



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÇİNKO NANOPARTİKÜL KATKISININ
EPOKSİ NANOKOMPOZİTİN MEKANİK VE
AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK YÜZEYLERDE
ANTİKOROZİF ÖZELLİKLERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

MERVE APŞAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Haziran-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Merve APŞAK tarafından hazırlanan “Çinko Nanopartikül Katkısının Epoksi Nanokompozitin Mekanik ve AISI 304 Paslanmaz Çelik Yüzeylerde Antikorozyon Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 17/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU

.....

Danışman

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM

.....

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 191316001 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Merve APŞAK

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİNKO NANOPARTİKÜL KATKISININ EPOKSİ NANOKOMPOZİTİN MEKANİK VE AISI 304 PASLANMAZ ÇELİK YÜZEYLERDE ANTİKOROZİF ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Merve APŞAK

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Akdemir

2019, 95 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM

Boya ve kaplamalardan korozyon dirençlerinin ve mekanik özelliklerinin iyi olması beklenmektedir. Bu tez çalışmasının amacı astar boya katında hem güçlü korozyon koruması sağlamak hem de güçlü mekanik özellikler elde edebilmektir. Tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Aşamalar aşağıda açıklanmıştır.

İlk olarak seçilen epoksi reçineye ağırlıkça farklı oranlarda (% 0.5, 1.0, 1.5) nanopartikül halinde Zn nanopartikül eklenerek nanokompozitler elde edilmiştir. Elde edilen nanokompozitler ve kontrol numunesi olarak saf epoksi reçinenin statik yük altındaki hasar görmeden maksimum çekme kuvvetini belirlemek için ASTM D638 çekme test standardına göre numunelere çekme testi uygulanmıştır. Post kür uygulamasının epoksi nanokompozitler üzerindeki etkilerini incelemek için çekme testleri post kür fırınına girmemiş numunelere de uygulanmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre post kür uygulamasının olduğu numunelerde saf epoksiye göre % 13.23 artış ile ağırlıkça %1 Zn içeren kompozit ve post kür uygulanmamış numunelerde ise saf epoksiye göre %90.22 artış ile ağırlıkça %0.5 Zn içeren epoksi kompozit en yüksek çekme mukavemeti açısından en iyi sonuçları vermiştir. Kompozitlerin termal özellikleri DSC TGA testleri ile incelenmiş ve bağ yapıları FTIR ile analiz edilmiştir. Yorumlamalar için SEM görüntüleri kullanılmıştır.

İkinci aşama olarak aynı parametreler ile hazırlanan nanokompozitler 60 mikron kalınlıkta AISI 304 saclar üzerine kaplanmıştır. Hazırlanan kaplamaların antikorozif özelliklerini gözlemlemek için kaplamalar ağırlıkça %10'luk HCI asit çözeltisi içerisinde 300 saat korozyon testine tabi tutulmuştur. Korozyon test sonuçlarına göre kaplanan paslanmaz çelik yüzeyi ağırlıkça %1 Zn nanopartikül içeren epoksi kompozitin en iyi oranda koruduğu gözlemlenmiştir. Kaplamanın çatlama-darbe direncini ölçmek için ASTM D 2794 standardına göre darbe testi uygulanmış ve ağırlıkça %1.5 Zn nanopartikül içeren numune ancak 90 cm yükseklikten gelen ağırlıkta çatlama göstererek en yüksek darbe direncini göstermiştir. Ayrıca kaplamalara ASTM D4145 standardına göre bükme testi de uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Epoksi Reçine, Zn Nanopartikül, Hasar Analizi, Kaplama, Korozyon,

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ZINC NANOPARTICLE ADDITIVE ON THE MECHANICAL AND AISI 304 STAINLESS STEEL SURFACES ANTICORROSIVE PROPERTIES OF EPOXY NANOCOMPOSITE

Merve APŞAK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

2019, 95 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Asst. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

Corrosion resistance and mechanical properties are expected to be good from paints and coatings. The aim of this thesis is to provide both strong corrosion protection and strong mechanical properties in the primer coat. This study consists of two stages. The stages are described below.

Nanocomposites were obtained by adding Zn nanoparticles in different amounts (0.5, 1.0, 1.5%) by weight to the selected epoxy resin. Tensile test was carried out according to ASTM D638 tensile test standard to determine the maximum tensile strength of the nano composites obtained and the pure epoxy resin as the control sample without being damaged under the static load. Tensile tests were also applied to samples that had not been applied to the postcure to examine the effects of the postcure on epoxy composites. 1% by weight of Zn nanoparticle with 13.23% increase compared to pure epoxy in the samples with postcure application and epoxy nanocomposite containing 0.5% Zn in weight with 90.22% increase compared to pure epoxy from non postcure samples shows best results in terms of highest tensile strength. DSC TGA analysis was used to analyze the thermal properties of composites and bond characterizations were analyzed by FTIR. The damage surfaces of the nanocomposites were examined by SEM and the effect of particle addition on fracture behavior was also investigated.

The nanocomposites prepared with the same parameters for the second stage are coated on 60 micron thickness AISI 304 plates. In order to observe the anticorrosive properties of the prepared coatings, the coatings were subjected to 300 hours of corrosion testing in 10% HCl acid solution. According to the corrosion test results, it was observed that the coated stainless steel surface preserves the best rate of 1% Zn nanoparticle containing epoxy composite. In order to measure the cracking-impact resistance of the coating, impact test was performed according to ASTM D 2794 standard and the sample containing 1.5% Zn nanoparticle by weight showed the highest impact resistance by cracking at a height of 90 cm. In addition, the bending test was applied to the coatings according to ASTM D4145 standard.

Keywords: Epoxy Resin, Zn Nanoparticle, Damage Analysis, Coating, Corrosion

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez sürecim boyunca bana hep destek olan, çalışmalarımın tüm aşamalarında benimle yakından ilgilenen, derin bilgi birikimi, tecrübe ve deneyimlerini benimle paylaşarak yol göstericim olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca deneysel çalışmalarımın her aşamasında bizzat yanımda olan, desteğini hep aldığım ve çözemediğim noktaların çözülmesinde yardımını hiç esirgemeyen Dr. Öğr. Görevlisi Şakir YAZMAN'a ve çalışmamın başlangıcında sunduğu yardımları ile birlikte tezimi bitirmemde sağladığı çok değerli ve önemli destekleri için Yrd. Doç. Dr. Fazliye KARABÖRK'e en içten teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim. Ayrıca ihtiyacım olduğunda yönlendirme ve yardımları ile bana destek oldukları için Prof. Dr. Mesut UYANER ve Dr. Öğr. Üyesi Lokman GEMİ'ye teşekkür ederim.

Tüm öğretim hayatım boyunca hep yanımda olan, bana inanan güvenen, maddi manevi desteğini esirgemeyen çok değerli babam Mustafa APŞAK, annem Selma APŞAK ve kardeşim Sefa APŞAK'a en içten, sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca lisans hayatımdan bu yana tanıdığım, en büyük destekçilerimden olan ve bana hep güvenen değerli arkadaşım Büşra ELBİR'e de gönülden teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamın tamamlanmasında 191316001 nolu proje ile yaptıkları maddi destekten ötürü Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne de teşekkürü borç bilirim.

Merve APŞAK

KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. NANOKOMPOZİT KAPLAMALAR VE KOROZYON	16
3.1. Nanokompozit Kaplamalar	16
3.1.1 Epoksi Nanokompozit Kaplamalar	17
3.2. Korozyon.....	19
3.2.1. Korozyon Mekanizması	20
3.2.2. Korozyon Türleri	22
4. KOROZYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ	29
4.1. Temel Korunma Yöntemleri	29
4.2. Kaplama ile Korozyondan Korunma	29
4.2.1 Metalik Kaplamalar	30
4.2.2 İnorganik Kaplamalar	32
4.2.3 Organik Kaplamalar	32
4.2.4 İletken Polimerle Kaplama	35
5. PASLANMAZ ÇELİKLER	36
5.1. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	37
5.1.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler	38
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
6.1. Malzeme Özellikleri	41
6.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Üretilmesi.....	42
6.2.1. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	45
6.2.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Karakterizasyonu	45

6.3. Epoksi/Nanopartikül Kaplama Uygulaması.....	45
6.3.1. Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	46
6.3.2. Kaplamanın Korozif Özelliklerinin Belirlenmesi.....	50
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	53
7.1. Zn Nanopartikül İlavesinin Nanokompozit Özelliklerine Etkisi.....	53
7.1.1 Nanopartikülün Kurlenme Üzerine Etkisi	53
7.1.2. Nanokompozitlerin Hasar Analizi	53
7.1.3. Nanokompozitlerin SEM Analizi	60
7.1.4. Nanokompozitin TGA Analizleri	68
7.1.5. Nanokompozitlerin DSC Analizleri.....	71
7.1.6. Nanokompozitin FT-IR Analizleri.....	73
7.2. Zn Nanopartiküllerin Kaplama Özelliklerine Etkisi	76
7.2.1. Kaplama Mekanik Özellikler.....	76
7.2.2 Kaplama Korozyon Testi	80
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
8.1 Sonuçlar	85
8.2. Öneriler	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ.....	96

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Z00	: Zn nanopartikül ilavesi yapılmamış saf epoksi (postkürü)
Z05	: Ağırlıkça %0,5 Zn nanopartikül ilavesi yapılmış epoksi (postkürü)
Z10	: Ağırlıkça %1,0 Zn nanopartikül ilavesi yapılmış epoksi (postkürü)
Z15	: Ağırlıkça %1,5 Zn nanopartikül ilavesi yapılmış epoksi (postkürü)
ZPY0	: Zn nanopartikül ilavesi yapılmamış saf epoksi (postkürsüz)
ZPY05	: Ağırlıkça %0,5 Zn nanopartikül ilavesi yapılmış epoksi (postkürsüz)
ZPY10	: Ağırlıkça %1,0 Zn nanopartikül ilavesi yapılmış epoksi (postkürsüz)
ZPY15	: Ağırlıkça %1,5 Zn nanopartikül ilavesi yapılmış epoksi (postkürsüz)
Zn	: Çinko
HCL	: Hidroklorik Asit

Kısaltmalar

DGEBA	: Diglisidil Eter Bisfenol A (Diglycidyl Ether of Bisphenol A)
TGA	: Termo Gravimetrik Analiz (Thermogravimetric Analysis)
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential Scanning Calorimetry)
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometre (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile her geçen gün daha yüksek mekanik ve anti-korozif özellikli malzeme ihtiyacı da artmış bulunmaktadır. Kompozit malzemeler çok eski çağlardan beri bilinmektedir ve kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra son yıllarda geliştirilen ileri kompozit malzemeler, malzeme uygulamalarında bir devrim meydana getirmiştir. Nano teknolojinin temeli, moleküler boyutta çalışarak, moleküler yapısı yenilenmiş büyük yapılar üretmektir. Malzemelerin nano boyuttaki özellikleri, aynı malzemenin makro boyuttaki özelliklerine göre değişiklik ve genellikle daha üstün özellikler göstermektedir. Kompozit malzemeler ile, uygun bileşenler ve üretim yöntemi seçildiğinde malzemedan istenen özellikler elde edilebilmektedir (Balasubramanian, 2013).

Nanokompozitler bir ya da iki bileşenden oluşan matris içinde dağılmış nano ölçekli boyutunda partiküller içeren malzemelerdir. Nanokompozitler üstün mekanik özellikler, elektriksel iletkenlik, geçirgenliği azaltma, yangın dayanımı, termal stabilite, kimyasal dayanım, yüzey görünümü gibi özellikler içermektedir. Literatürde nanopartiküllerin bir matris içerisinde dağılımını sağlayarak geliştirilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur (Chae & Kim, 2006; Halder, Prasad, Khan, Goyat, & Chauhan, 2017; Jumahat, Soutis, Abdullah, & Kasolang, 2012).

Metal ve alaşımları kararlı halleri, bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde buldukları ortamın elemanları ile tepkimeye girerek, önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrar ve bozulurlar. Sonuçta metal veya alaşımların fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliği istenmeyen değişikliklere uğramaktadırlar. Korozyon birbiri ile elektriksel ve elektrolitik teması olan ve aralarında potansiyel farkı oluşan iki metalik bölge veya nokta arasında meydana gelir. Bu bölge veya noktalardan potansiyel bakımından daha asil olanın yüzeyinde katodik reaksiyon meydana gelir, daha aktif olan diğer bölge veya nokta ise çözünür. Potansiyel farkının oluşum nedenleri arasında; metal veya alaşımların yapısal, kimyasal, mekanik veya ısı farklılıklar gösteren bölgeleri arasında potansiyel farkı oluşması, farklı iki metal veya alaşımların birbirine temas etmesi nedeniyle potansiyel

farkı oluşması, ortamın katodik olarak redüklenebilen bileşenlerinin, metalin değişik bölgelerinde farklı oranlarda bulunması potansiyel farkı oluşması bulunur.

Korozyon olayı endüstrinin her dalında kendini gösterir. Atmosfer şartlarına açık bulunan tanklar, depolar, direkler, korkuluklar, taşıt araçları, yeraltı boru hatları, betonarme demirleri, iskele ayakları, gemiler, fabrikalarda kimyasal madde doldurulan kaplar, borular, depolar ve birçok makine parçası korozyon olayı ile karşı karşıyadır. Bütün bu yapılar korozyon sebebiyle beklenenden daha kısa sürede işletme dışı kalmakta ve büyük ekonomik kayıplar meydana gelmektedir. Korozyon metalik malzemelerin uğradığı bir hasar, zarardır. Ekonomik açıdan tüm ülkelerin büyük maddi kayıplara uğramasına neden olmaktadır.

Metalleri korozyonda korumak henüz mümkün olmasada korozyonu yavaşlatmak için kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Metalleri korozyona karşı korumada geleneksel yöntem, boyama işleminden önce yapılan fosfatlama ve kromatlama işlemidir. Bu işlemler çevresel açıdan çok zararlı olup, çevre kirliliğine karşı yapılan uluslararası düzenlemelerce kısıtlanmaktadır. Bu işlemlerin başında kataforez kaplama tekniği gelir. Kataforez kaplama, diğer birçok kaplama prosesi ile karşılaştırıldığında (Sprey-Toz boyama, kaplama) kurulum maliyeti çok yüksektir ve kurulum aşaması oldukça zahmetlidir. Sistem yağ alma, aktivizasyon, pasivizasyon, fosfatlama, gibi birçok aşamadan oluşur ve bu kademeler için büyük bir tesis gerekmekte ve bu sistemin bakımı da oldukça zordur. Kataforez boyanın kaplama yapılmıyor olsa dahi 24 saat karıştırma işlemini sürdürmesi gerekmekte, bu da büyük bir enerji kaybına yol açmaktadır. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında korozyondan korunmak için son yıllarda alternatif daha pratik ve uygun maliyetli yöntemlere ilgi ve alaka artmıştır. Oksitlenebilecek metaller üzerine uygulanan polimerik kaplama işlemi daha pratik ve güçlü sonuçlar vermesi nedeni ile birçok alanda aktif kullanılmaya başlamıştır. Bu noktada önemli hususlardan biri yapılacak olan kaplama ile metali korozif etkilerden korurken yüzeyin mekanik özelliklerini de iyi bir seviyede tutabilmektir.

Son yıllarda birçok boya içerisine mikro ve nano boyutta çinko eklenerek boyanacak yüzey korozyondan korunmaya çalışılmaktadır (Kalendová, Veselý, Kohl, & Stejskal, 2015; Schaefer & Mischczyk, 2013). Aynı zamanda çinko iyonu kataforez gibi

birçok elektro kaplama prosesinin de vazgeçilmez metallereindir. Katalforez kaplama işlemine muadil olması amaçlanan bu çalışmada yüksek kurulum maliyeti isteyen aşamalar ortadan kaldırılarak maliyet ve enerjiden büyük ölçüde kazanç sağlanması hedeflenmektedir.

Çalışmada epoksi polimer reçine ve nano boyuttaki çinko partiküller kullanılarak kompozit yapı oluşturulacak dogbone numuneler hazırlanmış ve hazırlanan aynı yapı ile AISI 304 paslanmaz çelik saclar üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir.

İlk aşama olarak kaplama yapılacak olan kompozit yapının mekanik özellikleri incelenecektir. Buradaki amaç kaplanılacak malzemeyi sadece korozif etkilerden değil aynı zamanda mekanik olarak da koruması gerektiği içindir. Bu aşamada epoksi reçineye ağırlıkça farklı oranlarda (%0.5, 1, 1.5) nanoçinko partikülü eklenerek ASTM D638-14 standartlarına uygun dogbone çekme numuneleri üretilip çekme testleri yapılmıştır. Epoksi nanokompozitlerin mekanik özelliklerini incelemek için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu aşamada partikül etkisinin jelleşme süresi ve kırılma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiş, numunelerin bağ analizleri ve termal özellikleri yorumlanmıştır. Bunun yanı sıra postkür etkisinin nanokompozit malzemenin mekanik özelliklerini kontrol etmek ve nano partikül katkısının etkileri açıkça gözlemlemek için postkür uygulanmayan numunelerin mekanik özellikleri de aynı yöntemler ile test edilmiştir. Çekme testleri sonrası numunelerin hasar yüzeyleri taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) görüntülenmiş. Ek olarak kaplama malzemelerinin karakterizasyonu fourier dönüşümlü infrared spektrometre (FTIR), termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numunelerin bağ analizleri fourier dönüşümlü infrared spektrometre (F-TIR) ile araştırılmıştır.

İkinci aşama olarak aynı parametrelerle hazırlanan nanokompozitler ile (%0,5, 1, 1,5) numunelerle kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemine başlanmadan önce hazırlanan kaplama malzemesinin yüzeye daha iyi yapışmasını sağlamak amacı ile AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyler önce 400 grid ve daha sonra 1000 grid zımpara ile pürüzlendirilmiş ve aseton ile temizlenmiştir. Buradaki amaç sacların yüzeyine gereken pürüzlüğü vermek ve kaplamaya uygun hale getirmektedir. Literatürde birçok benzer

kaplama işlemi ıslak film aplikatörü ile uygulandığı için bu çalışmada da kaplama ıslak film aplikatörü ile yapılmıştır (M Behzadnasab, Esfandeh, Mirabedini, Zohuriaan-Mehr, & Farnood, 2014; Esfandeh, Mirabedini, Pazokifard, & Tari, 2007). Kaplamanın mekanik özelliklerini incelemek için bükme ve darbe testleri uygulanmış ve kaplamaların kalınlıkları ölçülmüştür. Korozyon testi için kaplama yapılmış numunelerin her biri ağırlıkça %10'luk HCl asit çözeltisi içerisinde daldırma yöntemi ile 300 saat korozyon testine tabii tutulmuştur. Numunelerin kaplanmış yüzeyleri korozyon testine hazırlık için ASTM-565 standardına uygun olarak 1mm genişliğinde karbür bıçak ile paslanmaz çelik etkilenecek şekilde çizik atılmış ve korozyon testi sonucunda çiziklerden kaplama altına geçen korozyon miktarları da yorumlamalara dahil edilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Vu ve ark. CNTs (karbonnanotüp)/ZnO(çinkooksit) nanokompozit içeren reçinenin mekanik ve dielektrik özelliklerini araştırmıştır. FTIR, XRD, FE-SEM, mekanik ölçümler, DSC ve elektriksel test ölçümleri yaparak bulgularına ulaşmışlardır. Epoksi reçinenin mekanik özelliklerinin, sadece ZnO veya CNT içeren epoksi nanokompozit ile karşılaştırıldığında CNTs / ZnO varlığında daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Bunun nedeninin CNT'lerin ZnO'leri taşıyarak epoksi içerisinde daha iyi dağılması ile olduğunu yani ZnO'lerin dağılmasında CNT'lerin büyük rolü olduğunu görmüşlerdir. CNTs / ZnO'nun 1/1'deki hacim oranı, mekanik özellik için en yüksek değerleri vermiştir. Ayrıca CNTs / ZnO içeren epoksinin dielektrik özelliği, CNTs yüzeyi üzerindeki ZnO tabakasının varlığı ile ilgili olarak dahada iyileşmiştir (Vu et al., 2018).

Halder ve ark poli vinil alkol ile modifiye edilmiş ZnO nanopartiküllerin epoksi nanokompozitlerin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar modifiye edilmiş ZnO partiküllerin yüzey modifikasyonlarını FT-IR, EDX ve TGA analizleri ile incelemişlerdir. Ağırlıkça % 0-3 aralığında modifiyeli ve modifiyesiz ZnO içeren epoksi nanokompozitler hazırlamışlar ve hazırlanan nanokompozitlerin Tg'sinde (camsı geçiş sıcaklığı) önemli gelişmeler gözlemlemişlerdir. Çekme ve basma testleri ile mekanik özellikleri inceleyen araştırmacılar PVA destekli ZNO nanopartikül takviyeli nanokompozitlerin ağırlıkça %2 konsantrasyonunda en iyi mekanik performansı verdiğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları hesaplamalara göre bu takviye oranında çekme mukavemetinde % 24, basma dayanımında %48, eğilme dayanımında %44, eğilme modülünde %77'lik gelişme gözlemlemişlerdir (Halder et al., 2017).

Samad ve ark Ağırlıkça %0,5 ve %1 ZnO nanopartikülleri içeren ve ağırlıkça % 0.78 PANI (polianilin) içeren epoksi nanokompozitler ile kaplama yapmışlar ve kaplamanın mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Numunelerin mekanik karakterizasyonları için geleneksel teknikleri (pendulum sertlik, çizilme, darbe direnci) ve nanoiz kullanmışlar, Tg ve termal stabilizasyonlarını incelemek için ise DSC ve TGA kullanmışlardır. Mekanik analiz sonuçları ZnO ile modifiye edilmiş ağırlıkça % 1lik kaplamanın kaplamanın sertlik değerinin (0.180 Gpa'dan 0.206 Gpa'ya) , çizilme

direncinin ZnO modifiyesiz kaplamaya göre max %15 oranında arttığını gözlemlemiştir. Diğer yandan darbe dayanımının, elastiklik modülünün (3.76 Gpa'dan 3.46 Gpa'ya) düştüğünü ve ZnO eklenmesinin kaplamanın Tg (59.45⁰C den 56.95⁰C'ye) ve termal stabilitesini azalttığını gözlemlemiştir (Samad, Alam, Chafidz, Al-Zahrani, & Alharthi, 2018).

Sari ve ark. Montmorillpnit nanokil (MNC) ve modifiye grafen oksit (MGO) partiküllerini kullanarak epoksi kaplama yapmışlardır. Tuz püskürtme testi ve Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ölçümleri sonucunda her iki takviyeli epoksinin de takviyesiz epoksiye oranla daha yüksek korozyon dayanımı gösterdiği ve MNC partiküllü nano kaplamanın MGO partiküllü olan kaplamaya göre daha fazla korozyon dayanımı olduğu görülmüştür (Sari, Shamshiri, & Ramezanzadeh, 2017).

Aşırı ve ark. NiLa_xFe_{2-x}O₄/Epoksi ile hazırladıkları nano kompozit ile paslanmaz çelik numuneler üzerine kaplama yapmış ve nano kompozit kaplamanın korozyon direncinin saf epoksiye göre daha yüksek olduğunu görmüşlerdir (Asiri, Hussein, Abu-Zied, & Hermas, 2013).

Condari ve ark. 130nm çaptaki nano silika ve epoksiyi karıştırarak (%2 oranda) AISI (paslanmaz çelik) 316L üzerine 50µm kalınlıkta kaplama yapmışlar ve çeşitli testler ile mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Buna göre saf epoksi ile kıyaslandığında kompozit kaplamada sertliğin %40 daha fazla olduğu görülmüştür. Nano kompozit kaplama ile artan yüzey pürüzlüğü ve kaplanan yüzeye kazandırılan su geçirmezlik özelliği sayesinde anti korozif özelliklerinin arttığı görülmüştür. Ağırlıkça %3.5'lik NaCl çözeltisi içerisinde yapılan potansiyodinamik ölçümlerşer ile nanosilika epoksi nanokompozit kaplı yüzeylerin saf epoksi ve kaplanma uygulamamış paslanmaz çelik yüzeye göre korozyon direncinin arttığı görülmüştür (Conradi, Kocijan, Zorko, & Verpoest, 2015).

Jaliov ve ark. mikro emisyon bazlı bir teknik kullanarak çinkofosfat ve çinkomolibdat nanopartikülleri hazırlamışlardır. Hazırlanan bu nanopartiküllerin boyutlarının 100nm daha küçük olduğu ölçülmüştür. Bu nanopartiküller epoksi kaplama içerisine kolayca dağılmış ve kusursuz denilebilecek bir kaplamaya sonuç vermiştir. Çelik(ANSI 1018) test numunelerine uygulanan kaplamanın korozyona karşı sürekli bir koruma sağladığı gözlemlenmiştir (Jalilov, Marella, & Claverie, 2016).

Olad ve ark. PANI(polianilin)-nano çinko ve epoksi reçine karışımı ile DIN St 12 demir numuneleri üzerine kaplama yaparak kaplamanın antikorozyf özelliklerini araştırmışlardır. Polianilin kaplamaya ek olarak nanopartikül çinko ve epoksi kullanımının kaplamanın antikorozyf özelliklerinde artışa yol açtığını görmüşlerdir. PANI / epoksi / Zn nanokompozit kaplama, ağırlıkça %4 çinko nano tanecikleri ve ağırlıkça % 3-7 epoksi reçinesi kullanılarak en iyi antikorozyf performansı gösterdiğini keşfetmişlerdir. Katkı maddesi olarak epoksi reçinesinin ve nano çinko partiküllerin kullanılmasıyla, sadece polianilin mekanik ve bariyer özellikleri iyileştirilmemiş, aynı zamanda iletken polianilin kaplamanın elektrokimyasal korozyon önleyici davranışını da açıkça görmüşlerdir (Olad, Barati, & Behboudi, 2012).

Boumaza ve ark epoksiye çeşitli nanopartiküller eklemiş, FTIR-ATIR analizleri ve nanoiz testleri ile epoksi kaplama filmlerinin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Epoksiye % 2 oranda ZrO_2 , ZnO , Fe_2O_3 ve SiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin, sertlikte % 28,% 56,% 61 ve% 71'lik bir artışa neden olurken modülün, sırasıyla% 4 ,% 25, % 21 ve % 26 arttığını gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde bu nanopartiküllerin epoksiye eklenmesi, takviyesiz epoksi ile karşılaştırıldığında kaplamanın çizilme ve darbe direncinin arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte SiO_2 , yüksek elastik modül, sertlik, çizilme ve darbe direncine sahip olan bu nanopartiküller arasında en üstün mekanik özellikler göstermiştir. Araştırmacılar bu partiküllerin ileri ki çalışmalarda antikorozyf performanslarının incelenmesini önermişlerdir (Boumaza, Khan, & Zahrani, 2016).

Jeon ve ark MWCNT'leri (Multi-duvarlı karbon nanatüpler) epoksiye ekleyerek kaplama yapmış ve kaplamanın korozyon direncini incelemişlerdir . Çalışmada yüzey analizi, yapışkanlık (yapışma) testi, EIS analizi ve higrotermak periyodik testleri yapılarak bulgulara ulaşmışlardır. Bunlara göre, epoksiye MWCNT eklenmesinin kaplamanın yapışma mukavemetini artırdığı, hidrofilik olan saf epoksinin MWCNT eklenmesi ile hidrofobikleştiği ve bunun kaplamada MWCNT içeriğinin artması ile arttığı, yine takviyeli epokside saf olana göre su difüzyonu ve absorpsiyonunun daha düşük olduğu ve tüm bunlarla birlikte MWCNT takviyeli epoksi kaplamada korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür (Jeon, Park, & Shon, 2013).

Bagherzadeh ve ark ağırlıkça %1 ,%3 ve %5 oranlarında nanokil içeren epoksi kompozitler hazırlayarak metal yüzeye sprej püskürtme yöntemi ile kaplama

yapmışlardır. Yapışma kontrolleri yapmak üzere yapışkanlık testi uygulamışlar ve katkı oranlarının bir farklılığa neden olmadığını görerek bütün oranlarda çok iyi yapışma sağlandığını görmüşlerdir. Korozyon özelliklerini ölçmek için yapılan 500 saatlik tuz püskürtme testi sonuçlarına göre nanokil katkısının kaplamada su çekme özelliğini düşürerek anti korozif özelliklere katkı sağladığını görmüşler ve en iyi sonuçların ağırlıkça %3 ve %5 orandaki katkılarda olduğunu gözlemlemişlerdir. Yaptıkları EIS test sonuçlarına göre de nanokil katkısının kaplamanın su geçirmezlik özelliğini önemli ölçüde artırarak anti korozif özelliklere katkı sağladığını gözlemlemişlerdir. EIS sonuçlarına göre ağırlıkça % 1 ve % 5'lik numuneler arasında önemli bir farklılık olduğunu belirtirlerken en iyi sonuçların ağırlıkça %3 ve %5lik kaplamalarda olduğu bilgisine ulaşmışlardır (Bagherzadeh & Mahdavi, 2007).

Shi ve ark Zn, Fe₂O₃, kil ve SiO₂ nanopartiküllerini kullanarak her bir partikülden ayrı ayrı ağırlıkça %1'lik karışımlar ile nanokompozitler hazırlamış ve karbon çelik yüzey üzerine kaplama yapmışlardır. Morfoloji incelemeleri için kesit ve üstten görüntüler alarak inceleme yapmış ve buna göre Zn, Fe₂O₃, kil nanopartikülleri ile hazırlanan kompozitler 40 µm kalınlıkta iken SiO₂ katkılı nanokompozit ile yapılan kaplamanın 10 µm kalınlıkta olduğunu görmüşler ve bunu nanosilika katkısının karışımın viskozitesini önemli ölçüde düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Partiküllerin epoksi reçine içerisinde genel olarak homojen dağıldığını gözlemlerken en iyi dağılımın nerede ise hiç aglomerasyon göstermeyerek SiO₂'ye ve ardından düşük miktarda aglomerasyon ve mikro çatlak gösteren Zn'ye ait olduğunu bulmuşlardır. Korozif özelliklerin incelenmesi için ağırlıkça %0.3 ve %3.5lik NaCl solüsyonları içerisinde 28 günlük daldırma yaparak potansiyodinamik ölçümler yapmışlar ve buna göre %0.3lük solüsyon içerisinde nanopartiküllerin etkisinin daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Korozyon dereceleri EIS ile incelenmiş ve buna göre %3.5lik NaCl çözeltisinde sırası ile Fe₂O₃, kil, SiO₂ ve Zn en iyi sonuçları verirken %0.3 lik çözeltide sırasıyla Fe₂O₃, SiO₂, Zn ve kil en iyi sonuçları vermiştir. Her iki durum içinde içerisinde hiç katkı olmayan epoksi kaplama en yüksek korozyona maruz kalmıştır. Young modülü ölçümlerine göre SiO₂ yaklaşık 2,50 GPa ile en iyi sonucu verirken Zn katkısı saf epoksi kaplamaya göre young modülünde %30luk bir artış sağladığını ölçmüşlerdir. Öte yandan Fe₂O₃ ve nanokil katkısı takviyesiz epoksiye göre young modülünce yaklaşık %25-30 lu bir düşüşe sebebiyet verdiğini de gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada gözlenen önemli hususlardan bir diğeri ise potansiyodinamik ölçümler sırasında Zn katkısının

zamanla ZnO₂'ye dönüşerek yüzeyde bir bariyer oluşturması ve bununda kaplamanın anti-korozif özelliklerini artırdığının görülmesidir (Shi, Nguyen, Suo, Liu, & Avcı, 2009).

Akıncı yapmış olduğu çalışmada 40x100 mm boyutlarındaki çelik kuponlar üzerine epoksi polyester toz kullanarak EDS (Electrostatic Spray Deposition) yöntemi ile çeşitli kalınlıklarda (76 – 160 µm arası) kaplama yapmıştır. Kaplama uygulamasından önce çelik yüzeyleri kumlama ile pürüzlendirmiş, kimyasal temizleme işlemine tabi tutmuş ve fosfatlama yapmıştır. Tuz püskürtme testine tabii tutmak üzere numuneleri ASTM D 1654-02 numaralı standarda uygun olarak karbür bıçak yardımı ile 45° açılı olarak çizmiştir. İnce katmanlar halinde birkaç çizik atarak alt tabakaya kadar ulaşmıştır. Numuneleri toplam 2246 saat ağırlıkça %5'lik NaCl çözeltisi püskürten tuz püskürtme kabini içinde korozyon testine maruz bırakmıştır. Deney sonuçlarına göre genel olarak epoksi kaplamanın çeliğin korozyon direncini artırdığını gözlemlerken kaplama kalınlığının artması ile korozyon direncinin daha da arttığını görmüştür. Bu durumu kaplama kalınlığının arttıkça korozyon direncinin artmasına yorumlamıştır (Akıncı).

Kumar ve ark TiO₂ ve CuO nanopartikülleri ve epoksi reçine kullanarak ağırlıkça %5, %10 ve %20 lik oranlarda nanopartikül içeren reçineler ile çelik yüzeyler üzerine kaplama yapmışlardır. Kaplamaların korozyon dirençlerini inceleyebilmek için numuneleri ağırlıkça %3.5lik NaCl içeren çözeltide 3 elektronlu korozyon testi düzeneğinde 30 gün boyunca teste tabi tutmuş ve EIS ölçümlerini almışlardır. Bu testlerin akabinde numunelerin SEM görüntülerini alarak korozyon durumlarını yorumlamışlardır. Tüm bunlara göre nanopartikül ilavesinin kaplamanın korozyon direncini artırdığını ve partikül miktarı arttıkça korozyon direncinin arttığını görmüşlerdir (Kumar et al., 2018).

Behzadnasab ve ark aminopropiltrioksolan (APS) ile muamele edilmiş nano boyuttaki ZrO₂ nanopartikül içeren epoksi kompozit ile düşük karbon içeren çelik saclar üzerine kaplama yapmışlardır. Kaplamanın korozyon performansını incelemek için kaplanmış numunelere EIS, Elektrokimyasal gürültü (ECN) ve tuz püskürtme testleri uygulamışlardır. Ağırlıkça %1, 2 ve 3lük ZrO₂ içeren kaplama malzemeleri ile yapılan test sonuçlarına göre nanopartikül ilaveli kaplamalar yüzeydeki bariyer özelliklerini artırarak çeliği korozyondan büyük ölçüde korumuş ve en iyi sonuçları ağırlıkça %2 ve

3 ZrO₂ nanopartikül içeren numuneler göstermiştir. Araştırma sonuçlarına göre EIS ve ECN test sonuçlarının karşılıklı bir ilişki içerisinde olduğunu bulmuşlardır. Nanopartikülleri epoksi içerisinde dağıtarak sedimentasyon davranışını inceleyen araştırmacılar, işlemsiz ZrO₂ nanopartiküllerin soniksiyon ile karıştırmadan 10 dakika sonra büyük oranda sedimentasyona uğradığını görürken silan muamaleli ZrO₂ nanopartiküllerin 24 saat sonunda bile halen aseton içerisinde çözemediğini gözlemlemişlerdir. Bu durum araştırmacılara silan muameli nanopartiküllerin epoksi içerisinde çok daha iyi bir dağılım vereceğini göstermiştir (M. Behzadnasab, Mirabedini, Kabiri, & Jamali, 2011).

Behzadnasab ve ark yapmış oldukları çalışmada APS ile muamele edilmiş nanozirkon ve nanokil ile epoksi bazlı nanokompozit oluşturarak çelik yüzeyler üzerine kaplama kaplama yapmışlardır. Kaplamanın korozyon bariyerini incelemek için numunelere EIS ve ECN testleri yapmışlar ve yapmış oldukları test sonuçlarına göre küresel nano ZrO₂'ler genel olarak nanokillerden daha iyi sonuç vermiştir. Testler ağırlıkça %3.5lik NaCl solusyonları içerisinde gerçekleşmiş ve her iki partikül içinde ağırlıkça %1, 2 ve 3'lük partikül içeren kaplamalar yapılırken en iyi korozyon bariyerlerini %1'lik nanokatki içeren kaplamalar oluşturmuşlardır. Araştırmacılar diğer parametrelerde düşük bariyer özelliklerinin oluşma sebebini kaplama filmlerinde oluşmaya başlayan çatlaklardan kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir (M Behzadnasab, Mirabedini, & Esfandeh, 2013).

Yu ve ark yapmış oldukları çalışmada vinil polimer/grafen bazlı nanokompozitlerin korozyon korumasını incelemişlerdir. İyi dağıtılmış polistren (PS) / modifiye GO (grafen oksit) nanokompozit polimerizasyonunun katkısız PS'ye göre üstün anti-korozif özellikler gösterdiğini belirlemişlerdir ve ağırlıkça %2lik grafen oksit katkısının saf polistrene göre kaplama filminin korozyondan koruma özelliğini %37.9'dan %88.53'e artırdığını gözlemlemişlerdir (Yu, Lin, Lin, Chan, & Huang, 2014).

Huang ve ark amino modifiyeli silika (AMS) ile elektroaktif epoksi nanokompozit (EES) ve elektroaktif olmayan epoksi nanokompozit (NEE) üretmişler ve her ikisinin de korozyon özelliklerini incelemişlerdir. İncelemelerde EIS, E_{corr}, I_{corr}, gibi

ölçümler kullanıp testleri ağırlıkça %5lik NaCl solüsyonunda gerçekleştirmişlerdir. Soğuk haddelenmiş çelik üzerine kaplanan her iki nanokompozit türünün korozyon testleri sonuçlarına göre elektroaktif epoksi kaplama diğerine göre çok daha üstün korozyondan koruma performansı göstermiştir. Araştırmacılar, elektroaktif epoksinin kaplamada iyi bir fiziksel bariyer olabileceğini yada AMS nanopartiküllerinin epoksi içerisinde çok iyi dağılarak iyi bir bariyer oluşturabileceğini bu iyi korumanın ihtimalleri arasında vermişleridir (Huang et al., 2011).

Pour-Ali ve ark klorür yüklü ortamda güçlendirici çelikleri korumak için epoksi/polianilin-kamforsülfonat nanokompozit (epoksi/PANI-CSA) kullanmışlardır. Sentezledikleri nanokompoziti FTIR ve TEM mikroskopilerini kullanarak analiz etmişlerdir. Çıplak, epoksi kaplı ve epoksi/PANI-CSA nanokompozit kaplı çeliklerinin korozyon davranışlarını ölçmek için 1 yıl boyunca empedans ölçümlerini almışlardır. Hem beton içerisinde hem de dışarıda test edilen numunelerin sonuçlarına göre Epoksi/PANI-CSA kaplamasının çelik donatılar için iyi bir korozyon direnci ve betonla iyi bir bağ mukavemeti sağladığını bulmuşlardır (Pour-Ali, Dehghanian, & Kosari, 2015).

Ramanzadeh ve ark yapmış oldukları çalışmada amino fonksiyonelleştirilmiş grafen oksit (FGO) ve grafen oksit (GO) kullanarak epoksi nanokompozitler üretmişler ve kaplama yapmışlardır. FGO/epoksi kompoziti ıslak transfer yöntemi (WTM) ile epoksi içerisine ağırlıkça %1 oranında FGO ekleterek hazırlamışlardır. Hazırlanan kompozitleri hafif çelik yüzeylere uygulamışlar ve bariyer ve korozyon koruma performanslarını ölçmek için tuz testi ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ile karakterize etmişlerdir. Ağırlıkça %1lik FGO katılması ile kaplama Cl⁻ iyonlarının difüzyonunu engellemiştir ve iyonik direnci ve bariyer direncini artırarak korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişleridir (B Ramezanzadeh, Attar, & Farzam, 2011).

Mostafei ve ark. ağırlıkça % 1, %2 ve %4 ZnO içeriği ile polianilin kullanarak nanokompozitler üretmişler, XRD, FTIR, SEM, TEM, TGA ile ürettikleri nanokompoziti karakterize etmişler ve daha sonra bu nanokompozitler ile epoksi reçineyi karıştırarak bir inorganik-organik kaplama malzemesi hazırlamışlardır. Hazırladıkları bu yapı ile ST 37 çelikler üzerine kaplama yapmışlar ve kaplamanın korozyon direncini incelemişlerdir. Kaplamanın korozyon direncini ölçmek için

kaplamayı elektrokimyasal empedans spektrokopisi (EIS) ve açık devre potansiyeli (OCP) yöntemleri ile %3.5luk NaCl çözeltisi içerisinde korozyon testlerine tabii tutmuşlar ve % 2lik ZnO-PANI-Epoksi kompozitin PANI-Epoksi kompozite göre 3 kat ve saf epoksiye göre 4 kat korozyon korumasını artırdığını açıklamışlardır. Bunlara ek olarak PANI varlığında kaplama-substrat arasında pasif bir film oluşturarak korozyon direncini artırdığını ZnO-PANI-Epoksi kaplamasını çatlaksız, düzgün bir yapı oluşturduğunu ve PANI-ZnO nanokompozitin yassı yapısından ötürü kaplamanın bariyer ve korozyon koruma performansını büyük ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir (Mostafaei & Nasirpour, 2014).

Pourhasem ve ark ağırlıkça % 0.05 , 0.1, 0.3 ve 0.5 lik grafen oksit (GO) ve amino silan modifiye edilmiş (A-GO) içeren epoksi kaplama malzemeleri hazırlamış ve amino silan modifiyeleri GO'ların nanokompozit kaplamalardaki performansını incelemiştir. A- GO'lerin FTIR, XRD, FE-SEM, ve EDS testlerini kullanarak karakterizasyonunu yapmışlardır. A-GO varlığında ASTM D4541-09 çekme standartlarına göre kaplamanın yapışma özelliğinin iki kat arttığını gözlemlemişlerdir. EIS test sonuçlarına göre en iyi korozyon direncinin ağırlıkça % 0.1lik A-GO varlığında olduğunu ve daha yüksek katkı oranlarının aglomerasyona neden oluşturarak kaplanın korozyon bariyerini yavaşlattığını gözlemlemişlerdir (Pourhashem, Rashidi, Vaezi, & Bagherzadeh, 2017).

Nguyen ve ark ağırlıkça % 1 lik nano-SiO₂ ve nano-Fe₂O₃ içeren epoksi nanokompozitler ile çelik donatıları kaplayarak ağırlıkça % 0.3 ve % 0.5 NaCl içeren çimento içerisine gömmüşlerdir. Kaplamaların korozyon dirençlerini potansiyodinamik polarizasyon ve elektro kimyasal empedans spektrokopisi kullanarak ölçmüşlerdir. Ağırlıkça %0.3 lük klorür harcı içerisindeki kaplanmış çelik donatıların 56 gün boyunca 0.1 M NaOH içerisine daldırılması sırasında elektrokimyasal olarak izlenmesi sonucu Fe₂O₃ nanopartikülünün korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu 56 günlük süre içerisinde Fe₂O₃'in korozyon akımını 7.9 kat azalttığını belirlemişleridir. Ağırlıkça %0.5lik klorür harcı içerisinde ise nanopartiküllerin korozyon direncini artırmadığını ve bu süre içerisinde çelik donatıların korozyona uğradığını gözlemlemişlerdir (Nguyen & Nguyen, 2018).

Yeh ve ark silika modifiye edilmiş epoksi reçine ve nano boyutta kil nanopartiküller kullanarak ağırlıkça %1, 3, 5, 7 nanopartikül içeren polimer-kil

nanokompozit (PCN) hazırlamışlar ve bu malzeme ile soğuk haddelenmiş çelik (CRS) üzerine kaplama yapmışlardır. Yapılan kaplamanın antikoroziyon özelliklerini incelemek için ağırlıkça %5lik NaCl solusyonu içerisinde bir dizi korozyon potansiyeli, polarizasyon direnci, korozyon akımı, empedans spektroskopisi elektrokimyasal ölçümlerini almışlardır. Yapılan korozyon testleri ve bir takım gözlemler sonucu bütün katkı oranlarında gaz ve buhar geçirgenliğinin azaldığını ve genel olarak korozyon direncinin arttığını gözlemlerken en iyi direnç ağırlıkça %7 kil içeren kaplamada bulmuşlardır. Buna ek olarak epoksi-kil nanokompozitin düşük su emme, düşük sertleşme büzüşmesi, camsı geçiş sıcaklığı ve yüksek çekme dayanımı gibi üstün özellikler ortaya koyduğunu da gözlemlemişlerdir (Yeh, Huang, Chen, Su, & Yu, 2006).

Navarcian ve ark PANI/kil nanokompozitleri üretip epoksi reçine ile birleştirerek çelik yüzeyler üzerine kaplama yapmışlar ve ağırlıkça %3.5lik NaCl çözeltisi içerisinde tafel eğrilerini kullanarak ve EIS(elektrokimyasal empedans spektroskopisi) testleri yaparak kaplamanın koroziyon özelliklerini incelemişlerdir. Kil olarak Na⁺ iyonları içeren doğal kil (MMT) ve alkil amonyum iyonları içeren organomodifiyeli montnaorillant (OMMT) kullanarak iki farklı içerikli nanokompozit üreten araştırmacılar yaptıkları testler sonucu Epoksi/PANI/OMMT kaplamasının Epoksi/PANI/MMT kaplamasına göre daha üstün korozyondan önleyici özellikleri sağladığını görmüşlerdir (Navarchian, Joulazadeh, & Karimi, 2014).

TabhPaz ve ark yapmış oldukları çalışmada yeni kompozitler üreterek metal sac üzerine iki tabakalı bir kaplama yapmış ve yaptıkları kaplamanın antikoroziyon ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaplamanın ilk katında çinko tanecikleri, çift duvarlı karbon nanotüpler, grafen nanotabakalar bulunurken ikinci katmanda matris yüksek elektriksel yalıtım özelliği sağlayacak olan altıgen bor eklemişlerdir. Polimer matris olarak stiren akrilik kullanan araştırmacılar nanopartiküllerin yapısını SEM ile incelemişlerdir. Koroziyon ortam içerisinde 28 gün boyunca katodik disbondment ile test ettikleri numunelerin sonuçlarına göre korozyon aşınmasının ağırlıkça %20 çinko, %2 karbon nanotüp, %2 grafen nanotabaka içeren matriste %90 azaldığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak nanopartiküllerin varlığında kaplamanın gaz geçirgenliğinin %75 ve termal genişlemesinin %65 kadar azaldığını ayrıca kaplamanın çizilme direncinin de arttığını gözlemlemişlerdir (TabkhPaz, Park, Lee, Hugo, & Park, 2017).

Hang ve ark karbon çeliği korozyondan korumak için organik bileşik (aminotrimetilfosfonikasit (ATMP)) ile muamale edilmiş montmorillonit kili (MMT) epoksi reçine içerisinde dağıtarak hazırladıkları kompozit ile kaplama yapmışlardır. Dağılımı incelemek için X-ray kullanmışlar ve kaplanan çeliğin korozyon direncini incelemek için ağırlıkça %3.5'lik NaCl solüsyonu içerisinde elektrokimyasal empedans spektrokopisi (EIS) ve lokal elektrokimyasal empedans spektrokopisi (LEIS) kullanmışlardır. Toplamada; epoksi, ağırlıkça %2 kil içerikli epoksi, ve ATMP ile Umodifiye edilmiş ağırlıkla %2 kil içeren epoksi olmak üzere 3 parametre inceleyen araştırmacılar yapmış oldukları test sonuçlarına göre ATMP ile modifiye edilmiş kilin normal kile göre üstün korozyon direnci gösterdiğini ve buna ek olarak çizilmiş numuneler üzerinde yapılan lokal ölçümleri ile ATMP'nin karbon çelik/kaplama arayüzeyinde korozyon engelleyici bariyer rolü olduğunu gözlemlemişlerdir (Hang et al., 2007).

Lu ve ark polianilin kaplı yumuşak çelik numunenin ani-korozyon performansını ölçmek için yapay tuzlu su ve hidroklorik asit ortamlarına maruz bırakmışlardır. Yapılan kaplama epoksi boya ile karşılaştırıldığında %3.5'lik NaCl çözeltisi içerisinde iki kat, 0.1 N'luk HCl çözeltisinde ise 100 kat daha az korozyona uğramıştır. Araştırmacılar kaplamanın korozyon dayanımını incelemek için Tafel ekstrapolasyonu, potansiyodinamik polarizasyon, galvanik eşleşme ve EIS yöntemlerini kullanmışlardır (Lu, Elsenbaumer, & Wessling, 1995).

Voevodin ve ark yapmış oldukları çalışmada uçakların korozyona uğramasını engellemek için kullanılan mevcut sistemler olan kromat yüzey işlemi, astar boya ve son kat boya olarak kullanılan boya sisteminde hava kuvvetlerinin kromat yüzey işleminin çevreye olan zararından kaynaklı bunun yerine alabilecek yöntemler araştırmasına yönelik araştırmalar yapmışlardır. Kromat yerine getirecekleri sistemin performansının uzun ömürler için gerekli dayanımı sağlayabilecek olması, mevcut ve gelecekteki çevresel gerekliliklere uyumlu olması ve diğer katlarla uyumlu çalışması gerektiği için araştırmalarında bunlara dikkat etmişlerdir. Bu kapsamda araştırmacılar tüm bu beklentileri göz önünde tutarak organik olarak modifiye edilmiş zirkonat sol-jel filmlerini incelemişlerdir. Sol-jel filmlerin AL 2024-T3 tabakalarına uygulamışlar ve FTIR e X-ray spektrokopilerini kullanarak filmin kimyasını araştırmışlardır. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri be EIS test sonuçları ile korozyon testlerini

yapan araştırmacılar sol-jel filmleri ile yapılan boya işleminin kromat yzey işleminden daya iyi bariyer ozellikleri gosterdiğini ve bunun çevreye zarar vermeden bu tür kaplamalar kullanarak alüminyum uçak yzeylerinin boyanabilecekleri konusunda umut vaat ettiğini belirtmişlerdir (Voevodin et al., 2001).

Qi ve ark Atom transfer radikal polimerizasyonu (ATRP) yolu ile grafen oksit (GO) üzerine polimetilmetakrilat (PMMA) işleyerek bir nanokompozit sentezlemişler ve bu nanokompozitte ATRP'nin polimerizasyonunu FTIR, TGA, GPC, XPS, SEM, TEM, ve AFM yöntemleri ile karakterize etmişlerdir. Sentezlemiş oldukları bu nanokompozit ile %3.5'lik NaCl çözeltisinde bakır substratlar üzerine kaplama yapmışlar ve elektrokimyasal yöntemler ile kaplamanın korozyondan koruma ozelliklerini incelemişlerdir. Buna göre; %81 PMMA-g-GO kaplamasının korozyon korumasını önemli ölçüde artırdığını ve %62 PMMA-g-GO, yalnız PMMA, yalnız Go ve PMMA-Go karışımına göre korozyon akımını 3-4 kat büyüklüğünde azalttığını gözlemlemişlerdir. % PMMA-g-GO kaplamasının korozyon korumasının uzun vadede azalabilir olduğunu ancak 100 saatlik deney sonuçlarına göre bakır substrat için halen etkili koruma gösterdiğini söyleyen araştırmacılar 2 µm kalınlıktaki kaplamanın korozyon koruması için yeterli olduğunu ve kaplama kalınlığı arttıkça korumanın artacağını belirtmişlerdir. Araştırmacılar bildirilerinin sonunda PMMA-g-Go kaplamasının metalleri korumak için ekonomik ve etkili bir yol olduğunu belirtmişlerdir (K. Qi, Sun, Duan, & Guo, 2015).

3. NANOKOMPOZİT KAPLAMALAR VE KOROZYON

3.1. Nanokompozit Kaplamalar

Birçok geleneksel ve ileri teknolojik uygulama hem malzemeyi değerlendirip hem de ilgili teknolojiyi ilerletmeyi amaçlayan özel gereksinimleri karşılayan, iyi tanımlanmış yüzey özelliklerine sahip malzemeler gerektirir. Günümüzde, yüzey mühendisliği, nanoteknoloji ve nanomalzemelerdeki gelişmeler, malzemelerin bileşiminin moleküler ölçeğe kadar manipüle edilmesine izin vererek yeni Hi-Tech fonksiyonel malzemelerinin önünü açmaktadır. Birçok malzemenin yüzeyi, kaplamalar uygulanarak işlevselleştirilebilir. (Gan, 2012)

Nanokompozit bir kaplama, nanokompozit bir yapıya sahip bir kaplamadır. Bu, en az bir fazın nanometre ölçeğinde bir boyutla sınırlı olduğu iki veya daha fazla karışmayan fazdan oluşan bir yapı anlamına gelir. Bu nedenle, nanokompozit bir kaplama, dolgu nano yapılarının dağıldığı bir matris tarafından oluşturulur. (Nguyen-Tri, Nguyen, Carriere, & Ngo Xuan, 2018a)

Nanokompozit malzemeler, matris malzemelerine göre, Çizelge 3.1.'de gösterildiği gibi üç farklı kategoride sınıflandırılabilir.

Çizelge 3.1. Farklı tipte nanokompozitler (Camargo, Satyanarayana, & Wypych, 2009)

Sınıf	Örnekler
Metal	Fe-Cr/Al ₂ O ₃ , Ni/Al ₂ O ₃ , Co/Cr, Fe/MgO, Al/CNT, Mg/CNT
Seramik	Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , SiO ₂ /Ni, Al ₂ O ₃ /TiO ₂ , Al ₂ O ₃ /SiC, Al ₂ O ₃ /CNT
Polimer	Al ₂ O ₃ /SiC, Al ₂ O ₃ /CNT Polymer Thermoplastic/thermoset polymer/layered silicates, polyester/TiO ₂ , polymer/CNT

İki tip nanokompozit kaplama vardır: (i) takviyeli matristeki takviye bileşeninin nano ölçekli olduğu kaplamalar, (ii) ayrı tabakaların oluşturduğu tabaka kalınlıklarının nano ölçekli boyutlarda olduğu katmanlı kaplamalar;

Nanokompozit yapılarda organik ya da inorganik yapılı matris tipleri bulunabilir. Bu kapsamda aşağıdaki gibi 4 ana grupta nanokompozit kaplama çeşidi bulunmaktadır;

- 1) Organik/inorganik nanokompozit kaplamalar
- 2) Organik/organik nanokompozit kaplamalar
- 3) İnorganik/organik nanokompozit kaplamalar
- 4) İnorganik/inorganik nanokompozit kaplamalar (Nguyen-Tri, Nguyen, Carriere, & Ngo Xuan, 2018b)

3.1.1 Epoksi Nanokompozit Kaplamalar

Son yıllarda yapılan çalışmalarda nanopartiküllerin, epoksi reçinelerinin özelliklerine etkisi incelenerek nanopartikül takviyelerinin reçinenin termal ve mekanik özelliklerini güçlendirdiği gözlemlenmiştir. Epoksi nanokompozitler epoksi matrisine dağılmış 1 ila 100 nm aralığında inorganik partiküllerden oluşan iki fazdan oluşmaktadır. Nanopartiküllerin nispeten düşük oranlarda epoksi kaplama sistemine dahil edilmesinin, mekanik özelliklerde, termal kararlılıkta ve epoksi reçinenin yapışmasında kayda değer geliştirmeler gösterdiği gözlemlenmiştir (Wetzel, Hauptert, & Zhang, 2003; Zhang, Rong, Yu, Wetzel, & Friedrich, 2002).

Literatürde kaplama malzemesi olarak mekanik ve korozif özellikleri iyileştirmek için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda yaygın olarak epoksi matris ve takviye bileşeni olarak çeşitli nano malzemeler kullanılmıştır (Asiri et al., 2013; M. Behzadnasab et al., 2011; Pour-Ali et al., 2015; B. Qi, Zhang, Bannister, & Mai, 2006; K. Qi et al., 2015; B Ramezanzadeh et al., 2011; Sari et al., 2017; Shi et al., 2009; Siddiqui, Sham, Tang, Munir, & Kim, 2009).

Kaplamalarda kullanılan ilk epoksi reçinesi ve halen en çok kullanılanı, BPA ve ECH reaksiyonu ile oluşan bisfenol A (BPA) epoksileridir. Temel koşullar altında, ilk reaksiyon, ECH'ye saldıran BPA anyonunun oluşumu ve Klorür anyonunun ortadan kaldırılmasıyla yeni oksiran halkası oluşumu ile sonuçlanır.

Epoksi kaplamalar, elektrolize maruz kalan metalik bir substratın korozyonunu genellikle iki şekilde azaltır (Galliano & Landolt, 2002). İlk olarak, zararlı bileşenlerin girişini kontrol etmek için fiziksel bir engel katmanı olarak hareket ederler. İkincisi, çelik yüzeye klorür anyonları gibi agresif türlerin saldırısına direnç göstermesinde yardımcı olmak için korozyon inhibitörleri için bir rezervuar görevi görebilirler (Shi et al., 2009). Bununla birlikte, Epoksi matrisin kaplama malzemesi olarak tek başına kullanılması kolay yüzey aşınma, yıpranma hasarlarına ve çatlak başlamasına karşı zayıf direnç gösterme nedeni ile çoğunlukla sorun oluşturmaktadır (Wetzel et al., 2003; Zhang et al., 2002). Epoksi matrisin bu tür özellikleri kaplamalarda lokalize kusurlara neden olarak kapamaların mekanik özelliklerinin düşmesine sebebiyet verir. Bunun yanı sıra bu kusurlar metalik substrat yüzeyine su, oksijen ve agresif türlerin girişine yol açarak lokal korozyonlara yol açabilir. Epoksi kaplamalar hidrofobik özellik göstermektedir ve kürlenme sırasında büyük hacimli büzüşme yaşayarak çevreden su emebilirler (Perreux & Suri, 1997). Kürlenmiş epoksi kaplamadaki gözenekler su emilimi ve diğer bileşenlerin epoksi-metal ara yüzeyine geçişine sebep olabilir ve bu da korozyon ve aşınma başlangıcına sebep olarak kaplamanın bozulmasına neden olur.

Epoksi kaplamaların bariyer performansı, gözenekliliği azaltmak ve zararlı türler için difüzyon yolunu kapatmak epoksi polimer ile karışabilen ikinci bir fazın eklenmesi ile mümkün olur (Shi et al., 2009). Nanopartiküllerin epoksi reçinelere dahil edilmesi, kaplamalarda dağılan ince partiküllerin boşlukları doldurabileceği ve çatlak köprüsüne, çatlak eğilmesine ve çatlak sapmasına yol açabileceğinden, kaplamaların bütünlüğünü ve dayanıklılığını artırmak için çevresel olarak olumlu çözümler sunar (Dietsche, Thomann, Thomann, & Mülhaupt, 2000). Nanopartiküller ayrıca kürlenme sırasında epoksi ayrışmasını önleyerek daha homojen bir kaplama sağlar. Nanopartiküller, epoksi reçinenin sertleşmesi sırasında lokal büzülmeden oluşan küçük delik kusurlarını işgal etme eğilimindedir ve daha fazla molekül birbirine bağlayan bir köprü görevi görür. Bu, azaltılmış bir toplam serbest hacmin yanı sıra çapraz bağlama yoğunluğunda bir artışa yol açar (Becker, Varley, & Simon, 2002; Crosky et al., 2006). Ek olarak, nanopartiküller içeren epoksi kaplamalar korozyon koruması için önemli bariyer özellikleri sunar ve kaplamanın kabarma veya delaminat olma eğilimini azaltır (Lamaka et al., 2007; Yang, Liu, & Han, 2005)

3.2. Korozyon

Korozyon bir malzemenin kimyasal ya da elektrokimyasal tepki ile sürekli olarak yıkılması yada bozulması anlamına gelir (Oturaklı, 2010).

Metal ve alaşımların kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde buldukları ortamın elemanları ile tepkimeye girerek, önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozulurlar. Sonuçta metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliği istenmeyen değişikliklere uğrar.

Korozyon birbiri ile elektriksel ve elektrolitik teması olan ve aralarında potansiyel farkı oluşan iki metalik bölge veya nokta arasında meydana gelir. Bu bölge veya noktalar potansiyel bakımından daha asil olanın yüzeyinde katodik reaksiyon meydana gelir, daha aktif olan diğer bölge veya nokta ise çözünür. Potansiyel farkının oluşum nedenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Metal veya alaşımın yapısal, kimyasal, mekanik veya ısı farklılıkları gösteren bölgeleri arasında potansiyel farkı oluşabilir.
- Farklı iki metal veya alaşımın birbirine temas etmesi nedeniyle potansiyel farkı oluşabilir.
- Ortamın katodik olarak redüklenebilen bileşenlerinin, metalin değişik bölgelerinde farklı oranlarda bulunması potansiyel farkı oluşturabilir.

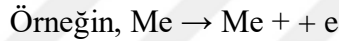
Sıradan bir demir parçası hidroklorik asit (HCl) çözeltisi içerisine daldırıldığında hidrojen kabarcıklarının oluştuğu görülür. Demirde bulunan enklüzyonlar, yüzey pürüzlülüğü, yerel gerilmeler, tane yönlenmesi veya ortamda meydana gelen değişimler nedeniyle demir parçasının yüzeyinde çok sayıda anot ve katot bölgeleri oluşur. Anot bölgesindeki pozitif yüklü demir atomları parçanın yüzeyinden ayrılarak pozitif iyonlar halinde sıvı çözeltiliye geçerken, negatif yüklü elektronlar metal (demir) içinde kalırlar.

Söz konusu elektronlar, çözültiden metal yüzeyine ulaşan pozitif hidrojen iyonlarını karşılayarak onları nötrleştirirler. Nötr hale gelen bazı atomların bir araya gelmeleri sonucunda hidrojen gazı oluşur. Bu işlem devam ettikçe, demir anot bölgesinde oksitlenir ve korozyona uğrar. Parçanın katot olan bölgeleri ise hidrojenle kaplanır. Çözünen metal miktarı, uygulanan gerilim ile metalin direncine bağlı olan hareketli elektron sayısı veya akım şiddeti ile doğru orantılıdır.

3.2.1. Korozyon Mekanizması

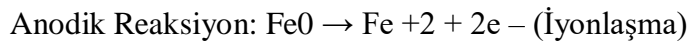
Korozyon sırasında anodik (elektron veren-yükseltgenme) reaksiyonlar ile katodik (elektron alan-indirgenme) reaksiyonları birlikte oluşur. Demir metalinin bulunduğu ortamdaki anodik ve katodik reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:

Anodik Reaksiyon: Metalik iletkenden iyonik iletkene olan pozitif yük transferini gerçekleştiren elektron reaksiyonudur. Anodik reaksiyon daima bir oksitlenme reaksiyonudur.

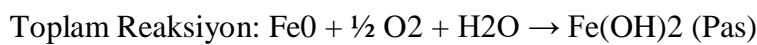


Katodik Reaksiyon: Metalden elektrolite negatif yükün transfer olduğu elektrot reaksiyonudur. Katodik reaksiyon daima indirgenme reaksiyonudur.

Elektrot Reaksiyonu: Elektrolit ve metal ara yüzeyinde yük transferine neden olan kimyasal reaksiyondur.



Katodik reaksiyon: $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2(\text{OH})^{-}$ – $2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{H}_2$ (Asitli Ortamda)

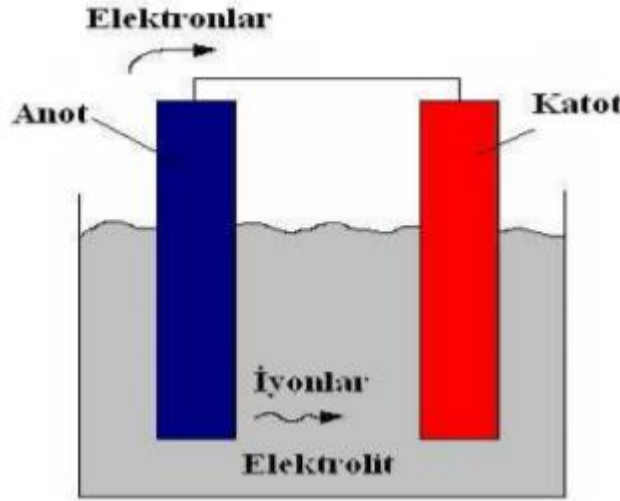


Kimyasal Korozyon

Metal malzemelerin direkt olarak ortamla reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Atmosferik koşullarda en önemli korozif maddeler O_2 , H_2S ve halojenler olduğundan genelde metal yüzeyinde korozyon ürünü olarak oksitler ve sülfürler oluşur. Kimyasal korozyon yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğinden yüksek sıcaklık korozyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu korozyon türüne örnek olarak, kazanlar, kazanların alevle ya da sıcak gazla temas ettiği bölgelerde meydana gelen korozyon verilebilir.

Elektrokimyasal Korozyon

Sulu ortamda metal ve alaşımlarının bozulmaları ile meydana gelen korozyon türüdür. Elektrokimyasal korozyon mekanizmasında, elektron alışverişi ara yüzeyde meydana gelir. Bu mekanizmanın gerçekleşebilmesi için; aralarında potansiyel fark bulunan malzemelerin aynı ortamda olması ve elektron akışının sağlanabileceği bir elektrolit olması gereklidir. Şekil 3.1’de anottan katoda elektrolit ile elektron akışının sağlandığı galvanik hücre gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Galvanik Hücre (Tanattı, 2015)

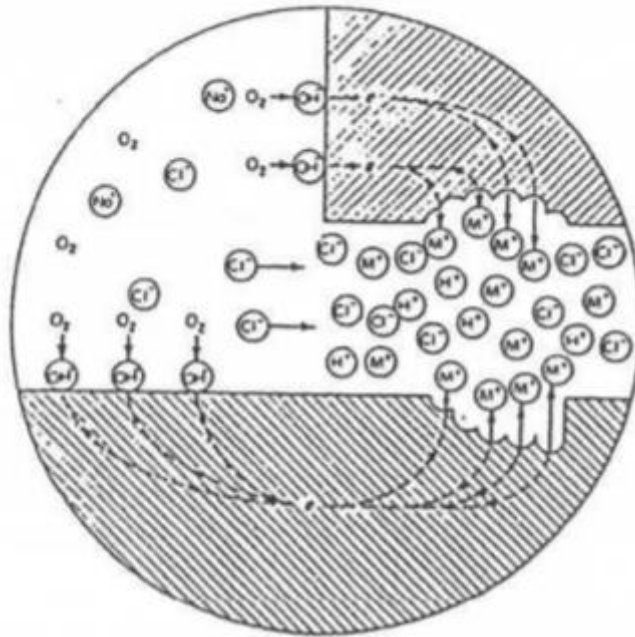
Çelik bir sacın yüzeyini Sn ile kaplandığında, kaplama tabakasının altında kalan çelik sac korozyona uğrar. Bu durumda, çelik sac anot, Sn ise olarak davranmaktadır. Oluşan anot- katot reaksiyonu sonucunda katot çelik sac korozyona maruz kalır. Çelik sacın yüzeyi Zn kaplandığında ise çelik sac katot, Zn ise anot olarak davranır ve Zn kaplama tabakası korozyona uğrar. Bunun nedeni galvanik seride Zn'nun potansiyelinin çeliğe göre düşük olmasıdır.

3.2.2. Korozyon Türleri

3.2.2.1. Aralık (Çatlak) Korozyonu

Aralık korozyonu, birbiri ile iyi temas etmeyen iki yüzey arasında kalan aralıkta bölgesel oksijen farklılaşması nedeni ile gözlenir.

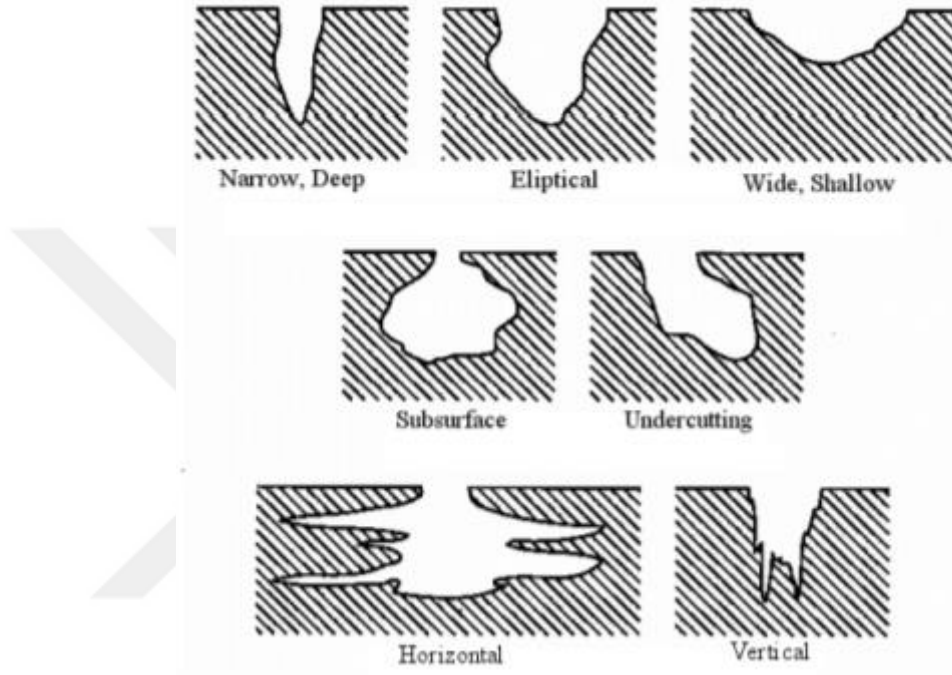
Genellikle sızıntı nedeniyle dar aralıklarda oluşan, hızlanmış korozyon türü olarak nitelendirilir. Oksijeninin az olduğu yerin anot, çok olduğu yer katot davranması ile korozyon olayı gerçekleşir. Herhangi bir alaşımın homojen olmaması korozyon olayını hızlandırır. Böyle bir durumda, aynı metalin rastgele farklı bölgelerinde anodik alanlar oluşurken başka bölgelerinde katodik alanlar oluşabilir. Aralık korozyonun oluşma mekanizması, metalin çözünmesi ve oksijenin hidroksil (OH^-) iyonuna indirgenmesi ile oluşur (Tanattı, 2015). Şekil 3.2 de aralık korozyonunun nasıl oluştuğu gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Çatlak Korozyonu (Tanattı, 2015)

3.2.2.2. Çukurcuk (Pitting) Korozyonu

Korozif bir ortama maruz kalan malzemenin yüzeyindeki pasif film üzerinde meydana gelen lokalize korozyon tipi çukurcuk korozyonu olarak adlandırılır. (Karadirek, 2013) Çoğu zaman oluşan çukurlar gözle görülemeyecek kadar küçüktür. Çukurların derinliği genellikle çapları kadardır.



Şekil 3.3. Malzeme yüzeyinde oluşan çukurcukların morfolojisi (Karadirek, 2013)

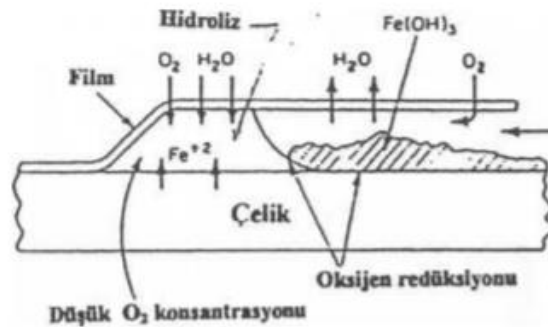
Oyuklanma korozyonu genellikle pasifleşebilen metaller olarak nitelenen paslanmaz çelik, alüminyum alaşımlarında gözlenir ve değişik şekillerde noktasal derin oyuklar halinde kendini gösterir. Şekil 3.3'te çukurcuk korozyonu ile oluşan çeşitli morfolojiler verilmiştir. Çukur korozyonu, metal yüzeyinin herhangi bir noktasında oluşan bir anodik reaksiyon ile başlar. Eğer metal ve çevre koşulları uygun ise, bu anodik reaksiyon birbirini doğuran bir seri otokatalitik reaksiyonlarla hızla devam ederek o noktada bir çukur oluşmasına neden olur. Yani, oyuk içindeki korozyon işlemi (olayı) oyuğun aktivitesini başlatan ve devam ettiren şartları ortaya çıkarır.



Şekil 3.4. Çukurcuk Korozyon

Çukur korozyonu en tehlikeli korozyon türüdür. Çok az malzeme kaybı olmasına rağmen, makine elemanı kısa sürede devre dışı kalabilir. Oluşan çukurların içi genellikle korozyon ürünleri ile doludur. Bu nedenle çukur sayısını ve derinliğini belirlemek son derece güçtür. Şekil 3.4'te çukurcuk korozyonu ile hasara uğrayan metal parçalara örnekler gösterilmiştir.

3.2.2.3. Filiform Korozyonu

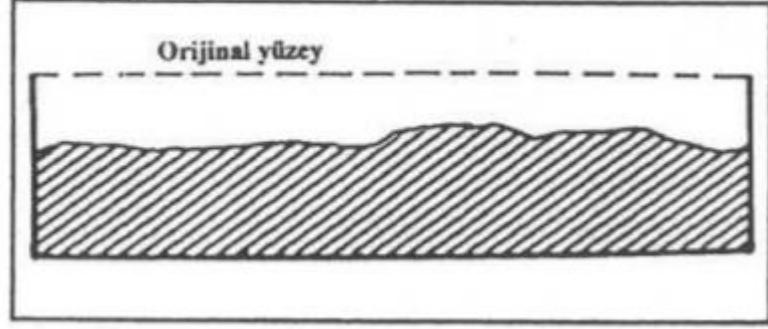


Şekil 3.5. Filiform korozyon

Metal yüzeyinde bulunan boya veya kaplama tabakası altında yürüyen bir korozyon olayıdır. Filiform korozyon, çatlak korozyonunun bir türü olarak kabul edilebilir. Bu korozyona kabuk altı korozyonu da denilmektedir. Şekil 3.5'te filiform korozyonunun nasıl oluştuğu gösterilmiştir. Korozyon olayı kabuk altında bir solucan hareketine benzer şekilde hareket eder. Bir filiform diğer bir filiformu kesmez. Kesişme halinde yansıma yaparak yoluna devam eder.

3.2.2.4. Homojen Korozyon

Anot ve katodun korozyona uğrayan yapının tüm yüzeyinde düzgün dağılarak oluşturduğu korozyon türüdür. Üniform korozyon, metalin yüzeyinin her noktasında aynı hızla ilerler ve sonuç olarak metalin kalınlığı her noktada yaklaşık aynı derecede azalır (Şekil 3.6). Atmosfere açık bulunan metalin uğradığı korozyon çoğunlukla bu tür korozyondur. (Coşkan, 2011)



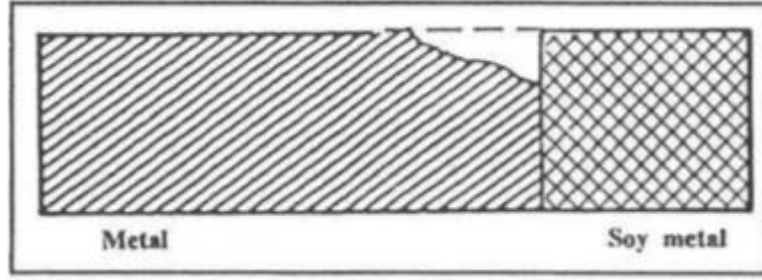
Şekil 3.6. Üniform korozyon

Bu tür korozyona atmosferik ortamda, redükleyici asitlerde ve korozif sularda rastlanır. Kesitte homojen bir azalma ile kendini gösterdiği için korozyon hızının tahmin edilmesi mümkündür. En yaygın korozyon türü olarak üniform korozyonun yol açtığı metal kaybı diğer korozyon türlerine oranla çok yüksektir. Ancak en az korkulan korozyon türüdür.

3.2.2.5. Galvanik Korozyon

İki farklı metalin bağlantısından ileri gelen bir korozyon çeşididir. Bu tip korozyona çok rastlanır. Basit olarak benzer olmayan metal korozyonu diye bilinen bu tür bir bozulma beklenmeyen yerlerde ortaya çıkar ve profesyonel kullanım alanlarında sık sık tehlikeli sonuçlar oluşturur. İki farklı metal bir korozif veya iletken çözeltiliye daldırıldığı zaman, iki farklı metal arasında genellikle bir potansiyel farkı mevcuttur. Galvanik bir hücrede korozyon hızı, yürütücü kuvvet olan anot ve katot arasındaki potansiyel farkına bağlıdır (Aydın, 2009). Bu metaller birbirine temas ediyorsa veya aralarında akım geçişine müsait bir ortam varsa, ikisi arasında elektron akışı meydana gelir. Bu durumda korozyona karşı direnci daha az olan metalin korozyonu genellikle

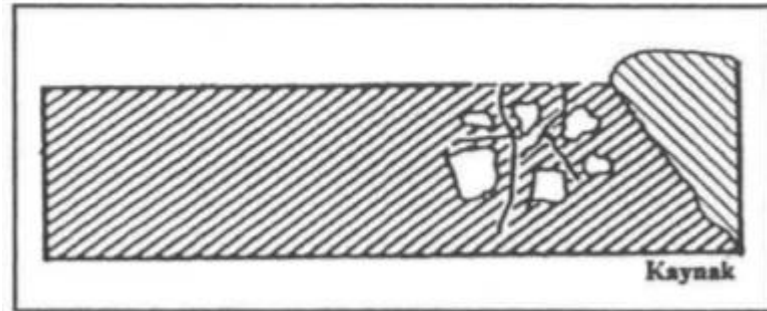
artarken, daha fazla korozyona dayanıklı malzemeye saldırı azalmaktadır. Az dayanıklı metal anodik, çok dayanıklı metal katodik olmaktadır. Katot olarak davranan metal çok az korozyona uğrar. Akım ve korozyonu devam ettiren faktör iki metal arasındaki potansiyel farkıdır. Kuru pil bu korozyon şekline iyi bir örnek teşkil eder. İki farklı metal bir korozif ortama daldırılır ve elektriksel bir bağ ile birbirine bağlanırsa, bir pil oluşur. Bu metallere elektrot potansiyeli daha elektronegatif olan metal anot olarak korozyona uğrar. Buna şekil 3.7’de olduğu gibi metallerin soymetallerin yanında anot şeklinde çalışması ile korozyona uğraması örnek verilebilir.



Şekil 3.7. Galvanik Korozyon

3.2.2.6. Taneler Arası Korozyon

Metal atomları daima geometrik bir düzen içinde kristalleşir. İki veya daha fazla metalden oluşan homojen yapıdaki alaşımlar da belli bir düzen içinde kristalleşir. Bunlara katı çözelti denebilir. Heterojen yapıdaki alaşımlarda ise, iki veya daha fazla katı fazlı karışım söz konusudur. Böyle bir alaşımda kristaller homojen bir yapıda değildir. Taneler arası korozyon, taneler arası sınır çizgilerinde meydana gelir. Bu bölgelerde metallere biri diğerine göre daha düşük konsantrasyonda bulunur. Bu nedenle sınır çizgileri korozyon için uygun bir ortam oluşturur. Paslanmaz çelikte kaynak yapılan bölgede bu tip taneler arası korozyon olayı meydana gelir.

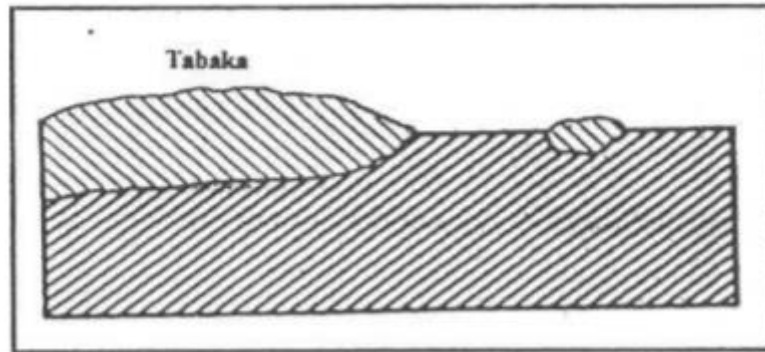


Şekil 3.8. Taneler arası korozyon

Taneler arası korozyon, taneler arasında bulunan herhangi bir safsızlıktan, örneğin bir alaşım elementinin daha fazla bulunması veya bulunmaması nedeniyle oluşur. Örneğin alüminyum içinde bulunan az miktarda demir taneler arası korozyona neden olabilir. Çünkü alüminyum içinde demir çok az çözünür, bu nedenle taneler arasında toplanır (Saraloğlu, 2010). Yine bunun gibi paslanmaz çeliklerde de, taneler arası sınır bölgelerinde krom miktarı çok azdır. Bu bölgeler krom azlığından taneler arası korozyona dayanıksızdır. Taneler arası korozyon mekanizması şekil 3.8'de gösterilmiştir.

3.2.2.7. Seçimli Korozyon

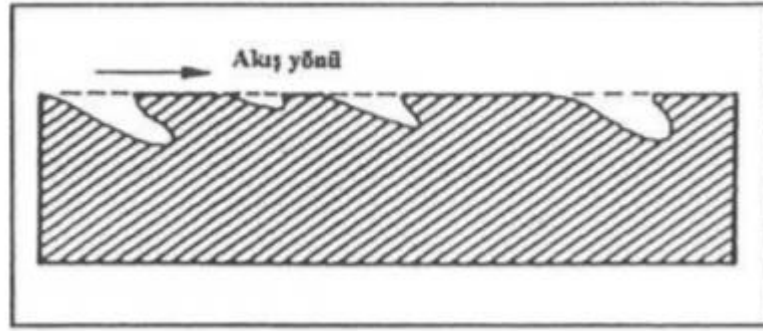
Bir alaşım içinde bulunan elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyon olayıdır (Şekil 3.9). Bu tip korozyona en iyi örnek, pirinç alaşımı içinde bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğramasıdır. Bu seçimli korozyona özel olarak Dezinsifikasyon adı verilir.



Şekil 3.9. Seçimli korozyon

3.2.2.8. Erozyon Korozyonu

Malzeme yüzeyi ile ortam arasındaki hız farkından dolayı oluşan bozunma türü erozyon korozyonu olarak adlandırılır. Erozyonlu korozyonda hem kimyasal hem de mekanik etki aynı anda etki göstermektedir. Mekanik etki veya kimyasal etkiden hangisinin daha etkin olduğu ortam şartlarına bağlı olarak ilerler (Tanattı, 2015). Erozyonlu korozyonun tipik bir görünüşü vardır. Akış yönünde göz ile görünen oyuklar ve dalga biçiminde yuvarlak oluklar oluşur (Şekil 3.10).

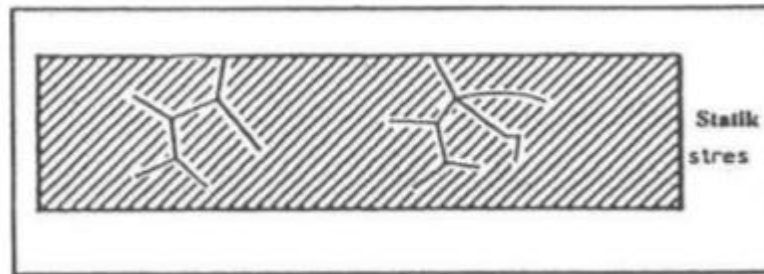


Şekil 3.10. Erozyon korozyonu

Hareketli akışkanların bulunduğu ekipmanlarda, örneğin borular, dirsekler, valfler, pompalar, santrifüjler, pervaneler, karıştırıcılar, ısı değıştirciler, kondansörler, orifisler, türbin paletleri gibi cihazlarda erozyonlu korozyon söz konusu olabilir. Erozyonlu korozyon olayına etkiyen en önemli faktör, akışkanın akış hızıdır. Akış hızı arttıkça erozyon etkisi de artar.

3.2.2.9. Gerilmeli Korozyonu

Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilme altında ise, metalin çatlayarak kırılması çabuklaşır. Metal yüzeyinde bulunan herhangi bir çukur veya hendek gerilim altında duyarlı hale gelerek korozyonun başlaması için uygun bir ortam yaratır (Şekil 3.11). Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, stres altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur.



Şekil 3.11. Stres korozyonu

4. KOROZYONDAN KORUNMA YÖNTEMLERİ

4.1. Temel Korunma Yöntemleri

Korozyondan korunmak için uygulanan başlıklar genel olarak beş başlık altında toplanır. Bunlar :

1. Uygun malzemenin seçimi
2. Çevre koşullarının belirlenmesi
3. Uygun tasarım
4. Elektrokimyasal koruma (katodik ve anodik koruma)
5. Kaplama uygulamaları (Aydın, 2009)

Çizelge 4.1. Bazı metal ve alaşımlarına etkiyen koroziyon ortamları (Aksun, 2014)

Metal	Koroziyon Ortamı
Paslanmaz Çelik	Derişik H_2SO_4 , HCl , HNO_3
Nikel ve Nikel Alaşımları	$NaOH$
Aluminyum	Hava
Kurşun	Sulu H_2SO_4
Kalay	Saf Su
Titan	Sıcak kuvvetli oksitleyici çözeltiler

Korozyondan korunmak için genel olarak bu unsulardan birçoğu göz önünde bulundurularak tasarım ve çalışma yapılır. Uygun seçimler yapılırken ekonomik olarak uygun seçimler göz önünde tutulmaktadır (Aydın, 2009). Bazı metal ve alaşımlarına etkiyen koroziyon ortamları çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

4.2 Kaplama ile Korozyondan Korunma

Korozyondan korunmak için en çok başvurulan yollardan biri metal yüzeylerin kaplanmasıdır. Bu kaplamalar; metalik kaplamalar, inorganik kaplamalar ve organik kaplamalar şeklinde çeşitlenmektedir (Uyanık, 2012)

Metalin yüzeyini kaplayarak korozif ortamla metalin bağlantısını kesmek, korozyondan korumada uygulanan en yaygın yöntemlerden biridir. Kaplama yapılacak metale uygun bir kaplama malzemesi seçmek, kaplama yüzeyinin temiz ve kuru olması bu yöntemde dikkat edilmesi gereken önemli hususlardandır. Aksi halde yüzeyde kaplamasız metal kısımlar bulunursa kaplanmış yüzeylerde korozyon hızlanır ve kaplamasız haline göre daha hızlı ilerler. (Aksun, 2014)

Kaplama uygulamaları ile korozyon aşağıdaki üç ana mekanizmadan biri veya ikisinin kombinasyonu ile önlenir:

- i) Aşındırıcı ortam ile metalik malzeme arasındaki temasın önlenmesiyle bariyer ile koruma
- ii) Kaplama malzemesinin fedakar anot görevi gördüğü katodik koruma.
- iii) İnhibisyon / pasivasyon yöntemi ile anodik koruma (Aydın, 2009)

Korozyondan korunmak için kaplama yöntemleri seçilirken bazı genel kurallara uyulması doğru yöntemin seçilmesinde yardımcı olacaktır. Örnek olarak asidik yani indirgeyici ortamlar için nikel, bakır ya da bunların alaşımları, oksidatif ortamlar için ise krom, titan ya da bunların alaşımları kullanılabilir. Diğer yandan asil metaller kendinden daha az asil metallere göre daha az korozyona uğradığı için uygun yerlerde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Ek olarak korozyonu önlemek ya da azaltmak için metaller yerine doğal veya sentetik mühendislik polimerleri, seramikler, karbon malzemeler ve kompozitlerin kullanılması da seçenekler arasındadır. (Acar, 2015)

4.2.1 Metalik Kaplamalar

Metallerin yüzeylerinin, ana metale göre korozyona daha dayanıklı bir başka metalle kaplanarak korunması metalik kaplama olarak adlandırılır. Ana metalin yüzeyini kaplayacak olan metalinin uygulanış biçimine göre bu işlemler sınıflandırılabilirler; (Kaftan, 2006)

- Püskürtme yöntemiyle metalik kaplama
- Sıcak püskürtme yöntemiyle metalik kaplama
- Elektrolitik kaplama (Elektrolizle kaplama) yöntemi
- Daldırma yöntemiyle metalik kaplama (Kaftan, 2006)



Şekil 4.1. Galvaniz Kaplama (Baker, 1992)

Metalik kaplama uygulamaları için bir kaplama uygulama türünün seçimi, ihtiyaç duyulan korozyon direnci, kaplanan malzemenin ömrü, üretilen parça sayısı, gereken üretim oranı ve çevresel hususlar gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. (Aydın, 2009). Metalik kaplamalara bir örnek olan ve sıcak daldırma işlemi ile yapılan galvaniz kaplama uygulamasına bir örnek şekil 4.1’de verilmiştir.

Aslen tüm kaplamalar bariyer koruması sağlar; aşındırıcı çevre ile metal substrat arasında bir engel oluştururlar. Bunun yanısıra ticari olarak hazırlanan tüm metal kaplamalar bir miktar kadar gözeneklidir ve kaplamalar nakliye sırasında veya kullanımda zarar görebilir. Bu nedenle, gözenek veya çizik altındaki galvanik etki kaplama performansını belirlemede önemli bir faktördür. Korozyon açısından, metal kaplamalar iki sınıfa ayrılabilir, yani sadece bariyer koruması sağlayan asil kaplamalar ve bariyer korumasına ek olarak katodik koruma sağlayan kaplama çeşitleri. (Revie, 2008)

Metalik kaplama ile korozyondan korunma yöntemlerine örnek olarak, çelik konserve kutuları üzerindeki kalay kaplama, motorlu taşıtlar yada ev aletlerinde kullanılan hem korozyon önleme hemde estetik ve parlak görünüm sağlayan nikel/krom sistemi örnek verilebilir. Çok özel bir kullanım alanı olarak alüminyum alaşımlı uçak yüzeylerinin saf alüminyum ile kaplanması korozyondan korunmak için kaplama yöntemlerine güzel bir örnek verir. (Bardi et al., 2009)

4.2.2 İnorganik Kaplamalar

İnorganik kaplamalar; fosfat kaplama, kromat kaplama ve anodik işlemler olmak üzere çeşitlenirler. Uygun bileşimdeki banyolar içerisinde daldırılan metaller, ortam ile reaksiyona girerek yüzeyde tuzlardan oluşan bir tabaka meydana getirirler. Bu işlemlere en iyi örneklerden biri fosfatlamadır. Fosfatlamadan sonra, pasifleştirme işlemi olarak kromatlama kullanılır. Fosfatlama çelik parçalara uygulanabilirken kromatlama yalnız başına sadece Zn, Cd ve Al gibi hafif metallere uygulanabilir. Yüzeyi temizlenmiş çelik parçalar asit (özellikle Zn ortofosfat) çözeltilerinde bekletilerek fosfat tabakasıyla kaplanırlar. Malzemenin dokusundaki gözenekler korozyon direncini düşüreceğinden bir tabaka ile kaplanmaktadır. (Kaftan, 2006)

İnorganik kaplamalar; kimyasal etki, elektrik yardımı ile ya da olmadan üretilir. Sualtı, seramik ve kil, cam, karbon, silikat ve diğerlerini ayarlayabilen su çimentoları gibi çok sayıda malzeme sınıfı içerir. İnorganik kaplamalar üretmek için bazı işlemler ile bir metalin yüzey katmanını, metal oksit veya koruyucu bir koruyucu film haline getirebilir. Bu film doğal oksit filminden daha iyi korozyon direncine sahiptir ve boyalar gibi ek koruma için etkili bir baz veya anahtar sağlar. Bazı durumlarda, bu işlemler boyamadan önce hazırlık aşaması olarak kullanılmaktadır. (Roberge & Eng, 2005)

4.2.3 Organik Kaplamalar

Organik kaplamaların kullanımı, korozyon kayıplarını en aza indirmek için en önemli yaklaşımlardan biridir. Yenilenebilir kaynakların çeşitli korozyon koruyucu kaplamaların hazırlanmasında kullanımı, çevresel kaygılar nedeniyle yeniden canlandırılmıştır. (Riaz, Nwaoha, & Ashraf, 2014)

Organik kaplamaların etkinliği, sadece kaplamaların özelliklerine değil, polimerik ağ ile ve bu ağdaki muhtemel kusurlara bağlı değil, aynı zamanda metal

substratın karakterine, yüzey ön işlemine ve uygulama prosedürlerine bağlıdır. Bu nedenle, bir kaplama uygulaması düşünüldüğünde, tüm sistemin özelliklerini dikkate almak gerekir. (Aydın, 2009)

Koruyucu organik kaplamaların kullanıldığı başlıca alanlar; otomotiv kaplama sistemleri, cihaz sistemleri, metal rulo kaplamaları; ağır hizmetler için toz kaplamalar, özellikle boru hattı kaplamaları; tarım ve inşaat malzemeleri kaplamaları ve dış ortama maruz kalan nesnelere için genel kullanım. Ayrıca, endüstriyel, mimari uçaklar ve denizcilik ekipmanları, kaplamaların korozyona karşı korunması için önemli olduğu diğer alanlardır. Organik kaplamalar sıklıkla çok katmanlı sistemler olarak uygulanır. (Oturaklı, 2010)

Organik kaplamalar, substrat metalini ortamından ayırmak için bir bariyer tabakası görevi görebilir. Bazı durumlarda, kaplamalarda korozyon önleyici kimyasalların varlığı, koruma performanslarını önemli ölçüde artırabilir. Çok katmanlı bir kaplama sisteminde, genellikle üstte organik kaplama kullanılır. Organik kaplama, boyama, toz kaplama, e-kaplama, sol-jel kaplama ve plazma polimerizasyonu dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlarla uygulanabilir veya oluşturulabilir. Bir kaplamanın ana bileşimi polivinil bütiral, akrilik poliüretan, vinil, epoksi ve çinko kromat veya stronsiyum kromat içeren fırınlanmış fenolik gibi çeşitli tiplerde olan reçinedir. Metal substratı aşındırıcı ortamdan korumak için, kaplamalar düzgün, gözeneksiz, yüzeye iyi yapışmış ve kendi kendine iyileşen olmalıdır. Bunlar, kaplamada korozyon önleyici pigmentlerin veya katkı maddelerinin mevcudiyeti veya filmde kurban anodik bir bileşik kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. (Hu, Zhang, Bu, Lin, & Song, 2012)

4.2.2.1 Epoksi Reçine ile Kaplama

Epoksi reçineleri, epoksi, epoksit, oksiran veya etoksil grubu olarak bilinen birden fazla üç üyeli halka (Şekil 4.2) bulunmasıyla karakterize edilen önemli bir polimerik malzeme sınıfıdır (Oturaklı, 2010).



Şekil 4.2. Üç üyeli halka (Jones, Nichols, & Pappas, 2017)

Epoksi sistemleri, epoksi reçine ve sertleştirici olmak üzere, iki ayrı bileşenden oluşur. Epoksi reçineler, katılma (poliadisyon) prensibine göre çapraz bağlanma yapan ve reaksiyona, içerdiği aktif epoksi grupları ile giren reçinelere denir. Poliadisyon reaksiyonu şekil 4.3'te gösterilmiştir. Aromatik, alifatik ve sikloalifatik olarak epoksi reçineler üç gruba ayrılır. Aromatik epoksi reçineler genelde Bisfenol A bazlıdır ancak Bisfenol F bazlı olanları da vardır. (Paksoy, 2008)

Sıvı epoksiler genelde endüstriyel zemin kaplamalarında, tank içindeki kaplamalarda, yapıştırıcılarda, elektrik endüstrisinde, kompozitlerde ve parça imalatında, katılar ise genelde atmosferik korozyona karşı dirençli boyalarda, kısaca solventli epoksi boyalarda, ayrıca toz boyalarda kullanılmaktadır. (Paksoy, 2008)

Amin/poliamin ve poliamidler olmak üzere iki tür de sertleştirici vardır. Poliaminler, kimyasallara ve çözücülere daha dayanıklıdır. Poliamidler ise suya karşı daha dayanıklıdır. Aynı zamanda daha iyi elastikiyet ve yapışma özellikleri bulunmaktadır. (Paksoy, 2008)

Epoksi sistemlere özelliğini baskın olarak sertleştiriciler verir. Bu yüzden birkaç epoksi reçine tipi olmasına rağmen, çok farklı türde sertleştirici tipi vardır. Örnek olarak aynı epoksi reçine iki farklı sertleştirici ile kombine edilirse, bir sistem kırılğan, diğer sistem ise elastik olabilmektedir. (Paksoy, 2008)



Şekil 4.3. Poliadisyon Reaksiyonu

Sertleşmiş epoksi reçinelerin çoğu, mükemmel mekanik mukavemet ve tokluğa sahip amorf termosetler sağlar; üstün kimyasal, nem ve korozyon direnci; iyi termal,

yapışkan ve elektriksel özellikler; hiçbir uçucu emisyon salgılamama ve kürlenme sırasında düşük büzülme; boyutsal kararlılık özellikleri ile genellikle başka hiçbir plastik malzemede bulunmayan özelliklerin benzersiz bir kombinasyonunu sağlar. Bu üstün performans özellikleri, üstün formül çok yönlülüğü ve makul maliyetleri ile birleştiğinde, epoksi reçineler çok sayıda yapıştırma, yapısal ve koruyucu kaplama uygulaması için tercih edilen malzemeler olarak kabul edilmiştir. (Oturaklı, 2010)

4.2.4 İletken Polimerle Kaplama

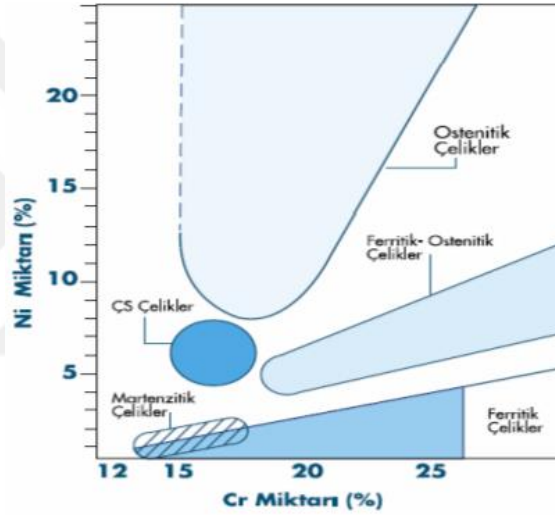
İlk olarak Mac Diarmid 1985 yılında iletken polimerlerin korozyondan koruma amaçlı kullanılabileceği fikrini ortaya atmasıyla aynı yıl bu konuda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Yapılan diğer kaplamaların çevre ve insan sağlığı açısından yarattığı tehlikeler nedeni ile son yıllarda iletken polimer kaplamaların önemi arttırmıştır (Pala, 2013).

İletken polimerlerin koruma özellikleri 4 farklı mekanizma ile açıklanabilir:

- (i) elektrokimyasal ara yüzeyin, metal çözüldüden ECP-yüzey-çözeltiye geçmesi;
 - (ii) metalin, yükseltgenmiş halde bulunan polimer ile soylastırılması;
 - (iii) inhibitör özellikleriyle karşıt iyonlar tarafından kendini iyileştirme özelliklerinin sağlanması;
 - (iv) eklenilen polimerin çapraz bağlanması üzerine bağlı olan bariyer etkisi.
- (Camille Lacaze, Ghilane, Randriamahazaka, & Lacroix, 2010)

5. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, alaşımlı çelik gruplarındandır. Paslanmaz çeliğin temeli kromdur (Cr) ve içeriğinde en az %12 miktarda krom bulunur. Kroma ek olarak nikel (Ni), molibden (Mo), bakır (Cu), alüminyum (Al), silisyum (Si), azot (N), titanyum (Ti), sülfür (S) ve mangan (Mn) gibi diğer alaşım elementlerini de türüne göre farklı miktarlarda içerebilmektedir. Farklı türlerdeki paslanmaz çeliklerin nikel ve krom oranlarını gösteren bir diyagram şekil 5.1’de verilmiştir. Bu elementler malzemenin yapısını değiştirmek, korozyon direncini arttırmak ve diğer bazı özelliklerini geliştirmek için kullanılır. (Aksun, 2014)



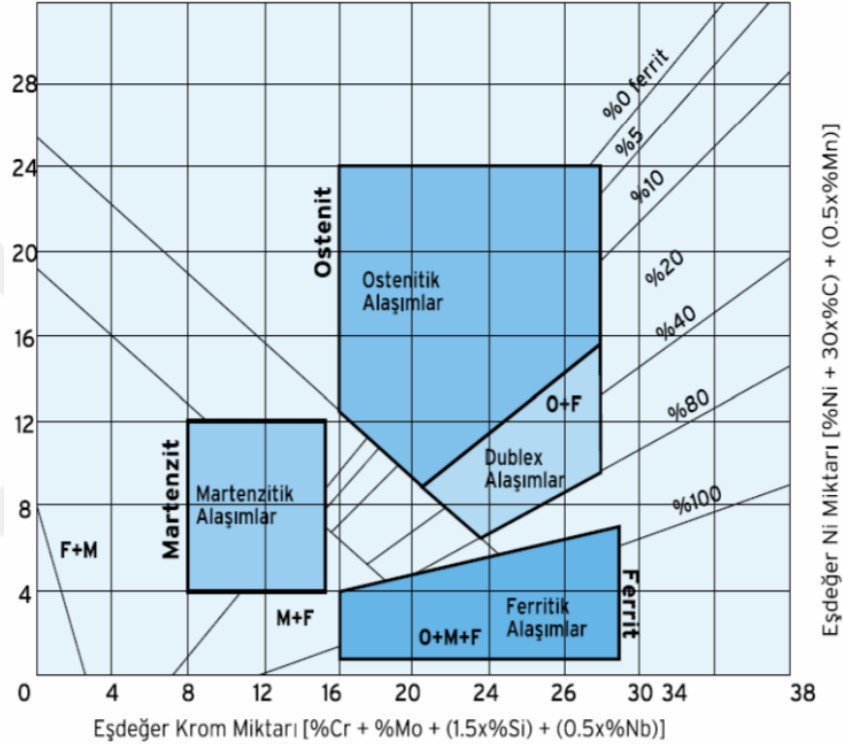
Şekil 5.1. Farklı türlerdeki paslanmaz çeliklerin nikel ve krom miktarları (Aksun, 2014)

Bu çeliklerin yüksek korozyon dayanımını sağlayan unsur; yüzeye kuvvetle tutunmuş, yoğun, sünek, çok ince ve de saydam bir oksit tabakasının bulunmasıdır. Çok ince olan bu amorf tabaka ile paslanmaz çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranarak indirgeyici olmayan ortamlarda korozyona karşı dayanım sağlarlar. Söz konusu oksit tabakası, oksijen bulunan ortamlarda oluşur ve dış etkilerle bozulsa bile kendini onararak eski özelliğine tekrar kavuşabilirler. (Şenyüz, 2008)

Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, dayanımlı iken, yüksek alaşımlı türleri asit, alkali çözeltileri ile klorür içeren ortamlara karşı dayanım göstermektedir. Bu çelikler ayrıca yüksek sıcaklık ve basınçlarda da kullanılabilir. Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi tufallanma ve malzemenin

mekanik dayanımında önemli bir düşme görülmemektedir. Bazı türlerde çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşme görülmez ve tokluklarını korurlar. (Şenyüz, 2008)

Schaeffler diyagramı çeşitli paslanmaz kalitelerinin bileşim oranlarına göre yerini gösterir (Şekil 5.2). Ferrit stabilizatörleri; ferrit faz alanını gösteren silikon, krom, molibden, vanadyum, niyobyum ve titanyum gibi karbür oluşturan metallere dir. Östenit stabilizatörleri ise; östenit faz alanını gösteren nikel, mangan, karbon ve nitrojen gibi elementlerdir. (Şenyüz, 2008)



Şekil 5.2. Schaeffler diyagramı (Aran & Temel, 2004)

5.1. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Paslanmaz çelikler 5 ana grupta toplanabilir.

- Östenitik paslanmaz çelikler
- Ferritik paslanmaz çelikler
- Ferritik-Östenitik (dubleks) paslanmaz çelikler
- Martenzitik paslanmaz çelikler
- Çökelme sertleştirmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler (Karcı, 2008)

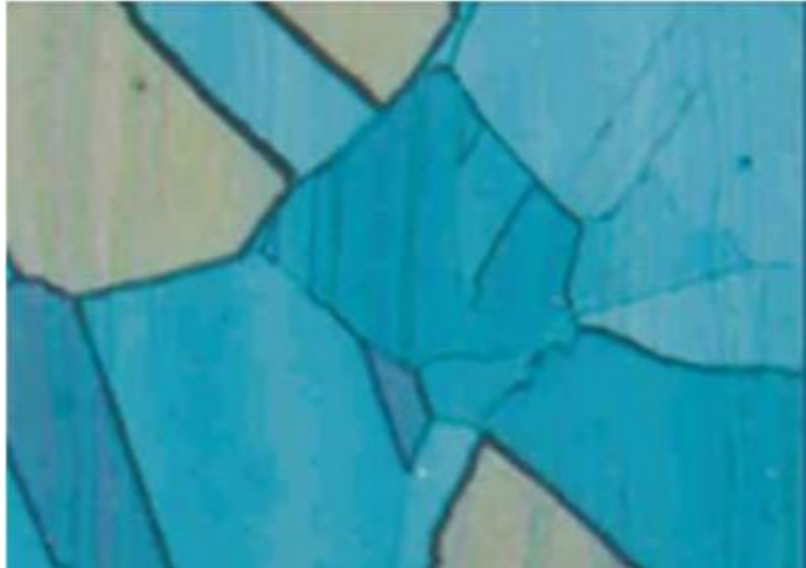
Bu çalışmada östenitik paslanmaz çeliğin bir çeşidi olan AISI 304 kullanılmıştır.

5.1.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler %6 ile 22 arasında Ni ve %16 ile 25 Cr içeren üçlü demirkrom-nikel faz alaşımlarında oluşan yapılardır. Paslanmaz çelik üretiminin yaklaşık %75'ini östenitik paslanmaz çelikler oluşturur. Dolayısı ile en çok kullanılan paslanmaz çelik türü östenitik paslanmaz çeliktir. (Aksun, 2014)

Östenitik paslanmaz çelikler manyetik değildir ve hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezle kübik kafese sahip östenitik iç yapılarını koruduklarından, normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemi yapılamaz. Tavlanmış haldeki süneklikleri, toklukları ve şekillendirilebilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Mukavemetleri sadece soğuk şekillendirme ile artırılabilir. (Şenyüz, 2008)

Korozyona karşı gayet iyi direnç gösterirler ancak daha iyi korozyon direnci gerekir ise içeriğine molibden ilave edilir. Ayrıca korozyon direncini daha da artırmak için östenitik paslanmaz çeliğe %22 oranında Ni ve %26 Cr eklenir. Bazen işlenebilirliğinin artması için selenyum da ilave edilir. Ancak işlenebilirlik için kullanılan katkı maddeleri korozyon direncini zayıflatmaktadır.



Şekil 5.3. Östenitik yapı (Aran & Temel, 2004)

Östenitik paslanmaz çelikler karbonlu çeliklere göre daha yüksek termal genleşme katsayısına ve elektrik direncine sahipken, daha düşük termal iletkenlik katsayısına ve ergime noktasına sahiptirler (Wang, Yang, & Bhadeshia, 2005)

Östenik paslanmaz çelik grubuna mensup AISI 304 paslanmaz çeliği; korozyon dayanımı, kaynak kabiliyeti ve şekillendirilebilme özelliği iyi olmasından dolayı gıda endüstrisinde süt benzeri içeceklerin taşınmasında ve depolanmasında, kapı ve pencere çerçevelerinde, çatı olukları ve soğutma kaplarında, otomotiv sanayinde gibi birçok uygulamada kullanılır. Ayrıca AISI 304 paslanmaz çeliğinde, tanelerarası korozyona karşı dayanımı artırmak amacıyla karbon içeriği azaltılmış AISI 304L paslanmaz çeliği geliştirilmiştir. AISI 304L paslanmaz çeliği, AISI 304 çeliğinin kullanıldığı tüm alanlarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. (Türkan, 2013)

Östenitik paslanmaz çelikler Fe-Cr sisteminde östenit faz alanını genişletici Ni ve Mn gibi elementlerin katılmasıyla daha da geliştirilmiştir. En yaygın türü 304 ve 316 tipleri gibi 300 serisi alaşımları olarak bilinmektedir (Kaya, 2010)

3XX serisi diğer serilere göre daha fazla nikel ve en çok % 2 mangan içerir. 301 ve 304 kaliteleri en az alaşımlı olan türlerdir ve 3XX serisinin temel alaşımları olarak kabul edilmektedirler. Mükemmel şekillendirilebilirliği, sünekliği ve yeterli korozyon dayanımı ile 304 kalite östenitik çelik en yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelik türüdür. Tavlanmış 3XX serisi çeliklerin akma dayanımı 200-275 MPa arasında iken yüksek azotlu 3XX serisinde akma dayanımı 500 MPa değerine kadar yükselebilmektedir. Bu çeliklerde korozyonu önlemek için kullanılan kromun ferrit yapıcı etkisi, östenit yapıcı alaşım elementleri katılarak giderilir. 304 kalite çeliklere molibden katılarak 316 ve 317 kaliteleri üretilir ve klorürlü ortamda noktasal korozyona karşı dayanım sağlanır. 309 ve 310 kaliteleri gibi yüksek kromlu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda ve oksitleyici ortamlarda kullanılmak için tercih sebebidir. Yüksek oranda nikelli alaşımlarda ise indirgeyici asidik ortamlar kullanım sebebidir. Ancak bu amaçla, kuvvetli bir östenit yapıcı olmasına karşın karbon miktarı arttırılamaz, bunun nedeni; bu element karbür oluşturarak korozyon dayanımını zayıflatmasıdır. Bunun yerine aynı zamanda oksitleyici ve indirgeyici asitlere de dayanıklı olan nikelden yararlanılabilmektedir. (Şenyüz, 2008).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kaplama malzemesi kaplanan metali korozyondan korumak için çok önemli bir etkidir. Epoksi kaplamalar birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta ve içerisinde mekanik ve antikorozyon özelliklerini iyileştirmek için çeşitli nanometaller ile desteklenmektedir.

Yapılan bu çalışmada, mutfak eşyaları, ev aletleri, endüstriyel mutfaklar, kimya ve petro kimya sektörü, gıda sektörü, otomotiv sanayi gibi sektörlerde kullanılan, paslanmaz çelik ailesinin en çok kullanım oranına sahip ve orta düzeyde korozyon direnci bulunan AISI 304 numuneler üzerine Zn nanopartikül ilaveli epoksiler ile kaplama yapılmış ve kaplamanın mekanik ve antikorozyon özellikleri incelenmiştir. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada matrisin mekanik özelliklerini incelemek amacıyla literatürden alınan bilgiler doğrultusunda epoksi reçineye ağırlıkça %0.5, 1 ve 1.5 oranlarında Zn nanopartikülü ilaveli numuneler, ASTM D638 çekme testi standartlarına uygun olarak üretilip çekme testi uygulanmıştır. Postkür uygulamasının epoksi kompozitler üzerindeki mekanik etkilerini incelemek amacıyla postkür fırınına girmemiş numunelere de çekme testleri uygulanmıştır. Hasarlı yüzeyler SEM ile incelenmiş ve DSC ile TGA analizleri ile termal özellikler incelenirken hazırlanan epoksi reçine ile nanopartikül arasındaki arayüzey etkileşimleri FTIR ile incelenmiştir. Zn ilavesinin jelleşme süresine etkisi de ayrıca gözlemlenmiştir.

İkinci aşama olarak ağırlıkça %0.5, 1 ve 1.5 Zn içeren epoksi boya ile 120*160*2 mm boyutundaki AISI 304 saclar üzerine ıslak film aplikatörü ile 60µm kalınlıkta kaplama yapılmıştır. AISI 304 malzeme yüzeyi boyanın yüzeye en iyi şekilde yapışmasını sağlamak amacıyla ilk önce 400 grid ve ardından 1000 gridlik zımpara ile temizlenmiş sonra aseton ile silinmiştir. Kaplamaların kalınlıkları kürlenme işlemi sonrasında ölçülmüştür. Yapılan kaplamalar hem %10'lik HCl solüsyonu içerisinde 300 saat bekletilmiş ve test süreci sonunda kaplamaların korozyon hasarları incelenmiştir. Kaplamanın yüzeye tutunma ve mekanik direncini ölçmek için ayrıca kaplanan yüzeyler; darbe testi, bükme testi ve kafes çizgi testine tabi tutulmuştur.

6.1. Malzeme Özellikleri

Çalışmada matris olarak kullanılan epoksi Hexion markasına ait MGS L160 laminasyon reçinesi olup viskozitesi 700-900 mPa·s ve kürleştiricisi ise Hexion marka MGS H160 10-50 mPa·s viskoziteli kürleştiricidir. Seçilen epoksi reçinenin mekanik özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Bu epoksinin seçilmesinde etkin olan unsur düşük viskozitesi sayesinde boya uygulamasına uygun olmasıdır.

Çizelge 6.1. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri (Hexion, n.d.)

Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	1,13 – 1,17	g/cm ³
Çekme mukavemeti	70 – 80	N/mm ²
Basma mukavemeti	80 – 100	N/mm ²
Eğilme mukavemeti	100 – 140	N/mm ²
Darbe mukavemeti	40 – 50	N/mm ²
Elastislik modülü	3,2 – 3,5	kN/mm ²
Kopma uzaması	5,0 – 6,5	%

Partikül takviyesi olarak kullanılan nanoboyuttaki Zn nanopartikülü "Nanografi" firmasından alınmış ve malzemeye ait olan fiziksel özellikleri Çizelge 6.2’ de sunulmuştur. Literatürde Zn nanopartikül takviyesinin epoksi matrisin korozif özelliklerini inceleyen çalışmalar çok nadirdir. Bu nedenle ZnO’ye göre yüksek fiyatına rağmen Zn seçilmiştir. Ayrıca yüzeyde oksitlenerek ZnO yapısının oluşumunun korozif özelliklere etkisinin incelenmek istenmesi de bu partikülü seçiminde etken olmuştur.

Kaplanılan malzeme olarak 2mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme orta halde korozyon dayanımı, iyi kaynak kabiliyeti ve şekillendirilebilme özelliği sahiptir. Kullanılan sacın kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 6.3. ve Çizelge 6.4.’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Zn Nanopartikül fiziksel özellikleri (Nanografi n.d.)

Özellik	Değer/Durum
Safılık Yüzdesi	%99,9
Ortalama Partikül boyutu	60-70 nm
Görünüm Rengi	Koyu Gri
Yoğunluk	7,133 g/cm ³

Çizelge 6.3 AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu (Özbek, Çiçek, Gülesin, & Özbek, 2017)

Sınıf	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
AISI 304	0,08	2	0,75	0,045	0,03	18,35	8,12	0,07	0,23

Çizelge 6.4. AISI 304 paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Birim	Değer
Akma dayanımı (%0,2)	Mpa	310
Çekme dayanımı	Mpa	600
Kopma uzaması	%	60
Sertlik	Rockwell	201
Elastiklik Modülü	Gpa	193

6.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Üretilmesi

Çalışmanın ilk aşamasında matrisin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için en uygun ilave oranı belirlenmiştir. Bu nedenle ilk olarak ASTM D 638 – 14 standardına göre çekme testinde kullanılmak üzere göre kütleli numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin kodları çizelge 6.5’te verilmiştir.

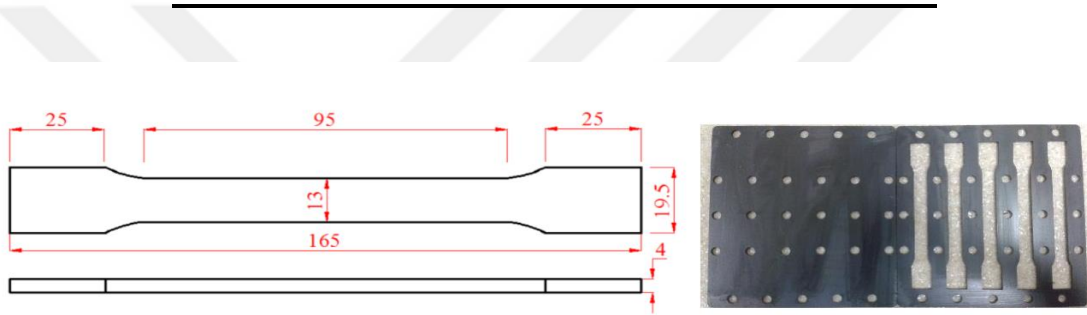
Üretim prosesine geçmeden önce oda sıcaklığında nanoçinko ilavesinin jelleşme süresine etkisi incelenmiştir. Buradaki amaç üretim esnasında karşılaşılabilecek zaman kısıtlanmasının belirlenmesidir. Ayrıca kaplama uygulaması için vizkozitenin olabildiğince düşük olması gerekir. Bu nedenle jelleşmeye başlama süresi bu çalışma için önem arz etmektedir.

Çalışmaya kontrol numunesi olarak adlandırılan saf epoksi numunelerin üretilmesi ile başlanmıştır. İlk olarak Epoksi reçine ve sertleştiricisi ağırlıkça 100:25 oranında birleştirilmiş ve mekanik karıştırıcıda 1000d/dk’da 10 dakika mekanik olarak karıştırılmıştır. Bu esnada oluşan gaz kabarcıklarının giderilmesi için vakumlu etüvde 22 °C sıcaklık, 0.75 bar vakum şartlarında 10 dakika gaz giderme işlemine tabii tutulmuş ve ardından standartlara uygun olan çekme numunesi kalıbına (Şekil 6.1) dökülmüş, 24 saat 22 °C sıcaklıkta kütleme işlemine bırakılmıştır. Bu işlemlerin

devamında 15 saat ve 80 °C sıcaklıkta post kür işlemi uygulanmıştır. Ayrıca bu postkür uygulamasının yapılmadığı numuneler de mekanik özelliklerin incelenmesi için tutulmuştur.

Çizelge 6.5. Epoksi matrise ilave edilen Zn nanopartikül oranları ve numunelerin kodları

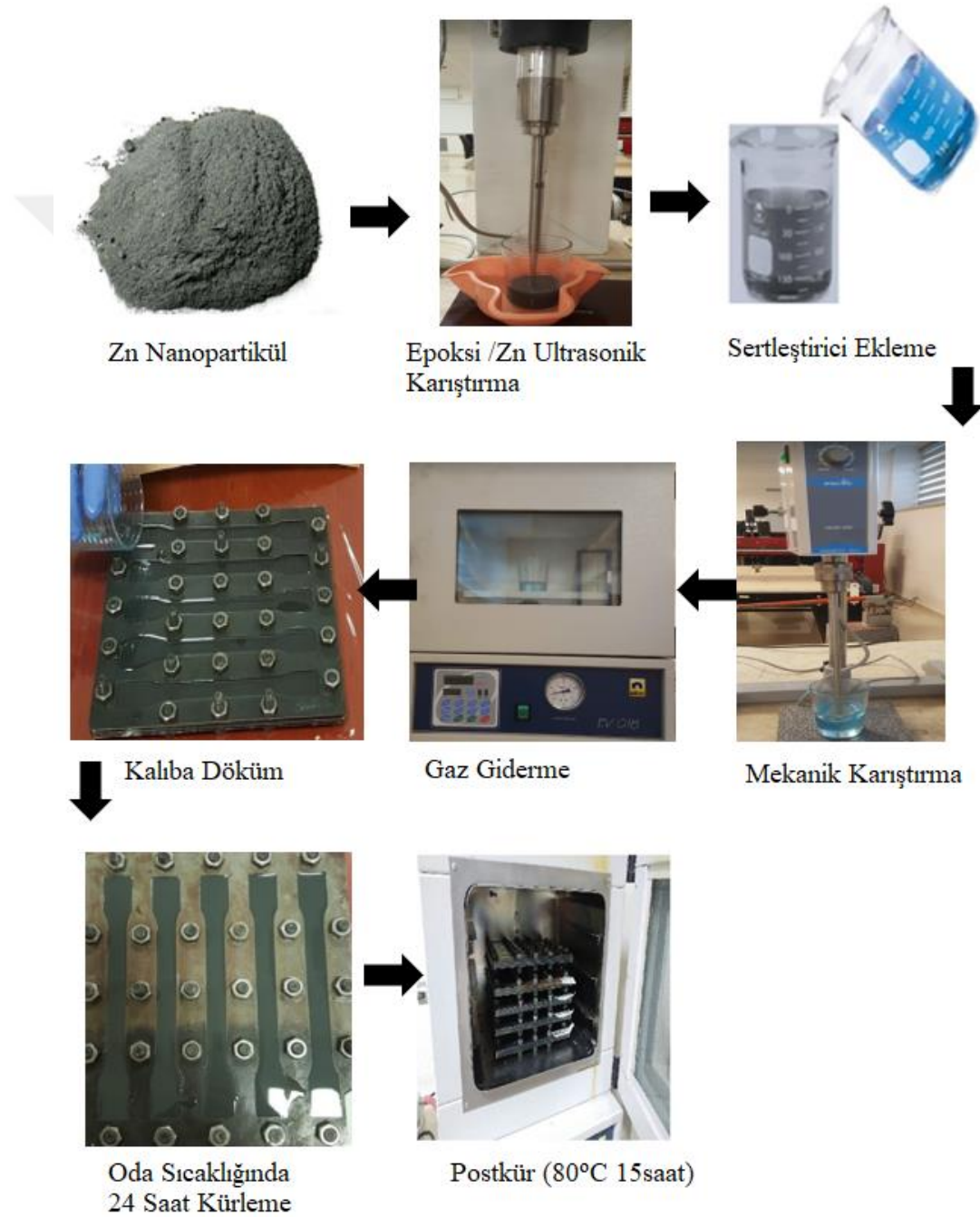
Ağırlıkça % Nanopartikül	Postkür	Numune Kodu
0 – Zn	Var	Z0
0.5 – Zn	Var	Z05
1 – Zn	Var	Z10
1.5 – Zn	Var	Z15
0 – Zn	Yok	ZPY0
0.5 – Zn	Yok	ZPY05
1 – Zn	Yok	ZPY10
1.5 – Zn	Yok	ZPY15



Şekil 6.1. ASTM D 638-14 çekme testi numunesi ölçüleri ve numune kalıbı

Nanopartikül ilaveli numunelerin üretiminde ise epoksi matrise sırasıyla ağırlıkça %0,5 – 1,0 – 1,5 oranlarında Zn nanopartikül ilavesi yapılmıştır. Literatürde %1 oran kullanılmıştır ancak bu çalışmada partikül ilave miktarının etkisi de incelenmek istendiği için farklı oranlarda ilave uygulanmıştır(Shi et al., 2009). Buna ek olarak partikül ilavesinin vizkozitede artışa neden olduğu bilinmekte ve kaplama uygulamasında mutlaka düşük vizkozite gerektiği için yüksek oranlı partikül ilavelerinden kaçınılmıştır (Chandrasekaran, Advani, & Santare, 2010). Matrisin içinde iyi dağıtılmamış nanopartiküller aglomera adı verilen ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyen istenmeyen sonuçlar verebilmektedir. (Deng, Rosso, Ye, & Friedrich, 2007) Tüm bu bilgiler doğrultusunda belirtilen oranlarda nanopartikül ilaveli kompozitler önce epoksi reçine tartılmış ve buna bağlı olarak nanopartikül miktarı hesaplanıp epoksi reçine ile ultrasonik homojenizatörde her seferinde 10 dk olmak üzere 4 kez buz banyosu içinde karıştırılmıştır. Ultrasonik karıştırma işleminin buz banyosu içerisinde yapılma nedeni karıştırma esnasında ısı ile kürlenme işleminin başlamasından kaçınmaktır. Sonrasında belirtilen oranda sertleştirici ilave edilerek 10 dakika boyunca

mekanik karıştırıcıda mekanik olarak yine karıştırılmış ardından gaz giderme işlemi uygulanıp ASTM D638-14 ("Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) standardında belirtilen çekme test numuneleri ölçülerine uygun olarak hazırlanmış olan kalıplara her bir parametreden 5 adet dökülmüştür. Son aşamada ise önce 24 saat 22°C sıcaklıkta kürlenme işlemi sonra 15 saat boyunca da 80°C sıcaklıkta post-kürleme işlemi uygulanmıştır. Çekme numunesinin üretim basamakları Şekil 6.2.'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Çekme numunesi üretim basamakları

6.2.1. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf epoksi ve epoksi nanokompozit numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri, ASTM D638-14 standardına uygun olarak 10000N çekme ve basma kapasitesindeki çekme test cihazında (SHIMADZU AGS-X) 2 mm/dk. hızında oda sıcaklığında yapılmıştır. Her bir parametre için 5 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda Zn ilavesi yapılmış epoksi nanokompozitlerin ve partikül ilavesi yapılmamış epoksi matrisin maksimum gerilme, % uzama, statik tokluk ve çekme modülü değerleri belirlenmiştir.

Çekme deneyleri sonrası numunelerin kırık yüzeylerindeki hasar incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (Hitachi – SU 1510) ile yorumlanmıştır.

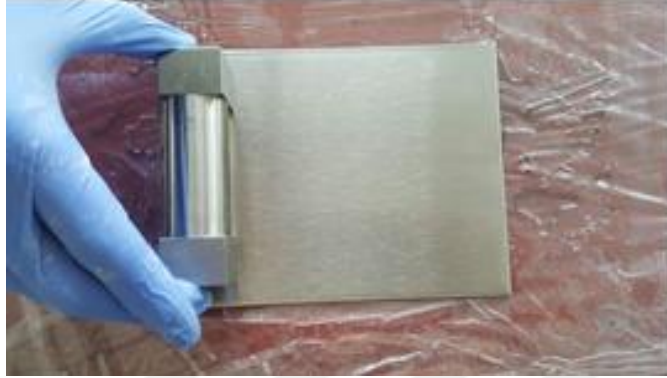
6.2.2. Epoksi/Nanopartikül Kompozitin Karakterizasyonu

Kontrol numunesi ve epoksi nanokompozitlerin termal kararlılıkları 30 °C – 800 °C sıcak aralığında 10 °C/dk. ısıtma hızında azot ortamında termogravimetrik analiz (TGA) (Setaram – Labsys Evo) cihazında analiz edilmiştir. Tg (camsı geçiş sıcaklığı) ve Tm (erime sıcaklığı) değerlerinin tespiti için saf epoksi ve epoksi nanokompozit numuneler, 30 °C – 350 °C sıcaklık aralığında 10 °C/dk. ısıtma hızında ve azot akışında diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) (Setaram – Labsys Evo) cihazında analiz edilmiştir. Bağ analizleri 2 cm-1 dalga sayısı hassasiyetinde FT-IR spektrometre (FTIR -Thermo Scientific – Nicolet iS5) ile yapılmıştır.

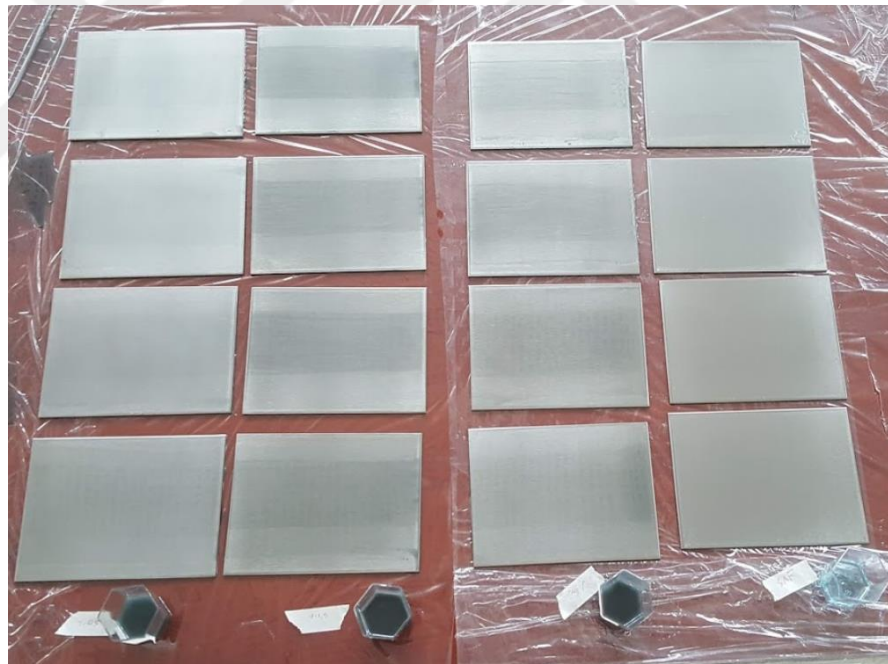
6.3. Epoksi/Nanopartikül Kaplama Uygulaması

Sırası ile önce 400 grit ardından 1000 grit ile zımpara uygulanıp ardından aseton ile temizlenerek yüzey hazırlığı yapılan AISI 304 paslanmaz numuneler ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 luk Zn partikül içerikli nanokompozit ve nanopartikül içermeyen epoksi matris ile ıslak film aplikatörü kullanılarak 60µm kalınlığında kaplanmıştır. Islak film aplikatörü ile kaplama uygulaması şekil 6.3'te gösterilmiş, kaplanan tüm yüzeyler şekil 6.4'te verilmiştir. Kaplama kalınlığı aplikatör üzerinde bulunan 60µm kaplama kalınlık

yüzeyi ile uygulanmış, kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra kaplama kalınlıkları boya kalınlık ölçer ile ölçülmüştür. Kaplama kalınlığı Burada önemli olan husus mekanik özelliklerin test edilme aşamasında hesaplanan jelleşme süresini aşmadan kaplamanın tamamlanmış olmasıdır.



Şekil 6.3. Islak film aplikatörü ile kaplama uygulaması



Şekil 6.4. Kaplama uygulaması yapılmış numuneler

6.3.1. Kaplamanın Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Kaplama Kalınlık Ölçümleri;

Kaplamanın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların kalınlığı Salutron Messtechnik dijital kaplama

kalınlık ölçüm cihazı (Şekil 6.5) ile ASTM B659 (Standard Guide for Measuring Thickness of Metallic and Inorganic Coatings) standardına uygun olarak 10 farklı noktadan ölçülerek min ve maksimum değerleri kaydedilmiş ve ortalama kalınlık değerleri bu ölçüm sonucuna göre hesaplanmıştır. Nanopartikül katkısının kurlenme sonucu kaplama kalınlığına etkisi bu sonuçlara göre yorumlanmıştır.



Şekil 6.5. Kaplama Kalınlık Ölçüm Cihazı (Salutron Messtechnik)

Darbe Testi;

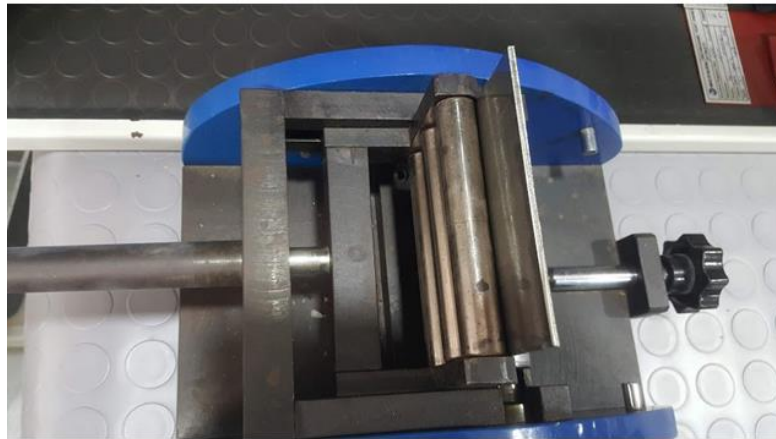
Kaplamanın çatlama-darbe direncini ölçmek için ASTM D 2794 (Standard Test Method for Resistance of Organic Coatings to the Effects of Rapid Deformation (Impact)) standardına uygun olarak “Neurtek boya ve kaplama darbe test cihazı” ile darbe testi yapılmıştır (Şekil 6.6). Kaplanmış yüzeylere darbe testi uygulaması yapılarak kaplamanın darbelere maruz kalması durumunda kaplamaların yüzeye tutunumu gözlemlenebilir (Knotek et al., 1992). Küresel şekilde bir ağırlık, yatay durumdaki kaplanmış test plakası üzerine dik olarak belirli bir mesafeden düşürülerek kaplama filmi üzerinde herhangi bir yırtık meydana gelene kadar her seferinde düşürülen ağırlığın yüksekliği artırılmış ve yırtılmanın olduğu yükseklik darbe direnci olarak kaydedilmiştir. Kaplama yüzeyine düşürülen ağırlık 900 gramdır. Kaplamaya 40 cm yükseklikten başlayarak ve yüksekliği 10’ar cm artırarak kaplama üzerindeki farklı noktalara darbe testi uygulanmıştır. Test sonuçları joule cinsinden kaydedilmiş ve yüzeylerdeki hasar alanları ölçülerek hesaplanmıştır.



Şekil 6.6 Kaplama Darbe Testi Cihazı

Bükme Testi;

Yapılan kaplamaların elastikiyetini ölçmek için ASTM D4145 (Standard Test Method for Coating Flexibility of Prepainted Sheet) standardına uygun olarak bükme testi (Şekil 6.7) uygulanmıştır. Test cihazındaki ağıza yerleştirilen kaplanmış numune 150mm çapta bir dairesel çubuk etrafında döndürülerek yaklaşık 180° bükülerek yüzeye tutunma, esneklik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 6.7. Bükme Testi Cihazı

Kafes Çizgi Testi;

Kaplamanın paslanmaz çelik üzerine yapışma kabiliyetini belirlemek amacıyla, ASTM D 3359 (Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test) standardına

uygun olarak kafes çizgi testi (Cross-Cut testi) yapılmıştır. Bu testte, kaplama üzerine, birbirine göre 90° açı ile iki grup çizgi çizilmekte ve çizilen yüzey üzerine bant yapıştırılıp kaldırılarak yüzeyden kalkan boya miktarı standartlarda verilen miktarlarla karşılaştırılarak, sırasıyla çok fazla dökülenden dökülme olmayan yüzeye karşılık gelen 0B ile 5B aralığında değişen sınıflara ayrılırlar ve Çizelge 6.6'daki veriler referans alınarak kıyaslanırlar (Vayeda & Wang, 2007). Kullanılan karbür bıçak ve bu bıçak ile çizik uygulamasının yapıldığı bir kaplama yüzeyi şekil 6.8'de gösterilmiştir.



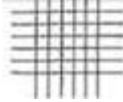
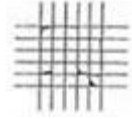
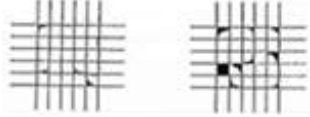
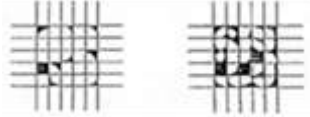
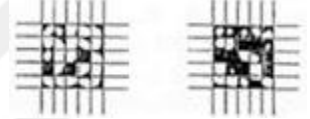
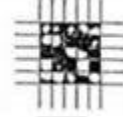
(a)



(b)

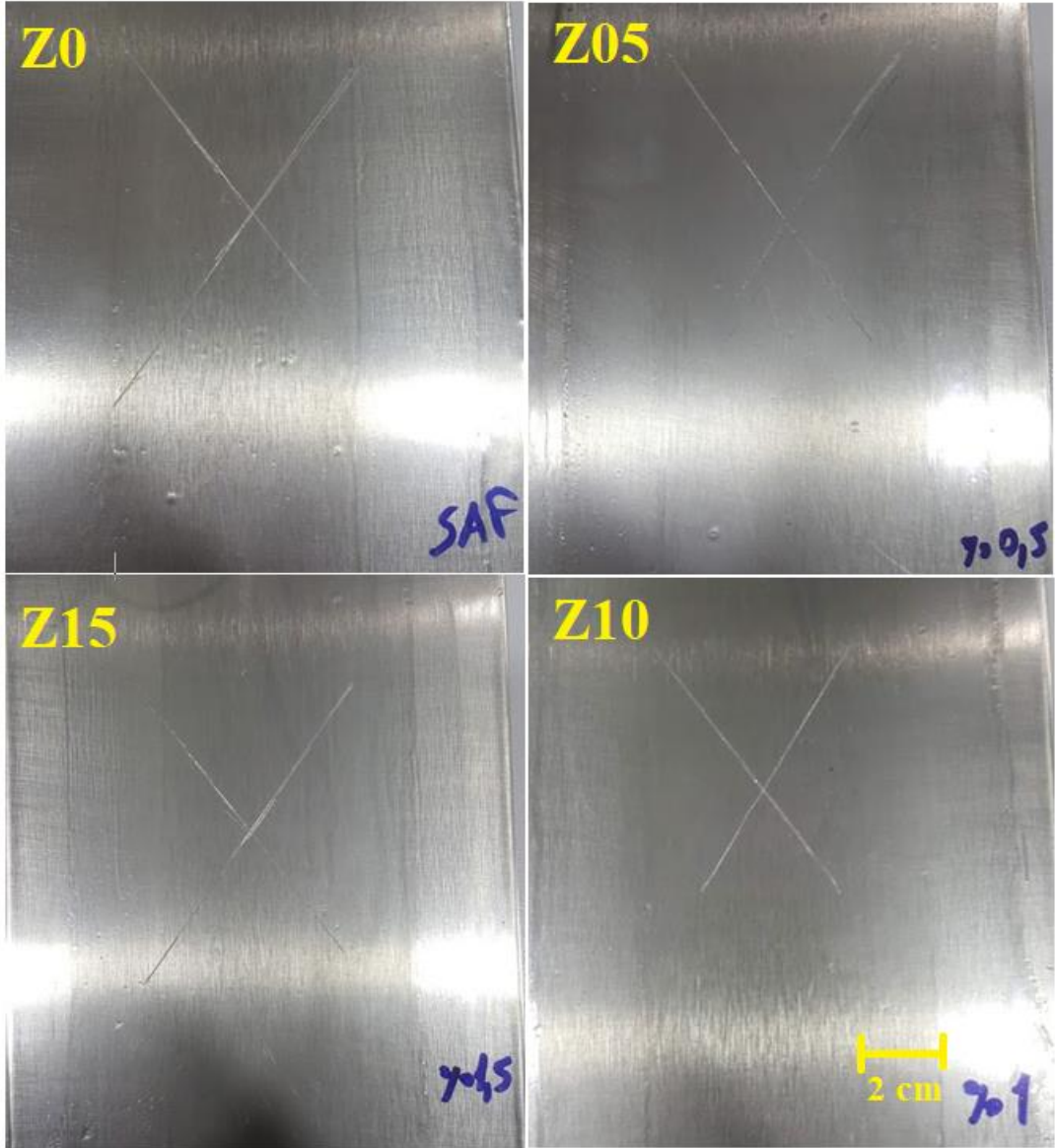
Şekil 6.8. Kafes Çizgi Testi a) Testin uygulandığı yüzey, b) Test Bıçağı

Çizelge 6.6. Kafes çizgi testi değerlendirme tablosu

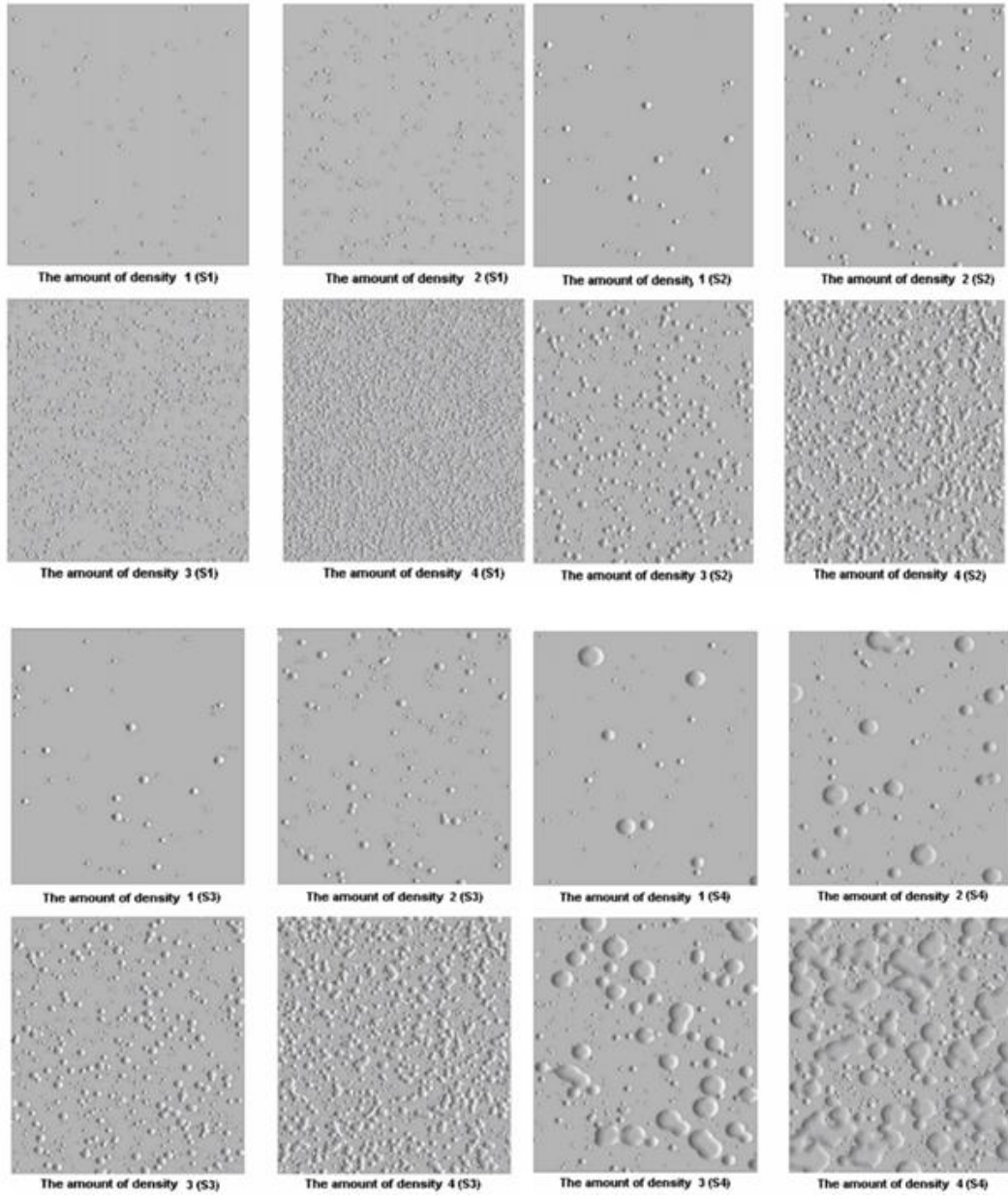
Sınıf	Boya Dökülmüş Alan (%)	Kopmanın Gerçekleştiği Boya Dökülmüş Yüzey Alanı
5 B	0	
4 B	5'ten az	
3 B	5 – 15	
2 B	15 – 35	
1 B	35 – 65	
0 B	65'ten büyük	

6.3.2. Kaplamanın Korozif Özelliklerinin Belirlenmesi

Literatürde paslanmaz çeliğin korozyon direncini incelemek amacı ile HCl asit çözeltisi kullanılmış çalışmalar mevcuttur (Feng, Hsu, Lu, & Shy, 2003). Kaplamanın korozif özelliklerinin belirlenmesi için yapılan kaplamalar ağırlıkça %10'luk HCl asit çözeltisi içerisinde daldırma yöntemi ile 300 saat korozyon testine tabii tutulmuştur. Kaplamalar çözelti içerisine bırakılmadan önce; kaplamaların üzerine paslanmaz çeliğe ulaşacak şekilde çarpı şeklinde çizikler atılmıştır (Akıncı, 2009). Buna göre korozyon testi kaplamanın olası çizilmeler durumunda çizik etrafındaki korozyon yayılımını incelemek için çizik atılan bölgelerden başlayan korozyonun yayılıp yayılmadığı kontrol edilmiştir (Akıncı, 2009; B Ramezanzadeh et al., 2011). Kaplamaların çizilmiş resimleri Şekil 6.9'da verilmiştir. Korozyon testi sonrası yüzeyde oluşan kabarcıklar ile, kabarcık Testi TS 9260 EN ISO 4628'e göre Şekil 6.10'daki referans fotoğrafları kullanılarak kaplamanın korozyonu yorumlanmıştır. (Yılmaz, 2010)



Şekil 6.9. Kaplanmış korozyon testi numuneleri



Şekil 6.10. TS 9260 EN ISO 4628 Kabarcık testi referans fotoğrafları

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Zn Nanopartikül İlavesinin Nanokompozit Özelliklerine Etkisi

Bu bölümde, Zn nanopartikül ilaveli epoksi nanokompozitin mekanik özellikleri, hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri, DSC/TGA analizleri ve FT-IR spektrumu incelenmiştir.

7.1.1 Nanopartikülün Kürlenme Üzerine Etkisi

Saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli hazırlanmış nanokompozitler vakum fırınından çıkarıldığı andan itibaren oda sıcaklığında her 5 dakikada bir kontrol edilerek jelleşme süreleri kontrol edilmiştir. Karşılaştırması yapılan katkı oranları ağırlıkça % 0,5 - 1 - 1,5 Zn nanopartikül ilaveli nanokompozitler ve saf epoksidir. Buna göre ağırlıkça %1,5 katkı içeren nanokompozit en hızlı jelleşme süresini göstererek 85 dakika sonunda jelleşmeye başlamış, %1'lik nanokompozit 105 dakika sonunda ve %0,5lik nanokompozit 135 dakika ve saf epoksi 150 dakika sonunda jelleşmeye başlamıştır. Bu bilgilerden yola çıkarak katkı miktarı arttıkça jelleşme süresinin arttığını gözlemlenmiştir. Literatürde benzer çalışmalar bulunmaktadır. (Umer, Li, Dong, Haroosh, & Liao, 2015)

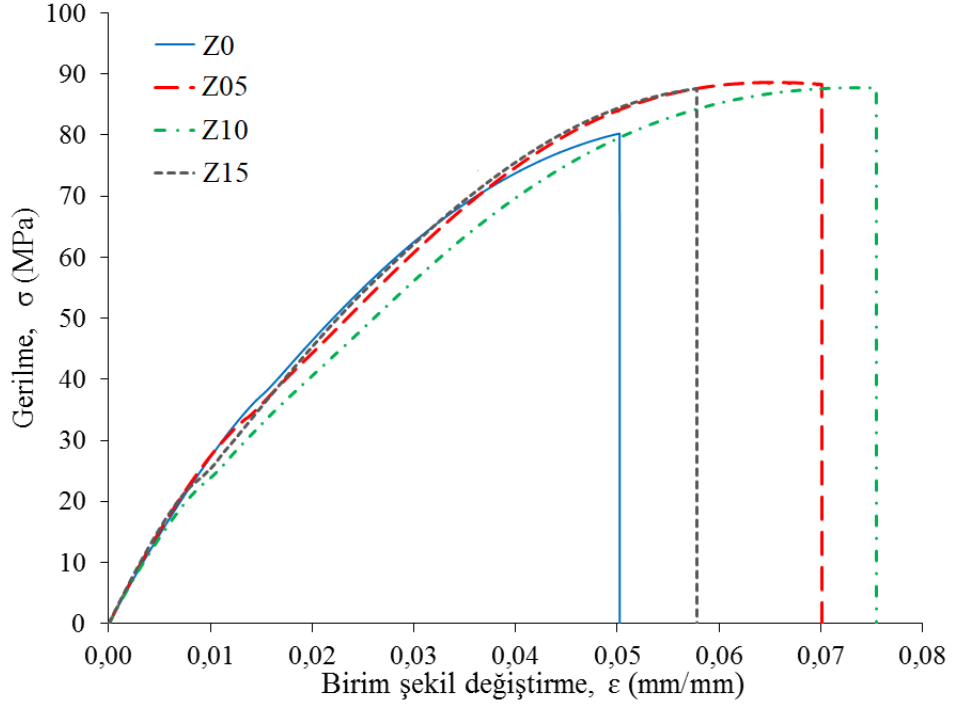
7.1.2. Nanokompozitlerin Hasar Analizi

Postkürü ve Poskürsüz numunelere uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 7.1 ve Şekil 7.3'de yer verilmiştir. Grafiklerden alınan bilgiler ile hesaplanan maksimum çekme dayanımı, % çekme uzaması ve tokluk grafikleri Şekil 7.2 ve Şekil 7.4'te gösterilmektedir. Saf epoksiden üretilen kontrol numunesinin özellikleriyle yapılan karşılaştırmalar. Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2' de verilmiştir.

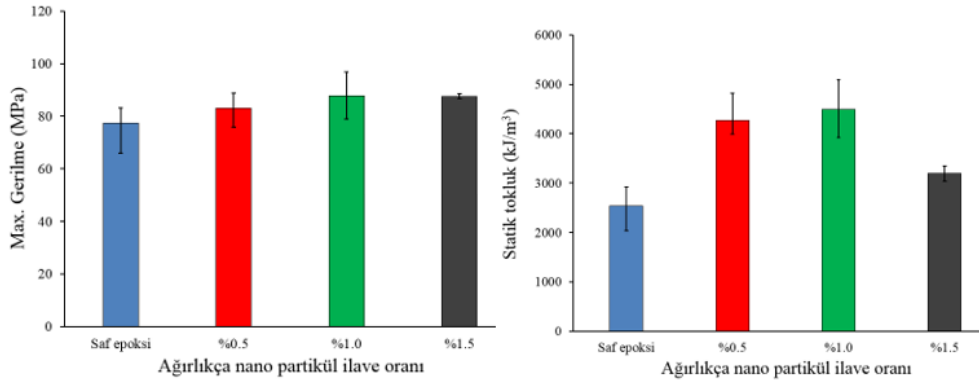
Postkür Uygulanmış Numuneler

Şekil 7.1, 7.2 ve Çizelge 7.1’de postkür uygulamasının olduğu 5 adet dogbone numunenin çekme testi sonucu elde edilen en yüksek çekme mukavemeti, statik tokluk değerleri ve çekme test cihazından okunan çekme uzaması sonuçları ortalamaları standart sapmaları ile birlikte verilmiştir. En yüksek çekme dayanımı açısından postkür fırınına girmiş numuneler incelendiğinde maksimum değer saf epoksiyle kıyaslandığında %13,23 artış ile ağırlıkça %1 Zn nanopartikül ilaveli numune Z10’da meydana gelmiştir. Ağırlıkça % nanopartikül ilave oranının artmasıyla mukavemette düzenli bir artışın olurken bu değerden sonra bir miktar azalma olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin nanopartikül miktarının arttıkça aglomera yapıların artmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Z0 kontrol numunesine kıyasla En düşük çekme mukavemeti % 7,33 ile ağırlıkça % 0,5 Zn nanopartikül katkılı numune Z05’te görülmüştür. Matrisin ağırlıkça %1’lik katkıda en iyi homojen dağılımı göstermesi ve elde edilen bu homojen dağılımla nano partiküllerin epoksi matris ile kuvvetli bir arayüzey oluşturmasının mukavemeti arttırıcı bir etki yaptığı düşünülmektedir. Bunun beraberinde tüm oranlardaki Zn nanopartikül katkılarının çekme testi sonuçları saf epoksi ile kıyaslandığında çekme dayanımında numunelerin tamamında çekme dayanımı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Epoksi reçinenin içerisindeki Zn nanopartiküllerin varlığının termal bir etki oluşturarak makro moleküller arasındaki serbest alanı daraltıp çapraz bağ yoğunluğunu arttırdığı ve çapraz bağ yoğunluğunun artması ile doymamış bağ yoğunluğunun azalması sonucu mukavemetin arttığı düşünülmektedir.

Grafikler statik tokluk değerleri açısından incelendiğinde, yine saf epoksiye göre en iyi sonuç %76.81 artış ile % 1 Zn nanopartikül ilaveli kompozit numunesinden elde edilmiştir. Statik tokluk değerinde de saf epoksi ile kıyaslandığında en düşük sonuç % 26.16 artış ile %1.5 Zn katkılı numunede görülmüştür. Ancak bu değer de diğer değerlerde olduğu gibi saf epoksiye göre artış göstermiştir.

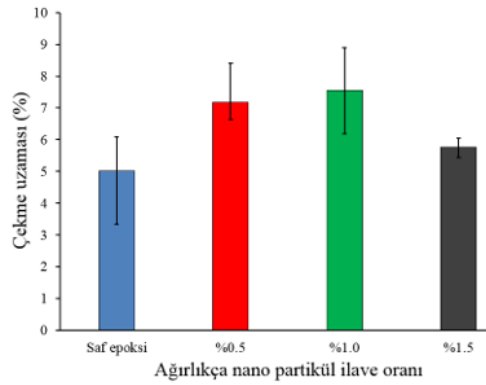


Şekil 7.1 Zn nanopartikül ilaveli postkür uygulanmış nanokompozitlerin çekme gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



a)

b)



c)

Şekil 7.2. Postkür uygulanmış nanokompozitlerin a) max. gerilme, b) statik tokluk c) % çekme uzaması değerleri

Çizelge 7.1 Zn nano partikül ilaveli postkür uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinin saf epoksiye göre değişimi

Numune	Maks. Çekme Mukavemeti		Statik Tokluk		Çekme Uzaması	
	(MPa)	% Değişim	(kJ/m ³)	% Değişim	%	% Değişim
Z0	77.43±7.81	—	2539±430	—	5.02±1.2	—
Z05	83.1±5.37	+ 7.33	4270±480	+ 68.18	7.17±0.63	+42.83
Z10	87.68±7.66	+ 13.23	4489±605	+76.81	7.54±1.73	+ 50.02
Z15	87.45±0.84	+12.89	3203±250	+26.16	5.77±0.28	+14.94

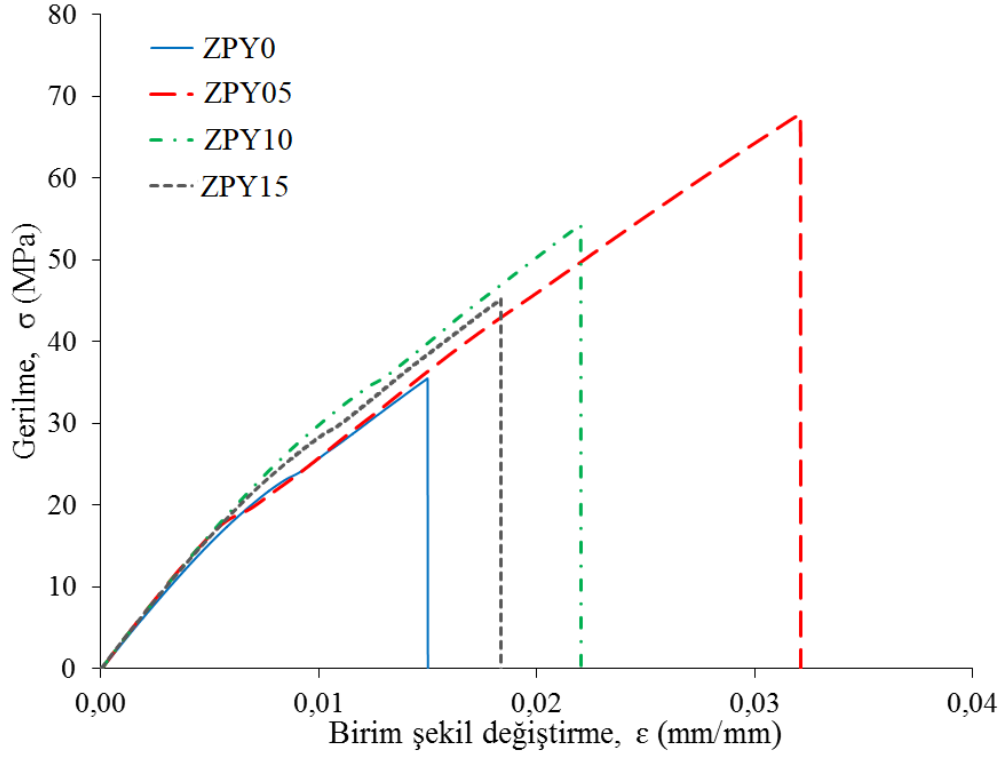
Postkür Uygulanmamış Numuneler

Şekil 7.3, postkür uygulanmamış numunelerin çekme testi sonuçları elde edilen uzama-birim şekil değiştirme grafiğini, şekil 7.4 ve çizelge 7.2 bu grafikteki değerler ile hesaplanan max çekme gerilmesi, statik tokluk ve çekme uzaması değerlerini göstermektedir. Postkür uygulaması olmayan numuneler için saf epoksi ile kıyaslandığında maksimum çekme mukavemeti için 67.81 Mpa değeri ve % 90.22 artış ile en iyi sonucu ZPY05 numunesi göstermiştir. İlave oranı %1,0 ve %1,5 olan numunelerdeki mukavemet artışı sırasıyla %52.85 ve %27.37 dir. Bunun yanı sıra, ağırlıkça %0,5 partikül oranından itibaren nanopartikül ilave oranı arttıkça çekme mukavemetlerinde bir düşüş görülmekle beraber sonuçlar saf epoksi ile kıyaslandığında yüzde olarak artı tarafta kalmıştır. Kullanılan epoksinin laminasyon türünde olması nedeniyle kürlenme süresinin uzun olması, ilave oranı arttıkça nanopartiküllerin birbirine yaklaşması sonucu Van der Waals kuvvetleri nedeniyle topaklanma (aglomera) yapma ihtimalinin artması, kullanılan Zn nanopartikülün yoğunluğunun oldukça yüksek olması nedeniyle çökelme yapmış olması ve homojen dağılımın sağlanamamış olması sonucunda ilave oranı arttıkça çekme dayanımı değerlerinde gitgide bir azalma görüldüğü düşünülebilir. Bununla beraber çekme mukavemeti sonuçları açısından her katkı oranında saf epoksiye göre çok iyi düzeyde artışlar görülmüştür.

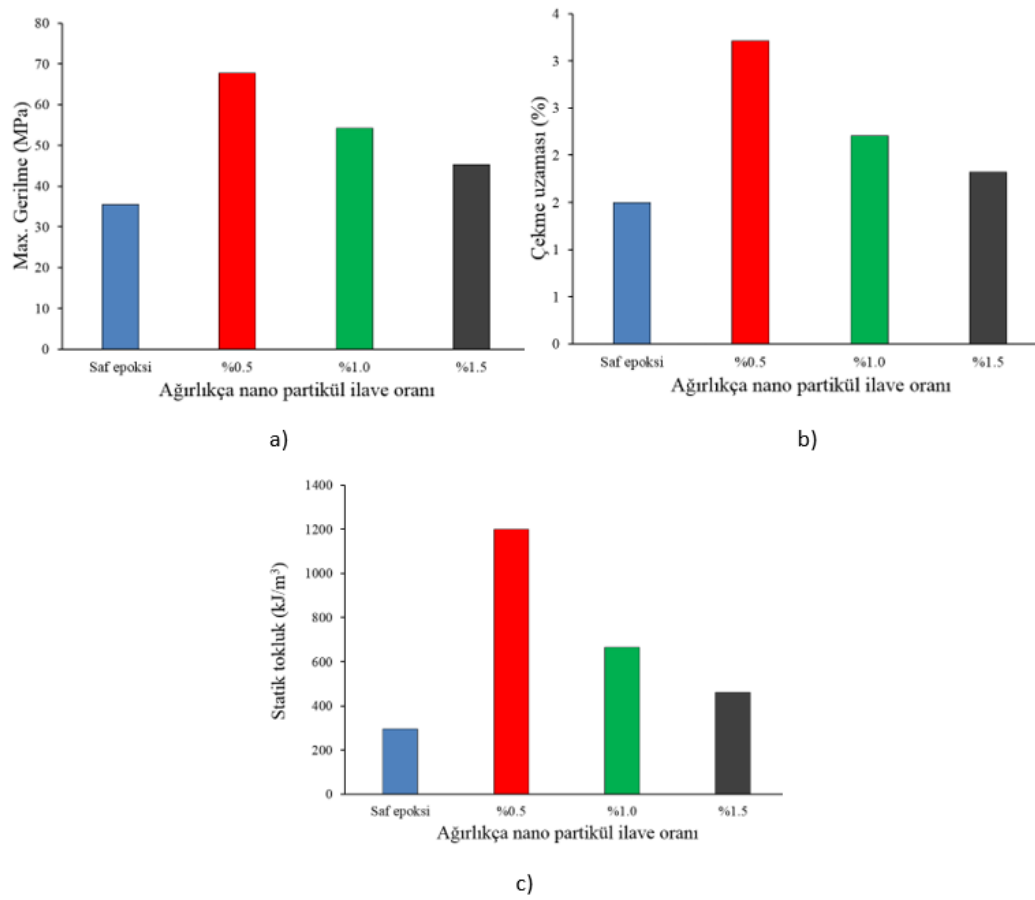
Statik tokluk değerleri açısından grafiklere bakıldığında, Saf epoksiye göre en iyi sonuç %303.71 artış ve 1199 kJ/m³ ile yine % 0,5 Zn nanopartikül ilaveli kompozit numunesinden elde edilmiştir ki bu sonuç saf epoksiyle kıyaslandığında 3 kattan daha

fazla tokluk kazanımı elde edilerek üstün bir tokluk değerine ulaşılmıştır. Statik tokluk değerinde de Zn nanopartikül katkı oranı arttıkça tokluk değerinde bir miktar azalma görülmüş ancak %1 katkı oranında 664 kJ/m^3 değeri ile %123.57 artış ve % 0,5 katkı oranında 460 kJ/m^3 değeri ile % 54.89 artış ile saf epoksi ile kıyaslandığında sonuçlar halen çok iyi düzeydedir.

Saf epoksi Zn nanopartikül ilaveli numunelerin postkür uygulanmış ve uygulanmamış olarak çekme testi sonuçları kıyaslandığında postkür uygulamasının numunelerin çekme dayanımı ve statik tokluk değerlerini oldukça artırdığı görülmektedir. Saf epoksi çekme dayanımı kıyaslamasına göre postkür uygulamasının mukavemetinde %118'lik bir artış getirdiği görülmektedir. Öte yandan postkür uygulanmamış numunelerde partikül katkısı ile çekme mukavemeti ve tokluk değerlerinin çok iyi derece iyileşme göstermesi Zn nanopartiküllerin varlığının termal bir etki yaparak makro moleküller arasındaki serbest alanı daraltıp çapraz bağ yoğunluğunu arttırdığı düşünülmektedir.



Şekil 7.3 Zn nanopartikül ilaveli postkür uygulanmamış nanokompozitlerin çekme gerilmesi – birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 7.4 Postkür uygulanmamış nanokompozitlerin a) max. gerilme, b) statik tokluk c) % çekme uzaması değerleri

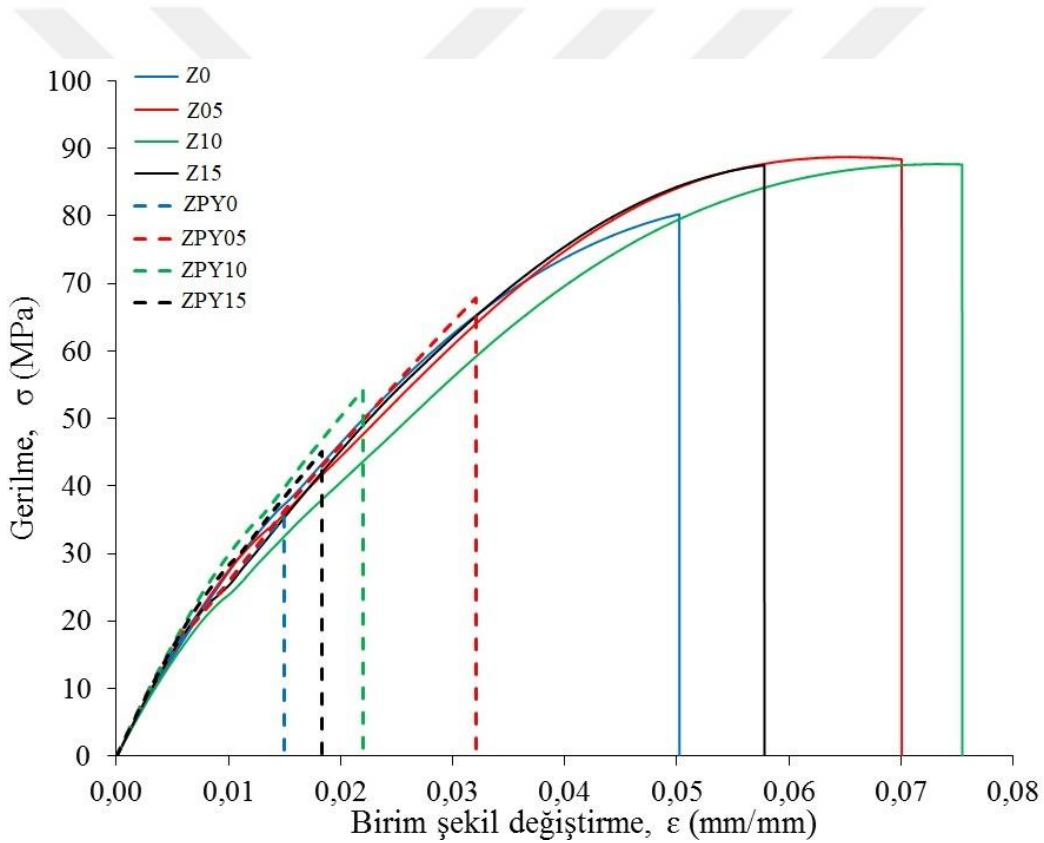
Çizelge 7.2 Zn nano partikül ilaveli postkür uygulanmamış numunelerin mekanik özelliklerinin saf epoksiye göre değişimi

Numune	Maks. Çekme Mukavemeti		Statik Tokluk		Çekme Uzaması	
	(MPa)	% Değişim	(kJ/m³)	% Değişim	%	% Değişim
ZPY0	35.48	—	297	—	1,4	—
ZPY05	67.81	+ 90.22	1199	+ 303.71	3,21	+ 129.29
ZPY10	54.23	+ 52.85	664	+ 123.57	2,2	+ 57.15
ZPY15	45.19	+ 27.37		+ 54.89	1,82	+ 28.58

Çalışmada kullanılan DGEBA epoksi reçinesinin mekanik özellikleri farklı çalışmalarda incelenmiş ve çekme mukavemetlerinin genel olarak 50 – 80 MPa arasındaki değerlerde bulunduğu görülmüştür. (Chatterjee & Islam, 2008; Gemi, Yazman, Uludağ, Dispınar, & Tiryakioğlu, 2017; Gojny, Wichmann, Fiedler, &

Schulte, 2005; Jiang, Kuila, Kim, Ku, & Lee, 2013; Mohan, Kumar, & Velmurugan, 2006; Zhou, Pervin, Lewis, & Jeelani, 2008) Üretici firmadan edinilen verilere göre bu değer çalışmalardakine yakın olup, 70-80 Mpa aralığındadır.

Şekil 7.5'te test edilen postkürlü ve postkürsüz tüm numunelerin çekme testleri sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde postkürsüz numuneler arasında en yüksek çekme mukavemetine sahip ZPY15 numunesinin dahi postkür uygulamasının olduğu kontrol numunesi Z0'a oranla daha düşük bir mukavemete sahip olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca postkür uygulamasının malzemenin süneklik kabiliyetini artırarak uzama değerlerini 2-3 kat oranında artırdığı aynı grafikten net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 7.5 Postkürlü ve Postkürsüz Saf Epoksi- Zn/Epoksi Nanokompozit Numunelerin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafiği

Yapılan testlerde çekme deneyleri sonucunda postkür uygulamasının olduğu saf epoksi reçinenin çekme mukavemeti değeri ortalama 77.43 MPa olarak bulunmuştur. Literatürde Zn nanopartikül ile yapılan bir kaplama çalışmasında epoksi matris içerisine ağırlıkça %1 eklenen Zn nanopartikülün matrisin mekanik özelliklerini iyileştirdiği

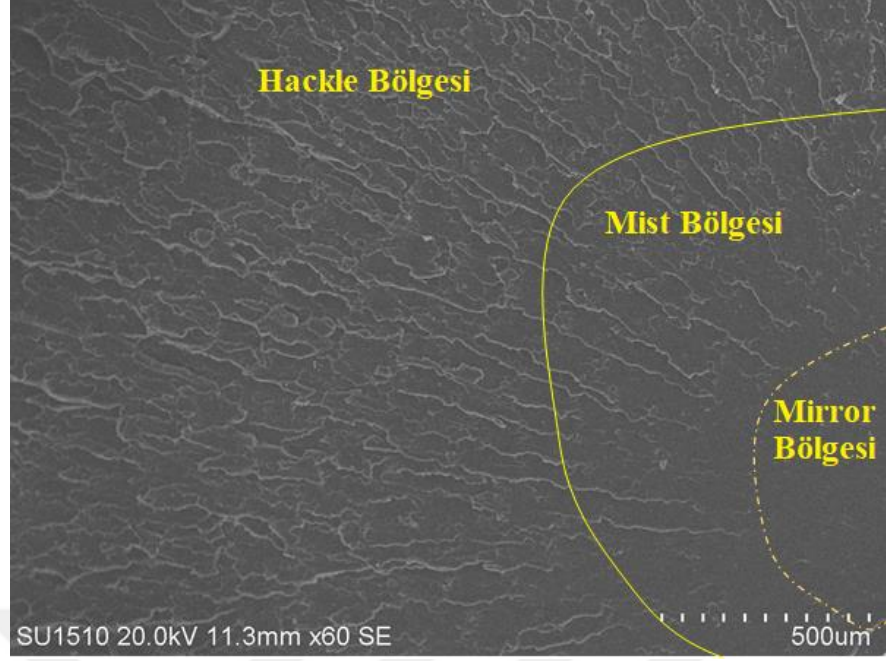
görülmüştür (Shi et al., 2009). Literatürde Zn nanopartikül ile yapılan çok fazla çalışma olmamakla beraber ZnO ile yapılmış bir incelendiğinde partikül ilavesinin matrisin mekanik özelliklerine olumlu faydalar getirdiği ve hibrit kullanımlarda sonuçların mükemmel seviyelere çıktığı çalışmalara rastlanmıştır. (Halder et al., 2017; B. Ramezanzadeh, Attar, & Farzam, 2010). Çalışmada postkürleme işlemi ile yapılan kompozitler kıyaslandığında en iyi sonucun 87.68 Mpa ortalama çekme mukavemeti ile açıkça ağırlıkça %1lik Zn nanopartikül olduğu gözükmektedir. Yapılacak olan bundan sonraki çalışmalarda bu sonuç kıyaslanabilir ve etüv fırınında bulunma süresi, kurlenme süresi gibi etkenlerin bu değeri değiştirebileceği postkür uygulanmayan numunelerde de net bir şekilde görülmüştür.

7.1.3. Nanokompozitlerin SEM Analizi

Epoksi reçine polimer bir yapıdır. Çekme deneyi sonrasında termoset grubunda ki polimerlerin kırılma yüzeylerinde genelde üç farklı bölge oluşmaktadır;

- Kırılma esnasında çatlak yavaşça büyürken birden hızlanarak pürüzsüz denilebilecek "mirror" isimli bölge,
- Mirror bölgesinin ardından bir geçiş bölgesi olan ve bu bölgeye göre daha çok pürüzlü olan "mist" bölgesi,
- Son olarak, deformasyon hızlanmaya başladığında nihai çatlak hızında, yüksek miktarda pürüzlü kaba bir yapıya sahip olan ve belirgin akıntı çizgileri içeren "hackle" bölgesi oluşur Bu bölge mist bölgesinin etrafını sarmaktadır. (Goyat, Suresh, Bahl, Halder, & Ghosh, 2015; Hayes, Edwards, & Shah, 2015)

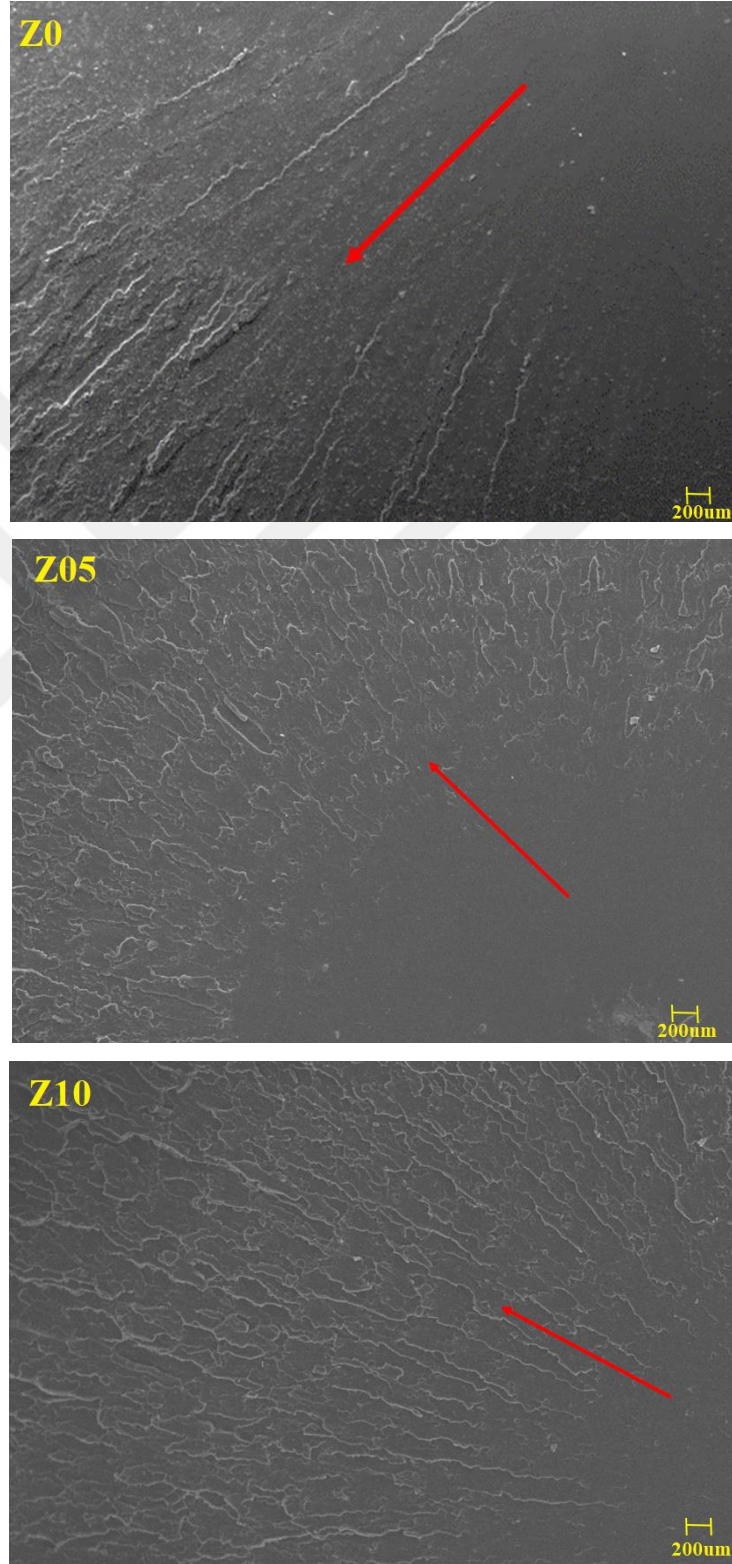
Mirror, mist ve hackle bölgelerinin oluşumu malzemelerin tokluğu, yükleme şartları, çevresel faktörler, takviye elemanı, türevi, miktarı, boyutu ve şekli gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir (Gao et al., 2012). Şekil 7.6'da saf epoksi Z0 numunesine ait mirror, mist ve hackle bölgeleri gösterilmiştir. SEM görürüntüleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'da bulunam Hitachi – SU 1510 cihazı ile alınmıştır.



Şekil 7.6. Çekme numunesi hasar yüzeyi sem görüntüsü, Mirror, Mist ve Hackle bölgeleri

Saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli postkür uygulaması yapılmış nanokompozitlerin çekme deneyleri sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinin SEM aracılığıyla alınmış görüntüleri şekil 7.7' de verilmiştir. Şekil 7.7' ya bakıldığında Z0 numunesinde mirror bölgesinin Z05 ve Z10 numunesine göre genel anlamda daha büyük olduğu görülmektedir. Mist bölgeler incelendiğinde Z10 numunesinde çatlak boylarının diğer numunelerden daha uzun olduğu görülmektedir. Bunlar ek olarak ise numunelerinin hackle bölgelerinde farklılıklar olduğu görülmektedir. Z0 ve Z05 numunesindeki plastik deformasyon bölgesinde gevrek kırılma yüzeyleri Z10 numunesine göre daha genişken, Z10 numunesinde bu bölgeler daha ufak, sık ve yoğun bir şekilde dağılmıştır. Bu duruma bakılarak Z10 numunesinde bu bölgenin Z0 ve Z05'tekine göre daha fazla enerji yuttuğu söylenebilir. Buradan mirror, mist ve hackle bölgelerinin oluşumunun, nanopartikül şekli, miktar ve dağılımına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Ayatollahi, Shadlou, & Shokrieh, 2011; Subhani et al., 2015). Görüntüler incelendiğinde saf epoksi Z0 numunesinin düşük yüzey pürüzlülüğüne sahipken Z05 ve Z10 numunelerindeki yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bununla birlikte Z10 numunesinin en yüksek oranda yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç bir önceki başlıkta açıklanan çekme numunesi sonuçları ile kıyaslandığında en yüksek çekme mukavemetine ve statik tokluğa sahip olan Z10 numunesinin en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olması, çekme testi sonucu hasar yüzeylerinde gözlemlenen

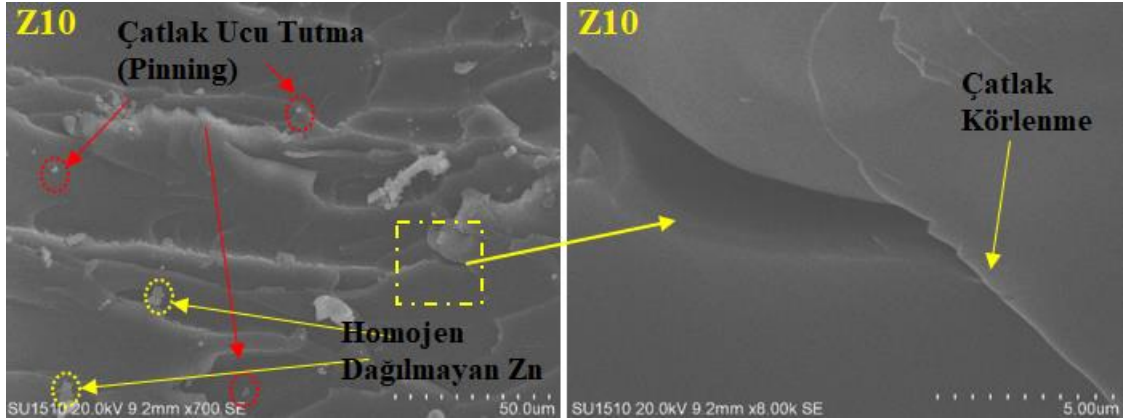
yüzey pürüzlülüğünün artması mukavemet ve tokluk değerlerini olumlu yönde etkilediği yorumu yapılmıştır. Ayrıca Şekil 7.7'de çatlak ilerleme yönleri gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Z0, Z05, Z10 Numuneleri hasar yüzeyleri SEM görüntüleri

Epoksi matrise ilave edilen nanopartiküller kompozit yapı içerisinde bazı mukavemetlendirme mekanizmaları sayesinde mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır. Partikül pull-out, çatlak saptırma (crack deflection), köprüleme (bridging), kayma bantları (shear bands), plastik deformasyon (plastic deformation) ve çatlak ucu pimleme (crack front pinning), çatlak eğilmesi (crack bowing) gibi tokluk artırma işlevi gören çeşitli mekanizmalarına neden olmaktadır (Ghadami, Dadfar, & Kazazi, 2016; Subhani et al., 2015). Epoksi nanokompozitlerin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde bu mekanizmalardan bazılarının gözlemlenmiştir. Bu mekanizmaları inceleyebilmek için özellikle "mist" ve "hackle" bölgelerinden görüntüler alınmıştır.

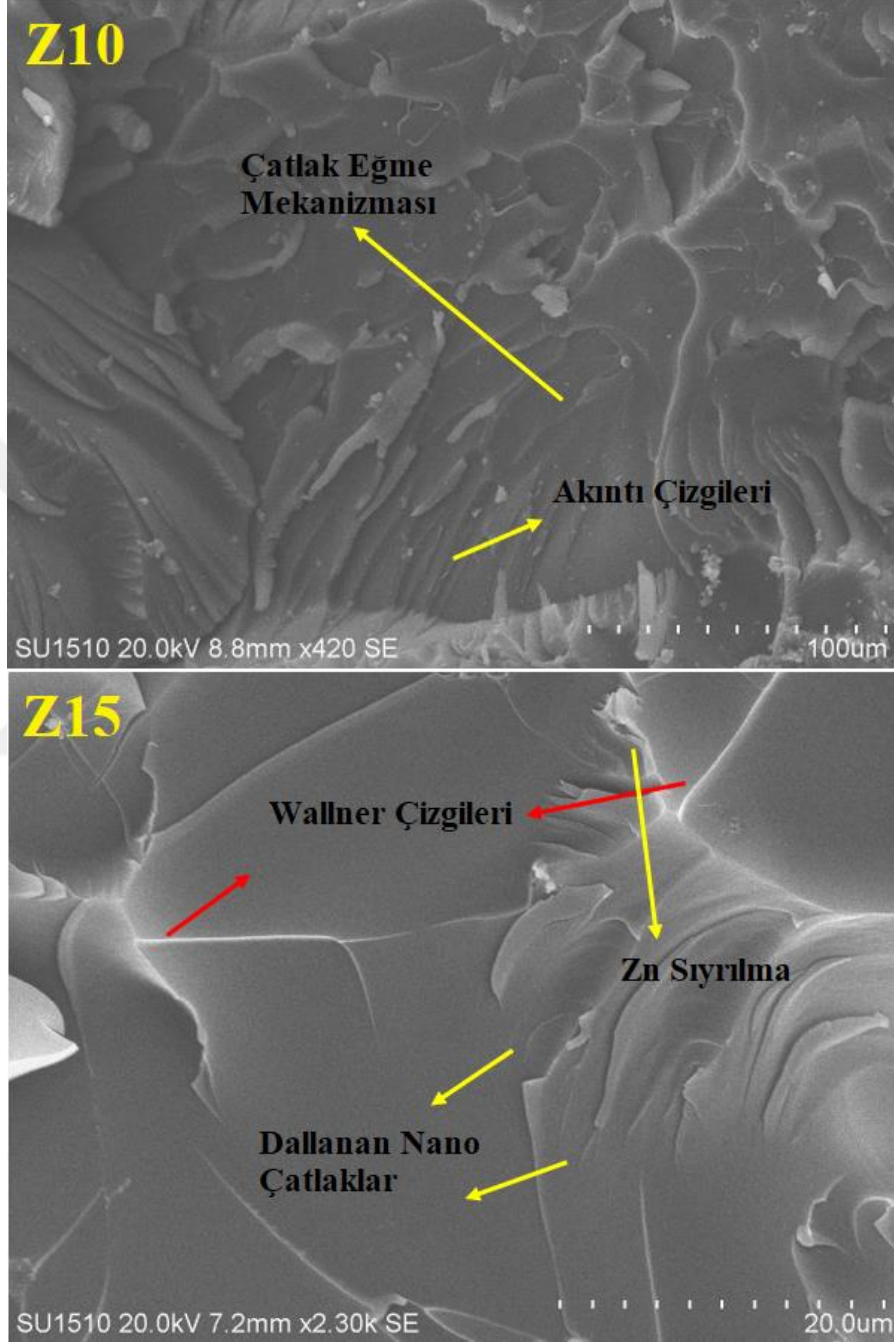
Şekil 7.8'deki hasar yüzeylerinde çatlak ucu pimleme (pinning) , çatlak körleme ve nano çatlak ilerleme mekanizmaları görülmektedir. Çatlak ucu pimleme (pinning) teorisine göre çatlak ilerlediği sırada rijit partiküller arasında çatlağın ön kısmı eğilir bu sırada çatlak ise karşılaştığı nanopartikülün konumunda pimlenmiş gibi kalır ve burada soğrulan enerji artar ve tokluk artmış olur. (Goyat et al., 2015; Wetzels, Rosso, Hauptert, & Friedrich, 2006).



Şekil 7.8. Hasar Yüzeyleri SEM görüntüleri; Çatlak ucu pimleme, çatlak körleme, nano çatlak ilerlemesi

Çatlak eğme mekanizması çatlak yolunu farklı bir yöne eğerek çatlak ilerlemesini geciktirmekte ve kırılmadan önce daha fazla enerji emilimine sebep olarak yapıdaki tokluğu arttırmaktadır (Şekil 7.9) (Halder et al., 2017). Çatlak eğme ve çatlak

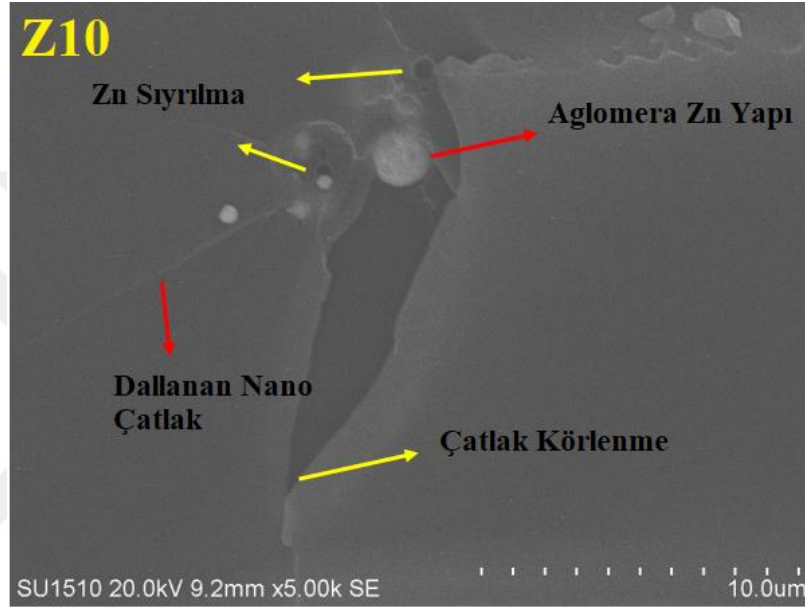
körlenme mekanizmalarının oluşumunun tokluk ve maksimum çekme dayanımını arttırdığı düşünülmektedir(Şekil 7.8 ve Şekil 7.9) (Battistella et al., 2008). Şekil 7.9'de nanopartiküllerin ilerleyen çatlağı, çatlak eğme mekanizmasıyla yönünü farklılaştırdığı görülmektedir.



Şekil 7.9 Hasar Yüzeyleri SEM görüntüleri; Çatlak Eğme Mekanizması, Akıntı Çizgileri, Zn partikül Sıyırılma

Partikül sıyırılması (pull-out) olarak adlandırılan mekanizma; epoksi matris ve nanopartikül arasındaki ayrılmadan dolayı oluşmaktadır. Bu mekanizma zayıf matris-nanopartikül ara yüzeyinden kaynaklanır. (Gojny et al., 2005). Çatlak genişledikçe Zn

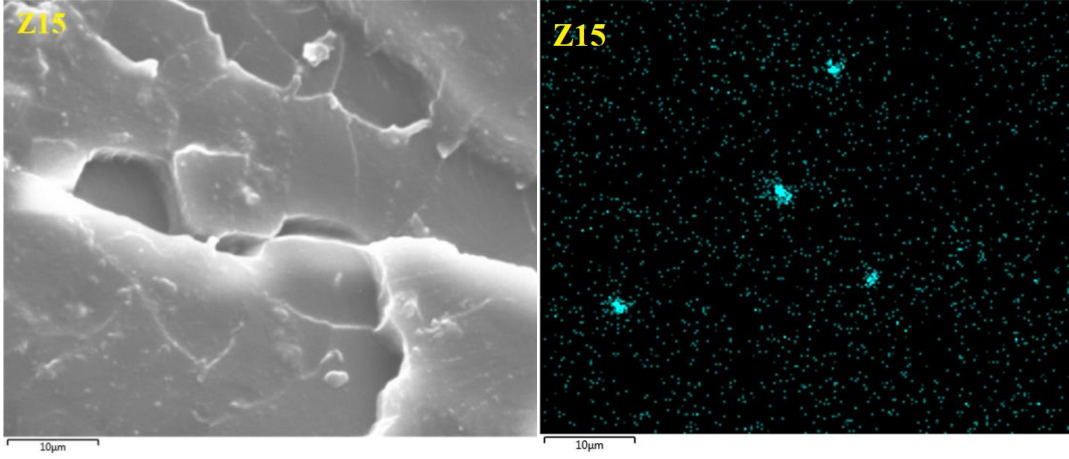
nanopartiküllerin epoksi ile nispeten düşük ara yüzey bağı oluşturması ve gerilimin artması Zn nanopartiküllerin matristen sıyrılmasına neden olmuştur (Şekil 7.9 ve Şekil 7.10). Şekil 7.8 'de gözlemlenen akıntı çizgileri ile lokalize kayma bölgeleri üretilerek malzemenin çatlak başlangıcından önce fazla enerji emilimi sağlanır ve bu durum çatlak ilerlemesini durdurabilir ve ayrıca akıntı çizgilerinin ortaya çıkması yüzey pürüzlülüğünü artırır ve bu durum yüzey pürüzlülüğü arttıkça tokluğun arttığının ispatıdır. (Halder et al., 2017)



Şekil 7.10 Hasar Yüzeyleri SEM görüntüleri; Çatlak körleme, Zn sıyrılma, dallanmış nanoçatlak yapıları

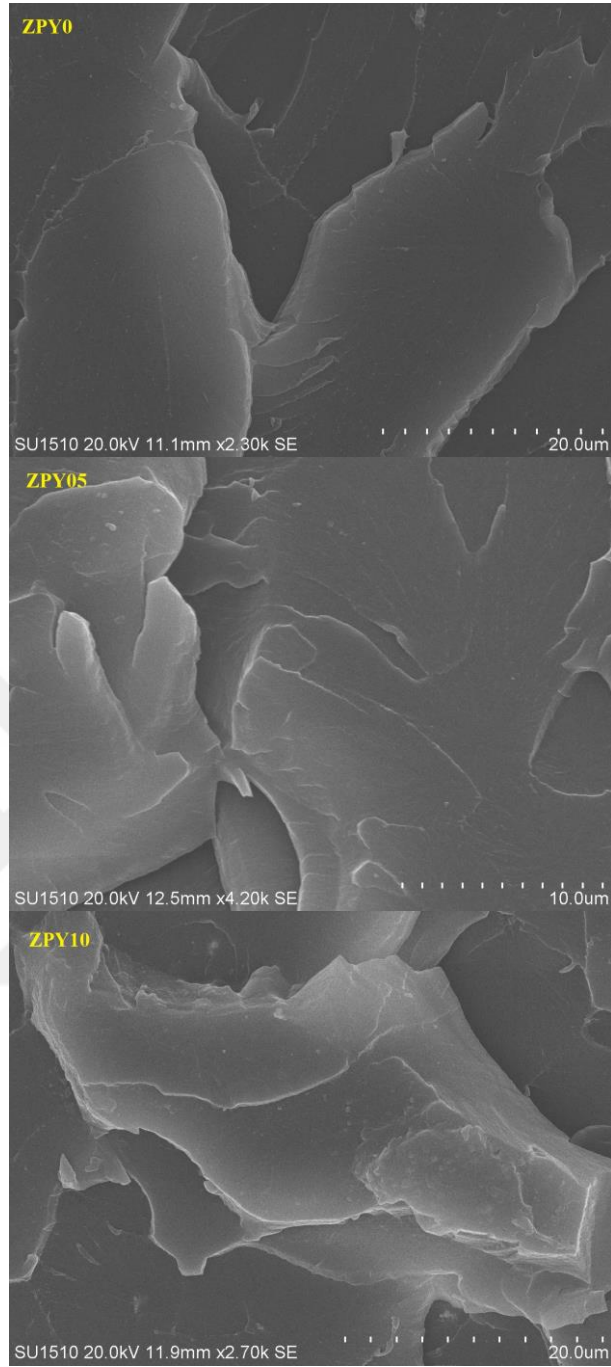
Şekil 7.11 'de Z15 numunesine ait bir hasar yüzeyinin EDX analizi verilmiştir. EDX analizi SEM görüntülerinin alındığı Hitachi – SU 1510 cihazında bulunan X ışınları (EDX- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'da yapılmıştır.

Bu analiz ile epoksi reçine içerisinde Zn nanopartiküllerin genel anlamda iyi dağılım sağlandığı gözlemlenmiş, bununla beraber çeşitli bölgelerde aglomera yapılar oluşturduğu da tespit edilmiştir.



Şekil 7.11 Z15 numunesine ait EDX analizi

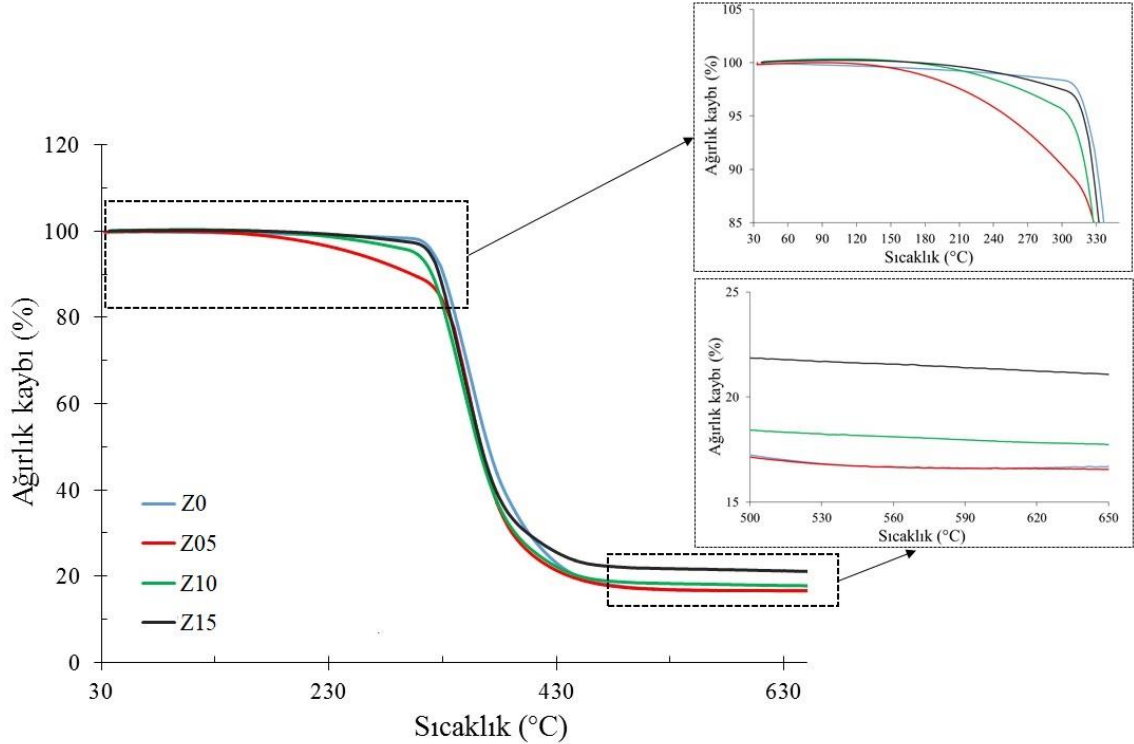
Şekil 7.12’de kürlenmemiş numunelerin çekme testi sonucu oluşan hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Yüzeyler incelendiğinde kürlenmiş numunelere göre kırılma yüzeylerinde oyuk pürüzlülüklerine daha az rastlandığı gözlemlenmektedir. Şekil 7.12’de ZPY0 numunesine bakıldığında ayrılma yüzeylerinin son derece gevrek olduğu gözlenmekte iken ZPY05 ve ZPY10 numunelerinde kırılmanın daha pürüzlü bir hasar yüzeyi meydana getirerek sünek bir davranış gösterdiği görülmüştür. Bunun nedeninin epoksi reçineye eklenen Zn nanopartiküllerin reçine içerisinde katalitik etki oluşturarak kürlenmeye sebebiyet verdiği için olduğu düşünülmektedir. Çekme deneyi sonuçları da bu düşünceyi destekler niteliktedir.



Şekil 7.12 Kürlenmemiş numunlerin hasar yüzeyleri SEM görüntüleri (a)Nanopartikül ilavesiz numune b) ağırlıkça %0,5 Zn katkılı numune c) ağırlıkça %1 Zn katkılı numune)

7.1.4. Nanokompozitin TGA Analizleri

Saf ve Nanoçinko ilaveli epoksi postkürü ve postkürsüz numunelerin kompozit numunelerinin termal kararlılıkları TGA grafikleri ile tespit edilmiştir (Şekil 7.13 ve Şekil 7.14). Tüm numunelerin termal kararlılıkları 30 °C – 800 °C sıcak aralığında 10 °C/dk. ısıtma hızında azot ortamında termogravimetrik analiz (TGA) (Setaram – Labsys Evo) cihazında Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'da yapılmıştır. Malzemelerin istatistiksel ısı direnç indeksi sıcaklığı (T_s), %5, %10 ve %50 kütle kaybının gerçekleştiği sıcaklıklar (T_{d5} , T_{d30} , T_{d50}) ve sıcaklık 800°C olduğunda kalan kömürleşme miktarı gibi parametreler TGA analizlerinden elde edilebilmektedir (Jin, Ma, & Park, 2011; Jin & Park, 2012; Park & Jin, 2004). TGA analizleri sonucu elde edilen sayısal sonuçlar Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4'te verilmiştir.



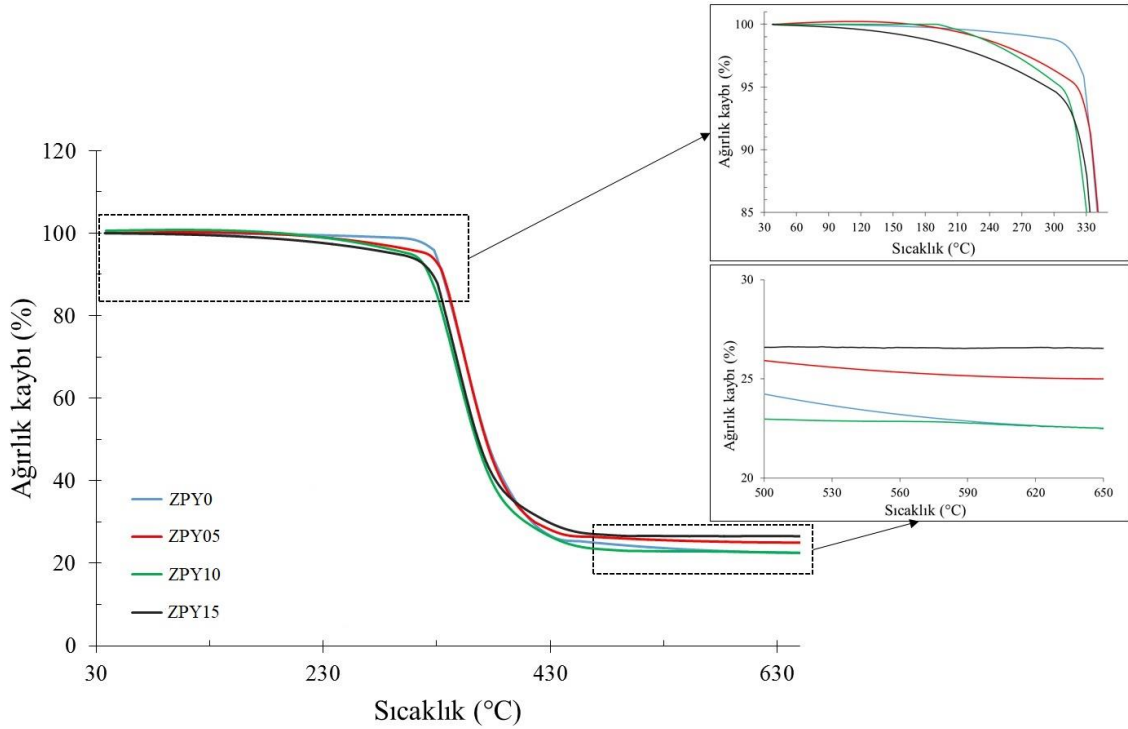
Şekil 7.13 Postkür uygulanmış numunelerin TGA grafiği

Çizelge 7.3 incelendiğinde T_{d5} değerinde partikül ilavesi arttıkça düzenli bir azalma olduğu gözlemlenmektedir. Aynı azalma istatistiksel ısı direnç indeksi sıcaklığı (T_s)

değerinde de gözlemlenmektedir. Bu azalmanın sebebinin partikül ilavesi ile meydana gelen aglomera yapılardan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra aynı çizelge incelendiğinde T_{d30} değerinde ağırlıkça %0,5 Zn nanopartikül ilaveli nanokompozitte artış olduğu gözlemlenmiş ve bunun üzerindeki parametrelerde yine düşüş gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre ağırlıkça %0.5'lik nanopartikül ilavesinin kompozit yapının termal özelliklerinde iyileştirme meydana getirdiği söylenebilir. (Gull et al., 2015) Ancak aglomera yapılar boşluk gibi davranarak genel anlamda termal kararlılıkları düşürmüştür.

Çizelge 7.3. Saf epoksi ve Zn ilaveli postkürümlü nanokompozitlerin TGA grafiklerinden elde edilen T_{d5} , T_{d30} , T_{d50} , T_s , ve 800 °C'de kömürleşme miktarları

Numune	Deneysel sonuçlar				800 °C'de kömürleşme miktarı (%)
	T_{d5} (°C)	T_{d30} (°C)	T_{d50} (°C)	T_s (°C)	
Z0	328.82	354.22	373.88	168,58	22.84
Z05	321.45	354.35	373.15	167,18	25.4
Z10	306.35	344.85	364.51	161,43	22.25
Z15	293.80	347.12	366.35	159,63	26.67



Şekil 7.14. Postkür uygulanmamış numunelerin TGA grafiği

Çizelge 7.4'te postkür uygulanmamış Zn nanopartikül/epoksi kompozitlerin TGA testleri sonucu elde edilen sayısal değerleri verilmiştir. Bu çizelge incelendiğinde postkürsüz numunelerde olduğu gibi saf epoksiye göre Zn nanopartikül ilaveli numunelerin termal kararlıklarında düşüşler görülmüştür. Sayısal değerler incelendiğinde T_{d5} ve T_s değerleri için en düşük sonuçlar ağırlıkça %0.5 nanopartikül ilaveli numunede görülmüştür. Bu parametrede yüksek oranda aglomera yapıların olduğu ve nanopartikülün matris içerisine homojen dağılmadığı düşünülmektedir. Bu şekilde düşünülmesinin bir diğer nedeni ağırlıkça %0.5'lik nanokompozitte T_{d5} değeri en düşük değer iken T_{d30} değeri saf epoksiden sonra en yüksek değeri işaret etmektedir. Buna göre yanma devam ederken karşılaşılan ani aglomera yapıların boşluk gibi davranarak yanmayı hızlandırdığı düşünülmektedir. Saf epoksiden sonra en iyi termal kararlılığı ağırlıkça % 1.5 Zn nanopartikül içeren numune göstermiştir.

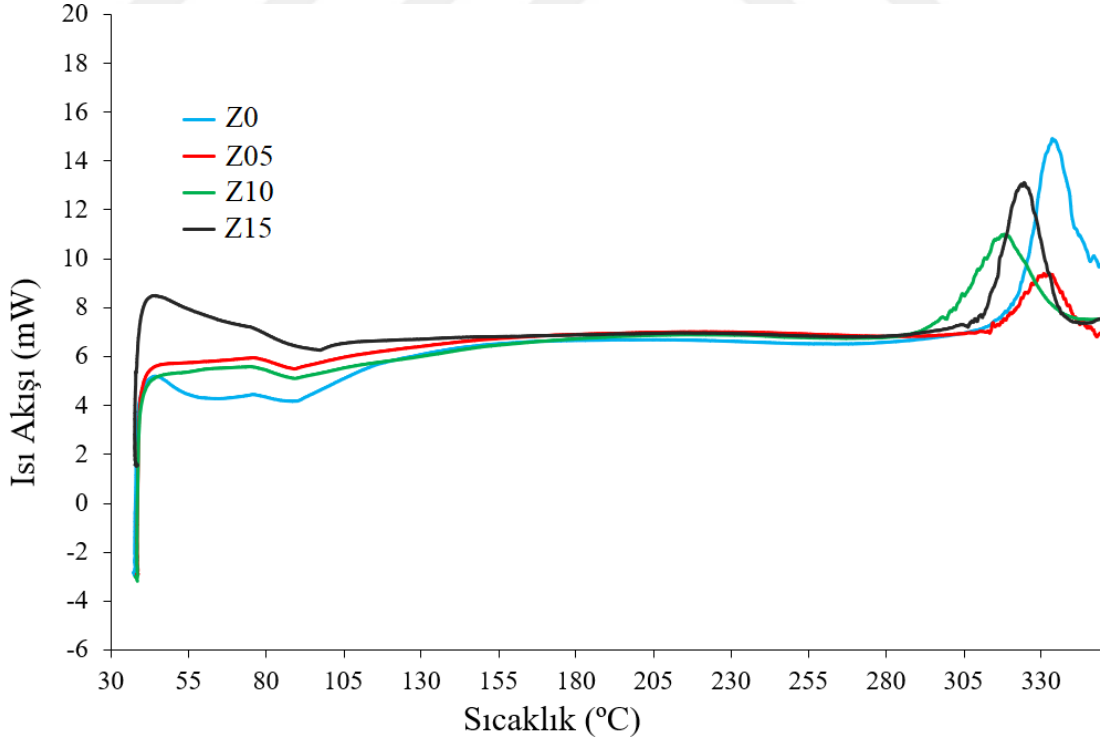
Postkürü ve postkürsüz numuneler kendi arasında kıyaslandığında Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4.'e göre genel olarak postkürü numunelerin termal kararlılıklarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra 800°C'deki kömürleşme sıcaklıklarından sonra kalan malzeme miktarı postkür uygulaması yapılmış numunelerde daha fazladır. Bunun nedeninin kürlenme ile meydana gelen çapraz bağların postkürsüz numunelere göre postkürü numunelerde daha fazla olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 7.4. Saf epoksi ve Zn ilaveli postkürsüz nanokompozitlerin TGA grafiklerinden elde edilen T_{d5} , T_{d30} , T_{d50} , T_s , ve 800 °C'de kömürleşme miktarları

Numune	Deneysel sonuçlar				800 °C'de kömürleşme miktarı (%)
	T_{d5} (°C)	T_{d30} (°C)	T_{d50} (°C)	T_s (°C)	
ZPY0	321.38	350.87	370.11	166,14	17.24
ZPY05	251.65	346.58	363.39	151,21	16.75
ZPY10	305.68	342.48	361.42	160,60	17.62
ZPY15	318.33	345.83	363.98	164,06	20.72

7.1.5. Nanokompozitlerin DSC Analizleri

Epoksi reçine içerisine eklenen farklı oranlardaki nanoçinkonun kürlenme davranışına etkileri diferansiyel tarama kalorimetre analizi (Setaram – Labsys Evo) cihazı ile 40°C'den 350°C'ye kadar artan sıcaklık koşullarında 10°C/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Analiz Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'da yapılmıştır. Analiz sonucu elde edilen DSC eğrileri ise Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'te verilmiştir. Numunelerin camsı geçiş sıcaklıkları (Tg) ve erime sıcaklıkları (Tm) değerleri grafiklerden tespit edilerek Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.6'da verilmiştir. Camsı Geçiş Sıcaklığı, "Tg" polimerik malzemelerin temel ayırt edici özelliklerinden birisidir. Maddenin camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladığı sıcaklık sınırı olarak tanımlanır Erime sıcaklığından her zaman daha düşüktür. Camsı geçiş sıcaklığını etkileyen faktörler; dallanma ve çapraz bağ. Çapraz bağ varsa bağ dönmesi zorlaşır ve Tg artar. Tüm numuneler endotermik reaksiyon göstermiştir.

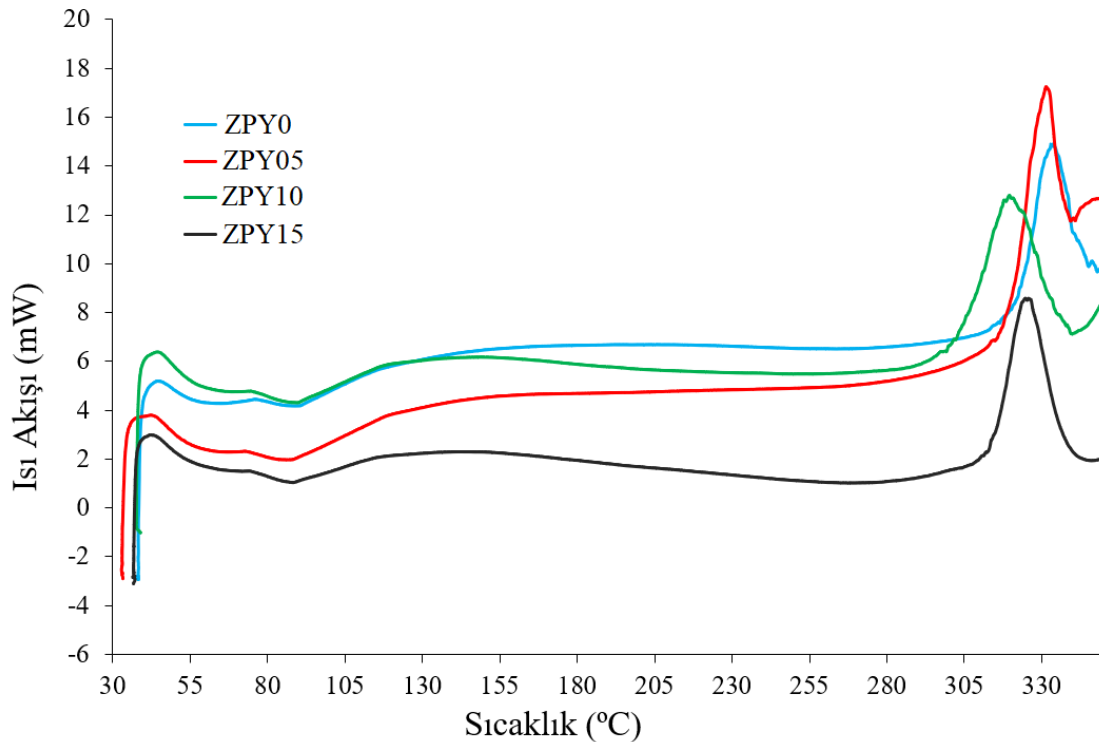


Şekil 7.15. Saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli postkürümlü kompozitlerin DSC eğrileri

Çizelge 7.5. Saf Epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli postkürümlü kompozitlerin camsı geçiş ve rime sıcaklıkları

Numune	T _g Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	T _m Erime Sıcaklığı (°C)
Z0	90.48	333,63
Z05	89.21	329,28
Z10	89.17	317,41
Z15	98.31	323,64

Moleküler ağırlık, matris partikül ara yüzey alanı, çapraz bağ yoğunluğu ve partikül yönelmesi gibi faktörler, termoset matrisli nanokompozitlerde genel anlamda; camsı geçiş sıcaklığı T_g değerinin değişmesinde önemli rol oynamaktadır (Sun, Zhang, Moon, & Wong, 2004). Polimer matrisin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) polimerin serbest hacmine bağlıdır. Kütle halinde moleküllerin hareketi boşluk veya boşlukların varlığı ile ilişkilidir (Jana, Salehi-Khojin, & Zhong, 2007). Çizelge 7.5 incelendiğinde ağırlıkça % 1,5 Zn nanopartikül ilavesinin saf epoksiye göre camsı geçiş sıcaklığını yaklaşık %10 değerinde artırdığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni partikül ilavesi ile çapraz bağ yoğunluklarının artması olarak yorumlanmaktadır. Bununla birlikte matris içerisindeki nanopartiküller çekirdeklenme bölgeleri oluşturması polimer matrisin kristalleşmesini artırarak T_g'nin yükselmesine sebep olmaktadır. (Ma, Siddiqui, Marom, & Kim, 2010).



Şekil 7.16. Saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli postkürsüz kompozitlerin DSC eğrileri

Çizelge 7.6. Saf Epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli postkürsüz kompozitlerin camısı geçiş sıcaklığı

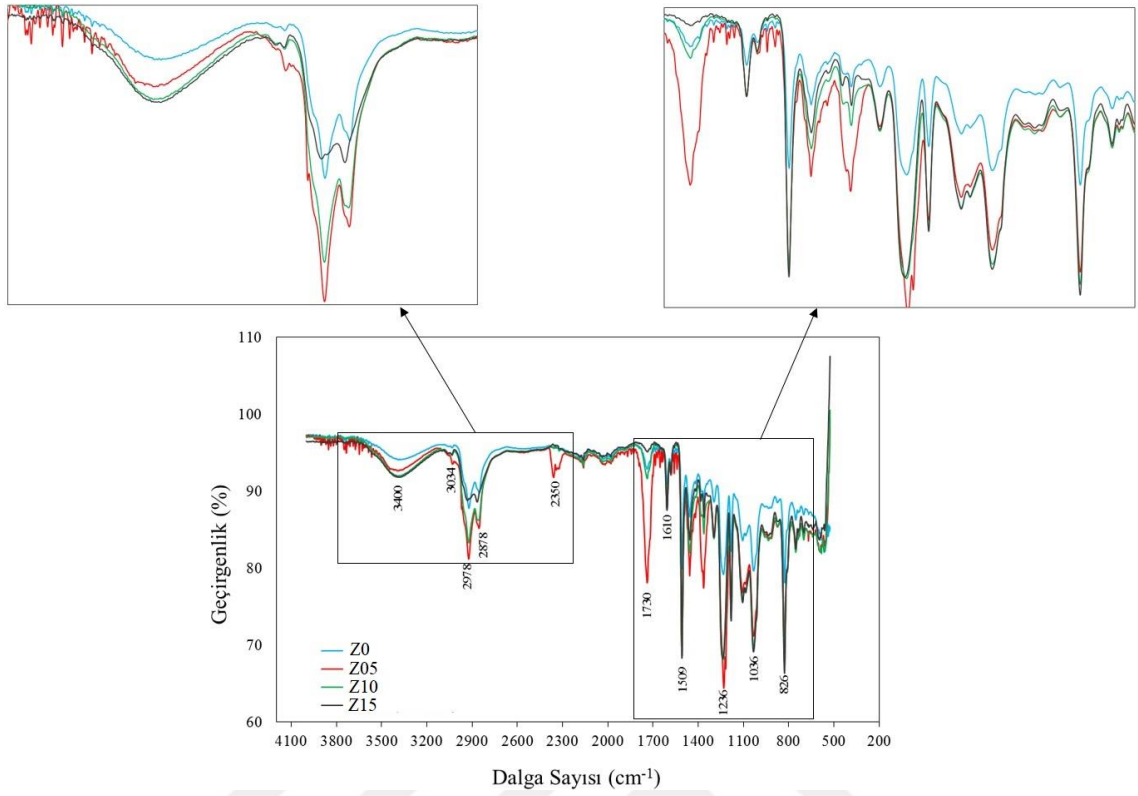
Numune	T _g Camısı Geçiş Sıcaklığı (°C)	T _m Erime Sıcaklığı (°C)
ZPY0	88.84	333,06
ZPY05	86.17	331,38
ZPY10	89.56	319,56
ZPY15	88.33	325,79

Postkürsüz numunelerin DSC analiz sonuçları elde edilen camısı geçiş sıcaklıkları T_g ve erime sıcaklıkları T_m verileri Çizelge 7.6.'da verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ZPY10 numunesine göre T_g camısı geçiş sıcaklığını artırdığı gözlemlenmiştir. Epoksi reçine içerisine ilave edilen nanopartiküller ile matris; reçinenin kür kinetiğindeki hidroksil gruplarının nanopartiküller üzerindeki katalitik etkisinden dolayı etkilenebilir. (Ji, Zhang, Rong, Wetzel, & Friedrich, 2004) Postkür uygulaması olmadan sadece nanopartikül ilavesinin camısı geçiş sıcaklığını artırması; nanopartikül ilavesinin epoksi reçine ile etkileşime girerek katalitik bir etki vermesi ve bu durumda kürlenmeye sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

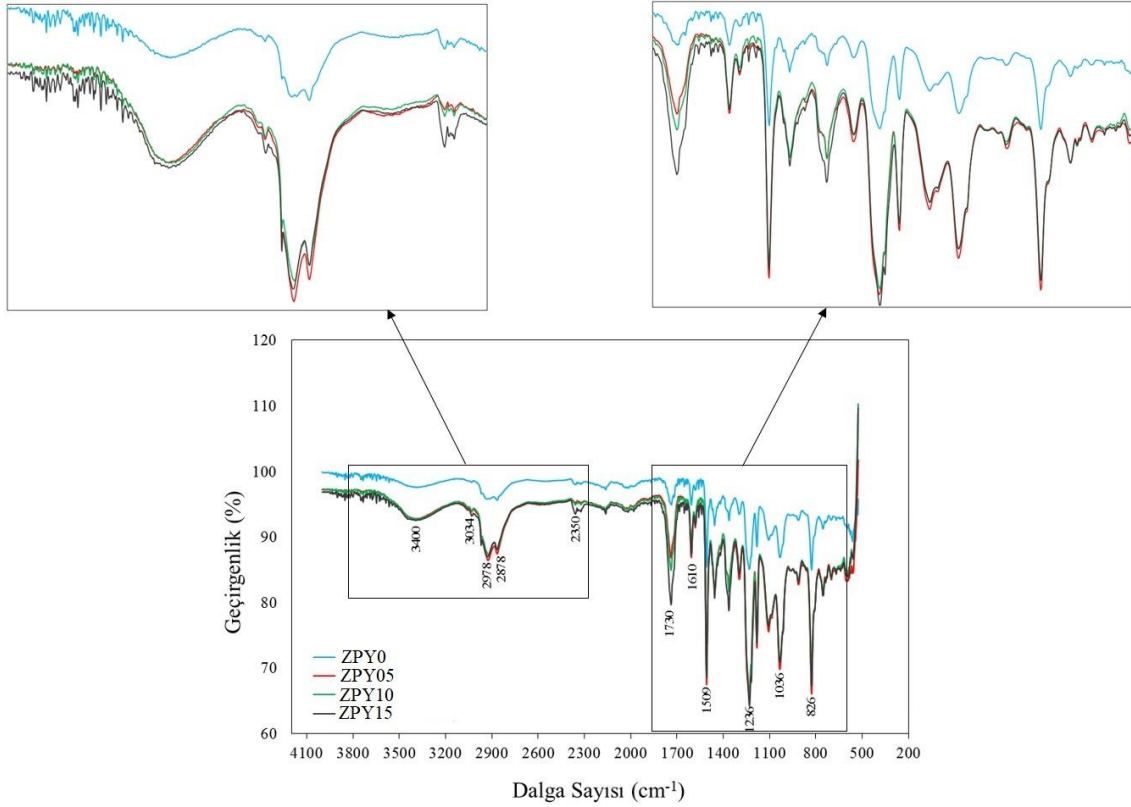
7.1.6. Nanokompozitin FT-IR Analizleri

Fourier Dönüşümü Infrared (FT-IR) spektrum ölçümleri, Thermo Scientific – Nicolet İS5 ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM)'da yapılmıştır. Yapılan tüm analizler 500 ile 4000 cm⁻¹ arasında, oda sıcaklığında ve 2cm⁻¹ hassasiyet ile bulunmuştur.

Numunelerin bağ yapılarını incelemek amaçlı yapılan FT-IR analizi ile post kür uygulanmış ve uygulanmamış olmak üzere saf epoksi ve epoksi nanokompozitlerin FT-IR spektrumları Şekil 7.17 ve Şekil 7.18'de verilmiştir. Buna ek olarak ise FTIR analizinden elde edilen kimyasal grupların farklı gerilim titreşimleri ise Çizelge 7.7'de verilmiştir (Cholake et al., 2014; González, Cabanelas, & Baselga, 2012; Jana & Zhong, 2007).



Şekil 7.17 Kürlenmiş Saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli kompozitlerin FT-IR spektrumları



Şekil 7.18. Kürlenmemiş Saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli kompozitlerin FT-IR spektrumları

Çizelge 7.7. Saf epoksi ve epoksi nanokompozitlerin farklı kimyasal grupların gerilim titreşimleri

Dalga sayısı (Bantlar) (cm ⁻¹)	Karakteristik Grup
3340-3500	Hidroksil (-OH) gerilmesi
3060	Oksiran halkasının C-H simetrik gerilmesi, N-H gerilmesi
2960-2870	-CH ₂ ve CH aromatik ve alifatik C-H gerilmesi
2349	-CO ₂
1607	Aromatik halkaların C=C gerilmesi
1509	Aromatik halkaların C-C gerilmesi
1236	-C-C-O-C gerilmesi
1036	Eter grupların C-O-C gerilmesi
828	Aromatik absorbance

Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de FTIR spektrumları incelendiğinde karakteristik bantların oluştuğu ve spektrum üzerinde yeni piklerin meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Yeni piklerin oluşmaması, nanopartikül ve epoksi matris arasında kimyasal bir etkileşim oluşmadığı, bundan ziyade fiziksel bir etkileşim olduğunun göstergesidir. (Barletta, Vesco, Puopolo, & Tagliaferri, 2016) Her iki şekile bakıldığında da epoksi nanokompozit numunelerde, saf epoksiye kıyasla bant kaymalarının olduğu ve nanopartikül ilave miktarına göre absorpsiyon titreşim pik yoğunluklarının farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Postkür uygulanmış numunelere göre postkür uygulanmamış numunelerin bant kaymaları oldukça büyük orandadır. Buradan, bant kaymalarının varlığının epoksi reçine ile nanopartiküller arasında etkileşimlerin oluştuğu gözlenmektedir. Nanopartiküllerin epoksi matris içerisine katkısı, nanopartikül epoksi matris etkileşimi ile ortaya çıkaran absorpsiyon yoğunluğunda artma ile sonuçlanmaktadır (Dhoke, Sinha, & Khanna, 2009). Nanopartikül ilavesinin fonksiyonel gruplar arasında meydana gelen kimyasal etkileşimi sağlayarak polimerleşmede etkili olduğu özellikle postkürsüz numunelerde net bir şekilde gözlemlenmektedir. İlave edilen nanopartikül ve epoksi arasında kuvvetli adezyon ve esnek bir ara yüzey kazanılarak, bu durumun ara yüzeylerde dayanımı ve kırılma tokluğunu arttırdığı kanısını oluşturmuştur (Jalili, Moradian, Dastmalchian, & Karbasi, 2007). Bu etkileşimin kırılma tokluğunu ve mekanik özellikleri iyileştirmede önemli faktör olduğu düşünülmektedir. Nanokompozit numunelerde absorpsiyon

titreşim pik yoğunlukları sırası ile en fazla ağırlıkça %0,5 Zn, %1 Zn ve %1,5 Zn ilaveli nanokompozitlerde görülmüştür. Nanopartikül miktarının artmasıyla absorpsiyon pik yoğunluklarında düşüşler görülmüş ancak bununla beraber tüm pik noktalarının saf epoksiden daha yüksek olduğuda görülmüştür. Nanopartikül miktarının artmasıyla aglomera olan nanopartiküller küreleşme esnasındaki otokatalitik etkiyi azaltabilmektedir (Rajabi, Marzban, & Derakhshan, 2014).

7.2. Zn Nanopartiküllerin Kaplama Özelliklerine Etkisi

7.2.1. Kaplama Mekanik Özellikler

Kalınlık Ölçümü;

Kaplamaların kalınlık ölçümleri her bir parametre için 10 farklı noktadan alınarak minimum ve maksimum kalınlık değerleri ve alınan ölçümlere göre kaplamaların ortalama kalınlık değerleri bulunmuştur.

Çizelge 7.8. Saf Epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli epoksi kompozit kaplamaların kalınlık ölçümleri

Numune	Minimum Kalınlık (μm)	Maksimum Kalınlık (μm)	Ortalama Kalınlık (μm)
Z0	68.2	88.4	72.6
Z05	69.3	93.1	74.5
Z10	77.4	108.6	86.9
Z15	81.6	124.7	96.7

Çizelge 7.8’de görüldüğü üzere epoksi nanokompozit içerisine eklenen partikül oranı arttıkça kaplama kalınlığında da düzenli bir artış olmuştur. Bunun nedeninin partiküllerin aglomera etkisinden ya da kürlenme sırasında partikül yoğunluğunun yüksek kaldığı bölgelerdeki çekme-topaklanma etkisinden olduğu düşünülmektedir. (Shi et al., 2009)

Darbe Testi,

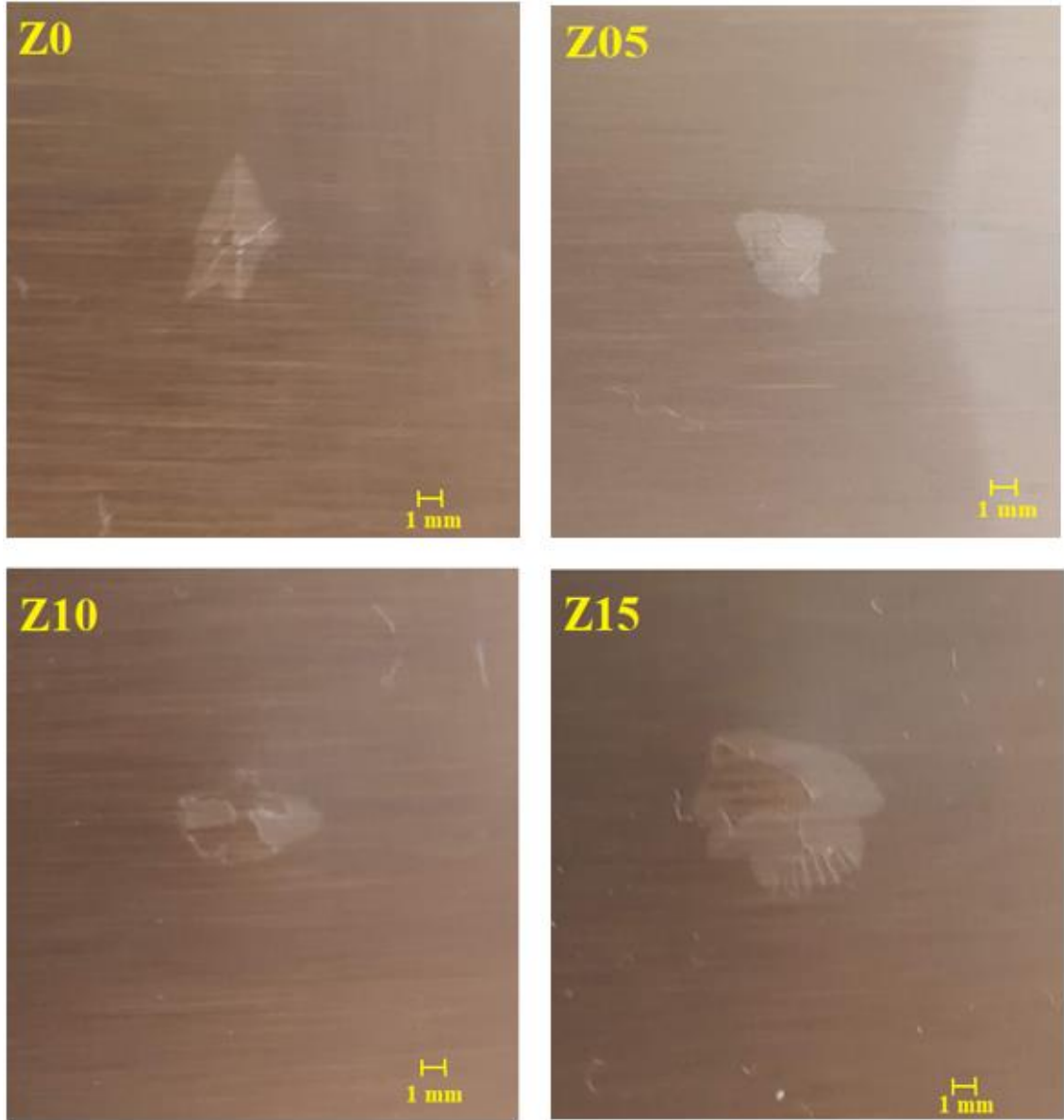
Kaplamaların herhangi darbe anında yüzeye tutunumunu incelemek, kaplama-ve kaplanan substrat yüzeyleri arasındaki tutunumun kuvvetini gözlemlemek amacı ile

kaplanan yüzeylere darbe testi uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre numunelerin hangi yükseklikte yırtılma-çatlamaya başladığı, yüzeye vurma enerjisi ve darbe sonrası oluşan hasarın yüzey alanı Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.9. Darbe Testi sonrası saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli kompozitlerin çatlamaya başladığı darbe atım yüksekliği

Numune	İlk yırtılmanın olduğu atım yüksekliği (cm)	Yüzeğe Vurma Enerjisi (Joule)	Yırtılma yüzey alanı(mm ²)
Z0	50	4,41	15
Z05	60	5,2	13
Z10	70	6,18	20
Z15	90	7,95	24

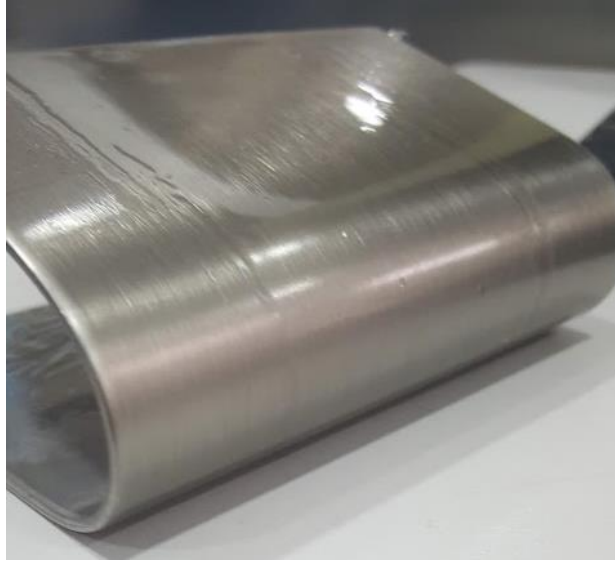
Test esnasında kaplanmış yüzeylere düşürülen ağırlığın kütlesi 900 gramdır. Darbe testi sonrası boya üzerindeki yırtılmaya ait görseller Şekil 7.19’da verilmiştir. Test sonuçlarında göre Z0 numunesi 50 cm yükseklik ve 4,41 J enerji, Z05 numunesi 60 cm ve 5,2 J enerji ve Z10 numunesi 70 cm yükseklik ve 6,18 J enerji ile hasara uğramıştır. Darbe testi sonuçlarına göre en yüksek darbe direncini; 90 vükseklik ve 7,95 enerji ile Z15 numunesi göstermiştir. Bu sonuca göre reçine içerisindeki Zn nanopartikül miktarının artması ile kaplamanın darbelere karşı direncinin arttığı ve kaplama yüzeyine daha kuvvetli tutunum gösterdiği yorumu çıkarılmıştır. Araştırmacılar epoksi kaplamaların zayıf özelliklerinden olan darbe direncini matris içerisine nanopartikül ilavesi yaparak arttırılabileceğini belirtmişlerdir (Haeri, Ramezanzadeh, & Asghari, 2017). Bununla beraber meydana gelen hasarların yüzey alanlarına bakıldığında en yüksek hasar alanı Z15 numunesinde, en düşük hasar alanı ise Z10 numunesinde görülmüştür.



Şekil 7.2. Darbe testi sonrası numunelerin çatlayan yüzeyleri; Z0,Z05,Z10,Z15

Bükme Testi;

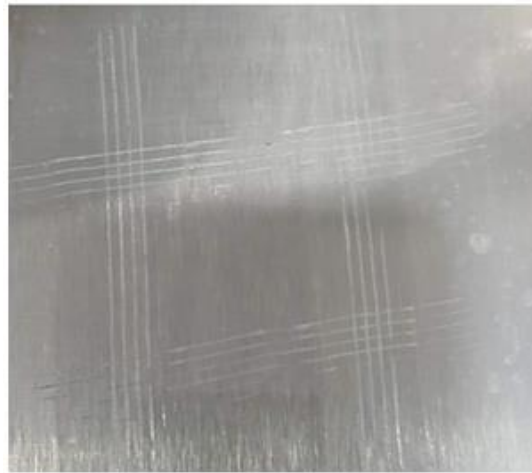
Kaplama filminin elastikiyetini ölçmek için yapılan bükme testine ait örnek bir numunenin test sonucu Şekil 7.20’de gösterilmiştir. Bükme çapı 150mmdir. Test sonucuna göre saf epoksi de dahil olmak üzere hiçbir numunede herhangi bir çatlama ya da yırtılmaya rastlanmamıştır. Buradan kaplama malzemesinin yüzeye çok iyi derece tutunduğu ve yeterli düzeyde esnekliğe sahip olduğu yorumu yapılmıştır.



Şekil 7.20. Bükme testi uygulanmış numune

Kafes Çizgi Testi;

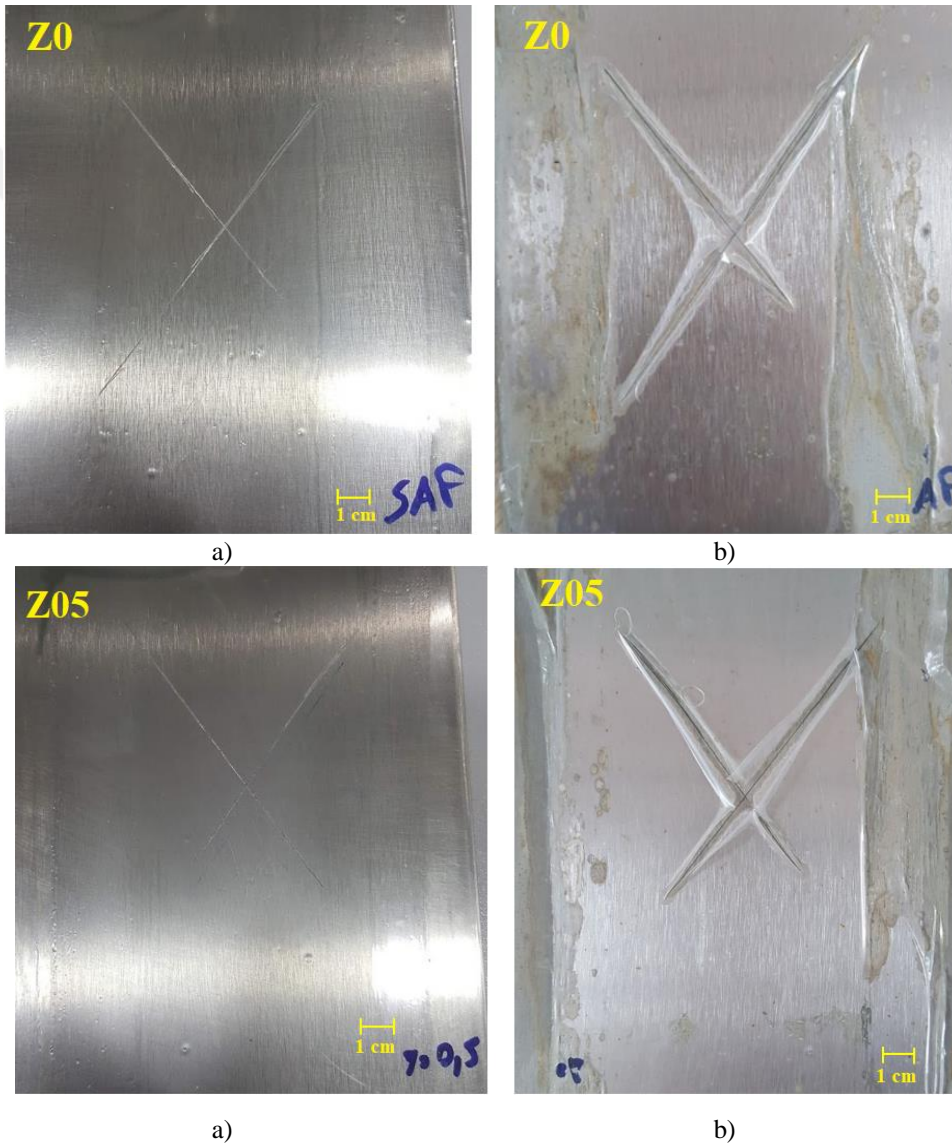
Yapılan saf epoksi ve epoksi nanokompozit kaplamanın paslanmaz çelik yüzeye tutunabilme sınıfını belirlemek amacı ile kafes çizgi testi yapılmıştır. Test sonuçları ASTM D 3359 (Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test) standardına göre yorumlanmıştır. Yapılan test sonucu tüm parametrelerde bir dökülme oluşmamış ve bunun sonucu olarak numune üzerinde oluşan izler 5B sınıfı olarak değerlendirilmiştir.(Bölüm 6, Çizelge 6.6) Şekil 7.21’da test sonucu görüntüsü bulunmaktadır. 5B sınıfı kaplamada test sonrası bir dökülme olmadığı anlamına gelmektedir. 5B sınıfı sonucuna göre kaplama önce yüzey pürüzlülüğünün uygun olduğu ve kaplamanın yüzeye istenen düzeyde yapıştığını göstermektedir.

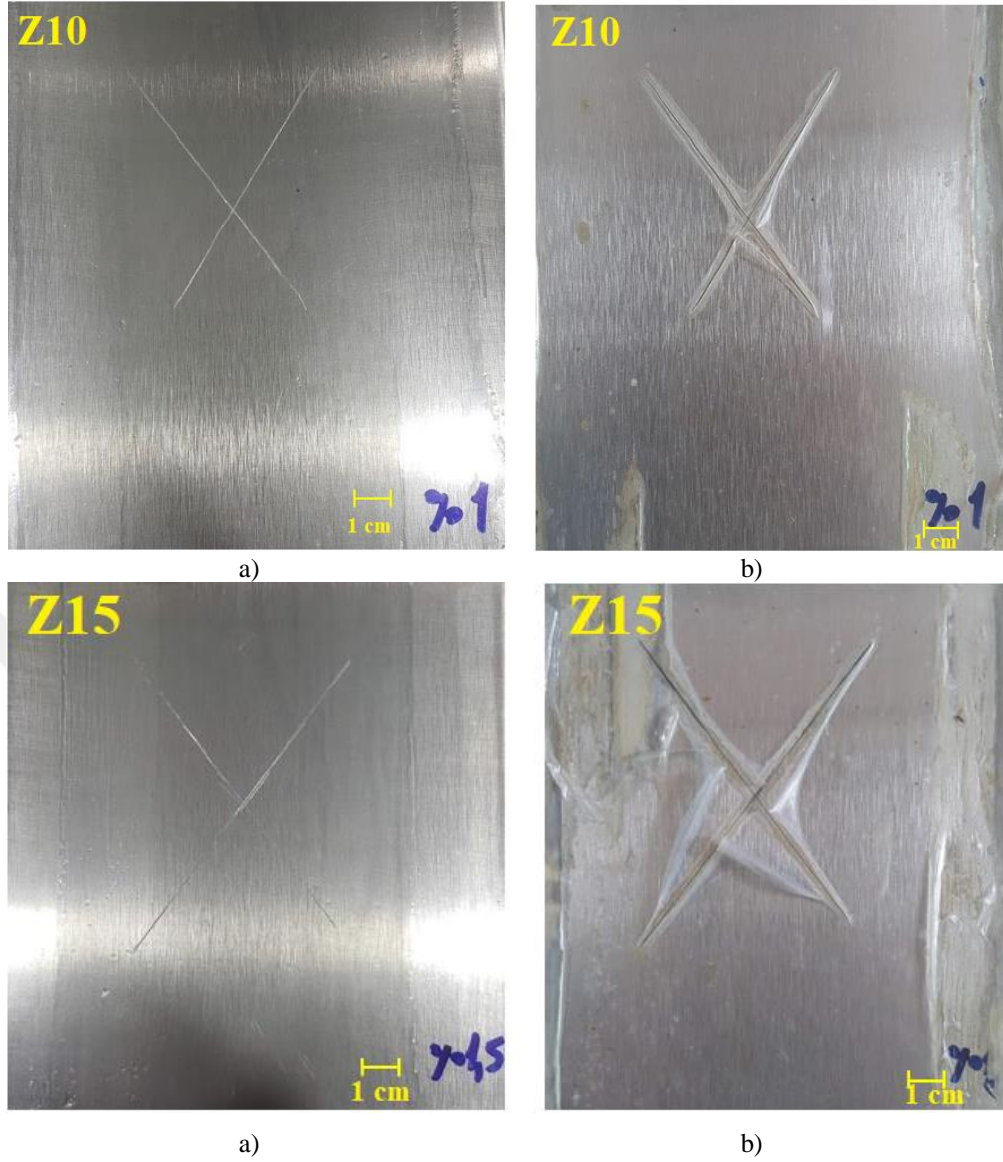


Şekil 7.21. Z0 numunesi kafes çizgi testi sonucu

7.2.2 Kaplama Korozyon Testi

Kaplamaların korozyon dirençlerinin incelemek için ağırlıkça %10'luk HCl asit çözeltisi içerisinde 300 saat tutulan saf epoksi ve Zn nanopartikül ilaveli kompozit kaplamaların korozyon testi sonrası görüntüleri Şekil.7.20'de verilmiştir. Görüntüler kaplama numuneleri solüsyon içerisinde çıkarılıp oda sıcaklığında kurutulduktan sonra çekilmiştir. Korozyon miktarlarını yorumlamak için kaplama üzerindeki baloncuklar incelenmiş ve atılan çiziklerden korozyonun ne kadar yayıldığı ölçülmüştür.





Şekil 7.3. Korozyon testi öncesi (a) ve sonrası (b) kaplanmış yüzeylerin görüntüsü (Z0; saf epoksi kaplama, Z05; ağırlıkça %0.5 Zn nanokompozit kaplama, Z10; ağırlıkça %1 Zn nanokompozit kaplama, Z15; ağırlıkça %1.5 Zn nanokompozit kaplama)

TS 9260 EN ISO 4628 standardına göre kaplamaların korozyon testi sonrası kabarcık sınıflandırmaları Çizelge 7.10'da verilmiştir. Kabarcık testi; yapılan kaplamanın gözeneklerinde kaplama altına ne miktarda geçirgenlik gerçekleştirdiğini göstererek kaplamanın fiziksel olarak korozyon tutma eğilimine bir yorum getirebilmektedir (Bagherzadeh & Mahdavi, 2007).

Çizelge 7.10. Korozyon testi sonrası numunelerin kabarcık testi sonuçları

Numune	Kabarcık Yoğunluğu	Kabarcık Çapı
Z0	2	S3
Z05	1	S2
Z10	1	S1
Z15	1	S3

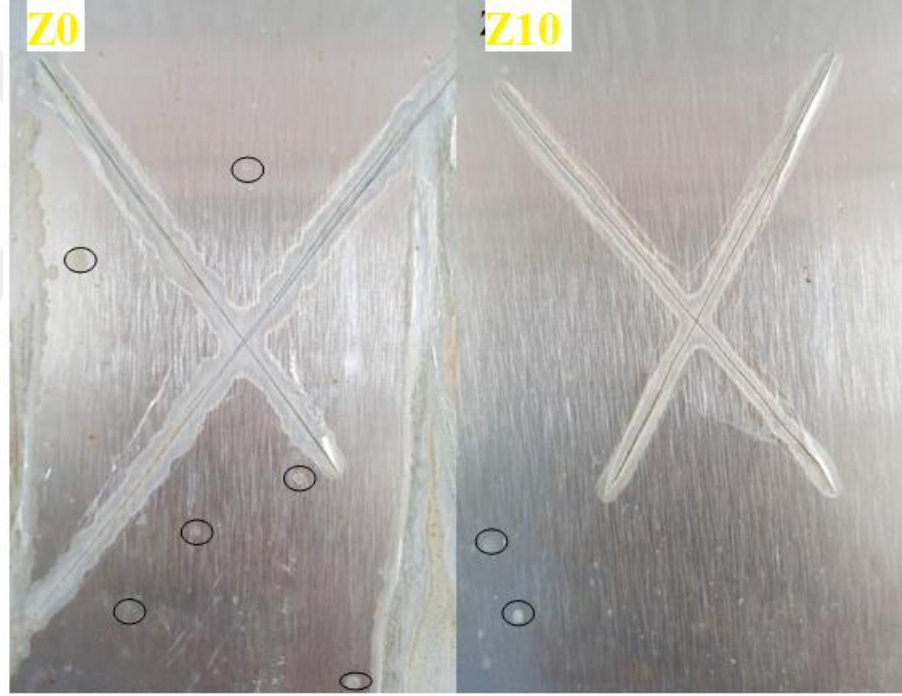
Şekil 7.20'ye göre kaplanan yüzeylerin korozyon testi sonrası görüntüleri incelendiğinde korozyona karşı en dayanımlı numunenin ağırlıkça %1.0 Zn nanopartikül içeren Z10 numunesi olduğu görülmektedir. En düşük dayanımı saf epoksi göstermiştir ve çizilen bölgelerden içeri diğer numunelere göre daha fazla korozyon almıştır. Ağırlıkça %0.5 Zn nanopartikül içeren Z05 numunesi Z0 numunesine göre daha iyi sonuç gösterirken Z10 numunesine göre daha düşük bir korozyon direnci göstermiştir. Z15 numunesi incelendiğinde ise korozyon dayanımının Z10 numunesinden daha düşük olduğu ve hatta Çizelge 7.10'a bakıldığında kabarcık çapının saf epoksiye benzer olduğu görüşmüştür. Ayrıca bu numune çizikleri çevresindeki boya kalkma oranı daha fazladır. Bunun nedeninin kaplama malzemesi içerisindeki Zn nanopartikülün miktarının artması ile aglomera yapıların artması ve bu yapılardan kaynaklanan kaplama kusurlarının oluşması olarak düşünülmektedir. Buna göre korozyon direnci için en iyi kaplama malzemenin ağırlıkça %1 Zn nanopartikül içeren epoksi kompozit olduğu ortaya çıkmıştır.

Literatürde AISI 304 paslanmaz çeliğin korozyonunu HCl asit içerisinde inceleyen bir çok çalışma mevcuttur(Feng et al., 2003; Saklakoğlu, İrizalp, Gökdemir, & Polat, 2016; Torchio, 1980). Çalışmalarda HCl kullanılmasının sebebi bu bileşiğin test sıvısı içerisinde çok sayıda Cl⁻ iyonları vermesi ve bu iyonlarında paslanmaz çelik yapı içerisindeki metal iyonları ile tepkimeye girerek yapıyı hızlandırılmış korozyona uğratmasıdır(Torchio, 1980). Paslanmaz çelik yapıda herhangi bir dış sebepten dolayı kalkan film tabakasından paslanmaz çeliğin iç kısımlarına halojenlerin (Cl,Fl...[7A grubu ametallerin sızması ve korozyonun hızla iç tabakalara kadar ilerlemesi ile pitting (çukurcuk) korozyonu oluşmaktadır.

Şekil 7.19 incelendiğinde saf epoksi kaplama üzerinde bir çok miktarda korozyon kabarcığı olduğu görülmektedir. Bu kabarcıkların pitting korozyon olduğu

düşünülmektedir. Z10 numunesine bakıldığında pitting korozyona çok az miktarda rastlanmıştır. Bunun nedeninin kaplama malzeme içerisinde bulunan Zn'nun kurban anot görevi görerek korozyonu kaplama altına geçirmiyor olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.21'de kaplamaların korozyon testi sonrası kalkan kısımları soyulup görüntüler bu şekilde alınmıştır. Korozyon testi öncesi kaplama üzerine atılan çizik ile paslanmaz çelik yüzeyi de hasar görmüştü. Test sonrası paslanmaz çeliğin kendi film tabakasının bozulması ile de korozyonun bu bölgeden başladığı Şekil 7.19'da görülmektedir. Saf epoksi bu bölgeden başlayan korozyonu tutmakta fazla başarılı olamamış ancak ağırlıkça %1 Zn nanopartikül içeren kompozit kaplama korozyonun bu bölgelerden içeri yayılımını engellemiştir.



Şekil 7.4. Z0; saf epoksi ve Z10; ağırlıkça %1 Zn nanopartikül içeren epoksi kompozitlerin korozyonu

Korozyon testi sonrası kaplama üzerine atılan çiziklerin genişleme miktarları çizelge 7.11'de verilmiştir. Buna göre çizik etrafında korozyonu en az dağıtan numune 3 mm sonuç ile Z10 numunesi olmuştur. Atılan çizikler etrafında korozyonun en çok dağıldığı numuneler ise 5mm dağılma ile Z0 ve Z15 numuneleridir.

Çizelge 7.11. Korozyon testi sonrası çiziklerden korozyon genişleme miktarları

Numune	Korozyon Genişliği(mm)
Z0	5
Z05	4
Z10	3
Z15	5

Literatürde Zn ve ZnO nanaopartikülün polimer matris içerisine eklenerek matrisin antikorozyon özelliklerini inceleyen çeşitli çalışmalar mevcuttur(Mostafaei & Nasirpouri, 2014; Olad et al., 2012; Shi et al., 2009). Bu çalışmalarda da matrise eklenen Zn bazlı nanopartiküllerin kaplanan malzemeyi korozyondan koruma konusunda büyük faydalar sağladığı belirtilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasının amacı katarforez uygulamalarında ki astar boya katında yapılan kaplama uygulamasına muadil olarak yüksek korozyon dirençli ve aynı zamanda mekanik özellikleri kuvvetli bir kaplama gerçekleştirmektir. Bu kapsamda Zn nanopartikül ilavesinin epoksi reçinenin mekanik ve korozyon özelliklerine olan etkisini araştırılmıştır. Ağırlıkça en uygun oranda % Zn nanopartikül ilavesinin belirlenmesi için epoksi matris içerisine ağırlıkça %0.5-1-1,5 oranlarında nanopartikül ilavesi yapılmış ve çekme testleri sonucunda bu oran %1 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında aynı deney oranları ile hazırlanan epoksi kompozitler AISI 304 saclar üzerine kaplanmış ve kaplamaların mekanik ve korozyon özellikleri korozyon, darbe, bükme ve kafes çizgi testleri ile incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ise maddeler halinde aşağıdaki gibidir;

- Postkür uygulamasının olduğu numunelerde Ağırlıkça %1 Zn nanopartikül ilavesi epoksi matrisin çekme mukavemetini saf epoksiye göre %13.23, statik tokluğunu %76.81 ve uzamasını % 50,02 oranında artırmıştır.
- Ağırlıkça % nanopartikül ilave oranının artmasıyla mukavemette düzenli bir artışın olurken %1 değerinden sonra bir miktar azalma olduğu görülmüştür. En düşük çekme mukavemeti %7,33 ile ağırlıkça %0,5 Zn nanopartikül katkılı numunede, Statik tokluk olarak bakıldığında ise en düşük sonuç %26.16 artış ile %1.5 Zn nanopartikül katkılı numunede görülmüştür
- Postkür uygulanmamış numunelerde ise en iyi çekme dayanımı, statik tokluk ve uzama değerleri saf epoksi ile kıyaslandığında sırası ile %90.22, 303.71 ve 129.29 artış ile ağırlıkça %0.5 Zn içeren numunede görülmüştür. Ayrıca postkür uygulamasının epoksi reçinenin mekanik özelliklerini iyileştirmede bir etken olduğu da açıkça görülmüştür.
- Saf epoksi numunelerin postkür uygulanmış ve uygulanmamış olarak çekme testi sonuçları kıyaslandığında postkür uygulamasının mukavemette %118'lik bir artış getirdiği görülmektedir. Öte yandan postkür uygulanmamış

numunelerde partikül katkısı ile çekme mukavemeti ve tokluk değerlerinin saf epoksiye göre çok iyi derece iyileşme göstermesi Zn nanopartiküllerin varlığının termal bir etki yaparak makro moleküller arasındaki serbest alanı daraltıp çapraz bağ yoğunluğunu arttırdığı düşünülmektedir.

- Saf epoksi ile nanopartikül ilaveli epoksi kompozitlerin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri karşılaştırıldığında, partikül ilavesinin yüzey pürüzlülüğünü ve dolayısı ile malzemenin tokluğunun artırdığı görülmüştür.
- Numunelerin DSC analiz grafiklerinden elde edilen camsı geçiş sıcaklık (T_g) değerlerine göre postkür uygulamasının olduğu epoksi nanokompozitlerde en yüksek sonuç 98.31 °C değeri ile ağırlıkça %1.5 Zn nanopartikül katkılı numunede, postkür uygulamasının olmadığı epoksi nanokompozitlerde ise 89.75 °C ile ağırlıkça %1 Zn nanopartikül katkılı numunede gözlenmiştir.
- Kaplanan yüzeyler incelendiğinde en yüksek darbe direncinin ağırlıkça %1.5 Zn nanopartikül ilaveli numune olduğu gözlemlenmiştir.
- HCl asit çözeltisi içerisinde yapılan kaplama korozyon testi sonuçlarına göre ağırlıkça %1 nanopartikül katkılı numune kaplama altına en az miktarda korozyon geçirerek saf epoksiye göre kaplamayı korozyondan en iyi oranda korumuştur. En düşük çukurcuk korozyonu miktarı bu oranda gözlemlenmiştir. Ayrıca bu numune; çizgilerden 3mm korozyon genişlemesi ile saf epoksiye oranla antikoroziv özelliklerde %40 iyileşme göstererek korozyon dağılımını en iyi derecede önlemiştir.

8.2. Öneriler

Çalışmanın sonucunda aşağıdaki önerilerde bulunulabilir;

- Kaplama uygulamasında maksimum darbe dayanımı en yüksek partikül ilaveli numunede görülmüştür (Ağırlıkça %1.5). Bu ilave oranının üzerine çıkıldığında darbe direncindeki değişimler incelenebilir.
- Çalışmada Zn nanopartikül ilavesinin postkür olmaksızın mekanik özelliklerde iyileşmeye sebebiyet verdiği görülmüştür. Çalışmadaki değerlerden yola çıkılarak pratikte postkür uygulaması yerine Zn nano partikül ilavesi yapılarak zamandan da kazanç sağlanabilir. Bunun yanı sıra postkür uygulamasında meydana gelen kalıntı gerilmelere de maruz kalınmamış olunacaktır.

- Çalışmada tüm korozyon çalışmaları tek bir süre içerisinde yapılmıştır. Süreç devam ettikçe kurban anot olan Zn nanopartikülünün bitmesi ile korozyon sürecinin hızlanacağı ve çukurcuk miktarlarının artacağı düşünülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda korozyon test sıvısı içerisinde çözünen Zn miktarı ve kaplanan yüzey üzerindeki çukurcuk korozyonu miktarları periyodik olarak kontrol edilerek kaplamaların yüzeyleri hangi süreler içerisinde koruyacağı rapor edilebilir.



KAYNAKLAR

- Acar, H. Y. (2015). *Corrosion prevention of carbon steel and aluminum metals by pani-ceo2 nanocomposite coatings*. Istanbul Technical University, Istanbul.
- Akıncı, A. Polimerik kaplamanın metalin korozyon direncine etkilerinin incelenmesi.
- Akıncı, A. (2009). Polimerik kaplamanın metalin korozyon direncine etkilerinin incelenmesi
- Aksun, E. (2014). *Poli(n-metilpirol)'ün sodyum dodesilsülfat varlığında paslanmaz çelik yüzeyinde elektrokimyasal sentezi ve korozyon koruma performansının incelenmesi*. Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Aran, A., & Temel, M. (2004). Paslanmaz Çeliklerin Üretimi, Kullanımı, Standartları, Sarıtaş Teknik Yayınları No: 1, 2: Baskı.
- Asiri, A. M., Hussein, M. A., Abu-Zied, B. M., & Hermas, A.-E. A. (2013). Effect of NiLaxFe2- xO4 nanoparticles on the thermal and coating properties of epoxy resin composites. *Composites Part B: Engineering*, 51, 11-18.
- Ayatollahi, M. R., Shadlou, S., & Shokrieh, M. M. (2011). Fracture toughness of epoxy/multi-walled carbon nanotube nano-composites under bending and shear loading conditions. *Materials & Design*, 32(4), 2115-2124. doi:10.1016/j.matdes.2010.11.034
- Aydın, H. (2009). *Corrosion inhibition by resin-conducting polymer based copolymer and composites coatings*. İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Bagherzadeh, M., & Mahdavi, F. (2007). Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anti-corrosive behavior in epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 60(2), 117-120.
- Baker, H. (1992). *ASM handbook: alloy phase diagrams* (Vol. 3): ASM international.
- Balasubramanian, M. (2013). *Composite materials and processing*: CRC press.
- Bardi, U., Caporali, S., Craig, M., Giorgetti, A., Perissi, I., & Nicholls, J. (2009). Electrodeposition of aluminium film on P90 Li-Al alloy as protective coating against corrosion. *Surface and Coatings Technology*, 203(10-11), 1373-1378.
- Barletta, M., Vesco, S., Puopolo, M., & Tagliaferri, V. (2016). Graphene reinforced UV-curable epoxy resins: Design, manufacture and material performance. *Progress in Organic Coatings*, 90, 414-424. doi:10.1016/j.porgcoat.2015.08.013
- Battistella, M., Cascione, M., Fiedler, B., Wichmann, M., Quaresimin, M., & Schulte, K. (2008). Fracture behaviour of fumed silica/epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(12), 1851-1858.
- Becker, O., Varley, R., & Simon, G. (2002). Morphology, thermal relaxations and mechanical properties of layered silicate nanocomposites based upon high-functionality epoxy resins. *Polymer*, 43(16), 4365-4373.
- Behzadnasab, M., Esfandeh, M., Mirabedini, S., Zohuriaan-Mehr, M., & Farnood, R. (2014). Preparation and characterization of linseed oil-filled urea-formaldehyde microcapsules and their effect on mechanical properties of an epoxy-based coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 457, 16-26.
- Behzadnasab, M., Mirabedini, S., & Esfandeh, M. (2013). Corrosion protection of steel by epoxy nanocomposite coatings containing various combinations of clay and nanoparticulate zirconia. *Corrosion Science*, 75, 134-141.
- Behzadnasab, M., Mirabedini, S. M., Kabiri, K., & Jamali, S. (2011). Corrosion performance of epoxy coatings containing silane treated ZrO2 nanoparticles on

- mild steel in 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, 53(1), 89-98. doi:10.1016/j.corsci.2010.09.026
- Boumaza, M., Khan, R., & Zahrani, S. (2016). An experimental investigation of the effects of nanoparticles on the mechanical properties of epoxy coating. *Thin Solid Films*, 620, 160-164.
- Camargo, P. H. C., Satyanarayana, K. G., & Wypych, F. (2009). Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities. *Materials Research*, 12(1), 1-39.
- Camille Lacaze, P., Ghilane, J., Randriamahazaka, H., & Lacroix, J. C. (2010). Electroactive Conducting Polymers for the Protection of Metals against Corrosion: from Micro-to Nanostructured Films. *Nanostructured conductive polymers*, 631-680.
- Chae, D. W., & Kim, B. C. (2006). Effects of zinc oxide nanoparticles on the physical properties of polyacrylonitrile. *Journal of applied polymer science*, 99(4), 1854-1858.
- Chandrasekaran, V., Advani, S., & Santare, M. (2010). Role of processing on interlaminar shear strength enhancement of epoxy/glass fiber/multi-walled carbon nanotube hybrid composites. *Carbon*, 48(13), 3692-3699.
- Chatterjee, A., & Islam, M. S. (2008). Fabrication and characterization of TiO₂-epoxy nanocomposite. *Materials Science and Engineering: A*, 487(1-2), 574-585.
- Cholake, S. T., Mada, M. R., Raman, R. S., Bai, Y., Zhao, X., Rizkalla, S., & Bandyopadhyay, S. (2014). Quantitative analysis of curing mechanisms of epoxy resin by mid-and Near-Fourier transform Infra red Spectroscopy. *Defence Science Journal*, 64(3), 314-321.
- Conradi, M., Kocijan, A., Zorko, M., & Verpoest, I. (2015). Damage resistance and anticorrosion properties of nanosilica-filled epoxy-resin composite coatings. *Progress in Organic Coatings*, 80, 20-26.
- Coşkan, S. (2011). *Üniform korozyona maruz betonarme binalarda deprem davranışının incelenmesi*. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi ZONGULDAK.
- Crosky, A., Kelly, D., Li, R., Legrand, X., Huong, N., & Ujjin, R. (2006). Improvement of bearing strength of laminated composites. *Composite structures*, 76(3), 260-271.
- Deng, S. Q., Rosso, P., Ye, L., & Friedrich, K. (2007). *Interlaminar fracture of CF/EP composites modified with nano-silica*. Paper presented at the Solid state phenomena.
- Dhoke, S. K., Sinha, T. J. M., & Khanna, A. (2009). Effect of nano-Al₂O₃ particles on the corrosion behavior of alkyd based waterborne coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 6(3), 353-368.
- Dietsche, F., Thomann, Y., Thomann, R., & Mülhaupt, R. (2000). Translucent acrylic nanocomposites containing anisotropic laminated nanoparticles derived from intercalated layered silicates. *Journal of applied polymer science*, 75(3), 396-405.
- Esfandeh, M., Mirabedini, S., Pazokifard, S., & Tari, M. (2007). Study of silicone coating adhesion to an epoxy undercoat using silane compounds: Effect of silane type and application method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302(1-3), 11-16.
- Feng, H.-P., Hsu, C.-H., Lu, J.-K., & Shy, Y.-H. (2003). Effects of PVD sputtered coatings on the corrosion resistance of AISI 304 stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 347(1-2), 123-129.

- Galliano, F., & Landolt, D. (2002). Evaluation of corrosion protection properties of additives for waterborne epoxy coatings on steel. *Progress in Organic Coatings*, 44(3), 217-225.
- Gan, Y. X. (2012). Structural assessment of nanocomposites. *Micron*, 43(7), 782-817.
- Gao, J., Li, J., Benicewicz, B. C., Zhao, S., Hillborg, H., & Schadler, L. S. (2012). The mechanical properties of epoxy composites filled with rubbery copolymer grafted SiO₂. *Polymers*, 4(1), 187-210.
- Gemi, L., Yazman, S., Uludağ, M., Dispinar, D., & Tiryakioğlu, M. (2017). The effect of 0.5 wt% additions of carbon nanotubes and ceramic nanoparticles on tensile properties of epoxy-matrix composites: a comparative study. *Mater. Sci Nanotechnol.*
- Ghadami, F., Dadfar, M., & Kazazi, M. (2016). Hot-cured epoxy-nanoparticulate-filled nanocomposites: Fracture toughness behavior. *Engineering Fracture Mechanics*, 162, 193-200.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B., & Schulte, K. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study. *Composites Science and Technology*, 65(15-16), 2300-2313.
- González, M. G., Cabanelas, J. C., & Baselga, J. (2012). Applications of FTIR on epoxy resins-identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology: IntechOpen.*
- Goyat, M., Suresh, S., Bahl, S., Halder, S., & Ghosh, P. (2015). Thermomechanical response and toughening mechanisms of a carbon nano bead reinforced epoxy composite. *Materials Chemistry and Physics*, 166, 144-152.
- Gull, N., Khan, S. M., Munawar, M. A., Shafiq, M., Anjum, F., Butt, M. T. Z., & Jamil, T. (2015). Synthesis and characterization of zinc oxide (ZnO) filled glass fiber reinforced polyester composites. *Materials & Design*, 67, 313-317.
- Haeri, S., Ramezanzadeh, B., & 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 and interface science*, 493, 111-122.
- Halder, S., Prasad, T., Khan, N. I., Goyat, M., & Chauhan, S. R. (2017). Superior mechanical properties of poly vinyl alcohol-assisted ZnO nanoparticle reinforced epoxy composites. *Materials Chemistry and Physics*, 192, 198-209.
- Hang, T. T. X., Truc, T. A., Nam, T. H., Oanh, V. K., Jorcin, J.-B., & Pébère, N. (2007). Corrosion protection of carbon steel by an epoxy resin containing organically modified clay. *Surface and Coatings Technology*, 201(16-17), 7408-7415.
- Hayes, M., Edwards, D., & Shah, A. (2015). *Fractography in Failure Analysis of Polymers*: William Andrew.
- Hu, R.-G., Zhang, S., Bu, J.-F., Lin, C.-J., & Song, G.-L. (2012). Recent progress in corrosion protection of magnesium alloys by organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 73(2-3), 129-141.
- Huang, T.-C., Su, Y.-A., Yeh, T.-C., Huang, H.-Y., Wu, C.-P., Huang, K.-Y., . . . Wei, Y. (2011). Advanced anticorrosive coatings prepared from electroactive epoxy–SiO₂ hybrid nanocomposite materials. *Electrochimica Acta*, 56(17), 6142-6149.
- Jalili, M. M., Moradian, S., Dastmalchian, H., & Karbasi, A. (2007). Investigating the variations in properties of 2-pack polyurethane clear coat through separate

- incorporation of hydrophilic and hydrophobic nano-silica. *Progress in Organic Coatings*, 59(1), 81-87. doi:10.1016/j.porgcoat.2007.01.018
- Jalilov, A. S., Marella, P., & Claverie, J. P. (2016). Anticorrosion Coatings Based on Zinc Phosphate and Zinc Molybdate Nanoparticles. *Journal of Molecular and Engineering Materials*, 04(04), 1640017. doi:10.1142/s2251237316400177
- Jana, S., Salehi-Khojin, A., & Zhong, W.-H. (2007). Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. *Thermochimica acta*, 462(1-2), 45-55.
- Jana, S., & Zhong, W. H. (2007). FTIR study of ageing epoxy resin reinforced by reactive graphitic nanofibers. *Journal of applied polymer science*, 106(5), 3555-3563.
- Jeon, H., Park, J., & Shon, M. (2013). Corrosion protection by epoxy coating containing multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(3), 849-853. doi:10.1016/j.jiec.2012.10.030
- Ji, Q. L., Zhang, M. Q., Rong, M. Z., Wetzel, B., & Friedrich, K. (2004). Tribological properties of surface modified nano-alumina/epoxy composites. *Journal of materials science*, 39(21), 6487-6493.
- Jiang, T., Kuila, T., Kim, N. H., Ku, B.-C., & Lee, J. H. (2013). Enhanced mechanical properties of silanized silica nanoparticle attached graphene oxide/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 79, 115-125.
- Jin, F.-L., Ma, C.-J., & Park, S.-J. (2011). Thermal and mechanical interfacial properties of epoxy composites based on functionalized carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 528(29-30), 8517-8522.
- Jin, F.-L., & Park, S.-J. (2012). Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites. *Polymer degradation and stability*, 97(11), 2148-2153.
- Jones, F. N., Nichols, M. E., & Pappas, S. P. (2017). *Organic coatings: science and technology*: John Wiley & Sons.
- Jumahat, A., Soutis, C., Abdullah, S. A., & Kasolang, S. (2012). Tensile properties of nanosilica/epoxy nanocomposites. *Procedia Engineering*, 41, 1634-1640.
- Kaftan, M. A. (2006). *Çelik yapılar da korozyon oluşumu ve korozyondan korunma yöntemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması*. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Kalendová, A., Veselý, D., Kohl, M., & Stejskal, J. (2015). Anticorrosion efficiency of zinc-filled epoxy coatings containing conducting polymers and pigments. *Progress in Organic Coatings*, 78, 1-20.
- Karadirek, Ş. (2013). *AISI 316L boyama kazanlarındaki çukurcuk korozyonunun SO₄--ve NO₃- inhibitörleri ile önlenmesi*. Yalova Üniversitesi, Yalova.
- Karcı, F. (2008). *Soğuk deformasyon ve kaynak ısı girdisinin aısı 304 paslanmaz çelik direnç kaynak kalitesine etkisi*. Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Kaya, N. (2010). *AISI 304 paslanmaz çelik ile genel yapı çeliğinin sürtünme kaynak kabiliyetinin araştırılması*. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Knotek, O., Bosserhoff, B., Schrey, A., Leyendecker, T., Lemmer, O., & Esser, S. (1992). A new technique for testing the impact load of thin films: the coating impact test. *Surface and Coatings Technology*, 54, 102-107.
- Kumar, A. M., Khan, A., Suleiman, R., Qamar, M., Saravanan, S., & Dafalla, H. (2018). Bifunctional CuO/TiO₂ nanocomposite as nanofiller for improved corrosion resistance and antibacterial protection. *Progress in Organic Coatings*, 114, 9-18.
- Lamaka, S. V., Zheludkevich, M. L., Yasakau, K. A., Serra, R., Poznyak, S., & Ferreira, M. (2007). Nanoporous titania interlayer as reservoir of corrosion inhibitors for

- coatings with self-healing ability. *Progress in Organic Coatings*, 58(2-3), 127-135.
- Lu, W.-K., Elsenbaumer, R. L., & Wessling, B. (1995). Corrosion protection of mild steel by coatings containing polyaniline. *Synthetic Metals*, 71(1-3), 2163-2166.
- Ma, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G., & Kim, J.-K. (2010). Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1345-1367.
- Mohan, T., Kumar, M. R., & Velmurugan, R. (2006). Thermal, mechanical and vibration characteristics of epoxy-clay nanocomposites. *Journal of materials science*, 41(18), 5915-5925.
- Mostafaei, A., & Nasirpour, F. (2014). Epoxy/polyaniline-ZnO nanorods hybrid nanocomposite coatings: Synthesis, characterization and corrosion protection performance of conducting paints. *Progress in Organic Coatings*, 77(1), 146-159.
- Navarchian, A. H., Joulazadeh, M., & Karimi, F. (2014). Investigation of corrosion protection performance of epoxy coatings modified by polyaniline/clay nanocomposites on steel surfaces. *Progress in Organic Coatings*, 77(2), 347-353. doi:10.1016/j.porgcoat.2013.10.008
- Nguyen-Tri, P., Nguyen, T. A., Carriere, P., & Ngo Xuan, C. (2018a). Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications. *International Journal of Corrosion*, 2018.
- Nguyen-Tri, P., Nguyen, T. A., Carriere, P., & Ngo Xuan, C. (2018b). Nanocomposite Coatings: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *International Journal of Corrosion*, 2018, 1-19. doi:10.1155/2018/4749501
- Nguyen, T. H., & Nguyen, T. A. (2018). Protection of Steel Rebar in Salt-Contaminated Cement Mortar Using Epoxy Nanocomposite Coatings. *International Journal of Electrochemistry*, 2018, 1-10. doi:10.1155/2018/8386426
- Olad, A., Barati, M., & Behboudi, S. (2012). Preparation of PANI/epoxy/Zn nanocomposite using Zn nanoparticles and epoxy resin as additives and investigation of its corrosion protection behavior on iron. *Progress in Organic Coatings*, 74(1), 221-227. doi:10.1016/j.porgcoat.2011.12.012
- Oturaklı, Ş. (2010). *Characterization and corrosion performance of γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane modified epoxy polymer*. İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Özbek, N. A., Çiçek, A., Gülesin, M., & Özbek, O. (2017). AISI 304 ve AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 43-49.
- Paksoy, A. K. (2008). *Çelik yapıların, atmosferik korozyona karşı korunmasında epoksi bazlı boya ve kaplamaların kullanımı ve performansı*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Pala, B. (2013). *Tip-304 paslanmaz çeliğin iletken polimer kaplamalar ile korozyona karşı korunması*. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Park, S.-J., & Jin, F.-L. (2004). Thermal stabilities and dynamic mechanical properties of sulfone-containing epoxy resin cured with anhydride. *Polymer degradation and stability*, 86(3), 515-520.
- Perreux, D., & Suri, C. (1997). A study of the coupling between the phenomena of water absorption and damage in glass/epoxy composite pipes. *Composites Science and Technology*, 57(9-10), 1403-1413.

- Pour-Ali, S., Dehghanian, C., & Kosari, A. (2015). Corrosion protection of the reinforcing steels in chloride-laden concrete environment through epoxy/polyaniline–camphorsulfonate nanocomposite coating. *Corrosion Science*, *90*, 239-247.
- Pourhashem, S., Rashidi, A., Vaezi, M. R., & Bagherzadeh, M. R. (2017). Excellent corrosion protection performance of epoxy composite coatings filled with amino-silane functionalized graphene oxide. *Surface and Coatings Technology*, *317*, 1-9.
- Qi, B., Zhang, Q., Bannister, M., & Mai, Y.-W. (2006). Investigation of the mechanical properties of DGEBA-based epoxy resin with nanoclay additives. *Composite structures*, *75*(1-4), 514-519.
- Qi, K., Sun, Y., Duan, H., & Guo, X. (2015). A corrosion-protective coating based on a solution-processable polymer-grafted graphene oxide nanocomposite. *Corrosion Science*, *98*, 500-506.
- Rajabi, L., Marzban, M., & Derakhshan, A. A. (2014). Epoxy/alumoxane and epoxy/boehmite nanocomposites: cure behavior, thermal stability, hardness and fracture surface morphology. *Iranian Polymer Journal*, *23*(3), 203-215. doi:10.1007/s13726-013-0216-5
- Ramezanzadeh, B., Attar, M., & Farzam, M. (2011). A study on the anticorrosion performance of the epoxy–polyamide nanocomposites containing ZnO nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, *72*(3), 410-422.
- Ramezanzadeh, B., Attar, M. M., & Farzam, M. (2010). Effect of ZnO nanoparticles on the thermal and mechanical properties of epoxy-based nanocomposite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *103*(2), 731-739. doi:10.1007/s10973-010-0996-1
- Revie, R. W. (2008). *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*: John Wiley & Sons.
- Riaz, U., Nwaoha, C., & Ashraf, S. (2014). Recent advances in corrosion protective composite coatings based on conducting polymers and natural resource derived polymers. *Progress in Organic Coatings*, *77*(4), 743-756.
- Roberge, P. R., & Eng, P. (2005). Corrosion Engineering. *Principles and Practice*, *1*.
- Saklakoğlu, N., İrizalp, S. G., Gökdemir, Z. E., & Polat, S. (2016). AISI 304 ve 316 paslanmaz çeliğinin HCl ve H₂SO₄ çözeltilerindeki gerilim korozyon çatlama davranışı. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, *7*(1), 139-149.
- Samad, U. A., Alam, M. A., Chafidz, A., Al-Zahrani, S. M., & Alharthi, N. H. (2018). Enhancing mechanical properties of epoxy/polyaniline coating with addition of ZnO nanoparticles: Nanoindentation characterization. *Progress in Organic Coatings*, *119*, 109-115. doi:10.1016/j.porgcoat.2018.02.018
- Saraloğlu, C. (2010). *Nano partiküller ile kuvvetlendirilmiş alüminyum metal matris kompozitlerin korozyon özelliklerinin belirlenme*. Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Sari, M. G., Shamshiri, M., & Ramezanzadeh, B. (2017). Fabricating an epoxy composite coating with enhanced corrosion resistance through impregnation of functionalized graphene oxide-co-montmorillonite nanoplatelet. *Corrosion Science*, *129*, 38-53.
- Schaefer, K., & Mischczyk, A. (2013). Improvement of electrochemical action of zinc-rich paints by addition of nanoparticulate zinc. *Corrosion Science*, *66*, 380-391.
- Shi, X., Nguyen, T. A., Suo, Z., Liu, Y., & Avci, R. (2009). Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. *Surface and Coatings Technology*, *204*(3), 237-245.

- Siddiqui, N. A., Sham, M.-L., Tang, B. Z., Munir, A., & Kim, J.-K. (2009). Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube–epoxy nanocomposite coating. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(10), 1606-1614.
- Subhani, T., Latif, M., Ahmad, I., Rakha, S. A., Ali, N., & Khurram, A. A. (2015). Mechanical performance of epoxy matrix hybrid nanocomposites containing carbon nanotubes and nanodiamonds. *Materials & Design*, 87, 436-444.
- Sun, Y., Zhang, Z., Moon, K. S., & Wong, C. (2004). Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42(21), 3849-3858.
- Şenyüz, G. (2008). *304 kalite paslanmaz çelik ve galvaniz sacların biçimlendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönleri ile incelenerek karşılaştırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- TabkhPaz, M., Park, D.-Y., Lee, P. C., Hugo, R., & Park, S. S. (2017). Development of nanocomposite coatings with improved mechanical, thermal, and corrosion protection properties. *Journal of Composite Materials*, 52(8), 1045-1060. doi:10.1177/0021998317720001
- Tanattı, K. (2015). *sıcak ekstrüzyon ile üretilen AA7075 alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma ve korozyon dayanımına ısıl işlemlerin etkisi*. Karabük Üniversitesi Karabük.
- Torchio, S. (1980). Stress corrosion cracking of type AISI 304 stainless steel at room temperature; influence of chloride content and acidity. *Corrosion Science*, 20(4), 555-561.
- Türkan, M. (2013). *Kaynaklı ve kaynaksız ostenitik paslanmaz çeliklerin koroziif ortamlardaki çekme davranışları*. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Umer, R., Li, Y., Dong, Y., Haroosh, H., & Liao, K. (2015). The effect of graphene oxide (GO) nanoparticles on the processing of epoxy/glass fiber composites using resin infusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(9-12), 2183-2192.
- Uyanık, M. (2012). *SİC nanopartikül ilaveli asitli çinko kaplama banyolarında yapılan kaplamaların malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Vayeda, R., & Wang, J. (2007). Adhesion of coatings to sheet metal under plastic deformation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(6), 480-492. doi:10.1016/j.ijadhadh.2006.08.003
- Voevodin, N., Grebasch, N., Soto, W., Kasten, L., Grant, J., Arnold, F., & Donley, M. (2001). An organically modified zirconate film as a corrosion-resistant treatment for aluminum 2024-T3. *Progress in Organic Coatings*, 41(4), 287-293.
- Vu, P. G., Truc, T. A., Chinh, N. T., Tham, D. Q., Trung, T. H., Oanh, V. K., . . . Hoang, T. (2018). Improvement of Mechanical and Dielectric Properties of Epoxy Resin Using CNTs/ZnO Nanocomposite. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 18(4), 2830-2837.
- Wang, H.-S., Yang, J., & Bhadeshia, H. (2005). Characterisation of severely deformed austenitic stainless steel wire. *Materials Science and Technology*, 21(11), 1323-1328.
- Wetzel, B., Hauptert, F., & Zhang, M. Q. (2003). Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance. *Composites Science and Technology*, 63(14), 2055-2067.
- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F., & Friedrich, K. (2006). Epoxy nanocomposites–fracture and toughening mechanisms. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(16), 2375-2398.

- Yang, L., Liu, F., & Han, E. (2005). Effects of P/B on the properties of anticorrosive coatings with different particle size. *Progress in Organic Coatings*, 53(2), 91-98.
- Yeh, J.-M., Huang, H.-Y., Chen, C.-L., Su, W.-F., & Yu, Y.-H. (2006). Siloxane-modified epoxy resin–clay nanocomposite coatings with advanced anticorrosive properties prepared by a solution dispersion approach. *Surface and Coatings Technology*, 200(8), 2753-2763. doi:10.1016/j.surfcoat.2004.11.008
- Yilmaz, M. (2010). *CORROSION RESISTANCE ANALYSIS OF ELECTROSTATIC POWDER COATED LOW CARBON STEEL SHEETS* MARMARA UNIVERSITY, ISTANBUL.
- Yu, Y.-H., Lin, Y.-Y., Lin, C.-H., Chan, C.-C., & Huang, Y.-C. (2014). High-performance polystyrene/graphene-based nanocomposites with excellent anti-corrosion properties. *Polymer Chemistry*, 5(2), 535-550.
- Zhang, M. Q., Rong, M. Z., Yu, S. L., Wetzel, B., & Friedrich, K. (2002). Improvement of tribological performance of epoxy by the addition of irradiation grafted nano-inorganic particles. *Macromolecular materials and engineering*, 287(2), 111-115.
- Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L., & Jeelani, S. (2008). Fabrication and characterization of carbon/epoxy composites mixed with multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, 475(1-2), 157-165.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve APŞAK
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Kastamonu – 06/05/1993
Telefon : 5425529288
e-mail : merveapsak@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Göl Anadolu Öğretmen Lisesi, Merkez, Kastamonu	2011
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015-2017	Kastamonu Kale Yapı Denetim	Kontrol Mühendisi
2017-Halen	Mepsan Petrol Cihazları	Teknik Satın Alma ve İş Geliştirme Uzmanı

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Apşak M, A. Akdemir, Ş. Yazman, " Effect Of Zinc Nanoparticle Reinforcement On Mechanical Properties Of Epoxy Composite, " 2. International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology IMSMATEC'19, Nevşehir, 2019 (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır.)