç parametreleri ve bunlara karşılık gelen yanıtlar arasındaki ilişkiyi analiz ederek ve genellikle ikinci dereceden veya bazen daha yüksek dereceden matematiksel modeller kullanarak RSM, istenen yanıtları veren optimum süreç parametrelerini belirlememizi sağlar [75,76]. Bu yaklaşım, emek yoğun deney sayılarını en aza indirirken akımsız kaplamaların da birden fazla özelliğini geliştirmeye çalışır.

RSM'de, proses parametreleri tanımlanmış bir aralıkta değiştirilerek bir dizi deney gerçekleştirilir. Elde edilen veriler daha sonra yanıt yüzeylerini temsil eden matematiksel modeller oluşturmak için kullanılır. Bu modeller, faktörlerin nasıl etkileşime girdiğinin ve yanıtları nasıl etkilediğinin görselleştirilmesini sağlar. Model katsayıları analiz edilerek, bireysel faktörlerin ve etkileşimlerinin önemi tespit edilebilir.

RSM'deki optimizasyon süreci, yanıtları maksimize veya minimize eden faktör ayarlarının bulunmasını içerir. Bu genellikle gradyan tabanlı algoritmalar veya yanıt yüzeyi optimizasyon algoritmaları gibi sayısal optimizasyon teknikleriyle gerçekleştirilir. Optimum faktör ayarları, uygulanan modellerden elde edilen tahmini yanıt değerlerine göre belirlenir.

RSM, faktör uzayını sistematik olarak keşfederek, tahmini modeller oluşturarak ve optimum koşulları belirleyerek süreç optimizasyonuna sistematik bir yaklaşım sağlar. Kaynak tüketimini ve zamanı en aza indirirken süreç sonuçlarını iyileştirmek için yapılandırılmış bir metodoloji sunar. Yanıt Yüzeyi Metodolojisi, bir veya daha fazla yanıt ile birkaç bağımsız değişken arasındaki işlevsel etkileşimi aydınlatmak için kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir koleksiyonundan oluşur [77].

Liu ve arkadaşları yanıt yüzeyi metodolojisini kullanarak akımsız Ni-W-P alaşım kaplamalı AZ91D magnezyum alaşımının korozyon direncinin optimizasyonuna odaklanan bir çalışma yürütmüştür. En yüksek korozyon direncini elde etmek için optimum teknolojik parametreler şu şekilde belirlenmiştir: 20 g/L nikel sülfat, 15 g/L sodyum tungstat, 30 g/L sodyum hipofosfit, banyo sıcaklığı 60 °C ve pH 9,3 olarak ayarlanmıştır. Bu koşullar altında, çalışma sodyum tungstat konsantrasyonunun kaplamanın korozyon direnci üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğunu göstermektedir [78].

Yazdani ve Vitry akımsız Ni-B-nanoelmas kaplama banyosu parametrelerinin sertlik ve partikül biriktirme oranının optimizasyonu üzerindeki etkilerini yanıt yüzeyi metodolojisini kullanarak araştırmayı amaçlamıştır. Moleküler dinamik simülasyonun sonuçları, borhidrürün nanoelmas yüzeyindeki düşük adsorpsiyon enerjisinin borhidrürün dehidrojenasyon sürecine elverişli olmadığını ortaya koymaktadır [79].

Farzaneh ve arkadaşları elektrolit içindeki kimyasal formülasyonun ortaya çıkan akımsız nikel fosfor kaplamanın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. En uygun koşullar, 32 g/L sodyum hipofosfit ve 1,5 g/L anyonik yüzey aktif madde kullanılarak pH 5'te belirlenmiştir. Geliştirilen modellerde belirtildiği gibi, bu özel banyo vasıtasıyla 1080 HV mikro sertlik ve 23 µm kalınlıkta bir Ni-P kaplama elde edilmiştir [80].

Wei SiC nanopartikülleri ile Ni-P akımsız kompozit kaplamaların mikrosertliğini optimize etmek için RSM içinde ortogonal deneysel tasarımı kullanmıştır. Kaplama çözeltisi sıcaklığı, pH ve SiC nanopartikül konsantrasyonu dahil olmak üzere üç etkili faktör incelenmiştir. Nanopartikül eklenmesi için ultrasonik dispersiyon kullanılmıştır. En uygun parametre kombinasyonu: kaplama çözeltisi sıcaklığı için 84-86 °C, 5,3-5,7 pH ve 4,5 g/L SiC nanopartikül konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. Isıl işlemten sonra 1000 HV'yi aşan bir mikro sertlik elde edilmiştir [81].

Mostafapour ve arkadaşları tarafından sürtünme yüzeyine odaklanılmış ve Al2024-T351 alt tabakalar üzerine Al7075-T6 kaplamada istenen mikroyapıyı ve mekanik özellikleri elde etmek için dönme hızını, eksenel kuvveti ve ilerleme hızını optimize etmek için de RSM kullanılmıştır. Çalışma, iki malzemenin gözeneklilik olmadan başarılı bir şekilde birleştirildiğini ve ince taneli homojen bir mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir [82].

Vahdati ve Moradi Al₂O₃ takviyeli Al7075 yüzey kompozitleri oluşturmak için sürtünme karıştırma işlemi (FSP) yoluyla alüminyum özelliklerini geliştirmeye odaklanmıştır. Takım hızı, ilerleme hızı, takım omuz çapı ve parçacık boyutu gibi girdi değişkenlerini içeren deneyleri tasarlamak için RSM kullanmışlardır. İstatistiksel analiz ve optimizasyon, bu faktörlerin akma dayanımını ve sertliği etkilediğini ortaya koymuştur [83].

Optimum koşullar, optimizasyon sürecinin etkinliği doğrulama testleri ile belirlenmiştir. Hashemi ve diğerleri Arşimet spiral alüminyum bipolar plakaların

şekillendirme sürecini deneyler ve RSM aracılığıyla incelemiştir. Gaz sıcaklığının kanal derinliğini ve incelme yüzdesini önemli ölçüde etkilediği optimum değerler belirlenmiştir. En iyi proses parametreleri 38 bar gaz basıncı, 308 °C sıcaklık ve 10 saniyelik proses süresidir [84].

Sharath ve diğerleri değişen B₄C ve grafit içeriğinin kompozit malzemelerin aşınma davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmek için RSM kullanmıştır. Bu seramiklerin konsantrasyonu arttıkça aşınma direnci iyileşmiştir. Ayrıca RSM, ağırlıkça %15 B₄C ve ağırlıkça %10 grafit gibi optimum parametrelerin belirlenmesini kolaylaştırarak önemli ölçüde aşınma direnci sağlamıştır. Bu yöntem, aşınma kaybı için matematiksel bir model oluşturulmasına yardımcı olarak aşınma özelliklerinin ve parametre öneminin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmuştur [85].

Bir katı hal kaplama işlemi olan sürtünme yüzey kaplama, metalik çekirdek verimliliğini artırarak üstün aşınma ve korozyon direncine sahip ince taneli kaplamalar sağlar. Rethnam ve arkadaşları EN8 üzerine doğal olarak homojen AISI316Ti paslanmaz çelik kaplamalar geliştirerek RSM kullanarak bağlanma mukavemetini, kaplama kalınlığını ve genişliğini tahmin etmiştir. Dönme hızı, travers hızı ve eksenel yük gibi parametrelerin bağlanma geometrisini etkilediği çok amaçlı optimizasyonun kaplama genişliğini artırarak ancak diğer yandan kalınlığı azaltarak bağlanma mukavemetini artırdığı belirlenmiştir [86].

Zhang ve arkadaşları akımsız kaplama yoluyla Ni-Fe-P üçlü alaşım kaplamalarının üretimini araştırmıştır. Kaplama hazırlama parametrelerini araştırmak için RSM uygulanmıştır. Merkezi kompozit tasarım, optimum banyo sıcaklığını (85 °C) ve pH'ı (8) belirlemiştir. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı analizinin yanı sıra kimyasal bileşim için EDS ve X-ışını kırınımı gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve potansiyel polarizasyon teknikleri, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon direncini değerlendirmiş ve en iyi korozyon direnci belirlenen optimum koşullarda gözlemlenmiştir [87].

Davoodi ve arkadaşları Ni-P/TiN dubleks kaplama ile kaplanmış 6061 alüminyum alaşımının tribolojik özelliklerini, uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi koşulları altında araştırmışlardır. Aşınma testleri ile aşınma derinliğini ve sürtünme katsayısını tahmin etmek için RSM kullanılarak bir model geliştirmişlerdir [88].

Model, aşınma derinliği için %99,95 ve sürtünme katsayısı için %94,39 gibi yüksek güvenilirlik katsayısı değerleri göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi, daha yüksek uygulanan yüklerle aşınma ve sürtünme katsayılarının arttığını ve 12 N'un hem TiN hem de Ni-P katmanlarının çıkarılmasıyla sonuçlandığını ortaya koymuştur. RSM analizi, uygulanan yükü aşınma derinliği ve sürtünme katsayısı üzerinde en etkili faktör olarak tanımlamıştır.

Sarkar ve diğerleri Ni-P alaşımının akımsız kaplama yoluyla bir bakır alt tabakanın mikrosertliğini geliştirmeye odaklanmıştır. Nikel sülfat konsantrasyonu, sodyum hipofosfit konsantrasyonu ve banyo sıcaklığı gibi parametreleri dikkate alarak mikrosertliği en yüksek seviyeye çıkarmak için Merkezi Kompozit Tasarım (CCD) kullandılar. Optimum koşullar 33,8 g/L nikel sülfat, 19,6 g/L sodyum hipofosfit ve 87,6 °C banyo sıcaklığı olarak belirlenmiş ve 1129 HV10g mikrosertlik elde edilmiştir. Parametre etkilerini analiz etmek için bulanık mantık kullanmışlar ve ANOVA ile nikel sülfatın önemini ve sodyum hipofosfit ile banyo sıcaklığı arasındaki etkileşimi doğrulamışlardır [89].

Reghuraj ve diğerleri 410 paslanmaz çelikten yapılmış cerrahi ekipmanı karartmak için sıcak alkali işlemini kullanmışlardır. Taguchi ve RSM kullanarak daldırma süresi, tuz çözeltisi sıcaklığı ve ağırlıkça % sodyum dikromat gibi işlem değişkenlerini değiştirerek elde edilen manyetit (Fe_3O_4) kaplamanın yansıma önleyici özelliğini optimize etmişlerdir. Deneysel ve doğrulayıcı testler, parametreleri başarılı bir şekilde optimize ederek %8,1'lik en düşük ortalama yansıma yüzdesini vermiştir [90].

Salim ve arkadaşları akımsız Ni-P kaplamaların sürtünme ve aşınma özelliklerini değerlendirmişlerdir. Taguchi'nin L-27 ortogonal dizisini ve üç test parametresini (yük, hız ve zaman) kullanmışlar ve aşınma derinliği ve sürtünme katsayısını tahmin etmek için dört tahmin modeli (RSM, Mamdani bulanık mantık, Sugeno bulanık mantık ve ANFIS) kullanmışlardır. TOPSIS yöntemi, ANFIS ve RSM'yi sürtünme ve aşınma özellikleri için sırasıyla 0,989 ve 0,994 güvenilirlik katsayıları (R^2) ile en iyi tahmin modelleri olarak tanımlamıştır [91].

RSM kullanılarak Ni-B, Ni-P ve çeşitli kaplama türleri üzerine yapılan çalışmalar literatürde oldukça yaygındır. Ancak, hiçbir çalışma özellikle akımsız Ni-B-P kaplamalar için parametrelerin optimizasyonuna odaklanmamıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında 4.2. bölümdeki Tablo 4.2’de belirtilen parametreler ile oluşturulan 20 adet farklı banyodan elde edilen kaplamalar üzerine incelemeler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, deneysel parametrelerin bir kombinasyonu oluşturularak, hedeflenen sonuç üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla faktöriyel deney tasarımı alternatif olarak geliştirilen etkili bir yöntemdir [92]. 20 adet kaplamanın karakterizasyon sonuçları aşağıdaki Tablo 5.1’de verilmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında seçim kriteri olarak her çıktı değeri için en iyi performansı gösteren numuneler seçilerek yüzey morfolojileri (SEM), kristal yapıları (XRD), kesit görüntüleri (SEM), sertlik değerleri (HV) ve korozyon direnci değerleri (Tafel eğrileri) verilmiştir. Bu kapsamda en iyi korozyon direnci için NiBPT3 kodlu numune, en iyi sertlik için NiBPT5 ve en iyi kalınlık için ise NiBPT12 kodlu numuneye ait karakterizasyon çalışmaları sonuçlarına aşağıda yer verilmiştir.

Sonuç olarak, yapılan bu bilimsel çalışma, NiBP-TiO₂ kaplamaların üretimi, morfolojik özellikleri, kaplama kalınlığı, kristalin yapıları ve sertlik özellikleri üzerine kapsamlı bir inceleme sunmaktadır.

Tablo 5.1. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalarda gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçları.

Deney No	Numune Kodu	TiO ₂ Partikül Konsantrasyonu (g/L)	Karıştırma Hızı (d/dk)	Yüzey Aktif Madde Konsantrasyonu (g/L)	Sertlik (HV)	Kalınlık (mm)	Korozyon Oranı (mpyx10 ⁻⁵)
1	NiBPT1	10	400	0,1	689	18,1	76
2	NiBPT2	15	200	0,1	709	20,28	58
3	NiBPT3	20	400	0,5	752	24,8	32
4	NiBPT4	5	600	0,1	630	10,26	119
5	NiBPT5	20	400	0,01	768	23,7	41
6	NiBPT6	10	400	0,1	682	16,7	68
7	NiBPT7	10	600	0,5	658	14,7	84
8	NiBPT8	10	400	0,1	679	16,8	61
9	NiBPT9	10	600	0,01	649	18,1	69
10	NiBPT10	20	600	0,1	747	25,4	39
11	NiBPT11	5	400	0,5	634	11,7	112

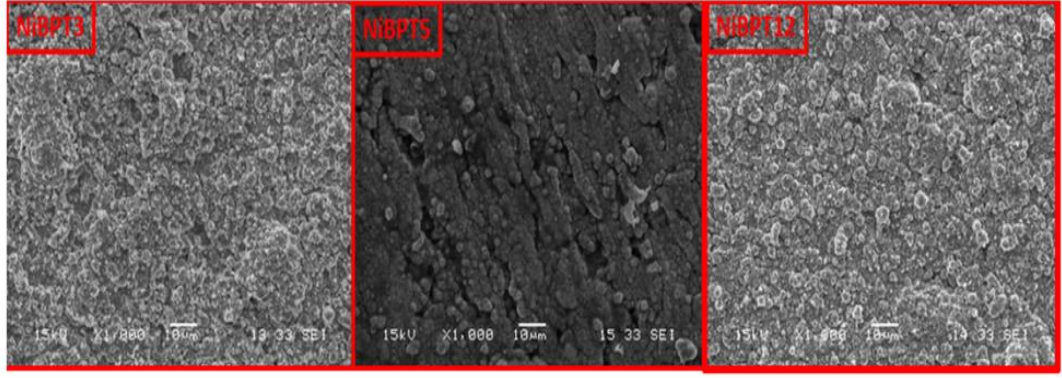
Tablo 5.1. (Devamı) Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalarda gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçları.

De ney No	Num une Kodu	TiO ₂ Partikül Konsantrasyon u (g/L)	Karıştırma Hızı (d/dk)	Yüzey Aktif Madde Konsantrasyonu (g/L)	Sertlik (HV)	Kalınlık (mm)	Korozyon Oranı (mpyx10 ⁻⁵)
12	NiBP T12	20	200	0,01	748	26,5	44
13	NiBP T13	5	200	0,5	629	15,6	117
14	NiBP T14	5	200	0,01	619	14,4	101
15	NiBP T15	15	200	0,1	714	23	68
16	NiBP T16	10	400	0,1	711	17,8	45
17	NiBP T17	10	200	0,01	639	16	76
18	NiBP T18	15	600	0,1	729	22,61	58
19	NiBP T19	15	200	0,5	712	21,4	54
20	NiBP T20	10	600	0,01	698	17	81

5.1. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ Kaplamalara Ait Kesit Ve Sem Görüntüleri

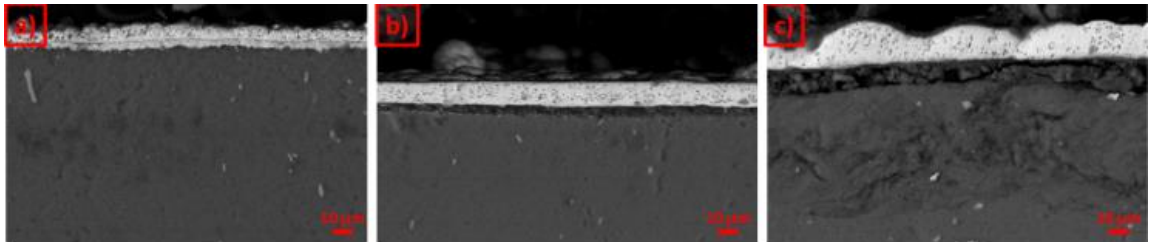
Kaplamaların yüzey ve kesit morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi vasıtasıyla incelenmiştir. Kesit görüntülerini elde etmek amacıyla numuneler kesilmiş, bakalite alınmış ve zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi sonrasında parlatma yapılarak numuneler analiz için hazır hale getirilmiştir. Bu analiz sonucunda kaplama kalınlığı verileri elde edilmiştir.

Şekil 5.1 akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalara ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) yüzey görüntülerini göstermektedir. Şekilden yüzey görüntüleri incelendiğinde kompozit kaplamaların nodüler yapılı olduğu anlaşılmaktadır. Nodüler yapı küçük tanelerden hareketle oluşan iri taneler anlamına gelmektedir. TiO₂ takviyesinin artması ile kaplama tabakasına giren TiO₂ oranı artmış ve partikül yüzeyleri çekirdekleyici görevi nedeniyle nikel tane boyutunda incelmeler meydana gelmiştir. Böylece daha küçük taneli yapı elde edilmesi söz konusu olmuştur. Bu durum kaplanan yapıların yüzey görüntülerine oldukça açık bir şekilde yansımıştır.



Şekil 5.1. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalara ait SEM görüntüleri.

Şekil 5.2 akımsız Ni-B-P-TiO₂ kaplamalara ait SEM kesit görüntülerine aittir. Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplama deneylerinden elde edilen sonuçlardan NiBPT3, NiBPT5 ve NiBPT12 kodlu kaplamalar sırasıyla 24,8 μm, 23,7 μm ve 26,5 μm kalınlığa sahiptir. Bu üç kaplama numunesi içinden en yüksek kaplama kalınlığı değerine sahip olan numune NiBPT12 numunesidir. Bu kompozit kaplamada üç farklı parametrenin etkisi söz konusudur. Bunlar toz konsantrasyonu (TiO₂), karıştırma hızı ve yüzey aktif madde konsantrasyonudur. Seçilen numunelerdeki TiO₂ toz konsantrasyonu sabit iken diğer bir parametre olan karıştırma hızı 200 ve 400 d/dk olarak uygulanmıştır. Verilen üç kompozit kaplama tabakası kıyaslandığında karıştırma hızındaki değişimin kaplama kalınlığında değişime neden olduğu anlaşılmaktadır. Bir diğer parametre olan yüzey aktif madde sodyum dodesil sülfat (SDS), akımsız banyoda parçacıkların topaklanmasını ve kümelenmesini en aza indirmek amacıyla kullanılmıştır. SDS yüzey aktif madde konsantrasyonunun belirli bir seviyenin üzerine çıkması, banyo çözeltisinde nanopartiküllerin kümelenmesine neden olabilir. Bu durum, nanopartiküllerin homojen bir şekilde dağılmasını engelleyerek az sayıda mikro boşluk ile kaba parçacıkların oluşmasına yol açabilir [93]. Kompozit kaplamalar üzerindeki etkisi ise yüzey pürüzlülüğü ve aglomerasyonu dengelemek olacağından daha homojen ve üniform bir kaplama elde edilmesini desteklemektedir.

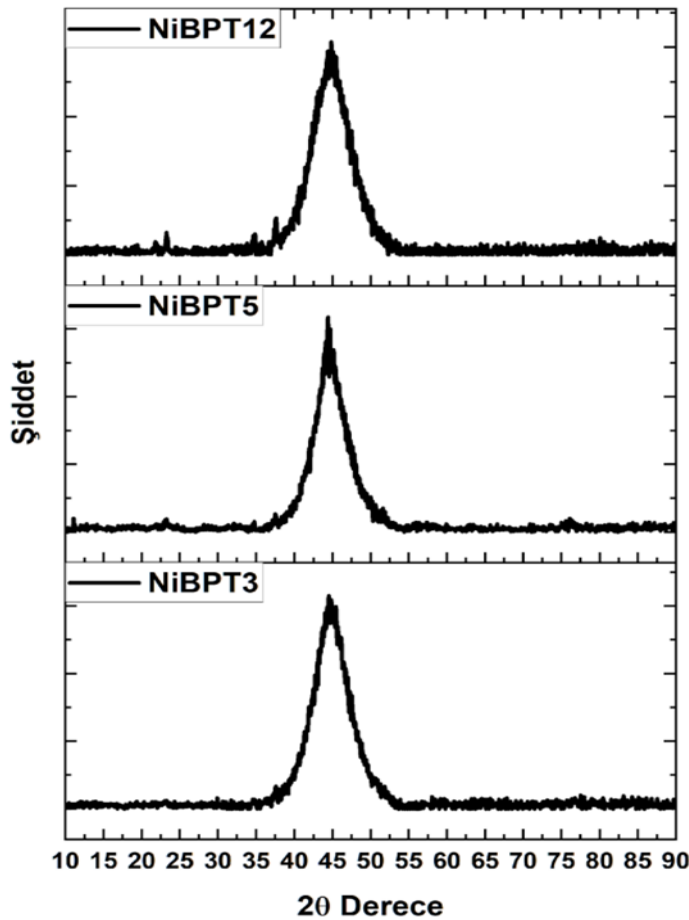


Şekil 5.2. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kaplamalara ait SEM kesit görüntüleri, a) NiBPT3, b) NiBPT5 ve c) NiBPT12.

5.2. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ Kaplamalara Ait Xrd Grafikleri

Faz analizleri ve kaplamaların kristalin yapılarını belirlemek için X-ışınları difraktometresi (XRD) analizi uygulanmıştır.

Şekil 5.3'te akımsız Ni-B-P-TiO₂ kaplamalara ait X-ışını kırınımı analizlerini (XRD) göstermektedir. Artan TiO₂ konsantrasyonu ile piklerin nispeten yayvan geniş piklerden daha keskin ve dik pikler haline geçiş yaptığı anlaşılmaktadır. $2\theta=44^\circ$ 'ye karşılık gelen pikler karakteristik nikel kırınım pikleridir. Bu durum, akımsız kaplama işlemi sonrasında nikelin başarıyla birikerek altlık yüzeyine tutunduğunu göstermektedir [94]. Kıyaslanan numuneler arasında kaplama tabakasına giren partikül miktarı açısından en yüksek TiO₂ içeriğine sahip olan numunede pik şiddeti diğer numunelere göre daha yüksektir. Bu durum Ni-B-P matrisi içerisine giren TiO₂ miktarı ile doğru orantılıdır. İlave edilen TiO₂ içeriğinin artması ile kaplama içerisinde bulunan TiO₂ oranı artmış ve XRD piklerinde TiO₂'ye ait olan kırınım zirvesinin şiddeti bu bağlamda yükselmiştir.



Şekil 5.3. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalara ait XRD analizleri.

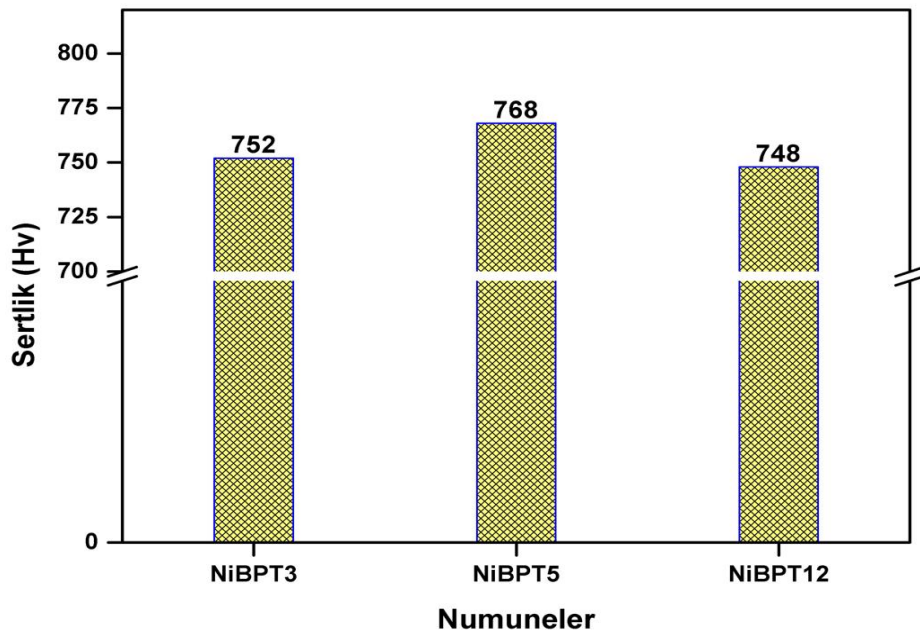
5.3. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ Kaplamalara ait Sertlik Grafikleri

Kaplama tabakasının sertliği Vickers sertlik analizi kullanılarak ölçülmüştür. Malzemenin üzerine kaplanan tabakanın sertliği, kesitin belirli bir süre ve yük altında kare piramit şeklindeki uçla batırılmasıyla belirlenmiştir. İşlem sonucunda elde edilen izin köşegen uzunlukları kullanılarak, aşağıda belirtilen formül doğrultusunda sertlik değerleri(VSD-Vickers Sertlik Değeri) hesaplanmıştır.

$$V = \frac{2P \sin(\frac{\alpha}{2})}{d^2} \quad (5.1)$$

Burada; P: kgf cinsinden uygulanan yük, a: tepe açısı, d: taban köşegen uzunluğu[(d₁+d₂)/2]

Şekil 5.4 akımsız Ni-B-P-TiO₂ kaplamalara ait sertlik grafiğini göstermektedir. NiBP-TiO₂ kompozit kaplama deneylerinden elde edilen sonuçlardan NiBPT3, NiBPT5 ve NiBPT12 numaralı kaplamalar sırasıyla NiBPT3 için 752 HV, NiBPT5 için 768 HV ve NiBPT-2 için 748 HV olarak ölçülmüştür. Bu üç kompozit kaplama içerisinde en yüksek sertlik değerine sahip olan numune 768 HV sertlik ile NiBPT5 numunesidir. Bu kompozit kaplama çalışmaları üç farklı parametre ile gerçekleştirilmiştir. Toz konsantrasyonu (TiO₂), karıştırma hızı ve yüzey aktif madde konsantrasyonu çalışılan parametrelerdir. En yüksek sertlik elde edilen kompozit kaplama olan NiBPT5 kaplamasında 20 g/L TiO₂, 400d/dk karıştırma hızı ve 0,01 g/L yüzey aktif madde konsantrasyonu ile çalışılmış ve 768HV sertlik değeri elde edilmiştir.

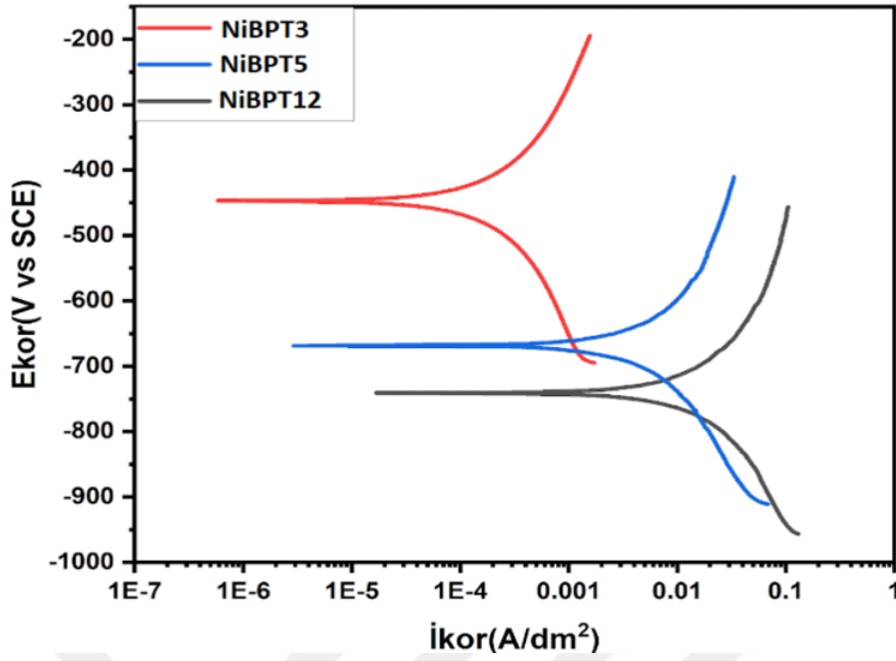


Şekil 5.4. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalara ait sertlik değerleri.

5.4. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ Kaplamalara Ait Korozyon Grafikleri

Korozyon hızlarının belirlemek için, potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) analizi uygulanmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, Gamry Interface 1000 Potansiyostat vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir ve tarama hızı 1 mV s^{-1} olarak ayarlanmıştır. Potansiyel, -100 mV ila 100 mV arasında taranmıştır. Tafel korozyon deneyleri, oda sıcaklığında, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi içinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri, üç elektrotlu bir sistem kullanılarak yapılmıştır. Bu sistemde, referans elektrot olarak doymuş bir kalomel elektrot (SCE), karşıt elektrot olarak grafit plaka ve çalışan elektrot olarak ise akımsız NiBP-TiO₂ kaplamalar kullanılmıştır.

Şekil 5.5 korozyon oranının belirlenmesi amacı ile yapılmış Tafel eğrilerine aittir. Tafel eğrilerini değerlendirebilmek için korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) değerlerini incelemek gerekmektedir. En yüksek potansiyel direnci ve en düşük korozyon akım yoğunluğuna sahip olan numunenin korozyon oranı en düşük olarak ele alındığı literatür tarafından bilinmektedir. Tafel eğrilerinden elde edilen sonuçlardan hareketle TiO₂ partiküllerinin korozyon korumasındaki gelişmeye önemli bir katkısı olduğu bilinmektedir. İlk olarak, TiO₂ partikülleri, korozyonun başlamasını ve ilerlemesini engelleyen inert fiziksel bariyerler olarak hareket eder ve bu da nikel tabakasının mikro yapısını değiştirir, dolayısıyla kaplamanın korozyon direncini artırır. İkinci olarak, TiO₂ partiküllerinin nikel tabakasında dağılması, TiO₂'nin standart potansiyelinin nikelden daha pozitif olması nedeniyle, TiO₂ partiküllerinin katot görevi gördüğü ve nikel metalinin anot görevi gördüğü birçok korozyon mikro hücresinin oluşmasına neden olur. Bu tür korozyon mikro hücreleri, anot polarizasyonunu kolaylaştırır. Bu nedenle, TiO₂ varlığında lokal korozyon engellenir ve esas olarak homojen korozyon meydana gelir.



Şekil 5.5. Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalara ait TAFEL eğrileri.

Akımsız Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamaların Taguchi analizleri sonucunda sertlik, korozyon ve kalınlık girdilerinin hepsini birden temsil edecek kompleks bir model elde edilememiştir. Her bir çıktı değişkeni için hesaplama denklemleri belirlenmiş ve bu denklemler dikkate alınarak tüm kombinasyonları içerecek şekilde deney faktörleri genişletilmiştir. Sertlik için hesaplanan eşitlik formülü;

$$\begin{aligned} \text{Sertlik} = & 705,12923330223 + 62,71389934676 \times A \\ & - 7,6110125829007 \times BC - 17,521635691675 \times B^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere sertlik için toz konsantrasyonu pozitif etki etmektedir. Kalınlık hesabı için eşitlik;

$$\begin{aligned} \text{Kalınlık} = & 20,451551657739 + 6,5665364663505 \times A + \\ & + 0,14456088337599 \times B - 0,20741250304827 \times C + \\ & + 0,63472472241801 \times AB - 0,960792500566 \times BC - \\ & ,30447894535137 \times A^2 - 1,8457224978806 \times C^2 - \\ & 2,7277454815491 \times A^2B \end{aligned} \quad (5.3)$$

Denklemler 5.3'te toz konsantrasyonu ve karıştırma hızı olumlu yönde, yüzey aktif madde konsantrasyonu ise olumsuz yönde etkilemektedir.

Ve Korozyon hesabı için;

$$\begin{aligned}
Korozyon = & 54,177028213118 - 33,363061930953 \times A \\
& + 0,25531078419689 \times B + 2,6994032239384 \times C \\
& + 14,159473981839 \times A^2 + 12,39577293015 \times B^2
\end{aligned}
\tag{5.4}$$

Denklem 5.4'e göre yüzey aktif madde konsantrasyonu ve karıştırma hızı olumlu yönde, toz konsantrasyonu olumsuz yönde etkilemiştir. Bu analizlere göre yapılan deneyler sonucunda oluşturulan ikinci dereceden modelin sertlik, korozyon ve kalınlık gibi yanıt değişkenleri için elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinde Yanıt Yüzeyi Yöntemi (YYY) uygulanmıştır.

Tablo 5.2. Üçüncü dereceden model için yanıt değişkenlerinin ANOVA sonuçları.

Kaynak	df	Sertlik		Kalınlık		Korozyon	
		F-değeri	p-değeri	F-değeri	p-değeri	F-değeri	p-değeri
Model	9	35,37	<0,0001	57,89	<0,0001	27,29	<0,0001
A:Toz Konsantrasyonu	1	163,45	<0,0001	433,86	<0,0001	116,79	<0,0001
B:Karıştırma Hızı	1	0,0018	0,9664	0,126	0,7293	0,0097	0,9229
C:Yüzey Aktif Madde Konsantrasyonu	1	0,8871	0,3622	0,5113	0,4895	0,9805	0,3389
AB	1	2,41	0,1387	2,47	0,1446	1,39	0,42
BC	1	2,34	0,1484	8,04	0,0162	5,9	0,0265
A2	1	6,39	0,14	0,3484	0,5669	8,44	0,0115
B2	1	6,92	0,0198	0,0014	0,9702	8,02	0,0133
C2	1	5,16	0,16	4,12	0,0672	0,9734	0,3377
A2B	1	7,18	0,12	14,44	0,0029	1,44	0,2472

Bu sonuçlara göre, istatistiksel olarak anlamsız faktörler modellerden çıkartılarak indirgenmiş bir model elde edilmiştir. Bu modelin sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir. F değeri, modelin veya faktörün önemini ölçen bir ölçüttür. Açıklanan varyans ile açıklanamayan varyansın oranını temsil eder. Daha büyük bir F değeri, modelin veya faktörün yanıt değişkenindeki varyasyonu açıklamada daha iyi olduğunu gösterir. Azaltılmış kare modellerin F değerleri, tam modellere göre artmıştır. Bu F değerlerindeki artış, azaltılmış modellerin yanıt değişkenlerindeki varyasyonu açıklamada tam modellerden daha iyi olduğunu gösterir. Anlamsız faktörleri ve etkileşimleri modelden çıkarılarak, uyumu iyileştirilmiş ve çıktıyı açıklama gücü geliştirilmiştir.

Tablo 5.3. İndirgenmiş ikinci dereceden model için yanıt değişkenlerinin ANOVA sonuçları.

Kaynak	df	Sertlik		Kalınlık		Korozyon	
		F-değeri	p-değeri	F-değeri	p-değeri	F-değeri	p-değeri
Model	5	148,26	<0,0001	63,83	0,0196	42,5	<0,0001
A:Toz Konsantrasyonu	1	703,19	<0,0001	649,75	<0,0001	27,87	<0,0001
B:Karıştırma Hızı	1	160,39	<0,0001	409,57	<0,0001	11,96	0,0023
C:Yüzey Aktif Madde Konsantrasyonu	1	244,22	<0,0001	22,05	0,0001	50,67	<0,0001
BC	1	189,53	<0,0001	64,89	<0,0001	27,36	<0,0001
B2	1	110,5	<0,0001	21,38	0,0001	8,31	0,0126

Uygunluk istatistikleri Tablo 5.4'te verilmiştir ve bu istatistikler üç yanıt değişkeni olan sertlik, kalınlık ve korozyon için uygunluğu gösteren bilgiler sağlar. Standart sapma (Std. Dev.), ortalama ve varyasyon katsayısı (C.V. %), verilerin dağılımı ve merkezi eğilimlerinin ölçütleridir. Varyasyon katsayısı, üç yanıt değişkeni arasında en düşük varyasyona (Sertlik için %2,05), korozyonun ise en yüksek varyasyona (%13,20) sahip olduğunu gösterir. Ortalama değerler, örneklerin ortalama sertliği 698,80 HV, kalınlığı 18,74 μm ve korozyon hızı $70,15 \times 10^{-5}$ mpy olduğunu gösterir.

Tablo 5.4. Modellerin uyum istatistikleri.

	Sertlik	Kalınlık	Korozyon
Standart sapma	14,16	0,9129	9,26
Ortalama	689,8	18,74	70,15
Varyasyon katsayısı %	2,05	4,87	13,2
R2	0,9217	0,9768	0,907
Ayarlanmış R2	0,9071	0,9599	0,8737
Tahmin edilen R2	0,8835	0,9355	0,8189
Uygunluk hassasiyeti	23,78	25,6382	16,6126



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalar için banyo parametrelerinden TiO₂, karıştırma hızı ve yüzey aktif madde konsantrasyonu değişken olarak seçilmiş ve taguchi yöntemi ile reçeteler hazırlanmıştır. Bu reçeteler doğrultusunda akımsız kaplama yöntemi ile 6XXX serisi alüminyum altlık üzerine Ni-B-P-TiO₂ kompozit kaplamalar başarı ile üretilmiştir.

Üretilen bu kaplamaların karakterizasyon çalışmalarında seçim kriteri olarak her çıktı değeri için en iyi performansı gösteren numuneler seçilerek yüzey morfolojileri (SEM), kristal yapıları (XRD), kesit görüntüleri (SEM), sertlik değerleri (HV) ve korozyon direnci değerleri (TAFEL) incelenmiştir. Bu kapsamda en iyi korozyon direnci için NiBPT3 kodlu numune, en iyi sertlik için NiBPT5 ve en iyi kalınlık için ise NiBPT12 kodlu numune seçilmiştir.

NiBPT3- NiBPT5- NiBPT12 numaralı kaplamaların sertlik değerleri sırasıyla 752 HV, 768 HV ve 748 HV olarak ölçülmüştür. NiBPT5 kaplamasında 20 g/L TiO₂, 400 d/dk karıştırma hızı ve 0,01 g/L yüzey aktif madde konsantrasyonu ile çalışılmış ve 768HV sertlik değeri elde edilmiştir. Değişken parametrelerden olan yüzey aktif madde konsantrasyonu miktarı azaldıkça sertlik değeri artarken karıştırma hızı arttıkça kaplamanın sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

XRD analiz sonuçlarına göre, TiO₂ miktarının artışıyla birlikte kaplama içindeki TiO₂ oranı yükselmiş ve buna bağlı olarak TiO₂'nin kırınım zirvelerinin şiddeti artmıştır.

NiBPT3- NiBPT5- NiBPT12 numaralı kaplamaların kalınlık değerleri sırasıyla 24,8 µm, 23,7 µm ve 26,5 µm olarak ölçülmüştür. Numunelerdeki TiO₂ toz konsantrasyonu sabit tutulurken, karıştırma hızı iki farklı değerde, yani 200 ve 400 d/dk olarak uygulanmıştır. Yapılan incelemeler, karıştırma hızındaki değişikliğin kaplama kalınlığını etkilediğini ortaya koymuştur.

SEM görüntüleri incelendiğinde NiBPT5 numaralı kaplamanın daha homojen ve üniform kaplandığı görülmektedir bu da SDS'nin kompozit kaplamalarda yüzey

pürüzlülüğünü ve aglomerasyonu dengeleyerek daha homojen ve üniform kaplamaların elde edilmesini sağladığı sonucuna varılmıştır.

TAFEL eğrileri ve SEM görüntüleri incelendiğinde yüzey hareketle TiO_2 partiküllerinin korozyon korumasındaki gelişmeye önemli bir katkısı olduğu gözlemlenmiştir.

Akımsız kaplama yöntemi ile malzemeler homojen bir şekilde kaplanabilirken bu kaplama yönteminin banyoları birden fazla kullanılabilir olduğu için de düşük maliyetlidir. Düşük sertlik ve düşük ergime sıcaklığına sahip olan alüminyum otomotiv, havacılık ve savunma sanayi alanında hafifliği sebebiyle en çok tercih edilen malzemedir. Alüminyum gibi bir önceki cümlede bahsedilen sektörlerde kullanılan malzemelerin özelliklerini geliştirebilmek adına yüksek sertlik değerine ve yüksek ergime sıcaklığına sahip seramik bir malzeme olan TiO_2 ile kaplamalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M. Schlesinger, M. Paunovic, Modern Electroplating: Fifth Edition, Mod. Electroplat. Fifth Ed. (2011). <https://doi.org/10.1002/9780470602638>.
- [2] Ç. Çakanyıldırım, M. Gürü, Alüminyum Üretim Teknolojilerindeki Gelişmeler, Çevreye Etkisi ve Uygulama Alanları, Politek. Derg. 24 (2021) 585–592. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.707885>.
- [3] M.P. Martínez-Viademonte, S.T. Abrahimi, T. Hack, M. Burchardt, H. Terryn, A Review on Anodizing of Aerospace Aluminum Alloys for Corrosion Protection, Coatings 2020, Vol. 10, Page 1106 10 (2020) 1106. <https://doi.org/10.3390/COATINGS10111106>.
- [4] A.A. Tracon, Coatings Technology-Fundamentals, Testing, and Processing techniques, Coatings Technol. Testing, Process. Tech. 238 (2007) 284.
- [5] R. Asthana, A. Kumar, N.B. Dahotre, Coatings and Surface Engineering, Mater. Process. Manuf. Sci. (2006) 313–395. <https://doi.org/10.1016/B978-075067716-5/50007-8>.
- [6] R. Parkinson, Properties and applications of electroless nickel Nickel Development Institute Properties and applications of electroless nickel, (n.d.).
- [7] J. Sudagar, J. Lian, W. Sha, Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review, J. Alloys Compd. 571 (2013) 183–204. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2013.03.107>.
- [8] A. Kahriman, E. Avcı, Ak{\i}ms{\i}z Nikel Kaplamalar Tarihçesi, Geli{\c{s}}imi ve Banyo Bile{\c{s}}enleri, Yüzey {\i}lemler Derg. 42 (2005) 50–54.
- [9] J.R. Henry, Electroless (autocatalytic) plating, Met. Finish. 100 (2002) 409–420. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)82044-X](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)82044-X).
- [10] R.C. Agarwala, V. Agarwala, Electroless alloy/composite coatings: A review, Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci. 28 (2003) 475–493. <https://doi.org/10.1007/BF02706445/METRICS>.
- [11] H. Gul, H. Algul, A. Akyol, M. Uysal, A. Alp, Evaluation of wear and corrosion behavior of electroless Ni-B-P/CNT composite coatings on aluminum surfaces, Diam. Relat. Mater. 137 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2023.110075>.
- [12] V. Vitry, (PDF) Electroless Nickel-Boron deposits: Synthesis, formation and characterization; Effect of heat treatments; Analytical modeling of the structural state, (2010). https://www.researchgate.net/publication/274083317_Electroless_Nickel-Boron_deposits_Synthesis_formation_and_characterization_Effect_of_heat_treatments_Analytical_modeling_of_the_structural_state (accessed December 26, 2024).

- [13] Ş. Macit, Investigating and development of electroless plating catalyst and activation solution in electroplating industry, (2017). <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/369354> (accessed December 23, 2024).
- [14] L.J. Durney, Graham's electroplating engineering handbook, Springer Science & Business Media, 1984.
- [15] T. Danışmanı, Y. Doç, İ. Gürlü, A. Aydın, E. Mühendisliği, A. Dalı, İ. Güvenliği, S. Yüksek, L. Programı, Zn-Ni kaplama tesislerinde iş sağlığı ve güvenliği, (2015). <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/622333> (accessed December 23, 2024).
- [16] N. Özer, YAPI MALZEMELERİNDE KOROZYON VE KOROZYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Derg. 26 (2021) 1159–1178. <https://doi.org/10.17482/UUMFD.796947>.
- [17] H. Simsek, A. Ozturk, INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MHD SLIP FLOW ON HEAT TRANSFER BETWEEN PARALLEL PLATES WITH SECOND-ORDER SLIP BOUNDARY CONDITIONS, Heat Transf. Res. 52 (2021) 13–30. <https://doi.org/10.1615/HEATTRANSRES.2021036940>.
- [18] Ö. Karakas, Consideration of mean-stress effects on fatigue life of welded magnesium joints by the application of the Smith–Watson–Topper and reference radius concepts, Int. J. Fatigue 49 (2013) 1–17. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2012.11.007>.
- [19] M. Uyanik, SiC nanopartikül ilaveli asitli çinko kaplama banyolarında yapılan kaplamaların malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması, (2012). <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/387195> (accessed December 23, 2024).
- [20] F. Russo, Innovative composite enamel coatings with improved abrasion resistance and mechanical properties, (2023).
- [21] G. Yan, Y. Wu, W. Liu, W. Yu, S. Shen, Stress evolution in enamel coating/Ni-based alloy systems during isothermal oxidation, J. Appl. Phys. 135 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0185084/3266879>.
- [22] L. Pawlowski, The science and engineering of thermal spray coatings, John Wiley & Sons, 2008.
- [23] H. Herman, S. Sampath, Thermal spray coatings, Metall. Ceram. Prot. Coatings (1996) 261–289. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1501-5_10.
- [24] Ö. Sayı, A. Kocatepe Üniversitesi, M. Bilimi ve Mühendisliği Böl, SOL-JEL YÖNTEMİYLE DÜŞÜK ERGİME SICAKLIKLIL SIR ÜRETİMİ, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilim. Derg. 9 (2009) 239–244. <https://dergipark.org.tr/en/pub/akufemubid/issue/1612/20181> (accessed December 23, 2024).
- [25] A. Coşğun, A. Taşçıoğlu, G. Yilmaz, B. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, F. Bilimleri Enstitüsü, İnce Film Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ve Çeşitleri, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg. 12 (2021) 351–363. <https://doi.org/10.29048/MAKUFEBED.861301>.

- [26] M.A. Al-Bukhaiti, K.A. Al-Hatab, W. Tillmann, F. Hoffmann, T. Sprute, Tribological and mechanical properties of Ti/TiAlN/TiAlCN nanoscale multilayer PVD coatings deposited on AISI H11 hot work tool steel, *Appl. Surf. Sci.* 318 (2014) 180–190. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.03.026>.
- [27] S. S, P. R, TRIBOLOGICAL EVALUATION OF WEAR RESISTANT PVD COATINGS, *J. Manuf. Eng.* 12 (2017) 99–102. <https://www.smenec.org/index.php/1/article/view/169> (accessed December 23, 2024).
- [28] A.M. Rashidi, A. Amadeh, The effect of current density on the grain size of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings, *Surf. Coatings Technol.* 202 (2008) 3772–3776. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2008.01.018>.
- [29] R. Child, Modern electroplating and electrofinishing techniques, *Met. Plat. Patination* (1993) 291–300. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1611-9.50028-5>.
- [30] R. Oriňáková, A. Turoňová, D. Kladeková, M. Gálová, R.M. Smith, Recent developments in the electrodeposition of nickel and some nickel-based alloys, *J. Appl. Electrochem.* 36 (2006) 957–972. <https://doi.org/10.1007/S10800-006-9162-7/METRICS>.
- [31] A. Lelevic, F.C. Walsh, Electrodeposition of NiP alloy coatings: A review, *Surf. Coatings Technol.* 369 (2019) 198–220. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.03.055>.
- [32] P. Sahoo, S.K. Das, Tribology of electroless nickel coatings – A review, *Mater. Des.* 32 (2011) 1760–1775. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2010.11.013>.
- [33] H. Nazari, G. Barati Darband, R. Arefinia, A review on electroless Ni–P nanocomposite coatings: effect of hard, soft, and synergistic nanoparticles, *J. Mater. Sci.* 2023 5810 58 (2023) 4292–4358. <https://doi.org/10.1007/S10853-023-08281-1>.
- [34] S.M. Monir Vaghefi, A. Saatchi, M. Ebrahimian-Hoseinabadi, Deposition and properties of electroless Ni–P–B₄C composite coatings, *Surf. Coatings Technol.* 168 (2003) 259–262. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00926-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00926-X).
- [35] H.C. Huang, S.T. Chung, S.J. Pan, W.T. Tsai, C.S. Lin, Microstructure evolution and hardening mechanisms of Ni–P electrodeposits, *Surf. Coatings Technol.* 205 (2010) 2097–2103. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2010.08.115>.
- [36] T.Y. Kim, H.J. Son, S.K. Lim, Y. Il Song, H.S. Park, S.J. Suh, Electroless Nickel Alloy Deposition on SiO₂ for Application as a Diffusion Barrier and Seed Layer in 3D Copper Interconnect Technology, *J. Nanosci. Nanotechnol.* 14 (2014) 9515–9524. <https://doi.org/10.1166/JNN.2014.10173>.
- [37] A. Brenner, *Electrodeposition of alloys: principles and practice*, Elsevier, 2013.
- [38] V. Vitry, L. Bonin, Formation and characterization of multilayers borohydride and hypophosphite reduced electroless nickel deposits, *Electrochim. Acta* 243 (2017) 7–17. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2017.04.152>.

- [39] A.M. Fundo, L.M. Abrantes, The electrocatalytic behaviour of electroless Ni–P alloys, *J. Electroanal. Chem.* 600 (2007) 63–79. <https://doi.org/10.1016/J.JELECHEM.2006.03.023>.
- [40] V.B. Chintada, T.R. Gurugubelli, M.R. Tamtam, R. Koutavarapu, Advancements in Nickel-Phosphate/Boron Based Electroless Composite Coatings: A Comprehensive Review of Mechanical Properties and Recent Developments, *Mater.* 2023, Vol. 16, Page 6116 16 (2023) 6116. <https://doi.org/10.3390/MA16186116>.
- [41] J.B. Mallory, Gleen o, Hajdu, 'Electroless Plat. Fundam. Appl. 1st Ed. Am. Electroplat. Surf. Finish. Soc. (1990).
- [42] G. Gutzeit, Catalytic nickel deposition from aqueous solution. I-IV, *Plat. Surf. Finish* 46 (1959) 1158–1164.
- [43] Q. Barati, S.M.M. Hadavi, Electroless Ni-B and composite coatings: A critical review on formation mechanism, properties, applications and future trends, *Surfaces and Interfaces* 21 (2020) 100702. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2020.100702>.
- [44] H. Algül, Akımsız kaplama yöntemi ile seramik partikül takviyeli nikel esaslı kompozit kaplamaların geliştirilmesi, (2020). <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/96799> (accessed December 24, 2024).
- [45] M. Yan, H.G. Ying, T.Y. Ma, Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni–P coating, *Surf. Coatings Technol.* 202 (2008) 5909–5913. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2008.06.180>.
- [46] R.M. Allen, J.B. VanderSande, The structure of electroless Ni-P films as a function of composition, *Scr. Met. (United States)* 16:10 (1982) 1161–1164. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(82\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0036-9748(82)90088-6).
- [47] L. Wang, L. Zhao, B. Zhang, W. Hu, X. Shu, X. Sheng, Z. Fang, Crystallization study of electroless Fe–Sn–B amorphous alloy deposits, *J. Alloys Compd.* 287 (1999) 234–238. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(99\)00064-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(99)00064-X).
- [48] A. Akyol, H. Algul, M. Uysal, H. Akbulut, A. Alp, A novel approach for wear and corrosion resistance in the electroless Ni-P-W alloy with CNFs co-depositions, *Appl. Surf. Sci.* 453 (2018) 482–492. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2018.05.152>.
- [49] C.T. Dervos, J. Novakovic, P. Vassiliou, Vacuum heat treatment of electroless Ni–B coatings, *Mater. Lett.* 58 (2004) 619–623. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00581-0](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00581-0).
- [50] K. Krishnaveni, T.S.N. Sankara Narayanan, S.K. Seshadri, Electroless Ni–B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance, *Surf. Coatings Technol.* 190 (2005) 115–121. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2004.01.038>.
- [51] P.G. Venkatakrishnan, M.S.S. Nazirudeen, S. Narayanan, Electroless Ni-BP ternary alloy coatings: preparation and evaluation of characteristic properties, *Eur J Sci Res* 82 (2012) 506–514.

- [52] G. Stremsdoerfer, H. Omidvar, P. Roux, Y. Meas, R. Ortega-Borges, Deposition of thin films of Ni–P and Ni–B–P by dynamic chemical plating, *J. Alloys Compd.* 466 (2008) 391–397. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2007.11.052>.
- [53] H. Algul, M. Uysal, A. Alp, A comparative study on morphological, mechanical and tribological properties of electroless NiP, NiB and NiBP coatings, *Appl. Surf. Sci. Adv.* 4 (2021) 100089. <https://doi.org/10.1016/J.APSADV.2021.100089>.
- [54] J.N. Balaraju, T.S.N. Sankara Narayanan, S.K. Seshadri, Electroless Ni-P composite coatings, *J. Appl. Electrochem.* 33 (2003) 807–816. <https://doi.org/10.1023/A:1025572410205/METRICS>.
- [55] M.A. Shoeib, M.M. Kamel, S.M. Rashwan, O.M. Hafez, Corrosion behavior of electroless Ni–P/TiO₂ nanocomposite coatings, *Surf. Interface Anal.* 47 (2015) 672–680. <https://doi.org/10.1002/SIA.5764>.
- [56] J. Hosseini, A. Bodaghi, Corrosion behaviour of electroless Ni–P–TiO₂ nanocomposite coatings using Taguchi, <https://doi.org/10.1179/1743294412Y.0000000093> 29 (2013) 183–189. <https://doi.org/10.1179/1743294412Y.0000000093>.
- [57] X. Yuan, Z. Hua, L. Wang, D. Sun, S. Chen, Effect of Nano-Al₂O₃ Particles on the NiP/nano-Al₂O₃ Coatings' Properties, *Appl. Mech. Mater.* 66–68 (2011) 1668–1675. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.66-68.1668>.
- [58] X. Yu, H. Wang, Z. Yang, P. Yin, X. Xin, XPS and AES investigation of two electroless composite coatings, *Appl. Surf. Sci.* 158 (2000) 335–339. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00114-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00114-8).
- [59] H. Ashassi-Sorkhabi, M. Es'haghi, Corrosion resistance enhancement of electroless Ni–P coating by incorporation of ultrasonically dispersed diamond nanoparticles, *Corros. Sci.* 77 (2013) 185–193. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2013.07.046>.
- [60] J.K. Pancrecious, S.B. Ulaeto, R. Ramya, T.P.D. Rajan, B.C. Pai, Metallic composite coatings by electroless technique – a critical review, <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1506692> 63 (2018) 488–512. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1506692>.
- [61] A. Szasz, D.J. Fabian, Z. Paal, J. Kojnok, Chemical mechanisms in electroless deposition: A study on the role of hydrogen in layer formation, *J. Non. Cryst. Solids* 103 (1988) 21–27. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(88\)90411-5](https://doi.org/10.1016/0022-3093(88)90411-5).
- [62] B. Oraon, G. Majumdar, B. Ghosh, Improving hardness of electroless Ni–B coatings using optimized deposition conditions and annealing, *Mater. Des.* 29 (2008) 1412–1418. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2007.09.005>.
- [63] M. Palaniappa, S.K. Seshadri, Friction and wear behavior of electroless Ni–P and Ni–W–P alloy coatings, *Wear* 265 (2008) 735–740. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2008.01.002>.
- [64] V.V.N. Reddy, B. Ramamoorthy, P.K. Nair, A study on the wear resistance of electroless Ni–P/Diamond composite coatings, *Wear* 239 (2000) 111–116. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00330-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00330-6).

- [65] P. Makkar, R.C. Agarwala, V. Agarwala, Wear characteristics of mechanically milled TiO₂ nanoparticles incorporated in electroless Ni–P coatings, *Adv. Powder Technol.* 25 (2014) 1653–1660. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2014.05.018>.
- [66] X. Shu, Y. Wang, C. Liu, W. Gao, Microstructure and properties of Ni–B–TiO₂ nano-composite coatings fabricated by electroless plating, *Mater. Technol.* 30 (2015) A41–A45. <https://doi.org/10.1179/1753555714Y.0000000190>.
- [67] D. Ekmekci, F. Bülbül, Preparation and characterization of electroless Ni–B/nano-SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ and CuO composite coatings, *Bull. Mater. Sci.* 38 (2015) 761–768. <https://doi.org/10.1007/S12034-015-0912-1/FIGURES/8>.
- [68] K. Kato, Wear in relation to friction — a review, *Wear* 241 (2000) 151–157. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00382-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00382-3).
- [69] S. Wang, X. Huang, M. Gong, W. Huang, Microstructure and mechanical properties of Ni–P–Si₃N₄ nanowire electroless composite coatings, *Appl. Surf. Sci.* 357 (2015) 328–332. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.09.011>.
- [70] D. Mohanty, T.K. Barman, P. Sahoo, Tribological Behavior, Mechanical Properties and Electrochemical Corrosion Response of Ultrasonically Assisted TiO₂ Reinforced Electroless Ni–B Coatings, *J. Inst. Eng. Ser. D* 105 (2024) 1231–1242. <https://doi.org/10.1007/S40033-023-00508-4/FIGURES/12>.
- [71] I. Sivandipoor, F. Ashrafizadeh, Synthesis and tribological behaviour of electroless Ni–P–WS₂ composite coatings, *Appl. Surf. Sci.* 263 (2012) 314–319. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2012.09.051>.
- [72] Y. Mahton, M.A. Kamde, P. Saha, Influence of Cu addition on the microstructure, and corrosion behavior of electroless Ni–Cu–P coating on squeeze-cast Al–Cu–Mg alloy, *Surf. Coatings Technol.* 494 (2024) 131544. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2024.131544>.
- [73] Z. Yin, F. Chen, Effect of nickel immersion pretreatment on the corrosion performance of electroless deposited Ni–P alloys on aluminum, *Surf. Coatings Technol.* 228 (2013) 34–40. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2013.04.001>.
- [74] V.V.T. Padil, M. Černík, Green synthesis of copper oxide nanoparticles using gum karaya as a biotemplate and their antibacterial application, *Int. J. Nanomedicine* 8 (2013) 889–898. <https://doi.org/10.2147/IJN.S40599>.
- [75] G.E.P. Box, The Exploration and Exploitation of Response Surfaces: Some General Considerations and Examples, *Biometrics* 10 (1954) 16. <https://doi.org/10.2307/3001663>.
- [76] R.H. Myers, D.C. Montgomery, C.M. Anderson-Cook, Building Empirical Models, *Response Surf. Methodol. Process Prod. Optim. Using Des. Exp.* (2016) 13–62. https://books.google.com/books/about/Response_Surface_Methodology.html?hl=tr&id=T-BbCwAAQBAJ (accessed December 24, 2024).
- [77] A.I. Khuri, S. Mukhopadhyay, Response surface methodology, *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2 (2010) 128–149. <https://doi.org/10.1002/WICS.73>.

- [78] B. Liu, Q. Zhang, Y. Li, Y. Yang, T. Zhang, Y. Wang, Y. Shao, H. Sun, Z. Wang, F. Wang, Optimization of the Corrosion Resistance of Electroless Ni–W–P Coatings on Magnesium Alloys by the Response Surface Methodology, *Coatings* 2021, Vol. 11, Page 18 11 (2020) 18. <https://doi.org/10.3390/COATINGS11010018>.
- [79] S. Yazdani, V. Vitry, RSM models approach for optimization of the mechanical properties of electroless Ni-B-nanodiamond coating: An experimental and molecular dynamic simulation study, *Surf. Coatings Technol.* 452 (2023) 129133. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2022.129133>.
- [80] A. Farzaneh, M. Ehteshamzadeh, A.J. Cobley, Modelling of surfactants and chemistry for electroless Ni-P plating, *https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1287621* 34 (2018) 454–461. <https://doi.org/10.1080/02670844.2017.1287621>.
- [81] S. Wei, Microhardness of Electroless Composite Coating of Ni-P with SiC Nano-Particles, *Adv. Mater. Res.* 662 (2013) 223–226. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.662.223>.
- [82] J. Homepage, A. Mostafapour, M. Moradi, H. Kamali, M.S. Meiabadi, A. Kaplan, Multi-response Optimization of the Mechanical and Metallurgical Properties of Al7075-T6 Deposition Process on Al2024-T351 by Friction Surfacing Using RSM and the Desirability Approach, *Iran. J. Mater. Form.* 7 (2020) 100–115. <https://doi.org/10.22099/IJMF.2020.35736.1146>.
- [83] J. Homepage, M. Vahdati, M. Moradi, Statistical Analysis and Optimization of the Yield Strength and Hardness of Surface Composite Al7075/Al2O3 Produced by FSP via RSM and Desirability Approach, *Iran. J. Mater. Form.* 7 (2020) 32–45. <https://doi.org/10.22099/IJMF.2020.35554.1143>.
- [84] J. Homepage, S.J. Hashemi, A.H. Roohi, R. Kermanshahi, Forming of Archimedean Spiral Bipolar Plates using Hot Gas Forming Process and its Characteristics Evaluation, *Iran. J. Mater. Form.* 8 (2021) 4–13. <https://doi.org/10.22099/IJMF.2020.36696.1154>.
- [85] B.N. Sharath, C.V. Venkatesh, A. Afzal, N. Aslfattahi, A. Aabid, M. Baig, B. Saleh, Multi Ceramic Particles Inclusion in the Aluminium Matrix and Wear Characterization through Experimental and Response Surface-Artificial Neural Networks, *Mater.* 2021, Vol. 14, Page 2895 14 (2021) 2895. <https://doi.org/10.3390/MA14112895>.
- [86] G.S.N. Rethnam, S. Manivel, V.K. Sharma, C. Srinivas, A. Afzal, R.K. Abdul Razak, S. Alamri, C.A. Saleel, Parameter Study on Friction Surfacing of AISI316Ti Stainless Steel over EN8 Carbon Steel and Its Effect on Coating Dimensions and Bond Strength, *Mater.* 2021, Vol. 14, Page 4967 14 (2021) 4967. <https://doi.org/10.3390/MA14174967>.
- [87] Z. Zhang, Y. Bai, Y. He, H. Li, Y. Fan, T. He, Using RSM optimization to fabricate Ni–Fe–P ternary alloy electroless coating and explore its corrosion properties, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 32 (2021) 26412–26424. <https://doi.org/10.1007/S10854-021-07020-Z/FIGURES/12>.

- [88] F. Davoodi, M. Atapour, F. Ashrafizadeh, R. Rikhtehgaran, Dry Sliding Wear Characteristics of NiP/TiN Duplex Coated Aluminum Alloy and Wear Analysis Using Response Surface Method, *J. Mater. Eng. Perform.* 31 (2022) 6360–6372. <https://doi.org/10.1007/S11665-022-06695-7/FIGURES/14>.
- [89] S. Sarkar, R. Mandal, N. Mondal, S. Chaudhuri, T. Mandal, G. Majumdar, Modelling and Prediction of Micro-hardness of Electroless Ni-P coatings Using Response Surface Methodology and Fuzzy Logic, *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* 16 (2022) 729–742. <https://portal.findresearcher.sdu.dk/en/publications/modelling-and-prediction-of-micro-hardness-of-electroless-ni-p-co> (accessed December 24, 2024).
- [90] A.R. Reghuraj, K.K. Saju, A. Ritwik, Taguchi method and Box-Behnken design approach for process parameter optimization of magnetite (Fe₃O₄) coating developed on stainless steel 410 grade by hot alkaline treatment, *https://doi.org/10.1177/09544089221119244* 237 (2022) 1583–1594. <https://doi.org/10.1177/09544089221119244>.
- [91] M. Salim, D.S. Saini, S.P.S. Matharu, M. Singh, Optimisation of Predicted Wear and Friction for Electroless Ni–P by RSM, Fuzzy Logic and ANFIS Using TOPSIS, *Trans. Indian Inst. Met.* 76 (2023) 2535–2548. <https://doi.org/10.1007/S12666-023-02990-6/FIGURES/12>.
- [92] G. Basmacı, İ. Kırbaş, M. Ay, M. Peker, Karma Taguchi ve yüzey yanıt yöntemi kullanılarak astm b574 (hastelloy c-22)’in tornalanması esnasındaki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu, *Sak. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.* 22 (2018) 761–771. <https://doi.org/10.16984/SAUFENBILDER.353379>.
- [93] P. Pandian, P. Sundaram, A. Sathishkumar, R. Prabakaran, P. Ganesh Kumar, S.C. Kim, A. Alodhayb, S. Pandiaraj, E. Rasu, M. Rajaraman, Effect of sodium dodecyl sulfate surfactant on the surface properties of electroless NiP-TiO₂-ZrO₂ composite coatings on magnesium AZ91D substrate, *Arab. J. Chem.* 16 (2023) 105028. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2023.105028>.
- [94] Q. Yuan, L. Yan, Y. He, S. Xu, Y. Sun, H. Liu, X. Hou, H. Zhou, X. Gong, Corrosion resistance of superhydrophobic Ni-B/TiC composite coatings prepared by electroless deposition, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 702 (2024) 135023. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2024.135023>.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İrem DİNÇ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği.
- **Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER

- Aralık 2023- Şubat 2024 yılları arasında Sunvell Enerji San ve Tic. A.Ş Kalite Kontrol Sorumlusu olarak çalıştı.
- Eylül 2024- halen Aksan Makina Demir Doğrama Mobilya Mühendislik Hizmetleri Sanayi Ve Ticaret Limited Şirketi'nde Kalite Kontrol Sorumlusu olarak çalışmaktayım.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

Response Surface Methodology for Optimizing Process Parameters to Enhance Morphological, Mechanical, and Corrosion Properties of Electroless Ni-B-P Coatings (Journal of Materials Engineering and Performance-revizyon)

Effect Of Surfactant Concentration And Heat Treatment Temperature On Hardness And Thickness Of Electroless Ni-B-P-B₄C Composite Coatings (NEM konferans)