



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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**POLİMER KAPLAMALARA KATILAN
NANOPARTİKÜLLERİN KAPLAMANIN FARKLI METAL
ALTLIKLARA YAPIŞMA DAVRANIŞI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Kemal ALTINOK

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK**

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222304713 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Ali Kemal ALTINOK** tarafından hazırlanan “**POLİMER KAPLAMALARA KATILAN NANOPARTİKÜLLERİN KAPLAMANIN FARKLI METAL ALTLIKLARA YAPIŞMA DAVRANIŞI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Şakir YAZMAN

Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 25/06/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr Mehmet Ali HINIS
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

Ali Kemal ALTINOK

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, epoksi malzeme içerisine katılan nanopartiküllerin kaplama performansına etkilerinin incelendiği deneysel bir araştırmadır.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca, tezin tüm aşamalarında değerli fikirleriyle destek olan, yol gösteren, birlikte çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK'e değerli katkılarından ve sabrından dolayı en içten teşekkürlerimi sunarım.

İmalat aşamasındaki desteklerinde dolayı Mysilo A.Ş. şirketine teşekkür ederim.

Hayatımın her alanında olduğu gibi tez çalışması süresince beni cesaretlendiren ve desteğiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Hatice Kübra ALTINOK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ali Kemal ALTINOK

AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK ARAŞTIRMA	3
2.1. Metal yüzeylerin kaplanması	3
2.2. Polimerik kaplamalar:	4
2.3. Nanokompozit Kaplamalar	6
2.4. Literatür özeti	8
2.4.1. Nanokompozit kaplamalarla ilgili yapılan çalışmalar.....	8
2.4.2. Bu çalışmanın literatürdeki yeri	14
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	16
3.1. Kullanılan Malzemeler	16
3.2. Kaplama Öncesinde Yüzey Hazırlığı.....	18
3.3. Nanokompozit Kaplamanın Hazırlanması Ve Uygulanması	18
3.4. Karakterizasyon Testleri	21
3.4.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi Analizi.....	21
3.4.2. Termogravimetrik Analiz	21
3.4.7. Dinamik Mekanik Analiz	22
3.4.3. Kaplama Kalınlığı Ölçümü.....	24
3.4.4. Kafes Çizgi Testi	25
3.4.5. Konik Bükme Testi	27
3.4.6. Tuzlu Su Sisi Testi.....	28
3.4.8. Darbe Testi.....	30
3.4.9. Nanoindentasyon (Nanosertlik) Testi	30
3.4.10. Mikroyapı Analizi.....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. FTIR Analizi Sonuçları	33
4.2. Termogravimetrik Analiz	33
4.3. Dinamik Mekanik Analiz	35
4.4. Kafes Çizgi Testi Sonuçları.....	36
4.5. Konik Bükme	39
4.6. Darbe Testi	42
4.7. Tuzlu Su Sisi Testi	44
4.8. Nano Sertlik Testi Sonuçları	46
4.9. SEM analizi sonuçları	47
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	49
5.1. Sonuçlar.....	50
5.2. Öneriler.....	52
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ.....	60

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİMER KAPLAMALARA KATILAN NANOPARTİKÜLLERİN KAPLAMANIN FARKLI METAL ALTLIKLARA YAPIŞMA DAVRANIŞI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Ali Kemal ALTINOK

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

ÖZET

Bu çalışmada, polimer malzemeye katılan Grafen nanoplaka (GNP), ZnO ve SiO₂ nanopartiküllerin kaplamanın farklı metal altlıklara yapışma davranışı ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, polimer matrise katılacak nanopartiküller ile elde edilecek yeni kompozit kaplamaların kullanılması sayesinde kaplamaların yüzeye tutunma davranışı ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve bu özellikleri en iyi şekilde sağlayan takviye ve altlık değişkenlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, ağırlıkça %1 oranında nanopartikül katılan epoksi kaplamalar hazırlanmış ve galvaniz kaplamalı çelik plaka (galvanizli sac) ve kaplamasız siyah çelik plaka (siyah sac) üzerine uygulanmıştır. Partikül katılan kompozit kaplamalara; kaplamaların yüzeye yapışma davranışını belirlemek için kafes çizgi testi (cross-cut), elastik özelliklerin belirlenmesi için konik bükme testi, korozyon direncini belirlemek için tuzlu su sisi testi, ani yük etkisindeki davranışını belirlemek için darbe testi ve kaplama sertliğinin belirlenmesi için nanosertlik testi uygulanmıştır. Ayrıca, kompozit kaplama malzemesinin karakterizasyonu amacıyla, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi, termogravimetrik analiz (TGA), dinamik mekanik analiz (DMA) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, katılan nano partiküllerin kaplamanın yapışma performansını ve mekanik özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nanokompozit Kaplama, Nanopartikül, Yapışma.

Haziran, 2024; 60 Sayfa

M.Sc. THESIS
**EXAMINATION OF THE EFFECTS OF NANOPARTICLES
INCORPORATED INTO POLYMER COATINGS ON THE ADHESION
BEHAVIOR AND MECHANICAL PROPERTIES ONTO DIFFERENT
METAL SUBSTRATES**

Ali Kemal ALTINOK

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

ABSTRACT

This study aims to investigate the effects of incorporating Graphene Nanoplatelets (GNP), ZnO, and SiO₂ nanoparticles into polymer materials on the adhesion behavior and mechanical properties of coatings on different metal substrates. Accordingly, through experimental investigations, the utilization of new composite coatings derived from nanoparticles incorporated into polymer matrices is targeted to enhance the adhesion behavior and mechanical properties of coatings. Moreover, the objective is to identify the reinforcement and substrate variables that optimize these properties.

In this study, epoxy coatings containing nanoparticle loading at a weight percentage of 1% were prepared and applied onto galvanized steel plates and uncoated black steel plates. Various tests were conducted on the composite coatings with incorporated particles to determine their adhesion behavior using cross-cut testing, elastic properties using cone bending testing, corrosion resistance using salt spray testing, behavior under sudden loading using impact testing, and coating hardness using nanoindentation testing. Additionally, for the characterization of the composite coating material, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis, thermogravimetric analysis (TGA), dynamic mechanical analysis (DMA), and microstructural analysis using scanning electron microscopy (SEM) were performed. The results obtained indicate that the addition of nanoparticles enhances the adhesion performance and mechanical properties of the coating.

Keywords: Composite coatings, Nanoparticle, Adhesion.

June, 2024; 60 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çeşitli yüzey hasarları ve korozyon örnekleri.	3
Şekil 2.2. Grafen oksit nanopartiküllerin elektrolitlerin metal altlığı ile iletimini sınırlandırması	7
Şekil 3.1. Kaplama uygulaması için hazırlanan plakalar; (a) galvanizli sac, (b) siyah sac.	16
Şekil 3.2. Mekanik karıştırıcı.	19
Şekil 3.3. Film aplikatörü ile kaplamanın uygulanması.	19
Şekil 3.4. Karakterizasyon testleri için hazırlanan test plakaları.	20
Şekil 3.5. Numune hazırlama adımları.	20
Şekil 3.6. Camsı geçiş bölgeleri.	23
Şekil 3.7. Kaplama kalınlık ölçüm metodu (URL-1).	24
Şekil 3.8. Kaplama kalınlık ölçümü.	25
Şekil 3.9. Kafes çizgi testi aplikatörü.	25
Şekil 3.10. Kafes çizgi testi uygulama adımları.	26
Şekil 3.11. EG numunesi için kafes çizgi testi örnek uygulaması; galvanizli sac yüzeyinde (b) ve siyah sac yüzeyinde (a).	27
Şekil 3.12. Konik bükme testi uygulama metodu.	28
Şekil 3.13. SE kaplaması için bükme testi uygulanmış numune.	28
Şekil 3.14. Tuz testi kabini.	29
Şekil 3.15. Tuz testi uygulanan numuneler.	29
Şekil 3.16. Tuzlu su sisi testi öncesi numuneler (a) siyah sac (b) galvanizli sac.	30
Şekil 3.17. EZ (siyah sac) numunesi için; darbe testi uygulanmış plakalar (a) 50 cm (b) 75 cm (c) 100 cm.	30
Şekil 3.18. Nanoindentasyon testi için hazırlanmış numuneler.	31
Şekil 3.19. Taramalı elektron mikroskobu.	32
Şekil 4.1. Kaplama numunelerine ait FTIR spektrumları.	33
Şekil 4.2. Numunelere ait TGA eğrileri.	34
Şekil 4.3. Numunelerin depolama modülü-sıcaklık grafiği.	35
Şekil 4.4. Numunelerin sönümlenme modülü $\tan(\delta)$ -sıcaklık grafiği.	36
Şekil 4.5. Galvanizli sac üzerine kafes çizgi testi testi uygulanan numuneler.	37
Şekil 4.6. Siyah sac üzerine uygulanan kafes çizgi testi uygulanan numuneler.	38
Şekil 4.7. Konik bükme testi uygulanan galvanizli sac üzerindeki numuneler.	40
Şekil 4.8. Konik bükme testi uygulanan siyah sac üzerindeki numuneler.	41
Şekil 4.9. Darbe testinin kaplamada meydana getirdiği hasar boyutları.	43
Şekil 4.10. Farklı yükseklik ve altlıklara ağırlık düşürme şeklinde yapılan darbe testinin kaplamada meydana getirdiği hasar boyutları.	44
Şekil 4.11. Tuzlu su sisi testi uygulanan galvanizli sac üzerindeki numuneler.	45
Şekil 4.12. Tuzlu su sisi testi uygulanan siyah sac üzerindeki numuneler.	46
Şekil 4.13. 2500x büyütme saf epoksi numuneye ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.	48
Şekil 4.14. EG numuneye ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri (a) 500x ve (b) 2500x.	48
Şekil 4.15. 5000x büyütme a) ES b) EZ nano partikül dağılımını gösteren SEM görüntüleri.	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı reçine tipleri ve özellikleri .	4
Çizelge 3.1. Epoksi reçine özellikleri.	17
Çizelge 3.2. Sertleştirici özellikleri.	17
Çizelge 3.3. Kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.	17
Çizelge 3.4. Belirlenen kaplama formülasyonları ve numune kodları.	18
Çizelge 3.5. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu (ASTM D 3359).	26
Çizelge 4.1. Numunelerin TGA sonuçları.	35
Çizelge 4.2. Kafes Çizgi Testi Sınıflandırması.	39
Çizelge 4.3. Konik bükme testi uygulanan numunelerin durumu.	42
Çizelge 4.4. Kapsama numunelerinin nano sertlik ve elastisite modülü değerleri.	47



SİMGELER VE KISALTMALAR

Al₂O₃	Alümina
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
cm	Santimetre
CNT	Karbon Nanotüp
ÇDKN	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
EİS	Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi
E'	Depolama Modülü
E''	Kayıp Modülü
Fe₂O₃	Demir Oksit
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GNP	Grafen Nanoplaka
GPa	Giga Paskal
GO	Grafen Oksit
Hz	Hertz
MPa	Mega Paskal
mm	Milimetre
mN	Milnewton
nm	Nanometre
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SiO₂	Silika
TGA	Termogravimetrik Analiz
Tg	Camsı Geçiş Sıcaklığı
TiO₂	Titanyum Oksit
WPE	Epoksi Eşdeğeri Başına Ağırlık
mPa·s	miliPaskal Saniye
ppm	Milyonda Bir Birim
APHA	Amerikan Halk Sağlığı Birliği
AHEW	Teorik Aktif Hidrojen Eşdeğeri
ZnO	Çinko Oksit
ZrO₂	Zirkonyum Oksit
δ	Delta
µm	Mikrometre
°C	Derece Santigrat
%	Yüzde

1. GİRİŞ

Metal yüzeylerin kaplanması, yüzeye farklı malzemeler uygulanarak koruma, estetik veya diğer özelliklerin artırılması amacıyla gerçekleştirilen bir işlemdir. Bu süreç, metal malzemelerin korozyona karşı direncini artırmak, aşınma dayanıklılığını güçlendirmek ve dekoratif özellikler eklemek için çeşitli tekniklerle uygulanır. Metal kaplama, endüstriyel, elektronik, otomotiv ve tıp gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal, ahşap, seramik, polimer gibi malzemelerin avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Genel olarak malzemelerin en önemli dezavantajı ortam koşullarıdır. Örnek olarak metal ve ahşap malzemeler nemden ve yağıştan olumsuz etkilenirler. Ahşap nemlendiğinde çürüyebilir veya fiziksel değişime uğrayabilir. Benzer şekilde metallerdeki korozyon nem ile doğrudan ilişkilidir. Korozyon, ekonomik açıdan yüksek bir maliyet oluşturmaktadır. Sadece malzeme güvenliği açısından değil, bu maliyeti azaltmak için de korozyon problemini gidermek ve metal yüzeylerin ömrünü artırmak oldukça önemlidir. Birçok uygulama, korozyon hızını düşürmek ve korozyonu kontrol altına almak için kullanılmasına rağmen bu alandaki iyileştirme çalışmaları sürmektedir. Yeni malzeme uygulamaları, farklı tasarımlar, malzemelerin farklı sektörlerde kullanılacak olması bu alandaki iyileştirmelerin devam etmesinin ardındaki en büyük etmendir.

Bu gibi olumsuz koşulları azaltmak adına insanlar tarih boyunca kullandıkları malzemelerin kullanım ömürlerini iyileştirici çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar ışığında kaplama alanında önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. Kaplamalar, metal ve metal olmayan yapıların yüzeylerine koruma veya dekorasyon amacıyla uygulanabilen ve endüstride yaygın olarak kullanılan koruma tabakalarıdır. Epoksi, akrilik, poliüretan ve polyester gibi reçineler bu amaçla kullanılan polimerik kaplama malzemeleri arasında yer alırlar. Polimer kaplamalardan beklenen ilk özellik uygulandığı metal yüzeye (altlığa) yapışmasının (adezyonun) yeterli seviyede olmasıdır. Kaplamanın metal yüzeye yeterli adezyonu göstermesi, servis ömrü süresince performansını doğrudan etkileyeceği için son derece önemlidir. Ancak epoksi gibi reçinelerin kürlenme sonrasında gösterdiği rijit ve gevrek yapı, kaplamanın mekanik direncini düşürmekte, aynı zamanda mekanik zorlamalar karşısında uygulandığı metal yüzeyden kolay ayrılmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda polimerik kaplamalara katılan nanopartiküllerin polimerik kaplamaların

korozyon direnci ve mekanik özelliklerinde iyileşmeye katkı sağladığı gösterilmiştir. Ancak bu özelliklerin yeterli seviyede olması başlangıçta kaplamanın yüzeye adezyonunun yeterince sağlanması ile mümkündür, aksi halde kaplama ne kadar güçlendirilirse güçlendirilsin beklenen performans elde edilemez. Bu nedenle bu tez çalışmasında, polimer kaplamalara katılan farklı türde nanopartiküllerin, kaplamaların uygulandığı galvanizli sac ve siyah sac metal altlıklara yapışma davranışları ve kaplamanın mekanik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır.

Bu tez çalışması, aşağıda açıklanan beş bölümden oluşmaktadır.

1. Bölümde, çalışmanın amacı ve içeriği hakkında bilgiler verilmiştir.
2. Bölüm’de, kaynaklar araştırılmış ve çalışma konusuyla ilgili yapılan uygulamalar ele alınmıştır. Ayrıca bu bölümde; nanokompozit kaplamalar, polimerik kaplamalar, epoksi kaplamalar, nanopartiküller hakkında bilgiler verilmiş ve bu tez çalışmasının literatürdeki yeri hakkında açıklama yapılmıştır.
3. Bölüm’de, deneylerde kullanılan malzemeler ve yöntemler detaylı olarak açıklanmıştır.
4. Bölüm’de, deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular incelenmiştir.

Sonuçlar ve öneriler bölümünde tez çalışmasından elde edilen sonuçlar verilmiştir. Yeni çalışmalara yardımcı olacağı düşünülen öneriler de bu bölümde yer almaktadır.

2. TEORİK ARAŞTIRMA

2.1. Metal Yüzeylerin Kaplanması

Metal malzemeler, günlük hayatta kullandığımız araç gereçlerden, otomotiv, gıda, kimya, havacılık, uzay gibi tüm sektörlerde çok yaygın kullanım alanı olan geniş bir malzeme sınıfıdır. Metal malzemeler, kullanıldıkları ortam, maruz kaldıkları mekanik ve kimyasal etkiler ve çevre koşullar nedeniyle çeşitli yüzey hasarları ve korozyona uğrarlar (Şekil 2.1). Metal malzemelere, bu etkilerden ve korozyondan korumak için kaplama işlemi uygulanır. Kaplama, metal ve çevresi arasında bariyer oluşturarak yüzeyi dış etkenlere karşı korur (Ranjith vd., 2010). Yüzeylere uygulanan kaplamalar yüzey özelliklerini geliştirmede oldukça etkindir.



Şekil 2.1. Çeşitli yüzey hasarları ve korozyon örnekleri.

Metal malzemelerin yüzeyleri metalik, organik veya inorganik malzemelerle kaplanabilir. Bu kaplama türleri arasında, uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle organik yani polimer esaslı kaplamalar en yaygın kullanılan kaplama türüdür. Diğer kaplama çeşitleri yanında son yıllarda kompozit kaplamalar konusunda yapılan çalışmaların arttığı görülmektedir. Kompozit kaplamalar ile ilgili çalışmalarda, mekanik ve tribolojik özelliklerin, korozyon ve oksidasyon direncinin geliştirilmesi sağlanarak, kaplamanın koruyucu performansını arttırmak, farklı

ortamlarda koruyuculuk sağlamak ve kaplamanın kullanım ömrünü arttırmak hedeflenmektedir.

2.2. Polimerik Kaplamalar

Polimerik kaplamalar metal yüzeylerin korunmasında en çok kullanılan kaplama türüdür. Gerek koruyucu gerekse dekoratif amaçlarla metal yüzeylere uygulanabilir. Polimerik kaplamalar, temel olarak matris (reçine), pigment, çözücü ve katkı maddelerinden oluşur. Bu bileşenlerin her biri kaplamanın özelliklerini ve fonksiyonlarını belirler. Metalik yüzeylerin kaplanmasında sıkça kullanılan polimerik reçineler arasında epoksi, akrilik, vinil ve poliüretan bulunur. Bu malzemeler farklı özelliklere sahiptir ve farklı uygulama alanlarına yöneliktir. Örneğin, yapışma özellikleri, mekanik dayanıklılık, korozyon direnci ve ultraviyole direnci gibi özellikler, polimerik reçineler arasında farklılık gösterir ve uygulama alanlarını belirler. Çizelge 2.1’de reçinelerin türleri ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı reçine türleri ve özellikleri (Paksoy, 2008).

Reçine türü	Özellikleri
Epoksi	İyi atmosferik korozyon direncine sahip, kimyasallara ve suya karşı dayanıklılığı yüksek, mükemmel yapışma özellikleri sunan, parlak ve yüksek darbe ile aşınma direnci gösteren bir malzeme, 105°C kuru ve 65°C ıslak sıcaklıklara dayanabilmektedir. Çelik ve betona çok iyi yapışma kapasitesi ile dikkat çeker.
Akrilik	Çok iyi ışık ve ultraviyole stabilitesi sayesinde parlaklığını ve rengini korur. Kimyasal ve atmosferik korozyona karşı yüksek direnç sergiler. Kimyasal gazlara ve agresif olmayan kimyasalların dökülme ve saçılmalarına karşı dayanıklıdır. Çapraz bağlanma ile kimyasal direnci daha da artırılabilir.
Vinil	Yağ, gres, alifatik hidrokarbon ve alkolde çözünmez, su ve tuz çözeltilerine karşı dayanıklıdır. Oda sıcaklığında inorganik asitlere ve alkalilere karşı direnç gösterir. Yanma direnci yüksektir, sağlam, esnek, düşük toksisiteye sahip, tatsız ve renksizdir. Endüstriyel boya olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir.
Alkit	Atmosferik korozyona karşı iyi direnç gösterir, kimyasal gazlara ise orta derecede dayanıklıdır ve kimyasal saçılmalara karşı yetersiz koruma sağlar. 105°C'ye kadar sıcaklığa dayanıklıdır. Endüstriyel bölgelerde yaygın olan hafif kimyasal gazlara karşı yeterli korozyon direnci sunar.
Poliüretan	Kimyasal olarak mükemmel parlaklık, renk ve ultraviyole direnci ile öne çıkar. Genel kimyasal ve nem dayanımı poliamid kürlenmeli epoksilere benzer. Mükemmel aşınma direnci sunar ve korozyon ortamlarda parlaklığını koruyan hızlı kürlenmiş son kat boya olarak kullanılır.

Matris malzemesi, kaplamayı bir arada tutan ve alt tabakaya yapışmayı sağlayan bileşendir. Termoplastik veya termoset polimerler matris olarak kullanılabilir. Termoplastik matrisler, içlerindeki çözücünün buharlaştırılmasıyla sertleşirler. Termoset matrisler ise uygulama sırasında veya sonrasında bir kimyasal reaksiyonla sertleşirler (Liang, 2008). Kaplama bileşiminde bulunan pigmentler, kaplamanın korozyon direncini, fiziksel özelliklerini ve görünümünü etkileyen inorganik veya organik bileşiklerdir. Solventler ise, kaplamanın geleneksel yöntemlerle uygulanabilmesi için viskozitesinin değiştirilmesine olanak sağlayan bileşenlerdir. Kaplama uygulandıktan sonra solventler buharlaşarak, yüzeyin ıslanmasını ve kaplamanın akışını ve uygulanmasını kolaylaştırır. Kaplama bileşiminde yer alan katkı maddeleri, küçük miktarlarda eklenmelerine rağmen, kaplamanın özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilen çeşitli kimyasallardır. Katkı maddeleri, kullanım amaçlarına göre değişiklik gösterebilir ve bu maddeler arasında sürfaktanlar, çökelmeyi önleyici maddeler, kaynaştırıcı ajanlar, sürtünme önleyici ajanlar, katalizörler, köpük gidericiler, ultraviyole ışık emicileri, dispersiyon ajanları, koruyucular, kurutucular ve plastikleştiriciler bulunabilir (Bayer ve Zamanzadeh, 2004).

Polimerik kaplamalarda en yaygın kullanılan reçinelerden birisi olan ve bu tez çalışmasında da matris olarak seçilen epoksi reçineler, polimerlerin ısısert plastik grubunda bulunan; yeterli termal kararlılığa, tribolojik davranışa ve kimyasal dirence sahip önemli bir matristir (Jiang vd., 2013). Ayrıca kolay uygulama, alt katmanlara iyi nüfuziyet ve düşük üretim maliyeti gibi pek çok avantaja sahiptir.

Epoksi sistemleri, epoksi reçine ve sertleştirici olmak üzere iki temel bileşenden oluşmaktadır. Epoksi reçine ile birlikte kullanılan sertleştiriciler genellikle amin/poliamin ve poliamid olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Poliaminler, kimyasallara ve çözücülere karşı daha yüksek direnç gösterirken, poliamidler suya karşı daha dayanıklı olup, aynı zamanda daha iyi elastikiyet ve yapışma özelliklerine sahiptir (Paksoy, 2008). Epoksi sistemlerin özelliklerini büyük ölçüde sertleştiriciler belirlemektedir. Bu nedenle, sınırlı sayıda epoksi reçinesi bulunmasına karşın, çeşitli sertleştirici türleri mevcuttur. Örneğin, aynı epoksi reçinesi iki farklı sertleştirici ile birleştirildiğinde, bir sistem kırılğan olurken, diğer sistem elastik özellikler sergileyebilir (Paksoy, 2008). Bunun yanı sıra, epoksi reçinelerin diğer polimerlerde olduğu gibi, yüksek çapraz bağlanmış yapısından kaynaklanan bazı zayıf yönleri

bulunmaktadır; düşük darbe dayanımı ve düşük kırılma tokluğu gibi özellikler bu zayıf yönler arasında yer alır. (Jiang vd., 2013; Haeri vd., 2016). Bu tip negatif yönleri azaltarak, daha yüksek mukavemet ve tokluğa sahip kaplamalar geliştirmek maksadıyla epoksi reçineye farklı nanopartiküller ilave ederek kompozit kaplamaların geliştirilmesi konusunda araştırmalar yapılmaktadır.

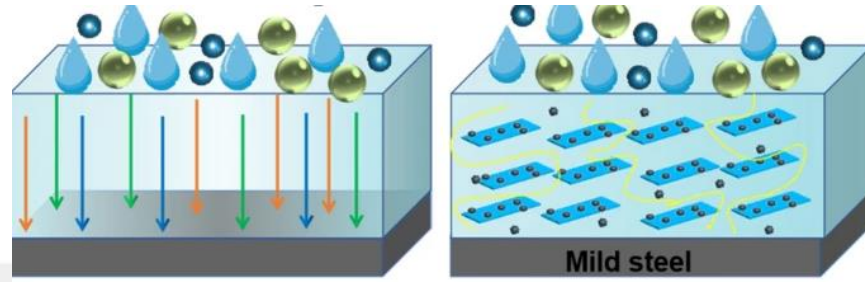
2.3. Nanokompozit Kaplamalar

Son yıllarda, nanoteknoloji en çok dikkat çeken bilim alanlarından biri haline gelmiştir. Malzemelerin nanoboyutta kullanılması, bu malzemelerin mekanik, kimyasal, optik, manyetik ve elektriksel özelliklerinde kayda değer değişiklikler meydana getirmektedir. Parçacık boyutu 100 nanometre ve daha küçük olan tozlar nanopartikül olarak adlandırılmaktadır. Nanoboyuttaki malzemelerin özellikleri, kütsel malzemelerden belirgin bir şekilde farklılık göstermektedir. Bu farklılığın temelinde iki ana neden bulunmaktadır. İlk olarak, nanoboyutlarda malzemelerin yüzey alanının artmasıyla birlikte yüzey enerjisi de artmakta ve bu durum malzemelerin daha reaktif olmasına yol açmaktadır. İkinci olarak, nanoboyutlara, özellikle nanoölçeğin alt seviyelerine inildikçe, kuantum etkileri malzemenin özelliklerinde daha belirgin hale gelmekte ve bu da malzemelerin optik, elektrik ve manyetik özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır.

Nanoteknolojinin ve nanomalzemelerin son yıllarda dahil olmaya başladığı alanlardan birisi de nanokompozit kaplamalardır. Kaplama endüstrisi son yıllarda, artan çevresel kaygılar ve ekonomik faktörler nedeniyle kaplamaların performansını geliştirmek amacıyla yeni teknoloji ve malzeme arayışına yönelmiştir. Kaplamaların performansını etkileyen faktörler arasında; kaplamanın kalitesi, uygulanacağı yüzeyin özellikleri, kaplama/alt tabaka arayüzey özellikleri ve ortamın korozyon özelliği sayılabilir (Tong vd., 2013). Kaplamaların beklenen özelliklerini iyileştirmek ve endüstriyel gereksinimleri karşılamak amacıyla, kaplama uygulamalarında polimer nanokompozitlerin kullanımı üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu ilgi, nanokompozitlerin nispeten düşük maliyetle üstün performans özellikleri sunabilmesinden kaynaklanmaktadır.

Nanokompozit kaplamalar, nanopartiküllerin polimer matrise eklenmesi ile oluşturulan ve polimer kaplamaların zayıf özelliklerini gidermek, korozyona karşı koruma performanslarını artırmak, mekanik, termal, yapışma davranışı gibi

özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilen kaplamalardır. Nanopartiküller, polimer matrise homojen olarak dağıtılarak mekanik mukavemeti artırabilir, çatlak oluşumunu azaltabilir, kimyasal direnci artırabilir ve korozyonu önemli ölçüde yavaşlatabilir. Şekil 2.2.'de grafen oksit içeren bir nanokompozit kaplamanın, korozyon oluşturabilecek elektrolitlerin iletim yolunu uzatarak kaplamanın korozyon direncini arttırması şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.2. Grafen oksit nanopartiküllerin elektrolitlerin metal altlığına iletimini sınırlandırması (Zhu vd., 2022).

Nanopartikül ilavesi reçinenin ayrışmasını önler ve homojen bir dağılım elde etmeye yardımcı olur, küreleşme sırasında oluşan lokal kusurların kapatılması için de olumlu katkı yapar. Ayrıca reçineye nanopartikül katılması delaminasyon ve kabarcıklanmayı önler (Shi vd., 2009). Son çalışmalarda, polimer nanokompozit esaslı elektroaktif kaplamaların geleneksel kaplamalardan çok daha düşük bir öz dirence sahip olduğu gösterilmiştir (Chen vd., 2020; Gandara vd., 2020; Zhang vd., 2021). Başarılı polimer nanokompozit kaplamaları tanımlamak için anahtar parametre, bunların metal veya diğer yüzeyler üzerine ne denli kolay ve verimli bir şekilde uygulanabilmeleridir (Fu vd., 2021; İftikhar vd., 2021). Ayrıca, birçok polimer nanokompozit kaplama geleneksel polimer kaplamalara benzer yollarla üretilebilir ve uygulanabilir, bu durum üretim ve uygulama açısından özellikle önemlidir (Hussain vd., 2006). Çeşitli endüstriyel uygulamalar için kendi kendini temizleme, sıcaklık direnci, aşınma direnci ve optik özellikler gibi fonksiyonel işlevler için farklı nanokompozit kaplamalar geliştirilmektedir.

Polimerik kaplamaların özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan nanokompozit kaplama araştırmalarında en yaygın kullanılan nanopartiküller arasında ZnO, TiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, ZrO₂, SiO₂, karbonnanotüpler ve grafen sayılabilir (Bensalah vd., 2014). Nanokompozit kaplamaların özellikleri; matrise katılan nanopartikülün türü, miktarı, boyutu, nanopartiküllerin hem birbiriyle hem de polimer matrisle uyumu gibi çeşitli

faktörlere bağlıdır. Ayrıca bu kaplamaların özelliklerini etkileyen en önemli konulardan birisi nanopartiküllerin matrisin içerisinde homojen olarak dağılmaması durumudur. Yapılan uygulamalarda nanopartiküllerin yüzey enerjileri ve yüzey alanları nedeniyle topaklanma eğilimi gösterdiği ve yapılan bir çalışmada, bu durumun olumsuz sonuçları rapor edilmiştir (Avella vd., 2001). Örneğin, karbon nanotüp ilavesi ile mekanik özelliklerde beklenin dışında azalma olduğu bunun da nanopartiküllerin homojen dağılmaması ve yükün polimer ile nanopartikül arasında iletileceği polimer-partikül ara yüzey etkileşiminin oluşmamasından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Zhou vd., 2019). Ultrasonik karıştırma ve nanopartikül miktarının olabildiğince düşük tutulması matrisin içerisinde nanopartiküllerin daha homojen bir şekilde dağıtılmaları için yapılabilecek uygulamalardır (Boumaza vd., 2016).

2.4. Literatür Özeti

2.4.1. Nanokompozit kaplamalarla ilgili yapılan çalışmalar

Günümüzün endüstriyel ve ekonomik faaliyetleri açısından bakıldığında, teknolojinin yaşam standartlarımızı belirleyen bir pencere açtığı görülmektedir. Bu gereksinimler altında, artan talepleri karşılamak için düşük maliyetli malzemelerin yanı sıra, yüksek performanslı alternatiflere de ihtiyaç duyulmaktadır.

Araştırmacılar, yüksek koruma performansına sahip ve kaplanan yüzeyde uzun süre etkisini koruyarak kalabilen nanokompozit kaplama üzerine yaptıkları çalışmalarda, nanokompozit kaplama sistemlerindeki özelliklerin, nanopartikülün morfolojisi, boyutları, en-boy oranları, kimyasal yapısı ve fonksiyonel grupları gibi özellikleri ile önemli derecede ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, nanokompozit kaplamalarda, nanopartiküllerin bu özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu yaklaşım, kaplama performansını ve dayanıklılığını artırarak korozyona ve mekanik zorlamalara karşı daha etkili koruma sağlayabilir (Kumar, vd., 2019).

Nanokompozit kaplamalar konusunda yapılan çalışmalarda elde edilen olumlu sonuçlar nedeniyle bu tez çalışmasında farklı tür ve geometrik yapıya sahip takviye malzemeleri olarak Grafen nano plaka (GNP), Silika (SiO₂) ve Çinko oksit (ZnO) nanopartiküller belirlenmiştir.

GNP, araştırmacıların nanokompozit kaplamalar konusunda son yıllarda üzerinde yoğunlaştığı nanopartiküllerden biridir. Grafen gibi iki boyutlu yapıya sahip

nanomalzemeler, kaplamaların bariyer performanslarını geliştirmek için önemli bir potansiyele sahiptir. Grafen, yüksek mekanik dayanıklılığı, mükemmel elektriksel özellikleri ve geniş yüzey alanı gibi özellikleri sayesinde araştırmalarda ve kaplama endüstrisinde dikkat çeken bir malzeme olmuştur. Özellikle korozyon önleyici kaplama uygulamalarında, grafen/polimer nanokompozitlerin kullanımı giderek popülerlik kazanmaktadır. Yapılan araştırmalar, grafenin homojen bir şekilde polimer matrise dağıtılması ile kaplamanın bariyer performansını arttırdığı ve böylece korozyon direncini geliştirdiğini göstermektedir (Lawal, 2019; Zhou vd., 2019; Zhan vd., 2018).

Bu tez çalışmasında kullanılan diğeri bir nanopartikül olan SiO₂ nanokompozit kaplamalar konusunda yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bir takviye malzemesidir. Polimer matrise katılan SiO₂'nin kompozitin özellikle mekanik özelliklerinde artışa ve bunun yanında korozyon direncinde iyileşmeye neden olduğu yönünde çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Taborda vd., 2021; Ma vd., 2021; Giraldo vd., 2017; Zarei vd., 2017; Safronova vd., 2021; Wu vd., 2019; Chrissafis, vd., 2009; Sargsyan, vd., 2007). Ayrıca SiO₂ nanopartiküllerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, SiO₂ katılan epoksi kompozit kaplamalarda, takviyesiz epoksiye göre kaplamada çizilme direnci ve darbe direncinde artış olduğu ifade edilmiştir (Boumaza vd., 2016; Zhang vd., 2006).

ZnO, bu tez çalışmasında kullanılan bir diğeri takviye malzemesidir. Bu nanopartikülün kullanıldığı çalışmaların, çinkonun galvanik özellikleri nedeniyle, çoğunlukla kaplamanın koroziif özellikleri konusunda olduğu görölmektedir. Yapılan çalışmalarda ZnO ile güçlendirilen polimer matrisin metal altlık yüzeyinde hem galvanik hem de bariyer koruması sağlayarak kaplamanın korozyon direncini arttırdığı ifade edilmiştir (Ramezanzadeh vd., 2011). ZnO katılan kompozit kaplamalarda koroziif özellikler yanında mekanik özelliklerin de iyileştiğini ortaya koyan çalışmalar bulunmaktadır (Vu vd., 2018).

Yapılan literatür taraması sonucunda, bu tez çalışmasında belirlenen nanopartiküllerin kullanıldığı nanokompozit kaplamalarla ilgili olduğu görölen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Abakah ve arkadaşları, epoksi matrise, farklı özelliklere sahip üç ayrı grafen nanopartikül (C750; 2 µm, M15; 15µm ve X50; 150µm) katarak hazırladıkları

kompozit kaplamanın metal altlığa yapışma davranışı ve korozyon performansını incelemişlerdir. Korozyon direncini belirlemek amacıyla tuzlu su sisi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) testleri uygulamışlar ve C750 GNP ile takviye edilen kaplamanın, saf epoksi kaplamanın korozyon önleme performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuşlardır. GNP takviyeli kompozit kaplamaların oluşturduğu sağlam pasif katman ve bariyer özellikleri, korozyon direncindeki artışın esas nedeni olarak açıklanmıştır. Aynı zamanda, C750 GNP/epoksi kompozit kaplamalardaki homojen dağılım ve daha az topaklanmanın da kaplamanın korozyon direncine katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Bunun yanısıra çalışmada, daha küçük parçacık boyutuna ve daha yüksek ortalama yüzey alanına sahip olan C750 GNP'nin korozif maddelerin daha derine nüfuz etmesini engelleyen bir bariyer koruması sağladığı, daha büyük boyutlu GNP'lerin (X50 ve M15) ise epoksi kompozitlerdeki mikro gözenekleri ve boşlukları dolduramadığı için zayıf korozyon özellikleri gösterdiği rapor edilmiştir. Öte yandan, hazırlanan tüm GNP/epoksi kaplamaların, hem kuru hem de ıslak testler sırasında alt tabakaya saf epoksiden çok daha güçlü yapıştığını belirleyen araştırmacılar, C750 GNP/epoksi kaplamanın yüzeye yapışma konusunda, M15 ve X50 GNP/epoksi kaplamalarla karşılaştırıldığında çok daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir (Abakah, 2021).

Ghauri ve arkadaşları polimer matrisli nanokompozit kaplama üzerine yaptıkları çalışmada, grafen oksiti epoksi matrise katarak film aplikatörü ile çeliğin üzerine kaplamışlardır. Grafen oksitin epoksi kaplamaya ağırlıkça %1 oranında dahil edilmesiyle, saf epoksi kaplamayla karşılaştırıldığında daha yüksek empedans değeri ve daha düşük korozyon oranı elde ettiklerini belirtmişlerdir (Ghauri vd., 2017).

Rajabi ve arkadaşları benzer şekilde, grafen oksiti mekanik karıştırma ile epoksi matris içine ağırlıkça %0,25 ekleyerek yaptıkları çalışmada, uygulanan kaplamanın korozyona karşı koruma özelliklerinin geliştirdiğini raporlamışlardır (Rajabi vd., 2015)

Barletta ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırmada, grafen ile takviye edilmiş epoksi kaplamaların çizilme direnci incelenmiştir. Araştırma sonuçları, grafenin çizilme görünürlüğünü azaltabildiğini ve bu sayede epoksi reçinelerin çizilme karşıtı özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Grafen benzeri malzemelerin yüksek spesifik mekanik özellikleri ve işlevselleştirme yetenekleri

sayesinde organik reçinelerle güçlü kovalent bağlar oluşturabilme potansiyeli, bu malzemeleri epoksi reçineler için son derece umut verici güçlendirici ajanlar haline getirmiştir. (Barletta vd., 2016).

Jiang ve arkadaşlarının, farklı en-boy oranlarına sahip grafen oksitleri (GO) takviye olarak kullandıkları çalışmada, GO'nun çeşitli ortamlarda homojen dağılım gösterebilme yeteneği, fiziksel bir bariyer işlevi görebilme kabiliyeti ve ticari olarak üretilme avantajı nedeniyle korozyon önleyici özellikleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, GO'lar, etanol içinde ultrasonik dispersiyona tabi tutulmuş ve daha sonra epoksi reçineye %0,1 ağırlık oranında eklenmiştir. GO'nun reçineye eklenmesinden sonra 30 dakika boyunca ultrasonik dispersiyon işlemi gerçekleştirilmiş ve ardından etanol uzaklaştırılmıştır. Sertleştirici ilave edildikten sonra karışım yüzeyi hazırlanan karbon çeliğine uygulanmış ve oda sıcaklığında 48 saat boyunca kürlenmiştir. Üç farklı boyut oranına sahip GO'nun katıldığı kompozit kaplamalar ile saf epoksi reçinenin kullanıldığı kaplamalar test edilmiştir. Sonuçlar, GO'nun ultrasonik karıştırma ile etkili bir şekilde dağıtıldığını ve en-boy oranındaki artışın korozyon performansını artırdığını göstermiştir. Yüksek en-boy oranlı GO'ların, korozif ortamın metale ulaşımını engelleyerek koruyucu bir etki sağladığı gösterilmiştir (Jiang vd., 2019).

Hayatdavoudi ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, epoksi kaplamaya grafen eklenmiş ve kaplamanın korozyon performansı değerlendirilmiştir. Grafen epoksi matrise ağırlıkça %0,4 oranında eklenmiş ve homojen bir şekilde dağıtılmıştır. Mekanik olarak bir saat boyunca karıştırılan bu karışıma sertleştirici ilave edilmiştir. Kaplanacak çelik yüzey önceden zımparalanmış ve kaplama sprey tabancası ile yüzeye uygulanmıştır. EIS ve tuz püskürtme testi ile kaplamanın korozyon önleme performansı analiz edilmiştir. Sonuçlar, grafen içeren kaplamanın korozyon performansında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermektedir (Hayatdavoudi ve Rahsepar, 2017).

TabkhPaz ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, metal altlık üzerine iki tabaka halinde kompozit kaplama uygulaması yapmışlardır. İlk tabakaya ağ. % 0; 0,5; 1; 2 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp (ÇDKN) (10-15 nm / 1-10µm) ve GNP (6 nm / 5µm) ile ağ. % 0; 5; 10; 20 oranlarında çinko (< 20 µm) partiküller ekledikleri kompozit kaplamayı, ikinci tabakaya ağ. % 0; 2, 5; 5; 10 oranlarında bor nitrür (1,5 µm)

ekledikleri kompozit kaplamayı uygulamışlardır. Bu çalışmada, ilk katmanın korozyon direncini artırması, ikinci katmanın ise korozyon direncinin yanı sıra mekanik özellikleri iyileştirmesi hedeflenmiştir. Kaplanmış numunelere gaz geçirgenliği, katodik ayrışma ve çizilme testleri uygulanmıştır. Araştırma sonuçları, nanopartiküllerin eklenmesinin gaz geçirgenliğinde yaklaşık %70 azalma ve çizilme direncinde yaklaşık %80 artış sağlayarak daha yüksek mekanik özellikler sunduğunu ortaya koymuştur. (TabkhPaz vd., 2018).

Askerden vd., (2022) epoksi matris kullanarak yaptıkları çalışmada, % 0,5, 1 ve 1,5 oranlarında ZnO nanopartikül katılarak elde edilen epoksi matrisli kompozit malzemenin özellikleri ve çelik yüzeyine uygulandıktan sonra kaplama özellikleri incelenmiştir. Kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme deneyi sonucunda en iyi özellikler ağ. %1 ZnO katılan kompozit malzemede elde edilmiş ve çekme dayanımı saf epoksiye göre %17,42 oranında artmıştır. Epoksi matrise katılan ZnO nanopartiküller en önemli etkiyi kaplamanın antikorozyf özellikleri üzerinde göstermektedir. Yapılan daldırma ve tuz sisi testlerinin her ikisinde de ağ. %1 oranında ZnO nanopartikül içeren kaplamaların korozyon direncinin saf epoksi ve diğer kompozit kaplamalardan daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sonuç, ZnO partiküllerin uygun oranda kullanılması durumunda, epoksi matris içinde bariyer etkisi ile korozyf iyonların kaplamada ilerlemesini zorlaştırdığını ve çelik yüzeyi koruduğunu göstermektedir. Daha yüksek oranda nanopartikül kullanılması topaklanmadan dolayı hem mekanik hem de antikorozyf özelliklerin zayıflamasına neden olmaktadır (Askerden vd., 2022).

Kalendová (2011) yaptığı çalışmada, farklı partikül boyutlarına sahip ZnO'nun katıldığı kompozit kaplamaların antikorozyf özelliklerini araştırmıştır. Matris olarak epoksi reçine kullanılan çalışmada, ZnO'nun partikül büyüklüğünün, kaplamanın mekanik özellikleri ve korozyon direncine etkileri incelenmiştir. Küçük partikül boyutlarının daha iyi antikorozyf ve mekanik özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur (Kalendová, 2011).

Samad ve arkadaşları, Ağırlıkça % 0,5 ve % 1 oranlarında ZnO nanopartikülleri içeren kaplamanın mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Numunelerin mekanik karakterizasyonlarını belirlemek için sertlik ve çizilme testleri yapılmıştır. Mekanik analiz sonuçları, ağ. % 1 oranında ZnO ilave edilmiş kaplamanın sertlik değerinin

0,180 GPa'dan 0,206 GPa'a çıktığını, çizilme direncinin ise takviye içermeyen kaplamaya göre % 15 oranında arttığını göstermiştir (Samad vd., 2018).

Vu ve arkadaşları çalışmalarında, karbon nanotüp ve ZnO nanopartikül takviyeli kaplamaların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, epoksi reçineye ZnO eklenmesinin karbon nanotüpe göre daha iyi mekanik özellikler verdiği, ZnO oranının da ağ. % 1'de en yüksek özellikleri sağladığı ifade edilmiştir (Vu vd., 2018).

Samad ve arkadaşları, ağırlıkça %0,5, %1, %2, %3, %4,5, %6 oranlarında ZnO partikülü epoksi matrise katarak yaptıkları kaplama çalışmasında, ZnO oranının etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, sırasıyla ağırlıkça %2 ve %1 nanopartikül katılan kaplamaların, mekanik özellikler bakımından en iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Nanopartikül miktarının artmasının epoksi matrisin kirlenmesini geciktirdiği aynı zamanda epoksinin çapraz bağ yoğunluğunda bir azalmaya neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca nanopartikül miktarındaki ağırlıkça %2'nin üzerindeki artışın, kaplamaların korozyon önleme performansında ciddi bir düşüşe neden olduğu belirtilmiştir. Mikroyapı analizlerinde, ZnO miktarı arttıkça, nanopartiküllerin boyutsal özelliklerinden kaynaklanan yoğun bir aglomerasyonun gözlemlendiği ifade edilmiş ve artan nanopartikül oranıyla kaplama özelliklerindeki düşüşün bundan kaynaklandığı belirtilmiştir (Samad vd., 2022).

El Saeed ve arkadaşları, hibrit nanopartikül (grafen oksit ve ZnO) takviyesi ile hazırladıkları epoksi kaplamanın altlık yüzeyine yapışma ve korozyon direnci özelliklerini araştırmışlar ve saf epoksi kaplamaya göre bu özelliklerde iyileşme gözlemlendiğini ayrıca ZnO ilavesinin partiküllerin homojen dağılımına olumlu etkide bulunduğunu belirtmişlerdir (El Saeed vd., 2015).

Bouibed ve Rachida, grafen oksit ve grafen oksit-SiO₂ hibrit nanopartikül katarak hazırladıkları epoksi nanokompozit kaplama ile yaptıkları çalışmalarında, hibrit nanopartikül takviyesinin kaplamanın, termal ve koroziyon özelliklerini geliştirdiğini, yüzeye yapışma davranışını iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır (Bouibed ve Doufnoune, 2019).

Alam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında SiO₂ nanopartikül içeren epoksi kompozit kaplamanın çelik yüzeyindeki korozyon performansını araştırmışlardır. Korozyon testleri, kaplanmış numunelerin 1 saatten 30

güne kadar değişen farklı sürelerde %3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yapılan EIS ölçümleri, SiO₂ nanopartiküllerinin varlığının ve artışının epoksi kaplamanın korozyon direncini büyük ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca yapılan Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi ile epoksi reçine ile sertleştirici arasında kimyasal bir etkileşim olduğunu göstermiş, bu durumun korozyon direncindeki artışı desteklediği ifade edilmiştir. Kaplamalar için en yüksek korozyon direnci, özellikle daldırma süresinin 30 güne uzatılmasıyla, %5 SiO₂ nanopartikül içeriğine sahip formülasyon için elde edildiği ifade edilmiştir (Alam vd., 2020).

Ranjbar ve arkadaşları çalışmalarında, SiO₂ nanopartikül ilave edilerek elde ettikleri epoksi nanokompozit kaplamaların antikorozyf özelliklerini EIS ölçümleriyle değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda, nanokompozit kaplama uygulanan numunelerin, tuz çözeltisinde 60 gün bekletildikten sonra dahi saf epoksi kaplamaya kıyasla, daha iyi korozyon direnci gösterdiklerini belirtmişlerdir (Ranjbar vd., 2013).

Boumaza ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, epoksi kaplamaların mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli nanopartiküller katarak mekanik özellikleri incelemişlerdir. Epoksi matrise % 2 oranında ZrO₂, ZnO, Fe₂O₃ ve SiO₂ nanopartiküllerin eklenmesiyle sertlikte sırasıyla, % 28, % 56, % 61 ve % 71'lik bir artış görülmüştür. Katılan nanopartiküllerin epoksi kaplamanın çizilme direnci ve darbe direncini arttırdığı ve en iyi mekanik özellikleri SiO₂ katılan kaplamada gözlemlendiği ifade edilmiştir (Boumaza vd., 2016).

2.4.2. Bu çalışmanın literatürdeki yeri

Yapılan literatür araştırmasında, nanokompozit kaplamalar konusunda çok sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda çoğunlukla tek tip metal altlık kullanıldığı ve yoğun olarak kaplamanın korozyon direncinin araştırıldığı anlaşılmaktadır. Ancak kaplamalar endüstriyel alanda farklı metalik yüzeylere de uygulanabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada altlık olarak, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, siyah sac ve galvanizli sac belirlenmiştir. Böylece kaplamanın farklı yüzeylerdeki davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda, nanokompozit kaplamanın farklı metal altlıklara yapışma davranışını belirlemek amacıyla kafes çizgi testi ve ayrıca kaplamanın elastikiyetini belirlemek amacıyla konik bükme testi yapılmıştır.

Yapılan tez çalışmasının literatürdeki çalışmalardan diğer bir farkı ise kaplamaların koroziye ortama bırakıldıktan sonra yeniden kafes çizgi ve bükme testlerine tabi tutulmuş olmasıdır. Böylece nanokompozit kaplamaların korozyon etkisinde koruyucu performansındaki değişimleri belirlemek amaçlanmıştır.

Bunların yanında, çelik malzemedan imal edilen endüstriyel yapı, çelik silo, çelik bina, gibi alanlarda zamanla oluşan çizik, yırtık, açılma veya korozyon nedeniyle oluşan hasarların bölgesel tadilatı söz konusu olduğunda kullanılabilecek alternatif bir kaplama geliştirmek de bu çalışmada hedeflenmiştir.

Ayrıca bu çalışmada nanokompozit kaplamayı hazırlarken, epoksi matrise katılacak olan nanopartiküller, kaplamaya yapacakları katkılar göz önüne alınarak belirlenmiştir. SiO₂ ekonomik ve yaygın kullanılan bir nanopartiküldür ve özellikle kaplamanın mekanik özelliklerine katkı yapması amaçlanmıştır. ZnO belirlenirken gerek galvanik özellikleri gerekse bariyer özellikleri ile kaplamanın korozyon direncine katkı sağlaması amaçlanmıştır. SiO₂ ve ZnO gibi inorganik iki nanopartikül dışında, karbon esaslı olan ve son yıllarda geliştirilen bir nanopartikül olan GNP üçüncü nanopartikül olarak belirlenmiştir. GNP seçilirken kompozit kaplama malzemesinde güçlendirici olarak kullanılmasının, bu malzemenin kullanım alanları açısından alternatif bir alan oluşturacağı düşünülmüştür. Ayrıca SiO₂'nin ve ZnO'nin küresel yapıda olması nedeniyle plaka formunda bir partikül olan GNP'nin tercih edilmesi ile nanokompozit kaplama özelliklere partikül geometrisinin etkisinin görülmesi amaçlanmıştır.

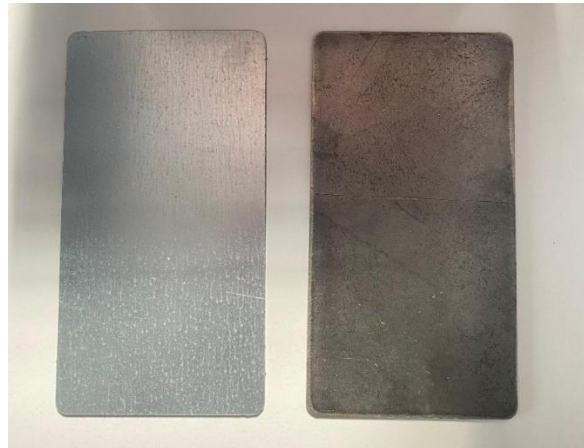
Yukarıda açıklanan ve örneklendirilen çalışmalar doğrultusunda, nanokompozit kaplama geliştirmeye yönelik olarak yapılan bu çalışmada; nanopartikül katılarak elde edilen kaplama malzemesi, siyah ve galvanizli çelik plakalar üzerine uygulanarak, deneysel çalışmalarla özelliklerinin incelenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmış ve sonuçlar tezin ilerleyen bölümlerinde raporlanmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, polimer kaplamalara katılan nanopartiküllerin kaplamanın farklı metal altlıklara yapışma davranışı ile mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kullanılacak partiküllerin türü, boyutu ve miktarı belirlenirken, polimer matris ile uyumu ve matris içinde yeterli homojen dağılımı göstermesi, uygulanan çelik yüzeylerde korumaya katkı sağlaması, bununla birlikte bariyer etkisi oluşturarak korozyon direncini geliştirmesi hedeflenmiştir. Bu amaç ve hedefler doğrultusunda, polimer matrise farklı nanopartiküller katılarak elde edilen yeni kompozit kaplamaların kullanılması sayesinde, kaplamaların yüzeye adezyonu ve korozyon performansının iyileştirilmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalar aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Kaplama uygulamasında altlık olarak kullanılan galvanizli çelik (TS EN 10346) ve siyah çelik sac (St 37) malzemeler silo üretim firması olan Mysilo Tahıl Depolama Sistemleri A.Ş.'den temin edilmiştir. Galvanizli çelik sacın yüzeyindeki galvaniz kaplamanın kalınlığı 30 µm olarak ölçülmüştür. Testlerde kullanılmak üzere çelik plakalar 80 mm x 150 mm ve 25 x 25 ebatlarında ve kalınlık 3 mm olara lazer kesim tezgahında kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.1).



(a)

(b)

Şekil 3.1. Kaplama uygulaması için hazırlanan plakalar; (a) galvanizli sac, (b) siyah sac.

Nanokompozit kaplama uygulamasında kullanılmak üzere matris malzemesi olarak POLİKEM Polires 188 markalı epoksi reçine belirlenmiştir. Kırıştırıcı olarak

Cadolite NC-562 markalı epoksi sertleştiricisi kullanılmıştır. Reçineye eklenen kürleştirici oranı ise ağırlıkça 1:1 olarak uygulanmıştır. Reçinenin ve sertleştiricinin özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Epoksi reçine özellikleri.

Epoksi Eşdeğeri Başına Ağırlık (WPE)	182-192
Viskosite, Brookfield, 25 °C, (mPa·s)	11000 - 15000
Renk (APHA)	<30
Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	1,15 – 1,18
Uçuşmama Yüzdesi	99,7
Hidrolize Edilebilir Klor (ppm)	<1000

Çizelge 3.2. Sertleştirici özellikleri.

Renk	<16
Viskozite 25 °C (mPa·s)	300-2300
Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	0,96 - 0,98
Teorik Aktif Hidrojen Eşdeğeri (AHEW)	174
Karışım Viskozitesi 25 °C	1,55
Kurutma / Sertleşme Süresi 5 °C (Saat)	5/12
Kurutma / Sertleşme Süresi 0 °C (Saat)	11/14

Takviye malzemeleri olarak kullanılan ZnO, GNP ve SiO₂ Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Partiküllerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.

Özellik	ZnO	GNP	SiO ₂
Safılık, %	99,5	99,9	99,5
Özgül Yüzey Alanı, (m ² /gr)	70	170,0	150-550
Partikül Boyutu	30 -50 nm	Kalınlık: 5 nm, Çap: 30 µm	15-35 nm
Görünüm Rengi	Beyaz	Gri	Beyaz
Yoğunluk, (gr/cm ³)	5,5	-	2,2

3.2. Kaplama Öncesinde Yüzey Hazırlığı

Kaplamanın aplikatör kullanılarak düzgün bir şekilde uygulanabilmesi ve yapışmayı zayıflatacak etkileri ortadan kaldırmak için yüzey hazırlığı yapılmıştır. Bu amaçla, sac yüzeyinde, lazer kesimi sırasında oluşan çapaklar ve koruyucu yağ tabakası kalıntıları giderilmiş ve aseton kullanılarak yüzey kimyasal olarak temizlenmiştir. Yüzey hazırlama işlemi sayesinde kaplamanın yapışma davranışını etkilemeyecek şekilde temiz bir yüzeye ve herhangi bir kalınlık farkı oluşturmada aplikatörün kullanılmasına uygun hale getirilmiştir.

3.3. Nanokompozit Kaplamanın Hazırlanması ve Uygulanması

Kaplama uygulamasında kullanılacak nanopartikül miktarını belirlemek için literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda epoksi matrisine çizelge 3.4’de verilen oranlarda nanopartikül katılmıştır.

Çizelge 3.4. Belirlenen kaplama formülasyonları ve numune kodları.

Numune kodu*	GNP (Ağ. %)	SiO ₂ (Ağ. %)	ZnO (Ağ. %)
SE	-	-	-
EG	1	-	-
ES	-	1	-
EZ	-	-	1

*Saf epoksi (SE), GNP katılan epoksi (EG), SiO₂ katılan epoksi (ES), ZnO katılan epoksi (EZ)

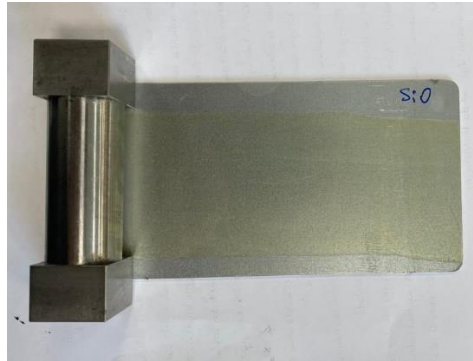
Nanopartikül takviyeli epoksi kompozit uygulamalarda, partiküllerin homojen olarak dağılması için matrisin ısıtılması ya da solvent kullanılması gerekmektedir (Shi vd., 2009). Isıtma yapıldığında nanopartiküllerde aglomerasyon durumundan dolayı homojen dağılımın zayıfladığı görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, solvent kullanılarak nanopartiküllerin homojen dağılımı sağlanmıştır. Solvent olarak, kimyasal bir değişikliğe sebep olmadığı için aseton kullanılmıştır.

Bu çalışmada, ilk olarak aseton, epoksi ve nanopartikül homojen dağılımın sağlanması amacıyla 10 dk mekanik olarak (1000 dev/dk) karıştırılmıştır. Kullanılan mekanik karıştırıcı Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Mekanik karıştırıcı.

Daha sonra, epoksi miktarı ile aynı oranda sertleştirici karışıma katılarak 5 dk daha karıştırılıp uygulama için hazır hale getirilmiştir. Tüm nanopartiküller için aynı işlem tekrar edilmiştir. Hazırlanan karışımlar çelik plakalar üzerine film aplikatörü kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 3.3).

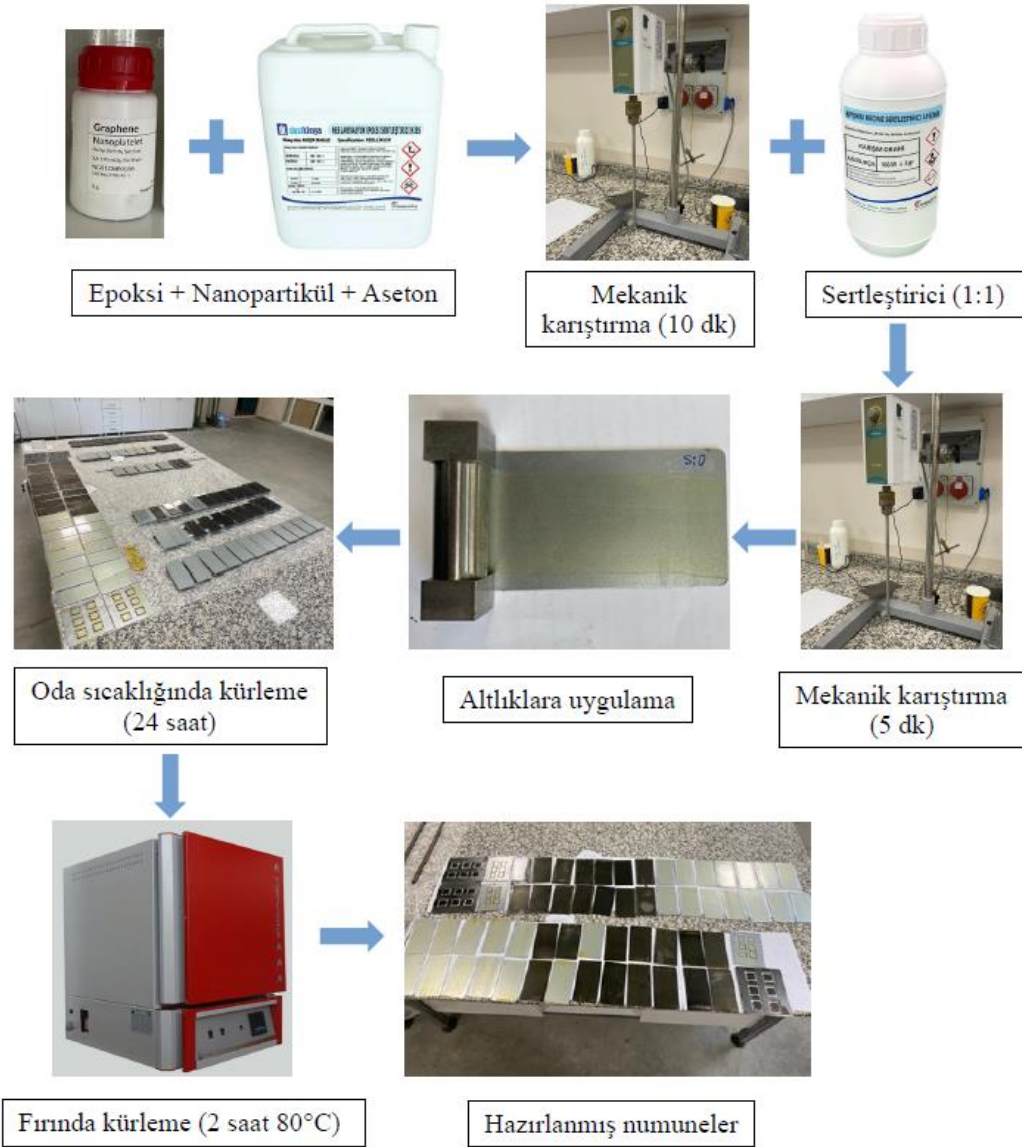


Şekil 3.3. Film aplikatörü ile kaplamanın uygulanması.

Kaplama uygulamasından sonra numuneler 24 saat süreyle oda sıcaklığında bekletilmiş daha sonra 2 saat 80°C sıcaklıkta fırında kürlenmiştir. Kürleme sonrasında numuneler Şekil 3.4’de, numune hazırlama adımları ise Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.4. Karakterizasyon testleri için hazırlanan test plakaları.



Şekil 3.5. Numune hazırlama adımları.

3.4. Karakterizasyon Testleri

Nanopartikül ilave edilmiş epoksi kompozit kaplamalara ve test plakalarına aşağıda verilen test ve analizler yapılmıştır.

3.4.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi analizi (FTIR)

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi, bir madde veya malzemenin moleküler yapısını ve kimyasal bileşenlerini belirlemek amacıyla kullanılan bir spektroskopik tekniktir. FTIR spektroskopisi, materyallerin kimyasal doğalarını açığa çıkararak organik ve inorganik bileşenleri ayırıştırma, polimerlerin yapısal analizi, biyolojik örneklerin karakterizasyonu gibi amaçlar için kullanılır. Bu teknik, moleküler düzeyde bilgi sağlayarak, araştırma, endüstriyel süreç kontrolü ve malzeme bilimleri gibi çeşitli bilimsel disiplinlerde uygulama alanına sahiptir.

Bu çalışmada FTIR analizi, tüm nanokompozit kaplama bileşimi için epoksi matris ve katılan nanopartiküller arasındaki etkileşimi ve meydana gelen kimyasal grupları belirlemek amacıyla yapılmıştır.

FTIR analizi, Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde, 500 – 4000 cm^{-1} aralığında 4 cm^{-1} çözünürlükte infrared spektrumlar alınarak gerçekleştirilmiştir.

3.4.2. Termogravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), bir maddenin kütle değişimini sıcaklık veya zamanla ilişkilendirerek, termal davranışını inceleyen yüksek hassasiyetli bir termal analiz tekniğidir. Bu yöntem, örnek üzerindeki sıcaklık artışı sırasında meydana gelen kütle kayıplarını ölçerek, termal bozunma, çözünme ve kimyasal reaksiyonlar gibi termal olayları tanımlar. TGA, malzeme biliminden ilaç geliştirmeye, polimer kimyasından çevre bilimine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu analiz, malzeme özellikleri, termal dayanıklılık ve bileşen içeriği hakkında ayrıntılı bilgiler sağlayarak, maddelerin termal davranışının anlaşılmasına önemli bir katkıda bulunur.

Bu çalışmada, her bir nanokompozit kaplama bileşiminin termal kararlılığını belirlemek amacıyla TGA yapılmıştır. Analiz, 800 °C'ye kadar 10 °C/dk ısıtma hızında Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

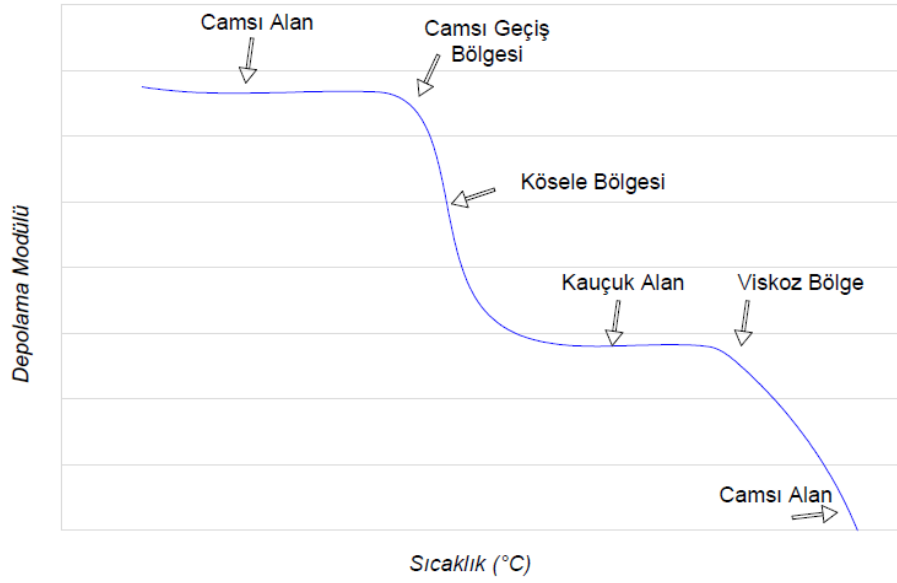
3.4.7. Dinamik mekanik analiz (DMA)

DMA, polimer malzemelerin viskoelastik özelliklerini ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. DMA belirli bir frekans aralığında artıp azalan bir yük uygulayarak malzemenin viskoelastik davranışlarını inceler. Bu teknikte, belirli bir frekansa sahip yük, belirli bir sıcaklık aralığında numuneye etki etmektedir. Bu etkiler altında malzemenin dinamik mekanik özellikleri, depolama modülü (E'), kayıp modülü (E'') ve sönümleme modülü $\tan(\delta)$ değerleri ile camsı geçiş sıcaklıklarındaki değişimler incelenerek belirlenmektedir.

Depolama modülü (E'), elastik gerilimin gerinime oranı olarak tanımlanır. Bir malzemenin enerjiyi elastik olarak depolayabilme yeteneğini gösterir. Depolama modülü temel olarak numunenin karakterini belirler. Depolama modülü yüksekse polimerin kırılması zordur. Numunenin elastik davranışı numunenin depolama modülü hesaplanarak değerlendirilir ve elastisite modülünden farklıdır. Elastisite modülü, çekme modülünü ifade ederken, depolama modülü numune veya malzemeye salınımlı yükler uygulandığında malzeme tarafından depolanan enerjiyi ifade eder. Depolama modülü belirli bir sıcaklık artışına kadar sabit kalır, daha sonra önemli ölçüde azalır ve belirli bir sıcaklıkta sıfır olur (Malyadri ve Kumar, 2022). Sıcaklık arttıkça görülen bölgeler camsı alan, geçiş bölgesi ve kauçuksu alan olarak ifade edilir (Nagamadhu vd., 2020).

Kayıp Modülü (E''), sinüzoidal deformasyonun her bir döngüsü başına kaybedilen enerji miktarını ölçen bir faktördür. Kayıp modülü arttığında, numune daha az sert ve daha kauçuksu hale gelir. Bu durumda, kayıp modülü bir noktaya kadar sinüzoidal olarak artar ve zirve, camsı geçiş sıcaklığında (T_g) görülür. Bu zirveden sonra, kayıp modülü değerleri camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda azalmaya başlar.

Cam geçiş sıcaklığı (T_g), kristal olmayan bir katının, sıvıdan camsı duruma veya tersi yönde dinamik dönüşümünü ifade eder ve özellikle bir polimerin amorf fazı için durum değişikliğini tanımlar. Viskoz bölgede malzeme akışkan hale geçmektedir (Şekil 3.6) (Rieger, 1996).



Şekil 3.6. Camsı geçiş bölgeleri.

Sönümlleme modülü, ($\tan \delta$), kayıp modülü (E'') ile depolama modülü (E') arasındaki oran olarak tanımlanır ($\tan \delta = E'' / E'$) (Zaimova vd., 2012). Daha yüksek $\tan \delta$ değerlerinin, daha büyük enerji kayıplarını temsil ettiği kabul edilir; bu kayıplar, polimerin moleküler zincirlerinin hareketi için gerekli olan yüksek enerji ile ilişkilidir (Gonzales vd., 2005, Al-Hartomy vd., 2011).

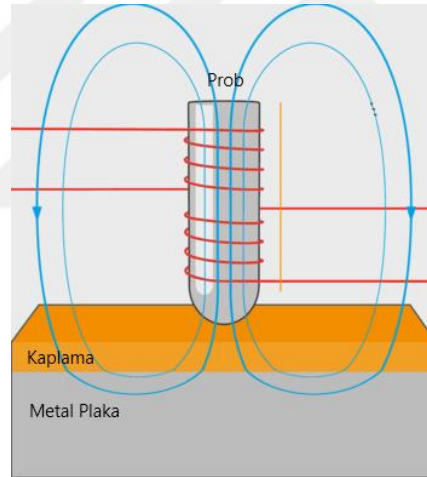
Bu tez çalışmasında, kaplama için kullanılacak nanokompozit malzeme bileşimlerinin dinamik mekanik özelliklerinin, sıcaklık değişimleri ve tekrarlayan yüklemelere maruz kaldığında nasıl etkilendiğini gözlemlemek için DMA analizleri yapılmıştır.

DMA analizleri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi Laboratuvarlarında bulunan DMA analiz cihazı (TA instruments Q800) kullanılarak, ASTM D4065 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada kullanılan test numunelerinin boyutları 30 mm x 6 mm ve kalınlık 1 mm'dir. Numuneler başlangıçta, 1 Hz'de termal stabilizasyona ulaşmamaları için beş dakika boyunca izotermal bir sıcaklıkta tutulmuş, ardından 25°C'den 140°C'ye, 1 Hz frekansta, 3°C/dakika ısıtma hızıyla yapılan analiz ile viskoelastik özellikler belirlenmiştir. Her bileşim için ikişer numune test edilmiş ve ortalama değerler dikkate alınmıştır.

3.4.3. Kaplama kalınlığı ölçümü

Kalınlık, kaplamaların işlevselliğini önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle kalınlığın belirlenmesi ve bu amaçla kullanılan teknikler kaplama araştırmaları ve teknolojisi için büyük önem taşır. Kalınlıkları birkaç nanometreden onlarca mikrona kadar değişen kaplamalara yönelik farklı ölçüm yöntemleri mevcuttur (Canlı, 2010). Bu çalışmada, kaplama kalınlıklarının ölçümü manyetik indüksiyon tekniği ile çalışan ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Manyetik indüksiyon tekniği hızlı, hassas ve tahribatsız bir kalınlık ölçüm metodudur. Bu yöntemde, etrafında bir bobinin sarılı olduğu metal prob, düz bir yüzeyde kaplamaya temas ettirilerek, düşük frekanslı bir alternatif akıma maruz bırakılır. Bu akım ile alternatif bir manyetik alan oluşturur. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, metal levha ile prob arasındaki voltaj farkı prob ucu ile metal levha arasındaki mesafeye bağlıdır. Kaplanmış parçalar için bu mesafe kaplama kalınlığına karşılık gelir (URL-1)



Şekil 3.7. Kaplama kalınlık ölçüm metodu (URL-1).

Test plakalarının yüzeyindeki kaplama kalınlıkları Şekil 3.8’de görülen Time TT-260 marka kaplama kalınlığı ölçüm cihazı kullanılarak TS EN ISO 2808 standardına göre ölçülmüştür. Her numune üzerinde dört farklı bölgeden kalınlık ölçümü yapılmış ve elde edilen ortalama kuru film kalınlıkları $50 \pm 10 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir.



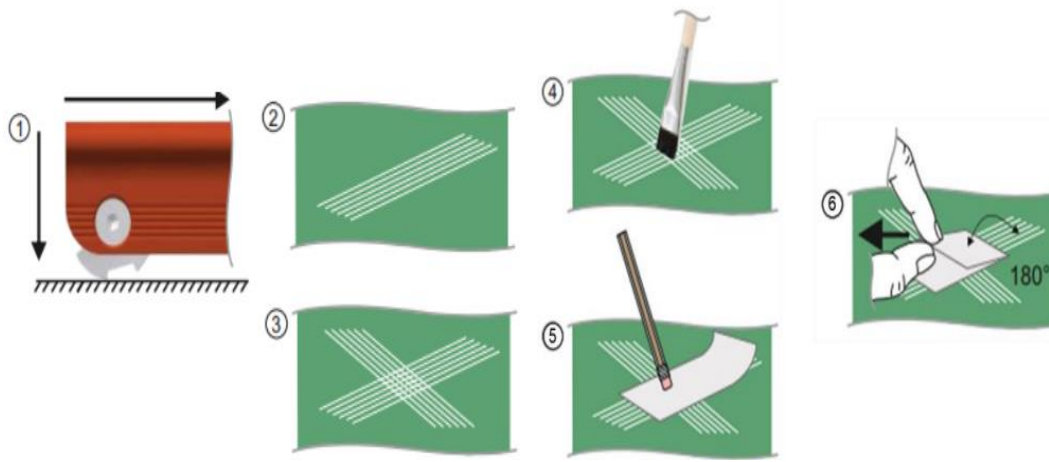
Şekil 3.8. Kaplama kalınlık ölçümü.

3.4.4. Kafes çizgi testi

Kaplamaların altlık yüzeyine iyi bir şekilde yapışması esastır, kaplamanın altlık yüzeyinden kolayca ayrılması durumunda malzemenin mekanik ve tribolojik özellikleri olumsuz etkilenir. Bu nedenle kaplama uygulanmış numunelere, kaplamanın metal altlığa yapışma davranışını belirlemek amacıyla, ASTM D 3359 (Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test) standardına uygun olarak kafes çizgi testi yapılmıştır. Şekil 3.9’da görülen kafes çizgi testi aplikatörü kullanarak, plakaların kaplanmış yüzünde 2 mm aralığa sahip bıçakla yatay olarak çizilmiştir. Daha sonra dikey olarak ikinci yönde çizilmiş ve çizilen kısma bant yapıştırılarak hızlı bir şekilde yüzeyden kaldırılmıştır. Test adımları Şekil 3.10’da verilmiştir. Bu işlem her bir kaplama türü için üçer adet yapılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.9. Kafes çizgi testi aplikatörü.

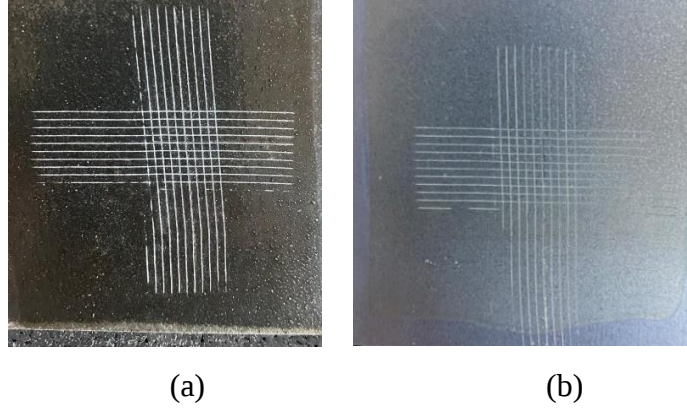


Şekil 3.10. Kafes çizgi testi uygulama adımları.

Yapılan test sonucunda, yüzeyden kaldırılan kaplama miktarı gözlemlenerek standartlarda (Çizelge 3.5) verilen görünümlele kıyaslanmıştır.

Çizelge 3.5. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu (ASTM D 3359).

Sınıf	Kaplama Dökülmüş Alan (%)	Kaplamanın Döküldüğü Yüzey Alanı Görseli
5B	0	
4B	5'ten az	
3B	5-15	
2B	15-35	
1B	35-65	
0B	65'ten büyük	



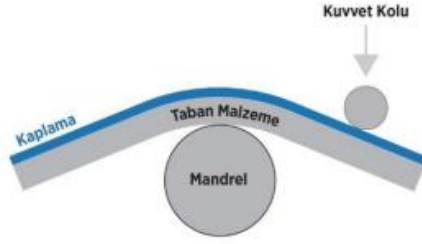
Şekil 3.11. EG numunesi için kafes çizgi testi örnek uygulaması; galvanizli sac yüzeyinde (b) ve siyah sac yüzeyinde (a).

Kaplamanın koruyucu performansı, altlık yüzeyinde uzun süre ve farklı ortam koşullarında özelliklerini yitirmeden kalabilmesine bağlıdır. Bu nedenle, kaplamaların metal altlık yüzeyine yapışma davranışı, kaplamalar tuzlu su sisi testine maruz bırakıldıktan sonra da yapılmış ve korozyon bir ortama bırakılan kaplamaların performansı yeniden analiz edilmiştir. Bu amaçla, 7 gün ve 21 gün tuzlu su sisi testine maruz bırakılan kaplamalara kafes çizgi testi yeniden yapılmıştır.

3.4.5. Konik bükme testi

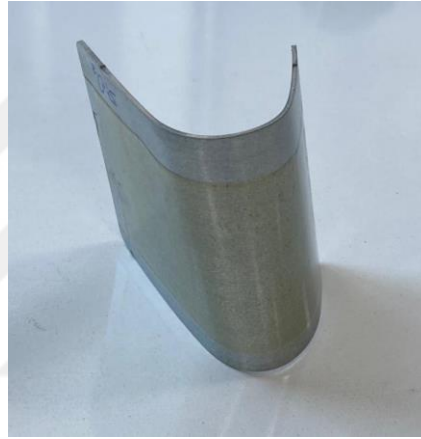
Konik bükme testi, kaplamanın herhangi bir deformasyona maruz kalmadan bükülebilme veya uzayabilme özelliklerini değerlendirmek için kullanılan test metodudur. Bu test, kaplama yapılmış yüzeyi, yüksek deformasyona maruz bırakarak konik bir mandrel üzerindeki değişken çapın etkisiyle oluşabilecek yırtılmanın hangi seviyede ortaya çıkacağını gözlemlemek için yapılmaktadır.

Kaplama kalınlıkları 50 ± 10 μm olarak belirlenen test plakalarına, ASTM D 522 standardına uygun olarak, her kaplama türü için üçer numune olacak şekilde konik bükme testi yapılmıştır. Konik bükme testi, çekme kolu yatay haldeyken test plakasının kısa kenarı zemine paralel olacak şekilde mandrel ve çekme mili arasına yerleştirildikten sonra dikey pozisyonda kuvvet uygulanarak konik mandrel üzerine doğru sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Konik bükme testi uygulama metodu.

Yapılan konik bükme testi sonuçları, kaplamalarda meydana gelen çatlama, soyulma ve pullanma durumlarına göre değerlendirilmiştir. Şekil 3.13’de konik bükme testi uygulanmış örnek bir numune görülmektedir. Bu işlem her bir kaplama türü için üçer adet yapılmıştır.



Şekil 3.13. SE kaplaması için bükme testi uygulanmış numune.

Kafes çizgi testinde olduğu gibi kaplamanın farklı ortam koşullarına maruz kalmaları durumunda, özelliklerindeki değişimi ve kaplama performansını analiz etmek amacıyla, benzer şekilde 7 gün ve 21 gün tuzlu su sisi testine maruz bırakılan kaplamalara konik bükme testi de yeniden yapılmıştır.

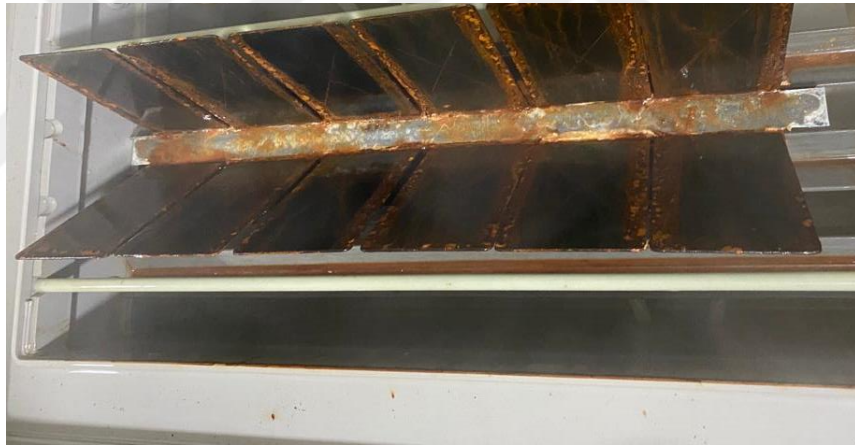
3.4.6. Tuzlu su sisi testi

Epoksiye eklenen nanopartiküllerin, kaplamanın korozyon direncine etkisini incelemek için ASLI M404 marka kabin kullanılarak ASTM B117 standardına uygun olarak Mysilo A.Ş. Firmasında yapılmıştır (Şekil 3.14).



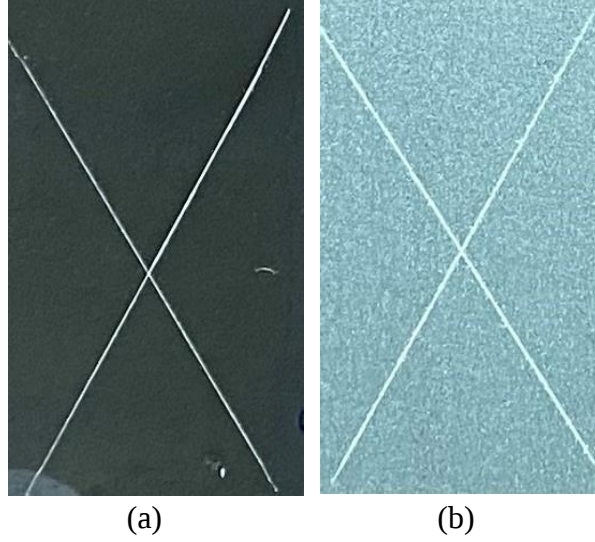
Şekil 3.14. Tuz testi kabini.

Kaplama yapılan plakalar tuz testi kabinine dikeyle 15° açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Tuz testi uygulanan numuneler.

Test sisteminde standartlara uygun olarak, pH değeri 6,5-7,2 arasında olan %5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisi kabin içine verilerek bir korozyon ortamı meydana getirilmiştir. Tuzlu su kabini deney sırasında tamamen kapalı tutularak kabin kenarlarından buhar çıkışını engelleyecek şekilde kapak ile izole edilmiştir. Kaplanmış numuneler tuzlu su kabinine yerleştirilmeden önce yüzeyi çapraz olacak şekilde çizilmiştir (Şekil 3.16). Kabindeki numuneler 7 ve 21 gün boyunca gözlenmiştir.

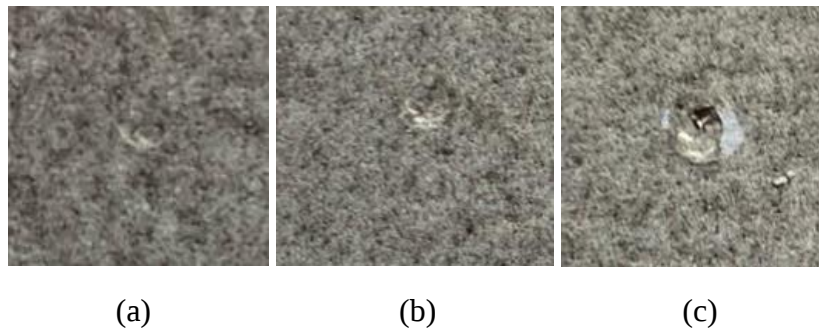


Şekil 3.16. Tuzlu su sisi testi öncesi numuneler (a) siyah sac (b) galvanizli sac.

3.4.8 Darbe testi

Kaplama numunelerinin darbe etkisi altındaki özelliklerini tayin etmek amacıyla Mysilo A.Ş. de bulunan QCY-J 120A marka darbe test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Her bir numuneye üçer adet darbe testi uygulanmıştır.

Darbe testi, test plakaları üzerine 50, 75 ve 100 cm yüksekliklerden 100 gr ağırlık düşürerek uygulanmıştır. Yapılan test ile metal altık üzerindeki kaplamanın ani bir yüke maruz bırakılması durumunda kaplama yüzeyinde meydana gelen ayrılma, yırtılma veya kabarma gözlenmiştir. Test sonrası Şekil 3.17’de örneği görülen numune yüzeyinde meydana gelen deformasyon boyutları belirlenerek kaydedilmiştir.



Şekil 3.17. EZ (siyah sac) numunesi için; darbe testi uygulanmış plakalar (a) 50 cm (b) 75 cm (c) 100 cm.

3.4.9 Nanoindentasyon (nanosertlik) testi

Nanokompozit kaplamaların sertliğini ölçmek için en uygun yöntem nanoindentasyon testidir. Bu testte uygulanan yük, kaplamanın kırılmayacağı kadar küçük olduğundan, kaplamanın gerçek sertliğini ölçmek mümkün olabilmektedir (Svobodová vd., 2019).

Epoksi matris içine katılan farklı nanopartiküllerin kaplamanın sertliğini nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla yapılan nanoindentasyon testi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merkez Laboratuvarında (Nano-Indination Tester, CSM Instruments) yapılmıştır. 20 mm x 20mm x 3mm ebatlarında kesilen ve kaplama uygulanan plakalarda test yapılmadan önce kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve ortalama kalınlık değeri $50 \pm 10 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Nanoindentasyon testi için hazırlanmış numuneler.

Her bir kaplama türü için üçer adet test yapılmıştır. Nanosertlik testi, batıcı uç numune üzerine dik açıyla 10 mN maksimum değere kadar yük uygulandıktan sonra maksimum değere ulaşıncaya kadar tekrar dereceli bir şekilde geri yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme ve geri yükleme işlemleri sonucunda ortaya çıkan yük (mN) ve derinlik (nm) değerlerinden kaplamaların sertlik ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir.

3.4.10 Mikroyapı analizi

Nanopartiküllerin epoksi matris içinde dağılımı durumu ve matris partikül arayüzey etkileşimi, nanokompozit kaplamaların performansını belirleyen iki kritik özelliktir. Uygun bir arayüzey ve homojen bir dağılım, kompozit kaplamaların mekanik özelliklerini belirgin şekilde olumlu etkilemektedir (Naebe vd., 2013). Bu amaçla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılan mikroyapı analizi ile noperçacıkların epoksi matrisindeki dağılımının ve arayüzey etkileşimlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra, diğer test sonuçlarının değerlendirilmesinde de SEM analiz sonuçlarından faydalanılmıştır.

Numune yüzeyleri SEM analizi yapılmadan önce altın tozu kullanılarak kaplanmış ve analiz Şekil 3.19’da görülen Fei Quanta 250 FEG marka SEM cihazı kullanılarak,

Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde yapılmıştır.



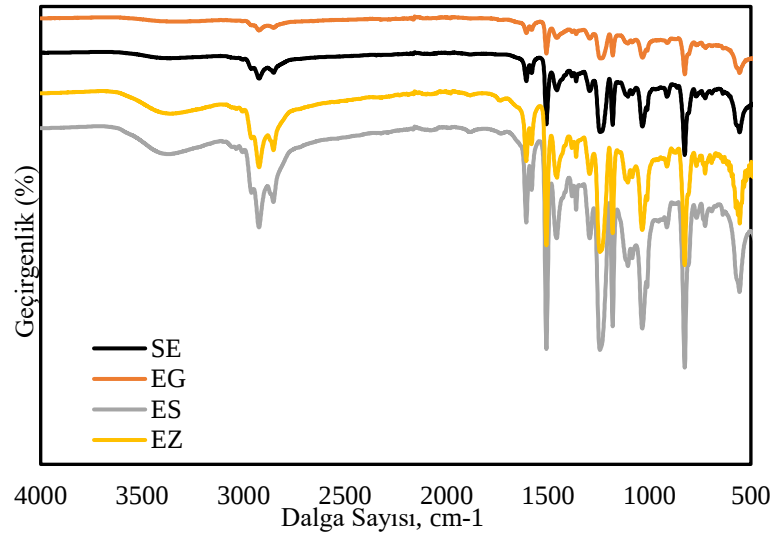
Şekil 3.19. Taramalı elektron mikroskobu.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. FTIR Analizi Sonuçları

FTIR analizi, kompozit kaplama bileşimlerinde epoksi matris ve katılan nanopartiküllerin arasındaki etkileşimi ve meydana gelen kimyasal grupları belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Epoksi matrise nano parçacıkların eklenmesi, kaplama örneklerinin fonksiyonel grupları üzerinde küçük etkilerle sonuçlanmış, pik yoğunluğunda önemli bir fark gözlenmemiştir (Şekil 4.1). Gözlemlenen küçük kaymalar, epoksi ve nano parçacıklar arasındaki etkileşimin varlığını göstermektedir. Spektrum üzerinde yeni piklerin meydana gelmemesi kimyasal bir etkileşimden daha çok fiziksel bir etkileşim olduğunu göstermektedir (Barletta vd., 2016; Dhoke vd., 2009).



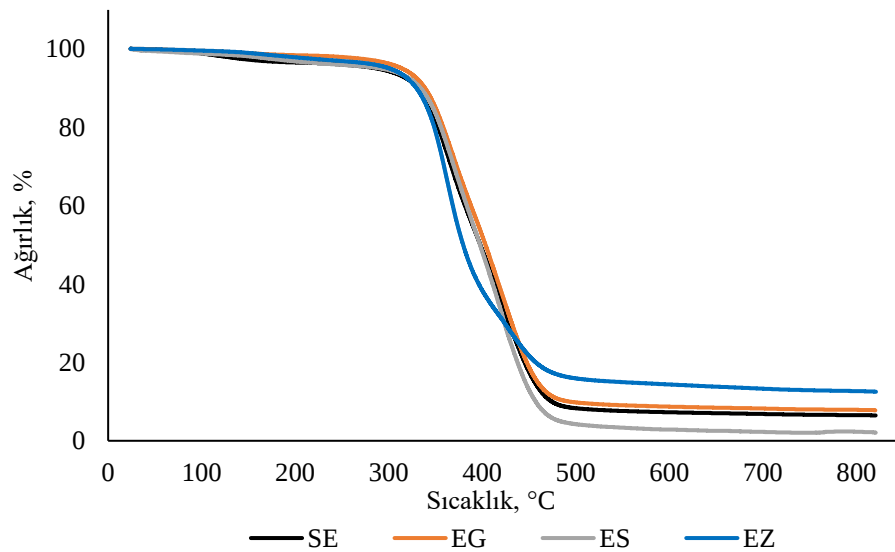
Şekil 4.1. Kaplama numunelerine ait FTIR spektrumları.

4.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Saf epoksi ve kompozit kaplamaların termal kararlılığını belirlemek amacıyla yapılan termogravimetrik analiz sonucu Şekil 4.2'deki TGA eğrisi ile verilmiştir. Eğriler üzerinde 20°C ile 300°C sıcaklık aralığında görülen yaklaşık %15'lik ağırlık kaybı, ticari epoksiye ilave edilen uçucu bileşenlerin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Tüm kaplama bileşimlerinde, yaklaşık 300°C de bozunmaya başladığı görülmektedir. Çizelge 4.1'de %50 ağırlık kaybının olduğu sıcaklıklar ve 800°C de kalan malzeme miktarları görülmektedir.

Çizelge 4.1’den de görülebileceği gibi, SE, ES ve EZ numunelerde %50 ağırlık kaybının olduğu sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakındır. EG numunede ise bu sıcaklığın daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, GNP katılan kaplama malzemesinin diğer numunelere kıyasla en yüksek termal kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun nedeni, GNP’nin fiziksel bariyer görevi görerek epoksi polimer yapısının ayrışmasını geciktirmesinden kaynaklanmıştır (Chen vd., 2018; Wei vd., 2017; Yazman vd., 2021). 800°C’de kalan malzeme miktarları, SE numunesinde %6,6 ES numunesinde %2,4 EZ numunesinde %12,7 ve EG numunesinde %7,9 olarak belirlenmiştir. Kompozit malzeme bileşimlerinde kalan malzeme miktarının saf epoksiye göre yüksek olması katılan partiküllerin termal kararlılığı olumlu etkilediğini göstermektedir. %50 ağırlık kaybının olduğu sıcaklığın daha düşük ve 800°C’de kalan malzeme miktarlarının daha yüksek olduğu EZ numunede, partikül aglomerasyonunun bu sonuçta kısmen etkili olduğu düşünülmektedir. Kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri bu durumu desteklemektedir.

TGA analizinde kalan malzeme miktarı, nanopartikül konsantrasyonu, yapısı, matrisin termal stabilitesi ve deney koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Bazı durumlarda epoksi matriste nanopartiküllerin varlığına rağmen kalan malzeme miktarı daha düşük olabilir. Bu çalışmada ES numunede bu durum gözlenmiştir. Bazı çalışmalarda da benzer sonuçlar gözlenmiş ve bu durumun nanopartikül tarafından çaprazbağ yoğunluğunun etkilenmesinden kaynaklanabileceği ifade edilmiştir (Nguyen vd., 2016; Samad vd., 2023).



Şekil 4.2. Numunelere ait TGA eğrileri.

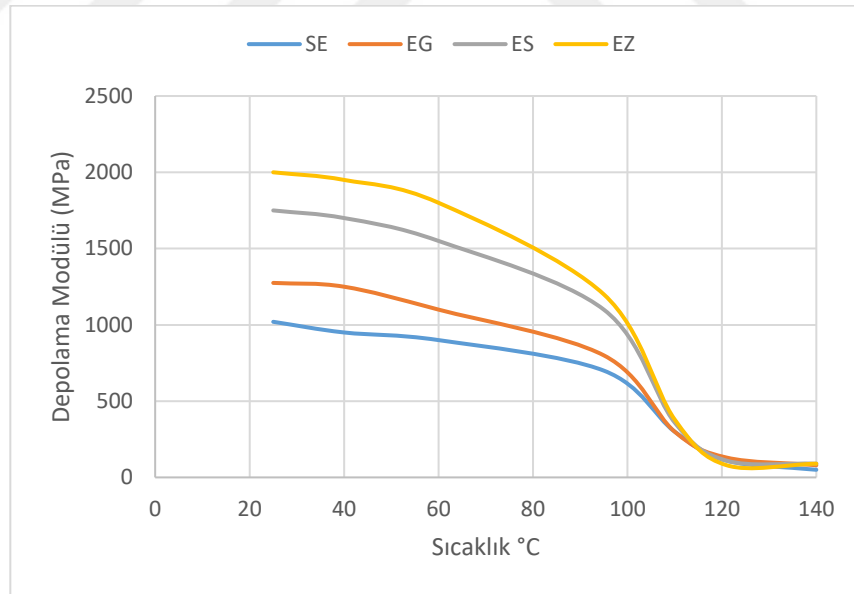
Çizelge 4.1. Nunumelerin TGA sonuçları.

Numune kodu	%50 (°C)	800 °C’de kalan malzeme miktarı (%)
SE	401	6,6
ES	403	2,4
EZ	393	12,7
EG	410	7,9

4.3. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

Bu çalışmada, kompozit kaplama bileşimlerinin viskoelastik özelliklerini belirlemek amacıyla DMA testi yapılmıştır. Yapılan test ile numunelerin elastik özelliklerini gösteren depolama modülü (E') ve sönümleme modülü ($\tan \delta$) değerleri belirlenmiştir.

Depolama modülü değerlerinin (E') sıcaklıkla değişim grafikleri Şekil 4.3’te verilmiştir. Değerlerin, 60°C'ye kadar çok fazla değişmediği, daha sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Azalan eğri, sıcaklığın artmasıyla numunelerin durumlarının camsı bölgeden kauçuksu bölgeye geçtiğini göstermektedir.

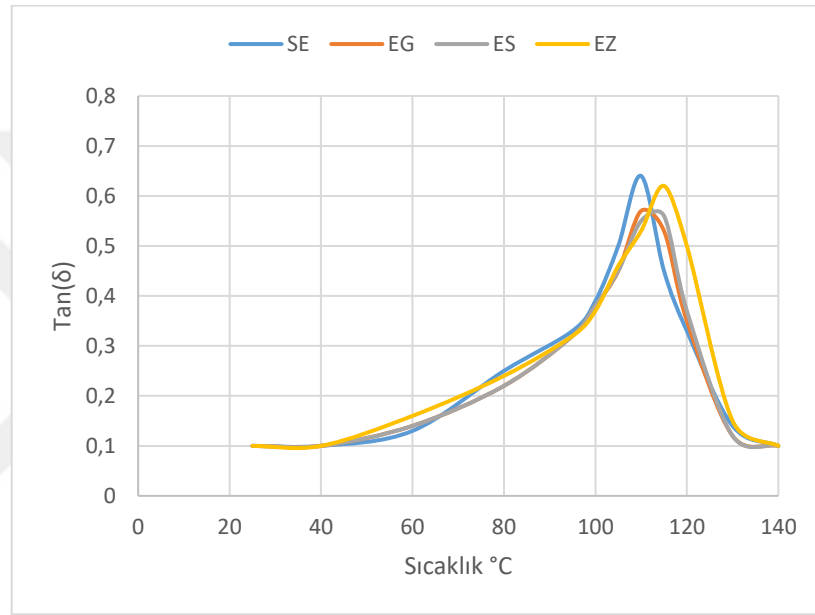


Şekil 4.3. Numunelerin depolama modülü-sıcaklık grafiği.

Depolama modülü değerlerinde, nanopartikül ilaveli numunelerin tamamında saf epoksiye göre artış olduğu görülmüştür. Depolama modülündeki artış, epoksiye katılan nanopartiküllerin, epoksi polimer zincirlerinin hareketini kısıtlaması nedeniyle gözlenmiştir (Ahmad vd., 2021; Gopalakrishnamurthy ve Sandur, 2022; Lu vd., 2006;

SudarshanRao, 2021). Kompozit kaplama malzemelerinin depolama modülü değerlerindeki artış, katılan nanopartiküllerin malzemenin elastik özelliklerini arttırdığını ortaya koymaktadır.

Kompozit bileşimlere ait $\tan(\delta)$ -sıcaklık grafiği Şekil 4.4'te verilmiştir. Grafik nanopartikül takviyeli numunelerde $\tan(\delta)$ değerlerinin saf epoksiden daha düşük olduğunu göstermektedir. Kompozit numunelerin $\tan(\delta)$ değerlerindeki bu azalma moleküller arası hareketin daha az olduğunu ve malzemedeki elastik davranışın daha iyi olduğunu gösterir (Kuzak vd., 1999; Park vd., 2009).



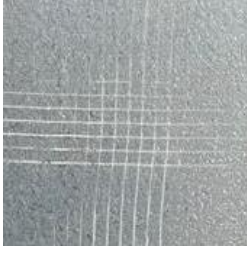
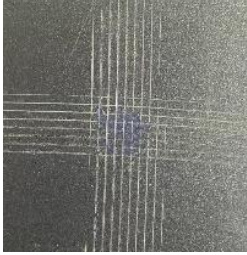
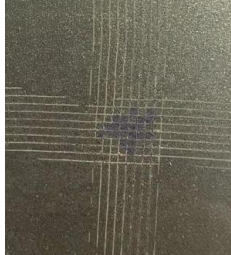
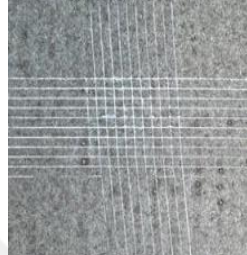
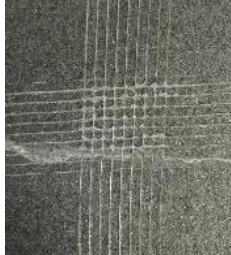
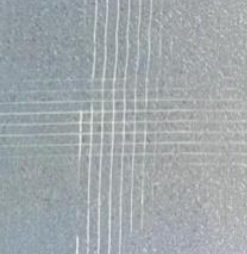
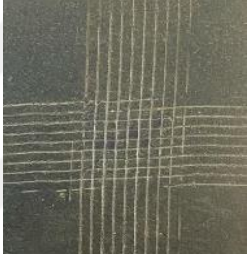
Şekil 4.4. Numunelerin sönümleme modülü $\tan(\delta)$ -sıcaklık grafiği.

Aynı zamanda, Şekil 4.4'te görülen pik noktasına karşılık gelen sıcaklık değerleri camsı geçiş sıcaklığıdır ve şekilden de görüldüğü gibi epoksiye nanopartikül eklenmesi camsı geçiş sıcaklığında yükselişe neden olmuştur. Bu durum, polimer zincirlerinin hareketliliğini zorlaştıran her faktörün camsı geçiş sıcaklığını arttırmasından kaynaklanmaktadır (Sepet, 2014).

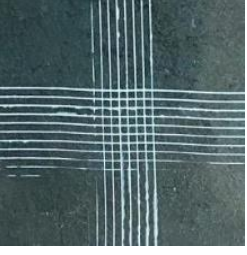
Saf epoksiye göre gözlenen elastik özelliklerdeki artış, kompozit kaplamaların konik bükme gibi diğer testlerde gösterdikleri performans ile de uyumludur.

4.4. Kafes Çizgi Testi Sonuçları

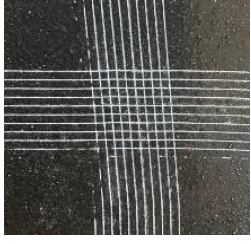
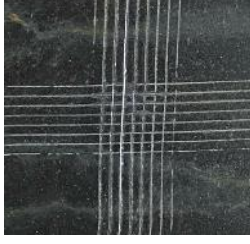
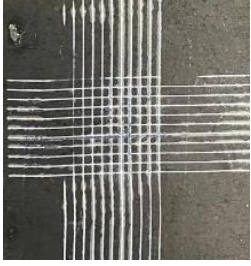
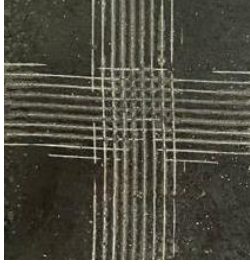
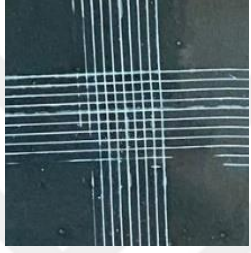
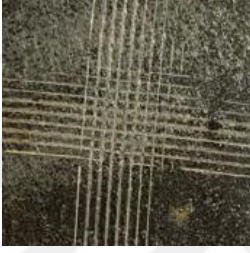
Kompozit kaplamaların, galvanizli sac ve siyah sac yüzeyine yapışma derecesini belirlemek için kafes çizgi testi yapılmıştır. Test sonucunda elde edilen yüzeyler Şekil 4.5 ve 4.6'da görülmektedir.

	Galvanizli Sac 0. Gün	Galvanizli Sac 7. Gün	Galvanizli Sac 21. Gün
SE			
EG			
ES			
EZ			

Şekil 4.5. Galvanizli sac üzerine kafes çizgi testi testi uygulanan numuneler.

	Siyah Sac 0. Gün	Siyah Sac 7. Gün	Siyah Sac 21. Gün
SE			

Şekil 4.6. Siyah sac üzerine uygulanan kafes çizgi testi uygulanan numuneler.

EG			
ES			
EZ			

Şekil 4.6.(devam) Siyah sac üzerine uygulanan kafes çizgi testi uygulanan numuneler.

Bu çalışmada, tüm numuneler üzerinde oluşan izler standart değerlendirme çizelgesine (Çizelge 3.6) göre analiz edilerek sınıflandırılmış ve Çizelge 4,2’de verilmiştir. Galvanizli ve çelik saclar üzerindeki tüm kaplama numunelerinin kafes çizgi testi sınıfı 5B olarak belirlenmiştir. Bu değerlendirme kaplamanın metal altlık yüzeyinden ayrılmadığını göstermektedir.

Bu test kaplama numuneleri tuzlu su sisi testine maruz bırakıldıktan sonra da yapılmıştır. Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi 7 ve 21 gün koroziif ortama bırakıldıktan sonra test yapılan kaplama numunelerinin tümünde saf epoksi kaplamaya göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. 7 ve 21 gün boyunca tuzlu su sisine maruz bırakıldıktan sonra yapılan ölçümlerde EG, ES, EZ numunelerinde, SE numunesine göre yüzeyden ayrılmanın daha az gerçekleştiği görülmüş, en iyi sonuç GNP katılan kaplama numunelerinde gözlenmiştir.

Farklı altlık yüzeylerindeki kaplamaların koroziif ortama maruz bırakıldıktan sonra durumları ayrıca değerlendirilmiştir. Galvanizli sac üzerine uygulanan EG numunesinde, 7 gün tuzlu su sisi testi sonrasında yapılan test sonucu kaplamanın durumu 5B olarak değerlendirilirken, aynı süre koroziif ortama maruz kalan siyah sac

üzerindeki kaplamada Şekil 4.6'da gösterildiği gibi bir miktar ayrılma olduğu ve çizgilerinin etrafında kırılmalar gözlemlendiği için 4B olarak değerlendirilmiştir. Benzer durum EZ numunesinde sırasıyla 4B ve 3B olarak değerlendirilmiştir. Bunun nedeni olarak, galvanizli sacın siyah saca göre yüzey pürüzlülüğünün fazla olması sayesinde mekanik kenetlenme etkisi göstererek yüzeye tutunmayı kolaylaştırdığı düşünülmektedir (Hall, 2013; Yin vd.,2014). 21 günlük tuzlu su sisine maruz kalmış numunelerde yapılan test sonrasında, kaplamada daha fazla yüzeyden ayrılma gözlenmiş, ancak siyah sac ve galvanizli sac arasında fark gözlenmemiş benzer sonuçlar elde edilmiştir.

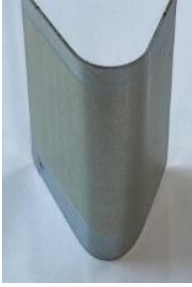
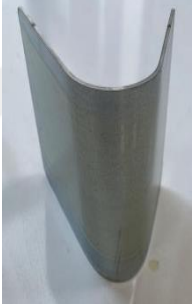
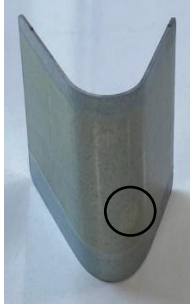
Elde edilen sonuçlar, özellikle GNP içeren kompozit kaplamaların, korozif ortamda çelik yüzeyine güçlü bir şekilde yapıştığını göstermektedir. Bu durumun GNP partiküllerin yapısal özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.2. Kafes Çizgi Testi Sınıflandırması.

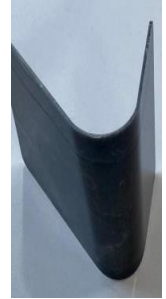
Altlık/gün Numune	Galvanizli Sac 0. Gün	Siyah Sac 0. Gün	Galvanizli Sac 7. Gün	Siyah Sac 7. Gün	Galvanizli Sac 21.Gün	Siyah Sac 21. Gün
SE	5B	5B	2B	2B	1B	1B
EG	5B	5B	5B	4B	3B	3B
ES	5B	5B	3B	3B	2B	2B
EZ	5B	5B	4B	3B	2B	2B

4.5. Konik Bükme

Kompozit kaplama numunelerine konik bükme testi uygulanarak kaplamaların elastikiyeti incelenmiştir. Konik bükme testine maruz bırakılmış numuneler Şekil 4.7 ve 4.8'de verilmiştir. Konik bükme testi sonucunda, hem siyah sac hem de galvanizli sac yüzeylerindeki kaplamalarda yüzeylerden herhangi bir ayrılma veya çatlama gözlenmemiştir, sadece galvanizli sac yüzeyindeki EZ numunesinde Şekil 4.7'de görüldüğü gibi lokal olarak kabarma meydana gelmiştir. Konik bükme testi, kaplama numunelerine tuzlu su sisi testi kabini içinde bekletildikten sonra da yapılmıştır, elde tüm sonuçlar aşağıdaki şekillerde ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

	Galvanizli Sac 0. Gün	Galvanizli Sac 7. Gün	Galvanizli Sac 21. Gün
SE			
EG			
ES			
EZ			

Şekil 4.7. Konik bükme testi uygulanan galvanizli sac üzerindeki numuneler.

	Siyah Sac 0. Gün	Siyah Sac 7. Gün	Siyah Sac 21. Gün
SE			
EG			
ES			
EZ			

Şekil 4.8. Konik bükme testi uygulanan siyah sac üzerindeki numuneler.

Tuzlu su sisine maruz bırakıldıktan sonra bükme testi uygulanan numunelerde her iki altlık uygulamasında da en iyi sonuç GNP takviyeli kompozit kaplama numunesinden elde edilmiştir. Bu numunede, 7 ve 21 gün tuzlu su sisine bırakıldıktan sonra yüzeyden tamamen kalkma gözlenmemiş çatlak oluşumu görülmüştür. Diğer numunelerde ise konik bükme testi sonrasında saf epoksiye benzer şekilde yüzeyden ayrılmalarının olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar, GNP nanopartikül takviyesinin kaplamanın elastikiyetini, hem farklı altlıklar üzerinde yapılan kaplama uygulamalarında, hem de kaplamalar korozyon ortamına maruz bırakılmaları durumunda olumlu etkilediğini göstermiştir.

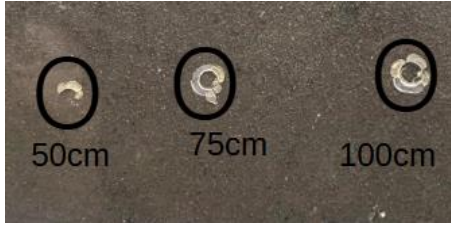
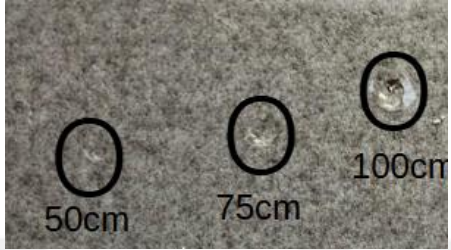
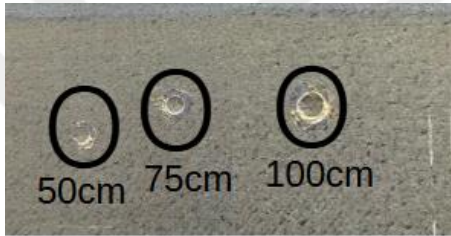
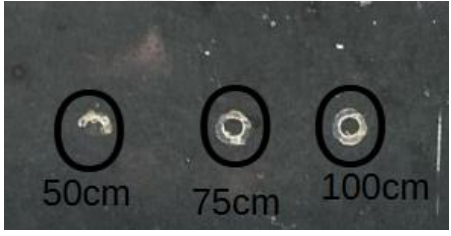
Çizelge 4.3. Konik bükme testi uygulanan numunelerin durumu.

Altlık/gün Numune	Galvanizli Sac 0. Gün	Siyah Sac 0. Gün	Galvanizli Sac 7. Gün	Siyah Sac 7. Gün	Galvanizli Sac 21. Gün	Siyah Sac 21. Gün
SE	Çatlama yok	Çatlama yok	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma
EG	Çatlama yok	Çatlama yok	Çatlama	Çatlama	Çatlama	Çatlama- yüzeyden kalkma
ES	Çatlama yok	Çatlama yok	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma
EZ	Lokal kabarma	Çatlama yok	Çatlama	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma	Çatlama- yüzeyden kalkma

4.6. Darbe Testi

Kaplama numunelerinin darbe etkisi altındaki özelliklerini tayin etmek amacıyla darbe testi yapılmıştır. Darbe testi uygulanmış kaplama numuneleri Şekil 4.9’da görülmektedir. Ayrıca, numune yüzeylerinde gözlenen hasar boyutları Şekil 4.10’da verilmiştir.

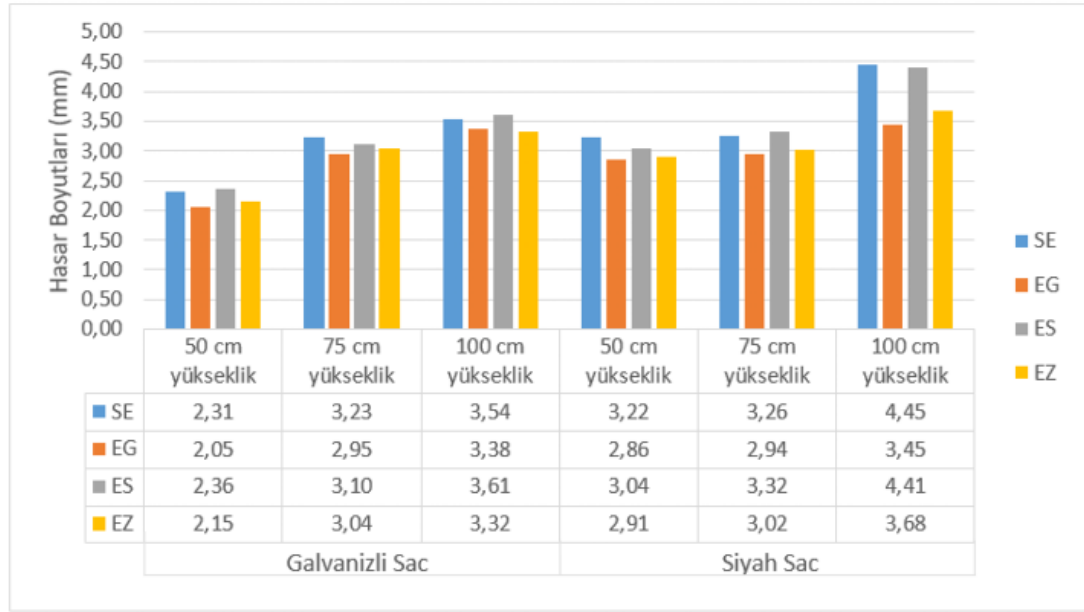
Darbe testi yapılan SE ve ES kaplama numunelerinde, 50 cm yükseklikten ağırlık bırakılması durumunda, hem galvanizli hem de siyah sac üzerinde deformasyon olduğu gözlenmiştir. EG numunesinde ise 50 cm yükseklikten ağırlık bırakılması durumunda çok az deformasyon gözlenmiş, 75 cm yükseklikten ağırlık bırakma durumunda hasar oluşmaya başlamış ve asıl tahribat 100 cm yükseklikten ağırlık bırakma durumunda gözlenmiştir.

	Galvanizli Sac	Siyah Sac
SE		
EG		
ES		
EZ		

Şekil 4.9. Darbe testinin kaplamada meydana getirdiği hasar boyutları.

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi tüm numuneler için siyah sac üzerindeki kaplamalarda gözlenen deformasyon boyutları galvanizli sac üzerindeki kaplamalara göre özellikle 50 ve 100 cm yükseklikten bırakılarak yapılan testte daha yüksek çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, katılan nanopartiküller genel olarak darbe direncinde artışa neden olmuştur. En iyi darbe direnci performansı ise EG numunesinde gözlenmiştir. Saf epoksi kaplamalardaki düşük darbe direncinin nanopartikül ilave edilmesiyle arttırılabileceği bu deney sonucunda görülmüştür.



Şekil 4.10. Farklı yükseklik ve altlıklara ağırlık düşürme şeklinde yapılan darbe testinin kaplamada meydana getirdiği hasar boyutları.

4.7. Tuzlu Su Sisi Testi

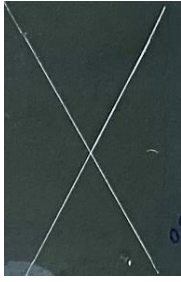
Farklı altlıklar üzerine uygulanan saf epoksi ve kompozit kaplamaların korozyon direncini belirlemek amacıyla yapılan tuzlu su sisi testi sonuçları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir. 7 gün tuzlu su sisine maruz bırakılmış galvanizli sac üzerine uygulanan numunelerde, galvaniz kaplamanın korozyon ürünü olan beyaz pas oluşumu görülmemiş, tüm kaplamalar bu sürede koruyucu olarak davranmıştır. Aynı sürenin sonunda siyah sac üzerindeki kaplamalarda, çizilen bölgelerde kısmen korozyon başladığı gözlenmiştir.

21 günlük tuzlu su sisine bırakılmış numunelerde ise, her iki altlık üzerindeki kaplamalar arasında da en iyi sonuç EG numunesinde ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, GNP takviyesinin plaka formundaki yapısından dolayı, korozif iyonların çelik alt tabakaya ulaşmasını geciktirmiş olmasıdır (Harsha vd., 2022). Ayrıca numunelerde kesme çizgileri üzerinde ve çevresinde lokal olarak artan korozyon görülmüştür. Bunun nedeni, kaplamanın uygulandığı yüzeyde ve kaplamada çeşitli nedenlerle var olabilen kusurlardır (tane sınırları, boşluk ve çatlak vb.). Ayrıca homojen olmayan dağılımın da bu duruma etkisi olabilmektedir. Bu tür kusurların bulunduğu bölgelerde bariyer korumasının etkinliğini kaybedebileceği ve lokal olarak korozyon oluşumunu teşvik edici rol oynayabileceği değerlendirilmiştir (Ding vd., 2018).

Deneyden elde edilen sonuçlar, kaplama yapılan bölgelerde korozyon ilerlemesinin yavaşladığını göstermiştir. Saf epoksiye katılan nanopartiküller, korozif iyonların altlıklara iletimini zorlaştırarak korozyon direncini artırmıştır. Bununla birlikte, kompozit kaplama ile alt tabaka arasında oluşturulan arayüzey bağı da, korozyon direncinin artmasına yol açmıştır (Matin vd., 2015; Tsai vd., 2018).

	Galvanizli Sac 0. Gün	Galvanizli Sac 7. Gün	Galvanizli Sac 21. Gün
SE			
EG			
ES			
EZ			

Şekil 4.11. Tuzlu su sisi testi uygulanan galvanizli sac üzerindeki numuneler.

	Siyah Sac 0. Gün	Siyah Sac 7. Gün	Siyah Sac 21. Gün
SE			
EG			
ES			
EZ			

Şekil 4.12. Tuzlu su sisi testi uygulanan siyah sac üzerindeki numuneler.

4.8. Nano Sertlik Testi Sonuçları

Bu deneyde, nano partikül takviyeli epoksi kaplamaların siyah sac ve galvanizli sac üzerine uygulandığında ortaya çıkan sertlik ve elastisite modülü değerleri nanosertlik testi yapılarak belirlenmiştir.

Test sonucunda elde edilen ve Çizelge 4.4’de verilen sonuçlar, nanopartikül eklenen numunelerde sertlik ve modül değerlerinde kısmi artış olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte galvanizli sac üzerine uygulanan kaplama numunelerinde siyah sac üzerine uygulanan kaplama sonuçlarına göre artış bir miktar daha fazla görülmüştür.

Sertlikte meydana gelen kısmi artış, matris içinde dağılan partiküller sayesinde molekül zincir hareketlerinin sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır (Martin-Gallego vd., 2011). Modül değerlerindeki artış ise, epoksinin çaprazbağ yoğunluğunun artması ve toplam boş hacmin azalması nedeniyle meydana gelmiştir (Alam vd., 2021; Becker vd., 2002; Samad vd., 2022; Shi vd., 2009).

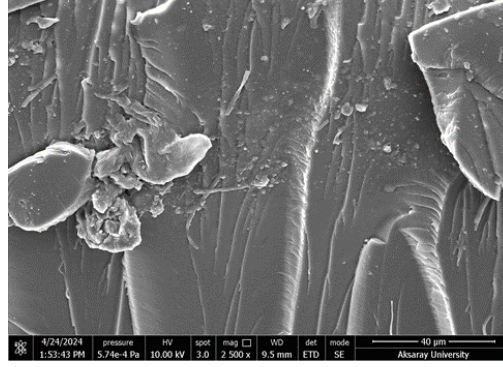
Çizelge 4.4. Kaplama numunelerinin nano sertlik ve elastisite modülü değerleri.

Numune adı	Nano sertlik (GPa)	Modül (GPa)	Nano sertlik (GPa)	Modül (GPa)
	Galvanizli Sac		Siyah Sac	
SE	0.21	3,91	0.19	3,40
EG	0.21	4,82	0.22	4,76
ES	0,23	4,80	0,22	4,27
EZ	0,24	4,87	0,21	3,83

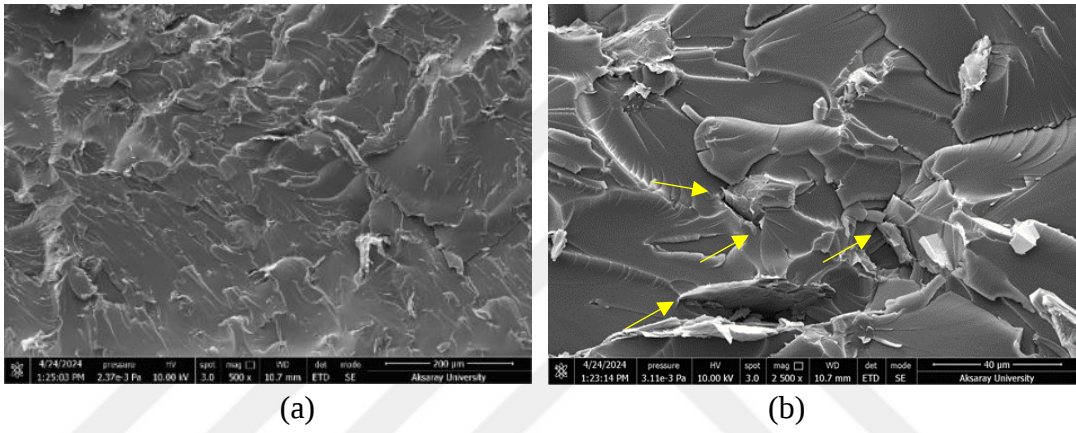
Ayrıca, nanopartiküllerin epoksiye eklenmesi, yük taşıma kapasitesini arttırmakta ve güçlü partikül-matris etkileşimi nedeniyle mikro çatlakların oluşmasını kısmen engelleyerek mekanik özellikleri artırmaktadır (Zhan vd., 2018).

4.9. SEM Analizi Sonuçları

Kompozit kaplama numunelerinin kırılma yüzeylerinden mikroyapı analizleri SEM kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.13’de verilen SE numunesine ait görüntüde gevrek kırılma davranışını karakterize eden çatlak dağılımı görülmektedir. EG numuesi ise daha pürüzlü bir kırılma yüzeyine sahiptir (Şekil 4.14a). Kaplamaya katılan GNP partiküllerin, çatlak yayılmasını geciktirerek, kırılma için daha fazla enerji gerektirmesi sayesinde bu kırılma yüzeyi oluşmaktadır.



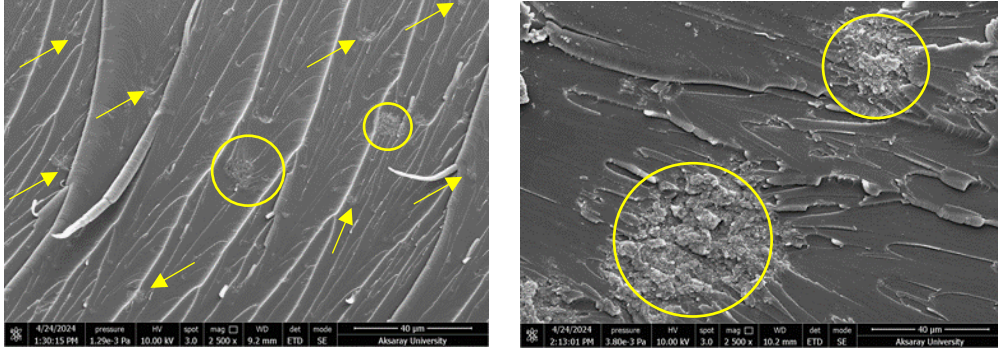
Şekil 4.13. 2500x büyütme saf epoksi numuneye ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü.



Şekil 4.14. EG numuneye ait kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri (a) 500x ve (b) 2500x.

GNP katılan numunenin kırılma yüzeyinin büyütülmüş görüntüsünde GNP'nin etkisi daha belirgin şekilde görülmektedir. Kırılma yüzeyinde GNP ile karşılaşan çatlak oluşumlarının sapma ve dallanma şeklinde yönlendikleri, ayrıca engellendikleri Şekil 4.14b'de görülmektedir. Bu durum, malzemenin tokluğunu ve mukavemetini artıran bir etkiye sahiptir (Duan vd., 2020). EG numunesine ait bu sonuç, aynı numune için, konik bükme, kafes çizgi ve darbe testlerinden elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Yapılan SEM analizinde, kompozit kaplama numunelerinde genel olarak katılan nanopartiküllerin homojen dağılım gösterdiği gözlenmiştir. Ancak ES ve EZ numunelerde kısmi topaklanmalara da rastlanmıştır (Şekil 4.15a ve Şekil 4.15b).



a)

b)

Şekil 4.15. 5000x büyütme a) ES b) EZ nano partikül dağılımını gösteren SEM görüntüleri.

Kompozitin malzemelerin özelliklerinin öncelikle nanopartiküllerin homojen dağılmasına ve polimer-partikül ara yüzey etkileşimine bağlı olduğu bilinmektedir (Shi vd., 2009). Nopartiküllerde topaklanma olması nanopartiküllerin matris ile arasındaki etkileşimi zayıflatacak ve yük aktarımı, çatlak engelleme gibi etkileri göstermeyecektir. ES ve EZ numunelerin, yapılan bazı test ve analizlerde diğer numunelere göre daha düşük özellik göstermeleri mikroyapı analizinden elde edilen sonuçlarla uyumludur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, yapılan deneysel çalışmalar doğrultusunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kompozit kaplama numunelerine yapılan FTIR testi sonucuna göre yeni kimyasal gurupların oluşmadığı, ancak pik noktalarında saf epoksi ile partiküllerin fiziksel etkileşimi sonucunda düşük seviyede kaymalar olduğu görülmüştür.
- Yapılan TGA analizi sonucunda, epoksi matrise nano partiküllerin eklenmesiyle termal özelliklerde radikal bir değişiklik gözlenmemiş ancak, GNP katılan kompozit malzemenin termal kararlılığında kısmi bir artış gözlenmiştir.
- DMA sonucunda, saf epoksiye göre oda sıcaklığındaki depolama modülü değerleri tüm numunelerde artmıştır. Kompozit kaplama malzemelerinin depolama modülü değerlerindeki artış, katılan nanopartiküllerin malzemenin elastik özelliklerini arttırdığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, nanopartikül takviyeli numunelerde $\tan(\delta)$ değerleri saf epoksiden daha düşük elde edilmiştir, Bu durum, moleküller arası hareketin daha az olduğunu ve kompozit kaplamalarda elastik davranışın daha iyi olduğunu göstermektedir.
- Kafes çizgi testinden elde edilen sonuçlar, özellikle GNP içeren kompozit kaplamaların, siyah ve galvanizli sac yüzeyine diğer kaplamalara göre daha güçlü bir şekilde yapıştığını göstermektedir. Ayrıca, 7 gün tuzlu su sisine maruz bırakılan numunelerde galvanizli sac üzerine yapılan kaplamaların siyah sac üzerine yapılanlara göre daha iyi sonuç verdiği, 21 gün bekletilen numunelerde ise galvanizli ve siyah sac yüzeyindeki kaplamalara uygulanan testlerden elde edilen sonuçlarda önemli bir fark olmadığı görülmüştür.
- Tuzlu su sisine maruz bırakıldıktan sonra bükme testi uygulanan numunelerde her iki altlık uygulamasında da en iyi sonuç GNP takviyeli kompozit kaplama numunesinden elde edilmiştir. Bu numunede, 7 ve 21 gün tuzlu su sisine bırakıldıktan sonra yüzeyden tamamen kalkma gözlenmemiş çatlak oluşumu görülmüştür. Diğer numunelerde ise konik bükme testi sonrasında saf epoksiye benzer şekilde yüzeyden ayrılmanın olduğu görülmüştür.
- Hazırlanan kaplama numunelerine yapılan darbe testi sonucunda, nanopartikül katılan numuneler genel olarak saf epoksiye göre daha iyi darbe direnci

göstermiştir. GNP ile takviye edilen kompozit kaplamalı numune diğer numuneler içinde en yüksek darbe direncine sahiptir. Bu numunede darbe direncindeki artış saf epoksiye göre yaklaşık % 30 olmuştur. Galvanizli sac üzerindeki kaplama numunelerinde darbe testi sonrasında oluşan deformasyonların siyah saca göre daha küçük olduğu görülmüştür.

- Tuzlu su sisi deneyinden elde edilen sonuçlar, 7 gün tuzlu su sisine maruz bırakılan galvanizli sac üzerine uygulanan kaplamaların tümünün bu sürede koruyucu olarak davrandığını gösterirken, siyah sac üzerindeki kaplamalarda kısmen korozyon başladığını göstermiştir. 21 günlük tuzlu su sisi testi uygulanan numunelerde ise her iki altlık üzerindeki kaplamalar arasında da en iyi sonuç EG numunesinde ortaya çıkmıştır. Bu durum, grafenin yapısal özellikleri nedeniyle gösterdiği üstün bariyer özelliğinden kaynaklanmıştır.
- Yapılan nanosertlik testi sonuçları nanopartikül eklenen numunelerde sertlik değerlerinde kısmi bir artış olduğunu göstermiştir. Nanopartikül ilavesi ile elastisite modülünde daha belirgin bir artış olmuştur. Bu değerdeki en yüksek artış saf epoksi numuneye göre %40 oranında bir artışla galvanizli sac üzerine uygulanan GNP takviyeli kompozit kaplamada elde edilmiştir. Genel olarak, galvanizli sac üzerindeki kaplamalarda sertlik ve modül değerlerindeki artış biraz daha fazla olmuştur. Değerlerdeki bu artış katılan nanopartiküllerin polimer molekül zincir hareketlerini sınırlandırmasından kaynaklanmıştır.
- SEM analizinden elde edilen sonuçlarda, katılan nanopartiküllerin, özellikle de GNP'nin çatlakların yayılmasında geciktirme etkisi gösterdiği görülmüştür. Genel olarak SEM analizinden elde edilen sonuçlar, diğer test ve analiz sonuçlarını desteklemektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, nanokompozit kaplamaların mekanik ve yapışma performansının, nanopartikül türü ve geometrisinin yanı sıra kullanılan altlık malzemenin türüne bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, GNP katılan nanokompozit kaplamaların, özellikle darbe direnci, elastik özellikler, yüzeye yapışma ve çatlak geciktirme gibi kritik performans kriterlerinde üstünlük sağladığı görülmüştür. Ayrıca, galvanizli sac üzerine uygulanan kaplamaların, siyah sac üzerine uygulananlara göre genel olarak daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu bulgular, nanokompozit kaplamaların endüstriyel uygulamalarda nanopartikül ve altlık türünün kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

5.2. Öneriler

Bu konuya ilişkin çeşitli araştırmalar ve daha ileri gelişmeler için sunulan öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- İki farklı altlık üzerin uygulanan kaplamalar kullanılarak yapılan bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, epoksi kaplamalara eklenen nanopartiküllerin kaplamaların yapışma davranışında olumlu etki sağladığını göstermiştir. Altlık malzemeleri çeşitlendirilerek ve altlıkların yüzey pürüzlülük durumları da dahil edilerek çalışmalar genişletilebilir.
- GNP takviyeli kaplama özelliklerinin önemli ölçüde geliştiği görülmüştür. Bu nedenle, GNP'nin epoksi veya diğer polimerik kaplama türlerindeki etkisi, grafenin matrise katılma oranları değiştirilerek, araştırılabilir.
- Kaplama kalınlığının yapışma ve mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla farklı kalınlıklardaki kaplamalarla çalışmalar yapılabilir.
- Nanopartikül türleri ve boyutları çeşitlendirilerek yapılacak yeni çalışmalar kaplama özelliklerinin daha da geliştirilmesine katkı sağlayabilir.
- Önerilen çalışmaların yapılması ile daha ince kaplamalar kullanılarak daha yüksek performans elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir, bu sayede daha düşük maliyetli, uygulanması kolay ve daha yüksek performanslı kaplamaların geliştirilebilmesi amaçlanabilir.

KAYNAKLAR

- Abakah, R., Huang, F., Hu, Q., Wang, Y. ve Liu, J., 2021. Comparative study of corrosion properties of different graphene nanoplate/epoxy composite coatings for enhanced surface barrier protection, *Coatings*, 11, 285.
- Ahmad, M., Ridzuan, M., Majid, M., Cheng, E. ve Sulaiman, M., 2021. Dynamic mechanical analysis of graphene nanoplatelets/glass reinforced epoxy composite. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2051, 1, 012046.
- Alam, M., Samad, U., Sherif E., Poulouse, A., Mohammed, J., Alharthi, N. ve Al-Zahrani, S., 2020. Influence of SiO₂ content and exposure periods on the anticorrosion behavior of epoxy nanocomposite coatings, *Coatings*, 10, 2, 118.
- Alam, M., Samad, U., Anis, A., Alam, M., Ubaidullah, M. ve Al-Zahrani, S., 2021. Effects of SiO₂ and ZnO nanoparticles on epoxy coatings and its performance investigation using thermal and nanoindentation technique, *Polymers*, 13,9,:490.
- Al-Hartomy, O. A., Falleh Al-Solamy, F., Ahmed Al-Ghamdi A., Dishovsky, N., Ivanov, M., Mihaylov, M. ve El-Tantawy, F., 2011. Influence of carbon black structure and specific surface area on the mechanical and dielectric properties of filled rubber composites, *International Journal of Polymer Science*, Article ID 521985.
- Apsak, M., Akdemir, A., Karabörk, F. ve Yazman, Ş., 2021. Investigation effect of zinc nanoparticles on the mechanical and anticorrosion properties of epoxy coatings on stainless steel surface, *Gazi University Journal Of Science*, 34, 3, 846-877.
- Askerden, M., Akdemir, A., Karabörk, F. ve Yazman, Ş., 2022. Çinko Oksit Partk. Epoksi Kap. Mek. Antikorzf Öz., *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 28, 1, 11-24.
- ASTM D3359-09e2, 2009. Standard test methods for measuring adhesion by tape test, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Avella, M., Errico, M., Martelli, S. ve Martuscelli, E., 2001. Preparation methodologies of polymer matrix nanocomposites, *Applied Organometallic Chemistry*, 15, 434-439.
- Aung, M., Li, W., ve Lim, H., 2020. Improvement of anticorrosion coating properties in bio-based polymer epoxy acrylate incorporated with nano zinc oxide particles, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59,5, 1753-1763.
- Baghdadi, Y., Youssef L., Bouhadir K., Harb, M., Mustapha, S., Patra, D. ve Tehrani-Bagha, A.R., The effects of modified zinc oxide nanoparticles on the mechanical/thermal properties of epoxy resin, *J. Appl. Polym*, 137, 49330.
- Barletta, M., Vesco, S., Puopolo, M. ve Tagliaferri, V., 2016. Graphene reinforced uv-curable epoxy resins: design, manufacture and material performance, *Progress in Organic Coatings* 90, 414-424.
- Bayer, G.T. ve Zamanzadeh, M., 2004. Failure analysis of paints and coatings, Published Internally By Matco Associates, 331.

- Becker, O., Simon, G. ve Dusek, K., 2002. Epoxy Layered Silicate Nanocomposites, *Advances in Polymer Science*, 47, 3, 329-347.
- Bensalah, W., Loukil, N., De-Petris Wery, M., and Ayedi, H. F., 2014. Assessment of automotive coatings used on different metallic substrates, *International Journal Of Corrosion*, 2014, 1, 1-12.
- Bouibed, A. ve Doufnounea, R., 2019. Synthesis and characterization of hybrid materials based on graphene oxide and silica nanoparticles and their effect on the corrosion protection properties of epoxy resin coatings, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 834-860.
- Boumaza, M., Khan, R. ve Zahrani, S., 2016. An experimental investigation of the effects of nanoparticles on the mechanical properties of epoxy coating. *Thin Solid Films*, 620, 160-164.
- Canlı, S., 2010. Thickness analysis of thin films by energy dispersive x-ray spectroscopy, Master of Science, Middle East Technical University, Ankara.
- Chen, M., Mikecz, V., 2005. Formation of nucleoplasmic protein aggregates impairs nuclear function in response to SiO₂ nanoparticles, *Experimental Cell Research*, 305, 1, 51-62.
- Chen, J., Zhu, Y., Guo, Z. ve Nasibulin, A., 2020. Recent progress on thermo-electrical properties of conductive polymer composites and their application in temperature sensors, *Engineered Science*, 12, 13, 22.
- Chrissafis, K., Paraskevopoulos, K., Pavlidou, E. ve Bikiaris, D., 2009. Thermal degradation mechanism of HDPE nanocomposites containing fumed silica nanoparticles, *Thermochimica Acta*, 485, 1, 65-71.
- Dhoke, S., Khanna, A.S. ve Sinha, T., 2009. Effect of nano-ZnO particles on the corrosion behavior of alkyd-based waterborne coatings, *Progress in Organic Coatings*, 64, 4, 371-382.
- Dhoke, S., Rajgopalan, N. And Khanna, A., 2012. Effect of nano-zinc oxide particles on the performance behavior of waterborne polyurethane composite coatings, *International Journal Of Material Science*, 2, 2, 47-55.
- Ding, R., Li, W., Wang, X., Gui, T., Li, B., Han, P., ve Song, L., 2018. A brief review of corrosion protective films and coatings based on graphene and graphene oxide, *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 1039-1055.
- Duan, W., Chen, Y., Ma, J., Wang, W., Cheng, J. ve Zhang, J., 2020. High-performance graphene reinforced epoxy nanocomposites using benzyl glycidyl ether as a dispersant and surface modifier, *Composites Part B*, 189, 107878
- El Saeed, A., El-Fattah, M. ve Azzam, A., 2015. Synthesis of ZnO nanoparticles and studying its influence on the antimicrobial, anticorrosion and mechanical behavior of polyurethane composite for surface coating, *Dyes and Pigments*, 121, 282-289.

- Fu, S., Zhu, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Zhang, Y., Qiao, L., Yin, N., Song, K., Liu, M. ve Wang, D., 2021. Recent advances in carbon nanomaterials-based electrochemical sensors for phenolic compounds detection, *Microchemical Journal*, 106776.
- Gandara, M. ve Gonçalves, E., 2020. Electroactive composites: PANI electrochemical synthesis with GO and rGO for structural carbon fiber coating, *Progress in Organic Coatings*, 138, 105399.
- Ghauri F., Raza M., Baig M., Ibrahim S., 2017. Corrosion study of the graphene oxide and reduced graphene oxide-based epoxy coatings, *Mater. Res. Express*, 4, 12, 125601.
- Gonzalez, L., Rodriguez, A., Valentin, J. L., Marcos- Fernandez, A., Posadas, P. ve Kunstst, K. G., 2005. Conventional and efficient cosslinking of natural rubber, *Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, 58, 638–643.
- Gopalakrishnamurthy, P. ve Sandur, C., 2022. Investigation of dynamic mechanical behavior of nanosilica filled carbon-kevlar-epoxy polymer hybrid nanocomposite, *IJETA journal*, 46, 3, 141-146
- Giraldo, L., Giraldo, M., Llanos, S., Maya, G., Zabala, R., Nassar, N., Franco, C., Alvarado, V. ve Cortés, F., 2017. The effects of SiO₂ nanoparticles on the thermal stability and rheological behavior of hydrolyzed polyacrylamide based polymeric solutions, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159, 841-852.
- Giraldo, H., Herrera, K., Valdés, M., Uheida, A., Procaccini, R. ve Pellice, S., 2021. Antibacterial performance of hybrid nanocomposite coatings containing clay and silver nanoparticles, *Physicochemical and Engineering Aspects*, 628, 127354.
- Haeri, S., Ramezanzadeh, B., Asghari, ve M., Barletta., 2016. A novel fabrication of a high performance SiO₂-Grapheneoxide (GO) nanohybrids: characterization of thermal properties of epoxy nanocomposites filled with SiO₂–GO nanohybrids, *Journal Of Colloid And Interface Science*, 493, 111-122.
- Harsha, V., Sharma, A. ve Tambe, P., 2022. Graphene oxide reinforced epoxy nanocomposites coatings for corrosion protection: a review, *Journal of Physics: Conference Series*, 2225, 012002.
- Hayatdavoudi, H., ve Rahsepar, M. 2017. A mechanistic study of the enhanced cathodic protection performance of graphene-reinforced zinc rich nanocomposite coating for corrosion protection of carbon steel substrate, *Journal of Alloys and Compounds*, 727, 1148–1156.
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M. ve Gorga, R., 2006. Polymer-Matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview, *Journal Of Composite Materials*, 40, 17.
- Iftikhar, A., Adnan, M., Usman, M., Akram, M. Javed S. ve Saqib, A., 2021. Study of magnetic and dielectric properties of ZnFe₂O₄/CoCr₂O₄ nanocomposites produced using sol-gel and hydrothermal processes, *Elsevier*, 865, 158953.

- Jiang, F., Zhao, W., Wu, Y., Dong, J., Zhou, K., Lu, G. ve Pu, J., 2019. Anti-corrosion behaviors of epoxy composite coatings enhanced via graphene oxide with different aspect ratios. *Progress in Organic Coatings*, 127, 70 – 79.
- Kalendová, A., 2003. Effects of particle sizes and shapes of zinc metal on the properties of anticorrosive coatings. *Progress In Organic Coatings*, 46, 4, 324-332.
- Kumar, A. ve Gupta, R., 2003. *Fundamentals of Polymer Engineering*, 2. Edition, USA.
- Kuzak, S. ve Shanmugam, A., 1999. Dynamic mechanical analysis of fiber-reinforced phenolics, *Journal of Applied Polymer Science*, 73, 649 – 658.
- Lawal, A., 2019. Graphene-based nano composites and their applications, A Review. *Biosensors and Bioelectronics*, 141, 111384.
- Liu, D., Zhao, W., Liu, S., Cen, Q. ve Xue, Q., 2016. Comparative tribological and corrosion resistance properties of epoxy composite coatings reinforced with functionalized fullerene C60 and graphene, *Surf. Coat. Technol.*, 286, 354–364.
- Liu, S., Gu, L., Zhao, H., Chen, J. ve Yu, H., 2016. Corrosion resistance of graphene-reinforced waterborne epoxy coatings, *J. Mater. Sci Technol.*, 32, 425–431.
- Lu, H., Xu, X., Li, X. ve Zhang, Z., 2006. Morphology, crystallization and dynamic mechanical properties of PA66/nano-SiO₂ composites. *Bulletin of Materials Science*, 29, 5, 485-490.
- Ma, L., Song, G., Zhang, X., Zhou, S., Liu, Y. ve Zhang, L. 2021. Attaching SiO₂ nanoparticles to GO sheets via amino-terminated hyperbranched polymer for epoxy composites: Extraordinary improvement in thermal and mechanical properties, *European Polymer Journal*, 157, 110677.
- Malyadri, T. ve Kumar, J., 2022. Investigation of mechanical properties for basalt fiber compoite with silica nano particles, *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 9, 2349– 5162.
- Martin-Gallego, M., Verdejo, R. ve Khayet, M., 2011. Thermal conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy nanofluids and nanocomposites, *Nanoscale Research Letters* 6, 1, 610-614.
- Matin, E., Attar, M. ve Ramezanzadeh, B., 2015. Investigation of corrosion protection properties of an epoxy nanocomposite loaded with polysiloxane surface modified nanosilica particles on the steel substrate, *Progress in Organic Coatings*, 78, 395-403.
- Naebe, M., Sandlin, J., Crouch, I. ve Fox, B., 2013. Novel polymer-ceramic composites for protection against ballistic fragments, *Polymer Composites*, 34, 180-186.
- Nagamadhu, M., Jeyaraj, P. ve Mohan Kumar, G.C., 2020. Influence of textile properties on dynamic mechanical behavior of epoxy composite reinforced with woven sisal fabrics, *Sadhana*, 45, 1, 1-10.

- Nguyen, T., Vuong, T., Hoang, T. Ve Xianming, S., 2016. Effect of nanoparticles on the thermal and mechanical properties of epoxy coatings, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16, 9, 9874-9881.
- Paksoy, A., 2008. Çelik yapıların, atmosferik korozyona karşı korunmasında epoksi bazlı boya ve kaplamaların kullanımı ve performansı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Park, J., Ye, Q., Topp, E., Misra, A., ve Spencer, P., 2009. Water sorption and dynamic mechanical properties of dentin adhesives with a urethane-based multifunctional methacrylate monomer, *Dental Materials*, 25, 12, 1569-1575.
- Rajabi, M., Rashed, G. ve Zaarei, D., 2015. Assessment of graphene oxide/epoxy nanocomposite as corrosion resistance coating on carbon steel, *Corros. Eng. Sci. Tech.*, 50, 7, 509-516.
- Ramezanzadeh, B., Attar, M. Ve Farzam, M., 2011. A study on the anticorrosion performance of the epoxy–polyamide nanocomposites containing ZnO nanoparticles. *Progress In Organic Coatings*, 72, 3, 410-422.
- Ranjbar, Z., Ashhari, S., Jannesari, A., ve Montazeri, S., 2013. Effects of nano silica on the anticorrosive properties of epoxy coatings, *Progress in Color, Colorants and Coatings*, 6, 2, 119-128.
- Ranjith, B. and Paruthimal, G., 2010, Ni–Co–TiO₂ nanocomposite coating prepared by pulse and pulse reversal methods using acetate bath, *Applied Surface Science*, 257, 42-47.
- Rieger, J., 1996. The glass transition temperature of polystyrene: Results of a round robin test, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 46, 3-4, 965-972.
- Safronova, E., Yurova, P., Ashrafi, A., Chernyak, A., Khoroshilov, A. ve Yaroslavtsev, A., 2021. The effect of ultrasonication of polymer solutions on the performance of hybrid perfluorinated sulfonic acid membranes with SiO₂ nanoparticles, *Reactive and Functional Polymers*, 165, 104959.
- Samad, U., ve Alam, M., 2023. Synergistic Effect of Nanoparticles: Enhanced Mechanical and Corrosion Protection Properties of Epoxy Coatings Incorporated with SiO₂ and ZrO₂, *Polymers*, 15, 14, 3100.
- Samad, U., Alam, M., Anis, A., Abdo, H., Shaikh, H. ve Al-Zahrani, S., 2022. Nanomechanical and electrochemical properties of zno-nanoparticle-filled epoxy coatings, *Coatings*, 12, 2, 282.
- Samad U., Alam, M., Chafidz, A., Al-Zahrani, S. Ve Alharthi, N., 2018. Enhancing Mechanical properties of epoxy/polyaniline coating with addition of ZnO nanoparticles: nanoindentation characterization, *Progress In Organic Coatings*, 119, 109-115.
- Sargsyan, A., Tonoyan, A., Davtyan, S. ve Schick, C., 2007. The amount of immobilized polymer in PMMA SiO₂ nanocomposites determined from calorimetric data, *European Polymer Journal*, 43, 8, 3113-3127.

- Sepet, H., 2014. Nano-partikül takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen nanokompozitlerin üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Shi, X., Nguyen, T., Suo, Z., Liu, Y. ve Avci, R., 2009. Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating, *Surface & Coatings Technology*, 204, 237–245.
- SudarshanRao, K., 2021. Dynamic mechanical behavior of unfilled and graphite filled carbon epoxy composites, *Materials Science and Engineering*, 1126, 1, 012033.
- Svobodová, J., Lysoňková, I., ve Krejčí, M., 2019. Microhardness and nano-hardness measurement of composite coatings applied to aluminium substrate. *Manufacturing Technology Journal*, 19, 4, 700-705.
- TabkhPaz, M., Park, D., Lee, P., Hugo, R. ve Park, S., 2018. Development of nanocomposite coatings with improved mechanical, thermal and corrosion protection properties, *Journal of Composite Materials*, 52, 8, 1045-1060.
- Taborda, E., Franco, C., Lopera, S., Castro, R., Maya, G., Idrobo, E. ve Cortés, F., 2021. Effect of surface acidity of SiO₂ nanoparticles on thermal stability of polymer solutions for application in EOR processes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107802.
- Tsai, P. Y., Chen, T. ve Lee, Y., 2018. Development and characterization of anticorrosion and antifriction properties for high performance polyurethane/graphene composite coatings, *Coatings*, 8, 7, 250.
- Tong, Y., Bohmb, S. ve Song, M. 2013. Graphene based materials and their composites as coatings, *Austin Journal of Nanomedicine & Nanotechnology*, 1, 1, 1003.
- Ulus, H., 2021. The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: performance evaluating by Dynamic Mechanical Analysis (DMA) and short beamshear(sbs)tests, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, 1, 412–419. URL Adres: <https://www.intechopen.com/books/397> Erişim tarihi: 14.05.2024.
- Vu, P., Truc, T., Chinh, N., Tham, D., Trung, T., Oanh, V., Hang, T., Olivier, M. And Hoang, T., 2018. Improvement of mechanical and dielectric properties of epoxy resin using cnts/zno nanocomposite, *Journal Of Nanoscience And Nanotechnology*, 18, 4, 2830-2837.
- Wei, J., Saharudin, M., Vo, T. ve Inam, F., 2017. Dichlorobenzene: an effective solvent for epoxy/graphene nanocomposites preparation, *Royal Society*, 4, 10, 170778.
- Wu, J., Zuo, X., Chen, Q., Deng, X., Liang, H., Zhu, T., Liu, J., Li, W. ve Nan, J., 2019. Functional composite polymer electrolytes with imidazole modified SiO₂ nanoparticles for high-voltage cathode lithium ion batteries, *Electrochimica Acta*, 320, 134567.

- Yazman, Ş., Uyaner, M., Karabörk, F. ve Akdemir, A., Effects of nano reinforcing/matrix interaction on chemical, thermal and mechanical properties of epoxy nanocomposites, *Journal of Composite Materials*, 55, 28, 4257-4272.
- Zaimova, D., Bayraktar, E., Katundi, D. ve Dishovsky, N., 2012. Elastomeric matrix composites: Effect of processing conditions on the physical, mechanical and viscoelastic properties, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 50, 81–91.
- Zarei, M., Kolahchi, R., Hajmohammad, M. ve Maleki, M., 2017. Seismic response of underwater fluid-conveying concrete pipes reinforced with SiO₂ nanoparticles and fiber reinforced polymer (FRP) layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 103, 76-85.
- Zhan, Y., Zhang, J., Wan, X., Long, Z., He, S. ve He, Y., 2018. Epoxy composites coating with Fe₃O₄ decorated graphene oxide: Modified bio-inspired surface chemistry, synergistic effect and improved anti-corrosion performance , *Applied Surface Science*, 436, 756-767.
- Zhang, X., Alloul, O., He, Q., Zhu, J., Verde, M. J., Li, Y., Wei, S. ve Guo, Z., 2013. Strengthened magnetic epoxy nanocomposites with protruding nanoparticles on the graphene nanosheets, *Polymer*, 54, 14, 3594-604.
- Zhou, X., Huang, H., Zhu, R., Sheng, X., Xie, D. ve Mei, Y., 2019. Facile modification of graphene oxide with Lysine for improving anti-corrosion performances of waterborne epoxy coatings, *Prog. in Org.Coat.*, 136 105200.
- Zhu, Q., Zhang, K. ve Huang, Y., 2022. Hydrothermally synthesized ZnO-reduced graphene oxide nanocomposite for enhanced anticorrosion performance of waterborne epoxy coating, *Nanostruct Chem.*, 12, 277–289.
- URL-1<<https://world.helmut-fischer.com/tr/teknikler/manyetik-i%CC%87ndueksiyon#:~:text=Manyetik%20ind%C3%BCktif%20%C3%B6l%C3%A7%C3%BCm%20i%C3%A7in%20prob,alternatif%20bir%20manyetik%20alan%20olu%C5%9Fturur.>>, Erişim tarihi: 26.04.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Ali Kemal ALTINOK

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Gazi Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü, 2009-2013

Lisans : Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2018-2019

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022-2024

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Ekosaray OSGB (Aksaray) / B Sınıfı İş Güvenliği Uzmanı
2. Mysilo Tahıl Depolama Sistemleri (Aksaray) / Makine Mühendisi

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Bildiriler:

Altınok, A. K. ve Karabörk, F., 2023. Nanopartiküllerin epoksi kaplamanın farklı metal yüzeylere yapışma davranışı ve korozyon direnci üzerine etkilerinin incelenmesi, 12. Uluslararası mühendislik mimarlık ve tasarım kongresi, Online Sözlü Sunum, Bildiriler kitabı: 74-82.