



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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EPOKSİ NANOKOMPOZİT KAPLAMALARA KATILAN
SİLİKA VE GRAFEN NANOPARTİKÜLLERİN KAPLAMANIN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ümit Esra ÖZCAN

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fazliye KARABÖRK

AKSARAY, 2019

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 142304405 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Ümit Esra ÖZCAN** tarafından hazırlanan **“EPOKSİ NANOKOMPOZİT KAPLAMALARA KATILAN SİLİKA VE GRAFEN NANOPARTİKÜLLERİN KAPLAMANIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ”** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir

Danışman: Doç. Dr. Fazlıye KARABÖRK

Aksaray Üniversitesi

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



Üye: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Necmettin Erbakan Üniversitesi

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



Üye: Prof. Dr. Kemal ALDAŞ

Aksaray Üniversitesi

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



Tez Savunma Tarihi: 24/04/2019

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

.....

Doç. 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

Ümit Esra ÖZCAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, metalik yüzeylerin kaplanmasında kullanılan epoksi malzeme içerisine katılan nanopartiküllerin kaplama özelliklerine etkilerinin incelenmesine yönelik deneysel bir araştırmadır.

Lisans ve yüksek lisans hayatım boyunca her zaman yol gösterici, yardımcı, destekleyici ve yüreklendirici biri olarak, karşıma çıktığı için kendimi çok şanslı olarak hissettiren çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Fazlıye KARABÖRK'e gönülden teşekkürler.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde bilgi ve tecrübesinden her zaman faydalandığım Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e, laboratuvar çalışmalarım esnasında yardımını hiç esirgemeyen Dr. Şakir YAZMAN'a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca Boya Test Laboratuvarlarını kullanmama izin verdikleri için TÜMOSAN A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ve iyi ve kötü günlerimde hep yanımda olan, bana desteklerini hiç esirgemeyen Annem, Kardeşlerim ve Yeğenime sonsuz teşekkürler.

Tezimin gerçekleşmesinde 2016-007 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Ümit Esra ÖZCAN

AKSARAY, 2019

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Polimerik Kaplamalar.....	3
2.2 Epoksi Kaplamalar	5
2.2.1 Kaplama öncesi metalik yüzeylerin hazırlanması	7
2.2.2 Epoksi kaplamanın uygulanması	9
2.3 Kaplamaların Özelliklerinin Belirlenmesi.....	10
2.3.1 Kaplama kalınlığının ölçülmesi.....	10
2.3.2 Renk ve parlaklık kontrolü	10
2.3.3 Sertlik.....	11
2.3.4 Yapışma mukavemeti	13
2.3.5 Esneklik	15
2.3.6 Darbe dayanımı.....	16
2.3.7 Korozyon direnci	17
2.3.8 Mikrosertlik ve mikroçizik testleri	17
2.4 Nanomalzemeler.....	20
2.5 Nanokompozit Kaplamalar.....	20
2.6 Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri	28
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	34
3.1 Malzemeler.....	34
3.2 Epoksi Nanokompozit Kaplamanın Hazırlanması ve Uygulanması	36
3.3 Karakterizasyon Testleri.....	40
3.3.1 Kaplama kalınlığı ölçümü.....	41
3.3.2 Kafes çizgi testi.....	41
3.3.3 Konik bükme ve çökertme testi	42
3.3.4 Darbe testi.....	45
3.3.5 Sertlik Testi.....	47
3.3.6 Mikrosertlik ve mikroçizik testleri	47
3.3.7 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi.....	51
3.3.8 Termogravimetrik analiz	51
3.3.9 Tarama elektron mikroskobu analizi	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
4.1 Kafes Çizgi Testi Sonuçları.....	53
4.2 Konik Bükme ve Çökertme Testi Sonuçları.....	53
4.3 Darbe Testi Sonuçları.....	54
4.4 Pendulum Sertlik ve Mikrosertlik Testlerinin Sonuçları.....	55
4.5 Mikroçizik Testi Sonuçları.....	56
4.2 FTIR Analizi Sonuçları	57
4.3 TGA Sonuçları	58
4.4 SEM Analizi Sonuçları.....	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63

5.1 Sonuçlar	63
5.2 neriler	64
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	72



YÜKSEK LİSANS TEZİ

EPOKSİ NANOKOMPOZİT KAPLAMALARA KATILAN SİLİKA VE GRAFEN NANOPARTİKÜLLERİN KAPLAMANIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Ümit Esra ÖZCAN

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fazlıye KARABÖRK

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, nanopartiküllerin epoksi kaplamaların özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Epoksi reçineler kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır, ancak epoksi kaplamaların zayıf mekanik özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda kullanımı sınırlıdır. Bu nedenle bu tez çalışmasında, 16 nm çapında silika (SiO_2) ve 24 μm çap ile 6 nm kalınlığa sahip grafen nanopartiküller (GNP) sırasıyla ağırlıkça % 1 ve % 0,1 oranlarında ayrı ayrı ve birlikte (hibrit) güçlendirici olarak epoksi matrise eklenmiştir. Epoksi kaplamaların mekanik, fiziksel ve termal özellikleri makro ve mikro analizlerle çok boyutlu olarak ele alınmıştır. Bu amaçla; kaplamaların yüzeye yapışma durumunu belirlemek için kafes çizgi testi, elastikliğini belirlemek için konik bükme ve çökertme testleri, darbe etkisindeki davranışını belirlemek için darbe testi yapılmıştır. Nanopartiküllerin etkilerini ortaya koyabilmek için sertlik; Persoz pendulum sertlik ve mikrosertlik yöntemleri ile ölçülmüştür. Ayrıca boyanın çizilme direncini belirlemek için mikroçizik testi yapılmıştır. Nanopartiküllerin epoksi kaplamanın termal kararlılıklarına etkileri termogravimetrik analiz (TGA) yöntemi ile belirlenmiştir. Epoksi reçine ve nanopartikül arasındaki etkileşimi belirlemek için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi yapılmıştır. Numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınıp nanopartiküllerin şekil ve dağılımının çatlak yayılmasına karşı etkileri incelenmiştir.

DeneySEL sonuçlar, grafen nanopartiküllerin epoksi matrise eklenmesinin, kaplamaların esnekliğinin ve darbe direncinin nanopartikül katılmamış epoksiye göre sırasıyla % 8,3 ve % 157,1 oranında arttığını göstermiştir. SiO_2 -GNP nanohibrid ilavesi, mikro sertliği % 53,8 oranında arttırmış, çizilme direncinin bir ölçüsü olan penetrasyon derinliği değerini ise % 29,7 azaltmıştır.

Anahtar kelimeler: Epoksi, nanokompozit kaplama, Silika, Grafen, Hibrit, Mekanik özellikler

Nisan, 2019; 72 sayfa

M.Sc. THESIS

EFFECTS OF SILICA AND GRAPHENE NANOPARTICLES ON MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY NANOCOMPOSITE COATINGS

Ümit Esra ÖZCAN

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

ABSTRACT

The aim of this study is the investigation on the effect of nanoparticles on the properties of epoxy coatings. Epoxy resins are used as coating materials but the practical use of epoxy coatings in industries is limited due to their weak mechanical properties. Therefore, in this thesis, silica (SiO₂) having 16 nm diameter and graphene nanoparticles (GNP) having 24 nm diameter and 6 nm thickness were introduced separately and together (hybrid) into an epoxy matrix as reinforcements in 1% and 0.1% by weight respectively. Mechanical, physical and thermal properties of the epoxy coatings were handled as multidimensional by the macro and micro analyses. For this purpose, effect of nanoparticles on adhesion of the coatings to the steel substrate, impact resistance and elasticity of epoxy coating were determined through cross-cut test, impact test and, conical bending and cupping tests, respectively. The hardness of the epoxy coating was measured by Persoz pendulum hardness and microhardness methods. In addition, the microscratch test was performed to determine the scratch resistance of the coating. Effect of nanoparticles on thermal stability of epoxy coating was determined through thermogravimetric analysis (TGA). Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis was performed to determine the interaction between epoxy resin and nanoparticle. Fractured surfaces of specimens were investigated through SEM images and discussed to identify effects of nanoparticles' shape and dispersion on crack propagation.

The experimental results showed that, the addition of GNPs into the epoxy matrix, the flexibility and impact resistance of the coatings increased by 8.3 and 157.1 %, respectively, according to neat epoxy. The microhardness increased by 53.8% and penetration depth, which is indicating of the scratch resistance, decreased by 29.7 %, with the addition of SiO₂-GNPs nanohybrid.

Keywords: Epoxy, Nanocomposite coatings, Silika, Graphene, Hybrid, Mechanical properties

April, 2019; 72 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. (a) Bisfenol A esaslı epoksi reçinenin kimyasal yapısı ve amin kür ajanı (b)Kürlenmiş epoksi ağ yapısı	6
Şekil 2.2. Pendulum sertlik ölçme cihazı ölçüm prensibi	12
Şekil 2.3. Kalem sertliği ölçümü.	13
Şekil 2.4. Kafes çizgi testi için kullanılan bıçağın özellikleri.....	13
Şekil 2.5.Yapışkan bandın kafes çizgilerine göre pozisyonu.	14
Şekil 2.6. Konik bükme testi.....	15
Şekil 2.7. Çökertme testinin şematik gösterimi.	16
Şekil 2.8. Darbe testi.....	16
Şekil 2.9. Yük - Derinlik Eğrisi	18
Şekil 2.10. Batıcı ucun batma derinliğine bağlı olarak elastisite modülünün değişimi.	19
Şekil 2.11. Mikro çizik testinin şematik gösterimi.	20
Şekil 2.12. Nanopartikül katılmış reçinenin kimyasal yapısının şematik gösterimi .	22
Şekil 2.13. Çeşitli karbon nanomalzemeler.	24
Şekil 2.14. Organik/inorganik öncüleri içeren sol-jel esaslı kaplamanın şematik görüntüsü	26
Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan epoksi ve sertleştirici.	34
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan nanomalzemeler.....	35
Şekil 3.3. Kullanılan test plakalarının ölçüleri, test plakaları ve boya aplikatörü.	36
Şekil 3.4. ASTM D638 Polimer çekme numunesi ölçüleri.	36
Şekil 3.5. Numune dökülmeden önce ve sonra çekme kalıpları.	37
Şekil 3.6. Ultrasonik karıştırıcı ve vakum fırını.	38
Şekil 3.7. Numune hazırlama adımları.	39
Şekil 3.8. Aplikatör ile kaplama uygulaması.....	40
Şekil 3.9. Kaplanmış numuneler (sağdan sola; saf epoksi, silika katılan, GNP katılan epoksi kaplama uygulamaları).....	40
Şekil 3.10. Kaplama kalınlığı ölçümü.....	41
Şekil 3.11. Hazırlanan numunelere kafes çizgi testi uygulanması.	42
Şekil 3.12. Kafes çizgi testi uygulanmış (a) silika ve (b) grafen katılan kaplama numuneleri.....	42
Şekil 3.13. Hazırlanan numunelere konik bükme testinin uygulanması.....	43
Şekil 3.14. Konik bükme testi uygulanmış (a) saf epoksi ve (b) hibrit katılan numuneler.....	43
Şekil 3.15. Çökertme test cihazı.	44
Şekil 3.16. Çökertme testi uygulanmış (a) saf epoksi, (b) silika, (c) hibrit ve (d) grafen katılan numuneler.....	45
Şekil 3.17. Darbe testinin uygulanması.	46
Şekil 3.18. Darbe testi uygulanmış (a) saf epoksi, (b) grafen katılan numuneler.	46
Şekil 3.19. Pendulum (persoz) sertlik testinin uygulanması.....	47
Şekil 3.20. Nanoindentasyon test cihazı.	48
Şekil 3.21. Kaplama numunelerinin örnek Yük - Derinlik eğrileri: (a) saf epoksi, (b) hibrit nanopartikül katılan numune.....	49
Şekil 3.22. Test uygulanan numunelerden alınan örnek yüzey görüntüsü.	50
Şekil 3.23. Hibrit nanopartikül katılan kaplama numunesinin, mikroçizik testi sonucunda elde edilen, artan yükleme değerine karşı penetrasyon derinliği ve kalan derinlik değişimi grafiği.	50

Şekil 3.24. FTIR analiz cihazı.....	51
Şekil 3.25. Tarama elektron mikroskobu.....	52
Şekil 4.1. (a) Silika (b) grafen katılan numunelerdeki yırtılma görüntüsü.	53
Şekil 4.2. Kaplamalara ait FTIR spektrumları.	58
Şekil 4.3. Kaplamalara ait TGA eğrileri.	59
Şekil 4.4. Saf epoksi (a) ve % 0,1 grafen katılan epoksi (b) kaplamaya ait SEM görüntüleri.	60
Şekil 4.5. Silika (a), grafen (b) ve silika-grafen (c) dağılımını gösteren SEM görüntüleri.	60
Şekil 4.5 (devam). Silica (a), grafen (b) ve silica-grafen (c) dağılımını gösteren SEM görüntüleri	61
Şekil 4.6. Farklı çatlak yayılım mekanizmalarını gösteren SEM görüntüleri: mikroçatlaklar (a), çatlak dallanması (b), çatlak sapması ve çatlak durdurma (c), (d) çatlak köprüleme.....	62



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Farklı reçine tipleri ve özellikleri	4
Çizelge 2.2. Sarkaç türüne göre test değişkenleri.	11
Çizelge 2.3. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu.	14
Çizelge 2.4. Kaplamaların çeşitli özelliklerini geliştiren nanopartikül türleri	23
Çizelge 2.5. Nano partiküllerin modifikasyonu için kullanılan silanlar	27
Çizelge 3.1. Kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.....	35
Çizelge 3.2. Nanokompozit kaplama formülasyonu.....	37
Çizelge 4.1. Kaplamaların fiziksel ve mekanik özellikleri.	55
Çizelge 4.2. Kaplamaların sertlik ve modül değerleri.	56
Çizelge 4.3. Artan yük altında yapılan çizik testi sonrası penetrasyon ve kalan derinlik değerleri (Sonuçlar 5 N yük altındaki değerlerdir).	57
Çizelge 4.4. Kaplama numunelerinin TGA sonuçları.....	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Al₂O₃	Alümina
ATO	Antimonkalayoksit
CuO	Bakıroksit
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
Fe₂O₃	Demiroksit
FTIR	Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrometre Analizi
GO	Grafenoksit
GNP	Grafen Nanopartikül
GPTMS	Glycidoxypopyltrimethoxysilane
ITO	İndiyumkalayoksit
MPS	Methacryloxypropyltrimethoxysilane
MWCNT	Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
SiO₂	Silika
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu
TGA	Termogravimetrik Analiz
TiO₂	Titanyumoksit
ZnO	Çinkooksit
ZrO₂	Zirkonyumoksit

1. GİRİŞ

Polimerik kaplamalar, metalik yüzeylerin mekanik ve korozyon etkilerden korunması ve daha uzun süre kullanılmalarını sağlamak için uygulanan koruyucu kaplamalardır. Epoksi reçineler; termal kararlılık, kimyasal direnç, kolay uygulanabilme ve düşük maliyet gibi sahip oldukları pek çok avantajları sayesinde bu amaçla kullanılan kaplama malzemelerinden birisidir. Ancak, yüksek çaprazbağı yapıları nedeniyle oluşan zayıf çekme dayanımları ve gevrek yapıları uygulama alanlarını sınırlandırmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek ve daha yüksek dayanım ve tokluğa sahip epoksi kaplamalar geliştirebilmek için araştırmacılar, çeşitli nanopartiküller katarak epoksi reçineyi modifiye etme yoluna gitmişlerdir.

Bu tez çalışması, epoksi kaplamaya katılan nanopartiküllerin etkilerinin araştırılması amacıyla yapılmıştır. Daha önce yapılan çeşitli çalışmalarda, epoksi matrise katılan nanopartiküllerin çizilme ve aşınma direncini önemli oranda arttırdığı rapor edilmiştir. Polimerik kaplamaların özelliklerini geliştirmek için en çok kullanılan nanopartiküller arasında Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , $CaCO_3$, Fe_2O_3 ve SiO_2 sayılabilir. Diğer yandan literatürde, polimerik kaplamalara; karbon nanotüp ve grafen gibi çeşitli nanokarbon formlarının katılmasıyla yapılan çalışmaların olduğu gözlenmiştir. Ancak bu çalışmaların çoğunlukla kaplamaların korozyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik olduğu mekanik özellikler konusunda sınırlı sayıda çalışmanın yapıldığı tespit edilmiştir. Kaplama uygulanmasının tek amacı altındaki metalik yapıyı korozyondan korumak değildir, iş makineleri gibi mekanik zorlamalara maruz kalan çeşitli uygulamalarda kaplamanın yeterli direnci göstermesi ve soyulma, çizilme, yırtılma gibi olayların en az seviyede olması istenir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında özellikle mekanik özellikler üzerinde durulmuş ve bu konudaki çalışmalara katkı verilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca, bu tez çalışmasında, yeni bir malzeme olan grafenin silika gibi inorganik bir nanopartikülle birlikte hibrit olarak kullanılması durumunda etkileşimlerinin nasıl olacağı, silikanın küresel, grafenin düzlemsel yapısının epoksi matrisli bir kaplama uygulamasında özellikleri nasıl etkileyeceğinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Literatürde, hibrit nanopartikül kullanılarak yapılan sınırlı sayıdaki çalışmanın yine kaplamaların korozyon özelliklerine etkileri konusunda yoğunlaşması, mekanik özelliklerin incelendiği çalışma sayısının çok az olması bu konunun tez çalışması

olarak seçilmesine neden olmuştur.

Bu çalışmada, epoksi matris içine silika (SiO_2) ve grafen nanoparpartiküller (GNP) katılmıştır. SiO_2 ve grafen epoksi matris içine sırasıyla ağırlıkça % 1 ve % 0,1 oranlarında ayrı ayrı ve birlikte hibrit nanopartikül (% 1 + % 0,1) olarak katılarak kaplama özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın bölümleri ve içerikleri aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

Giriş bölümünde, çalışmanın amacı ve içeriği açıklanmıştır.

2.Bölüm’de, polimerik kaplamalar, epoksi kaplamalar, nanopartiküller ve nanokompozit kaplamalar hakkında bilgi verilmiş, bu çalışmanın literatürdeki yeri açıklanmıştır.

3. Bölüm’de, yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve yöntem açıklanmıştır.

4. Bölüm’de, deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular incelenmiştir.

Sonuçlar ve öneriler bölümünde tez çalışmasından çıkarılan sonuçlar özetlenerek sıralanmıştır. Yapılacak olan benzer çalışmalara yardımcı olacağı düşünülen önerilere de bu bölümde yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Polimerik Kaplamalar

Polimerik kaplamalar çevresel ve mekanik etkilere karşı metalik yapıların korunması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplamalar koruyucu olarak kullanılmalarının yanında, dekoratif veya fonksiyonel amaçlarla yüzeylere uygulanabilir, ancak çoğu durumda amaç bunların bir kombinasyonudur (Mathiazhagan ve Joseph, 2011). "Fonksiyonel kaplamalar" terimi, bir kaplamanın klasik özelliklerinin (örneğin dekorasyon ve koruma) yanı sıra ek bir işlevselliğe sahip olmasını ifade eder (Mathiazhagan ve Joseph, 2011). Kaplamalar, uygulanacağı metalik yüzeyin uygun şekilde hazırlanmasının ardından tek kat uygulanabileceği gibi, astar ve son kattan oluşan çok katlı sistemleri olarak da uygulanabilir. Ayrıca, bazı durumlarda, örneğin otomotiv kaplama sistemleri gibi, bu uygulama 4-6 kat arasında değişebilir (Mathiazhagan ve Joseph, 2011).

Polimerik kaplamalar çoğunlukla dört temel bileşenden oluşur; matris (reçine), pigment, çözücü ve katkı maddeleri. Aşağıda bu bileşenlerin özellikleri ve fonksiyonlarına kısaca değinilmiştir. Kaplamalar, kaplama bileşiminde kullanılan matrisin adıyla ifade edilirler. Metalik yüzeylerin kaplanmasında yaygın olarak kullanılan polimerik reçineler arasında; epoksi, akrilik, alkit, vinil ve poliüretan sayılabilir. Bu malzemeler; yüzeye yapışma özellikleri, mekanik, korozif ve ultraviyole dirençleri, şeffaf olarak uygulanabilirlikleri yönünden farklılık göstermekte ve uygulama alanları değişmektedir. Çizelge 2.1’de reçinelerin türleri ve özellikleri verilmiştir.

Matris: Basit bir ifadeyle, bir kaplamanın matrisi, bir arada tutan ve alt tabakaya yapışmanın sağlanmasından esas olarak sorumlu olan bileşendir. Birkaç istisna dışında, matris neredeyse daima organiktir ve doğal reçinelerden veya insan yapımı polimerlerden oluşur. Matrisler, nasıl kürleştiklerine göre iki şekilde sınıflandırılırlar. Yalnızca içindeki çözücünün buharlaştırılmasıyla kürleneyen reçineler termoplastik, uygulama esnasında veya sonrasında bir kimyasal reaksiyon ile kürleneyen reçineler ise termoset olarak adlandırılır (Bayer ve Zamanzadeh, 2004).

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

Reçine tipi	Özellikleri
Epoksi	İyi atmosferik korozyon dayanımı, kimyasal dayanımı iyi, su dayanımı iyi, yapışması mükemmel, parlaklık, darbe direnci ve aşınma direnci yüksek, 105 °C kuru, 65 °C ıslak sıcaklık dayanımı, çeliğe ve betona mükemmel yapışma
Akrilik	Mükemmel ışık ve ultraviyole stabilitesi, parlaklığını ve rengini koruma, kimyasal ve atmosferik korozyon yüksek direnç, Kimyasal gazlara, çok agresif olmayan kimyasalların dökülme ve saçılmalarına dayanım, çaprazbağlanma ile daha iyi kimyasal dayanım
Vinil	Yağ, gres, alifatik hidrokarbon ve alkolde çözünmeme, su ve tuz çözeltilerine dayanım, oda sıcaklığında inorganik asit ve alkalilere dayanım, yanma direnci, sağlam, esnek, düşük zehirlilik, tatsız, renksiz, endüstriyel boya olarak çok geniş bir kullanım alanı
Alkit	Atmosferik korozyona iyi, kimyasal gazlara ise orta dayanım, kimyasal saçılmalara yetersiz dayanım, 105 °C sıcaklığa kadar dayanım, endüstriyel bölgelerde en yaygın duman tipi olan hafif kimyasal gazlara karşı yeterli korozyon direnci
Poliüretan	Kimyasal olarak mükemmel parlaklık, renk ve ultraviyole dayanımı, genel olarak kimyasal ve nem dayanımı poliamid kürlenmeli epoksilere benzer, mükemmel aşınma direnci, korozif ortamlarda parlaklığını koruyan hızlı kürlenmiş son kat boya olarak kullanım

Pigment: Pigmentler, bir kaplamanın korozyon direncini, fiziksel özelliklerini ve görünümünü etkileyebilir. Bunlar genellikle inorganik ve organik olmak üzere iki kategoriye ayrılırlar. İnorganik pigmentler, çoğunlukla kristal yapıda olan ve çeşitli reçine sistemleriyle uyumunu geliştiren özel katkılar yardımıyla kaplama içinde dağıtık olarak bulunan ayrı parçacıklardan oluşur. Yukarıda listelenen pigment fonksiyonlarının üçüne de, yani korozyon direncine, fiziksel özelliklere ve estetiğe katkıda bulunabilirler. Organik pigmentler genellikle oldukça karmaşık organik moleküllerdir, çeşitli türleri bazı reçinelerde ve çözücülerde kısmen çözünebilir, nadiren endüstriyel kaplamalarda kullanılırlar, en önemli avantajlarından birisi canlı, zengin renk vermeleridir.

Solvent: Birkaç istisna dışında, kaplamaların çoğu matrisin çözünmesi ve kaplamanın geleneksel yöntemlerle uygulanabilmesi için viskozitesinin değiştirilmesini

gerektirir. Solventler, kaplama uygulandıktan sonra buharlaşır ve yüzeyin ıslanmasının yanı sıra kaplamanın akışına ve uygulanmasına yardımcı olur. Lateks kaplamada ana çözücü su olduğu halde, çözücüler genellikle organik sıvılar olabilir. Bazı solventler bazı reçinelere daha uyumludur ve diğerlerinden daha etkili bir şekilde çözebilir.

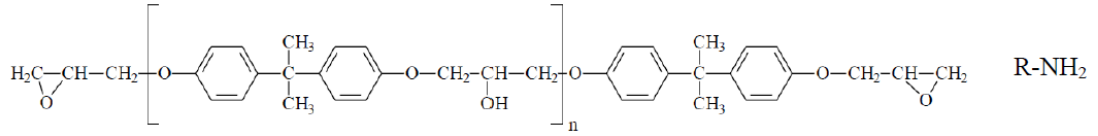
Katkı Maddeleri: Katkı maddeleri, küçük miktarlarda ilave edilmesine rağmen bir kaplamanın özelliklerini büyük oranda etkileyebilen çeşitli kimyasallardır. Kullanım amaçlarına göre katkı maddeleri arasında; sürfaktanlar, çökelmeyi önleyici maddeler, kaynaştırıcı ajanlar, sürtünme önleyici ajanlar, katalizörler, köpük gidericiler, ultraviyole ışık emicileri, dispersiyon ajanları, koruyucular, kurutucular ve plastikleştiriciler sayılabilir (Bayer ve Zamanzadeh, 2004).

Kaplama endüstrisi, son yıllarda, artan çevresel kaygılar ve ekonomik faktörler nedeniyle kaplamaların etkinliğini geliştirmek için yeni teknolojiler ve malzemeler aramaya yönelmiştir. Kaplamanın kalitesi, uygulanacağı yüzeyin (alt tabaka) özellikleri, kaplama/alt tabaka arayüzey özellikleri ve ortamın korozyif özelliği kaplamaların verimini etkileyen çeşitli faktörler olarak sayılabilir (Tong vd., 2013).

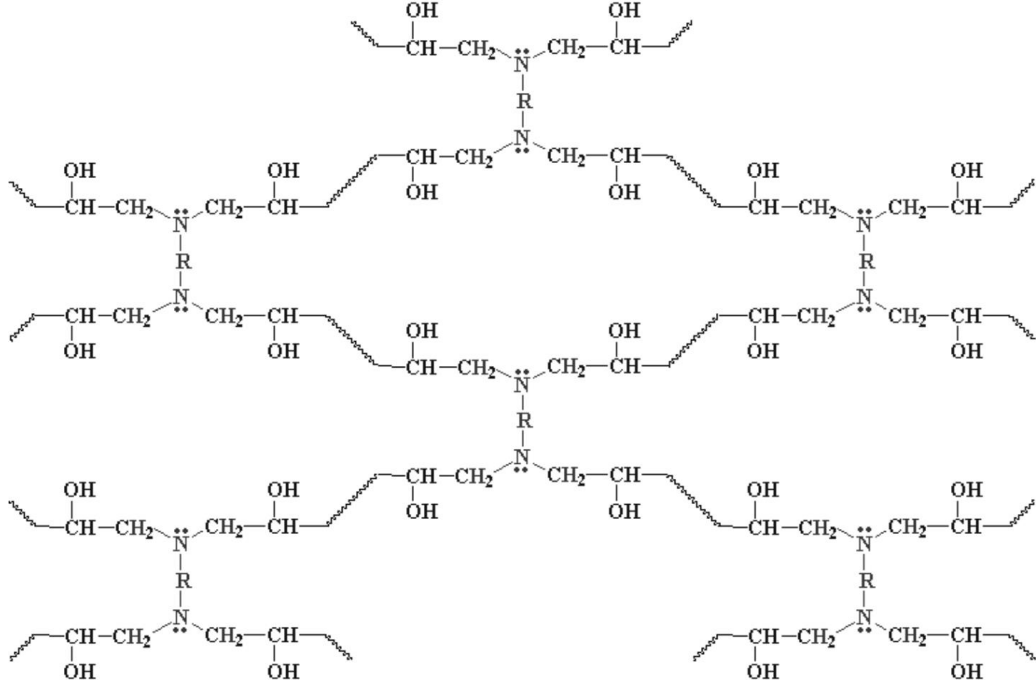
Günümüzde endüstriyel gereksinimleri karşılamak için, kaplama uygulamalarında polimer nanokompozitlerin kullanımı yoğun olarak araştırılmaktadır, çünkü nanokompozitler nispeten düşük maliyetli, üstün özellikler sunmaktadır.

2.2 Epoksi Kaplamalar

Epoksi reçine esaslı kaplamalar çok çeşitli yüzeylerde uzun yıllardan beri kullanılmaktadır (Tiwari, 2012). Yapılarında iki veya daha fazla yüksek reaktivliğe sahip oksiran halkaları (epoksi grupları) içeren oligomerlere epoksi reçineler denir (Şekil 2.1). Epoksi reçineler hakkındaki ilk bilgi 1943'te patent literatüründe yayınlanmıştır ve 1953'te epoksi reçinelerin sanayi üretimi başlamıştır. Son 20-30 yılda epoksi reçinelerinin çeşit ve üretim kapasitesi çok fazla artmıştır. Günümüzde üretilen epoksi reçinelerinin yarısı boyar maddelerin (lake, emaye, cila, boya vb.) hazırlanmasında kullanılır.



(a)



(b)

Şekil 2.1. (a) Bisfenol A esaslı epoksi reçinenin kimyasal yapısı ve amin kür ajanı (b)Kürlenmiş epoksi ağ yapısı (Ramezanzadeh vd., 2010;URL-1).

Epoksi reçineler polimerlerin ısısert plastik grubunda yer alan; yeterli termal kararlılığa, tribolojik davranışa ve kimyasal dirence sahip önemli bir organik matristir (Jiang vd., 2013). Ayrıca kolay uygulama, alt katmanlara iyi nüfuziyet ve düşük üretim maliyeti gibi pek çok avantaja sahiptir. Bununla birlikte, diğer polimerlere benzer şekilde, yüksek çapraz bağlanmış yapısından kaynaklanan, bazı zayıf yönleri vardır; düşük darbe dayanımı ve düşük kırılma tokluğuna gibi (Jiang vd., 2013; Haeri vd., 2017).

Epoksi sistemleri, epoksi reçine ve sertleştirici olmak üzere iki bileşenden oluşur. Epoksi reçineler, katılma (poliadisyon) prensibine göre çapraz bağlanma yapan ve reaksiyona, içerdiği aktif epoksi grupları ile giren reçinelerdir. Aromatik, alifatik ve

sikloalifatik olmak üzere epoksi reçineler üç gruba ayrılır. Aromatik epoksi reçineler, Bisfenol A bazlıdır. Bisfenol F bazlı olanları da vardır (Paksoy, 2008).

Epoksi reçineler moleköl ağırlıklarına göre iki gruba ayrılır. Sıvı epoksilerin moleköl ağırlığı 1000 g/mol mertebesinde ve solventsiz epoksi reçine olarak da anılırlar. Katı epoksilerin moleköl ağırlığı 1000 g/mol'den fazladır ve solventli reçine olarak da anılırlar. Sıvı epoksiler genelde endüstriyel zemin kaplamalarında, tank içi kaplamalarda, yapıştırıcılarda, elektrik endüstrisinde, kompozitlerde ve parça imalatında, katılar ise genelde atmosferik korozyona karşı dirençli kaplamalarda, kısaca solventli epoksi kaplamalarda, ayrıca toz boyalarda kullanılır (Paksoy, 2008).

Epoksi ile birlikte kullanılan, amin/poliamin ve poliamid olmak üzere iki tür sertleştirici vardır. Poliaminler, kimyasal ve çözücülere daha dayanıklıdır. Poliamidler, suya karşı daha dayanıklıdır. Aynı zamanda daha iyi elastikiyet ve yapışma özellikleri vardır (Paksoy, 2008). Epoksi sistemlere özelliğini daha çok sertleştiriciler verir. Bu yüzden birkaç epoksi reçine tipi olmasına rağmen, pek çok sertleştirici tipi vardır. Örneğin, aynı epoksi reçine iki farklı sertleştirici ile kombine edilirse, bir sistem kırılkan, diğer sistem ise elastik olabilir (Paksoy, 2008).

Epoksi reçineler plastik, metal, cam, tahta gibi birçok yüzeye kuvvetle yapışabilirler. Bu özelliğinin yanı sıra kimyasallara ve suya karşı gösterdikleri direnç, düşük dielektrik sabiti ve ısıtmaya karşı kararlılıkları epoksi reçinelerin birçok uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Epoksi reçinelerinin en büyük tüketicisi kaplama endüstrisidir. Epoksi reçineler çoğunlukla kimyasalların kullanıldığı yerlerde özel amaçlı kaplamalarda kullanılır. Bu reçineler, çok çeşitli yüzeylerde iyi yapışma ve mekanik özelliklere sahip ince tabakalı uzun süreli kaplamalar sağlarlar. Yıkama makinalarında, gemilerde, köprülerde, boru hatları ve kimyasal madde fabrikalarında, otomobillerde, konteynerlerde ve yer kaplamalarında uygulama bulurlar (Şahmetlioğlu, 2000).

2.2.1 Kaplama öncesi metalik yüzeylerin hazırlanması

Kaplama yapılmadan önce metalik yüzeyler, yüzeyin durumuna göre, çeşitli yöntemlerle hazırlanır, aşağıda bu yöntemler açıklanmıştır.

Solvent temizliği: Yüzeydeki safsızlıkların (yağ, kir, toz, toprak vb.)temizlenmesine yarar, pas alma yapılmaz.

El aleti ile mekanik temizlik: Metalden çabuk kopan pas ve diğer parçacıklar alınır. Genelde tel fırçalar, kazıma aletleri, zımpara gibi el aletleri kullanılır, küçük alanların temizliği için pratiktir.

Tahrikli bir aletle mekanik temizlik: Metalden çabuk kopan pas ve diğer parçacıklar alınır. Genelde küçük alanların temizliği için pratiktir ve taş motoru gibi aletler kullanılır. Motorlu temizlik aletleri ile yapılan temizlik her zaman el aletleri ile yapılan temizlikten daha etkilidir.

Beyaz metal püskürtme temizliği: Tamamen temizlenmiş bir yüzey amaçlandığı zaman kullanılır. Yüzeyin homojen bir satha ve gri mavi bir renge sahip olması temizlenmiş olmasının göstergesidir. Eski boya ve tüm yabancı maddeler sökülmiş olmalı, yağ, kir, toz, vs. kalmamalıdır.

Ticari püskürtme temizliği: Yüzeydeki safsızlıklar uzaklaştırılır. Pastan dolayı oluşan renk değişimleri, hafif pas veya eski boya kalıntıları yüzeyde kalabilir. Yüzey girintiliyse, bu girintilerin içinde pas veya eski boya kalmış olabilir, bu oran 1 cm²'de %30'u geçmemelidir.

Süpürme amaçlı püskürtme temizliği: Yüzeydeki yağ, kir, hafif pas gibi metalden çabuk kopan pas parçacıklarının tamamı temizlenir. Yüzey bir aşındırıcı ile temizlenene kadar, yüzeyde iyi yapışmış pas, boya ve kaplama parçacıkları kalır.

Dađlama: Kimyasal veya elektrokimyasal olarak yüzeydeki tüm pas ve pas parçacıkları uzaklaştırılır.

Beyaz metale yakın püskürtme temizliği: Hemen hemen tamamen temizlenmiş bir yüzey gerektiği zaman kullanılır. Temizlenmiş yüzeyde çok hafif gölgelenmeler, pastan dolayı renk değişiklikleri, oksitlenmeler veya eski boya parçacıkları kalabilir. Bu oran 1cm²'de % 5'i geçmemelidir. Eski boya ve tüm yabancı maddeler sökülmiş olmalı, yağ, kir, toz, vs kalmamalıdır.

Su jetiyle temizlik: Ayrılması kolay, tabaka halindeki pası alır. Aşındırıcı ile yüzey temizliğinin çeşitli sebeplerden dolayı yapılmasında sakınca olan bazı yüzeylerde kullanılsa da, su jetine aşındırıcı partiküller katılarak temizleme özelliği iyileştirilebilir. Ani pas denen bir pas tabakasının yüzeyde oluşması su jetinin uygulanmasının dezavantajıdır. Bunu engellemek için, temizlikten sonra çeşitli inhibitörler kullanılabilir ancak bunlar da daha sonra boyanın yüzeye yapışmasına engel olabilirler.

Sayılan temizleme yöntemleri arasında en yaygın olan, aşındırıcı malzeme püskürten bir makine yardımıyla yapılan yüzey temizliğidir (Paksoy, 2008).

2.2.2 Epoksi kaplamanın uygulanması

Bir kaplama, klasik ekipmanlarla (fırça, rulo veya püskürtü) uygulanabilecek seviyede yeterince düşük ve aynı zamanda sarkma veya damlama olmaması için de yeterince yüksek bir viskoziteye sahip olmalıdır. Uygulamadan sonra, en azından kısa bir süre için uygun bir viskoziteyi korumalıdır. Bu, sadece fırça izleri gibi kusurların giderilmesi için değil aynı zamanda kaplamanın termodinamik olarak ıslak olabilmesi için de gereklidir. Bu ikinci özellik, iyi yapışma sağlamak için kritik önem taşır (Bayer ve Zamanzadeh, 2004).

Kaplamaların başlıca uygulanma yöntemleri aşağıda sayılmıştır (Bayer ve Zamanzadeh, 2004):

- Fırça ve Rulo
- Püskürtme Uygulamaları
 - Hava (Konvansiyonel) Sprey
 - Havasız Sprey
 - Elektrostatik Sprey
- Akış Kaplama
- Rulo Kaplama
- Toz kaplama

2.3 Kaplamaların Özelliklerinin Belirlenmesi

Kaplamalara uygulanan çeşitli test ve analizlerle kaplama özellikleri belirlenebilir, böylece hangi koşullar altında kaplamanın nasıl performans göstereceği tespit edilmiş olur. Bu sayede, doğru kullanım yerlerinin belirlenebilmesi ve özelliklerin geliştirilebilmesine yönelik çalışmalar yönlendirilebilir.

Test plakası malzemesi, yüzey hazırlama şekli, kaplama kalınlığı, plakanın bulunduğu ve testin yapıldığı ortam koşulları, kütleme şartları test sonuçlarını etkileyen en önemli faktörler olarak sayılabilir. Bu nedenle tekrar edilebilir ve güvenilir sonuçlar alınabilmesi için bu faktörlerin sabit tutulması gerekir. Farklı yerlerde ve zamanlarda yapılan test sonuçlarının karşılaştırılabilir olması için ASTM, DIN, ISO, TSE’de test koşullarıyla ilgili olarak çok açık tanımlar yapılmıştır.

Metalik yüzeylere kaplama yapıldıktan sonra kaplamanın özelliklerini belirlemek amacıyla endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan testler aşağıda verilmiştir:

2.3.1 Kaplama kalınlığının ölçülmesi

Kaplamanın uygulanan yüzeydeki kalınlığını mikron cinsinden ölçme işlemidir. Bu test için manyetik, elektronik veya ultrasonik ölçüm yapan aletler kullanılır. Herhangi bir dalga (ses, ışık, ultrasonik dalga vs.) farklı dalga iletkenliğine sahip ardışık tabakalardan geçerken dalganın bir bölümü, tabakalar arasındaki ara yüzeylerden geri yansır. Geri yansıyan dalganın, ölçme ucuna ulaşma süresi, uzaklığa göre değişir. Dolayısıyla, yansıyan dalganın geri ulaşım süresi ölçülerek, yansıma yüzeyinin ölçüm ucuna uzaklığı belirlenebilir. Tüm ultrasonografik ölçümler bu ilke üzerine geliştirilen cihazlarla yapılır. Uygulama yüzeyine göre farklı ultrasonik iletkenliğe sahip kuru filmlerin bu yolla kalınlıklarının ölçülmesi mümkündür.

2.3.2 Renk ve parlaklık kontrolü

Renk gözle değerlendirilen bir durum olmasına rağmen spektrofotometre denilen cihazlarla da tespit edilmektedir. Renkler standartlaştırılmış bir renk katalogunda belirtilen renk numaralarıyla tarif edilir. Renk kontrolü yapılırken standart

numunenin rengi ile kaplamanın rengi birbirine uymalıdır. Bunun için kaplanmış plaka ve standart plaka kontrol edilir. Eğer renk tutmuyorsa imalattaki kaplamanın rengi düzeltilir.

Parlaklık, bir yüzeyin üzerine düşen ışınları yansıtması demek olup, parlaklık derecesi bir kaynaktan gelen ışınlarla yüzeyde oluşan görüntünün netlik derecesi ile ifade edilir. Parlaklık ölçümü için glossmetre denilen cihazlar kullanılır. Bu cihaz, ışık kaynağından çıkan ışığı parlaklığı ölçülecek yüzeye değişik açılardan düşürebilecek özelliktedir. Bunun nedeni, farklı açılardan yansıtılmış ışık kaynağı ile pratikteki durumu simüle etmektir. Parlaklığın ölçüsü yaygın olarak yüzeyden yansıyan ışığın şiddetinin belirli bir açıdan yüzeye düşen ışık şiddetine oranı olarak ifade edilir.

2.3.3 Sertlik

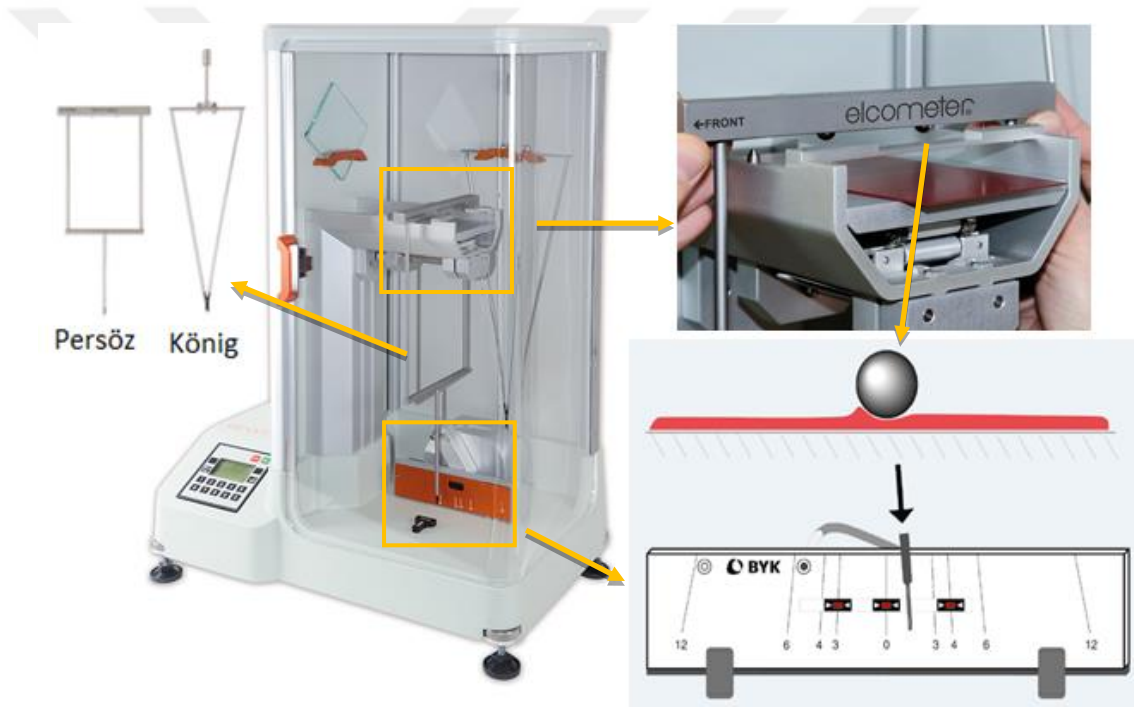
Yüzey sertliği kaplamanın temel özelliklerinden birisidir ve dışarıdan gelen fiziksel ve atmosferik şartlara karşı gösterilen direncin bir ölçüsüdür. Kaplamanın sertliği yaygın olarak Pendulum (sarkaç) veya kalem sertliği yöntemleri ile ölçülür. Sarkaç sistemi ile yapılan sertlik testleri Konig-Albert Pendulum veya Persoz Pendulum sarkacı kullanılarak yapılır. İki yöntem arasında kullanılan sarkacın geometrisi, temas noktasındaki çelik kürelerin ağırlığı ve çapı, salınım genliği gibi farklar vardır.

Çizelge 2.2. Sarkaç türüne göre test değişkenleri (URL-2).

	Konig	Persoz
Ağırlık	200 g $\pm$ 0,2	500 g $\pm$ 0,1
Çap	5 mm	8 mm
Başlangıç açısı	6°	12°
Bitiş açısı	3°	4°

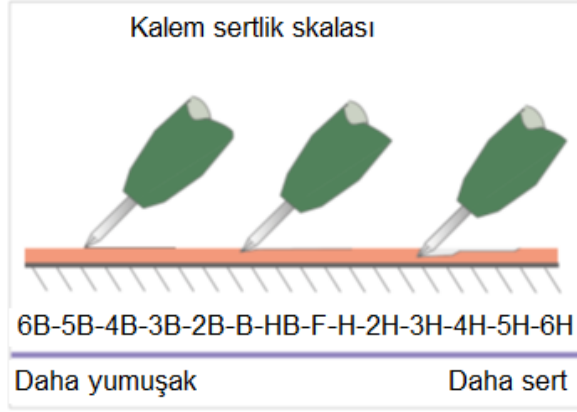
Testin ölçüm prensibi, yarı küre biçimli iki temas noktası (yarı küre biçimli çelik toplar) aracılığıyla kaplama filminin üst yüzeyine temas eden bir sarkacın periyodik hareketinin, kaplama filminin tepkisine bağlı olarak zaman içinde sönümlenmesi ve durması esasına dayanır (Şekil 2.2). Sarkaç, belli bir genlikten başlayarak salınmaya başlar. Çelik toplar, herhangi bir anda, temas ettikleri kaplama filminde ufak bir

çöküntüye yol açarlar. Sarkacın hareketine bağlı olarak konum değiştiren toplar, sarkacın salınım periyodu dolunca tekrar aynı basma noktasına dönerler. Bu arada, kaplama filmindeki çöküntü, filmin esnekliği ölçüsünde kaybolur. Diğer bir deyişle, kaplama filmi, esnekliği ölçüsünde çelik topu iter ve sarkacın salınım genliği giderek sönümlenir. Kaplama filmi ne kadar sert ise çelik toplar kaplamaya o kadar az batar. Yani sarkacın enerjisi o kadar az yutulur ve sarkaç daha uzun süre sallanır. Sarkacın başlangıç açısı Konig için 6° , Persoz için 12° olarak ayarlanır. Salınım açısı Konigde 3° 'ye Persozde 4° 'ye düşünce cihaz kaydı durdurur ve sonra sarkaç durur. Durma süresinin saniye cinsinden karşılığı, kaplama filminin sertliği olarak kaydedilir ve bu değere “sarkaç sertliği” denir.



Şekil 2.2. Pendulum sertlik ölçme cihazı ölçüm prensibi (URL-2).

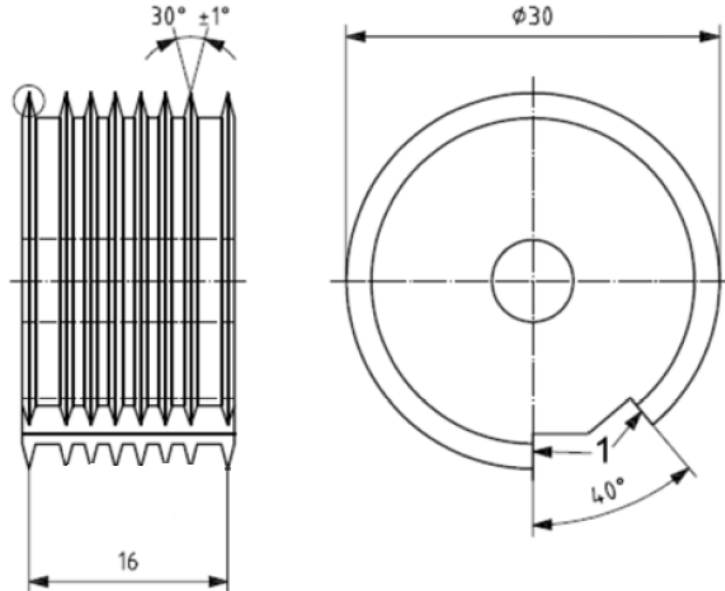
Kalem sertliği yöntemleri ile ölçümde ise 6B'den 6H'ye kadar olan özel aparatına takılmış ve kendi ağırlığına bırakılmış kalemler ile kaplanan yüzey sırayla çizilir ve silinir (Şekil 2.3). Kaplanan yüzeyini ilk çizmeye başlayan kalemin üzerindeki harf ve rakam kaplamanın sertliğini ifade eder.



Şekil 2.3. Kalem sertliği ölçümü (URL-2).

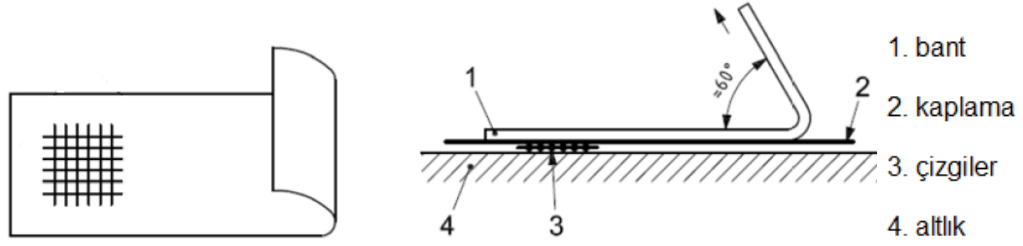
2.3.4 Yapışma mukavemeti

Kaplamanın uygulandığı yüzeye yapışma durumu kafes çizgi testi (Cross-Cut testi) ile ölçülür. Şekil 2.4'te kafes çizgi testi için kullanılan bıçağın özellikleri görülmektedir. Bu testte, kaplama üzerine birbirine göre 90° açı ile iki grup çizgi çizilir. Çizgi aralıkları kaplamanın kalınlığına göre belirlenir ve kaplama kalınlığı 60 mikrondan küçük ise 1 mm, 60-120 mikron ise 2 mm ve 120 mikrondan büyük ise 3 mm ara ile çizilir.



Şekil 2.4. Kafes çizgi testi için kullanılan bıçağın özellikleri (TS EN ISO 2409).

Çizilen yüzey üzerine bant yapıştırılıp Şekil 2.5'te görüldüğü gibi tek seferde kaldırılır. Testte kullanılan adhezyon bantının taşıyıcısı krep kağıt, yapışkanı ise doğal kauçuktur. Yüzeyden kalkan boya miktarı standartlarda verilen miktarlarla karşılaştırılarak, sırasıyla çok fazla dökülenden dökülme olmayan yüzeye karşılık gelen 0B ile 5B aralığında değişen sınıflara ayrılırlar (Çizelge 2.3).



Şekil 2.5.Yapışkan bandın kafes çizgilerine göre pozisyonu (TS EN ISO 2409).

Çizelge 2.3. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu (TS EN ISO 2409).

Sınıf	Boya Dökülmüş Alan (%)	Kopmanın Gerçekleştiği Boya Dökülmüş Yüzey Alanı
5 B	0	
4 B	5'ten az	
3 B	5 – 15	
2 B	15 – 35	
1 B	35 – 65	
0 B	65'ten büyük	

2.3.5 Esneklik

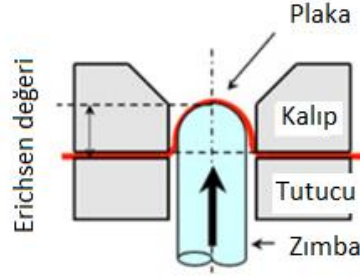
Kaplamalar için esneklik, kaplama filminin herhangi bir arıza göstermeden bükülebilmesi ve uzayabilmesi olarak tanımlanır. Kaplamanın esnekliğini belirlemek için bükme ve çökertme testi uygulanır.

Bükme testleri silindirik veya konik bükme şeklinde uygulanabilir ancak yaygın olarak kullanılan test Şekil 2.6'da görülen konik bükme testidir. Konik bükme test plakası konik bir mandrel etrafında 15 saniye içinde 180° bükülür. Sonuçlar, kaplama filminde çatlamanın olup olmamasına göre veya kaplama filminde çatlamların uzadığı mesafenin koninin küçük tabanından itibaren ölçülmesiyle mm olarak verilir.



Şekil 2.6. Konik bükme testi.

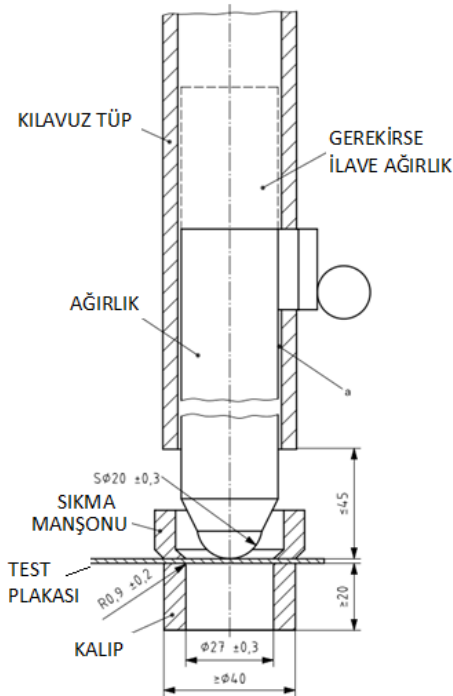
Esnekliği belirlemek için uygulanan bir diğer test Şekil 2.7.'de uygulaması şematik olarak gösterilen çökertme testidir. Bu testte, kaplanmış test plakasının arka yüzüne doğru sabit bir hızla itilen 20 mm çapındaki yarı küre biçimli bir zımba, plakayı 0,2 mm/sn hızla deforme etmeye başlar. Zımbanın ilerlemesi sürerken, kaplama filminin yüzeyi, bir yandan, bir büyüteçle sürekli olarak gözlenir. Kaplama filminde ilk çatlak görüntüsü belirdiğinde cihaz durdurulur. Zımbanın plakaya değdiği ilk andan kaplamanın çatladığı ana kadar aldığı yol kaydedilir.



Şekil 2.7. Çökertme testinin şematik gösterimi.

2.3.6 Darbe dayanımı

Kaplama filminin, üzerine gelen ani kuvvetlere karşı gösterdiği dirence darbe direnci denir. Darbe testi, kaplamalar için yapılmış özel cihazlar ile yapılır (Şekil 2.8). Bu testte ucu küresel şekle sahip bir ağırlık, yatay durumdaki kaplanmış test plakası üzerine dik olarak belirli bir mesafeden düşürülür, bu işleme kaplama filminde bir bozulma (çatlama, kabarma, pullanma gibi) meydana gelinceye kadar, her seferinde küresel ağırlığın yüksekliği biraz daha artırılarak devam edilir. Kaplama filminin herhangi bir bozulma göstermeden direnç gösterdiği en fazla yükseklik darbe direnci olarak alınır.



Şekil 2.8. Darbe testi (TS EN ISO 6272-1).

2.3.7 Korozyon direnci

Kaplamaların gerçek kullanım koşullarındaki korozif özelliklerinin belirlenmesi son derece önemlidir. Fakat bu testler son derece pahalı ve çok uzun zaman isteyen testlerdir. Bu nedenle, bu testlerin daha küçük boyutta, ağırlaştırılmış ortam koşullarında ve daha kısa sürede sonuçlandırılabilmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında; nem odası, tuzlu su sisi ve kimyasal maddelere karşı direnç testleri sayılabilir.

Nem odası testinde, kaplanmış panel, % 90 nem ve 38 °C sıcaklık koşullarındaki bir kabine yerleştirilir. 48 saat aralıklarla paneller kontrol edilir. Kaplama filminin yüzeyinde yoğunlaşan su buharının film içinde yol alarak tahrip etmesi çoğunlukla filmde kabarcık oluşmasına neden olur. Bu kabarcıkların sıklığı ASTM D-714'e göre tespit edilerek sonuç nem direnci olarak verilir.

Tuzlu su sisi testi, özellikle paslanmayı önleyecek kaplama sistemlerinin performansını ölçmek üzere geliştirilmiş bir testtir. Özel olarak yapılmış bir kabin içine yerleştirilen test plakalarına % 20'lik tuzlu su karışımı 35–40 °C'lik ortamda belirli süre sis şeklinde püskürtülür. Köşegenler doğrultusunda panel X şeklinde çizilmelidir. 48 saatte bir paneller kontrol edilir. Boyada meydana gelen; çizikten itibaren pasın ilerlemesi, panel yüzeyinde paslanma, boya filminde kabarcıklanma, çatlama, pullanma, matlaşma, parlaklık kaybı gibi değişiklikler incelenerek değerlendirilir.

2.3.8 Mikrosertlik ve mikroçizik testleri

Bu testte, uygun bir batıcı uç kullanılarak numune yüzeyine dik olacak şekilde belirlenen bir maksimum değere kadar yük uygulanır ve bu maksimum yük değerine ulaştıktan sonra tekrar dereceli olarak geri yükleme yapılır. Yükleme ve geri yükleme sonucunda elde edilen Yük (N) – Derinlik (nm) eğrileri analiz edilerek numunenin mekanik özellikleri belirlenir (Şekil 2.9).

Sertliği ve elastisite modülünü belirlemek için üç parametreye ihtiyaç vardır. Bunlar maksimum yük (Pmax), indenter temas alanı (Ac) ve yükü boşaltma başlangıç temas rijitliğidir (dP/dh). Geleneksel mikrosertlik testlerinde olduğu gibi, dinamik

mikrosertlikte de, sertlik maksimum yükün (P_{max}), iz alanına (A_c) bölünmesiyle bulunmaktadır. Böylece sertlik ifadesi eşitlik (3.1)'deki gibi yazılır.

$$H = \frac{P_{max}}{A_c} \quad (3.1)$$

Burada A_c temas alanı, yük kaldırıldığı andaki batıcı ucun, malzeme ile arasındaki derinlik mesafesi (h_c)'nin bir fonksiyonu olarak alındığında, $A_c = F(h_c)$ şeklinde ifade edilebilmektedir. Uç, tepe yarı-açısı θ olan bir koni şeklinde kabul edilirse, uç geometrisi kullanılarak temas alanı (3.2) eşitliği ile hesaplanabilir.

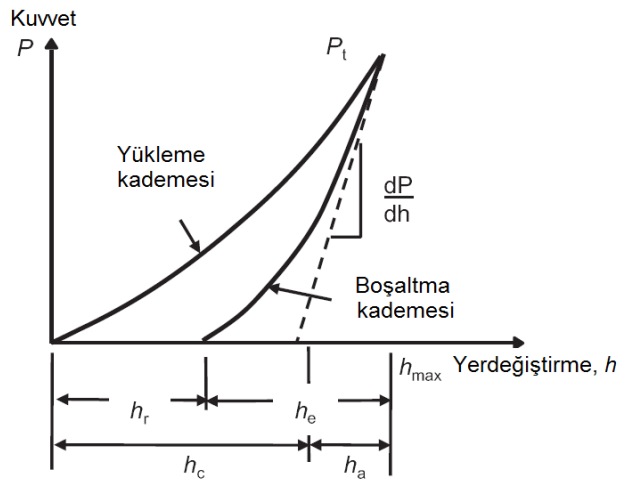
$$A_c = \pi(\tan^2\theta)h_c^2 \quad (3.2)$$

Berkovich indenter için temas alanı, eşitlik (3.3) şekiline dönüşür.

$$A_c = 26.43h_c^2 \quad (3.3)$$

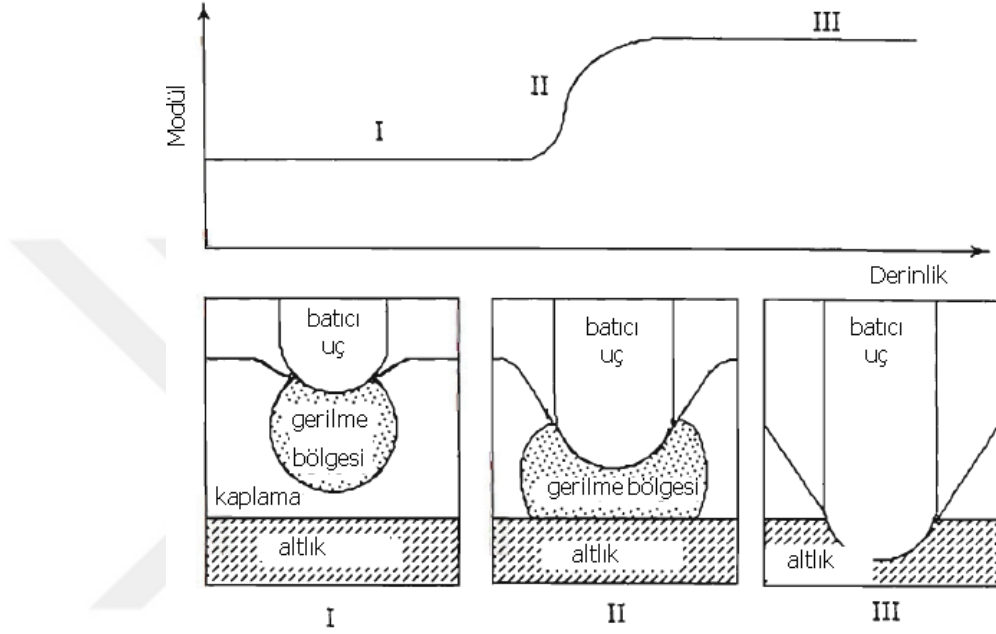
Bu testle kaplama numunelerinin sertliğinin yanında modül değerleri de tespit edilebilmektedir. Şekil 2.9'de gösterilen Yük – Derinlik eğrisinden okunan kuvvet (P) ve yerdeğiştirme (h) değerleri ile Berkovich batıcı ucunun maksimum yük altında oluşturduğu alan (A) yardımıyla elastisite modülünün hesaplanması Oliver ve Pharr metodu ile denklem (3.4) kullanılarak yapılmaktadır.

$$E = \frac{dP}{dh} \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{A} \quad (3.4)$$



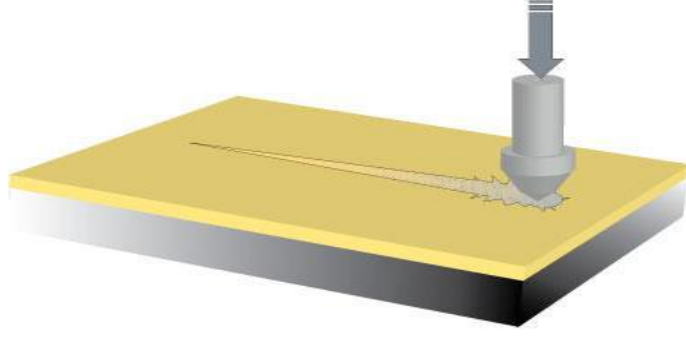
Şekil 2.9. Yük - Derinlik Eğrisi (Fischer-Cripps,2009).

Maksimum yük değeri kaplama kalınlığına uygun olarak belirlenmelidir ve ölçümün kaplamadan yapılması sağlanmalıdır (Şekil 2.10). Yükün uygun belirlenmemesi durumunda, II. bölgede olduğu gibi alttaki metalik malzemenin etkisi veya III. bölgede olduğu gibi doğrudan altlık malzemesinin elastisite modülü ölçülmüş olur. Bu nedenle kaplamanın elastisite modülünün doğru belirlenmesi için uygun yükleme durumu I. resimde görüldüğü gibi olmalıdır.



Şekil 2.10. Batıcı ucun batma derinliğine bağlı olarak elastisite modülünün değışimi.

Mikroçizik testi, kaplamaların yüzeylerinin kırılma, deformasyon ve aynı zamanda altlığa yapışma gibi mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılır. Yöntem keskin bir uç ile malzemede kontrollü bir çizik oluşturma esasına dayanır (Şekil 2.11). Kritik yük değeryerinde kaplamada hasar oluşumu başlar. Kritik yükleme değeryerü yüklemeye koluna eklenmiş olan sensör ve optik mikroskop ile saptanır. Mikro çizik cihazı ile yüzeyde oluşturulan çizikğin optik görüntüsü üzerinde derinlik, akustik ve sürtünme kuvveti ölçümleri analizi yapılabilmektedir.



Şekil 2.11. Mikro çizik testinin şematik gösterimi.

2.4 Nanomalzemeler

Son yıllarda nanoteknoloji en çok ilgi gören bilim alanlarından birisidir. Malzeme bileşenlerinin nanoboyutta olması malzemenin mekanik, kimyasal, optik, manyetik, elektrik özelliklerinde ciddi değişimlerin meydana gelmesini sağlamaktadır. Genel olarak boyutları 100 nm ve altında olan tozlar nanopartikül olarak adlandırılmaktadır.

Kütlesel malzemelerle nanoboyuttaki malzemelerin özellikleri birbirinden farklıdır. Bu farkın oluşmasının temelde iki nedeni vardır; ilki, nanoboyutlarda malzemenin yüzey alanının artması nedeniyle malzemenin yüzey enerjisi artmakta, malzeme daha reaktif olmaktadır. İkinci neden ise, nanoboyutlarda ve özellikle nanoölçeğin altlarına doğru gidildikçe kuantum özelliklerinin maddenin özelliklerine hakim olmaya başlaması ve optik, elektrik ve manyetik özelliklerini değiştirmesidir.

2.5 Nanokompozit Kaplamalar

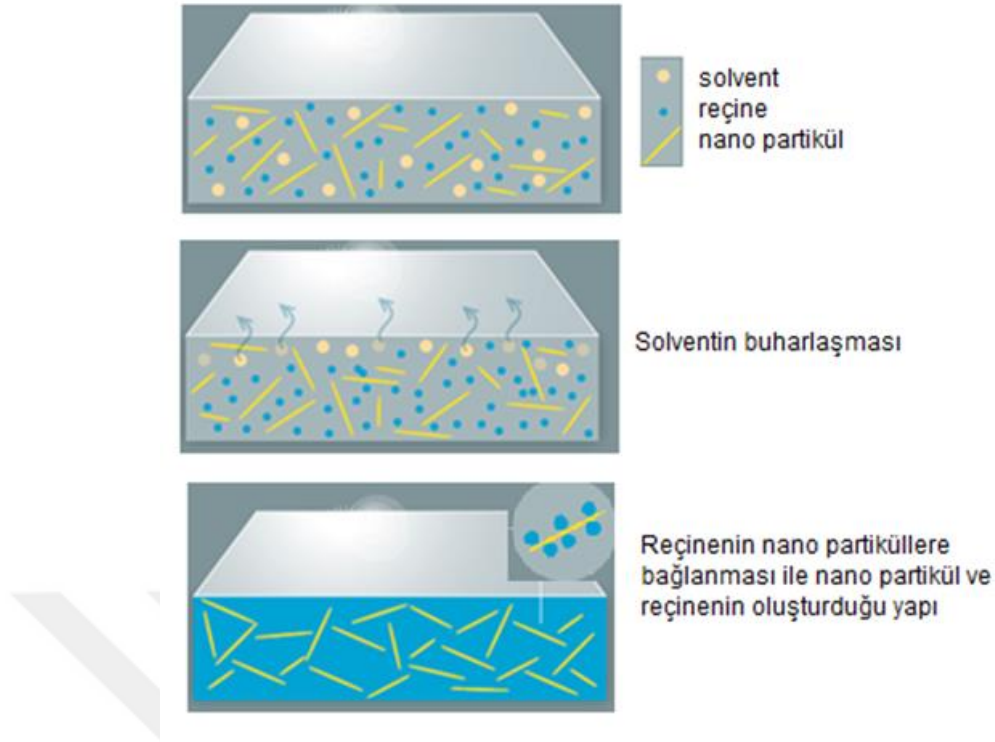
Kaplamaların iki temel fonksiyonu vardır; güzel bir görüntü sağlamak ve altındaki metali maruz kaldığı olumsuz koşullara karşı korumak (Bensalah vd., 2014). Kaplamalar servis ömürleri süresince koruyucu ve dekoratif fonksiyonlarının azalmasına neden olan etkilere maruz kalırlar. Çalışma ortamından kaynaklanan çevresel etkilenmeler, ultraviyole ışınlarının neden olduğu kimyasal ve fiziksel tahribat, mekanik zorlamalar nedeniyle oluşan yırtılma, çizilme ve aşınma gibi nedenlerle kaplamanın yıpranması söz konusu olmaktadır. Kaplamada meydana gelen tahribat nedeniyle kaplamanın koruyucu özelliğini kaybetmesi, çelik

malzemenin korozyonunu hızlandırdığı için, sadece estetik olarak değil çelik malzemenin tahribatı açısından da büyük kayıplara neden olmaktadır.

Nanomalzeme teknolojisindeki gelişmeler nanomalzemelerin kullanım alanlarını çeşitlendirmiştir. Özellikle nanopartiküllerin dolgu olarak kullanıldığı uygulamalarda, nanopartiküllerin yüzey alanı daha büyük olduğu için geleneksel dolgu malzemelerine göre matrisle adezyonunun daha iyi olması, bu durumun ise partikül-matris arasında gerilme transferini kolaylaştırması gibi sağladığı avantajlar nedeniyle kaplamalara nanopartikül katılması bu uygulama alanlarından birisidir. Yapılan çalışmalar kaplamalara katılan nanopartiküllerin (alümina, silika, bakır, çinko oksit) kaplama özelliklerinde (çevresel etkiler, ultraviyole ışınlarına vb) diğer dolgulardan daha etkili olduğunu göstermiştir (Kotnarowska, 2008; Leder vd., 2002; Wang vd., 2002).

Nanopartikül katılarak elde edilen yeni nesil kaplamalarla 3-30 µm kaplama kalınlığı sağlanabilmektedir. Bu kalınlık, geleneksel kaplama malzemelerinin kullanılması durumunda bu değerin yaklaşık on katı olmaktadır (Kotnarowska, 2008). Nanopartikül katılmış polimer matrisin kimyasal yapısı şematik olarak Şekil 2.12’de verilmiştir.

Daha büyük partikül yerine nanopartikül katılması ve dağıtılması “arayüzey malzeme” miktarının önemli oranda arttığı bir polimer karışımı sağlar. Örneğin; boyutu 300 nm olan partikülün hacimce % 30 katılması durumunda arayüzey malzeme oranı % 3 olurken, partikül boyutu 50 nm’ye düştüğünde bu değer % 22’ye yükselmiştir. Böylece arayüzey malzemesi kaplama malzemesinin temel bileşeni haline gelir (Fernando, 2009).



Şekil 2.12. Nanopartikül katılmış reçinenin kimyasal yapısının şematik gösterimi (Wassink, 2007).

Boya ve kaplamaların performansı, polimer matrise katılan ikinci bir fazın, zararlı türlerin difüzyon yolunu kesmesi (zikzaklama) ve poroziteyi azaltmasıyla artırılabilir. Nanopartikül, reçine içinde dağıldığında boşlukları doldurabilir, çatlak köprüsü ve çatlak sapmasına neden olarak kaplamanın bütünlüğünü ve dayanıklılığını artırır. Nanopartiküller aynı zamanda, kürleşme sırasında reçinenin ayrışmasını önleyerek daha homojen bir kaplama sağlarlar. Nanopartiküller, daha çok molekül arasında bağlantı köprüsü gibi hareket ederler ve reçinenin kürleşmesi sırasında bölgesel büzölmelerin sonucunda oluşan küçük kusurları kapatırlar. Ayrıca reçineye nanopartikül katılması korozyon direncini artırır ve kabarcıklanma veya delaminasyonu azaltır (Shi vd., 2009).

Polimerik kaplamalarla ilgili çalışmalarda en yaygın kullanılan nanopartiküller arasında; TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , CaCO_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 ve çeşitli nanokarbon formları yer almaktadır (Ghanbari ve Attar, 2015). Kaplamaların çeşitli özelliklerini geliştiren nanopartikül türleri Çizelge 2.4'te verilmiştir. Nanopartikül katılan kaplamalarda özellikler; nanopartikülün türü, boyutu, miktarı, nanopartiküllerin birbiriyle ve polimer matrisle uyumu gibi çeşitli faktörler tarafından etkilenmektedir (Perera 2004;

Kotnarowska vd., 2014). En az bunlar kadar etkili olan bir diğer faktör ise nanopartiküllerin matris içinde homojen olarak dağılmaması durumudur, yapılan çalışmalarda nanopartiküllerin yüzey alanları ve yüzey enerjileri nedeniyle topaklanma eğiliminde olduklarını göstermektedir (Rong vd., 2001; Avella vd., 2001; Wetzel vd., 2003). Ultrasonik karıştırma ve nanopartikül miktarının mümkün olduğunca düşük tutulması matris içinde daha homojen bir dağılım için yapılabilecek uygulamalardır (Ramezanzadeh vd., 2011; Boumaza vd., 2016).

Silika çok amaçlı bir nanopartiküldür ve farklı uygulamalar için nanokompozit kaplamaların üretiminde kullanılabilir. Diğer nanopartiküller arasında yüksek sertliği, hidrofilik yüzey yapısı ve uygun fiyatı ile öne çıkmakta; çizilme ve aşınma direnci yüksek, şeffaf ve maliyeti düşük kaplamaların elde edilmesini sağlamaktadır (Ghanbari ve Attar, 2015). Silika ile birlikte, alümina ve cam parçacıkları gibi inorganik katkı maddeleri, temel özelliklerinden ödün vermeden epoksilerin kırılma tokluğunu arttırmak için modifiye ediciler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Jiang vd., 2013).

Çizelge 2.4. Kaplamaların çeşitli özelliklerini geliştiren nanopartikül türleri (Fernando, 2009).

Boya özellikleri	Nano malzeme
Antimikrobiyal	CuO; TiO ₂ ; ZnO
Korozyon direnci	Nano kil
Elektrik iletkenliği, statik yük dağılımı	ITO, ATO, SnO ₂
Yangın geciktirici	Nanokil
IR – Absorbsiyon / Yansıtma	ITO, ATO, TiO ₂ , In ₂ O ₃
Manyetik özellikler	Fe ₂ O ₃
Mekanik özellikler (çizilme direnci)	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂
Fotokataliz, kendi kendini temizleme	TiO ₂ , ZnO
UV stabilizasyonu	TiO ₂ , ZnO, BaSO ₄ , CeO ₂

Diğer taraftan karbon nanotüp ve grafen gibi çeşitli karbon formları da polimer kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için kullanılan diğer nanopartiküllerdir (Şekil 2.13). Benzersiz yapısı ve olağanüstü mekanik, elektrik ve termal özelliklerinden

dolayı grafen; piller, kondansatörler, güneş pilleri, nanokompozitler, korozyon önleme için sensörler ve kaplamalar gibi sayısız potansiyel uygulama için umut verici bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır (Chen vd., 2017; Liu vd., 2016). Grafen nanopartikül, karbon atomlarından oluşan tek tabakalı ve iki boyutlu yapıya sahip bir nanopartikül olup, sıfır boyutlu fulleren, bir boyutlu karbon nanotüp ve üç boyutlu grafit nanomalzemelerin yapı taşı oluşturur (Shishevan vd., 2015). Grafen nanotabaka üretimi ilk kez 1970 yılında gerçekleştirilmiş, ancak ilk izole edilmiş bağımsız tek katmanlı grafen, grafitin mikromekanik bölünme ile ayrılmasıyla 2004'te rapor edilmiştir (Bastani ve Darani, 2015). Grafenin yığılma eğilimi yüksektir ve istiflenmiş grafen levhaları düşük yüzey alanlı grafit gibi davranır; optimum özelliklere sahip bir nanokompozit elde etmek için grafenin organik kaplamalarda homojen dağılımı ve etkili arayüzey etkileşimi en önemli zorluklardır (Pourhasem vd., 2017).



Şekil 2.13. Çeşitli karbon nanomalzemeler.

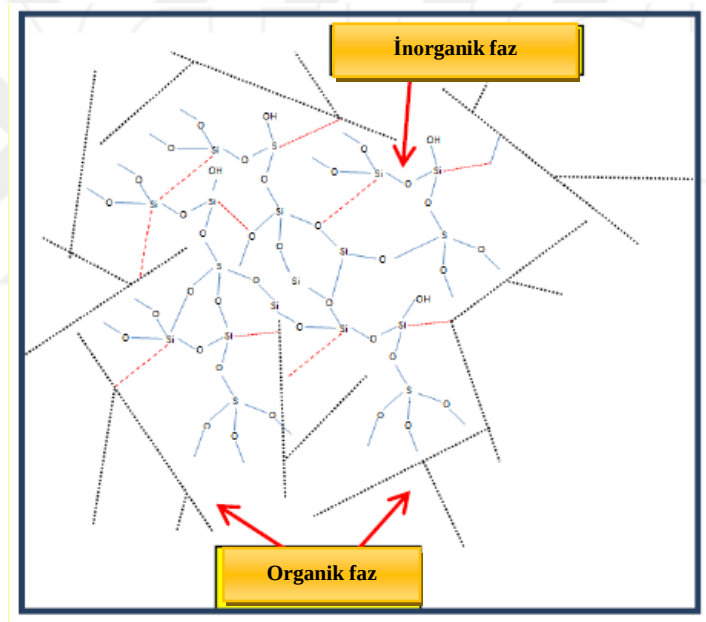
Epoksi reçineler sağladıkları avantajlar ve özellikleri nedeniyle çok farklı endüstriyel uygulamalar için kaplama malzemesi olarak en çok kullanılan malzemelerin başında gelmektedir (Ghasemi-Kahrizsangi vd., 2015). Ancak, yüksek çaprazbağlı yapıları nedeniyle oluşan zayıf çekme dayanımları ve gevrek yapıları uygulama alanlarını sınırlandırmaktadır (Haeri vd., 2017, Conradi vd., 2015). Bu durumun üstesinden gelebilmek ve daha yüksek dayanım ve tokluğa sahip epoksi kaplamalar

geliştirebilmek için araştırmacılar, çeşitli nanopartiküller katarak epoksi reçineyi modifiye etme yoluna gitmişlerdir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda nanopartiküllerin, epoksi reçinelerinin özelliklerine etkisi incelenmiş ve nanopartiküllerin reçinenin termal ve mekanik özelliklerini güçlendirdiği gözlemlenmiştir. Epoksi nanokompozit kaplamalar, epoksi matrisine dağılmış 1 ila 100 nm aralığında inorganik partiküllerden oluşan iki faza sahiptir. Nanopartiküllerin nispeten düşük oranlarda epoksi kaplama sistemine dahil edilmesi, mekanik özelliklerde, termal kararlılıkta ve epoksi reçinenin yapışmasında kayda değer gelişmeler sağlamıştır (Ng vd., 1999; Zhang vd., 2002; Naganuma ve Kagawa, 2002; Wetzel vd., 2003). Ramezanzadeh ve Attar (2011b) iyi dağılım için, nanopartiküllerin konsantrasyonunun düşük olması gerektiğini, yüksek olması halinde aglomerasyona ve parçacıkların toplanmasına yol açtığını ileri sürmüşlerdir. Benzer şekilde yapılan diğer çalışmalar da matris içindeki nanopartikül miktarının artmasının (ağırlıkça % 5'in üstü) özellikleri olumsuz etkilemeye başladığını göstermiştir (Matria vd., 2009).

Polimer matris içinde homojen dağılmış partiküller sadece kendilerinden beklenen fonksiyonlarını yerine getirebilirler. Yüksek yüzey aktivitesi nanopartiküllerin önemli bir özelliğidir. Aglomerasyon kaplama malzemesiyle temas eden yüzey alanını sınırlandırdığı için son derece zararlıdır. Nanomalzemeler hala çok pahalı oldukları için ticari ürün formülasyonlarında bu durum son derece önemlidir. Partiküllerin matris içinde dağılımları aşağıda sayılan yöntemlerle sağlanmaktadır (Wetzel vd., 2003; Rong vd., 2001):

- Kuru partikül sistemlerinin dispersiyonu – mekanik
 - Mikserle karıştırma (wet milling)
 - Ultrasonik karıştırma
- Kuru partikül sistemlerinin dispersiyonu – kimyasal
 - Dağıtıcılarla doğrudan yüzey etkileşimi ile dispersiyon
 - Birleştirme ajanları ile yüzey modifikasyonu (silanlar en çok kullanılan ajanlardır, örnek: methacryloxypropyltrimethoxysilane, MPS)
- Islak sistemlerde dispersiyon
 - Sol-jel bazlı reaksiyonlar ve diğer sıvı ortam reaksiyonları

Nanopartikül üreticileri veya reçine üreticileri, inorganik nanopartikülleri solventte dağıtılarak reçine içinde ön dağıtılmış halde sunabilmektedirler. Kaplamaya katılan nanopartikül agregasyonu özellikle şeffaflığı etkilediği için inorganik nanopartiküllerin reçine içinde dağıtılmasında uygulanan tekniklerden birisi de sol-jel yöntemidir. İnorganik fazın organik matris içinde in-situ formasyonu sol-jel tekniği kullanılarak ele alınmıştır (Ramezanzadeh ve Mohseni, 2012; Presting ve König, 2003). Organik/inorganik öncü yapılar matris içinde in-situ silika ağı oluşturmak için kullanılabilir. Böylece, Şekil 2.14'te görülen, organik/inorganik faz içeren hibrit nanokompozit yapı elde edilir. Hibrit nanokompozitteki organik faz adezyonu ve esnekliği sağlar, inorganik faz ise kaplamanın mekanik hasarlara karşı direncini artırır (Ramezanzadeh ve Mohseni, 2012).



Şekil 2.14. Organik/inorganik öncüleri içeren sol-jel esaslı kaplamanın şematik görüntüsü (Ramezanzadeh ve Mohseni, 2012).

Kaplama performansı partikül matris etkileşimine son derece bağlıdır. Bunu geliştirmek için, çeşitli yüzey modifikasyonları uygulanmakta, böylece dispersiyon kabiliyeti ve partikül matris arayüzey bağının kuvvetlendirilmesi amaçlanmaktadır (Sajjadi vd., 2013). Nanoparçacıkların güçlü yüzey enerjisi ve van der Waals kuvveti kaçınılmaz olarak tekrar bir araya getirme ve istiflenmeye neden olabilir (Rong vd., 2001; Avella vd., 2001; Wetzel vd., 2003). Böylece, homojen dağılım ve güçlü dolgu

matris arayüzeyinin sağlanması, kompozit kaplamaların son özelliklerini belirleyecek olan iki önemli faktördür (Dong vd., 2016). İnorganik nanopartiküllerin kaplama içindeki dağılımları zayıf olduğu için özelliklerdeki artış kolay sağlanamaz. İnorganik dolguların organik fazlara karşı affiniteleri yoktur. Bu, faz ayrılmasına ve topaklanma oluşmasına neden olur. Bu topaklanmış partiküller (>100 nm) son katın özelliklerini, özellikle de optik berraklığı bozar. Bu problemi çözmek için bir yaklaşım, dolgunun hidrofobik (su sevmez) olması için organosilanlarla yüzey modifikasyonu ve böylece polimer matris içinde dispersiyonunu iyileştirmek olmuştur. Bu yüzey modifikasyonu sadece dispersiyonu sağlamaz, aynı zamanda partikül matris arasındaki fiziksel/kimyasal arayüzey adezyonunun daha güçlü olmasını da sağlar (Tahmassebi vd., 2010). Polimerik kaplamalara katılan bazı nano partiküller için kullanıldığı belirlenen uygun modifikasyon kimyasalları Çizelge 2.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Nano partiküllerin modifikasyonu için kullanılan silanlar (Shi vd., 2004; Rong vd., 2001; Behzadnasab vd., 2011; Ribeiro vd., 2014; Valesco-Santos vd., 2011; Ma vd., 2006).

Nano partikül	Modifikasyon ajanı
Al ₂ O ₃	aminopropyltriethoxysilane
	methacryloksipropiltrimethoxysilane
ZrO ₂	aminopropyltrimethoxysilane
SiO ₂	glicidoxypopyltrimethoxysilane
	aminopropyltriethoxysilane
	methacryloxypropiltrimethoxysilane
	methacryloksipropiltriethoxysilane
	dimethyldiclorosilane
Karbon nanotüp	glicidoxypopyltrimethoxysilane
	aminopropyltriethoxysilane
	octadecyltrimethoxysilane
	3-decylthiophene- <i>b</i> -polidimetilsiloksan
	trimethoxysilane
	Isocyanatopropyltriethoxysilane
	Vinyltriethoxysilane
	methacryloxypropyltrimethoxysilane toluene-2,4-diisocyanate
TiO ₂	aminopropyltrimethoxysilane
	Isocyanatopropyltrimethoxysilane

2.6 Bu Çalışmanın Literatürdeki Yeri

Epoksi reçineler, 1940'ların sonlarında boya endüstrisinde kullanılmaya başlanmış ve kendine bu sektörde önemli bir yer edinmiştir. Bunun nedeni, farklı kullanım alanları için değişik formülasyonlara izin vermesi ve bu uygulamalarda sağladığı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikler olmuştur (Şen, 2003).

Epoksi reçinelerin kaplama olarak kullanılması konusundaki çalışmaların öncelikle; epoksi reçinenin kimyasal kompozisyonunun değiştirilmesi, sertleştirici türlerinin reçine özelliklerine etkilerinin belirlenmesi, epoksi reçinenin astar ya da son kat olarak veya tek başına uygulanması ve farklı yüzeylere epoksi kaplama uygulaması konularında yapıldığı görülmüştür.

Son yıllarda epoksi kaplamalar konusunda yapılan çalışmalarda nanopartikül katkısının kaplama özelliklerine etkileri çalışmaya başlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarından bu konudaki çalışmaların; nanopartikül katkısının kaplamanın mekanik, termal, fiziksel ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi, farklı nanopartikül türlerinin ve oranlarının kaplama özelliklerini nasıl etkilediğinin incelenmesi ve nanopartikülleri tek başlarına veya hibrit olarak eklemenin kaplama özelliklerine etkilerinin incelenmesi yönünde olduğu görülmüştür.

Aşağıda bu konularda yapılan çalışmaların bir kısmı ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Silika nanopartiküllerin epoksi kaplamaların mekanik özelliklerine etkileri konusunda Conradi vd., (2015) yaptıkları çalışmada, epoksi matris içine çeşitli boyutlarda silika nanopartiküller katarak östenitik paslanmaz çelik altlık üzerine uygulamışlar ve artan yükleme altında çizilme testine tabi tutmuşlardır. Sonuçta, daha gevrek olan saf epoksi kaplamanın, silika / epoksi kaplamaya kıyasla daha ciddi bir hasar gördüğünü ve bu durumun, silika parçacıklarının epoksi kaplamanın sertliğini arttırmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Aynı yönde yapılan bir diğer çalışmada Işın vd., (2009) epoksi matris içerisine çeşitli oranlarda (0,5; 1; 2; 4; 6) silika nanopartiküller katarak alüminyum altlık üzerine kaplama uygulaması yapmışlar ve kaplamanın mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ancak bu çalışmada silika nanopartiküllerin yüzeyi glycidoxypopyltrimethoxysilane (GPTMS) ile

modifiye edilerek uygulanmış ve bu durumun nanopartiküllerin matris içinde homojen dağılımını iyileştirdiği, ayrıca modifiye edilmiş silika katılan kaplamaların modül, sertlik ve aşınma değerlerinin büyük oranda geliştiği ifade edilmiştir.

Epoksi matrise sadece silika değil farklı nanopartiküller katılarak kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenmesine yönelik olarak yapılan bir çalışmada, Boumaza vd., (2016) epoksi matrise ZrO_2 , ZnO , Fe_2O_3 ve SiO_2 nanopartiküller katmışlardır. Nanopartiküllerin eklenmesi ile (yukarıda verilen sıralamaya göre), sertliğin % 28, % 56, % 61 ve % 71 oranında arttığı, modülün sırasıyla % 4, % 25, % 21 ve % 26 oranında arttığı, benzer şekilde, bu nanopartiküllerin dahil edilmesinin takviye edilmemiş numuneyle karşılaştırıldığında kaplamanın çizilme ve darbe direncini de arttırdığı rapor edilmiştir. Ayrıca, bu konuda yapılan diğer çalışmalarda iyi bir dispersiyon için nanopartiküllerin konsantrasyonunun düşük olması gerektiği, aksi halde partikül aglomerasyonuna yol açabileceği ortaya konulduğu için, araştırmacılar literatür çalışmalarını dikkate alarak, nanopartiküllerin homojen dağılımını elde etmek amacıyla nanopartikülleri matrise düşük bir konsantrasyonda (% 2) dahil etmişlerdir. Nanopartiküllerin çok az miktarda eklenmesine rağmen epoksi kaplamanın mekanik özelliklerini arttırdığını vurgulamışlardır.

Literatür araştırmalarında, sadece inorganik nanopartiküllerin epoksi kaplamaların mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılmadığı bunun yanında karbon esaslı nanomalzemelerin de etkilerinin incelendiği görülmektedir. Barletta vd., (2016) bu yönde yaptıkları çalışmada grafenle güçlendirilmiş epoksi kaplamaların çizilme direncini araştırmışlardır. Grafenin, çizilme görünürlüğünü azaltabildiği ve böylece epoksi reçinelerinin etkili anti-çizik özelliklerini destekleyebildiğini ortaya çıkarmıştır. Grafen türevi malzemelerin yüksek özgün mekanik özellikleri ve fonksiyonelleştirme prosedürü ile organik reçinelerle güçlü kovalent bağlar oluşturmada uygun olmaları nedeniyle, epoksi reçineler için güçlendirici ajan olarak son derece umut verici olduğu yapılan çalışmada vurgulanmıştır.

Polimerik kaplamalarda korozyon direncinin literatürde yoğun olarak araştırıldığı görülmektedir. Shi vd., (2009) yaptıkları çalışmada epoksi matris içine ayrı ayrı ağırlıkça % 1 oranında nanoboyutta Zn , SiO_2 , Fe_2O_3 ve kil katarak elde ettikleri kaplama malzemelerini çelik altlık üzerine uygulamışlar ve korozif özelliklerini

incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, Fe_2O_3 ve kil katılan numunelerde korozyon direncinde önemli oranda iyileşme sağlandığını ortaya koymuştur. Benzer bir çalışmayı Kotnarowska ve Przerwa, (2013) yapmış ve çalışmalarında epoksi matris içine ağırlıkça % 3,5 oranında nanoalümina (tane boyutu 20 nm) ve nanosilika (tane boyutu 12 nm) katarak ayrı ayrı çelik altlık üzerine uygulamışlardır. Korozyon davranışını belirlemek için yaptıkları üç yıl süren uzun testlerden sonra alümina katılan kaplamanın daha iyi performans gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Chen vd., (2017) yaptıkları çalışmada epoksi matrise ağırlıkça % 0,5 ve % 1 oranlarında grafen ekleyerek korozyon ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçta, saf epoksi kaplamaya kıyasla korozyondan koruma performansının önemli ölçüde arttığını ve grafen nano-tabakaların eklenmesinin sürtünme katsayısını azaltarak kuru koşullar altında kompozitlerin aşınma direncinde kayda değer bir gelişme sağladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında, grafenin topaklanma eğilimini ortadan kaldırmak ve homojen bir dağılım elde etmek için grafen dağıtıcı kimyasallar kullanmışlardır. Grafen nanopartikülün kaplamanın korozif özelliklerine etkileri konusunda yapılan diğer bir çalışmada, Pourhasem vd., (2017) epoksi matris içerisine ağırlıkça % 0,05; 0,1; 0,3 ve 0,5 oranlarında grafenoksit (GO) katarak çelik altlık üzerine kaplamışlardır. Yapılan kaplamanın korozyon direncini elektrokimyasal testlerle ve yüzeye yapışma durumunu pull-off metodu ile analiz etmişlerdir. Yüzeye tutunmada herhangi bir olumsuzluğun olmadığını, korozif özelliklerin ise % 0,1 oranında GO katılan numunelerde en iyi sonucu verdiğini, GO miktarının artması ile topaklanmaların olduğunu ve özelliklerin olumsuz etkilendiğini ifade etmişlerdir. Yine grafen katarak (ağırlıkça % 0,1; 0,4 ve 0,7) Zhang vd., (2015) yaptıkları çalışmada, kaplamanın termal, mekanik ve korozif özelliklerini incelemişlerdir. % 0,7 oranında nanopartikül katılan numunelerde elastisite modülünün % 213 ve termal kararlılığın (% 20 ağırlık kaybı sıcaklığı için) 73 °C arttığını, saf epoksi uygulanan numunede 1,3 mm/yıl olan korozyon hızının 0,3 mm/yıl olarak elde edildiğini ifade etmişlerdir. Bu durumun epoksinin fiziksel bariyer etkisi ile birlikte, matris içerisinde iyi dağılmış grafen tabakalarının fiziksel yapısından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Benzer sonuçlar Barletta vd., (2015) ile Monetta vd., (2015) tarafından yapılan çalışmalarda da ortaya konulmuş ve grafen takviyesi ile reçinelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin iyi bir

kombinasyonunun sağlandığı, dolayısıyla bu amaçla kullanılabilecek fonksiyonel bir kaplama malzemesi olabileceği ifade edilmiştir.

Literatürde, tek bir nanopartikül türünün veya farklı nanopartiküllerin ayrı ayrı kaplamaya katılması durumundaki etkilerinin ele alındığı çok sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Son yıllarda, farklı nanopartiküllerin birlikte (hibrit) katılması durumunda kaplama özelliklerinin nasıl etkileneceği konusunda yapılan yeni çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu çalışmalardan birkaç tanesi aşağıda sıralanmıştır.

Ma vd., (2016) nananosilika ve grafeni birlikte çeşitli oranlarda kullanarak elde ettikleri kompozit kaplamanın korozyif özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla elektrokimyasal analizlerle birlikte, tarama elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi yaparak nanopartiküllerin matris içindeki dağılımını ve partikül matris etkileşimini incelemişlerdir. SiO₂-GO hibrit nanopartiküllerin 1:5 oranında katılması durumunda en iyi sonuçların elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Bouibed ve Rachida, (2019) çalışmalarında epoksi kaplama içine GO, silika ve GO-SiO₂ hibrit nanopartikül katarak çelik yüzey üzerine uygulanan kaplamanın korozyif özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla; FTIR, SEM, TGA analizleri ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, epoksi polimer içine GO-SiO₂ hibrit nanopartiküllerin eklenmesinin epoksi reçinenin hidrofobik özelliğini azalttığını ve malzemenin korozyon direncini arttırdığını ortaya koymuştur. Çelik yüzey ile epoksi kaplama arasındaki dağılım performansı, ısıl kararlılık ve yapışma özelliklerinin de geliştiği gözlenmiştir.

Yu vd., (2015) yaptıkları çalışmada, epoksi matris içerisine GO ve nanoalümina (Al₂O₃) partiküllerini hibrit olarak ekleyerek kaplama uygulaması yapmışlar ve ağırlıkça % 2 oranında yapılan katkının korozyif özellikleri iyileştirdiğini göstermişlerdir. Bu iyileşmenin nedenlerini; epoksi reçinenin fiziksel bir bariyer görevi görmesinin yanında, alüminanın korozyon önleyici bir performansa sahip olması, katılan nanopartiküllerin mikro gözenekleri tıkayarak fazladan bir bariyer tabakası sağlaması ve epoksi reçine içindeki iyi dağılmış GO partiküllerinin sahip oldukları yüksek en boy oranı nedeniyle epoksi kaplamaların korozyon önleyici

performansını güçlendirebilecek tabakaların oluşmasında etkili olması olarak açıklamışlardır.

Yang vd., (2011) çalışmalarında, çok cidarlı karbon nanotüpleri (MWCNT) ve grafen nanotabakaları birlikte kullanarak epoksi kompozitlerinin mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Uzun ve kıvrımlı MWCNT'lerin grafen nanotabakaları köprüleyerek ve bunların toplanmasını önleyerek, grafen/MWCNT yapıları ve polimer matris arasında artan bir temas yüzey alanı oluşturacağını ortaya koymuşlardır. Grafen ve MWCNT'ler arasındaki bu etkileşimle, epoksi kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri üzerinde dikkate değer bir sinerjik etkinin varlığı gösterilmiştir. Karbon nanotüpler ve grafen nanotabakalarının birlikte kullanılması, grafenin özelliklerinin korunması ve polimer matris içindeki dağılımının iyileştirilmesi, grafen katılan polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında esas amaç olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşımla, çekme özelliklerinde önemli bir artış elde edilmiştir.

TabkhPaz vd., (2018) yaptıkları çalışmada, iki tabakalı polimer kaplama sistemlerinde nanopartiküllerin kombinasyonlarını incelemişlerdir. Birinci tabakaya ağırlık % 0; 0,5; 1; 2 oranlarında MWCNT (10-15 nm / 1-10µm) ve GNP (6 nm / 5µm) ile ağırlık % 0; 5; 10; 20, çinko (< 20 µm) eklemişler, ikinci tabakaya ağırlık % 0; 2; 5; 5; 10 bor nitrid (1,5 µm) eklemişlerdir. İlk tabakadaki uygulamada korozyon direncinin iyileştirilmesi, ikinci tabakada ise korozyon direnciyle birlikte mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kaplanmış numunelere, gaz geçirgenliği, katodik ayrışma ve çizilme testleri uygulanmıştır. Nanopartiküllerin eklenmesi, daha az gaz geçirgenliği (yaklaşık % 70 azalma) ve daha yüksek mekanik mukavemet (çizilme direncinde yaklaşık % 80 artış) sağlamıştır.

Grafen ve özellikle hibrit nanopartikül katılarak yapılan literatür çalışmalardan da görülebileceği gibi bu çalışmalar çoğunlukla kaplamanın korozif performansını incelemeye yönelik olmuştur. Kaplamanın mekanik zorlanmalar karşısında nasıl davranacağı konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Kaplama uygulanmasının tek amacı altındaki metalik yapıyı korozyondan korumak değildir, bunun yanında mekanik zorlamalar karşısında kaplamada; soyulma, çizilme, yırtılma gibi olayların en az seviyede olması istenir. Bu nedenle bu tez çalışmasında özellikle mekanik

özellikler üzerinde durulmuş ve bu konudaki çalışmalara katkı verilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanında, grafenin yeni bir malzeme olması ve silika gibi inorganik bir nanopartikülle birlikte hibrit olarak kullanılması durumunda etkileşimlerinin nasıl olacağının, silikanın küresel, grafenin düzlemsel yapısının birlikte epoksi matrisli bir kaplama uygulamasında özellikleri nasıl etkileyeceğinin ortaya konulması çalışmanın amaçları arasındadır.

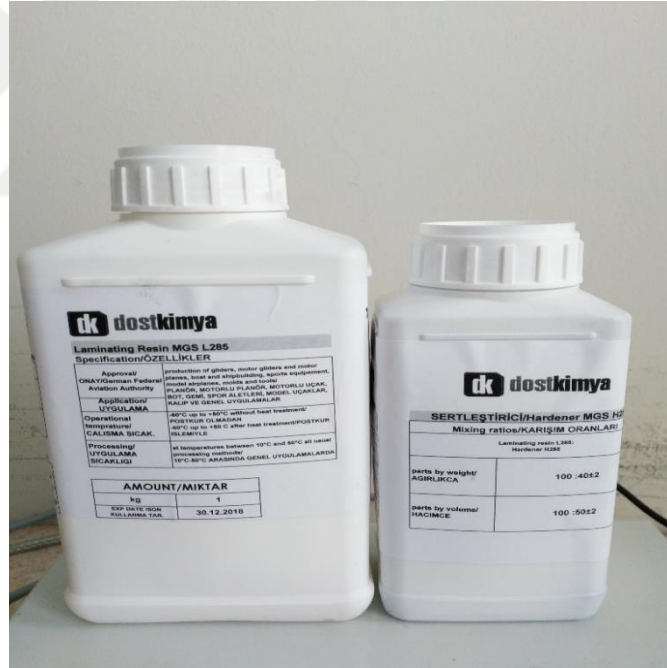


3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan bu çalışmada, çelik yüzeylerin epoksi ile kaplanması sonrasında kaplamanın mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Kaplamanın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla epoksi matris içine çeşitli oranlarda grafen ve SiO₂ nanopartiküller ayrı ayrı ve birlikte katılmıştır.

3.1 Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan epoksi reçine Hexion marka MGS-L285 reçinesidir (Şekil 3.1). Bu reçine 600-900 mPas viskoziteli ve iki fazlı olup (% 80-90 diglisidil eter bisfenol A ve % 10-20 alifatik diglisidileter karışımı) kürleştiricisi ise yine Hexion markasına ait olan MGS-H285 (% 70- 90 sikloalifatik amin ve % 10-30 polioksil alkil amin karışımı)'dir. Reçineye katılan kürleştirici oranı ağırlıkça 40/100'dür.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan epoksi ve sertleştirici.

Nanopartikül takviyesi olarak kullanılan nanotabaka formundaki grafen nanopartikül (GNP) ve yüzeyi silanla modifiye edilmiş küresel SiO₂ Nanografi (Türkiye) firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.2). Nanopartiküllerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



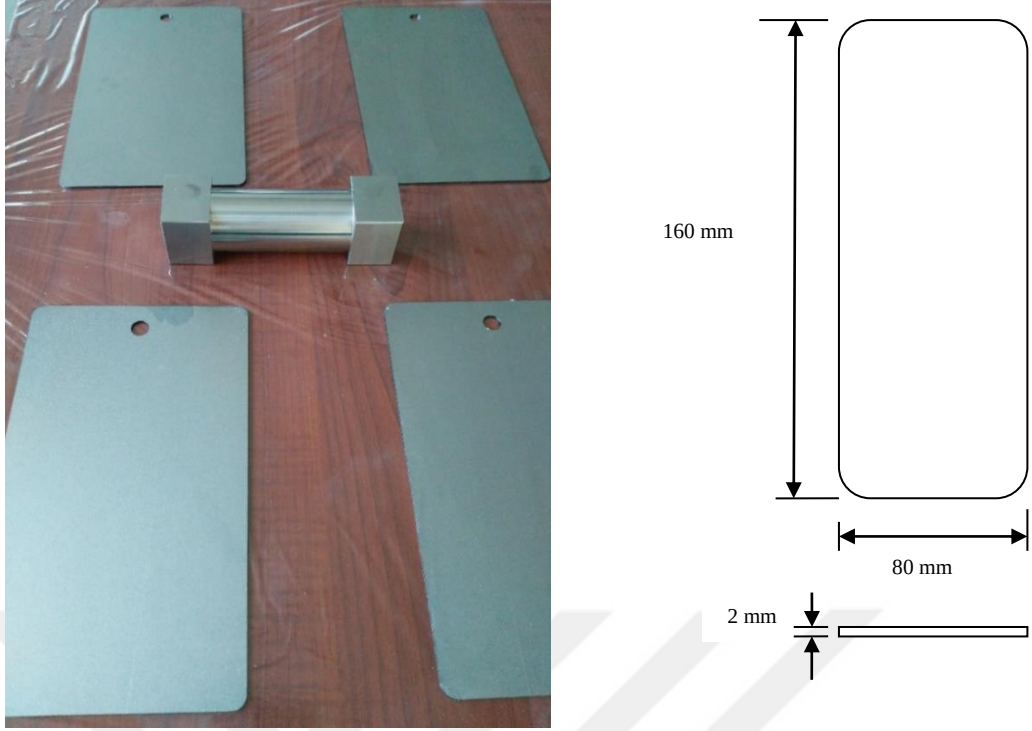
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan nanomalzemeler.

Çizelge 3.1. Kullanılan nanopartiküllerin fiziksel özellikleri.

Özellik	Grafen	SiO ₂
Safılık, %	99,5	97,3
Özgül Yüzey Alanı, m ² /g	150	150-550
Kalınlık	6 nm	-
Çap	24 µm	16 nm
Görünüm rengi	Siyah ve gri	Beyaz
Yoğunluk, g/cm ³	-	2,2

Altlık olarak 160x80x2 mm ölçülerinde Tümosan Firmasından temin edilen, bu amaçla kullanım için hazırlanmış olan, çelik plakalar kullanılmıştır (Şekil 3.3). Altlık yüzeyi kaplama uygulaması yapılmadan önce asetonla temizlenmiş ve alkolle silinerek hazırlanmıştır.

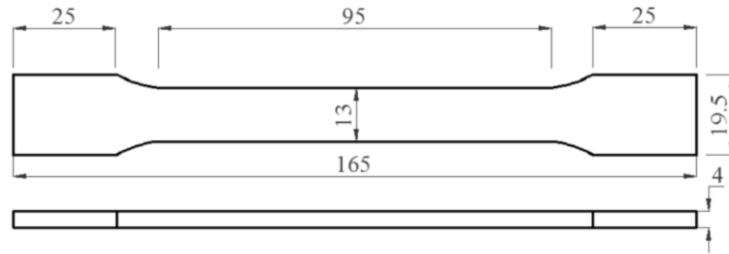
Kaplama filminin uygulanması amacıyla Şekil 3.3’de görülen boya (film) aplikatörü kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Kullanılan test plakalarının ölçüleri, test plakaları ve boya aplikatörü.

3.2 Epoksi Nanokompozit Kaplamanın Hazırlanması ve Uygulanması

Epoksi kaplama uygulaması için matrise katılacak nanopartikül miktarını belirlemek amacıyla yapılan literatür çalışmaları incelenmiş, ayrıca Şekil 3.4'te ölçüleri verilen bulk numuneler Şekil 3.5'te görülen kalıplar kullanılarak üretilmiş ve çekme deneyleri yapılmıştır. Bu ön çalışmalardan alınan sonuçlar doğrultusunda silika ve grafen epoksi matrise Çizelge 3.1'de verilen oranlarda katılmıştır.



Şekil 3.4. ASTM D638 Polimer çekme numunesi ölçüleri.



Şekil 3.5. Numune dökülmeden önce ve sonra çekme kalıpları.

Çizelge 3.2. Nanokompozit kaplama formülasyonu.

Numune kodu*	SiO ₂ (Ağırlıkça %)	GNP (Ağırlıkça %)
SE	-	-
SiE	1	-
GE	-	0,1
HE	1	0,1

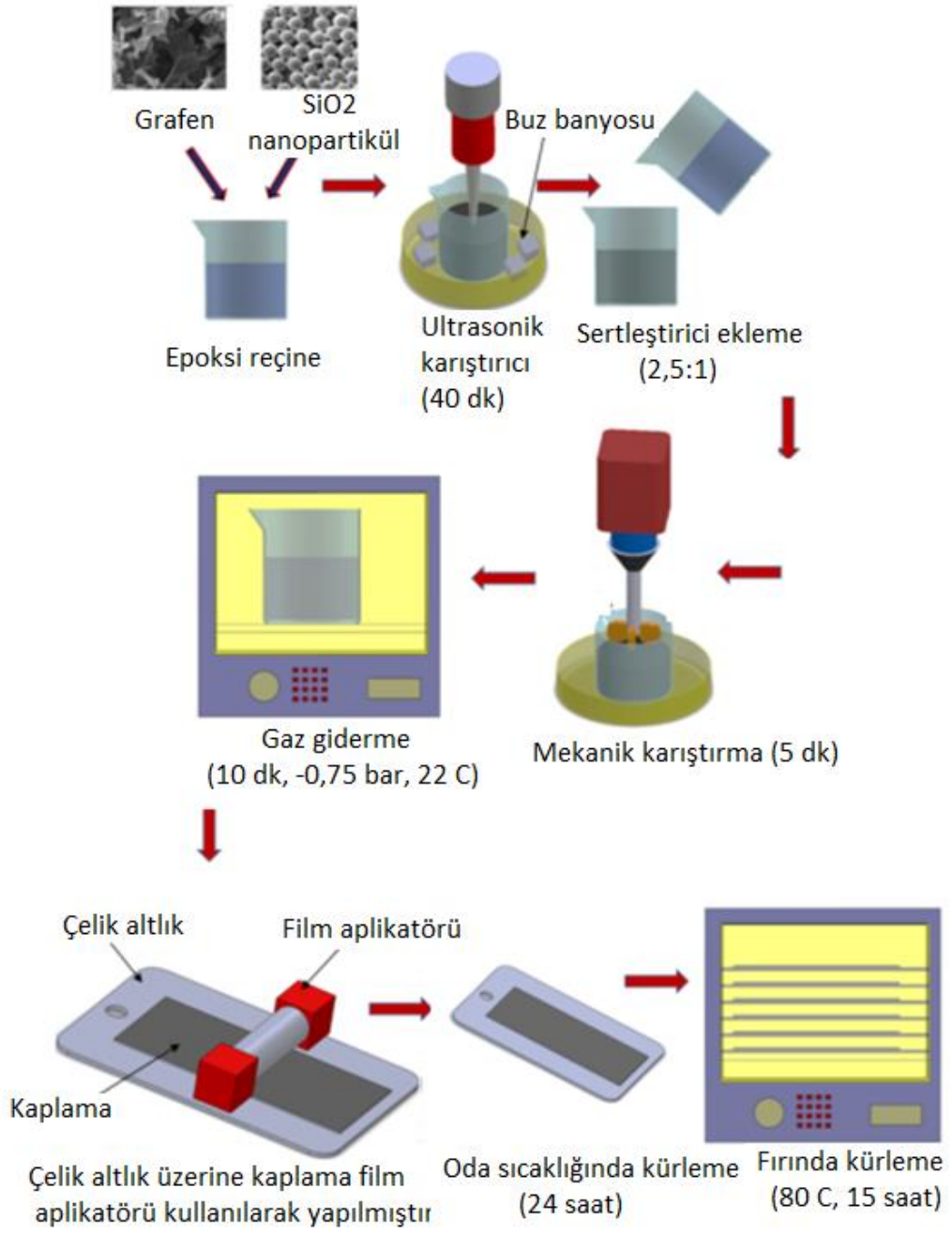
*Saf epoksi (SE), Silika katılan epoksi (SiE), Grafen katılan epoksi (GE), Hibrit katılan epoksi (HE)

GNP ve silika nanopartiküllerin epoksi reçine içerisinde homojen dağılımını sağlamak amacıyla ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.6). Nanopartiküllerin zarar görmesini engellemek ve hızlı kürleşmenin engellenmesi amacıyla buz banyosu içerisinde 5'er dakikalık periyotlarda kısa aralıklarla toplam 40 dakika ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Elde edilen epoksi / nanopartikül karışımının içerisine ağırlıkça % 40 oranında sertleştirici ilave edildikten sonra mekanik olarak 5 dakika karıştırılmıştır. Mekanik karıştırma sonucu oluşabilecek hava kabarcıklarını gidermek amacıyla karışım oda sıcaklığında 10 dakika vakum fırınında 0,75 bar vakumda bekletilerek karışım içerisinde bulunan hava kabarcıklarının giderilmesi sağlanmış, epoksi nanokompozit kaplama malzemesi çelik yüzeye uygulanmak için hazırlanmıştır (Şekil 3.6). Numunelerin hazırlanması aşamaları Şekil 3.7'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ultrasonik karıştırıcı ve vakum fırını.

Hazırlanan epoksi nanokompozit kaplama malzemesi film aplikatörü kullanılarak çelik altlık üzerine uygulanmıştır (Şekil 3.8). Test ve analizlerde kullanılmak için hazırlanan, ağırlıkça %1 oranında silika katılan, % 0,1 oranında grafen katılan, hibritnanopartikül katılan (% 1 silika + % 0,1 grafen) ve karşılaştırma amacıyla nanopartikül katılmamış olan epoksi ile kaplanmış numuneler Şekil 3.9’de görülmektedir. Kaplama yapıldıktan sonra numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiş, 15 saat 80 °C sıcaklıkta fırında kürlenmiştir.



Şekil 3.7. Numune hazırlama adımları.



Şekil 3.8. Aplikatör ile kaplama uygulaması.



Şekil 3.9. Kaplanmış numuneler (sağdan sola; saf epoksi, silika katılan, GNP katılan epoksi kaplama uygulamaları).

3.3 Karakterizasyon Testleri

Epoksi matrisli nanokompozit kaplama uygulanan test plakalarına aşağıda verilen test ve analizler yapılmıştır.

3.3.1 Kaplama kalınlığı ölçümü

Kaplama, film aplikatörü kullanılarak 60 μm olarak uygulanmıştır, ancak Tümosan A.Ş.'de bulunan Elcometer marka kaplama kalınlığı ölçüm cihazı ile her numune üzerinden yapılan üçer kalınlık ölçümünün değerlendirilmesi ile elde edilen kuru film kalınlıkları 60 ± 10 μm olmuştur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kaplama kalınlığı ölçümü.

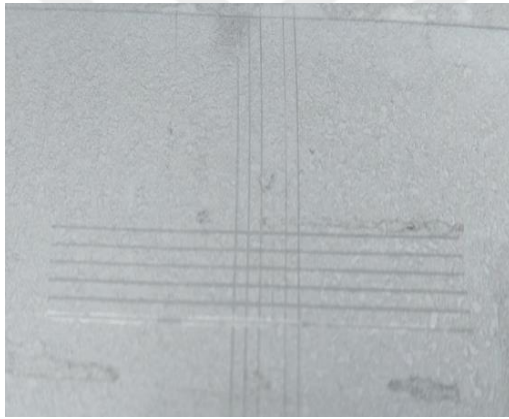
3.3.2 Kafes çizgi testi

Kaplamanın çelik altlık üzerine yapışma kabiliyetini belirlemek amacıyla, ASTM D 3359 standardına uygun olarak Şekil 3.11'de uygulaması görülen kafes çizgi testi (Bant testi) (Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test) Tümosan A.Ş.'de bulunan altı bıçaklı bir kesici aparat kullanılarak yapılmıştır. Test uygulanmadan önce plakaların kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve kalınlıklar 55 ± 5 μm olarak belirlenmiştir. Her plakanın kaplanmış yüzeyinde kesici aparat kullanılarak 2 mm aralıklı çizgiler çizilmiş, sonra oluşan çizgilere 90° açı oluşturacak yönde aynı şekilde çizgiler çizilmiştir. Çizme işlemi, sonuçların etkilenmemesi için kenarlardan değil test plakasının orta kısmına yakın bölgelerden her numune için ikişer adet yapılmıştır, diğer testlerde de bu durum dikkate alınarak ölçümler yapılmıştır. Çizilen yüzey üzerine bant yapıştırılıp hızlı ve kuvvetli bir şekilde bir seferde kaldırılarak yüzeyden kalkan boya miktarı standartlarda verilen miktarlarla karşılaştırılarak kaplamanın çelik altlık üzerine yapışma durumu incelenmiştir. Test uygulanmış (çizme işlemi ve bant uygulaması sonrasında) numune yüzeyleri Şekil

3.12’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yüzeydeki kaplamalardan bir kalkma olmamıştır.



Şekil 3.11. Hazırlanan numunelere kafes çizgi testi uygulanması.



(a)



(b)

Şekil 3.12. Kafes çizgi testi uygulanmış (a) silika ve (b) grafen katılan kaplama numuneleri.

3.3.3 Konik bükme ve çökertme testi

Kaplamanın esneklik özelliğini ölçmek için, ASTM D 522 standardına uygun olarak kaplanmış test plakalarına mandrelle konik bükme testi (Mandrel Bend Test of Attached Organic Coatings) ve EN ISO 1520:2006 standardına uygun olarak çökertme testi (Paints and varnishes - Cupping test) her formülasyon için üçer adet yapılmıştır. Testler yapılmadan önce plakaların kaplama kalınlıkları ölçülmüş ve kalınlıklar 57 ± 5 μm olarak belirlenmiştir. Konik bükme testi, kaplanmış yüzeyin hızlı ve daha büyük deformasyonlarla karşılaşması durumunda kaplamanın esneklik

özelliğini belirlemek için yapılmaktadır. Ayrıca konik bir mandrel üzerinde testin yapılması, kaplamanın farklı deformasyon oranlarında (mandrel çapındaki değişime bağlı olarak) davranışını ve oluşabilecek yırtılmanın mandrelin dar kısmından başlayıp ne kadar ilerleyebileceğini görmeyi de sağlamaktadır. Çökertme testi ise daha yavaş ve daha küçük deformasyonlarda kaplamanın esneklik performansını belirlemek için yapılmaktadır. Çökertme testinde, sabitlenmiş test plakasının kaplanmış yüzeyinde oluşturulan çökme, kaplama üzerinde her yönde eşit bir deformasyon meydana getirmektedir.

Konik bükme testi Tümosan A.Ş.'de bulunan Şekil 3.13'te görülen konik bükme test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Test, kaplanmış her bir test plakasının bükme kolu kullanılarak, konik mandrel etrafında 180° bükülmesi ile uygulanmıştır. Kaplama filminde çatlamanın olup olmamasına göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 3.14'te konik bükme testinin uygulanması ve test uygulanmış numuneler görülmektedir.

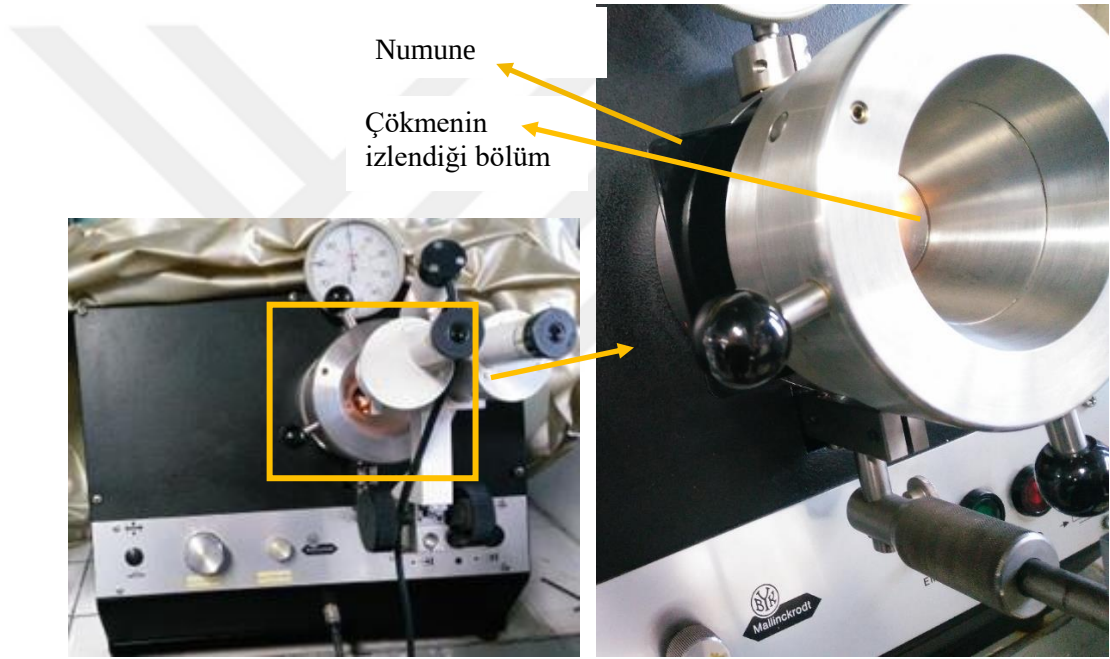


Şekil 3.13. Hazırlanan numunelere konik bükme testinin uygulanması.

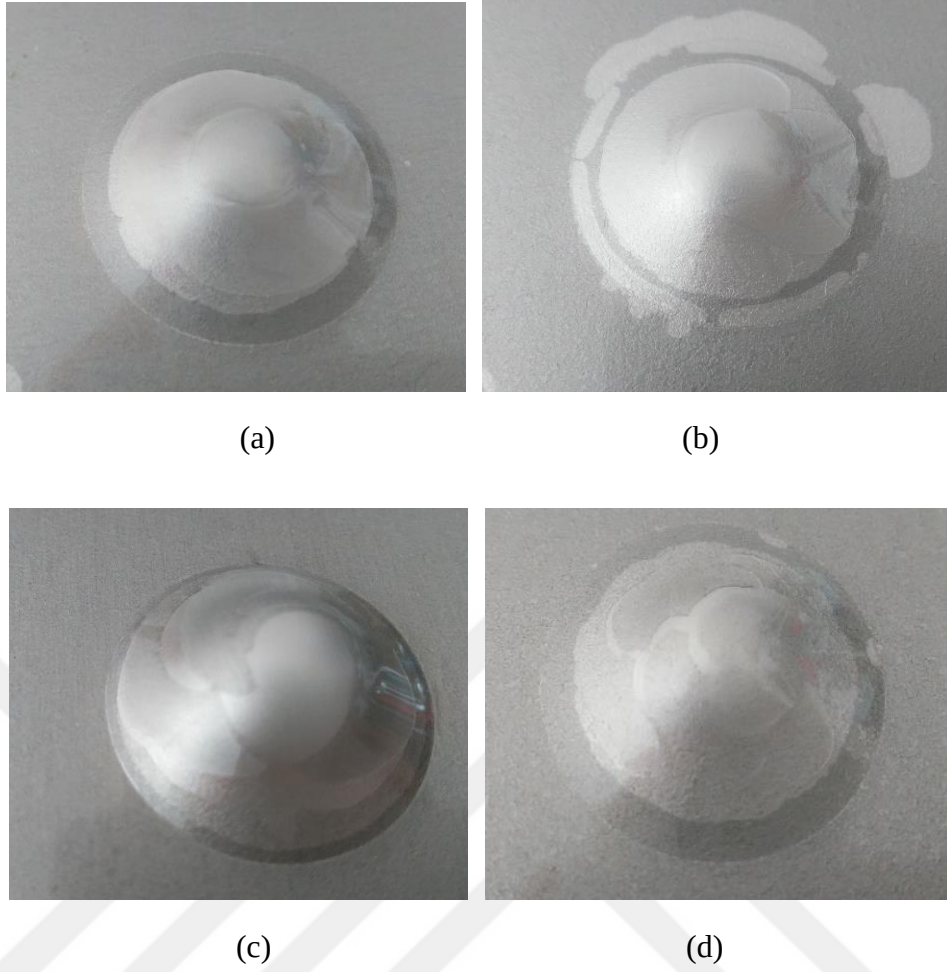


Şekil 3.14. Konik bükme testi uygulanmış (a) saf epoksi ve (b) hibrit katılan numuneler.

Çökertme testi Tümosan A.Ş.'de bulunan Şekil 3.15'te görülen Byk Mallinckrodt marka çökertme test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Test plakaları cihaza yerleştirildikten sonra kaplanmış plakanın arka yüzüne doğru 0,2 mm/sn hızla itilen 20 mm çapındaki yarı küre biçimli zımba plakayı deforme etmeye başlar. Zımbanın ilerlemesi sürerken, kaplama filminin yüzeyi, Şekil 3.15'te görülen cihazın izleme penceresinden bir büyüteçle sürekli olarak gözlenmiş, kaplama filminde ilk çatlak görüntüsü belirdiğinde cihaz durdurulmuştur. Zımbanın plakaya değdiği ilk andan kaplamada çatlağın oluştuğu ana kadar aldığı yol kaydedilmiştir. Teste tabi tutulannumuneler Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.15. Çökertme test cihazı.



Şekil 3.16. Çökertme testi uygulanmış (a) saf epoksi, (b) silika, (c) hibrit ve (d) grafen katılan numuneler.

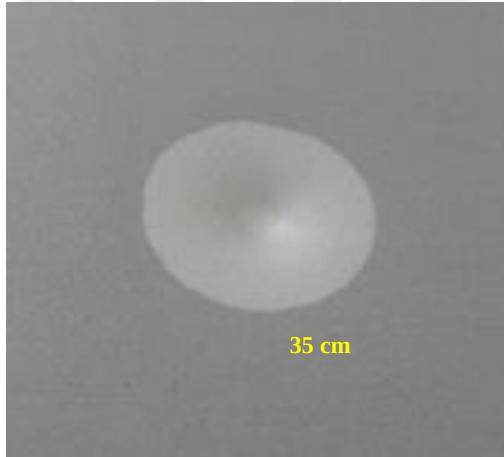
3.3.4 Darbe testi

Kaplamanın darbe etkisindeki davranışını belirlemek için EN ISO 6272-1:2011 standardına (Paints and varnishes -- Rapid-deformation (impact resistance) tests -- Part 1: Falling-weight test) uygun olarak kaplanmış test plakalarına her formülasyon için üçer adet darbe testi yapılmıştır. Darbe testi Tümosan A.Ş.'de bulunan ve Şekil 3.17'de görülen Byk Mallinckrodt marka darbe test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Test yapılmadan önce plakaların kaplama kalınlıkları 58 ± 5 μm olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada tüm numuneler; 35, 40, 50, 70, 80 ve 90 cm yüksekliklerden numune üzerine 0,907 kg ağırlık düşürmek suretiyle teste tabi tutulmuştur. Kaplamada çatlama veya kabarma gözlenen yükseklikler kaydedilmiştir. Şekil 3.18'de darbe testi uygulanmış saf epoksi ve grafenle güçlendirilmiş kaplama numunelerindeki deformasyonlar görülmektedir. Darbe testi, konik bükme ve çökertme testinden farklı olarak, plakanın kaplanmış yüzeyine deformasyonun uygulanması ve ani bir

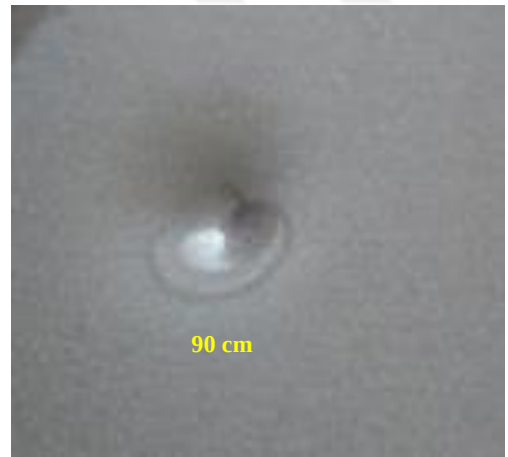
yüklemeye (darbe) yapılır. Metalik malzemenin üzerindeki kaplamanın darbeye maruz kalması durumunda, darbenin şiddetine bağlı olarak, kaplamanın yüzeyden ayrılması veya altlıkla birlikte deforme olabilmesi durumu test edilmektedir.



Şekil 3.17. Darbe testinin uygulanması.



(a)

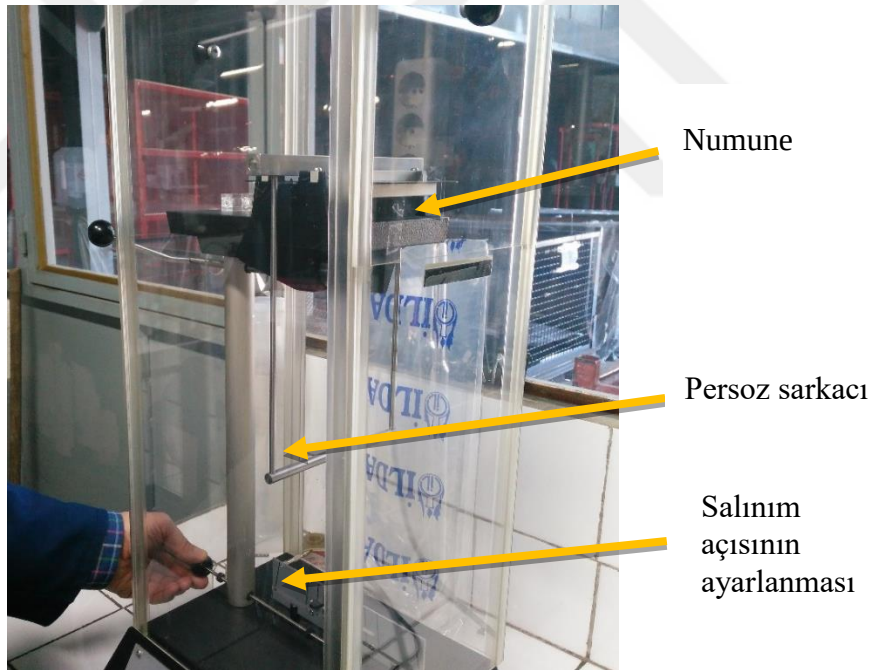


(b)

Şekil 3.18. Darbe testi uygulanmış (a) saf epoksi, (b) grafen katılan numuneler.

3.3.5 Sertlik Testi

Kaplamanın sertliğini belirlemek amacıyla ASTM D 4366 standardına (Standard Test Methods for Hardness of Organic Coatings by Pendulum Damping Tests) uygun olarak kaplanmış test plakalarına Şekil 3.19’da görülen ve Tümosan A.Ş.’de bulunan test cihazı kullanılarak Persoz Pendulum sertlik testi her formülasyon için üçer adet uygulanmıştır. Test uygulaması yapılacak plakaların kaplama kalınlıkları 55 ± 5 μm olarak ölçülmüştür. Kaplanmış test plakaları, kaplanan yüzeyleri sarkacın üzerinde bulunan yarı küre biçimli iki nokta ile temas edecek şekilde, test cihazına yerleştirilmiştir. Persoz Pendulum ile ölçüm yapıldığı için sarkacının başlangıç salınım açısı 12° olarak ayarlanmış ve salınım açısı 4° ’ye düşünce cihaz kaydı durdurulmuş ve sonra da sarkaç durmuştur. Her bir numune için durma süresinin saniye cinsinden karşılığı, kaplama filminin sertliği olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.19. Pendulum (persoz) sertlik testinin uygulanması.

3.3.6 Mikrosertlik ve mikroçizik testleri

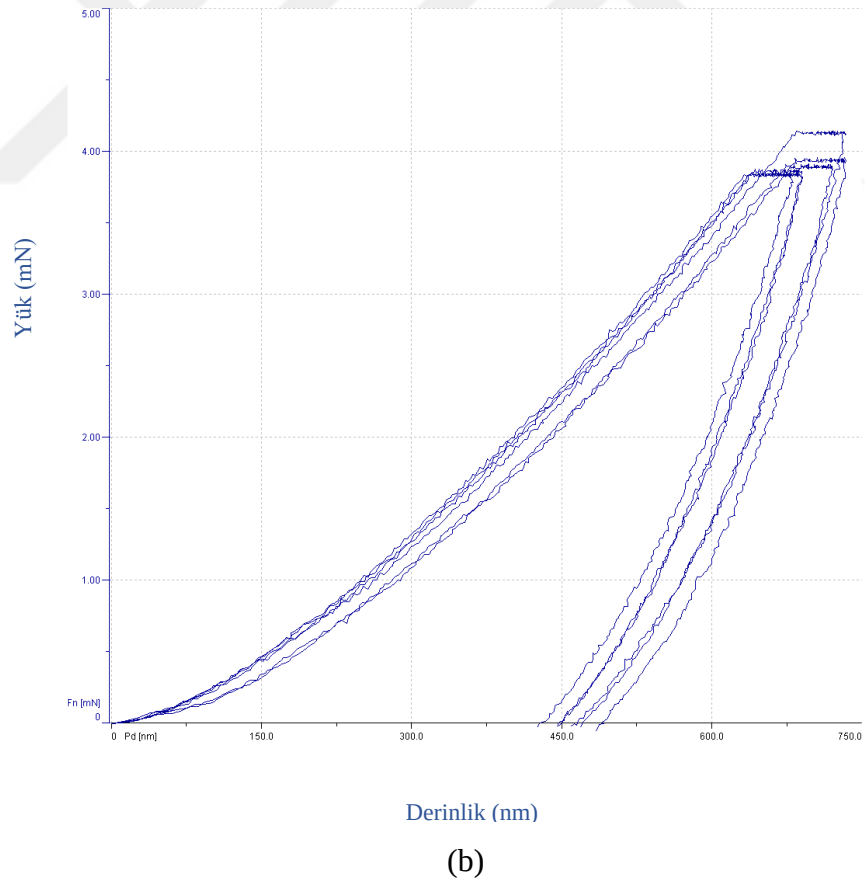
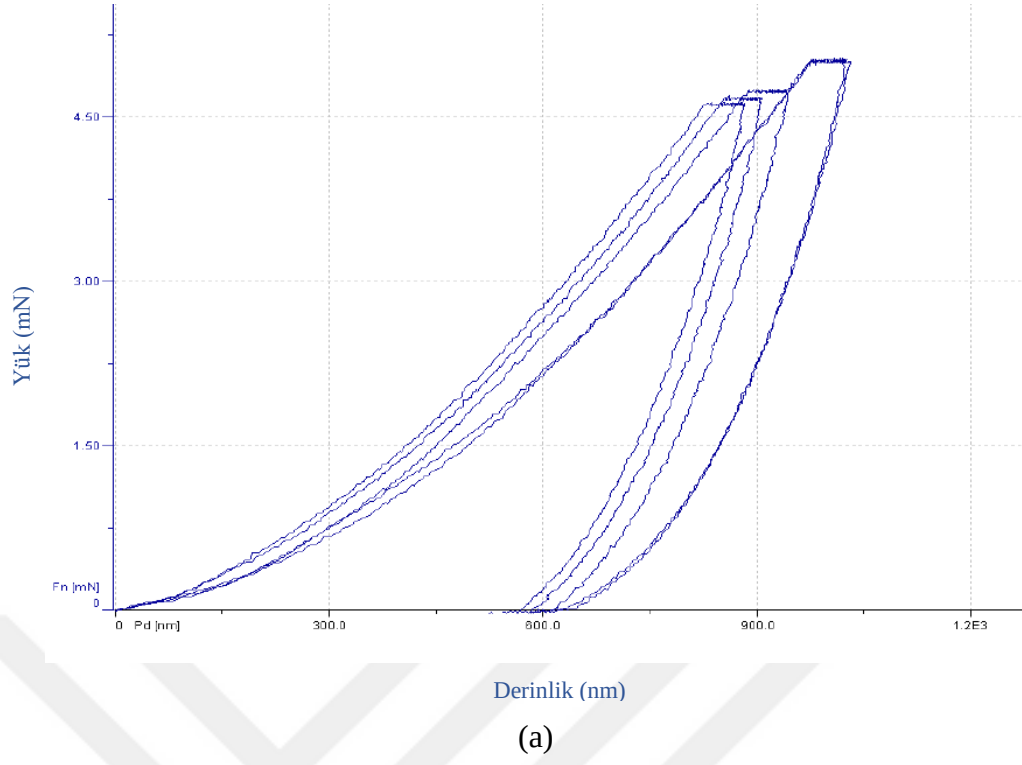
Bu aşamaya kadar sayılan ve yukarıda açıklamaları verilen testler, daha çok kaplamaların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla endüstriyel amaçlı uygulanan

testlerdir. Bu tez çalışmasında epoksi reçine içine çeşitli nanopartiküller katılarak kaplama uygulaması yapıldığı için nanoboyuttaki bu güçlendiricilerin etkilerini daha iyi gözleyebilmek ve yorumlayabilmek amacıyla bu testlerin yanında ayrıca aşağıda detaylı açıklamaları verilen test ve analizler uygulanmıştır.

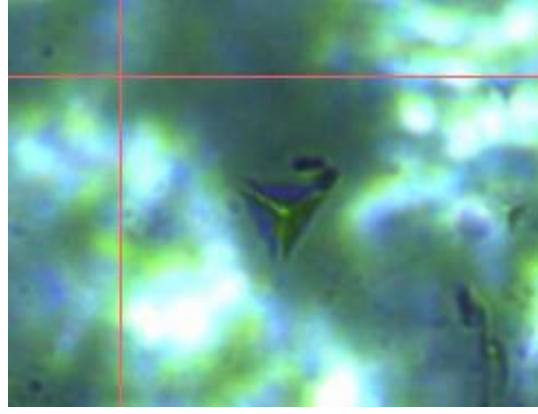
Kaplamaların mikrosertlik ve mikroçizik testleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) Merkez Laboratuvarında (Nano-Indentation Tester, CSM Instruments) yaptırılmıştır. Test uygulanmadan önce plakaların kaplama kalınlıkları $58 \pm 1 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Testler her formülasyon için beşer adet yapılmıştır. Kullanılan test cihazı Şekil 3.20’de görülmektedir. Kaplanan numunelerin mikrosertliği, Berkovich nanoindentasyon testi ile belirlenmiştir (Şekil 3.20). Test sırasında, batıcı uç kullanılarak numune yüzeyine dik olacak şekilde belirlenen 50 mN maksimum değere kadar yük uygulanmış ve bu maksimum yük değerine ulaştıktan sonra tekrar dereceli olarak geri yükleme yapılmıştır. Yükleme ve geri yükleme sonucunda kaplama numunelerine ait Şekil 3.21’de verilen Yük (mN) – Derinlik (nm) eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler analiz edilerek kaplama numunelerinin sertliği ve elastisite modülü değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca, indentasyon test cihazının mikroskobu kullanılarak yüzey görüntüsü alınabilmektedir. Şekil 3.22’de kaplama numunelerinin yüzeyinde oluşan ize ait örnek bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.20. Nanoindentasyon test cihazı.

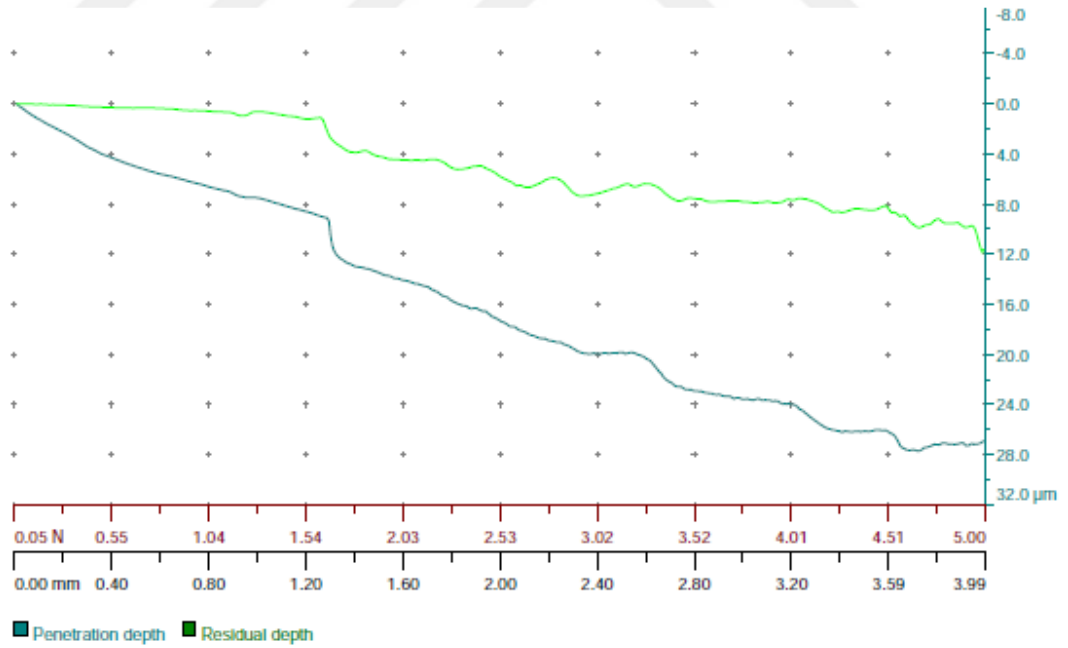


Şekil 3.21. Kaplama numunelerinin örnek Yük - Derinlik eğrileri: (a) saf epoksi, (b) hibrit nanopartikül katılan numune.



Şekil 3.22. Test uygulanan numunelerden alınan örnek yüzey görüntüsü.

Kaplanmış numuneler için mikroçizik testi, Rockwell uç (100 μm yarıçapa sahip elmas) kullanılarak 0,05 ila 5 N arasında değişen yük altında ve 4 mm/dk hızda yapılmıştır. Numunelerde yük altında oluşan penetrasyon derinliği, kalan derinlik ve elastik toparlanma miktarları ölçülmüştür. Şekil 3.23’de hibrit nanopartikül katılan kaplama numunesinin, mikroçizik testi sonucunda elde edilen, artan yükleme değerine karşı penetrasyon derinliği ve kalan derinlik değişimi grafiği verilmiştir.



Şekil 3.23. Hibrit nanopartikül katılan kaplama numunesinin, mikroçizik testi sonucunda elde edilen, artan yükleme değerine karşı penetrasyon derinliği ve kalan derinlik değişimi grafiği.

3.3.7 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi

Epoksi reçine ve nanopartikül arasındaki etkileşimi ve oluşan kimyasal grupları belirlemek için Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopi analizi yapılmıştır. Analiz Şekil 3.24'te görülen Perkin Elmer 400 markalı cihazda (ODTÜ Laboratuvarı), $500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ aralığında 4 cm^{-1} çözünürlükte infrared spektrumlar alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24. FTIR analiz cihazı.

3.3.8 Termogravimetrik analiz

Kaplamanın termal kararlılığını belirlemek için termogravimetrik analiz (TGA) yapılmıştır. Analiz, $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir (Aksaray Üniversitesi Laboratuvarı, ASÜBTAM).

3.3.9 Tarama elektron mikroskobu analizi

Epoksi nanokompozit kaplamalarda nanopartiküllerin dağılımı ve çatlak yayılmasını etkileme mekanizmaları tarama elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Ayrıca SEM analizi sonuçları, diğer test sonuçlarının yorumlanması amacıyla da kullanılmıştır. Analizler, yapılan ön çalışmalarda üretilen çekme numunelerinin kırılma yüzlerinde yapılmıştır. Numune yüzeyleri SEM incelemelerinden önce altın tozu kullanılarak kaplanmıştır. Analizler Şekil 3.25'de görülen ZEISS EVO LS 10

marka SEM cihazı kullanılarak, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (İLTEK) yapılmıştır.



Şekil 3.25. Tarama elektron mikroskobu.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kafes Çizgi Testi Sonuçları

Kaplamanın metal altlık yüzeyine tutunabilme derecesini belirlemek amacıyla kafes çizgi testi yapılmıştır. Bu çalışmada tüm numuneler üzerinde oluşan izler 5B sınıfında değerlendirilmiştir (Çizelge 4.1). 5B sınıfı, test sonrası kaplamalarda bir dökülmenin olmadığı anlamına gelmektedir. Bu sonuç, kaplama öncesinde yapılan yüzey hazırlığının uygun olduğunu ve kaplamanın yüzeye yeterince tutunduğunu göstermiştir.

4.2 Konik Bükme ve Çökertme Testi Sonuçları

Kaplama filminin herhangi bir çatlama, yırtılma göstermeden bükülebilmesinin göstergesi olan esnekliğini belirlemek için konik bükme testi uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde tüm panellerde yırtılmanın meydana geldiği ancak en az yırtılmanın grafen katılan epoksi kaplamada meydana geldiği gözlenmiştir. Sonra sırasıyla hibrit nanopartikül katılan epoksi, silika katılan epoksi ve saf epoksi kaplama uygulanan panellerde, konik bükme testi sonucunda artan yırtılmalar oluşmuştur (Çizelge 4.1).

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi kaplamada meydana gelen yırtılma incelendiğinde silika katılan numunede yırtılmanın düz bir şekilde olduğu, grafen katılan numunede ise yırtılmanın zikzaklı bir şekilde meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durumun, grafenin iki boyutlu yapısının deformasyon kabiliyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.1. (a) Silika (b) grafen katılan numunelerdeki yırtılma görüntüsü.

Esnekliğin belirlenmesi amacıyla ayrıca çökertme testi yapılmıştır. Bu testte, zımbanın plakaya değdiği ilk andan kaplamada çatlağın başladığı ana kadar olan çökme miktarı değeri mm cinsinden ölçülmüştür. Bu değer saf epoksi kaplamada 4,8 mm, nanosilika katılan epoksi kaplamada 4,5 mm, grafenkatılan epoksi kaplamada 5,2 mm ve hibrit nanopartikül katılan kaplamada 2,9 mm olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Grafen nanopartikülle güçlendirilmiş epoksi kaplamada, kaplamanın esnekliği nanopartikül katılmamış epoksiye göre % 8,3 oranında artmıştır.

Bu sonuçlar; en esnek kaplama malzemesinin grafen katılan epoksi olduğunu, hibrit katılan epoksi kaplamanın diğer kaplamalara göre oldukça gevrek bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, konik bükme testinden elde edilenle benzerlik göstermektedir. Grafen, epoksi kaplamanın esnekliğini yapısal özellikleri sayesinde arttırmıştır. Grafenin iki boyutlu ve tabakalı yapısı, yükleme sırasında farklı yönlerde deformasyona izin verdiği için bu yüksek esnekliği sağlamaktadır.

4.3 Darbe Testi Sonuçları

Kaplamanın, üzerine gelen ani kuvvetlere karşı gösterdiği direnç darbe testi ile ölçülmüştür. Saf epoksi kaplamada 35 cm yükseklikte kabarma meydana gelirken, silika ve hibritkatılan epoksi kaplamalarda 35 ve 40 cm yüksekliklerde hasar meydana gelmemiş, 50 cm yükseklikte çok küçük deformasyon meydana gelmiş ve 70 cm yükseklikte kabarmanın arttığı gözlenmiştir. Grafen katılan epoksi kaplamada tüm yüksekliklerde herhangi bir çatlama meydana gelmemiş, 90 cm yükseklikte ise çatlama oluşmaya başladığı görülmüştür (Çizelge 4.1). Bu numunede darbe direncindeki artış nanopartikül katılmamış epoksiye göre % 157,1 oranında olmuştur.

Elde edilen sonuçlar, tüm nanopartiküllerin epoksi kaplamanın darbe direncini arttırdığını ancak grafen katılan numunelerde bu artışın daha fazla olduğunu göstermiştir. Esneklikteki iyileşmenin nedenleri burada da etkili olmuştur. Saf epoksi kaplamaların, mekanik özellikler bakımından zayıf yönlerinin başında yer alan düşük darbe dayanımı (Jiang vd., 2013; Haeri vd., 2017) özelliğinin nanopartikül katılarak iyileştirilebileceği bu çalışmayla gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Kaplamaların fiziksel ve mekanik özellikleri.

Num. kodu	Kafes çizgi testi	Konik bükme testi	Çökertme testi (mm)	Darbe testi (Hasarın meydana geldiği yükseklik) (cm)
SE	5B	Çatlama oluştu (+++)	4,8	35
SiE	5B	Çatlama oluştu (++)	4,5	50
GE	5B	Çatlama oluştu (çok az miktarda)	5,2	90
HE	5B	Çatlama oluştu (+)	2,9	50

4.4 Pendulum Sertlik ve Mikrosertlik Testlerinin Sonuçları

Bu çalışmada kaplamanın sertliği, Pendulum sertlik ve mikrosertlik testleri olmak üzere iki farklı yöntemle değerlendirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.2). Beklendiği gibi, sertliğin belirlenmesindeki farklı yöntemler, yüzey deformasyonuna neden olan kuvvetlerin mekanizmasına bağlı olarak farklı sonuçlar vermiştir. Mikrosertlik testinde, kaplama yüzeyine temas eden Berkovich uç kullanılarak, artan bir normal kuvvet uygulanmakta ve penetrasyon derinliğine bağlı olarak sertlik belirlenmektedir (Spirkova vd., 2006). Bununla birlikte, yüzeyde sallanan bir sarkacın sönümleme süresinin ölçülmesi prensibine dayanan pendulum sertlik testinde; yüzey sertliği, pürüzlülük ve kaplama kalınlığı sonuçları etkilemekte ve sönümleme süresi ne kadar kısaysa sertlik o kadar düşük olmaktadır. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi sertlik, yüzeydeki nanoparçacıkların varlığından etkilenmiş ve nanopartiküllerin eklenmesiyle, hem Pendulum sertlik hem de mikrosertlik değerleri artmıştır. Mikrosertliğin, özellikle hibrit nanopartiküllerin eklenmesiyle % 53,8 oranında önemli bir artış gösterdiği, diğer numunelerin ise sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Hibrit nanopartikül katılan numunelerde, toplam nanopartikül miktarının (SiO_2 ve GNP) artışıyla birlikte, ölçüm sırasında daha fazla nanopartikül ile etkileşime girilmesi beklenen bir durumdur. Sertlik artışının ayrıca, epoksi matriste dağılmış hibrit nanopartiküller tarafından moleküler zincir hareketlerinin sınırlandırılmasından da kaynaklandığı düşünülmektedir (Martin-Gallego vd., 2011). Bu durumda, malzeme, uygulanan yükün neden olduğu

deformasyona karşı daha fazla direnç göstermektedir (Shokrieh vd., 2013). Pendulum sertlik testinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir, fakat maksimum sertlik bu yöntemde nanosilika eklenen numunelerde elde edilirken, mikrosertlik yönteminde hibrit nanopartiküllerin eklendiği numunelerde elde edilmiştir. Kaplamaların yüzeyine kısmen göç eden sert silika nanopartiküllerin varlığı muhtemelen pendulum sertliğinin artmasına neden olmuştur (Sangermano vd., 2005; Sangermano vd., 2009). Bunlara ilaveten, deforme olan bölgenin alanı ve hacmi uygulanan yöntemlerin ölçeğine bağlı olarak büyük oranda değişmektedir. Bu yüzden, yönteme bağlı olarak, sertlik ölçümünün yapıldığı alanın büyüklüğündeki fark nedeniyle, matris veya nanoparçacık ile daha fazla temas etme durumunun sonuçların farklı olmasına neden olmuş olabileceği düşünülmektedir.

Epoksi kaplamaların elastisite modülü değerleri, grafen katılan ve hibrit katılan numunelerde Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi önemli oranda artmıştır. Bu artışa; grafen nanopartiküllerin kaplamadaki boşlukları doldurması, matris molekül zincirleri arasında köprü görevi görmesi, epoksinin çaprazbağ yoğunluğunda bir artış ve toplam boş hacimde bir azalmaya neden olması yol açmaktadır (Becker vd., 2002; Shi vd., 2009).

Çizelge 4.2. Kaplamaların sertlik ve modül değerleri.

Numune kodu	Pendulum sertlik (saniye)	Mikrosertlik (GPa)	Modül (GPa)
SE	325	0,26	4,94
SiE	347	0,27	4,30
GE	345	0,28	6,80
HE	331	0,40	6,81

4.5 Mikroçizik Testi Sonuçları

Artan yük altında yapılan çizik testi sonrası penetrasyon derinliğinin tüm numunelerde azaldığı, penetrasyon derinliği değerindeki en büyük azalmanın % 29,7 oranıyla hibrit nanopartikül katılması ile oluştuğu görülmektedir. Benzer şekilde, nanopartikül katılan kaplamalarda kalan derinlik miktarının azaldığı görülmüştür

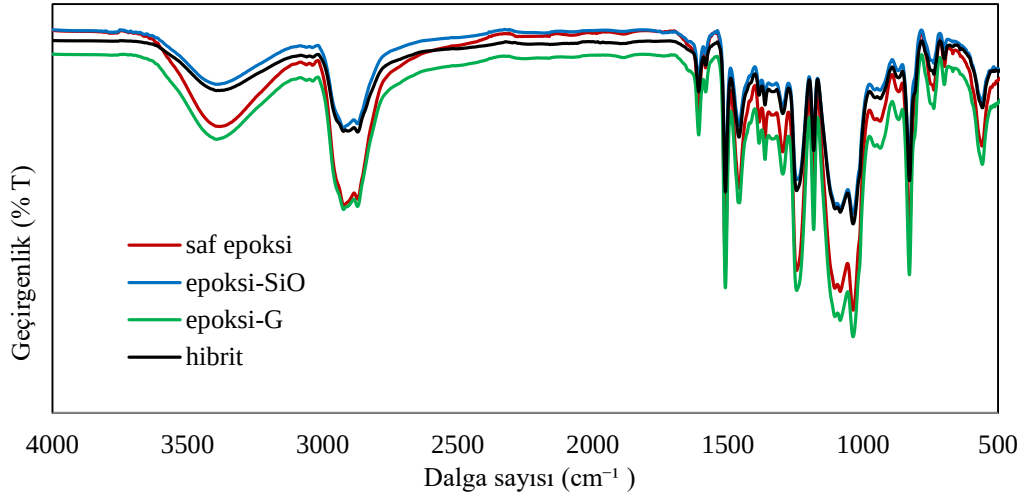
(Çizelge 4.3). Bu sonuç, SiO₂, GNP veya hibrit nanopartiküllerin varlığının, epoksi reçinenin elastik alanda deforme olmasını sağladığını gösterir; bu ise deformasyonun çoğunun yükün uygulanması sırasında meydana geldiği ve yük kalktıktan sonra düzeldiği anlamına gelir. Elde edilen düşük penetrasyon derinliği, malzemenin çizilme direncindeki artışın bir göstergesidir ve Çizelge 4.2'de görülen sertlik artışı bu sonucu desteklemektedir. Bu sonuçlar epoksiye katılan nanopartiküllerin dış yüklere karşı koydukları, epoksi ile nanopartiküller arasındaki etkileşimin yüksek olduğu ve oluşan arayüzeyin gerilme dağıtıcı bir görev yaptığı anlamına gelmektedir (Barletta vd., 2016, Yang vd., 2011, Jiang vd., 2013).

Çizelge 4.3. Artan yük altında yapılan çizik testi sonrası penetrasyon ve kalan derinlik değerleri (Sonuçlar 5 N yük altındaki değerlerdir).

Numune kodu	Penetrasyon derinliği (µm)	Kalan derinlik (µm)	Elastik toparlanma (%)
SE	38,12	15,05	60,52
SiE	34,29	10,72	68,74
GE	33,5	10	70,15
HE	26,78	10,33	61,43

4.2 FTIR Analizi Sonuçları

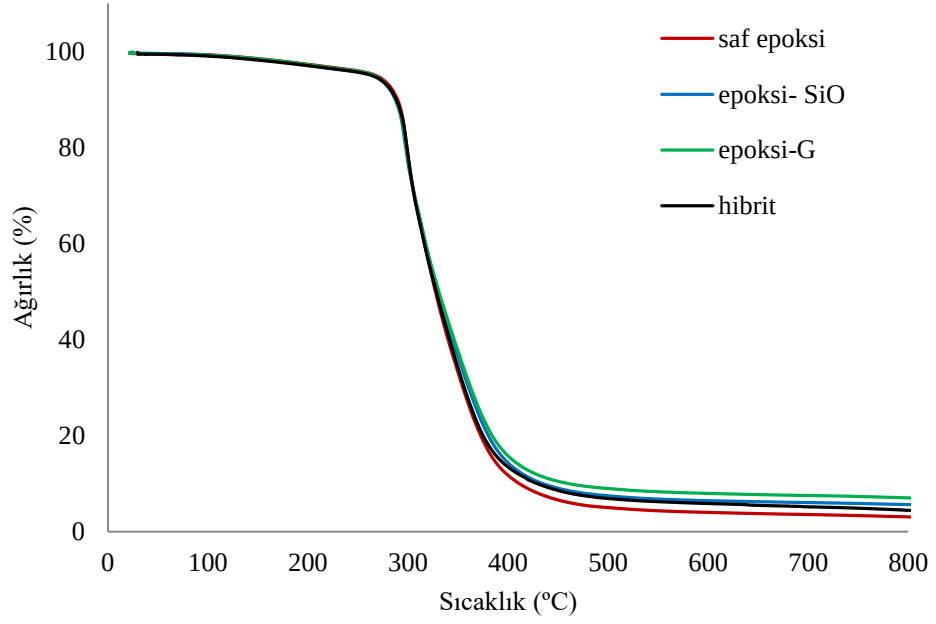
Kaplama ve nanopartikül arasındaki etkileşimi ve oluşan kimyasal grupları belirlemek için yapılan FTIR analizinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir. Piklerde oluşan kaymalar, epoksi ile nanopartiküller arasında etkileşimin varlığını göstermekle birlikte, spektrum üzerinde yeni piklerin oluşmaması kimyasal bir etkileşimden daha çok fiziksel bir etkileşim olduğunu göstermektedir (Dhoke ve Khanna, 2009; Barletta vd., 2016).



Şekil 4.2. Kaplamalara ait FTIR spektrumları.

4.3 TGA Sonuçları

Termogravimetrik analiz numunelerin sıcaklık arttıkça fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri belirlemek için yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Katılan nanopartiküllerinepoksi kaplamanın termal davranışını çok fazla etkilemediği anlaşılmıştır. % 50 ağırlık kaybının olduğu sıcaklık değerlerinde bir miktar artış olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, organik ve inorganik yapılar arasındaki etkileşimin termal kararlılığı geliştirebildiğini göstermektedir (Kahraman vd., 2006). Benzer etki 800 °C'de kalan malzeme miktarlarında da gözlenmiş ve saf epoksida % 3,08, nanosilika katılan numunede % 5,65, grafen katılan numunede % 7,04 ve hibrit numunede % 4,46 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, artan malzeme miktarının kaplamanın alev direncinin göstergesi olduğu yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir (Kahraman vd., 2006).



Şekil 4.3. Kaplamalara ait TGA eğrileri.

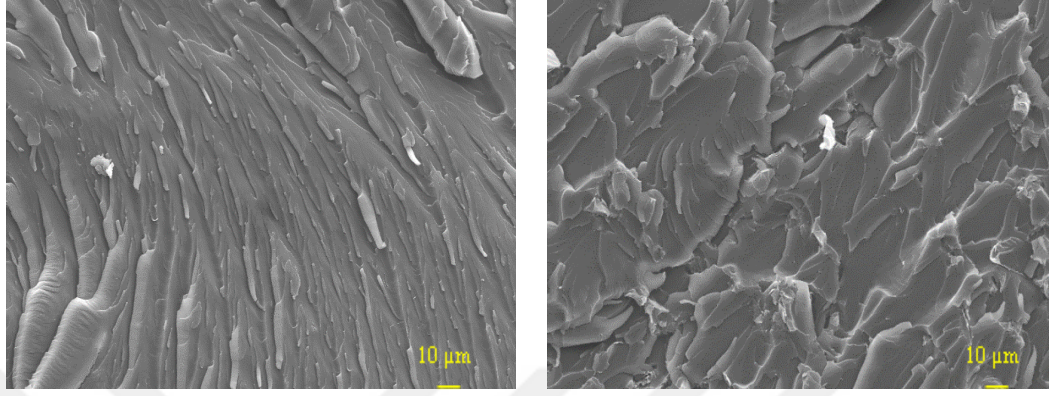
Çizelge 4.4. Kaplama numunelerinin TGA sonuçları.

Numune kodu	% 50 (°C)	800 °C'de kalan malzeme miktarı (%)
SE	327	3,08
SiE	329	5,65
GE	330	7,04
HE	328	4,46

4.4 SEM Analizi Sonuçları

Nanopartiküllerin epoksi matris içindeki dağılımı ve arayüzey etkileşimi, nanopartikül takviyeli epoksi kaplamaların performansını etkileyen iki önemli faktördür. Güçlü bir arayüzeyin ve iyi bir dağılımın, kompozit kaplamaların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır (Naebe vd., 2013). Şekil 4.4.a'da verilen SEM görüntüsünde, saf epoksi kaplamanın gevrek yapısını ve zayıf darbe dayanımını yansıtan rastgele dağılmış çatlaklar görülmektedir. Nanopartikül katılan kaplamaların, Şekil 4.4.b'de görüldüğü gibi pürüzlü bir kırılma yüzeyine sahip olduğu görülmekte, bu durumun çatlak yayılmasını geciktirilebileceğini ve böylece

kırılma için daha fazla enerjinin gerekli olacağını düşündürmektedir. Bu karakteristik morfoloji, ayrıca bu numunedeki darbe dayanımındaki artışa da işaret etmektedir (Jiang vd., 2013).

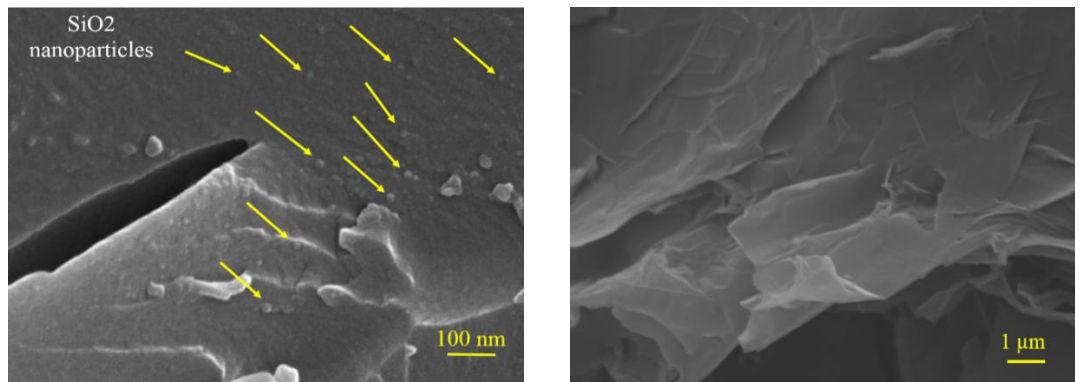


(a)

(b)

Şekil 4.4. Saf epoksi (a) ve % 0,1 grafen katılan epoksi (b) kaplamaya ait SEM görüntüleri.

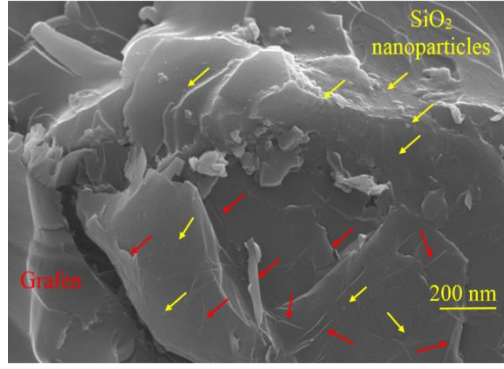
SEM analizi aynı zamanda, grafen ve silika nanoparçacıkların epoksi matrisindeki dağılımının homojen olduğunu da göstermiştir (Şekil 4.5). Silikanın partikül büyüklüğü çok küçük olmasına rağmen, modifiye edilmiş nanosilika kullanılması nedeniyle aglomerasyon gözlenmemiştir.



(a)

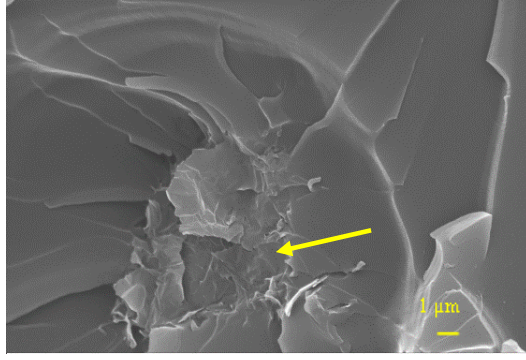
(b)

Şekil 4.5. Silika (a), grafen (b) ve silika-grafen (c) dağılımını gösteren SEM görüntüleri.

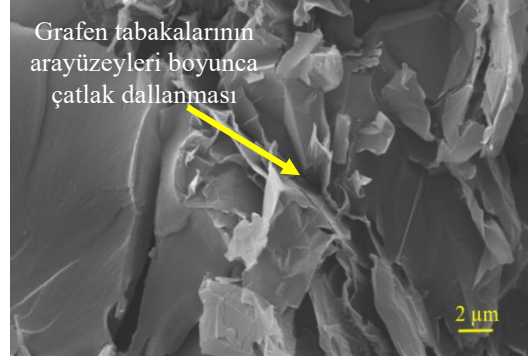


Şekil 4.5 (devam). Silica (a), grafen (b) ve silica-grafen (c) dağılımını gösteren SEM görüntüleri.

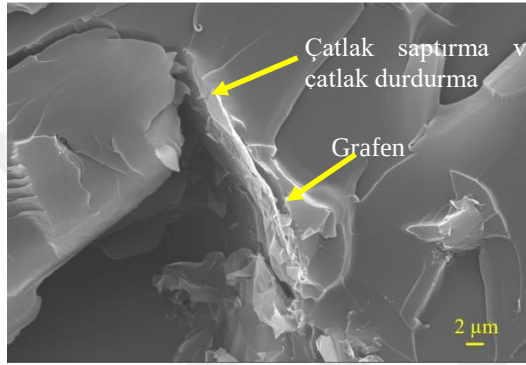
GNP/epoksi kompozit kaplamaların SEM görüntülerinde, ortasında grafenlerin bulunduğu (sarı ok ile gösterilmiştir), çukura benzeyen yapıların varlığını görülmektedir (Şekil 4.6.a). Hasar sürecinde, GNP'ler çok sayıda mikro çatlaklar oluşturarak kırılma enerjisini tüketebilmektedir. Çatlakyayılmasında nanopartiküllerin oluşturduğu farklı etkiler grafen katılan epoksi matrisin SEM görüntülerinde görülmektedir, bunlar arasında; grafen tabakaları arayüzeyleri boyunca çatlak dallanması (Şekil 4.6.b), GNP'lerin geniş yüzey alanları sayesinde oluşan çatlak sapması veya çatlakın durdurulması (4.6.c) ve GNP'ler kırılma enerjisini etkin bir şekilde dağıttığında oluşan çatlak köprüleme (Şekil 4.6.d) sayılabilir. Benzer gözlem ve sonuçlar başka araştırmacılar tarafından da bildirilmiştir (Silvestre vd., 2015; Wua vd., 2015).



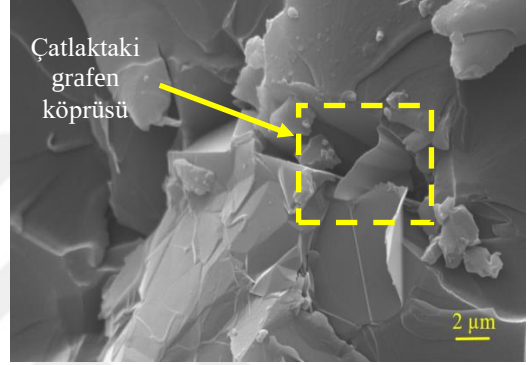
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.6. Farklı çatlak yayılım mekanizmalarını gösteren SEM görüntüleri: mikroçatlaklar (a), çatlak dallanması (b), çatlak sapması ve çatlak durdurma (c), (d) çatlak köprüleme.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, SiO₂ (ağ. %1), grafen (ağ.% 0,1) ve hibrit (SiO₂-GNP) (ağ. % 1 + 0,1) nanopartiküllerin epoksi reçineye katılarak çelik malzeme üzerine yapılan kaplama uygulamalarında özellikleri nasıl etkiledikleri ele alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Kaplamanın yüzeye yapışma durumunu belirlemek için yapılan kafes çizgi testi sonucunda, tüm numunelerde yüzeyden herhangi bir kalkma olmadığı, altlıkla yeterli adezyonun sağlandığı gözlenmiştir.
- Kaplama filminin esnekliğini belirlemek için yapılan konik bükme ve çökertme testleri sonucunda en yüksek elastik özellikler grafenle güçlendirilen numunelerde elde edilmiştir. Grafen nanopartikül eklenen epoksi kaplamada, kaplamanın esnekliği nanopartikül katılmamış epoksiye göre çökertme deneyi sonuçlarına göre % 8,3 oranında artmıştır.
- Kaplamanın, üzerine gelen ani kuvvetlere karşı gösterdiği direnci belirlemek için yapılan darbe testi sonucunda, grafenle güçlendirilen epoksi kaplama diğer numuneler içinde en yüksek darbe direncini göstermiştir. Bu numunede darbe direncindeki artış nanopartikül katılmamış epoksiye göre % 157,1 oranında olmuştur.
- Grafenle güçlendirilen numunelerde; grafenin iki boyutlu ve tabakalı yapısı yükleme sırasında farklı yönlerde deformasyona izin verdiği için epoksi kompozit kaplamanın yüksek esneklik göstermesini sağlamıştır.
- Kaplamaların sertliği iki ayrı yöntemle ölçülmüştür. Pendulum sertlik ölçme yöntemi ile yapılan ölçümde, nanosilika katılan numunelerde en yüksek sertlik elde edilirken, mikro sertlik ölçümlerinde en yüksek sertlik değeri hibrit nanopartikül (GNP ve SiO₂) eklenen numunelerde elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardaki bu farklılık; yüzeyde deformasyona veya hasara neden olan dış kuvvetlerin çeşitleri ve mekanizmalarının yöntemlere göre değişmesinden kaynaklanmıştır. Ayrıca, değişimin derecesi, ölçüm yapılan alanın büyüklüğü ve ölçüm sırasında matris veya nanopartikülle temasa bağlı olarak etkilenmiştir.

- Epoksi reçineye hibrid nanopartiküllerin katılmasıyla, mikrosertlik ve çizilme direncinde elde edilen artışın, SiO₂ ve GNP'lerin birbirlerinin etkilerini güçlendirici davranışlarının bir sonucu olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, bu çalışmada olduğu gibi, iki boyutlu grafen ve küresel silika kullanılmasıyla sağlanan farklı geometrilerin etkileşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- FTIR analizi sonucunda, yeni kimyasal grupların oluşmadığı, sadece piklerde epoksi ile nanopartiküller etkileştiği için hafif bir kaymanın olduğu gözlenmiştir. Epoksi matrise nanopartiküllerin katılmasıyla organik ve inorganik yapılar arasındaki etkileşime bağlı olarak termal kararlılık biraz iyileşmiş ancak, genel olarak termal özelliklerde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.
- SEM incelemelerinde, nanopartiküllerin epoksi matriste homojen dağılımları gözlenmiştir. Ayrıca grafenin yapısal özelliklerinden dolayı, çatlak yayılmasında oluşturduğu farklı etkiler açıkça görülmüştür. Elde edilen sonuçlar mekanik testlerden elde edilen sonuçları desteklemektedir.
- Sonuç olarak, epoksi reçineye nanopartiküllerin eklenmesinin, epoksi kaplamaların mekanik özelliklerini geliştirmek için etkili bir yöntem olabileceği gösterilmiştir. Grafen ile güçlendirilmiş epoksi kaplamaların daha yüksek elastikiyet ve darbe direncine sahip olduğu, silika ve hibrit nanopartiküller ile güçlendirilmiş epoksi kaplamaların daha yüksek sertlik ve çizilme direncine sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, nanopartikülle güçlendirilen epoksi kaplamaların mekanik zorlamalara maruz kalan uygulamalarda kullanılabileceği öngörülmektedir.

5.2 Öneriler

Yapılan tez çalışması sonucunda bu konuda yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler getirilebilir:

- Hibrit nanopartikül etkisini görmek için katılan nanopartikül miktarı, bu çalışmada olduğu gibi ayrı ayrı katılan nanopartiküllerin miktarlarının toplamı olarak değil, onlarla eşit miktarda katılarak çalışmalar yapılabilir. Böylece aynı oranda katılması durumunda, bu çalışmada özellikle sertlikte

meydana gelen artışın katılan nanopartikül miktarının artışıyla mı hibrit etkiyle mi oluştuğu yorumlanabilir.

- Epoksi kaplamalara grafenin güçlendirici olarak katılmasının kaplama özelliklerinde önemli gelişmeler sağladığı görülmüştür, bu nedenle, grafenin reçine içindeki oranının optimum değerini bulmak için, kullanım miktarının aralıklarını çok küçük tutarak çalışmalar yapılabilir. Bu hem optimum miktarı bulmak hem de maliyet açısından yol gösterici olacaktır.
- Üretilen kaplama malzemelerinin ısııl özellikleri ve kürleme kinetiklerinin mekanik özellikler üzerine etkisi incelenebilir.
- Kaplama özellikleri incelenirken tek bir kalınlık üzerinde bu incelemeler yapılmıştır, kaplama kalınlığının mekanik özelliklerin iyileştirilmesindeki rolünü araştırmak için farklı kaplama kalınlıkları araştırılabilir. Nanopartikül türü ve miktarı ile kaplama kalınlığı arasındaki ilişki incelenebilir.
- Deformasyon kabiliyeti farklı altlık malzemeleri kullanılarak, kaplamanın elastikiyeti bu koşullarda test edilebilir.
- Otomotiv sektöründe kullanılan birden çok katlı boya sistemine bir alternatif geliştirmek için, istenilen tüm fonksiyonları yerine getirmek şartıyla, tek katlı boya sistemi için çalışma yapılabilir. Bu amaçla, yapılan testlere, özellikle korozyon testleri eklenebilir. Hem boya kalınlığı düşürülebilir hem de kat üstü kat boya atma tekniği değiştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Avella M., Errico M.E., Martelli S. ve Martuscelli E., 2001. Preparation methodologies of polymer matrix nanocomposites, *Applied Organometallic Chemistry*, 15, 434-439.
- Barletta, M., Vesco, S., Puopolo, M. ve Tagliaferri, V., 2015. High performance composite coatings on plastics: UV-curable cycloaliphatic epoxy resins reinforced by graphene or graphene derivatives, *Surface & Coatings Technology*, 272, 322–336.
- Barletta, M., Vesco, S., Puopolo, M. ve Tagliaferri, V., 2016. Graphene reinforced UV-curable epoxy resins: Design, manufacture and material performance, *Progress Organic Coatings*, 90, 414–424.
- Bastani, S. ve Darani, M.K., 2015. Ch. 8. Graphene-based UV-curable nanocomposite coatings, Milne, W.I., Cole, M., *Carbon Nanotechnology*, One Central Press, Cheshire, UK.
- Bayer, G.T. ve Zamanzadeh M., 2004. Failure analysis of paints and coatings, Published Internally By Matco Associates, 331.
- Becker, O., Varley, R. ve Simon, G., 2002. Morphology, thermal relaxations and mechanical properties of layered silicate nanocomposites based upon high-functionality epoxy resins, *Polymer*, 43, 4365–4373.
- Behzadnasab, M., Mirabedini, S.M., Kabiri, K. ve Jamali S., 2011. Corrosion performance of epoxy coatings containing silane treated ZrO₂ nanoparticles on mild steel in 3.5% NaCl solution, *Corrosion Science*, 53, 89-98.
- Bensalah, W., Loukil, N., De-Petris Wery, M., ve Ayedi, H. F., 2014. Assessment of Automotive Coatings Used on Different Metallic Substrates, *International Journal of Corrosion*, Article ID 838054, 12 pages.
- Bouibeda, 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*, DOI:10.1080/01694243.2019.1571660.
- 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.
- Chen, C., Qiu, S., Cui, M., Qin, S., Yan, G., Zhao, H., Wang, L. ve Xue, Q., 2017. Achieving high performance corrosion and wear resistant epoxy coatings via incorporation of noncovalent functionalized graphene, *Carbon*, 114, 356–366.
- Conradi, M., Intihar, G. ve Milena Zorko, M., 2015. Mechanical and wetting properties of nanosilica/epoxy-coated stainless steel, *MTAEC'9*, 49, 613.

- Dhoke S.K. ve Khanna A.S., 2009. Electrochemical behavior of nano-iron oxide modified alkyd based waterborne coatings, *Materials Chemistry and Physics*, 117, 550–556.
- Dong, R. ve Liu, L., 2016. Preparation and properties of acrylic resin coating modified by functional graphene oxide, *Applied Surface Science*, 368, 378–387.
- Fernando R.H., 2009. Nanocomposite and Nanostructured Coatings:Recent Advancements In Nanotechnology Applications in Coatings; ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington DC, 1008,1,2-21.
- Fischer-Cripps A.C., 2009. IBIS Handbook Of Nanoindentation Book, Fischer-Cripps Laboratories Pty Ltd.
- Ghanbari, A. ve Attar, M.M., 2015. A study on the anticorrosion performance of epoxy nanocomposite coatings containing epoxy-silane treated nano-silica on mild steel substrate, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23, 145–153.
- Ghasemi-Kahrizsangi, A., Neshati, J., Shariatpanahi, H. ve Akbarinezhad, E., 2015. Improving the UV Degradation Resistance of Epoxy Coatings Using Modified Carbon Black Nanoparticles, *Progress in Organic Coatings*, 85, 199–207.
- Haeri, S.Z., Ramezanzadeh, B. ve Asghari, M., 2017. A novel fabrication of a high performance SiO₂-graphene oxide (GO) nanohybrids: Characterization of thermal properties of epoxy nanocomposites filled with SiO₂–GO nanohybrids, *Journal of Colloid Interface Science*, 493, 111–122.
- Isın D., Kayaman-Apohan N. ve Gungor A.,2009. Preparation and characterization of UV-curable epoxy/silica nanocomposite coatings, *Progress in Organic Coatings*, 65, 477–483.
- Jiang, T., Kuila, Y., Kim, N.H., Ku, B.C. ve Lee, J.H., 2013. Enhanced mechanical properties of silanized silica nanoparticle attached graphene oxide/epoxy composites, *Composites Science Technology*, 79, 115–125.
- Kahraman, M.V., Kuğu, M., Menciloglu, Y., Kayaman-Apohan, N. ve Gungor, A., 2006. The novel use of organo alkoxy silane for the synthesis of organic–inorganic hybrid coatings, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 21-22, 2143–2151.
- Kotnarowska, D. ve Przerwa, M., 2013. Assessment of the Erosive Wear Kinetics of Epoxy Coatings Modified with Nanofillers, *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 3, 89-93.
- Kotnarowska, D., 2008. Influence of mechanical factors on surface state of acrylic coatings with nanofillers, *Materials Science*, 14, 337–340.

- Kotnarowska, D., Przerwa, M., ve Szumiata, T., 2014. Resistance to erosive wear of epoxy-polyurethane coating modified with nanofillers, *Journal of Materials Science Research*, 3, 2.
- Leder, G., Ladwig, T., Valter, V., Frahn, S., ve Meyer, J., 2002. New effects of fumed silica in modern coatings, *Progress in Organic Coatings*, 45, 139-144.
- Liu, S., Gu, L., Zhao, H., Chen, J. ve Yu, H., 2016. Corrosion Resistance of Graphene-Reinforced Waterborne Epoxy Coatings, *Journal of Materials Science & Technology*, 32, 425-431.
- Ma, P.C., Kim, J.K. ve Tang B.Z., 2006. Functionalization of carbon nanotubes using asilane coupling agent, *Carbon*, 44, 3232-3238.
- Ma, Y., Di, H., Yu, Z., Liang, L., Lv, L., Pan, Y., Zhang, Y. ve Yin, D., 2016. Fabrication of silica-decorated graphene oxide nanohybrids and the properties of composite epoxy coatings research, *Applied Surface Science*, 360, 936-945.
- Maitra, U., Prasad, K. E., Ramamurty, U. ve Rao, C. N. RÇ., 2009. Mechanical Properties of Nanodiamond-Reinforced Polymer-Matrix Composites, *Solid State Communications*, 149, 1693-1697.
- Martin-Gallego, M., Verdejo, R., Lopez-Manchado, M.A. ve Sangermano, M., 2011. Epoxy-Graphene UV-cured nanocomposites, *Polymer*, 52, 4664-4669.
- Mathiazhagan, A., ve Joseph, R., 2011. Nanotechnology-a New prospective in organic coating-review, *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2 (4), 225-237.
- Monetta, T., Acquesta A. ve Bellucci, F., 2015. Graphene/Epoxy Coating as Multifunctional Material for Aircraft Structures, *Aerospace*, 2, 423-434.
- Naebe, M., Sandlin, J., Crouch, I. ve Fox, B., 2013. Novel Polymer-Ceramic Composites for Protection Against Ballistic Fragments, *Polymer Composites*, 34, 180-186.
- Naganuma, T. ve Kagawa, Y., 2002. Effect of particle size on the optically transparent nano meter-order glass particle-dispersed epoxy matrix composites, *Composites Science and Technology*, 62, 1187.
- Ng, C.B., Schadler, L.S. ve Siegel, R.W., 1999. Synthesis and mechanical properties of TiO₂-epoxy nanocomposites, *Nanostructured Materials*, 12, 507-510.
- Paksoy, A.K., 2008. Çelik yapıların, atmosferik korozyona karşı korunmasında epoksi bazlı boya ve kaplamaların kullanımı ve performansı, *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Perera, D.Y., 2004. Effect of pigmentation on organic coating characteristics. Review. *Progress in Organic Coatings*, 50, 247-262.

- Pourhashem, S., Vaezi, M.R., Rashidi, A. ve Bagherzadeh, M.R., 2017. Exploring corrosion protection properties of solvent based epoxy-graphene oxide nanocomposite coatings on mild steel, *Corrosion Science*, 115, 78–92.
- Presting, H. ve König. U., 2003. Future nanotechnology developments for automotive applications, *Materials Science Engineering C* 23, 6-8, 737–741.
- Ramezanzadeh, B. ve Mohseni, M., 2012. Preparation of sol–gel based nano-structured hybrid coatings: effects of combined precursor's mixtures on coatings morphological and mechanical properties, *Journal Sol-Gel Science Technology*, 64, 232–244.
- Ramezanzadeh, B. ve Attar, M.M., 2011. Characterization of the fracture behavior and viscoelastic properties of epoxy polyamide coating reinforced with nanometer and micrometer sized ZnO particles, *Progress Organic Coatings*, 71, 242–249.
- Ramezanzadeh, B., Moradian, S., Tahmasebi, N. ve Khosravi, A., 2011. Studying the role of polysiloxane additives and nano-SiO₂ on the mechanical properties of a typical acrylic/melamine clearcoat, *Progress in Organic Coatings*, 72, 4, 621-631.
- Ribeiro, T., Baleizão, C. ve Farinha J.P.S., 2014. Functional Films from Silica/Polymer Nanoparticles, *Materials*, 7, 3881-3900
- Rong M.Z., Zhang M.Q., Liu H., Zeng H.M., Wetzel B. ve Friedrich K., 2001. Microstructure and tribological behavior of polymeric nanocomposites, *Industrial Lubrication and Tribology*, 53, 2, 72-79.
- Sajjadi S. A., Avazkonandeh-Gharavol M. H., Zebarjad S. M., Mohammadtaheri M., Abbasi M. ve Mossaddegh K., 2013. A comparative study on the effect of type of reinforcement on the scratch behavior of a polyacrylic-based nanocomposite Coating, *Journal Coatings Technology and Research*, 10(2), 255–261.
- Sangermano, M., Malucelli, G., Amerio, E., Priola, A., Billi, E. ve Rizza, G., 2005. Photopolymerization of epoxy coatings containing silica nanoparticles, *Progress in Organic Coating*, 2005, 54, 134–138.
- Sangermano, M., Messori, M., Martin Galleco, M., Rizza ve Gvw Voit, B., 2009. Scratch resistant tough nanocomposite epoxy coatings based on hyperbranched polyesters, *Polymer*, 50, 5647–5652.
- Shi, G., Zhang, M.Q. ve Rong, M.Z., 2004. Wetzel B. and Friedrich K., Sliding wear behavior of epoxy containing nano-Al₂O₃ particles with different pretreatments, *Wear*, 256, 1072-1081.
- Shi, X., Nguyen, T.A., 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.

- Shishevan, F.A., Acar, V., Akbulut, H. ve Seydibeyoğlu, M.Ö., 2015. Reçinesine Grafen ve Karbon Nanotüp Eklenmesinin Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Darbe Davranışları Üzerindeki Etkileri, Mühendislikte Yeni Teknolojiler Sempozyumu, 10-23
- Shokrieh, M.M., Hosseinkhani, M.R., Naimi-Jamal, M.R. ve Tourani, H., 2013. Nanoindentation and nanoscratch investigations on graphene-based nanocomposites, *Polymer Testing*, 32, 45–51.
- Silvestre, J., Silvestre, N. ve de Brito, J., 2015. An Overview on the Improvement of Mechanical Properties of Ceramics Nanocomposites, *Journal of Nanomaterials*, 2015, 106494.
- Song, H.J., Zhang, Z.Z. ve Men, X.H., 2007. Surface-modified carbon nanotubes and the effect of their addition on the tribological behavior of a polyurethane coating, *European Polymer Journal*, 43, 4092-4102.
- Spirkova, M., Slouf, M., Blahova, O., Farkacova, T. ve Benesova, J., 2006. Submicrometer Characterization of Surfaces of Epoxy-based Organic–Inorganic Nanocomposite Coatings. A Comparison of AFM Study with Currently Used Testing Techniques, *Journal Applied Polymer Science*, 102, 5763–5774.
- Şahmetlioğlu, E., 2000. Epoksi reçinelerinin üretimi bağlayıcı ve yapıştırıcı olarak kullanımının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Şen, E., 2003. Water dispersed epoxy resin for surface coatings, Master Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.
- TabkhPaz, M., Park, D.Y., Lee, P.C., Hugo, R. ve Park, S.S., 2018. Development of nanocomposite coatings with improved mechanical, thermal and corrosion protection properties, *Journal of Composite Materials*, 52 (8), 1045-1060.
- Tahmassebi N., Moradian S., Ramezanzadeh B., Khosravi A. and Behdad S., 2010. Effect of addition of hydrophobic nano silica on viscoelastic properties and scratch resistance of an acrylic/melamineautomotive clearcoat, *Tribology International*, 43, 685–693.
- Tiwari, A., 2012. Nanomechanical Analysis of Hybrid Silicones and Hybrid Epoxy Coatings, *Advances in Chemical Engineering and Science-A Brief Review*, 2, 34-44.
- Tong, Y., Bohmb, S. ve Song, M., 2013. Graphene based materials and their composites as coatings, *Austin J Nanomedicine Nanotechnology*, 1(1), 1003.
- TS EN ISO 2409, 2013. Boyalar ve vernikler - çapraz kesme deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN ISO 6272-1, 2011. Boyalar ve vernikler - hızlı şekil bozulması (darbeye direnç) deneyleri - bölüm 1: ağırlık düşürme deneyi, büyük alanlı iz çıkarıcı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Velasco-Santos, C., Martínez-Hernández A.L. ve Castaño V.M., 2011. Carbon Nanotubes – Polymer Nanocomposites. Edited by Siva Yellampalli. Published by InTech, Croatia.

Wang, H., Bai, Y., Liu, S., Wu, J., ve Wong, C. P., 2002. Combined effects of silica filler and its interface in epoxy resin. *Acta Materialia*, 50, 4369-4377.

Wassink, J., 2007. No more scratching, *Delft Outlook*, 7, 4, 16-19.

Wetzel, B., Hauptert, F. ve Zhang M.Q., 2003. Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance, *Composites Science and Technology*, 63, 2055-2067.

Wua, S., Ladani, R.B., Zhang, J., Bafekrpour, E., Ghorbani, K., Mouritz, A.P., Kinloch, A.J. ve Wang, C.H., 2015. Aligning multilayer graphene flakes with an external electric field to improve multifunctional properties of epoxy nanocomposites, *Carbon*, 94, 607–618.

Yang, S. Y., Lin, W. N. ve Huang, Y. L., 2011. Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites, *Carbon*, 793–803.

Yu, Z., Di, H., Ma, Y., Lv, L., Pan, Y., Zhang, C. ve He, Y., 2015. Fabrication of graphene oxide–alumina hybrids to reinforce the anti-corrosion performance of composite epoxy coatings, *Applied Surface Science*, 351, 986–996.

Zhang, M.Q., Rong, M.Z., Yu, S.L., Wetzel, B. ve Friedrcih, K., 2002. Improvement of the tribological performance of epoxy by the addition of irradiation grafted nano-inorganic particles, *Macromolecular Materials Engineering*, 287, 111–115.

Zhang, Z., Zhang, W., Li, D., Sun, Y., Wang, Z., Hou, C., Chen, L., Cao, Y. ve Liu, Y., 2015. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method, *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 2239-2251.

URL-1<<http://www.pslc.ws/mactest/epoxy.com>>, Erişim tarihi: 30.03.2019.

URL-2<<https://www.elcometer.com/en/physical-test-equipment/hardness-scratch/elcometer-3045-persoz-konig-pendulum-hardness-tester.html>>, Erişim tarihi: 29.03.2019.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ümit Esra Özcan

Doğum Tarihi ve Yeri : 28.11.1980 / Konya

E-Posta Adresi : esra980@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans :Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü -2006

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı - 2019

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR

1. Ozcan, U.E., Karabork, F., Yazman, S., Akdemir, A., 2019. Effect of Silica/Graphene Nanohybrid Particles on the Mechanical Properties of Epoxy Coatings, Arabian Journal for Science and Engineering, <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03724-x> (SCI makale)
2. Karabörk, F., Akdemir, A., Özcan, Ü.E., 2016. Araç boyalarına nano partikül katılması ve boya özelliklerine etkilerinin araştırılması. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016) Çukurova University, October 26-28, 2016, Adana / TURKEY Pages: 3950-3959, Paper ID:1080 (Sözlü sunum)