T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOROZİF ORTAMIN YAPIŞTIRICI VE YAPIŞTIRICI BAĞLANTILARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Abdullah ASLAN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KOROZİF ORTAMIN YAPIŞTIRICI VE YAPIŞTIRICI BAĞLANTILARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Abdullah ASLAN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2018, 254 Sayfa

Jüri
Danışmanın Unvanı Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Dr.Öğr. Üy. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Prof. Dr. Ahmet YAPICI
Doç. Dr. Necati ATABERK

Bu tez kapsamında saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin korozif ortamlardaki kimyasal ve mekanik davranışları belirlenmiştir. Ardından alüminyum A2024 T3 ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler ile tek taraflı bindirmeli bağlantılar ve çift konsol kiriş bağlantıları oluşturularak test edilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında saf epoksi reçine ve %1 ÇCKNT takviyeli epoksi reçine deiyonize su, tuzlu su, sülfirik asit çözeltisi (H_2SO_4) ve hidroklorik asit (HCl) çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat şartlandırılmıştır. Şartlandırma sonrasında kimyasal değişimleri ve bağ yapısı farklılıklarını anlamak için DSC, TGA ve FT-IR testleri yapılmıştır. Daha sonra reçinelerden üretilen çekme çubukları şartlandırılarak, şartlandırma sürecinin reçinelerin mekanik özelliklerine olan etkisi çekme testleri yapılarak belirlenmiştir. Çekme testleri neticesinde reçinelerin mekanik özellikleri ile diğer testler arasında bağlantı kurularak yorumlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise anotlama yöntemiyle yüzeyleri hazırlanan alüminyum numuneler ile tek taraflı bindirmeli bağlantılar ve çift konsol kiriş bağlantıları oluşturularak bu numuneler şartlandırılmış ve kayma testleri (SLJ) ile çift konsol kiriş (DCB) testleri yapılmıştır. Bu testler neticesinde bağlantılarda oluşan maksimum kuvvetler, gerilmeler, uzamanlar ve şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin kırılma tokluğu ve hasar davranışları belirlenmiştir. Alüminyum için yapılan işlemlerin aynısı karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler için de yapılarak aynı testler uygulanmıştır. Mekanik testler neticesinde oluşan hasar yüzeyleri, makro görüntüler, optik mikroskop görüntüleri ve SEM görüntüleri yardımıyla yorumlanarak mekanik ve kimyasal test sonuçlarıyla beraber değerlendirilmiştir.

Sonuçlara bakıldığında, şartlandırma ortamlarının hem saf epoksi reçineye hem de ÇCKNT takviyeli epoksi reçineye kimyasal ve mekanik olarak oldukça etkilediği söylenebilir. Ayrıca, yapışma davranışının reçinelerin kendi özelliklerden oldukça farklı olduğu ve bu farklılığın yapışma yüzey durumundan kaynaklandığı söylenebilir. Tüm sonuçlar dikkate alındığında, şartlandırma işleminin reçineler üzerine olumlu ve olumsuz etkilerinin olabileceği fakat, reçinenin çalışacağı ortama uygun bir malzeme seçimi yapılırsa, şartlandırmanın olumsuz etkilerinin kaldırılabileceği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi reçine, kimyasal karakterizasyon mekanik karakterizasyon, karbon nano tüp, şartlandırma, yapıştırıcılı bağlantılar, hasar analizi, kırılma mekaniği

ABSTRACT

Ph. D THESIS

INVESTIGATION OF EFFECTS OF CORROSIVE ENVIRONMENT ON ADHESIVES AND ADHESIVE JOINTS

Abdullah ASLAN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2018 254 Pages

Jury
Advisor Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Asst. Prof. Dr. Gürol ÖNAL
Prof. Dr. Behçet DAĞHAN
Prof. Dr. Ahmet YAPICI
Assoc. Prof. Dr. Necati ATABERK

In this study, it is discussed that effects of corrosive environment on mechanical, thermal and chemical behaviours of neat and MWCNT reinforced epoxy resin. After the properties of epoxy resin was determined, two different single lap joints which were consist of aluminium A2024 T3 and CFRC materials and two different double cantilever beams were produced and tested.

First stage of this study, neat and MWCNT reinforced epoxy resin was aged through 1, 168, 720 hours, at deionized water, NaCl solution, H_2SO_4 acid solution and HCl acid solution. After aging process, DSC, TGA AND FT-IR tests were made in order to determine chemical, thermal and bond structure changes. Tensile tests were made to tensile test specimen produced by neat and MWCNT reinforced epoxy resin. Tensile test results and other tests were evaluated together and results showed at related chapters.

Second stage of this study, aluminium single lap joints and double cantilever beams were produced and aged at 4 different environments. SLJ and DCB test were made and maximum load, maximum stress, strain, critical fracture energy values and crack length were determined. After the tests, specimens were analysed by optical and scanning electron microscope. Failure type of the specimens were investigated. All results evaluated together all of these tests were remade for CFRC materials.

When it is looked at the results, it is said that aging environments are effect both neat and MWCNT reinforced epoxy chemically and mechanically. On the other hand, adhesion behaviours of these resins are quite different from their own mechanical properties depends on surface condition of adhered materials. All thing into consideration, aging process have a great impact on adhesives and adherents both positively and negatively. If the joint is designed by taking into consideration to aging environment type, negative effects of aging environment were removed.

Keywords: Epoxy resin, chemical characterization, mechanical characterization, carbon nano tube, aging, adhesive joints, failure analysis, fracture mechanics

ÖNSÖZ

İnsanlığın yaşam standartlarındaki artışlar teknolojik gelişmelere, teknolojik gelişmeler ise malzeme alanında ki ilerlemeye doğrudan bağlıdır. Son yıllarda malzeme alanında ki gelişmeler kompozit malzemelerin ortaya çıkması ile oldukça ivme kazanmıştır. Kompozit malzemeler, birçok malzemenin ve üretim yönteminin farklı kombinasyonlarıyla üretilse de kompozit malzemelerin en önemli bileşenlerinden birisi de polimerlerdir. Geleneksel malzemelere kıyasla sıra dışı mekanik özellikleri olan polimerlerin, endüstride en sık kullanılanlarından birisi de epoksi reçinelerdir. Yapılan literatür incelemelerinde epoksi reçinelerin ve çeşitli takviye malzemelerin eklenmesi ile ortaya çıkan yeni epoksi reçinelerin mekanik ve termal özelliklerini belirleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Fakat, epoksi reçinelerin çalıştıkları ortamdan etkilenmesi, çalıştıkları ortamların epoksi reçineye hangi açılardan etkisi olduğunun belirlenmesini gerektirmektedir. Bu sebeple epoksi reçinelerin korozif şartlardan mekanik ve kimyasal olarak nasıl ve ne oranda etkilendikleri bu çalışmanın çıkış noktasıdır.

Yapılan tez çalışması iki kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak epoksi reçinenin ve partikül takviyeli epoksi reçinenin şartlandırma ortamları ve şartlandırma süreleri belirlenerek, fiziksel, kimyasal ve mekanik davranışları belirlenmiş, ardından alüminyum ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek taraflı bindirme bağlantıları ve çift konsol kiriş bağlantıları üretilerek şartlandırılmış ve şartlandırma ortamlarının epoksi reçinelerin yapışma mekanizmasına etkileri incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek sonuçlar kısmında belirtilmiştir.

Selçuk Üniversitesi ÖYP Koordinatörlüğü tarafından ÖYP-2015-008 nolu proje ile desteklenen bu çalışmada, çalışmanın başından sonuna kadar her aşamasında yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen danışmanlarım sayın Prof. Dr. Hayrettin Düzcükoğlu'na ve sayın Prof. Dr. Ömer Sinan Şahin'e müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Çalışmanın başından sonuna kadar yanımda olan, numunelerin üretilmesinden sonuçların değerlendirilmesine kadar her türlü konuda yardımını esirgemeyen, çalışma ile alakalı her türlü konuda ilerleyişimi hızlandıran ve çalışmamı kolaylaştıran Dr. Öğr. Üy. Mürsel Ekrem'e teşekkürü bir borç bilirim. Bu tez çalışmasının tez izleme komitesinde bulunan Dr. Öğr. Üy. Gürol Önal'a da çalışmaya yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ilk ortaya çıktığı zamanlarda yardımını esirgemeyen Yüksek Makine Mühendisi Muhammed Ali Şenyurt'a ve Caner TATAR'a, şartlandırma ortamlarının hazırlanması konusunda yardımını esirgemeyen kimya bölümü araştırma görevlisi Gülcihan Güzel Kaya'ya, malzeme temin etmem noktasında yardımcı olan ve işlerimi kolaylaştıran LBS teknoloji şirketine ve Bekir Bey'e, cihazlarını ve laboratuvar imkanlarını kullanmama müsaade eden Necmettin Erbakan üniversitesi makine mühendisliği bölüm başkanı sayın Doç. Dr. Necati ATABERK' e, acil durumlarda yardımlarını esirgemeyen N.E.Ü malzeme laboratuvarları binası güvenlik görevlilerine, numunelerin üretilmesinde ve test edilmesinde ve sonuçların işlenmesinde yardımını esirgemeyen sayın Arş. Gör. Emin SALUR'a, Kutay CANPOLATA'a, ve Arş. Gör. Uğur ÖZMEN'e, hasar yüzeyi görüntüleme konusunda yardımcı olan Dr. Öğ. Üyesi Turan Demirci'ye ve Arş. Gör. Harun SEPET'e çalışmam boyunca maddi manevi desteğini esirgemeyen sayın Arş. Gör. Mustafa Kuntoğlu'na, teşekkür ederim.

Son olarak tüm çalışmalarımda yanımda olan ve desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Abdullah ASLAN

KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **viii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

2.1. Yapıştırıcılar, epoksi reçineler ve takviyeli epoksi reçineler 5
2.2. Şartlandırma Ortamları ve şartlandırma etkileri 10

3. KURAMSAL TEMELLER **17**

3.1. Yapıştırıcılar ve yapıştırıcılı bağlantılar 17
3.1.1. Yapışmanın temelleri 17
3.1.2. Yapışma teorileri 21
3.1.3 Yapıştırma bağlantıları 31
3.1.4. Yapıştırmalı Bağlantılarda Oluşan Gerilmeler 34
3.1.5. Yapıştırma bağlantılarında hasar mekanizmaları 36
3.1.6. Yapıştırıcıların sınıflandırılması 38
3.1.7. Yapıştırıcıların Kullanım alanları 42
3.1.8. Yapıştırıcılı bağlantılarda yüzey hazırlama teknikleri 47
3.2.Nano Teknoloji ve karbon nanotüpler 54
3.3. Korozyon 57
3.4. Polimerlerin Bozulması 74
3.4.1. Oksidatif bozunma 76
3.4.2. Termal Bozunma 77
3.4.3. Hidroliz 77
3.4.4. Kimyasal yaşlanma 79

4. MATERYAL ve METOD **79**

4.1. Numunelerin Özellikleri 79
4.2. Numunelerin üretilmesi ve şartlandırılması 83
4.2.1. Alüminyum yüzeylerin hazırlanması 84
4.2.2. Kompozit yüzeylerin hazırlanması 92
4.2.3. Epoksi ve takviyeli epoksi reçinelerin hazırlanması 96
4.2.4. Çekme Numunelerinin hazırlanması 98
4.2.5. Kayma Testi (SLJ) numunelerinin hazırlanması 100
4.2.6. Çift konsol kiriş testi (DCB) numunelerinin hazırlanması 104
4.3. Numunelere uygulanan deneyler 106

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **119**

5.1. Kütle değişimi sonuçları 119
5.2. FT-IR sonuçları 124
5.3. DSC testi sonuçları 136
5.4. TGA sonuçları 146
5.5. Çekme testi sonuçları 154
5.6. SLJ testi sonuçları 172
5.7. DCB testi sonuçları 201

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 224

6.1 Sonuçlar 225
6.2 Öneriler 232

KAYNAKLAR 235

ÖZGEÇMİŞ 246

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

T_g (Camsı geçiş sıcaklığı)
T_k (Termal kararlılık bozulma sıcaklığı)
T_b (Bozunma sıcaklığı)
T_i (Sıcaklık farkının başladığı sıcaklık)
τ (Kayma gerilmesi)
σ (Normal gerilme)
G (Kayma modülü)
ΔC_p (Isı kapasitesi)
µm (Mikro metre)
nm (Nano metre)
$K_{ıc}$ (Kırılma tokluğu)
$G_{ıc}$ (Kritik kırılma enerjisi)
Ra (Ortalama yüzey pürüzlülüğü)
Rz (5 büyük yüzey pürüzlülüğü ortalaması)
Rmax (Maksimum yüzey pürüzlülüğü)
mPas (viskozite birimi)

Kısaltmalar

SLJ (Single lap joint)
DCB (Double contilever beam)
ÇKK (Çift konsol kiriş)
ÇCKNT (Çok cidarlı karbon nano tüp)
TCKNT (Tek cidarlı karbon nano tüp)
KNT (Karbon nano tüp)
CNT (Carbon nano tube)
SİO2 (Silisyum oksit)
H_2SO_4 (Sülfirik asit)
HCl (Hidroklorik asit)
NaCl (Tuz)
CFRC (Carbon fiber reinforced composite)
FT-IR (Fourier-transform infrared spectroscopy)
DSC (Differential scanning calorimetry)
TGA (Thermogravimetric analysis)
SEM (Scanning electron microscope)
Al_2O_3 (Alüminyum oksit)
NaOH (Sodyum hidroksit)
$CaCO_3$ (Kalsiyum karbonat)
K.M (Kül miktarı)
MPa (Mega pascal)

1. GİRİŞ

Günümüzde, geleneksel malzemeler kullanılarak, gereksinimlerin tümünü karşılamak oldukça zordur. Artan dünya nüfusu ve ihtiyaçlar karşısında, hızla azalan doğal kaynaklar, seçilen malzemenin dayanım, süneklik, aşınma, korozyon gibi temel özelliklerinin yanı sıra, maliyet hususunun da giderek önem kazanmasına sebep olmuştur. Maliyet konusu, mühendislerin yaptıkları tasarımlarda önemli bir tasarım kriteri haline gelmiştir (Aslan, 2018) Mühendisler, yaptıkları tasarım optimizasyonları ile optimum ağırlık/mukavemet kombinasyonunu hedeflemektedir . Mukavemetten fazla kayıp olmadan malzeme ağırlığının azaltılmak istenmesi, araştırmacıları kompozit malzeme alanına yönlendirmiştir (Sambell ve ark., 1972). Kompozit malzemelerin gelişimi ile birlikte amaca uygun malzeme tasarlanabilmekte ve böylelikle istenilen ağırlık/mukavemet kombinasyonu yakalanabilmektedir. Bunun yanı sıra üretilmiş olan geleneksel malzemelerin ve kompozitlerin istenilen şekilde birleştirilebilmesi konusu da oldukça önemlidir (Drzal ve ark., 1983). Geçmişten günümüze ihtiyaca yönelik birçok bağlantı elemanı tasarlanmakta üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bunlar arasında, çivi, perçin ve cıvata gibi malzemeler, lehim ve kaynak gibi teknikler bulunmaktadır. Sürdürülebilir enerji (Daly, 1990) kavramının öneminin giderek arttığı günümüz şartlarında enerji verimliliğini esas alan mühendislik yaklaşımları sebebiyle, tasarlanan makine elemanının hafifliği önemli bir tasarım kriteri haline gelmiştir. Bu sebeple yapıştırıcılı bağlantılarının uygun durumlarda, geleneksel bağlantı elemanlarının yerine kullanımı yaygınlaşmaktadır (Kaya, 2004; Banea ve da Silva, 2009; Ekrem, 2015).

Gerek kompozit malzeme üretiminde gerekse çeşitli malzemelerin birleştirilmesinde (Panigrahi ve Zhang, 2011) yapıştırıcıların önemli bir rolü vardır. Yapıştırıcıların genel tanımı, iki veya daha fazla parçanın birleştirilmesini sağlayan, genellikle sentetik esaslı bir bağlantı elemanıdır ve bu bağlantı elemanı ile yapılan bağlantılar çözülemeyen bağlantılardır. Yapıştırıcılı bağlantılar kendi bünyesinde oluşan kohezyon direnci ve parça yüzeyinde oluşan adezyon direnci sayesinde üzerine etkiyen dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar. Uygulanmasının kolaylığı, bağlantısı yapılacak elemanlar üzerinde delik ve çentik gibi gerilme yığılmasına neden olabilecek düzensizliklerin bulunmaması, farklı malzemelerin bağlanmasını sağlaması, sızdırmazlık sağlaması, iyi sönümleme özelliklerine sahip olması, yorulma hasarı riskinin düşük olması, mukavemet ağırlık oranının iyi olması özellikleri sebebiyle havacılık ve uzay uygulamalarında (Higgins, 2000) sıkça kullanılmaktadırlar. Bunun

yanı sıra, otomotiv, altyapı sistemleri, tıp, biyomedikal, elektronik, paketleme, spor, inşaat ve deniz endüstrilerinde yapıştırıcıların kullanımı gün geçtikçe artmakta ve geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerini almaktadır. Boeing ve Airbus firmaları 787 ve 350 modellerinin parçalarının %50 den fazlasında yapıştırıcı kullanmaktadırlar (Cruz ve ark.).

Geleneksel malzemeler, sahip oldukları mukavemet ve şekillendirilebilirlik özellikleri sebebiyle endüstride sıkça kullanılsa da çevresel faktörler sebebiyle korozyona maruz kalması, çeşitli zorluklara neden olmaktadır (Tang ve ark., 2010). Ortamdaki nem sebebiyle korozyona maruz kalan makine elemanlarının kullanım ömürleri oldukça sınırlanmaktadır (Batchelor ve Stachowiak, 1988). Özellikle sıcak/ soğuk gibi değişken sıcaklıklı çevresel şartlarda (Bao ve Yee, 2002), deniz içerisinde ve denize yakın yerlerde (Muthukumar ve ark., 2011), toprak altında ve buna benzer ortamlarda (Yu ve ark., 2008) çalışan makine elemanlarının ömürleri korozyona bağlı etmenler sebebiyle azalmaktadır. Tüm bu durumlar, kompozit malzemelerin, dolayısıyla yapıştırıcıların önemini artırmaktadır.

Hayvansal esaslı yapıştırıcıların kullanımı milattan öncesine kadar dayanmaktadır (Skeist, 2012). Hayvansal protein esaslı kazein yapıştırıcılar ahşap uçakların üretiminde kullanılmış fakat neme karşı dayanıksız olmaları ve bozunmaları sebebiyle sürdürülebilir olmadıkları belirlenmiştir. Sentetik reçinelerin geliştirilmesiyle beraber yapıştırıcıların endüstriyel kullanımlarında önemli oranda artış gerçekleşmiştir (Şekercioğlu, 2001).

Yapıştırıcılar, formlarına göre, yapıştırılan malzeme türlerine göre, kimyasal durumlarına göre ve yapıştırma şartlarına göre farklı şekillerde tasarlanırlar ve üretilirler. Yapıştırıcılar üzerinde yapılan çalışmalar yardımıyla, yapıştırıcı mukavemetinin ve yapıştırıcı ile yapışma yüzeyleri arasındaki bağlantı kalitesinin artırılması hedeflenmektedir. Bunun için bağlantı yapılacak şartlar ve bağlantının kullanılacağı yer iyi analiz edilerek bu duruma uygun bir bağlantı tipi belirlenmesi, yapıştırıcı seçilmesi, yapıştırılacak yüzeylerin prosese uygun olarak hazırlanması ve yapıştırma işleminin standartlara uygun olarak yapılması gerekir.

Yapıştırıcı alanındaki en önemli problemlerden birisi yapıştırıcıların laboratuvar ortamında oldukça iyi mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler göstermelerine rağmen, çalışma ortamından (nem, sıcaklık, basınç, kimyasal, radyoaktif etkiler) oldukça fazla etkilenerek zamanla fiziksel ve kimyasal yapısında bozulmalar meydana gelmesidir

(Chen ve ark., 2000). Sıcaklık ve neme maruz kalan yapıştırıcılı bağlantıların plastikleşmesi sonucu mekanik özelliklerinde kayıp oluşabilir. Bu bozulmalar ve kayıplar karmaşık mekanizmaların bir arada işlemesiyle oluşur ve yapıştırıcıların bu olumsuzluktan minimum düzeyde etkilenmelerini sağlamak için öncelikle çalışma ortamlarındaki durumları tespit edilmeli ve buna uygun iyileştirmeler yapılmalıdır. Şartlandırma olayının yapıştırıcı içerisindeki fiziksel ve kimyasal tahribatı tespit edilerek şartlandırma ortamına uygun bir katkı maddesi kullanılması ile ve/veya bir başka yapıştırıcı kullanarak ve/veya yapıştırılan malzemeyi değiştirerek bu olumsuz etkiler giderilebilir.

Bu tez çalışmasının amacı, kompozit malzeme üretiminden, çeşitli metalleri, plastikleri yapıştırmaya kadar çok geniş bir kullanım alanına sahip olan endüstriyel epoksi yapıştırıcının korozif şartlardan nasıl etkilendiğini tespit etmektir. Bununla birlikte, yapıştırıcıyı korozif ortamlara uygun katkı maddesiyle modifiye ederek ve yapıştırılan malzemeyi değiştirerek çalışma ortamının olumsuz etkilerinin azaltılmasını ve yapıştırıcı mukavemetinin, yapıştırıcı kalitesinin artırılmasını sağlamaktır. Epoksi yapıştırıcının mekanik ve kimyasal yapısı incelendikten sonra yapıştıcılı bağlantı malzemesi olarak kullanıldığında, yapışma kalitesinin korozif ortamlardan ne şekilde etkilendiği tespit etmektir.

Bu çalışma kapsamında, endüstriyel epoksi yapıştırıcı standartlara uygun olarak hazırlanıp (kürleşme tipine uygun sertleştirici ile karıştırılarak ve uygun kürleşme sıcaklığında bekletilerek) H_2SO_4 (sülfürik asit) çözeltisinde, HCl (hidroklorik asit) çözeltisinde, NaCl çözeltisinde ve deiyonize ortamında 30 gün süreyle bekletilerek bu bekletme neticesindeki fiziksel, kimyasal termal ve mekanik değişimler incelenmiştir. Bu değişimleri incelemek için epoksi reçinelerin kütle değişimleri, bağ yapısını anlamak için FT-IR (fourier tranformation infrared spektrometri) testleri, bozunma sıcaklığı, erime sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı ve özgül ısı değerlerini tespit etmek için DSC (differential scanning calorimetry) ve TGA (thermogravimetric analysis) testleri yapılmıştır. Ardından, mekanik özelliklerine olumlu etki yaptığı önceki çalışmalar da tespit edilen (Ekrem, 2015) bir nano partikül olan çok cidarlı karbon nano tüp (ÇCKNT) ile takviye edilen epoksi reçine, saf epoksi reçine ile aynı şartlarda şartlandırılarak saf epoksi için uygulanan testlere tabi tutulmuştur. İki farklı yapıştırıcıdan elde edilen fiziksel ve kimyasal sonuçlar birbirleriyle kıyaslanarak şartlandırma ortamlarının her iki yapıştırıcıya da etkileri belirlenmiştir.

Şartlandırma ortamlarının yapıştırıcılara etkileri belirlendikten sonra yapıştırıcılı bağlantılara etkilerini belirlemek için 2 farklı malzeme 2 farklı bağlantı tipi belirlenmiştir. Yapıştırılan malzemelerden birisi Al 2024-T3 levha, diğeri ise 8 kat 0,90˚ yönlü karbon elyaf takviyeli kompozit levhadır. Bu malzemeler, her iki yapıştırıcı ile ayrı ayrı tek taraflı bindirmeli bağlantı ve çift konsol kiriş bağlantısı şeklinde yapıştırılarak 4 farklı ortamda şartlandırılmıştır. SLJ (single lap joint) testi yardımıyla şartlandırma ortamlarının, bağlantıların kayma dayanımına ve kayma bağlantılarında oluşan hasar tipine etkisi, DCB (double cantilever beam) testi yardımıyla da şartlandırma ortamının kırılma tokluğuna ve kırılma davranışlarına etkisi belirlenmiştir. Tüm numunelerin hasar yüzeyleri, optik mikroskop ve taramalı mikroskop (SEM) yardımıyla incelenerek şartlandırma ortamlarının yüzeylere etkisi ve hasar mekanizmaları incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ilgili bölümlerde grafikler, tablolar ve görüntüler halinde verilmiştir. Tüm sonuçlar beraber değerlendirilerek sonuç bölümünde yorumlanmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde yapılan çalışma ile ilgili literatür bilgileri yer almaktadır. Yapılan literatür incelemesinde yapıştırıcılar, yapıştırıcı bağlantılar, yapıştırıcılı bağlantıların mekanik testleri, yapıştırıcıların kimyasal ve termal testleri, kompozit ve alüminyum malzemelerin yapıştırıcılı bağlantıları, çeşitli nano partiküllerin yapıştırıcılara etkisi, polimerlerin korozif davranışları, polimerlerin şartlandırılma ortamları ve bu ortamların polimerlere etkileri yer almaktadır.

2.1. Yapıştırıcılar, epoksi reçineler ve takviyeli epoksi reçineler

(Srivastava, 2011) tarafından yapılan çalışmada karbon-karbon ve karbon-seramik elyaf takviyeli kompozit malzemeler, %3 ÇCKNT takviyeli epoksi reçine ile yapıştırılarak tek taraflı bindirmeli bağlantılar oluşturulmuştur. Karbon- karbon kompozitlerin testleri neticesinde takviyeli epoksi reçinenin mukavemetinde %25 lik diğer numune de ise %35'lik bir artış olduğu bildirilmiştir. ÇCKNT takviyesi ile mukavemetin yanı sıra tokluk değerleri de iyileştirilmiştir.

(Zhai ve ark., 2006) tarafından yapılan çalışmada Al_2O_3, $CaCO_3$ ve SiO_2 nano partikülleri ile takviye edilen epoksi reçine ile yapıştırılan çelik numunelerin kayma testleri yapılmış ve testler neticesinde en iyi sonucu Al_2O_3 takviyeli reçinenin verdiği bildirilmiştir. Saf epoksi reçineye göre mukavemetin 5 kat artırıldığı diğer nano partiküllerin ise mukavemeti 3 kata kadar artırdığı bildirilmiştir.

(Gerson ve ark., 2010) tarafından yapılan çalışmada TCKNT takviyesinin epoksi reçine üzerine etkisi belirlenmiştir. TCKNT ilavesi sonucunda epoksi reçine molekülleri ile etkileşime geçen KNT molekülleri sebebiyle çapraz bağ yoğunluğunun arttığı ve bunun da mukavemeti artırdığı bildirilmiştir.

(Kinloch ve ark., 2003) tarafından yapılan çalışmada %1 den %21,8'e kadar 5 farklı oranda SiO_2 nano partikül takviyesi yapılan epoksi reçine yardımıyla yapıştırılan alüminyum 2024 T-3 numunelerin SLJ ve DCB testleri yapılmıştır. Testler neticesinde kayma dayanımında %40 a kadar iyileştirme olduğu, ağırlıkça %2 nano partikül takviyesinden sonraki oranlarda ise mukavemetin düştüğü belirtilmiştir. Benzer şekilde DCB testi neticesinde hesaplanan $G_{ıc}$ değerinde de %35 civarında artış olduğu bildirilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) sıcaklığında ise en yüksek sıcaklıklar en yüksek nano partikül takviyeli reçinelerde elde edilmiş, mukavemetin yüksek olduğu (düşük

oranda nano partikül ihtiva eden) numunelerde ise referans numunesine göre 3˚C' lık düşüş olduğu bildirilmiştir.

(May ve ark., 2010) tarafından yapılan çalışmada %0,05 oranında ÇCKNT ve % 0,71 oranında γ-Al_2O_3 ilave edilerek çelik ve alüminyum yapıştırıcılı bağlantılar hazırlanmıştır. Yapılan SLJ testi neticesinde kayma mukavemeti 10 MPa' dan 25 MPa' a çıkarılmıştır. Hasar tipi ise kohezif hasar tipinden adezif hasar tipine dönüşmüştür. Ayrıca takviye edilmiş epoksi reçinenin termal kararlığının saf epoksi reçineden daha iyi olduğu bildirilmiştir.

(Chatterjee ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada epoksi reçine farklı oranlarda ve büyüklüklerde KNT ve grafen ile takviye edilerek mekanik özellikleri incelenmiştir. Kullanılan tane boyutlar 5μm ve 25 μm dir. Çalışma sonucunda grafen takviyesinin termal iletkenliği artırdığı, kullanılan partikül boyutunun artmasının kırılma tokluğunu artırdığı bildirilmiştir.

Reçineleri takviye etmek için kullanılan partiküllerin boyutlarının yapışma kalitesine ve mekanik özelliklere etkisi detaylı bir şekilde (Fu ve ark., 2008) tarafından çalışılmıştır.

(Ladhari ve ark., 2010) tarafından yapılan çalışmada farklı miktarlarda (%3-7-10) nano kil içeren poli propilen yapıştırıcı, deiyonize su ve deniz suyu içerisinde, farklı sıcaklıklarda (25, 45, 85˚C) şartlandırılmıştır. Deiyonize su içerisinde şartlandırılan numunelerde, aynı süre içerisinde su emme miktarı hem nano kil oranıyla hem de sıcaklıkla doğru orantılı olarak artmıştır. 85˚C'de %10 takviyeli reçine %7 takviyeli reçineden 2 kat daha fazla su emmiştir. Benzeri durum deniz suyu içerisinde de gerçekleşmiştir. Farklı olarak toplam su emme miktarlarının deiyonize su ortamına göre yarı yarıya azaldığı ve su emme karakteristiğinin değiştiği belirtilmiştir. Eğilme özellikleri incelendiğinde ise eğilme mukavemetinde tüm numunelerde azalma gözlemlenmiş fakat azalmaya rağmen %10 takviyeli numunenin dayanımı takviyesiz numuneye göre 2 kat daha iyidir. Aynı sürede şartlandırılmış ve aynı nano kil oranında takviye edilmiş fakat farklı sıcaklıklarda şartlandırılmış iki numuneden 85˚C'de şartlandırılan numunenin dayanımının 25˚C'de şartlandırılan numuneye göre daha az olduğu bildirilmiştir.

Yapıştırıcılı bağlantılardaki gerilme dağılımı, kırılma davranışları ve kırılma özellikleri, enerji analizleri, yapıştırıcılı bağlantıların mekanik testleri, yapıştırıcılı bağlantıların soyulma davranışları, yapıştırıcı bağlantılarının tasarımı ve konstrüktif

özellikleri, yapıştırıcılı bağlantıların temas noktalarında mekanik özellikler, yüzey hazırlama işlemleri ve yüzey ölçümleri, kimyasal bağlanma, kauçuk esaslı, poliüretan, yapısal akrilikler, fenolik reçinelerin özellikleri, tarihi gelişimleri ve kullanım alanları gibi konular referans kitap olarak (Pocius ve Dillard, 2002) tarafından ve (Shields, 1974) çalışılmış ve referans kitap olarak yayınlanmıştır.

Yapısal yapıştırıcılar, uygulama alanları, uygulanma şekilleri, avantajları, dezavantajları, test metotları, sıcaklık ve nemin yapıştırıcılar üzerine etkisi, yapıştırıcıların servis ömürleri konuları (Adams ve Wake, 1984) tarafından çalışılmıştır.

Alüminyum bağlantılarda yüzey hazırlama işlemi zor ve uzun süreli bir prosestir. 7 farklı yüzey hazırlama prosesi alüminyum numunelere uygulanarak yüzey hazırlama işleminin mukavemete etkisi incelenmiş ve bu inceleme neticesinde en iyi yüzey hazırlama yönteminin sıcak sülfürik asit içerisinde AC anodizasyon yöntemi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kromik-sülfürik asit ile temizleme yönteminde de anodizasyon yöntemiyle benzer sonuçlar verdiği fakat bağlantıların çekme mukavemetinde anodizasyon yöntemine göre düşüş olduğu bildirilmiştir (Lunder ve ark., 2002).

(Aydin ve ark., 2005) tarafından yapılan çalışmada tek taraftan bindirmeli bağlantılarda orta bölgelerde kayma gerilmeleri serbest uçlarda ise ayrılma oluştuğu bildirilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artırılması ise kayma gerilmelerinin normal gerilmelere dönüşmesine sebep olacağı için hasar modunu değiştirmektedir.

Alüminyum alaşımlarında yüzey hazırlama prosesi alüminyum türüne göre ve yapıştırıcı türüne göre değişse de asitle dağlama prosesi alüminyumun epoksi ile yapıştırılması için uygundur. Yapıştırma işlemi reçinenin yüzeye tutunması ile mümkün olduğu için, yüzey pürüzlülüğünün epoksi reçinenin yüzeye tutunmasına uygun olması ve gözenek dağılımının homojen olması gerekmektedir (Prolongo ve ark., 2008).

Yapıştırılan malzemelerin sertliği ile bağlantı mukavemetinin arasında ki ilişkiyi belirlemek için karbon elyaf takviyeli kompozit, yüksek elastikliğe sahip çelik ve 6082 alüminyumu kullanılmış ve yapıştırılan malzemenin sertliği arttıkça tek taraflı bindirmeli bağlantının mukavemetinin arttığı bildirilmiştir (Reis ve ark., 2011).

Çelik, Bronz ve alüminyum malzemeler ilk olarak sıkı geçme yöntemi ile ardından epoksi reçine ile yapıştırılarak birleştirilmiş ve sıkı geçmenin yapıştırıcıya göre 4 kat daha fazla çevrim sağlayabildiği bildirilmiştir. En yüksek yapışma mukavemeti bronz malzemede, en düşük yapışma mukavemeti ise alüminyum malzemede elde edilmiştir (Şekercioğlu, 2001).

Epoksi reçine nano elastomerik kopolimer ile takviye edilerek tek taraflı bindirmeli bağlantı testleri yapılmış ve takviye malzemesinin yapıştırıcı mukavemeti ve kırılma tokluğuna etkisi incelenmiştir. Yapıştırma mukavemetinde yaklaşık %20' lik artış olduğu ve kırılma tokluğu değerlerinin de iyileştiği belirtilmiştir (Khoee ve Hassani, 2010).

(Sydlik ve ark., 2013) tarafından yapılan çalışmada %0,5, 1, 2, 3, 5, 10 oranlarında fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş çok cidarlı karbon nano tüpler epoksi yapıştırıcıya katılarak modifiye edilmiş ve kayma dayanımı saf epoksi reçineye göre %36 oranında artırılmıştır. Fonksiyonelleştirilmemiş karbon nano tüpün ise kayma dayanımını %27 oranında artırdığı bildirilmiştir.

Çok cidarlı karbon nano tüp (ÇCKNT), nano Al_2O_3 ve nano SiO_2 partikülleri diglisidil eter bisfenol (epoksi) yapıştırıcıya karıştırılıp tek taraflı bindirmeli bağlantı testi (SLJ) yapılarak mekanik karakterizasyonu yapılmış ve neticesinde ÇCKNT takviyeli reçinenin kayma dayanımının %50, Al_2O_3 takviyeli reçinenin kayma dayanımının ise % 70 oranında arttığı tespit edilmiştir (Mansourian-Tabaei ve ark., 2014).

Yapılan deneysel incelemeler neticesinde epoksi reçine içerisindeki en dikkate değer iyileştirme %1 ÇCKNT takviyesi ile elde edildiği bildirilmiştir. Daha yüksek partikül takviyesi oranlarında reçinenin dayanımının saf epoksinin de altına düştüğü bildirilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde ÇCKNT partiküllerinin polimer zincirinin molekül hareketlerini kısıtlayarak reçinenin dayanımını artırdığı, kırılma tokluğu testleri neticesinde de ÇCKNT takviyesinin kırılma tokluğunu oldukça arttırdığı belirtilmiştir (Ekrem, 2015).

(Yazman, 2018) tarafından yapılan çalışmada %0,5' ten %2' ye kadar 7 farklı oranda ÇCKNT takviyesi yapılmış ve en iyi sonuçların %1.25 oranında elde edildiği bildirilmiştir. Ardından ÇCKNT takviyeli reçine içerisine 3 farklı oranda Al_2O_3 takviyesi eklenerek hibrit reçine elde edilmiş ve bu reçine ile üretilen numunelerin kayma dayanımlarında artış olurken tokluklarında azalmalar gözlemlenmiştir. Daha sonra en iyi sonuçların elde edildiği reçineler ile tek taraflı bindirmeli alüminyum bağlantıları üretilmiş ve SLJ testleri neticesinde kayma dayanımında %81,9 oranında artış elde edilmiştir.

(Gojny ve ark., 2005) tarafından yapılan çalışmada fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş TCKNT ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçineler ile yapıştırılan numuneler içerisinde en yüksek dayanım %0,5 oranında ÇCKNT ile takviye edilmiş

numunelerden elde edilmiştir. Fonksiyonelleştirilmemiş KNT ile takviye edilen epoksi reçine ile üretilen numunelerin ise sünekliği ve mukavemeti saf epoksi reçineye göre daha düşük çıktığı bildirilmiştir.

Fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş KNT lerin karşılaştırıldığı bir çalışmada, fonksiyonelleştirilmiş % 0.5 ve 1 oranında takviye edilmiş epoksinin mekanik özelliklerinin iyileştirildiği, fonksiyonelleştirilmemiş CNT ile takviye edilen epoksi reçinenin ise saf epoksi reçineye göre mekanik özelliklerinin düştüğü belirtilmiştir (Tang ve ark., 2011).

Ağırlıkça %1 KNT ile takviye edilen epoksi reçinenin mukavemetinde bir değişiklik olmazken sünekliğinde ve tokluğunda artış olduğu bildirilmiştir (Hernández-Pérez ve ark., 2008).

%1.5, 3 ve 5 oranlarında Al_2O_3 ile takviye edilen epoksi ile üretilen numunelerin içerisinde en iyi mekanik özellikler %1.5 oranındaki takviye edilmiş epoksi reçineden elde edilmiştir (Ghadami ve ark., 2016).

%0,5-5 oranında karbon nano tüple takviye edilmiş epoksi reçine ile yapıştırılarak oluşturulan tek taraflı bindirme bağlantılarının dayanımında artış olduğu ve en iyi sonuçların %1 takviye oranında elde edildiği bildirilmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak A2024 T3 alaşımı kullanılmış ve yüzey hazırlama tekniği olarak anodizasyon prosesinin uygulandığı bildirilmiştir (Yu ve ark., 2010).

(Sulong ve ark., 2009) tarafından yapılan çalışmada ÇCKNT partiküllerinin kimyasal olarak fonksiyonelleştirilmesinin, partiküllerin elektriksel özelliklerini etkileyeceği bildirilmiştir.

2.2. Şartlandırma Ortamları ve şartlandırma etkileri

(Komorek ve ark., 2016) yaptıkları çalışmada deniz suyunun ve atmosfer ortamının cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin eğilme davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deniz suyu etkilerini incelemek için bir platform tasarlanmış ve bu platform sayesinde deniz suyu içerisinde hareketli bir şekilde şartlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şartlandırma zamanı uzay hava araçlarının servis bakım akademisinin belirlediği koşullara göre 36 gün olarak belirlenmiştir. İki farklı şartlandırma ortamının da etkilerinin birbirine yakın olduğu ve kompozitlerin mukavemetlerinde %5-10 mertebelerinde mukavemet kaybı gerçekleştiği belirtilmiştir.

(Deniz ve ark., 2013) tarafından yapılan çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit boruları deniz suyu ortamından nasıl etkilendiği belirlenmiştir. %3,5 tuzluluk oranına sahip ortam da 3,6 ve 9 ay boyunca maruz bırakılan kompozit borular, basınç testi ile incelenmiştir. Şartlandırma zamanı arttıkça boruların hasara uğradığı kuvvetin azaldığı bildirilmiştir.

(Karakuzu ve ark., 2014) tarafından yapılan çalışmada deiyonize su ve tuzlu su ortamlarının kompozit borulara etkileri çalışılmıştır. Şartlandırma zamanı 3, 6, 9 ve 12 ay olarak belirlenmiş ve tuzlu su ortamında sıvı absorpsiyonunun 9 aya kadar devam ettiği bildirilmiştir. Her iki ortamda kayma modülü aynı oranda etkilemiştir. Her iki ortamdaki numunelerin çekme mukavemetleri ise şartlandırılmamış numuneden daha küçüktür.

(Min ve ark., 2015) yaptıkları çalışmada hızlandırılmış termal yapıştırma işleminin karbon epoksi malzemelere etkisini incelemiştir. Zaman-sıcaklık faktörü diye tanımlanan bir parametrenin hesaplanması neticesinde bilinen bir sıcaklık değeri için istenilen zaman da yaklaşık mukavemet tahmini yapılabilmesine olanak sağladığı belirtilmiştir. Söz konusu hesaplamalar için elde edilmesi gereken değerler, sürünme testi yardımıyla elde edilmiştir.

(Alessi ve ark., 2015), su içerisinde bekletilerek şartlandırılan epoksi reçinenin üzerinde oluşan gerilmeleri gözlemlemeyi sağlayan foto elastik bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Şartlandırma ortamının 90˚ C' de distile su ortamı olduğu, ardından kapalı bir nem ortamına alıp bekletildiği ve ortamdaki nemi almak için kalsiyum diklorit tuzu kullanılarak havadaki nemin azaltıldığı bildirilmiştir. Şartlandırma zamanı olarak 60 gün belirlenmiş ve yaklaşık 70 saatte su absorpsiyonunu sabitlenmiştir. 800

saatten sonra da desorpsiyonu gerçekleşmiştir. Söz konusu yöntem yardımıyla karmaşık olan şişme ve difüzyon mekanizmalarının açıklanmasının mümkün olduğu bildirilmiştir.

Epoksi reçinenin ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin 90˚ C, 110˚ C, 120˚ C, 130˚ C ve 180˚C' de 1,2,4,8 ve 16 gün hızlandırılmış olarak şartlandırıldığı bir çalışmada, mikroskopi görüntülerine ve FT-IR sonuçlarına göre oksidatif bozunmanın yüzeysel bölgelerde gerçekleştiği bildirilmiştir. Kompozit malzemelerde gözlemlenen matris bozunmasının ve reçine ile elyaf arası çatlakların, basma davranışını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Yapılan mikroskopi incelemelerinde sıcaklık arttıkça oksidatif bozunmanın arttığı ve bu bozunmanın da renk değişiminden anlaşılabildiği belirtilmiştir. Oksidasyon tabakasının kalınlığının 8 gün içerisinde yaklaşık 1 mm ye ulaştığı belirtilmiştir. 16 gün sonunda incelenen mikro yapı görüntülerinde ise 1,5 mm civarlarında 30 μm genişliğinde mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Şartlandırma işlemi neticesinde mekanik özelliklerde azalışta artışta olabileceği bildirilmiştir (Zhang ve ark., 2016).

(Arefinia ve ark., 2012) tarafından yapılan çalışmada [n-PANI (DBSA)] partiküllerinin korozyon direnci incelenerek epoksi reçineyi takviye etmek için kullanılmıştır. Partiküller yapıştırılan yüzeye kaplama şeklinde uygulanmıştır. Korozif ortam olarak %3,5 derişimli NaCl çözeltisi kullanılmış olup şartlandırma süresi 77 gün olarak belirlenmiştir. Şartlandırma işlemi neticesinde kaplama işleminin, şartlandırmanın bağlantıda oluşturduğu olumsuz etkilerin azaltıldığı bildirilmiştir.

Polimer şartlandırılması fiziksel ve kimyasal şartlandırma olmak üzere iki kategoride incelenir. Fiziksel şartlandırma, moleküllerin yapısal değişimi ile değil dizilimlerinin veya düzenlerinin değişimiyle gerçekleşir. Camsı geçiş sıcaklığının altında bir sıcaklıkta uzun süre beklenerek gözlemlenebilir. Kimyasal değişimde ise çapraz bağ yoğunluğu artışı, oksidasyon, depolimerizasyon gibi olaylar gerçekleşebilir ve bu durumun geri dönüşü yoktur (Barbosa ve ark., 2017).

(Barbosa ve ark., 2017) tarafından yapılan çalışmada şartlandırma ortamı olarak 80˚C de 8 saat, 0.89 W/m^2'lik UVA radyasyon ve 50˚C 4 saat buhar ortamı çevrimi kullanılmıştır. Hızlandırılmış şartlandırma işlemi neticesinde, numunelerde %0,58 ile 1.08 arasında kütle kaybı gözlemlenmiştir. Şartlandırma temas yüzeyi alanlarının farklı olmasının kütle değişimini etkilediği bildirilmiştir. Şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerin camsı geçiş sıcaklıkları (Tg) arasında yaklaşık 7˚ C'lik bir düşüş gözlemlenmiş ve bu düşüşün reçine içerisindeki bağ ayrılması sebebiyle gerçekleştiği bildirilmiştir. Mekanik özelliklerde (interlaminar shear strength ve basma testi) ise

şartlanmış numunelerde küçük bir artış gözlemlenmiştir. Fakat bu mekanik özellik artışı sadece şartlandırma etkilerinin fazla olduğu yüzeysel bölgelerde olması sebebiyle tüm malzeme boyunca homojen olmadığı tespit edilmiştir (anizotropi). Bunun sebebi polimer yapı içerisindeki artık gerilmeler, yüzeysel bölümlerde yüksek nem ve sıcaklık olması sebebiyle serbest bırakılmış olmasından kaynaklanabileceği şeklinde açıklanmıştır.

Nemli ortamlarda yapıştırıcıların yapıştırma yüzeylerindeki kohezif kuvvetlerde azalma ve/veya adezif kuvvetlerde azalma gözlemlenebilir (Molitor ve ark., 2001),(Mubashar ve ark., 2009).

Şartlandırma işlemi neticesinde hasar modunun adezif hasar tipinden kohezif hasar tipine dönüşebildiği bildirilmiştir (Al-Harthi ve ark., 2004),(Loh ve ark., 2002) .

Nano partiküllerin takviye malzemesi olarak kullanılmasının en önemli sebeplerinden birisi, moleküler zincirlerin etrafını sararak hareketini kısıtlaması ve gevşemeyi geciktirmesi olarak bildirilmiştir (Loh ve ark., 2002; Ladhari ve ark., 2010).

(Jojibabu ve ark., 2017), yaptıkları çalışmada CNT, GNP, CNH nanopartiküllerinin reolojik, termal stabilite ve tek taraflı bindirmeli epoksi bağlantı mukavemetine etkisini incelemişlerdir. 12 hafta boyunca 40, -20, 70˚C de %70 bağıl nem ortamında şartlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Saf epoksi reçinenin kayma mukavemeti 14 MPa'dan 6 MPa'a, CNT takviyeli epoksinin kayma mukavemeti 19.7 MPa'dan 13.8 MPa'a, GNP takviyeli epoksi yapıştırıcının kayma mukavemeti 20.7 MPa'dan, 15.1 MPa'a, CNH takviyeli epoksinin ise 20.3 MPa'dan 11.5 MPa'a düştüğü bildirilmiştir.. Takviye malzemelerinin karıştırma esnasında tahrip olmasını önlemek için ısınmasının engellenmesi gerektiği belirtilmiştir. Nano partikül yüzdesi ise ağırlıkça %0,5 olarak belirlenmiştir. Testlerden 1 gün önce nem ve sıcaklık dengesi için 27˚C'de 1 gün beklenilmiştir. 12 hafta neticesinde mukavemetin düzgün olarak azalmaya devam etmediği ve sabitlendiği bildirilmiş ve bu durum plastizasyon aşamasının tersine dönmesi ile açıklanmıştır. Nano partiküllerin dayanımı artırması, moleküllerin kinetik enerjisinin sıcaklık ile artması ve su moleküllerinin kolayca reçine içerisine, temas yüzeylerine difüze olması ile açıklanmaktadır. Bu sebeple bozunma kolaylaşır. Fakat epoksi reçine içerisindeki serbest grupların tutulmasını sağlayan nano takviyeler serbest grupların su ile etkileşimini azaltarak reçinenin sıvı emilimini azaltır. Diğer bir deyişle nano partiküller epoksi içerisinde bariyer vazifesi görerek molekül zincirlerinin hareketini kısıtlar. Şartlandırma neticesinde hasar modunun kohezif moddan mix moda, ardından adhesive moda geçtiği bildirilmiştir.

(Savvilotidou ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada, soğuk kürleşen yapısal epoksi yapıştırıcıların şartlandırılma davranışının ilk dönemlerinde elastiklik modüllerinin maksimum olduğunu fakat ilerleyen dönemlerde çapraz bağ yoğunluğunun (cross-link) yoğunluğunun artması sebebiyle düştüğünü belirtmişlerdir. Çekme gerilmesinin ve hasar anındaki uzamanın doğrudan çapraz bağ yoğunluğu ile ilgili olduğu bildirilmiştir. Şartlandırma zamanı olarak 12 ay belirlenmiştir.

(Naceri, 2008) tarafından yapılan çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin hygrotermal şartlandırılması incelenmiştir. %60 ve%96 bağıl nem ortamında ve 60˚C' de şartlandırılan numunelerin kütle değişimleri ölçülmüştür.

(Delasi ve Whiteside, 1978) tarafından yapılan çalışmada, deiyonize su ortamının epoksi reçine de plastikleşmeye neden olduğu bildirilmektedir. Deiyonize su ortamı epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığını düşürmektedir.

(Sugiman ve ark., 2016) yaptıkları çalışmada epoksi reçinenin distile su ve tuzlu su ortamlarında sabit ve değişken sıcaklıkta sıvı absorpsiyon ve mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Şartlandırma süresi 60 gün olarak belirlenmiştir. Tuzlu su ortamında sıvı emiliminin saf suya göre daha az olduğu bildirilmiştir. Epoksi reçinenin şartlandırılması neticesinde kırılma tokluğu değerlerinde, sertleştirici tipine göre hem azalma hem de artma oluşabileceği belirtilmiştir. Şartlandırma işleminin çekme mukavemetine ve kırılma tokluğuna önemli oranda bir etkisinin olmadığı fakat sıvı emilimi ile az da olsa bir düşüş olduğu bildirilmiştir.

Bir hafta boyunca -18, 25 ve 70˚C'de termal yaşlandırmaya tabi tutulan malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. -18˚C de şartlandırılan numunelerin yük taşıma kapasitesinin arttığı, en yüksek uzama değerinin şartlandırılmamış numune de gözlemlendiği bildirilmiştir (Akderya ve ark., 2016).

Epoksi reçinenin bağıl nemli ve sıcak ortamda şartlandırıldıktan sonra amin gruplarının oksitlenmesi ile kimyasal değişikliklerin başladığı bildirilmiştir (Meiser ve Possart, 2011).

(Fan ve Li, 2014) yaptıkları çalışmada numuneleri, 90, 120 ve 150˚C de hava sirkülasyonlu fırında 13 gün boyunca şartlandırmışlardır. Yapılan anova analizinde şartlandırma süresinin şartlandırma sıcaklığına göre mekanik özellikler üzerine daha fazla etkisinin olduğu bildirilmiştir. Bu çalışmaya göre tabakalı kompozitlerin normal atmosferik koşullardaki ömrü 14 yıl civarında tahmin edilmiştir.

(Pitarresi ve ark., 2015) yüksek çapraz bağ yoğunluklu ve düşük yoğunluklu ticari epoksi reçineleri 50˚C' de su içerisinde 50 gün boyunca şartlandırarak sıvı

absorpsiyon davranışını, kimyasal özelliklerini ve kırılma davranışını belirlemişlerdir. Yüksek çapraz bağ yoğunluklu epoksi reçinenin şartlandırma neticesinde 2 kat daha fazla sıvı emdiği fakat her ikisinin de sıvı emme karakteristiğinin birbirine benzer olduğu gözlemlenmiştir. Kırılma tokluğu (Kıc) açısından değerlendirildiğinde 1 haftalık şartlandırma neticesinde yüksek bağ yoğunluklu epoksinin kırılma tokluğunda yaklaşık %100 oranında artış, düşük bağ yoğunluklu epoksinin ise %15 oranında artış gözlemlenmiştir. 50 gün sonunda ise yüksek bağ yoğunluklu epoksi reçine yaklaşık %20'lik bir düşüş gösterirken, düşük bağ yoğunluklu reçine %10'luk bir artış göstermiştir.

(Rocha ve ark., 2017) tarafından yapılan çalışmada rüzgar türbini kanatlarında kullanılan yapısal epoksi reçinenin deiyonize su içerisinde 50°C' de 200 gün boyunca şartlandırılması neticesinde elde elen sonuçlar bildirilmiştir. Yaklaşık 40 günlük şartlandırma neticesinde sıvı emilimi sabitlenmesine rağmen şartlandırma işlemine devam edilmiştir. Kompozit malzemelerde şartlandırma işlemi neticesinde %36 oranında kayma gerilmesi kaybı ve yorulma ömründe 3 de 1 oranında azalma, saf epoksi çubuklarda ise %17 oranında mukavemet kaybı tespit edilmiştir. Kurutma işlemi neticesinde ise kompozit için mekanik özelliklerin tamamen geri kazanılamazken, saf epoksi çubuklarda geri kazanma oranı oldukça yüksektir. Bu durumun kompozit malzeme içerisindeki fiber reçine ara yüzeyinin şartlandırma neticesinde tahrip olmasında kaynaklandığı bildirilmiştir. Saf epoksi çubuklar hasar modu açısından değerlendirildiğinde şartlandırılmamış numune düz ve gevrek bir kırılma gösterirken, şartlandırılmış numune boyun vererek kırılmış, şartlandırılıp kurutulan numune ise parçalı kırılma göstermiştir. Camsı geçiş sıcaklıklarında şartlandırılmış numunede %20'lik bir artış gözlemlenmiş, geri kurutulan numune ile şartlandırılmamış numune arasında ise dikkate değer bir değişim gözlemlenmemiştir.

Farklı sarım açılarında üretilen boruların 80° C' de 20, 40 ve 60 gün şartlandırılması neticesinde elde edilen numunelerin basma davranışları ve kimyasal davranışları belirlenmiştir (Fitriah ve ark., 2017). 60 günlük şartlandırma neticesinde basma mukavemetinde %50'lik bir düşüş gözlemlenmiştir.

3 farklı epoksi reçinenin kullanıldığı çalışmada sabit sıcaklıkta %100 nem ortamında ve ultraviyole radyasyona maruz bırakılarak 40 gün şartlandırılmıştır. Şartlandırma neticesinde tüm numunelerde yer değiştirme değerinde artış gözlemlenmiştir. Numunelerde %80'e varan mukavemet kayıpları gözlemlenmiştir (Giampaoli ve ark., 2017).

(Bouvet ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada numuneleri 30, 40, 50 ve 60˚C de deiyonize su içerisinde 6 hafta boyunca sonra vakum altında 2 hafta bekletip aynı sıcaklıklarda aynı süre bekleyerek şartlandırılma işlemini gerçekleştirmişlerdir. Vakum işlemi sonucunda emilen suyun tamamı geri atılmış ve kimyasal özellikler geri kazanılmıştır. Sıvı absorpsiyonunun epoksi yapısında plastikleşmeye neden olduğu, camsı geçiş sıcaklığında ve mukavemette düşüşe neden olduğu bildirilmiştir.

(El Yagoubi ve ark., 2015) tarafından yapılan çalışmada epoksi reçinenin sıvı absorpsiyon davranışın non-Fickian bir davranış gösterdiği bildirilmiştir. FT-IR sonuçlarına göre şartlandırma neticesinde artık bir şekilde yapıda bulunan anhidrad guruplarının hidroliz olduğu belirtilmiştir. Ayrıca deneysel yöntem neticesinde epoksi reçine için yaklaşık olarak bir sıvı emme simülasyonu oluşturulmuştur.

(Guzmán ve ark., 2014) tarafından yapılan çalışmada hava araçlarının maruz kaldığı çevresel şartlar (bağıl nem, sıcaklık, radyasyon) kombine şekilde simule edilerek numunelere uygulanmıştır. Şartlandırılan numunelere çekme testi uygulanarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen özelliklere göre bir korelasyon yapılarak yeni bir model geliştirilmiş ve bu model kullanılarak malzemelerin şartlandırma özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar neticesinde geliştirilen modelin düşük bir hata oranı ile doğru tahminler yapabildiği belirtilmiştir.

(Yıldırım, 2008) tarafından yapılan çalışmada formaldehit, melamin formaldehit, üre formaldehit yapıştırıcılar 15-30-45-60-75-90 gün ve 20,40,60,80 °C sıcaklık ortamında şartlandırılmıştır. Şartlandırma neticesinde hem yapıştırıcıların kendi arasındaki kohezyon kuvvetlerinde hem de yüzeyle yapıştırıcı arasına oluşan adezyon kuvvetlerinde azalma olduğu belirtilmiştir.

(Leger ve ark., 2013) tarafından yapılan çalışmada epoksi reçine 70˚C'lik ortamda 1, 5, 14 gün boyunca su ortamında şartlandırılmıştır. Şartlandırma neticesinde ölçülen mukavemet değerlerinde dikkate değer düşüşler olduğu ve hasarın bağlantı yüzeylerinden itibaren oluşmaya başladığı bildirilmiştir. Ayrıca epoksi reçinenin de oldukça plastikleştiği bildirilmiştir.

(Knox ve Cowling, 2000) tarafından yapılan çalışmada epoksi reçine ile yapıştırılan çelik numuneler 30˚C ve %100 bağıl nem ortamında şartlandırılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yüzey hazırlama yönteminin şartlandırma etkisini değiştirdiği bildirilmiştir. Korozyona dirençli astar kullanarak şartlandırmanın olumsuz

etkilerinin azaltılabileceği bildirilmiştir. Şartlandırma işleminin olumsuz etkilerini azaltmak konusunda en etkili astarlardan birisinin silane astarı olduğu tespit edilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

Kuramsal temeller bölümünde, yapılan çalışma ile ilgili olan, yapıştırıcı ve yapıştırıcı bağlantılar, yapıştırma prosesinin uygulanabildiği malzemeler, yapışma teorileri, yapıştırıcılar için kullanılan takviye malzemeleri, korozyon konusunda genel bilgiler, polimerlerin bozunması, bu çalışmada kullanılan malzemeler, numunelerin üretilmesi ve şartlandırılması ve numunelere uygulanan deneyler hakkında bilgiler yer almaktadır.

3.1. Yapıştırıcılar ve yapıştırıcılı bağlantılar

Bu bölümde, yapışma işleminin temelleri, yapışma teorileri, yapıştırıcılı bağlantılar, yapıştırıcılı bağlantılarda oluşan gerilmeler, yapıştırıcılı bağlantılarda oluşan hasar mekanizmaları, yapıştırıcıların genel özellikleri ve sınıflandırılması, yapıştırıcıların kullanıldığı yerler ve yapıştırıcılı bağlantılarda yüzey hazırlama teknikleri konularında bilgiler yer almaktadır.

3.1.1. Yapışmanın temelleri

Yapışma, yapıştırıcı ile yapıştırılacak olan malzeme arasında meydan gelen kuvvetler sebebiyle iki malzemenin bir arada durması eylemidir. Diğer bir tanımında ise İki parçanın yapıştırma görevi yapan, genellikle sentetik esaslı bir malzeme ile yapılan çözülemeyen bir bağlantıdır ve parçalar arasında çok ince bir tabaka oluşturan yapıştırıcı, çok defa kimyasal reaksiyonların sonucunda makro moleküller oluşumu ile sertleşir. Yapıştırıcı gerek kendi iç mukavemeti (kohezyon direnci) ve gerekse parça yüzeylerine yapışması (adezyon direnci) ile etkiyen dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar. Bir diğer tanımı ise iki aynı ya da farklı malzemenin yüzeysel kuvvetler (yüzey ile yapıştırıcı ve yapıştırıcının kendi içinde oluşan kuvvetler yardımıyla) ile bir arada tutulması işlemidir (Wu, 1982).

Yapıştırma bağlantısı birçok parametreden etkilendiği için yapıştırıcılı bağlantıları anlayabilmek için bağlantı tasarımı, yapışma teorileri, yapıştırıcıların performansı ve dayanıklılığı, çevresel faktörlere verdikleri tepkiler, yapıştırılan malzemelerin özellikleri, yapıştırıcıların özellikleri, yapıştırılacak malzemenin yüzey özellikleri gibi konularının iyi anlaşılması gerekir. İyi bir yapışma bağlantısı ve

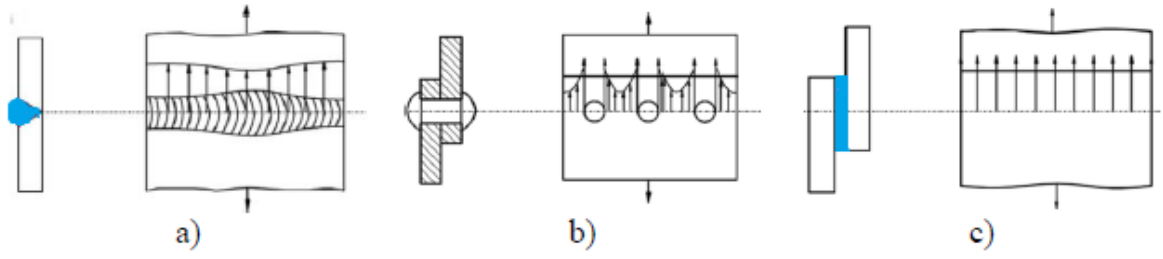
optimum bağlantı performansı verecek yapıştırıcı-malzeme kombinasyonunu elde edebilmek için bu faktörlerin hesaba katılması gerekir (Parvatareddy, 1997).

Endüstride kullanılmakta olan birçok yapıştırıcı vardır. Bu yapıştırıcıların seçimi, bağlantı şekline, bağlantı işleminin yapılışına ve işçiliğe, makine elemanının çalışacağı yere ve yükleme tipine bağlıdır. Çalışma koşullarına bağlı olarak tasarlanan bağlantı düzgün bir şekilde gerilme aktarımını sağlayarak makine elemanının hasara uğramasını engeller. Güçlü bir yapıştırma için yüzeylerin temizliği de önemlidir. Yağ, kir, nem, zayıf oksit tabakalar, fiziksel ve kimyasal yöntemler yardımıyla temizlenmelidir.

Özet olarak iyi bir yapıştırmanın temel gereksinimleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Petrie, 1975);

- Yapıştırılacak malzemelere uygun bir yapıştırıcının seçilmesi,
- Bağlantı dizaynının iyi seçilmesi,
- Yüzeylerin temizliği ve pürüzlülüğü,
- Yapıştırılacak yüzeylerin ıslanabilmesi,
- Uygun yapıştırıcının yapıştırma süreçleri (katılaşma ve kürleşme).

Yapıştırıcıların en temel fonksiyonları birleştirilen parçaları bir arada tutmaktır. Yapıştırıcı bu fonksiyonunu yükleme nedeniyle oluşan gerilmeyi bir yüzeyden diğerine düzgün (üniform) bir şekilde aktararak yerine getirmektedir. Yapıştırıcılar, gerilme aktarma işini, diğer birleştirme yöntemlerine göre daha düzgün bir şekilde yerine getirir. Bu durum kaynaklı, perçinli ve yapıştırıcılı bağlantılar için şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Birleştirme bağlantılarında gerilim dağılımları a) kaynaklı, b) perçinli ve c) yapıştırma (Sarı, 2017)

Düzgün yüzeyler yapıştırıcılı bağlantıların kendiliğinden sağlanan özelliklerindendir. Herhangi bir yüklemeye maruz kalan yapıştırıcıların diğer mekanik birleştirmelerde olduğu gibi yüzeyleri bozulmaz. Bu özellik görünüş ve fonksiyon açısından önemlidir. Özellikle hava araçlarında (örneğin bir helikopterin rotor kanadında) düzgün ve pürüzsüz dış yüzeyler hava direncinin minimize edilmesi ve sıcaklığın mümkün olduğunca düşük tutulması için önemlidir. Ayrıca düşük ağırlıklı

malzemelerde gerilme dağılımının düzgün bir şekilde oluşturulması için de yapıştırıcılar sıkça kullanılmaktadır. Yapıştırıcılı bağlantılar gerilme dağılımını düzgünleştirmek için geniş alanlar sağlarlar ve böylelikle küçük alanlarda gerilme yığılmalarının oluşumuna engel olurlar (Ebnesajjad, 2010).

Uygun yüzey hazırlama yöntemleri kullanılarak farklı malzemelerin (metal, plastik, seramik, mantar, kauçuk… vb.) bir araya getirilmesi için yapıştırıcılar sıkça kullanılır. Ayrıca sadece yapıları bir arada tutma özelliği ile değil birleştirme özelliği ile beraber iletkenlik sağlamak için de kullanılabilir.

Sıcaklık değişkenliklerinin olduğu proseslerde, farklı malzemelerin bir araya getirilmesine imkân sağlaması yapıştırıcıların bir diğer önemli fonksiyonudur. Esnek yapıştırıcılar, farklı termal genleşmelere sahip olan ve perçin gibi mekanik birleştirme yöntemiyle birleştirilirse hasara uğrama ihtimali olan malzemelerin birleştirilmesini sağlayarak bağlantıda hasar oluşumunu engeller. Yapıştırıcılar sıra dışı özellikleri ile çok ince ve/veya gevrek malzemelerin bir araya getirilebilmesini sağlar.

Yapıştırıcıların, yapıştırma özelliklerinin yanında sızdırmazlık malzemesi olarak ta kullanılabilmesi bir diğer önemli fonksiyonudur. Contalarda ve sızdırmazlığın önemli olduğu çeşitli proseslerde yapışma işlevini yerine getirdikten sonra sıvıların ve gazların dışarıya çıkışını engeller. Ayrıca elastik yapıları ve titreşim sönümle kabiliyetleri sebebiyle birçok proseste titreşim sönümleme elemanı olarak ta kullanılabilirler. Böylelikle değişken yüklemelere maruz bırakılan sistemlerde oluşan titreşimleri absorbe ederek makine elemanının yorulma ömrünü uzatır ve genellikle yapıştırıcı hasara uğramadan önce yapıştırılan malzemeler yorulma hasarına uğrar.

Yapıştırıcıların avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Avantajları:

- Herhangi bir şekle sahip ince, kalın gevrek ve sünek malzemeleri birleştirilmesinde kullanılabilir.
- Mekanik (perçin ve cıvata gibi) ve termal (kaynak ve lehim gibi) birleştirme yöntemlerinde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının azaltılması ile tüm yapışma alanı boyunca daha düzenli (üniform) gerilme dağılımı elde edilmesini sağlar.
- Daha büyük yük taşıma alanı elde edilmesine olanak sağlayarak dar bölgelerde gerilme yığılmalarının oluşmasına engel olarak bağlantının hasara uğramasına engel olur (Ebnesajjad, 2010).
- Aynı ve/veya farklı malzemelerinin birleştirilebilmesine olanak sağlar.

- Farklı malzemeler arasında oluşan elektrokimyasal (galvanik) korozyonun engellenmesini veya azaltılmasını sağlar.
- Titreşim sönümleme kabiliyetleri sebebiyle tekrarlı yüklemelere maruz kalan makine elemanlarının yorulma ömürlerini artırır.
- Titreşim sönümleme kabiliyetleri sebebiyle yorulma ömrünün iyileştirilmesinin yanı sıra darbe yüklerine karşı da oldukça dirençlidirler.
- Kaynaklı ve perçinli bağlantıların aksine birleştirilen malzemelerin (adherend) kimyasal ve mekanik özelliklerini bozulmasına engel olur.
- Contalarda ve sızdırmazlığın önemli oluğu çeşitli proseslerde sızdırmazlık elemanı olarak kullanılmaktadır.
- Makine elemanı bağlantısının ısı ve elektrik iletimi konusunda kullanıcıların isteğine bağlı olarak hem iletken hem de yalıtkan bağlantı tasarımı yapılabilmesine olanak sağlar.
- Lehim, kaynak ve perçin bağlantılarına kıyasla dikkat çekici bir dayanım/ağırlık oranına sahiptir.
- Maliyet açısından uygun ve etkili bir tekniktir
- Mekanik bağlama yöntemlerine göre ucuz ve daha hızlıdır.
- Hava araçlarında önemli bir tasarım kriteri olması sebebiyle diğer bağlantı türlerine kıyasla daha pürüzsüz ve aerodinamik yüzeyler elde edilmesine olanak sağlar.
- Mukavemet hesaplarındaki en önemli tasarım kriterlerden olan ağırlık parametresinin azaltılmasına yardımcı olur.

Dezavantajları:

- Yapıştırıcılar, yapıştırılan malzemeler şeffaf olmadıkça yapıştırma alanının görsel olarak incelenmesini zorlaştırır (DeLollis, 1970).

- Yapıştırılacak yüzeylerin temizlenmesi ve homojen olarak pürüzlendirilmesi, agresif korozif etkiye sahip ortamlara ve kimyasallara karşı yapıştırma dayanımı elde etmek için gereklidir.

- Yüksek yapışma dayanımı elde edebilmek için uzun kürleşme sürelerine ihtiyaç duyulabileceği için, ekstra maliyetlere neden olabilir ve kürleşme sıcaklığı ile süresinin yapıştırıcıya uygun olarak belirlenmemesi yapıştırıcıdan istenen mekanik özelliklerin elde edilmesini engelleyebilir.

- Yapıştırıcılı bağlantıların çalışacağı ortamların sıcaklığı genellikle yaklaşık olarak 177˚C ile sınırlıdır fakat özel olarak tasarlanan yapıştırıcılar ile yapıştırılan makine elemanları 371˚C'ye kadar kullanılabilirler. Sınırlı kullanım alanı olan bu yapıştırıcıların ise maliyetleri geleneksel yapıştırıcılardan daha yüksektir.
- Rijit işlem kontrolü ve yüzey temizliği çoğu yapıştırıcı için önemlidir.
- Yapıştırıcı bağlantıların kullanım ömrü maruz kaldığı çevreye doğrudan bağlantılıdır. Çalıştığı ortamın sıcaklığı, kimyasal ve elektro kimyasal yapısı, fiziksel yapısı yapıştırıcıları olumsuz yönde etkileyerek beklenenden çok daha kısa sürelerde hasara uğramasına neden olabilir.
- Yapıştırıcı çözücüsü olarak kullanılan kimyasallara veya temizlenmesinde kullanılan çözücülere temas etmek ve/veya solumak sağlık sorunlarına neden olabilir.

3.1.2. Yapışma teorileri

Yapıştırma işleminin ilk kullanıldığı dönemden bu yana mekanik kilitlenme, elektrostatik, difüzyon, adsorbsiyon- yüzey reaksiyon teorileri detaylı bir şekilde çalışılmış ve yapıştırma mekanizmaları olarak açıklanmıştır. Yapıştırma teorileri çizelge 3.1' de gösterilmektedir. Yapıştırma bağlantılarındaki yapışma mekanizması genellikle birden fazla yapışma tipinin kombinasyonu şeklinde gerçekleşir. Oluşan yapışma mekanizmaları ise yapıştırıcı tipine göre farklılık gösterebilir. Hangi yapışma mekanizmasının aktif olduğunu tespit etmek zor bir işlem olduğu için yapışma mekanizmalarının detaylı bir şekilde anlaşılması, yapıştırıcı çalışan araştırmacılar için oldukça önemlidir.

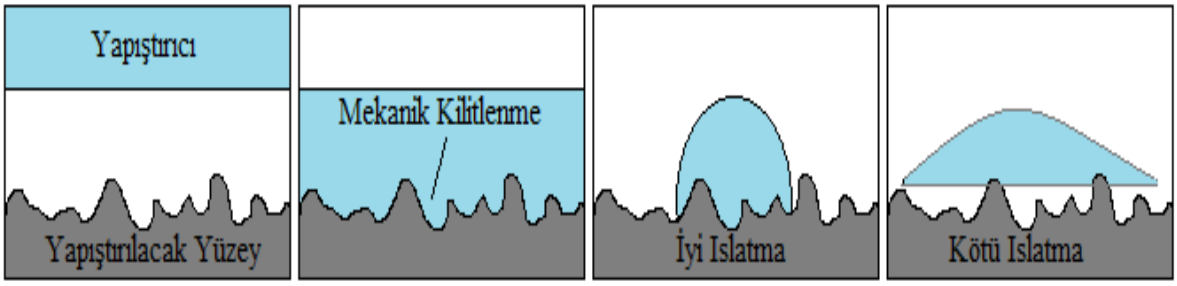
Yapıştırıcılı bağlantıların en önemli noktalarından birisi yapıştırıcı ile yapışma yüzeyi arasındaki etkileşimdir. Söz konusu etkileşimin mikroskobik, atomik veya moleküler olması bağlantı mekanizmasını anlamak için oldukça önemlidir. Birleşme mekanizmasına göre etkileşim boyutları çizelge 3.1 de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Yapışma teorileri

Geleneksel	Yeni	Ölçek
Mekanik kilitlenme	Mekanik kilitlenme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Fiziksel Adsorbsiyon	Yüzey Islatma Teorisi	Moleküler/Atomik
	Zayıf sınır tabaka	Moleküler
	Kimyasal Bağlanma	Atomik

3.1.2.1. Mekanik Kilitlenme Teorisi

Mekanik kilitlenme teorisi yapışma teorilerinin ilk araştırılanlarından birisidir ve MacBain tarafından belirtilmiştir (McBain ve Hopkins, 1925). Bu teoriye göre yapışma, yapıştırıcının yapışma yüzeylerine doğru hareket ederek yapışma yüzeylerindeki gözenekleri, oyukları ve diğer düzensizlikleri doldurması ile yapışma gerçekleşir. Yapıştırıcı gözeneklerde sıkışmış hava ile yer değiştirerek karşı yüzeye tutunur. Böylelikle iki yüzeyin pürüzlülüğü sebebiyle yapıştırıcı, iki malzemeyi birbirine bağlar. Bu sebeple mekanik kilitlenme mekanizması pürüzlü yüzeylerde, parlak yüzeylere göre daha iyi sonuç verir fakat sadece pürüzlü yüzeylerde gerçekleşebiliyor olması bu teorinin kullanım alanını kısıtlar. Ayrıca mekanik kilitleme molekül ölçeğinde bir yapışma mekanizması değildir. Bu mekanizma tek başına bir yapışma metodu olarak değil yapıştırıcının yapıştırılan yüzey üzerindeki tutunmasını artırmak için kullanılmaktadır. Şekil 3.2'de mekanik kilitlenme mekanizmasının aşamaları ve yapıştırıcının yüzeydeki gözenekleri tamamen kapladığı ve kaplayamadığı örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Mekanik kilitlenme, mekanizması, yapıştırılan yüzeyde ki iyi ıslatma ve kötü ıslatma görüntüsü

Mekanik kilitlenmeyi etkileyen en temel unsurlar pürüzlülük ve yüzeydeki düzensizlikler ile birlikte yapıştırıcının yapıştırılan yüzeyleri ıslatabilmesidir (Gent ve

Lin, 1990). Yapıştırıcının yüzeyleri yeterli oranda ıslatamaması ve/veya yapıştırıcının yüzeye uygun bir şekilde dağılmaması bağlantının oluşmasını engelleyebilir. Düşük viskoziteli yapıştırıcılar mikro boşluklara ve gözeneklere daha hızlı nüfuz edebildiği için daha iyi ara yüzey bağlantısı oluşturmaktadır.

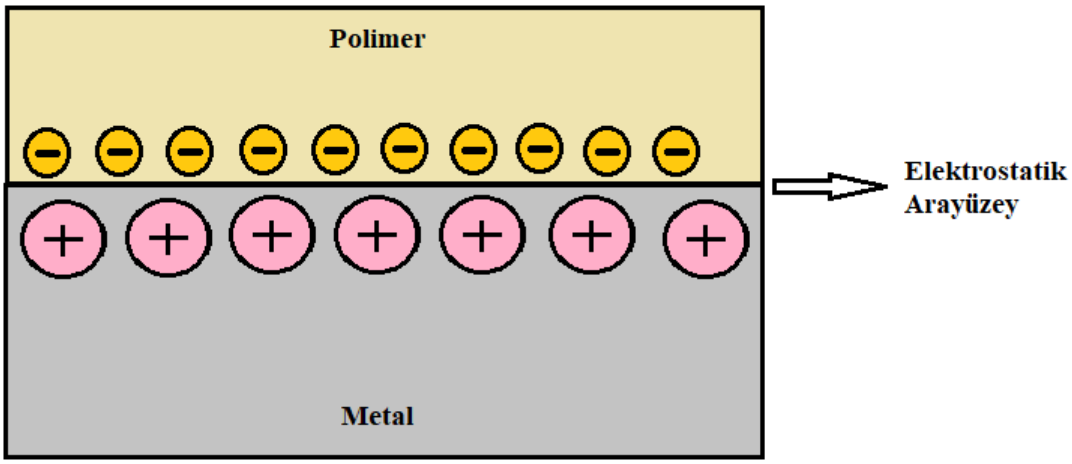
Yapılan literatür incelemesinde, yapışma yüzeyleri için en uygun yüzey pürüzlülüğü Ra= 1.5-2.5 μm alınabileceği belirtilmektedir. Pürüzsüz yüzeylerde, yapıştırıcının tutunma kabiliyeti azaldığı için mukavemet değerleri azalmaktadır. Çok kaba işlenmiş yüzeylerde de (Ra> 5 μm) yüzeylerin tamamen ıslanması sağlanamadığı için bağlantıda aşırı boşluklar oluşturacağından mukavemeti düşürdüğü bildirilmiştir (Şekercioğlu ve Özenç, 2012).

3.1.2.2. Elektrostatik Teori

Elektrostatik teorisi yapıştırılan yüzeyle yapıştırıcı arasında gerçekleşen elektrostatik etkileşimden kaynaklanan bağlantı türü olarak tanımlanabilir. Bağlantı yüzeyleri ile yapıştırıcı arasında gerçekleşen elektron transferi, yüzeylerin ayrılmasını engeller ve yapışma gerçekleşmiş olur.

Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin ara yüzeyinde pozitif ve negatif yüklerin oluşturduğu elektriksel bir bölge meydana gelir. Polimer üzerinde yer alan negatif iyonlar metal yüzeyinde yer alan pozitif iyonlar ile etkileşime girer ve bağlantı oluşur. Yapıştırıcı ile yapışma yüzeyi arasında gerçekleşen bu durum şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu teorinin bir diğer açıklaması da yapıştırıcının yapıştırılan yüzeyden ayrılması sonucu ortaya çıkan elektriksel boşalmasıdır.

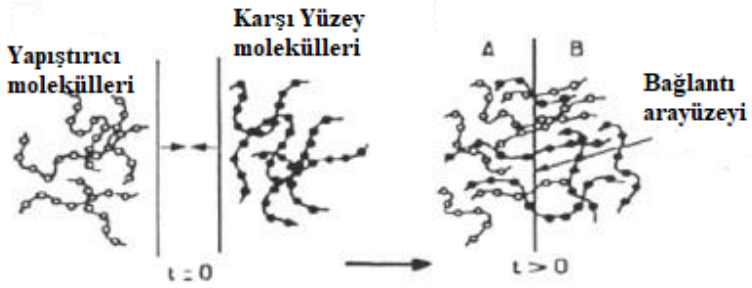
Elektrostatik yapışma polimerler ile metal yüzeyler arasında gerçekleşebilir. Metallik olmayan sistemlerde oluşan elektrostatik yapışma kuvvetleri incelendiğinde, kimyasal yapışma kuvvetlerinin yanında ihmal edilebilir boyutlarda olduğu bildirilmektedir(Merrill ve Roberts, 1977).



Şekil 3.3. Polimer ve metal arasında gerçekleşen Elektrostatik bağlanma

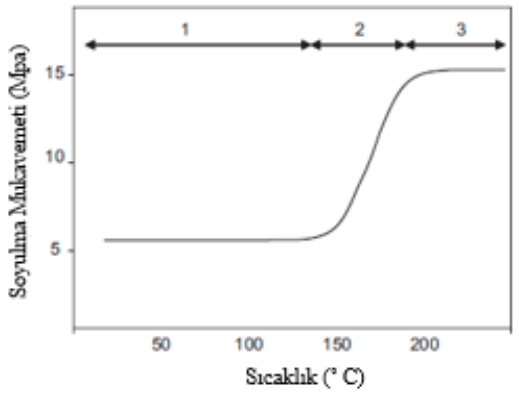
3.1.2.3. Difüzyon Teorisi

Difüzyon teorisi birbirine temas etmeye başlayan moleküllerin etkileşimi ile ortaya çıkan bağlantı şeklidir. Bu teori, hareket kabiliyetine sahip uzun moleküllerden oluşan zincirlere sahip yapıştırıcı ve karşı yüzeyler arasında gerçekleşir. Yapıştırıcı moleküllerinin karşı yüzey malzemesi içine difüze olabilmesi, yapıştırılacak malzemenin serbest hacmine ve yapıştırıcı ile yapıştırılacak malzemenin moleküler uygunluğuna bağlıdır. Moleküler uygunluk ise yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin içerisinde bulunan farklı fonksiyonel gruplar arasındaki çekimdir (Carpenter, 2000). Difüzyon tabakasının kalınlığının 1-100 nm arasında olması gerekir. Termoplastiklerin sıcak birleştirilmesi prosesi difüzyon teorisine örnek olarak verilebilir (Petrie, 2002). Polietilen ile polipropilen yapıştırıcıların bütil kauçuk ile birleştirilmesi de bu teoriye örnek olarak verilebilir. Difüzyon teorisi ve polimerler arasında gerçekleşen bağlantı şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Difüzyon teorisi ve polimerler arasında gerçekleşen bağlantının şematik gösterimi

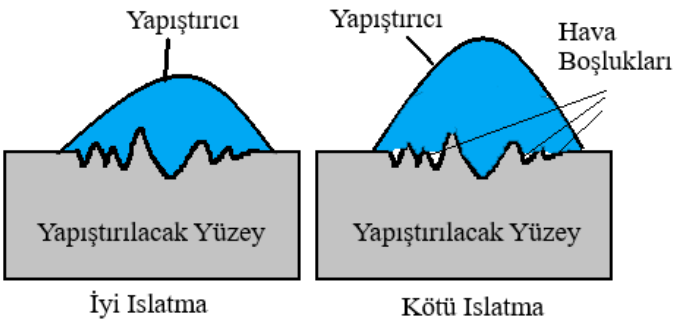
Difüzyon teorisi moleküler seviye bir bağlantı şeklidir ve polimer / polimer bağlantılarında oluşur. Difüzyon teorisi ile gerçekleşen bağlantılarda fiziksel süreksizlikler olmadığı için gerilme yığılmaları gözlemlenmemesi bir avantaj olarak değerlendirilirken, difüzyon mekanizmasının gerçekleşebilmesi için gerekli olan yüksek sıcaklıklar sağlanamazsa bağ kalitesi zayıf olabilir. Yapıştırıcı olarak kullanılan polimerin erime sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen proseslerde kaliteli difüzyon bağlantıları elde edilebilir. Difüzyon sıcaklığı sadece bağlantı kalitesini değil, bağlantının hasar modunu da etkilemektedir. Düşük difüzyon sıcaklıklarında birleşen polimerlerde adezif hasar tipi gözlemlenirken, yüksek difüzyon sıcaklıklarında hasar tipi kohezif hasara dönüşür. Difüzyon sıcaklığı ile soyulma mukavemeti arasındaki ilişki ve difüzyon sıcaklığına bağlı hasar modları şekil 3.5 de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Polipropilen ve bütil kauçuğun soyulma mukavemetinin difüzyon sıcaklığı ile değişimi (1-adezif hasar, 2-adezif/kohezif hasar, 3-kohezif hasar)

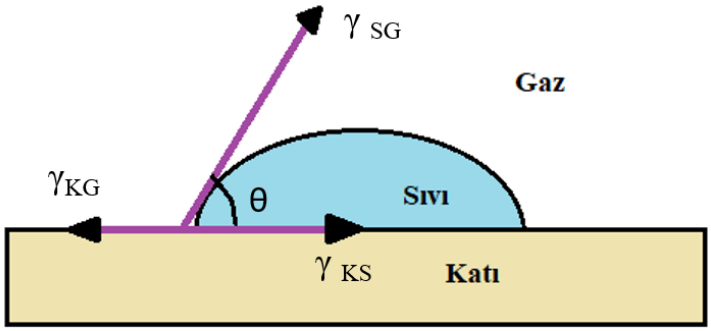
3.1.2.4. Islanabilirlik teorisi

Bu teoriye göre yapışma, iki yapıştırılacak yüzeyler arasında oluşan temas sonucu yüzey kuvvetlerinin aktive olması ile oluşur (Fowkes, 1964). Bu kuvvetler hem yapıştırıcının yüzeyi ıslatması hem de katılaşma sürecinde oluşur ve oldukça kuvvetli bağlar ortaya çıkarır. Yapıştırıcı ile yüzeyin düzgün ıslanması ve yetersiz ıslanması şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Yeterli ve yetersiz ıslanmış yapıştırıcılı bağlantılarının şematik olarak gösterilişi

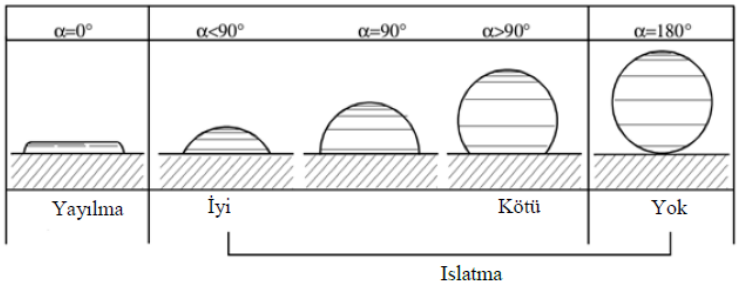
Yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzeyin sürekli temas halinde bir arada bulunması işlemi ıslatma olarak tanımlanır. Herhangi bir sıvı, bir yüzeye damlatıldığı zaman yüzeyle sıvı arasında bir temas açısı oluşur ve bu temas açısı ölçülebilir. γ olarak adlandırılan ara yüzey gerilimleri, üç fazın kesiştiği noktadaki denge değerlerini temsil eder. K, S ve G, sırasıyla katı, sıvı ve gaz fazlarını belirtir. γ ifadesi, katı yüzeyin, sıvının doymuş buharıyla dengede olması gerektiğini belirtmek için kullanılır; yani sıvı filmi katı yüzey üzerinde dengelenir. Şekil 3.7' de homojen, pürüzsüz, düzlemsel ve rijit ideal katı yüzeyde temas açısını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.7. Homojen, pürüzsüz, düzlemsel ve rijit ideal katı yüzeyde temas açısının şematik gösterimi

En yaygın ara yüzey kuvvetleri, Van der Waals ve Lewis asit-baz etkileşimi neticesinde oluşmaktadır. Genel olarak bu kuvvetlerin büyüklüğü hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzemelerin serbest yüzey enerjisi gibi temel termodinamik nicelikler ile ilişkilidir. Bu çekim hem yapıştırıcının yüzeyi ıslatması hem de katılaşma işlemi esnasında oluşur ve çok kuvvetli bağlar ortaya çıkarır. İyi bir ıslatma oluşabilmesi için yüzeyin serbest yüzey enerjisi sıvının yüzey enerjisinden büyük olmalıdır (Şekil 3.8.). Çoğu organik yapıştırıcı yapıştırılacak yüzeyi düzgün bir şekilde ıslatabilirken, birçok katı yüzeyin yüzey geriliminin yapıştırıcılardan düşük olması yapışma işlemini zorlaştırmaktadır. Bu durum epoksi gibi organik bir yapıştırıcının metalleri yapıştırmak

konusunda neden iyi sonuçlar verdiğini ve polimerlerin yapıştırılması konusunda da neden yetersiz olduğunu açıklar (Petrie, 2002).



Şekil 3.8. Islatma açı ve ıslatma davranışları arasındaki ilişki (Ekrem, 2015)

3.1.2.5. Kimyasal bağ teorisi

Bu teori, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında oluşan kimyasal kuvvetlerin bağlanmayı sağlaması şeklinde tanımlanabilir (Mittal, 1977). Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasında oluşan kuvvetler; ikincil bağlar (van der waals kuvvetleri ve hidrojen bağları), birincil bağlar (kovalent, iyonik ve metalik) ve birincil ve ikincil bağlar arasındaki etkileşimlerden ortaya çıkan gerilimlerdir (Baldan, 2012). Kimyasal bağların sahip oldukları enerjiler çizelge 3.2 de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Kimyasal bağların sahip oldukları enerji değerleri

Bağ tipi	Örnek	Enerji(kJ/mol)
Kovalent	C-C	350
İyonik	Na…..Cl	450
İyonik-Dipol	Na….CF_3H	33
Dipol-Dipol	CF_3H….. CF_3H	2
London Dağılımı	CF_4…….. CF_4	2
Hidrojen Bağı	H_2O……H_2O	24

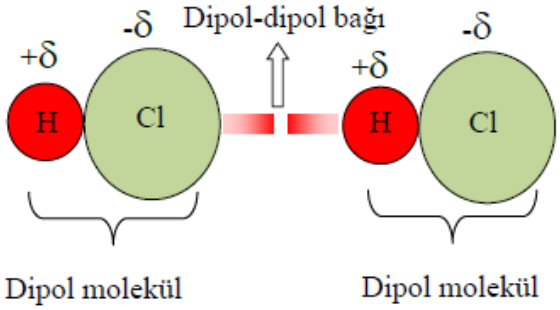
İkincil bağlar tek başlarına kaliteli bağlantılar elde edilmesine olanak sağlamaz fakat mekanik kilitlenme, elektrostatik kuvvetler ya da difüzyon bağı gibi birincil birleşme mekanizmalarına yardımcı olarak yapıştırıcı ile yüzey bağlantısının kalitesini artırabilirler (Kerr ve ark., 1967).

Moleküller arası etkileşimler aşağıda listelenmiştir.

- Dipol (polar molekül): İçerisinde pozitif ve negatif yük dağılımı olan bir molekül olarak tanımlanabilir.

- Dipol-Dipol: Polar moleküller arasında var olan ve polar bir molekülün pozitif sonunun diğer molekülün negatif sonunu çekmesi ve pozisyonunu değiştirmesi ile oluşan bağ yapısı olarak tanımlanabilir. Bu kuvvetler Van -der Waals kuvvetlerine göre daha kuvvetlidir.
- Hidrojen bağı: dipol- dipol bağının özel bir halidir ve hidrojen atomunun, küçük ve elektronegatifliği yüksek bir atom ile etkileşime geçmesi (F, O, N, S) sonucu oluşur.
- London dağılma kuvvetleri; çekirdek hareketi sırasında elektronlar ve elektronların değişen pozisyonları nedeniyle meydana gelen anlık olarak meydan gelen dipollerden (uyarılan dipoller) kaynaklanan moleküller arası kuvvetlerdir.
- Polarizasyon; bir atom veya molekülün elektron bulutunun bozulması olarak tanımlanır. Genel olarak, kutuplanabilirliğin bir atomun büyüklüğü ve bir atom üzerindeki elektron sayısı ile artacağı söylenebilir. London dağılım kuvvetlerinin büyüklüğü atom boyutu ve elektron sayısı ile artar.

Şekil 3.9'da dipol moleküller ve dipol moleküller arasında oluşan dipol dipol bağlantısı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Dipol moleküller ve dipol moleküller arasında oluşan dipol dipol bağlantısı (Ekrem, 2015)

Kovalent bağ, iki atom arasında, bir veya daha fazla elektronun paylaşılmasıyla oluşan kimyasal bağın bir tanımıdır (Grandbois ve ark., 1999). Yapıştırma bağlantılarında ise yüzey boyunca ve çapraz bağlanmış yapıştırıcı ile termoset yüzeyinde oluşur. Bu bağ tipi çoğu zaman en dayanıklı bağdır. Ancak bir arada bulunabilen uyumlu kimyasal yapıların var olması ile oluşabilir. Bazı kaplanmış yüzeyler, ahşap, plastik ve kompozit yüzeyleri çeşitli fonksiyonel gruplara sahip olduğu için kimyasal bağların kurulmasına elverişlidir. Fakat elverişli olmayan yüzeylerde

çeşitli yüzey hazırlama teknikleri yardımıyla elverişli hale getirilebilirler (Wingfield, 1993).

Büyük olasılıkla, kimyasal bağlar, selülozik yüzeye sahip bir malzeme ile epoksi reçine bağlantısını da açıklayabilir. Epoksi reçinede yer alan fonksiyonel gruplar selülozik yüzeydeki hidroksil gruplarıyla etkileşime geçerek kimyasal bağ oluşturulmasını sağlarlar (Ebnesajjad, 2010).

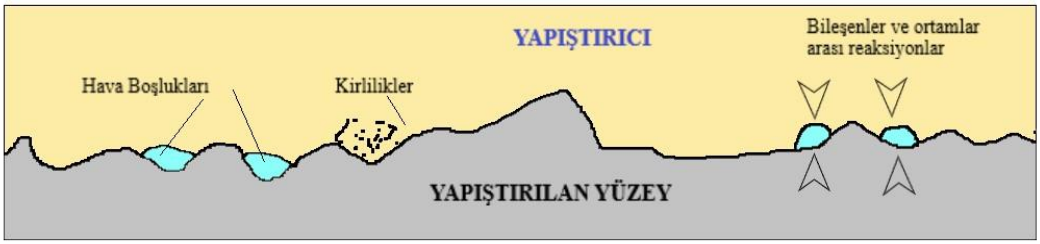
3.1.2.6. Zayıf sınır tabakası teorisi

(Bikerman, 1967) tarafından tarif edilen bu teoriye göre yapıştırıcı, yapıştırılan yüzey özellikleri, çalışma ortamı veya bunların kombinasyonu sebebiyle oluşan tabaka sebebiyle bağlantının zayıflayarak hasara uğramasıdır. Yapıştırıcı ya da yapıştırılan yüzeylerde yer alan impüriteler yapıştırıcı ile yüzeyin zayıf bağlanmasına sebebiyet verir. Bağlantı hasara uğradığında hasarın yapıştırıcıdan ya da yüzeyden kaynaklandığı düşünülmesine rağmen gerçek sebep zayıf bağlanan tabakadır. Şekil 3.10.'da yapıştırılan malzemenin yüzeyinde oluşan tabakaların şematik resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Yapıştırılan malzemelerin yüzeylerinde oluşan tabakaların şematik görüntüsü

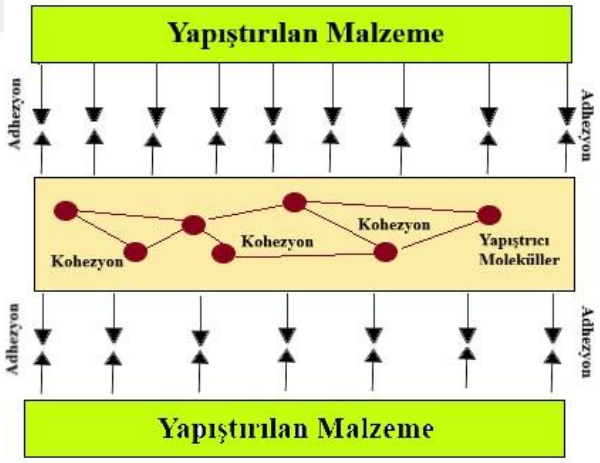
Polietilen ve metal oksitler zayıf sınır tabakası içeren yapılara örnek olarak verilebilir. Polietilenler zayıf ve düşük moleküler ağırlığa sahip olması sebebiyle yapışma yüzeyine tamamen dağılarak zayıf sınır tabakasını oluşturur. Bu zayıf tabakada çalışma esnasında hasar oluşumuna sebebiyet verebilir. Bu durumu gidermek ve yüzeyin sağlıklı bir şekilde ıslanabilmesini sağlamak için yüzey hazırlama teknikleri önemlidir. Şekil 3.11'de (Bikerman, 1967) tarafından tarif edilen zayıf sınır tabakalarının oluşumu şematik gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Zayıf sınır tabakalarının oluşumunun şematik olarak gösterilmesi

3.1.2.7. Kohezyon

Kohezyon (Latince: cohaerere, bir arada bulunma anlamındadır) moleküller arası çekim kuvveti demektir (Eberhart ve ark., 1991). Aynı cins moleküllerin arasındaki çekim kuvvetine denir. Kohezyon, sıvı ve katı (gazlarda ihmal edilebilecek kadar küçüktür) maddelerde görülür. Kohezyonun yapıştırıcı açısından tanımı ise, yapıştırıcıyı oluşturan bileşenlerin (reçine, sertleştirici vb.) yapıştırıcının polimerizasyonu sırasında meydana gelen kimyasal (bağ kuvvetleri) ve fiziksel (van der Waals kuvvetleri) kuvvetler tarafından bir arada tutulmasıdır. Adezyon ve kohezyon mekanizması şematik olarak şekli 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Adezyon ve kohezyon mekanizmasının şematik gösterimi

Küçük ya da büyük çaplı moleküller için, moleküllerin farklı yüklerine denk gelen negatif ve pozitif kutuplar olabilir. Bu şekilde moleküllerden oluşan kuvvetler küçük mıknatıslara benzetilebilir. Burada tıpkı mıknatıslarda olduğu gibi, çeşitli dipoller elektromanyetik kuvvetlerle birbirlerine bağlanmaktadır. Bu bağlar van der Waals bağı olarak adlandırılır. Van der Waals bağları diğer bağlar kadar kuvvetli değildir. Kovalent bağlar ise atomlar arasında elektron köprüleri oluşturarak kenetlenmeleri durumunda

meydana gelir. Buradaki kuvvetler, ortak kullanılan elektronların kendi eksenleri etrafında zıt yönde dönmesi sonucunda meydana gelen elektromanyetik kuvvetlerdir. Zıt yönde dönen elektronların oluşturduğu elektromanyetik alanlar, birbirlerini bir mıknatısın artı ve eksi kutupları gibi çeker. Kohezyon, yapıştırıcının kendi içinde gerçekleşen bir olay olmasından dolayı kohezyon yapıştırıcının kendi yapısıyla alakalı bir durumdur.

3.1.3 Yapıştırma bağlantıları

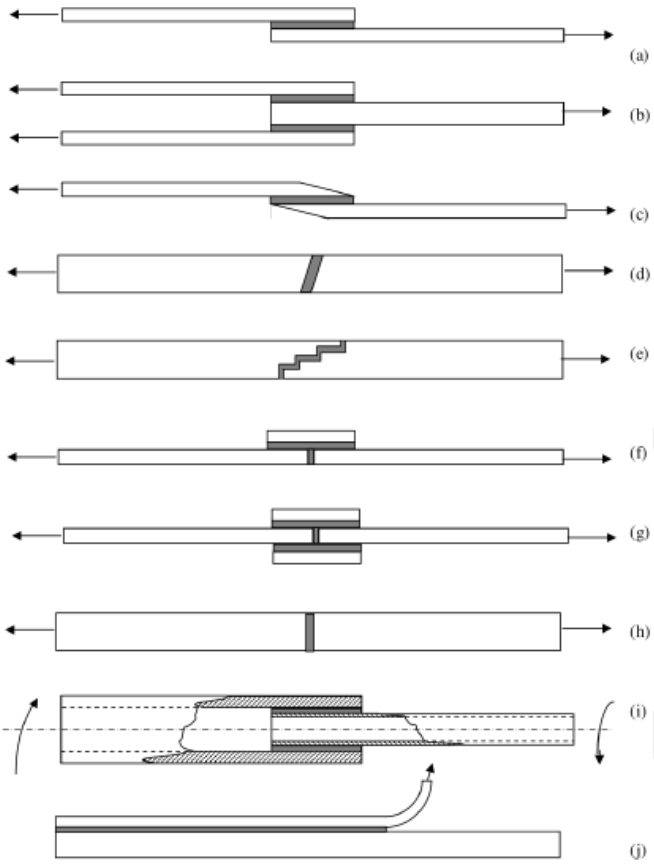
Bağlama elemanları parçaları birbirine, gövdeye veya makinaları temele bağlayan bağlama elemanlarıdır. Bu elemanlar çözülme ve fiziksel olmak üzere iki esasa göre sınıflandırılabilir. Çözülme bakımından bağlantılar çözülebilen ve çözülemeyen bağlantılar olarak ayrılabilir. Çözülemeyen bağlantı elemanlarında bağlantı ancak herhangi bir dış etki ile tahrip edilerek çözülebilir. Fiziksel esasa göre bağlama elemanları ise malzeme, şekil ve sürtünme esasına bağlı olarak gerçekleşebilir.

- **Malzeme bağı,** bağlama elemanlarında, bağlama malzeme yolu ile gerçekleşir, (kaynak, lehim, yapıştırma)
- **Şekil bağı** bağlama elemanlarında bağlama, bağlama elemanının şekline veya bağlama işlemi sırasında bağlama elemanında oluşturulan plastik veya elastik şekil değiştirmeye dayanmaktadır. (Örneğin paralel kama, mil, perçin)
- **Sürtünme veya kuvvet bağı** bağlama elemanlarında bağlama, sürtünmeye dayanmaktadır; örneğin cıvata, sıkı geçme, konik geçmeler gibi bağlama yöntemleri

Bu iki esasın yanı sıra bağlama elemanları dolaysız (direkt) ve dolaylı olarak ta sınıflandırılabilir. Dolaysız bağlama yönteminde makine elemanları birbirine doğrudan bağlanmaktadırlar. Dolaylı bağlama yönteminde ise makine elemanları birbirine bir bağlama elemanı ile bağlanırlar. Bu anlatılanlara göre teknikte birçok bağlama yöntemleri kullanılır. Bunların arasında seçim yaparken yükleme (statik, değişken), darbe, sıcaklık, korozyon gibi çalışma koşulları, bağlantının esas fonksiyonunun yanı sıra sızdırmazlığı veya hem kuvvet iletimi hem sızdırmazlığı sağlama gibi ek fonksiyonlar dikkate alınarak tasarım yapılabilir (Akkurt, 2012).

Yapıştırıcı açısından durum yeniden ele alındığında, yukarıda anlatılan unsurlara ek olarak yapıştırıcı tipi, yapıştırılan yüzeylerin durumu ve yüzey hazırlama tekniği,

yapıştırıcı kalınlığı gibi unsurlarda dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilir. Şekil 3.13' te çeşitli uygulamalarda sıkça kullanılan bağlantı tipleri gösterilmektedir.

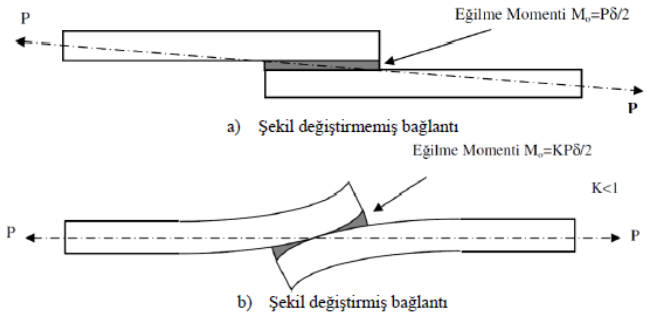


Şekil 3.13. Yapıştırma bağlantı tipleri, (a) Tek taraflı bindirme bağlantısı, (b) çift taraflı bindirme bağlantısı, (c) Pahlı bindirme bağlantısı, (d) açılı bindirme bağlantısı, (e) kademeli bağlantı, (f) Tek taraflı takviyeli alın bağlantısı, (g) Çift taraflı takviyeli alın bağlantısı, (h) alın bağlantısı, (i) silindirik bindirmeli bağlantı, (j) soyulma (Adams ve ark., 1997)

İyi bir yapıştırma bağlantısı elde edebilmek için; uygun yapıştırıcının seçilmesi, iyi bir bağlantı tasarımı, yapıştırılacak malzeme yüzeyinin temizlenmesi ve hazırlanması, yapıştırıcının yüzeyleri iyi ıslatması ve yapıştırıcının uygun bir şekilde (zaman ve sıcaklık) kürlenmesi gerekmektedir (Ebnesajjad, 2010).

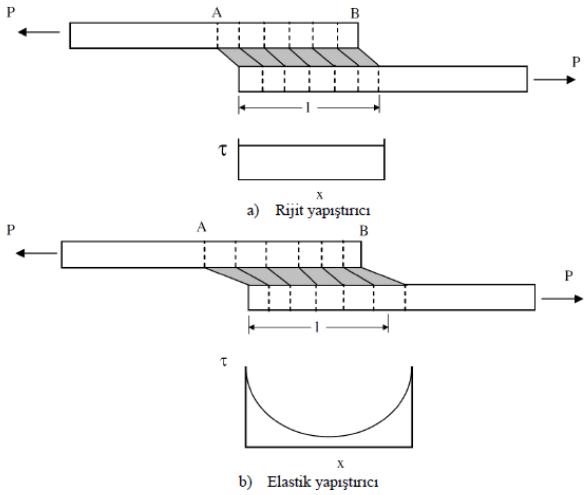
Şekil 3.13'te gösterilen bağlantı tiplerinden en yaygın kullanılanı, Sekil 3.14'te detaylı görüntüsü gösterilen tek taraflı bindirme (SLJ) bağlantısıdır. Yapıştırma bağlantılarının test edilmesinde ve özelliklerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılır. Bağlantının üretimi basittir ve testler neticesinde elde edilen sonuçlar hem yapıştırıcı kalitesini anlamak hem de malzeme yüzey işlemlerinin değerlendirebilmesi açısından

kullanışlı ve doğru sonuçlar verir fakat oluşan gerilme durumları biraz karmaşıktır. Tek taraflı bindirme bağlantılarında yük aynı doğru üzerinde etki etmemektedir (şekil 3.14.a). Bu durum eğilme momenti oluşturur ve şekil 3.14.b'de de görüldüğü gibi sistemde bir dönme etkisi meydana gelir. Yapıştırıcı tabakasında sadece kaymadan dolayı uzama olmaz ve bununla beraber bağlantının uçlarında yırtılma gerilmeleri de oluşur. Bağlantıda çekmeden dolayı uzama fazla olmaz, fakat eğilme oluşur. Özellikle gerilmelerin yüksek olduğu bölgelerde yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı birlikte plastik bölgeye girebilir (Yazman, 2018).



Şekil 3.14. Tek taraflı bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve sonraki görünümü (Adams ve Wake, 1984) (Adin, 2007)

Yapıştırıcılı bağlantılarda mukavemet birçok unsura bağlı olduğu için genel bir hesaplama yöntemi geliştirilmesi zordur fakat bağlantıya etki eden kuvvet F, yapıştırıcı yüzeyi genişliği b ve uzunluğu l kabul edilirse, τ = F/ b.l yaklaşımı sıklıkla kullanılmaktadır. Tek taraflı bindirme bağlantılarının basitleştirilmiş analizinde bu yaklaşımın kullanılabilmesi için yapıştırıcı reçinenin rijit ve yapıştırıcının sadece kayma doğrultusunda şekil değiştirildiğinin kabul edilmesi gerekmektedir (şekil 3.15). Bu durumda bağlantı üzerinde oluşan normal gerilmeler A-B uzunluğu boyunca lineer olarak azalır ve sıfıra yaklaşır. Şekil 3.15 b'de ise yapıştırıcı reçine elastiktir. Bu sebeple gerilme sıfıra doğru değil üst levhada maksimum olacak şekilde dağılım gösterir. Şekil 3.15 a'da yapıştırıcı üzerinde görülen düzgün paralelkenar şekil 3.15 b deki bozulmuş şekle döner ve buna diferansiyel kayma denir (Adin, 2007).

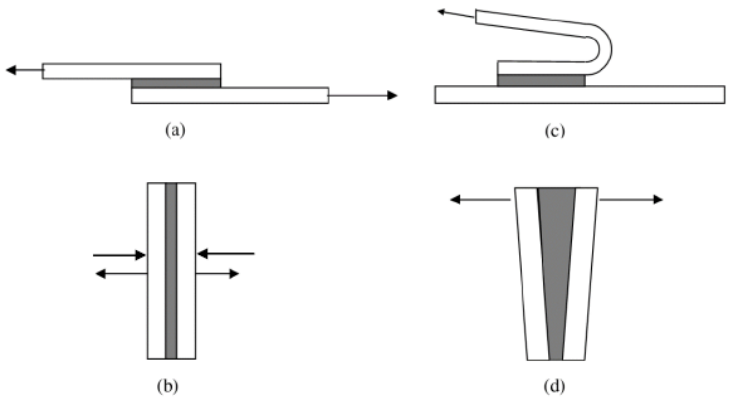


Şekil 3.15. Yüklenmiş haldeki tek taraflı bindirme bağlantısının deforme olmuş hali ve kayma gerilmesi dağılımı (Adams ve Wake, 1984) (Adin, 2007).

Özet olarak yapıştırma bağlantısının mukavemetinin artırılması için, yapıştırıcı kalitesi, kalınlığı, yapıştırılan malzeme, yüzey hazırlama tekniği, çalışma ortamı (sıcaklık, nemlilik, radyasyon) gibi unsurların yanı sıra, bağlantıya uygulanan kuvvetin yönü ve bağlantı yüzey alanının artırılması önemlidir.

3.1.4. Yapıştırmalı Bağlantılarda Oluşan Gerilmeler

Yapıştırmalı bağlantılarda yükleme durumuna bağlı olarak dört farklı gerilme oluşur. Şekil 3.16' da gösterilen bu gerilmeler, kayma (şekil 3.16 a) (shear), çekme (şekil 3.16 b) (butt), soyulma (şekil 3.16 c) (peel) ve çekme-makaslamadır (şekil 3.16 d) (cleavage). Bağlantı mukavemeti belirlenirken bu durum dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.16. Yapıştırıcılı bağlantılarda oluşan gerilme tipleri **a-** Kayma gerilmesi, **b-**çekme gerilmesi, **c-** soyulma gerilmesi **d-**çekme makaslama gerilmesi

3.1.4.1. Kayma gerilmesi

Kayma gerilmesi (τ), malzeme kesiti ile aynı düzlemde olan ve kesit alanına paralel olan kuvvet vektör bileşeninden kaynaklanan bir gerilme türüdür (Dieter ve Bacon, 1986). Kayma gerilmesi, bir cismin zıt yönlerine etki eden eşit ve karşı kuvvet çiftleri olan kayma kuvvetlerinden kaynaklanır.

Yapıştırıcılı bağlantılarda kayma gerilmesi, yapışma alanının tamamına düzgün bir şekilde etki eder (Barbee ve ark., 1995). O sebeple yapışma alanının tamamı tarafından uygulanan yükün paylaşılması, bağlantı ömrünü uzatarak maliyeti düşürür. Yapıştırıcılı bağlantılarda bağlantı tasarımı yapılırken bağlantı mümkün olduğunca kayma yüküne maruz kalacak şekilde yüklenmelidir. Çünkü yapıştırıcılar genellikle bağlı alanın tümünde bağlantı mukavemetine katkı sağlaması sebebiyle kayma gerilmesine maruz kaldığında oldukça dayanıklıdır (Petrie, 1975).

Şekil 3.13'de gösterilen bağlantı şekilleri incelendiğinde a, b, c, f, g, i bağlantı tipleri kayma gerilmesine uygun konstrüksiyonlarına örnek olarak verilebilir. h ve j bağlantıları ise bağlantı çekme gerilmesine maruz bırakıldığı için yanlış yapıştırma konstrüksiyonlarına örnek olarak verilebilir. d ve e bağlantı tipleri ise hem kayma gerilmesine hem de çekme gerilmesine maruz kaldıkları için zorunda olmadıkça tercih edilmemesi gereken bağlantı tipleridir.

3.1.4.2. Çekme ve Basma gerilmesi

Çekme ve basma gerilmesi bir makine elemanında parçanın kesit merkezinden geçen ve eksen üzerinde birbirine göre karşıt yönde olan iki kuvvet tarafından zorlandığı durumda meydana gelir. Bu etki makine elemanını üzerinde boyca uzamaya neden oluyorsa çekme gerilmesi kısalmaya neden oluyorsa basma gerilmesi olarak tanımlanır.

Yapıştırılmış bağlantılarda çekme gerilmesi, bağlantı düzlemine dik olarak etki eden kuvvetler bağlanan alanın tümüne düzgün olarak dağıtılabilirse çekme gerilmesine maruz bağlantı yükleme durumuna göre optimize edilmiş olur fakat bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etkidiğinden emin olmak çoğu zaman mümkün değildir. Bağlantıda, yapıştırıcının dış kenarlarında yüksek gerilme bölgesi oluşur. Eğer bu gerilmeler eksenden kaçık olarak etkirse o zaman gerilme yapışma alanına eşit dağıtılmamış olur

ve bağlantı emniyetsiz olur. Bir diğer önemli olan nokta ise yapıştırılan malzemenin kalın olmasıdır (Ekrem, 2015).

Yapıştırma bağlantısının maruz kaldığı yük etkisi ile önemli oranda bir eğilme gerilmesi oluşmamalıdır. Eğer yükleme durumu buna uygun değilse gerilme dağılımı eşit olmayacaktır (Adin, 2007).

Çekme gerilmesi oluşturan yükleme tipinde olduğu gibi, basma yükünü de yapıştırıcıda sadece basma gerilmesi görmek için aynı doğrultuda yükleri muhafaza etmek önemlidir. Basma yüklemesi altındaki bir yapıştırıcının hasara uğraması oldukça zordur ancak düzensiz gerilme dağılımları sebebiyle zayıf noktalar çatlaklar gözlemlenebilir (Ekrem, 2015).

3.1.4.3. Soyulma gerilmesi

Soyulma gerilmesinin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisinin de esnek olması gerekir (Hart-Smith, 1985). Bu tür yüklemeler de bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı çabuk bozulacaktır. Mümkün oldukça bu tür yüklemeden kaçınılmalıdır (Ekrem, 2015).

3.1.4.4. Çekme-Makaslama gerilmesi

Çekme-makaslama gerilmesi, genellikle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentin sonucunda oluşur. Diğer gerilme tiplerinde oluşan gerilme dağılımının düzgünlüğü bu gerilmede söz konusu olmadığı için gerilme dağılımı bağlantının bir bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi karşılamak için ise çok daha fazla yapışma alanına ihtiyaç vardır. Bu durum da maliyet artışına neden olacağı için bu gerilme türü bağlantı tasarımı esnasında tercih edilmeyen bir gerilmedir (Adin, 2007).

3.1.5. Yapıştırma bağlantılarında hasar mekanizmaları

Yapıştırıcı ile yapılan bağlantıların yüklemeye maruz kaldığında oluşabilecek hasarların belirlenmesi, bağlantıları yapılan deneylerin sonuçlarının sınıflandırılmasına ve anlaşılmasına yardımcı olur. Yapıştırılan malzemelerde oluşan ve yapıştırıcıda meydana gelen hasar tipleri şekil 3.17'de gösterilmektedir. Bu hasar modları tek

başlarına gerçekleşebilecekleri gibi birlikte de (mix mod) gerçekleşebilirler. Yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki tip hasar modeliyle (adezyon ve kohezyon) karşılaşılır (Adin, 2007; Ekrem, 2015).

Adezyon kuvvetleri iki maddenin temas yüzeylerinde oluşan yapışma kuvvetleridir (Myshkin ve ark., 2005). Yapıştırmalı bağlantılarda oluşan adezyon mekanizmasında ki en önemli fiziksel faktör Van der Waals kuvvetleri ile gerçekleşen çekim ve yüzeye tutunmadır.

Yapıştırıcının, yapıştırılacak malzemenin yüzeyindeki pürüzlere tam olarak yayılamaması, moleküller arası kuvvetlerin zayıflamasına neden olur. Bu sebeple yapıştırıcının yapıştırılan malzeme yüzeyinde yer alan pürüzlere tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Kapiler etkilerin ve yapıştırıcı viskozitesinin, sıvı halde yüzeye uygulanan yapıştırıcıların malzemenin yüzeyinde yer alan pürüzlere istenilen şekilde dağılması üzerine önemli oranda etkisi vardır (Sancaktar ve Simmons, 2000).



Şekil 3.17. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar tipleri (Adin, 2007)

Yapıştırıcılı bağlantılarda, yükleme neticesinde gerçekleşen hasar, yapıştırıcıdan ya da yapıştırılan malzemenin kendisinden meydana geliyorsa, buna kohezyon hasarı denir (Klapper ve Dockery, 2006). Hasar neticesinde her iki yüzeyde de yapıştırıcı olmalı ya da yapıştırılan yüzey den bir miktar malzeme olmalıdır. Yapıştırıcılı bağlantıların çalışma ortamlarında ya da test edilmesi esnasında bağlantının kohezyon hasarına uğraması tercih edilir. Çünkü kohezyon hasarı iyi bir yapıştırma işleminin

gerçekleştirildiğinin göstergesidir. Dolayısıyla eğer adezyon hasarı oluşursa yapıştırma işleminde veya yüzey hazırlama metodunda bir problem olmuş olabilir.

3.1.6. Yapıştırıcıların sınıflandırılması

Yapıştırıcıların sınıflandırılması noktasında çeşitli uygulamalara bağlı olarak oldukça fazla yaklaşım vardır. Hatta şu an endüstride kullanılan yapıştırıcıların spesifik uygulamalar için tasarlanan kombinasyonları bu sınıflandırmayı daha da zorlaştırmaktadır.

En genel anlamda, yapıştırıcılar doğal ve sentetik olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sentetik yapıştırıcılar insan eliyle üretilen yapıştırıcılar olarak tarif edilebilir. Doğal yapıştırıcılar ise hayvanlardan veya bitkilerden doğal olarak elde edilen yapıştırıcılardır.

Birçok yapıştırıcı organik polimerlerden üretilirken inorganik polimerlerden üretilen yapıştırıcılar da mevcuttur. En eski yapıştırıcılar doğal yapıştırıcılar olsa da mekanik ve termal özelliklerindeki zayıflıklar sebebiyle iyileştirilmesi ya da alternatif yapıştırıcıların kullanılması gerekebilir. Birçok uygulamada ihtiyacı karşılayabilecek sınıflandırma yapıştırıcının,

- Fonksiyonuna
- Kimyasal kompozisyonuna
- Uygulanma şekline ve reaksiyonuna göre
- Fiziksel formuna göre
- Maliyetine göre
- Nihai kullanımına göre

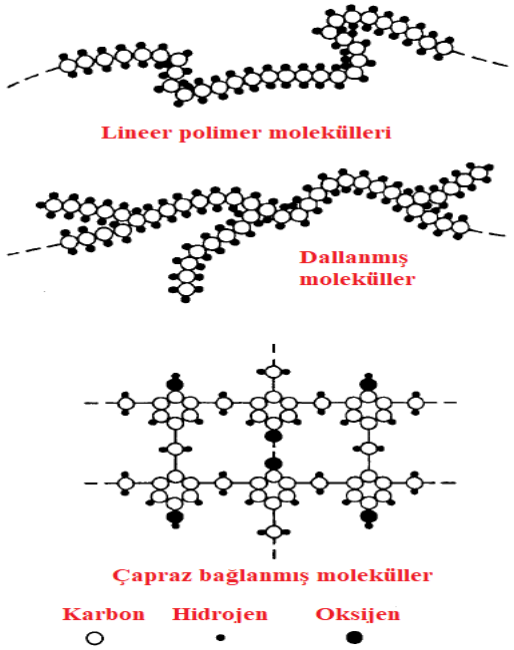
yapılmaktadır.

Termoset Yapıştırıcılar

Termoset (ısıyla katılaşan) yapıştırıcılar ilk kürleşmeden sonra tekrar tekrar ısıtılamayan ve yumuşatılamayan malzemelerdir. İlk kürleşme ve çapraz bağ oluşumundan sonra ısıtılarak tekrar yumuşatılabilir fakat ilk hali gibi sıvı forma geçmesi olanaksızdır. Termoset yapıştırıcıların yapısı ergitilemez ve çözünemez şekildedir. Genellikle yüksek sıcaklıklar altında oksidasyon ve zincir kırılması sebebiyle hasara uğrarlar.

Termoset yapıştırıcılar yapıştırıcı tipine bağlı olarak oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda geri dönüşü mümkün olmayan bir kimyasal reaksiyon ile

kürleştirilirler. Bu kimyasal reaksiyon çapraz bağlanma olarak isimlendirilir (Bauer, 1979). Bu bağ yapısı, kürleşme reaksiyonu esnasında iki düzgün polimer zincirinin arasında gerçekleşen bağlantının rijitleşmesi şeklinde gerçekleşir. Bu durum şekil 3.18'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Polimer zincirinin kürleşme reaksiyonu (Petrie, 1975)

Termoset yapıştırıcılarda güçlü bağlantıların elde edilebilmesi için bazen yüksek basınçlar gerekebilir fakat sadece küçük bir uygulama basıncı ile de güçlü bağlanma sağlayabilen termoset yapıştırıcılar da mevcuttur. Termoset yapıştırıcılar bazen de fırça ya da sprey şeklinde uygulanabilmesi için çözücü içerisinde kullanılabilir. Ancak çoğunlukla sıvı, pasta şeklinde ve katı şekillidirler. Epoksi ve üretan yapıştırıcılar termoset yapıştırıcılara örnek olarak verilebilirler.

Termoplastik Yapıştırıcılar

Termoplastik yapıştırıcıların termoset yapıştırıcılardan en önemli farkı sıcaklık altında kürleşme reaksiyonu göstermemeleridir. Termoplastik yapıştırıcılar genellikle katıdır ancak ısıtıldıklarına yumuşarlar ve erirler. Isıtıldıklarında eriyebilmelerinin nedeni çapraz bağlanma olmamasıdır (Bartz ve ark., 1975). Moleküler yapıları termosetlerde olduğu gibi lineer zincir şeklinde ya da dallanmış şekilde olabilir.

Termal şartlandırma, eritme için tekrar tekrar sıcaklık uygulanmasına neden olur. Bu da yapıştırıcının oksitlenmesine sebebiyet verir ve yapıştırıcının tekrar

kullanım limitini sınırlar. Termoplastik yapıştırıcılar uygulandıktan sonra bağlantı oluşur ve yapıştırıcı soğudukça sertleşme gerçekleşir. Termoplastik yapıştırıcıları akıcı hale getirilebilmek için çözücü içerisinde çözerek kullanmak mümkündür. Ahşap yapıştırıcıları buna örnek olarak verilebilir.

Termoplastik yapıştırıcılar uygulanacakları yüzeye uygulandıktan sonra bir süre beklenerek yapıştırılırsa uygun bir kürleşme sağlanmış olur. Kürleşme reaksiyonlarını hızlandırmak için hızlandırıcı ile satılan yapıştırıcılar vardır. Su yardımıyla aktive olan zarf yapıştırıcıları bunlara örnek olarak verilebilir. Çapraz bağlanma olmaması sebebiyle, düşük sıcaklıklarda oldukça iyi mekanik özellikler gösterseler de yüksek sıcaklıklarda termoset yapıştırıcılarla kıyaslanamayacak kadar düşük mekanik özelliklere sahiptirler. Bu sebeple düşük sıcaklıklarda sürünme hasarına maruz kalabilirler. Uzun süreli kullanımda ortaya çıkan sürünme hasarı (Zhang ve ark., 2004), (Li ve Dasgupta, 1993) termoplastik yapıştırıcıların yapısal kullanımındaki en önemli engel olarak değerlendirilebilir. Termoplastikler, kimyasal ortamlara ve çözücülere de termosetler kadar dayanıklı değildirler.

Elastomerik yapıştırıcılar

Elastomer yapıştırıcılar, kendilerine has reolojik özellikleri sebebiyle (Christensen ve McKinley, 1998) ayrı olarak sınıflandırılırlar. Elastomer yapıştırıcıların temeli yüksek tokluk ve uzamaya sahip olan sentetik ya da doğal olarak elde edilen elastomerik polimerlere dayanmaktadır. Bu yapıştırıcılar yüksek derecede genleşme ve sıkışma kapasitesine sahip polimer esaslı reçinelerden imal edilmişlerdir. Uygulanan yük kaldırıldıktan sonra başlangıçta sahip oldukları boyutlarına ve şekillerine hızlı veya zamana bağlı bir şekilde geri döner. Sonuç olarak elastomer yapıştırıcıların en önemli iki özelliğinden birisi büyük bir enerji absorbe edici ve titreşim sönümleyici olması (Deng ve ark., 2006), buna ek olarak ta düzgün olmayan yükleme dağılımlarında bağlantı tasarımlarında yüksek mukavemet sunmasıdır. Elastomer yapıştırıcılar hem termoset hem de termoplastik esaslı olabilir. Termoset bazlı olan elastomer yapıştırıcılar bazı yapısal uygulamalarda kullanılabilirler.

Elastomer yapıştırıcılar sahip oldukları özellikler sebebiyle çok geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Elastomerler yüksek viskoelastikliğe sahip malzemeler olduğu için yüksek derecede uzamaya sahiptir, düşük modüllüdür ve yüksek tokluk değerlerine sahiptir. Bu özellikler elastomer reçinelere, yüksek soyulma mukavemeti ve farklı genleşme

katsayılarıyla yüzeylere bağlanarak yüksek esneklik dereceli bağlantılar oluşmasını sağlar. Elastomer reçineler dolgu malzemesi, ses yalıtımı (Haussling, 1991) ve titreşim sönümleyici olarak yaygın biçimde kullanılırlar.

Hibrit Yapıştırıcılar:

Hibrit yapıştırıcılar termoset, termoplastik veya elastomer reçinelerin tek bir yapıştırıcı şeklinde kombine edilmesiyle oluşturulur. Hibrit reçineler, farklı özelliklere sahip reçinelerin her bir bileşeninin en yararlı özelliklerinden yararlanmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Genel olarak yüksek sıcaklıkta mukavemetli ve rijit reçineler, yüksek soyulma mukavemeti ve enerji absorpsiyonu sağlamak için termoplastik veya esnek, yüksek tokluğa sahip elastomerler ile birleştirilirler. Fakat elastomer reçinelerin ilk tasarımları esnasında, bileşen içerisinde yer alan zayıf özelliklerin giderilememesi sebebiyle iyi ve kötü özelliklerin bir arada olması sebebiyle kullanıma sunulamamışlardır.

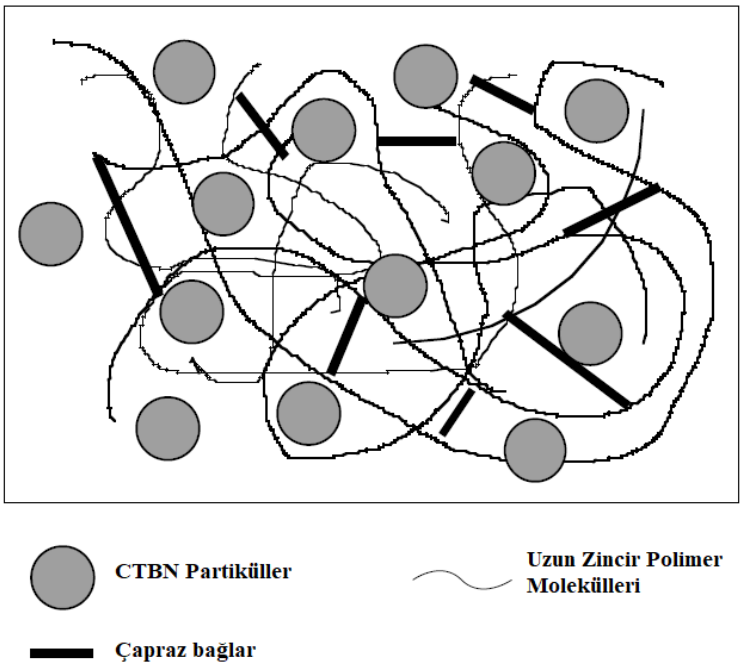
Hibrit reçinelerde gevrek kırılma ile mücadele edebilmek için esnekliğe sahip reçineler bir başka reçineye karıştırılmışlardır. Böylelikle nitril fenolik epoksi polisülfit reçineler ortaya çıkarılmışlardır. Bunlarında en önemli dezavantajları içlerinde bulunan elastomerik bileşenler sebebiyle düşük camsı geçiş sıcaklığı göstermeleri ve kimyasal ortamlara dirençlerinin zayıf olması sebebiyle erken bozunmalarıdır. Yine de bu reçineler uzay havacılık, ulaşım ve otomotiv sektörlerinde sıkça kullanılmaktadır. Piyasada tek bileşenli ve çift bileşenli olarak temin edilmesi mümkündür.

Son dönemlerde yüksek sıcaklıklarda mukavemet kaybı göstermeden yüksek soyulma mukavemetine ve tokluğuna sahip termoset reçineler aşağıdaki şekilde oluşturulur.

- Reaktif hibritler, sadece beraber karıştırılmak yerine birlikte reaksiyona sokulurlar,
- Dağılmış faza sahip hibritler, uygun esnekliği kazandırabilecek bir ortamda matris içerisine ayrıca dağıtılırlar.

Bu şekilde formülize edilen ve üretilen reçineler, sıra dışı özellikleri bir arada sunar. Bu reçinelere verilebilecek en önemli örneklerden birisi epoksi-üretan reçinelerdir. Bu özellikleri sağlayacak bir başka metot ise özel mikro yapıya sahip bileşenlerin yapıştırıcı içerisine eklenmesidir. Bahsedilen mikro yapıya sahip bileşenler fiziksel olarak kararlıdır ve kimyasal olarak bağlanmış elastomerlerden oluşur. Vinil ve karboksi akronitril bütadien polimerler epoksi veya akrilik reçine içerisinde dağıtılarak elde edilebilirler. Bu durum şekil 3.19'da gösterilmektedir. Bu yapıştırıcılar yüksek soyulma, kayma ve darbe mukavemetlerinin yanı sıra yağlı yüzeylerde bile oldukça iyi tutunma sağlarlar. Bu

durumun, yapıştırma neticesinde reçine tarafından yağın emilmesi sonucu yağın, reçine içerisinde bir diğer esnek bileşen gibi görev yapmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



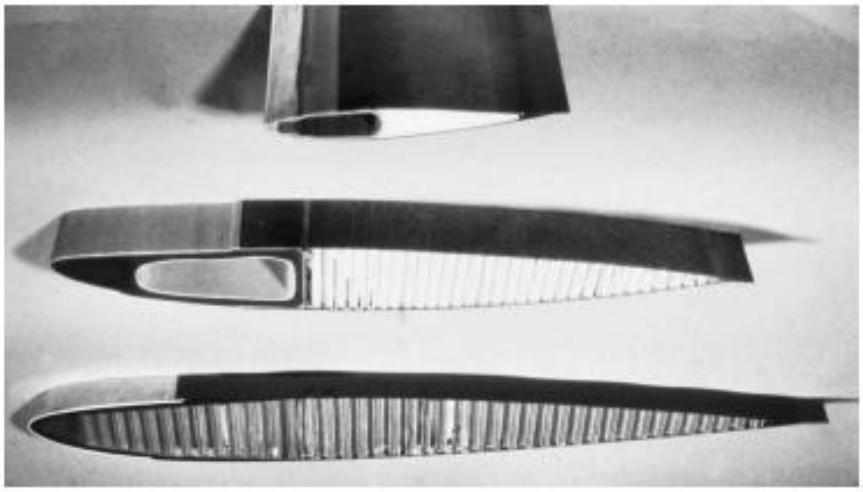
Şekil 3.19. Nitril elastomer dağıtılmış ve toklaştırılmış epoksi ve akrilik reçine (Petrie, 1975)

3.1.7. Yapıştırıcıların Kullanım alanları

Günümüzde yapıştırıcıların esas yük taşıma ve aktarma elemanı olarak kullanıldığını birçok uygulama vardır. Bunların en önemlilerinden bir tanesi havacılık uygulamalarıdır (Baker, 2012), (Shaojie, 2008). Diğer endüstrilere kıyasla havacılık ve uzay uygulamalarında güvenlik ve güvenilirlik en önemli tasarım kriterlerinden birisi olmasına rağmen, yapıştırıcıların en çok kullanıldığı sektörlerin başında gelirler. Bu durum da yapıştırıcıların ne kadar önemli ve güvenilir bağlantı elemanlarından olduğunun göstergesidir. Yapıştırıcı bağlantılı uçak şaseleri, ikinci dünya savaşı zamanlarından günümüze kadar gelen uzun bir süreç boyunca kullanılmaktadır (Strausberg ve Link, 1990). Kompozit alanındaki ilerlemeler sebebiyle yapıştırıcılara olan talep artmıştır çünkü havacılık sanayinde hafiflik ve dayanıklılığı bir arada sunan metal kompozit bileşenler farklı yapılar olması sebebiyle yapıştırıcılardan başka bir yöntemle bir araya getirmek oldukça zordur. Havacılıkta sıkça kullanılan bal peteği konstrüksiyonları da petek ile alt üst katmanların yapıştırıcı reçine ile bir araya getirilmesiyle oluşturulur (Masuda ve Fukuda, 1995), (Akkuş, 2016). Gösterdikleri

yüksek mukavemet, titreşim sönümleme ve yüzey kalitesi özellikleri kanat yapımında sıkça kullanılırlar. Bir helikopter kanadında kullanılan bal peteği konstrüksiyonu şekil 3.20'de gösterilmektedir. Boeing 747'de kullanılan bir bal peteği konstrüksiyonun 300 kilograma kadar yükleri güvenle taşıyabildiği bildirilmiştir (Ebnesajjad, 2010).

Lear fan uçaklarının %80 inden fazlası karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerden üretilmiştirler. Bu uçağın üretimindeki bağlantıların çoğunda hem şase de hem de gövde de yapıştırıcılar kullanılmaktadır. 2016 itibariyle tespit edilen verilere göre havacılık alanında kullanılan yapıştırıcı pazarının 2.41 milyar dolara ulaştığı bildirilmiştir (Açık, 2017).

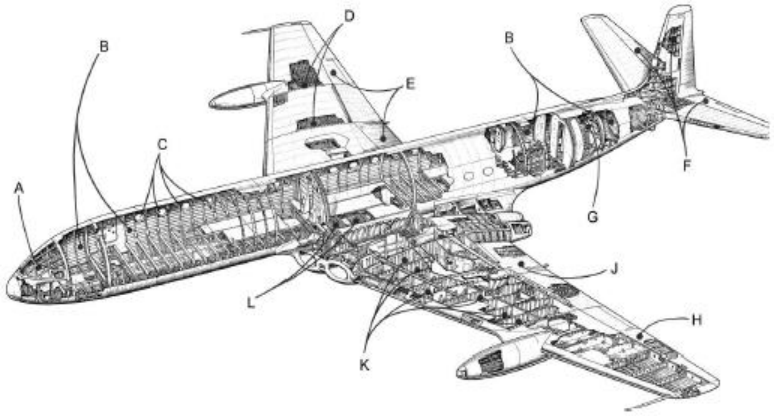


Şekil 3.20. Savaş helikopteri rotoru Amerikan ordusu (Adams ve ark., 1997)

Havacılık sektöründe neden yapıştırıcıların kullanıldığı on bir madde ile özetlenmektedir;

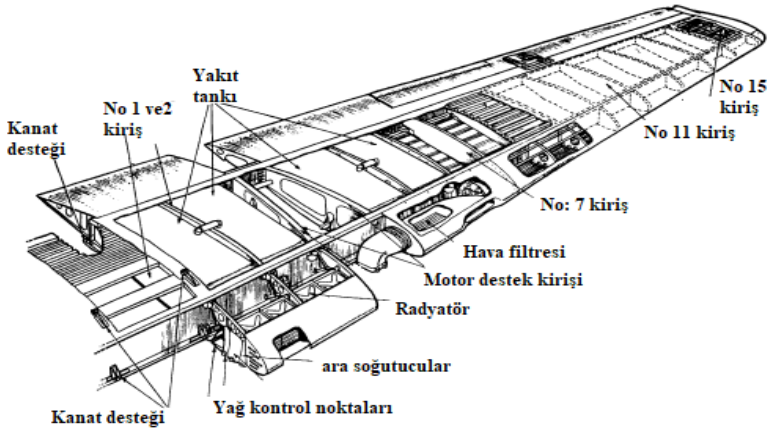
- Ağırlığın azaltılması
- Yüksek yorulma dayanımı ve sonik damperleme özelliği
- Tasarımın basitleştirilmesi
- Pürüzsüz dış yüzeyler
- Farklı yapıların kolaylıkla birleştirilebilmesi
- Üretim zamanı ve maliyetindeki düşüş
- Çatlak ilerlemesini ve büyümesini önleme
- Sızdırmazlık
- Yüksek mukavemet
- Büyük yapıları bir arada tutabilmesi
- Yeni tasarlanan malzemelerin kullanımına imkân sağlaması

Şekil 3.21'de bir yolcu uçağının yapısal olarak hangi bölümlerinde yapıştırıcı kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Uçak gövdesinin görüntüsü a-Pilot kubbesi yapısı, b- yük taşıyan uzunlamasına kirişler, c- pencere çerçeveleri, d- kanatlardaki kirişler, e- kanatçıklar ve flaplar, f- dış yüzeyler ve arka kanatçıklar, g- basınçlı bölgenin kapatılması, h- kanatların hareketli kısımları, j- kanatçıklar, k- dikey kirişler ve kanat destekleri, l- basınç bölgesindeki tüm kirişler (Adams ve Wake, 1984)

Bir uçak kanadının içerisinde kullanılan yapıştırıcılı bölgelerinin detaylı görünümü ise şekil 3.22'de gösterilmektedir.



Şekil 3.22. Yapıştırıcıların uçak kanadı içerisinde kullanıldığı bölümler (Adams ve Wake, 1984)

İnşaat sektörü, yapıştırıcıların kullanıldığı bir diğer alandır. Epoksi ve polyesterler beton içerisinde cıvataların tespitinde kullanılırlar. Köprülerde epoksi reçineler tasarım eksikliklerini gidermek ve köprü için belirlenen tasarım yükünü artırmak için kullanılırlar (L'hermite ve Bresson, 1971) (Macdonald ve Calder, 1982) tarafından bildirilen bir çalışmada, köprünün 5-6 mm kalınlığındaki 254 mm

uzunluğundaki çelik levhalar kumlama yöntemiyle yüzeyleri pürüzlendirilmiş ve epoksi reçine ile bağlanmışlardır.

Demir yolu taşımacılığında kullanılan metro, tramvay ve tren gibi araçlarda bulunan sürgülü kapıların rahat çalışması için hafif konstrüksiyonlar gereklidir. Bu sebeple bu kapıların imal edilmesinde yapıştırıcılar ile bağlantıları yapılmış alüminyum konstrüksiyonlar kullanılmaktadır. Kapıların kullanıldığı yere ve şartlara göre poliüretan, nitril poli propan yapıştırıcılar kullanılmaktadır.

Yakıt tasarrufu ve verimlilik konularının öneminin arttığı otomotiv sektöründe çeliğe alternatif olarak kullanılan alüminyum ve kompozit malzemelerin artışıyla beraber yapıştırıcı kullanımı da artmaktadır. 2015 yılı itibariyle otomotiv sektöründeki yapıştırıcı kullanımının 5.56 milyar dolar seviyelerine çıktığı bildirilmiştir (Açık, 2017).

Otomobil sektöründe yapıştırıcı kullanımı kaporta, boya ve montaj bölümleri olmak üzere üç bölüme ayrılır. Kaporta bölümünde metal-metal, metal-plastik ve metal kompozit bağlantıları yapıştırıcılar yardımıyla gerçekleştirilir. Bu noktadaki en önemli problemlerden bir tanesi tüm malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilecek tek tip bir yapıştırıcının olmamasıdır. Flanş bağlantıları, titreşimin yüksek olduğu bölgelerde ve hibrit bağlantı bölgelerinde sıkça kullanılmaktadır. Boyacılık bölümünde, kaplama ve dalgalanma önleyici olarak kullanılmaktadır. Montaj bölümünde ise rijitliği artırmak , gerilme konsantrasyonunu düşürmek ve maliyet/işçilik/zaman tasarrufu için kullanılmaktadır (Adams, 2005) (Pocius, 2012).

Yapıştırıcıları diğer bir kullanım alanımı mobilyacılıktır. Ahşap veya ahşap metal mobilya iskeletleri, yüksek burulma ve klivaj gerilmelerine maruz kalabilir. Metal çerçeveler bu iş için kullanılsa da estetik gerekçelerle farklı şekillerde çerçevelerin tercih edilmesi metal çerçevelerin döküm yoluyla elde edilmesini gerektirir. Döküm yoluyla elde edilen çerçeveler, yapıştırıcılar ile birbirine bağlanır. Ahşap yoğunluklu mobilyalarda da hem dolgu malzemesi olarak hem de yüksek gerilmeye dayanıklı bağlantıların elde edilmesinde kullanılırlar. Bu iş için özel olarak tasarlanan polivinil asetat emülsiyonları ve üre formaldehitler endüstride bu iş için sıkça kullanılmaktadır (Adams ve ark., 1997).

Denizcilik uygulamalarında yapıştırıcı ve yapıştırıcılı bağlantıların oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Şekil 3.23 de bir teknenin yapıştırıcı yardımıyla gövde ve üst panel bağlantı uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 3.23. Ahşap, metal ve kompozit yapıştırıcı uygulamalarının olduğu tekne üretimi görüntüsü (http://www.turksail.com)

Yapıştırıcılar, küçük balıkçı teknelerinden büyük yatlara ve gemilere kadar birçok modelde kullanılmaktadır. Nem, deniz suyu, değişken iklim şartları ve güneş durumu, gibi tahrip edici çevresel şartlar, denizcilik uygulamalarında yapıştırıcı seçimini ve uygulamasını zorlaştırmaktadır (Roland ve ark., 2004). 2014 kasım verilerine göre denizcilik sektörümde yapıştırıcı pazarı 8,6 milyar dolar seviyelerindedir ve Avrupa'dan Amerika'ya kadar tüm marinalarda kullanılmaktadır. Geleneksel olarak denizcilik uygulamalarında alüminyum ve kaynaklı birleştirme işlemleri kullanılmaktadır. Bu durum gerilme yığılmalarına ve ağırlık artışına neden olur. O sebeple deniz araçlarının üretiminde ağırlığı azaltırken yük taşıma kapasitesi artıran yapıştırıcılar oldukça önemli bir yere sahiptir. Ayrıca kaynak prosesinden kaynaklanan çarpılma (distorsiyon) problemini de ortadan kaldırması sebebiyle artık gerilme (residual stress) oluşumunu ve hassas tasarımların yapılmasını sağlar (Adams, 2005) (Tysarczyk ve ark., 2010).

Elektrik elektronik pazarında yapıştırıcıların pazar payı 6 milyar dolar seviyelerindedir. Çiplerin montajında, kabloların kaplanmasında, elektronik bileşenlerin kaplanmasında, elektronik ekipmanların ana karta sabitlenmesinde yapıştırıcılar sıkça kullanılmaktadır (Da Silva ve ark., 2011) (Möller ve ark., 2015).

Teknolojik gelişmeler, yapıştırıcıların medikal uygulamalarda (cerrahi, dişçilik, veterinerlik) kullanımını da beraberinde getirmektedir (Pocius, 2012). Yapıştırıcılar bu alanda kullanılırken, esneme, nefes alma, absorpsiyon, gözeneklilik, toksik olmama, anti mikrobiyel, canlı dokularla uyumluluk ve saydamlık gibi sıra dışı özellikler

sunarlar. Cerrahi operasyonlarda oluşabilecek çeşitli komplikasyonlardan kaçınmak için basit ve hızlı yapıştırıcılar sıklıkla kullanılırlar (Scognamiglio ve ark., 2016). Yapıştırıcıların bu sektördeki pazar payı incelendiğinde 15 milyar dolar seviyelerinde olduğu görülmektedir. Artan dünya nüfusu ve sağlık problemleriyle beraber bu rakamın daha da artacağı düşünülmektedir.

3.1.8. Yapıştırıcılı bağlantılarda yüzey hazırlama teknikleri

Yapıştırıcı bağlantılarının kullanılabilmesindeki en önemli adımlardan birisinin de yapıştırılacak yüzeylerin durumu ve yapısı olması sebebiyle, yüzey hazırlama yöntemleri oldukça önemlidir. Çünkü gözle muayenede son derece güzel görünen metal yüzeyler, mikroskopla incelendiğinde çok sayıda yüzey düzensizliğine sahip olduğu ve istenilen pürüzlülük değerinde olmadığı görülür. Ayrıca yüzeyde oksitler ve yüzey tarafından adsorbe edilmiş gazlarda bulunabilir. Metal olmayan yüzeyler de ise nem, çeşitli katkı maddeleri, adsorbe edilen filmler, yapışma prosesini zorlaştırır ve kaliteyi düşürür (Verbruggen, 1987), (Van Ooij, 1985). Tüm bu etkileri gidermek ve kaliteli bağlantılar elde etmek için kullanılan yüzey hazırlama teknikleri temel olarak temizlik, süreklilik, stabilite ve ıslatma gibi dört temel unsur üzerine konumlanmaktadır.

Temizlik, kirli yüzeylerle de çok güçlü bağlantılar kurabilen bazı özel yapıştırıcılar hariç, diğer yapıştırıcıların yüzeye sağlam bir şekilde tutunmasında önemli bir adımdır. Temizlik sadece istenmeyen kirlerin, oksit ve çeşitli düzensizliklerin ortadan kaldırılması değil aynı zamanda yüzey homojenliğini sağlamak ve yapıştırıcı uygulanacak yüzeydeki özelliklerin noktadan noktaya değişmemesini gerektirmektedir. Yapıştırma yüzeyinde yer alan süreksizlik yapıştırma işleminden sonra gerilme yığılmalarına yetersiz tutunmalara sebebiyet verebileceği için bu hususa dikkat edilmelidir.

Hem bağlantı öncesinde hem de sonrasında yüzey stabilizasyonu da oldukça önemlidir. Çünkü bu sebeple istenmeyen ara yüzeyler oluşabilir. Bu durum uygulama esnasında süresinin iyi ayarlamamasından, yüzey reaktifliğinden ve kürleşme sırasındaki zaman-sıcaklıktan kaynaklanabilir.

Islatma teorisinde belirtildiği gibi, yapıştırma yüzeylerinin serbest enerjisinin yapıştırıcının yüzey geriliminden daha yüksek olması gerekmektedir. Bazı durumlarda, (özellikle yapıştırılacak malzemeler polimerler veya polimer matrisli kompozitler olduğunda), bu yüzeylerin serbest enerjisinin yapıştırıcı ile uyumlu olabilmesi için

değiştirilmesi gerekir. Bu sebeple yüzeyleri homojenleştirmek, belirli kimyasal grupları oluşturmak, yüzey pürüzlülüğünü istenilen seviyeye getirmek ya da zayıf sınır katmanları kaldırmak için yüzey hazırlama işlemlerini uygulamak gerekir.

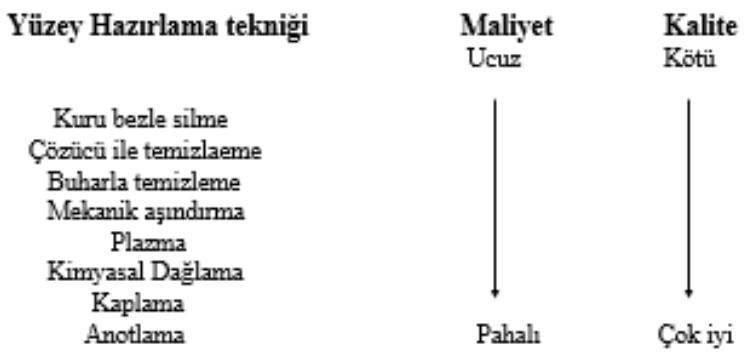
Mekanik (kumlama, zımparalama), kimyasal (eloksal, asitle dağlama) ve enerji tabanlı (plazma, lazer) olmak üzere endüstride kullanılan yüzey işlemlerinin birçok farklı çeşidi uygulanmaktadır. Tüm yapıştırma proseslerinde, en uygun yüzey hazırlama işlemi, yapıştırılacak malzemenin karakteristikleri, şekil ve boyutu, yapıştırıcı ve üretim ile ilgili diğer koşulları dikkate alınarak seçilmelidir (Sabbineni, 2015).

Özet olarak yapıştırıcı bağlantısı yapılacak yüzeyler trikloretan, aseton, izopropilen vb. gibi organik bir çözücüyle buharlı yağ giderme yöntemi ile temizlenir. Bu işlemin ardından, yapıştırılacak yüzeyin, malzeme özelliğine bağlı olarak uygun bir pürüzlendirme işlemi ile pürüzlendirilerek yapıştırıcının temas yüzey alanının artırılmasını sağlamak için kumlama veya zımparalama gibi yöntemlerle devam edilir. Daha sonra eğer yapıştırılacak malzeme metalse, kimyasal dağlama metodu ile metal yüzeyinden zayıf bağlı oksitler kaldırılır ve yüzeye güçlü bir şekilde bağlanmış bir oksit tabaksı oluşturulur. Eğer yapıştırılan malzeme yalıtkan (karbon elyaf takviyeli kompozit) bir malzeme ise sadece pürüzlendirilerek ve temizlenerek yüzey hazırlama işlemi tamamlanır. Bazı özel durumlar da yapıştırma yüzeyinin ıslatılabilirliğini iyileştirmek ve oksidasyondan korumak için malzemenin yüzeyinde astar oluşturulabilir (Ebnesajjad, 2010).

En çok kullanılan yüzey hazırlama metotları (Ebnesajjad, 2010);

- Aşındırma
- Çözücüyle silme
- Buharla yağ giderme
- Ultrasonik buharla yağ giderme
- Dağlama

Yapıştırıcılı bağlantılarında yüzey temizliği yönteminin maliyet ve kalitelerine göre sıralanışı şekil 3.24’de gösterilmektedir.



Şekil 3.24. Yüzey hazırlama tekniklerinin maliyet ve kalitesi ile arasındaki ilişki (Ebnesajjad, 2010)

3.1.8.1 Aşındırma tekniği ile yüzey hazırlama

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetine yüzey pürüzlülüğünün önemli oranda etkisi vardır (Deligianni ve ark., 2001), (Özel ve Karpat, 2005) . Bu etki, gözenekler sayesinde malzemenin yüzey alanının arttırılması ile sağlanmaktadır. Böylece yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki tutunma artacağı için bağlantı dayanımı artırılır.

Aşındırma işlemleri kum püskürtme, zımparalama veya taşlama gibi aşındırmada kullanılan yöntemler yardımıyla gerçekleştirilir. Kum püskürtme yönteminde koruyucu oksit tabakasını muhafaza etmek için önemli olan ön ısıtma prosesi, diğer yöntemler için gerekli değildir. Kum püskürtme prosesi, sert kumların sıkıştırılmış hava veya yüksek su basıncı yardımıyla karşı yüzeye püskürtmek suretiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için pürüzlülüğü 2,5 μm'yi aşan yüzeyler önerilmekte, ve 5-7 μm pürüzlülüğünde yüzeyler de sıklıkla kullanılmaktadır. Sert yüzeylerde ise 40 ve 80 numaralı sert alüminyum oksit kumlar 6-7,5 kg/cm^2 basınçlı hava tabancaları ile uygulanmaktadır.

Aşındırma yöntemleri uygulanırken unutulmaması gereken bir diğer nokta da yaygın olarak yüzey pürüzlülüğü ölçen cihaz ile ölçülen yüzey profillerinde sadece profilin derinliğini göstermesidir. Pürüzlendirme işlemi, pürüzlendirilen yüzeye düz bir açı ile bakıldığında yüzeydeki parlaklığın azalması sayesinde belirlenebilir.

Kum püskürtme yönteminde temiz ve ince kum kullanılmalı ve püskürtme için kullanılan hava, kuru ve filtrelenmiş olmalıdır. Kum püskürtmekte kullanılacak hava basıncı ve tane çeşidi/boyutu temizlenecek yüzeyin sertliğine bağlı olarak değişmektedir. Kum püskürtme yöntemi, floropolimer kaplamaların da kaliteli bir yapışma elde etmek için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir (Ebnesajjad, 2010).

Püskürtme metodunun uygulanabilmesi için çok sayıda aşındırıcı mevcuttur. Bu aşındırıcılar genellikle alüminyum oksit (alümina), cam bilye, silikon dioksit (kum, silika), silisyum karbür ve kuartzdır. Aşındırma işleminin minimal bir şekilde yapılarak karşı yüzeyin nispeten yumuşak bırakılması istenilen durumlarda plastik, fındık kabuğu, sodyum bikarbonat gibi yumuşak aşındırıcılarda kullanılabilir. Bu aşındırıcılara, aşındırılacak malzemeye (malzeme sertliği ve yoğunluğu), aşındırma miktarına ve maliyete göre karar verilebilir. Genel olarak alüminyum oksit ve silikon karbid, 16 ile 240 taneli boyut aralığına ve keskin kenarlı tanelere sahiptir. Silisyum karbür, alüminyum oksitten daha fazla kırılgan ve oldukça sert, keskin tanecikli bir yapıdadır. Silisyum karbür ise son derece sert malzemelerin kumlanmasında kullanılır ve oldukça maliyetlidir (Ebnesajjad, 2010). Silikon dioksit ile kumlama, silikon dioksitin düzgün şekilli ve pürüzsüz olması sebebiyle ucuz olmasına rağmen metal yüzeylerin pürüzlendirilmesinde çok fazla tavsiye edilmezler. Cam bilyeler kimyasal olarak reaktif olmayan camdan üretilir. Çevresel olarak diğerlerine kıyasla zararsız olması, maliyeti düşürmesi ve düzgün küresel şekli sayesinde homojen ve güzel bir aşındırma yapması sebebiyle tavsiye edilirler.

Zımparalama ise geniş yüzeyleri temizlemek ve istenilen pürüzlülüğü sağlamak için oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Literatürde yer alan bilgilere göre zımparalamada tane büyüklüğü 100 ile 180 numaralı silisyum karbür kum zımpara kağıdı ve yüzey pürüzlülüğün ise 1,5 ile 2,5 μm arasında olması önerilmektedir (Rogers, 1966) (Zhai ve ark., 2008). Çok parlak yüzeylerde, yapıştırıcının yüzeye tutunması zorlaştığı için mukavemet değerlerinde düşüşler gözlemlenmektedir. Benzer şekilde, pürüzlülük değeri Ra>5μm'den büyük olan yüzeylerde, ıslatma ve adezyon mekanizmalarının oluşumunun zorlaşması sebebiyle ve bağlantıda boşluklar oluşturacağından mukavemet azalır. Bu pürüzlülük değerlerinde oluşabilecek hava absorpsiyonu, kürleşen yapıştırıcı içinde kalabilir (Şekercioğlu ve Özenç, 2012). Yüzey zımparalama işlemi sırasında izlerin mekanik kilitleme mekanizmasının oluşmasını sağlaması için çekme yönüne dik olarak hazırlanması gerekir.

3.1.8.2 Çözücüyle silme tekniği ile yüzey hazırlama

En çok kullanılan fakat tek başına yeterli olmadığı için başarısız olduğu düşünülen bir metottur. Yapıştırılacak yüzeyler, üzerine temiz çözücü bir solüsyonun damlatılıp bir bez veya kâğıt yardımıyla silinmesiyle temizlenir. Silinen yüzeylerde

çizgilerin oluşması bezin veya çözücünün temiz olmadığını gösterir. Temizleme işleminde kullanılan çözücü solüsyonlar tolüen, etilen, metil etil keton ve asetondur. Yapıştırılacak malzeme yüzeylerinin daha detaylı temizliği için silme işleminin ardından çözücü koyulan bir beher içerisinde ultrasonik banyoda 30 dakika çalkalanıp daha sonra fırında 80˚C'de 15 dakika kurutma ve tekrar silme işlemi gerçekleştirilebilir. Böylelikle yapıştırma yüzeyi, üzerinde kalan küçük boyutlu düzensizliklerden ve kirlerden tamamen arındırılmış olur (Ekrem, 2015).

3.1.8.3 Buharla yağ giderme tekniği ile yüzey hazırlama

Buharla yağ giderme yöntemi, özellikle sıvı yağlar, gresler, mumlar, talaşlar ve küçük boyutlu parçacıklar gibi çözünebilir kirlerin, metalik ve metalik olmayan parçaların yüzeylerinden çıkarılması için kullanılan bir temizlik işlemidir. Buhar yardımıyla yağ gidermenin temel prensibi çözücü solüsyonların buharlaştırılarak sıcak bir şekilde yüzeye uygulanması ve yüzeylerin temizlenmesidir. Çözücü buharının uygulanma sıcaklığı kaynama noktasındadır ve yaygın olarak trikloroetilen (kaynama noktası 87˚C) veya perkloroetilen (kaynama noktası 121˚C) çözücüler kullanılır. Metallerin trikloroetilen buharına bir dakika daldırılması, yüzeylerinde bulunan kirlerin ve yağın tamamen temizlenmesi için yeterlidir (Snogren, 1974).

3.1.8.4 Ultrasonik buharla yağ giderme tekniği ile yüzey hazırlama

Ultrasonik buharla yağ giderme yöntemi buharla yağı giderilmiş yüzeylerin ultrasonik banyo içerisinde temizlenmesi işlemidir. Temizlenecek yüzeyler ilk olarak buhar durulama yöntemi ile ya da kaynamakta olan bir çözücü içine daldırmak suretiyle temizlenir. Ardından parçalar buhar veya spreyli buhar ile yıkanarak ultrasonik banyo içerisine daldırılır. Ultrasonik yıkama sırasında insan kulağıyla duyulamayacak kadar yüksek frekanslara çıkan ses dalgaları (saniyede 18.000 devirden daha fazla) yardımıyla hızlı bir çalkalama sağlanarak, yüzeyde kalan kirler hızlı bir şekilde giderilir. Yüzeyde ki küçük parçalar, çözünmeyen maddeler ve güçlü kirler, hızlı bir şekilde yüzeylerden uzaklaştırılır. Temizlenecek yüzeyler için optimum temizlik prosesi, temizlenecek yüzeylere uygun frekans ve yoğunluğun deneme yanılma yöntemi ile seçilmesi mümkündür. Yüzeyden çıkarılan kir, temizlenen parçanın türüne ve banyo içerisindeki çözücüye bağlıdır. Bazı ultrasonik yağ gidericiler, değişken frekans ve güç kontrollerine

sahiptirler. Ultrasonik temizleme için en yaygın frekans aralığı saniyede 20.000 ile 50.000 devir arasındadır (Ekrem, 2015).

3.1.8.5 Dağlama tekniği ile yüzey hazırlama

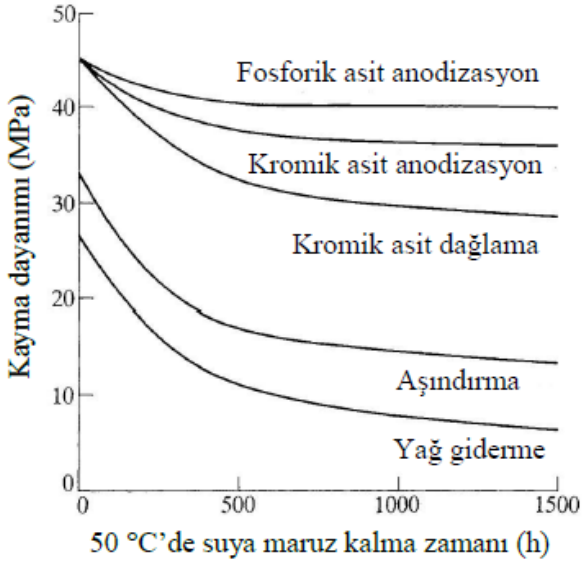
Dağlama tekniği ile yüzey hazırlama yöntemi sadece fiziksel ya da kimyasal olarak yüzeyin temizlenmesini ve zayıf tabakaların kaldırılmasını değil, aynı zamanda yüzeyin kendi kimyasından kaynaklanan yüzey durumunu yeniden ortaya çıkarır. Böylelikle yüzey sınır tabakasını modifiye ederek yüzeyin ıslanma ve bağlanma kabiliyetini artırır. Yapıştırıcının yapıştıracağı yüzeyi daha kolay ıslatabilmesi için yapıştırılacak malzemenin yüzeyinden pas, boya ve organik kirletici maddeler gibi serbest kirlilikler kaldırıldığında yapıştırıcılı bağlantının dayanımı önemli ölçüde artar. Çizelge 3.3'de çok sayıda metallik malzemenin ve yapıştırıcının kombinasyonu şeklinde yapılan bağlantı mukavemetlerine yüzey hazırlama yöntemlerinin etkisini göstermektedir. Yüzey hazırlama ile sağlanan bağlantı dayanımı, kullanılan yapışıcı türüne bağlı olduğu kadar yapıştırılan malzeme tipine bağlıdır (Ekrem, 2015).

Çizelge 3.3. Yapıştırılan malzeme, yüzey hazırlama ve yapıştırıcıya göre bağlantı kalitesi (Ekrem, 2015)

Yapıştırılan Malzeme	Yüzey hazırlama	Yapıştırıcı	Kayma Dayanımı (MPa)
Alüminyum	Temizlenmemiş	Epoksi	3.06
Alüminyum	Buharla yağ giderme	Epoksi	5.77
Alüminyum	Aşındırma	Epoksi	12.1
Alüminyum	Asitle dağlama	Epoksi	19.0
Alüminyum	Temizlenmemiş	Vinil fenolik	16.8
Alüminyum	Yağ giderme	Vinil fenolik	19.9
Alüminyum	Asitle dağlama	Vinil fenolik	35.7
Paslanmaz çelik	Temizlenmemiş	Vinil fenolik	36.0
Paslanmaz çelik	Yağ giderme	Vinil fenolik	43.5
Paslanmaz çelik	Asitle dağlama	Vinil fenolik	49.7
Soğuk haddelenmiş çelik	Temizlenmemiş	Epoksi	20.0
Soğuk haddelenmiş çelik	Buharla yağ giderme	Epoksi	19.9
Soğuk haddelenmiş çelik	Aşındırma	Epoksi	29.6
Soğuk haddelenmiş çelik	Asitle dağlama	Epoksi	30.8
Bakır	Buharla yağ giderme	Epoksi	12.3
Bakır	Asitle dağlama	Epoksi	16.1
Titanyum	Temizlenmemiş	Vinil fenolik	9.35
Titanyum	Yağ giderme	Vinil fenolik	21.4
Titanyum	Asitle dağlama	Vinil fenolik	46.5
Titanyum	Asitle dağlama	Epoksi	21.8
Titanyum	Sıvı asitle temizleme	Epoksi	22.9
Titanyum	Sıvı honlama	Epoksi	26.9
Titanyum	Hidrofluosilisik asitle dağlama	Epoksi	27.5

Dağlama yöntemi genellikle kimyasal bir yöntemdir ve yüzeyi temizledikten sonra daha önce belirlenmiş oksitlerin güçlü bir şekilde yüzeye tutunmasını sağlar. Bu yöntem uygulanabilecek en etkili yöntemlerden birisi olduğu için maksimum dayanımın gerektiği uzun ömürlü olması gereken bağlantılarda tercih edilmelidir. Yapıştırılacak malzemelerin özelliklerine uygun değişik kimyasal işlemler uygulanır. Yapıştırılacak malzemeler hazırlanan asit çözeltisinin içine konulur ve belirli bir süre bekletilir. Çözeltinin sıcaklığı belirtilen sıcaklıklarda muhafaza edilmelidir yoksa hem çözeltinin kimyasal yapısı değişebilir hem de buharlaşabileceği için uygulayan kişide sağlık problemlerine neden olabilir.

Farklı yüzey hazırlama tekniklerinin 50˚C'lik su içerisinde şartlandıran tek taraflı bağlantıların kayma dayanımları üzerine etkileri şekil 3.25'de gösterilmektedir.

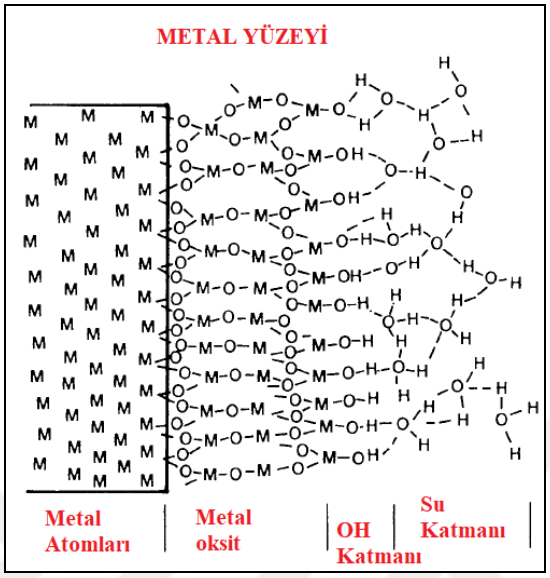


Şekil 3.25. 50 ˚C'de su içinde yaşlanmaya tabi tutulmuş alüminyum alaşımlı epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının performansını yüzey ön işlemlerinin etkisi (Petrie, 1975)

Alüminyum bağlantılar, yapıştırma işlemi uygulanmadan önce dağlama ya da çözelti içerisinde anotlama yöntemiyle yüzeyleri hazırlanır. Daha az dayanıma ihtiyaç duyulan yerlerde ise sadece mekanik aşındırma yeterlidir. Dağlama yöntemin de dört farklı yöntem kullanılmaktadır. Fosforik asitle anodizasyon, kromik asit anodizasyon, nitrik fosforik asit anodizasyon ve sodyum hidroksit anodizasyondur.

Fosforik asit dağlama ile yüzeyde ağ şeklinde homojen bir oksit tabakası elde edilir. Oksit kalınlıkları 400 nm civarındadır. Bu büyüklükteki oksitler yapışma yüzeyinde mekanik kilitlenme mekanizmasının oluşmasını sağlar. Anodizasyon

esnasında oksitlerin oluşmasının yanı sıra yüzeyde bir miktar su kalabilir fakat anodizasyon sonrasında ısıtma yöntemiyle su yüzeyden uzaklaştırılır (Davis, 1993). Bu durum şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Metal yüzeyindeki metal oksit, hidroksit ve su katmanlarının şematik olarak gösterilişi (Davis, 1993)

3.2.Nano Teknoloji ve karbon nanotüpler

Nano teknoloji, Atomlar veya molekülleri tek tek alıp hassas bir şekilde birleştirerek istenen ürünü elde etmek olarak tanımlanabilir (Schummer, 2004). Yunancada 'cüce' anlamına gelen nano, fizikte bir metrenin milyarda biri anlamına gelen ölçü birimidir. Bu tanıma göre "nano teknoloji" insanın saç kılının 80 binde biri büyüklüğünde "nano" ölçüdeki parçalarla uğraşan bilimdir. Tıpkı yap-boz oyununda parçaların birleştirilerek istenen şeklin oluşturulması gibi, nano teknolojide de atomlar veya moleküller tek tek alınıp hassas şekilde birleştirilerek istenen ürün elde edilir (Adlakha-Hutcheon ve ark., 2009). Bilindiği gibi bütün maddeler atomlardan oluşmuştur. Özelliklerini de atomlarının dizilişlerinden alırlar. Nano teknolojinin kullanıldığı ve kullanılacağı alanlar şunlardır:

- Mikroskobik moleküler bilgisayarlar, moleküler bilgisayarlar sadece hesap ve işlem yapmayacaklar, aynı zamanda kendilerini de çoğaltabilecekler.

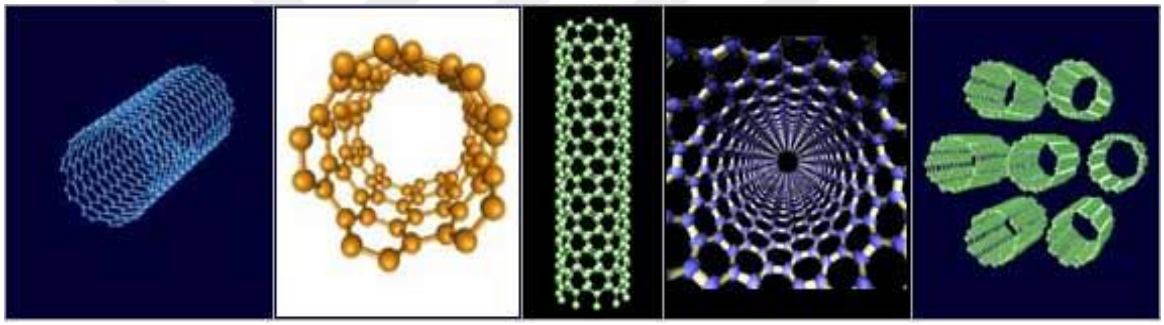
- Bütün eşyalar atomlarına kadar ayrılıp tekrar daha yararlı malzemelerin üretilmesinde kullanılabileceğinden mükemmel bir geri dönüşüm sağlanmış olacaktır.
- Dünyadaki çevre kirlenmesinin önünün alınması ve mevcut kirlenmiş kaynakların otomatik olarak temizlenmesi mümkün olabilecektir.
- Asfalt yerine yüksek etkinlikli ve kendini türetebilecek solar hücrelerden oluşan yollar dünyadaki enerji üretimini dörde katlayabilir.
- Moleküler gıda sentezi ile kıtlık ve açlığın önlenmesi mümkün olabilir.
- Nano teknoloji çevre konusunda da kullanılabilir. Temiz su kaynaklarını kirleten maddeler ayrıştırılabilir, denize dökülen petrol çözülerek temizlenebilir.
- Atom seviyesinde üretim yapılacağından çevreye verilecek zarar minimuma indirilebilir.

Nano teknolojik çalışmalar malzeme alanının konusudur. Malzeme alanında gerçekleşen gelişmeler doğrudan ya da dolaylı olarak diğer alanları da etkileyebilir. Nano malzemeler son derece dikkat çekici özellikleri sebebiyle beklentinin yüksek olduğu bir malzeme sınıfıdır. Dört ana malzeme türünün (metal, seramik, polimer, kompozit) herhangi bir türüne ait olabilirler. Diğer malzemelerden kimyasal yapılarına göre değil boyut açısından ayrılırlar (Callister Jr ve Rethwisch, 2012).

Parçacık boyutları atomsal boyutlara yaklaştıklarında malzemelerin sergiledikleri bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerde çarpıcı değişiklikler meydana gelir. Örneğin makro ölçekte mat davranan malzemeler, nano ölçekte saydam hale gelebilirler. Bazı katılar, sıvı, kimyasal olarak kararlı malzemeler yanıcı, elektriksel olarak yalıtkan malzemeler iletken davranabilir. Ayrıca özellikler nano ölçek sınırlarında boyuta bağlı olarak değişebilmektedir. Bu etkilerin bazıları kuantum mekaniğinden kaynaklanırken diğerleri ise yüzey ile ilgilidir. Bir parçacığın boyutu azaldıkça yüzeyinde bulunan atomlarının oranı önemli ölçüde artar. Bu özgün ve olağandışı özellikleri sayesinde nano malzemeler elektronik, biyomedikal, spor, enerji üretimi, ve değişik endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Callister Jr ve Rethwisch, 2012).

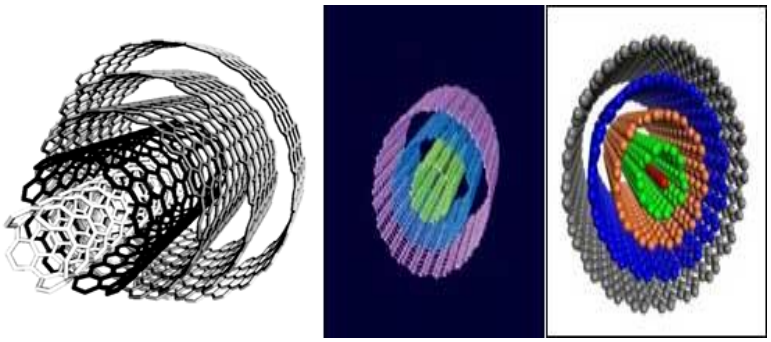
Endüstride ve bilimsel çalışmalarda hali hazırda kullanılmakta olan nano partiküller silisyum oksit, alüminyum oksit, titanyum oksit, çinko oksit, demir oksit, karbon nanotüp, grafen …vb. şeklinde sıralanabilir.

Karbon nanotüpler, tek çeperli, çok çeperli, fonksiyonelleştirilmiş, fonksiyonelleştirilmemiş olmak üzere sınıflandırılabilirler. Tek çeperli nano tüpler oldukça önemli özelliklere sahiptir çünkü çok çeperli nano tüplerde (Multi Walled Nano Tubes-MWNT) bulunmayan elektriksel özellikleri vardır. Tek çeperli karbon nanotüpler, modern elektronik biliminin şu anki dayanağı mikro elektromekanik ölçeğin ötesinde elektroniği daha küçük hale getirmek için en muhtemel adaydır. Bu sistemlerin en temel yapı bloğu elektrik telleridir ve TCNT'ler mükemmel iletiçiler olabilir. TCNT'lerin yararlı bir uygulaması da intramoleküler (molekül, zerre içi) alan etkili transistorlardır (Field Effect Transistors-FETs). TCNT'lerin alan etkili transistör olarak kullanımı yoluyla ilk intramoleküler mantık geçidinin üretimi bugünlerde mümkün hale gelmiştir. Tek cidarlı karbon nanotüplerin üretimi oldukça maliyetlidir ve bu durum TCNT'ler üzerine daha detaylı çalışmalar yapılabilmesinin önünde ki en önemli engeldir.



Şekil 3.27. Tek çeperleri karbon nano tüpler (www.nanokar.com)

Çok çeperli nanotüpler tüp şeklini almak için kendi üzerinde kıvrılmış olan çoklu grafit katmanlardan meydana gelir. Çok çeperli nano tüplerde tabakalar arası mesafe grafitteki grafen tabakaları arasındaki mesafeye yakındır, yaklaşık olarak 3,3 Angström (1 Angström= 0,1 nanometre). Burada çift çeperli nanotüplerin özel konumunun üzerinde durulmalıdır. Çünkü tek çeperli nanotüple karşılaştırıldığında, kimyasallara karşı direncini önemli ölçüde geliştirdiğimiz zaman çok benzer bir morfolojiyi ve özellikleri bir araya getirmektedir. Bu özellikle fonksiyonelleşme gerektiği zaman önemlidir. (Bu, nanotüplerin yüzeyine kimyasal işlevlerin aşılanması anlamına gelmektedir). Tek çeperli karbon nano tüplerde, kovalent fonksiyonelleşme bir takım C=C ikili bağını parçalayacaktır. Nano tüpün yapısında boşluklar bırakır ve bunun için mekanik ve elektriksel özelliklerinin ikisini birden düzenlemek gerekir. Çift çeperli karbon nanotüp durumunda ise, sadece dıştaki çeper düzenlenir. Şekil 3.28'de ÇCNT'ler gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Çok cidarlı karbon nano tüpler

3.3. Korozyon

Korozyon, malzemelerin genel anlamda, kademeli bir aşınma göstererek kimyasal veya elektro kimyasal reaksiyonlarla bozulması olarak tanımlanır (Revie, 2008). Korozyon, malzemelerin mekanik yollar dışındaki bozunumları olarak ta tanımlanır. Korozyon aracılığıyla malzemeler doğadaki hallerine geri dönerler. Korozyonun hızı, ortam koşullarına göre değişmektedir. Örneğin, su içinde suyun hızı ya da asitliğiyle, malzemenin hareketiyle, sıcaklıkta ya da havalanmadaki artışla, bazı bakterilerin veya başka etkili birtakım faktörlerin varlığıyla artış gösterir. Diğer taraftan, korozyon koruyucu tabakalar ve filmler yardımıyla geciktirilir (Shreir, 2013). Suyun alkalinliğinin korozyon hızı üzerine etkisi olsa da korozyonun gerçekleşebilmesi için daima su ve oksijen gereklidir (Handbook, 1987).

Birçok metalin korozyon hızı, pasifleşme sebebiyle, pratikte önemsenemeyecek kadar küçüktür. Ancak endüstride temel yapı malzemesi olarak kullanılan demir ve çelik, sulu ve nemli ortamlarda korozyona dayanıksız bir metaldir (Song ve Saraswathy, 2006). Bu sebeple korozif ortamlar söz konusu olduğunda, çoğu zaman demir yerine korozyona daha dayanıklı fakat daha pahalı başka metal veya alaşımların kullanılması tercih edilir. Bu sebeple, malzeme seçiminde, korozyonun yanı sıra ekonomik faktörler de göz önüne alınır. Mühendislik açısından bakıldığında, korozyonla mücadelenin temeli ekonomiye dayanır. Yapılan tasarımın durumuna göre optimum dayanım/ korozyon durumuna sahip malzeme seçiminin yapılması gerekir. Metal seçiminde korozyon hızları ile kullanılabilirlik dereceleri birlikte değerlendirilir. Ucuz metaller korozyon hızları yüksek olsa bile bazı ortamlarda korozyona daha dayanıklı metallere tercih edilebilirler.

Metal malzemelerin ve alaşımlarının tamamı atmosfere açık ortamlarda farklı şekillerde ve miktarlarda korozyona maruz kalmaktadır. Tunç, pirinç, paslanmaz çelik, çinko ve alüminyum gibi korozyona karşı koruma olmaksızın uzun süre dayanacakları umulan malzemeler kullanım koşulları altında çok yavaş bir korozyona uğrarlar. Demirin ve çeliğin yapısal korozyonu, metal gerektiği ölçüde korunmazsa hızla ilerler. Demir ve çelik yapısal malzemeler olması sebebiyle endüstride sıkça kullanılırlar ve bu sebeple de korozyona karşı direnç gösterememeleri önemli ekonomik kayıplara yol açar. Çünkü uygun maliyetleri ve fiziksel özellikleri göz önüne alındığında çok büyük miktarlar kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde çeliğin korozyonundan dolayı gerçekleşen ekonomik kaybın 70 milyar dolar seviyelerinde olduğu bildirilmektedir. Demir ve çeliğin korozyona karşı korunması özellikle tasarım ve bakım mühendislerinin dikkat etmesi gereken konulardandır.

Endüstride kullanılan metallerin ve alaşımların çoğu sulu ortamlarda ve atmosfere açık ortamlarda kararlı değillerdir. Metallerin hemen hepsi (saf olarak bulunan altın ve platin hariç) doğada oksit, sülfat ve karbonat bileşikleri halinde bulunurlar. İnsan gücü yanında önemli miktarda hammadde ve enerji tüketilerek saf hale getirilirken enerji kapasiteleri artar ve entropileri (düzensizlikleri) azalır ancak saflaştırılmış metaller termodinamik yasalara uygun olarak doğada bulundukları daha kararlı bileşiklerine dönme eğilimi gösterirler. Böylelikle metaller korozyon sonucu doğada bulundukları kararlı oksit, sülfat gibi minerallere dönüşürler. Endüstride yapısal malzeme olarak çokça kullanılan demirin; korozyonu neticesinde oluşan pasın kimyasal analizi, demir oksitten oluştuğunu göstermiştir. Demir ise doğada bulunan demir oksit filizlerinden elde edilir.

Günümüzde korozyon kontrolü konusu çok önemli bir tasarım kriteri olduğu halde pratikte yeteri kadar üzerinde durulmamakla birlikte endüstriyel yatırım ve üretim maliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Korozyon nedeni ile ülkelerin uğradıkları malzeme, enerji, emek ve bilgi kaybının yıllık değeri "gayri safi milli gelirin %3,5- 5'i düzeyindedir. Türkiye için ise bu kaybın %4,5 civarında olduğu tahmin edilmektedir. Bu durumda yılda yaklaşık 2,5 milyar dolarlık bir kayıp demektir.

Kimyasal korozyonda, malzeme korozif bir sıvı ile çözünür. Elektro kimyasal korozyonda, metal atomları üretilen elektrik devresinden dolayı katıdan uzaklaştırılır. Metal ve bazı seramikler, genellikle yüksek sıcaklıklarda bir gazlı ortamla reaksiyona girer ve malzeme oksit ve diğer bileşik oluşumları ile bozunabilir. Polimerler, yüksek sıcaklıklarda oksijene maruz kaldıklarında çapraz bağlanma kaybına veya bozunuma

uğrarlar. Malzemeler radyasyon ve hatta bakteriye maruz kaldıklarında bile değişebilir. Aşınma mekanizmaları da korozyona sebebiyet vererek malzemenin şeklini değiştirebilir.

Korozyon çeşitleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Genel (üniform) korozyon
- Çukur korozyonu
- Galvanik Korozyon
- Aralık korozyonu
- Kaplama altı korozyonu
- Taneler arası korozyon
- Erozyonlu korozyon
- Aşınmalı korozyon
- Gerilmeli korozyon
- Yorulmalı korozyon

***Genel korozyon**

En yaygın görülen korozyon türüdür. Homojen dağılımlı korozyon olarak da isimlendirilir. Yüzeyin büyük bir bölümünde ya da tamamında kimyasal ya da elektrokimyasal tepkimenin aynı şekilde yürümesi ile malzeme yüzeyi her yerinde aynı biçimde aşınır. Ortalama korozyon hızlarının ise her yerde aynı olduğu kabul edilir. Eşit dağılımın başlıca kaynağı anodik ve katodik yerlerin sürekli yer değiştirmeleridir. Bu durumda malzeme sürekli incelir ve zamanla iş göremez duruma gelir. Çinko veya bir çelik parçasının seyreltik sülfürik asit çözeltisine batırıldığında yüzeylerinin her tarafında aynı hızla çözünmesi bu duruma örnek olarak verilebilir.

Homojen dağılımlı korozyonun yol açtığı metal kaybı diğer korozyon türlerine kıyasla oldukça yüksektir. Buna karşın korozyon hızı, laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilen deneyler yardımıyla saptanabildiği için ortamda bulunan parça ve yapıların ömürleri önceden tahmin edilebilir. Buna bağlı olarak farklı koruma yöntemleri uygulanabilir. Katodik koruma, ortama ilave edilen korozyon hızını sınırlayıcı maddeler inhibitörler ve yüzey kaplamaları (boyama ve astarlama) genel korozyonu azaltmak veya koruma amacıyla kullanılabilir. Tüm bunların yanında homojen dağılımlı korozyonun yararlı bir işlem olarak da kullanıldığı durumlar bulunmaktadır. Örneğin sıcak haddeleme sonucu çeliğin yüzeyini kaplayan oksit

tabakalarının uzaklaştırılmasında dekapaj denilen bu korozyon koşulunun gerçekleştirildiği kimyasal işlemler uygulanır (Çakır, 1991).

*** Galvanik korozyon**

Birbirleriyle temas halinde olan farklı türden metal ve alaşımların aynı ortama bırakılması halinde karşılaşılan korozyon olayıdır. Aynı ortamda bulunan farklı iki metal arasında bir potansiyel fark oluşur. Bu iki metal birbirlerine bir metal veya başka bir yolla bağlanırsa bu potansiyel fark nedeniyle elektronlar bir taraftan diğerine doğru akarlar. Böylelikle anot ve katot bölgeleri oluşur. Galvanik eşleşmeler çoğunlukla bir tasarım veya bir imalat gereksinimi olarak ortaya çıkar. Bu nedenle tasarım ve imalat işlemleri galvanik korozyon etkisi göz önünde bulundurarak yapılmalıdır. Genel olarak aktif olan metallerin korozyonu hızlanırken daha soy olan metallerin korozyonu yavaşlayacağı veya tamamen önleneceği için tasarım yaparken bu hususa dikkat edilmelidir (Yalçın ve Koç, 1998).

Korozyon ortamı, mesafe ve yüzey büyüklüğü parametreleri galvanik korozyona etki den faktörler olarak sıralanabilinir.

Korozyon ortamının yapısı malzemelerin korozyon davranışını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Mesafe etkisi korozyona maruz kalacak yüzeylerin arasındaki mesafe ile ilgilidir. Galvanik korozyon genellikle birleşme noktalarında yoğun olarak görülmektedir. Birleşme noktasından uzaklaşıldıkça korozyon azalır. Anot veya katot Yüzey büyüklükleri galvanik korozyona etki eden diğer bir faktördür. Anot yüzeyinin katot yüzeyine göre küçük olması istenilmeyen bir durumdur. Çünkü akım geçen bir hücrede akım yoğunluğu küçük yüzeyli elektrotta daha büyük olur. Akım yoğunluğunun büyük olması korozyon hızının da büyük olmasına sebep olur. Şekil 3.29’da alüminyum levhayı sabitlemek için kullanılan paslanmaz çelik cıvata arasında oluşan galvanik korozyon gösterilmektedir.



Şekil 3.29. Alüminyum levha ile paslanmaz çelik cıvata arasında oluşan korozyon (Handbook, 1987)

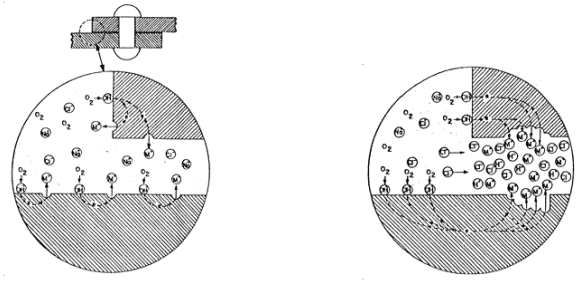
Galvanik korozyondan korunmak ya da galvanik korozyonun etkisini azaltmak için çeşitli metotlar uygulanabilir. Bazı durumlarda birkaç yol birlikte izlenerek koruma sağlanabilir (Hihara ve Latanision, 1992). Bu yollar;

- İlk olarak kullanılacak olan malzemeler seçilirken, galvanik dizi sıralamasına göre mümkün olabilen en yakın malzemeler seçilmelidir. Galvanik dizide birbirinden uzak malzemelerin eşlenmesi olanaklar ölçüsünde engellenmelidir. Bu tür eşlemeler bir zorunluluk olarak ortaya çıkarsa malzemeler bir ara parça veya yalıtkan conta kullanılarak izole edilmelidir.
- Küçük anot ve büyük katot etkisinden kaçınılmalıdır.
- Ortamın korozifliğini azaltmak adına ortama inhibitör eklenebilir.
- Her iki malzemeye karşı anodik davranan üçüncü bir malzeme kullanılabilir. Bu durum katodik koruma olarak isimlendirilir.
- Anodik parçaların tasarımı yapılırken kolay değişebilecek biçimde tasarım yapılmasına dikkat edilir veya bu parçaların uzun ömürlü olmaları için daha kalın yapılabilir.

*** Aralık korozyonu**

Korozif ortamlarda malzeme yüzeylerindeki aralıklar, yarıklar içinde veya malzeme yüzeyindeki örtülmüş yerlerde şiddetli yerel korozyon meydana gelir. Aralık korozyonu, korozyon olayının belirli dar bölgelerde yoğunlaşması sonucu ortaya çıkan bozunma türüdür. Kum, kir ve korozyon ürünleri aralık korozyonunun nedenleri arasında gösterilebilir. Birikinti, yüzeyi kapatarak yüzeyin altında durgun ortam koşulu oluşturur. Bir aralığın korozyona neden olabilmesi için sıvının aralık içine girebilecek kadar geniş olması, fakat durgun bir bölge sağlayabilmesi için de yeterince dar olması

gerekir. Bu nedenle aralık korozyonu, çok küçük deliklerde olur. Bu delikler milimetrenin onda biri veya daha küçük olabilir. Şekil 3.30'da aralık korozyonunun gelişim mekanizması gösterilmektedir (Jones, 1992).



Şekil 3.30. Aralık korozyonun başlangıcı ve ilerlemesi (Handbook, 1987)

Hava içeren deniz suyu (pH=7) içine daldırılmış perçinlenmiş iki levhada levha malzemesinin çözünmesi (yükseltgenme $M \rightarrow M^{2} + 2e^{-}$) ve oksijenin hidroksil iyonuna indirgenmesi ($½O_2 + H_2O + 2e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$) reaksiyonları oluşur.

Başlangıçta aralıkların içinde ve bütün yüzeyde tepkimeler aynı şekilde yürürler. Metal iyonunun oluşumu sırasında ortaya çıkan elektronlar oksijen indirgenmesinde kullanılır. Kısa bir süre sonra aralık içinde oksijen konveksiyonun sınırlı olması nedeniyle tükenir ve böylece bu bölgede oksijen indirgenmesi durur, bu korozyon durumunda herhangi bir değişime yol açmaz. Çünkü aralığın içerisindeki yüzey dış yüzeye oranla çok küçüktür ve böylece toplam oksijen indirgenme hızı hemen hemen değişmemiş olarak kalır. Bu nedenle oksijenli ve oksijensiz halde korozyon hızı aynı kalır. Oksijen tükendikten sonra kapalı bölgede oksijen indirgenmesi olmaz ancak metal çözünmesi artar. Aralık içindeki potansiyel metal yüzeyine göre daha büyüktür fakat yine de aralık içinde metal çözünmesi artar. Yani dış yüzey katot, aralık anot olarak bu mekanizmada görev alır. Aralık içinde metal iyonlarının artışı nedeniyle aralık içine CI iyonları göç eder ve yük dengesi sağlanır. Bu göçle aralık içinde metal klorür artar. Alkali metal tuzları dışındaki metal tuzları, metal klorür ve sülfatları, suyu hidroliz ederler. Bu işleme göre ($MCI_2 + 2H_2O \rightarrow M(OH)_2 + 2\ HCI$) metal klorürler sulu çözeltilerinde çözünmeyen metal hidroksit ve serbest aside ayrışırlar.

Klor ve hidrojen iyonu birçok metallerin ve alaşımların çözünmesini hızlandırırlar. Göç ve hidroliz nedeniyle bu iki iyon aralık içinde toplandıklarından metalin çözünmesi artar. Çözünmenin artmasıyla göç de artar ve sonuç olarak korozyon olayı hızlanır ya da oto katalitik olarak hızlanır. Aralık içerisindeki klorür derişiminin ortamdaki nötr sodyum klorür çözeltisi derişiminden 3 ile 10 kat büyük olduğu ve ph'ın

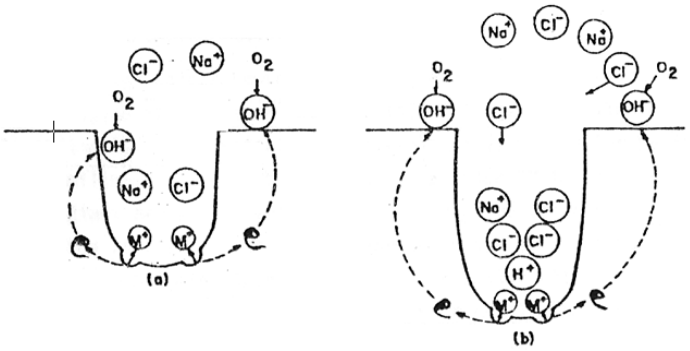
2 ile 3 arasında olduğu saptanmıştır. Aralık içinde korozyon arttıkça metal yüzeyindeki oksijenin indirgenme hızı da artar bu da metalin dış yüzünü katodik olarak korur. Böylece örtülü kısım altında aralık korozyonu ile yerel aşınma olurken metalin diğer kısımlarında yüzey çok az aşınır ya da hiç aşınma olmaz.

Aralık korozyonunun önlenebilmesi için;

- Perçinli ve cıvatalı bağlantılar yerine kaynak kullanılabilir.
- Kaplar, tam boşalma sağlayabilecek bir tasarımda yapılmalıdır. Keskin köşelerden ve durgun bölgelerden kaçınmak gerekir. Tam boşaltma, yıkanma ve temizlemeyi kolaylaştırır. Kabın dibine çökmeleri önler.
- Mümkünse proses esnasında asılı tanecikler (süspansiyonlar) uzaklaştırılır.

*** Çukurcuk Korozyonu**

Korozyon olayının çok dar bölgeler üzerinde yoğunlaşması sonucu malzeme üzerinde delikler ve çukurcuklar oluşturmasıyla meydana gelen korozyon türüdür. Malzeme yüzeyinde oluşan çok sayıda çukurcuklar genellikle bir karıncalanma görüntüsü verir. Çukurların çapı, derinliği ve sıklığı malzeme ve ortama bağlı olarak değişir. Toplam metal kaybı miktarı çok fazla değildir ancak parçalar zamanla delinerek kullanılmaz hale gelebilir. Ayrıca çukurcuk diplerinde meydana gelen gerilim yoğunlaşması dayanım kaybının yanında korozyonlu yorulma ve gerilmeli korozyonu beraberinde getirerek zamanla çatlamaya neden olabilir. Bozucu etkisi, yaygın bir şekilde karşılaşılması ve kontrol edilmesindeki güçlükler nedeniyle en korkulan korozyon türlerindendir (Mattsson, 1989). Şekil 3.31'de çukurcuk korozyonu oluşumunun şematik görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.31. Çukurcuk korozyonunun oluşum düzeni (a) Başlangıç (b) İleri seviye (Handbook, 1987)

Çukurcuk korozyonu türünü birçok metal ve alaşımlarda görmek mümkündür. Çukurcuk korozyonu, genellikle klor ve brom iyonları içeren nötr ortamlarda oluşur. NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $AlCl_3$ ve NaBr tuzlarından birini ve/veya birkaçını aynı zamanda içeren havalandırılmış ortamlar bu duruma örnek olarak verilebilir. Sodyum klorür ve oksijen bakımından zengin olan deniz suyu ortamları çukurcuk korozyonuna yol açan en önemli ortamların başında gelir. Deniz suyunda kalan ve o ortamda çalışan paslanmaz çelikler çukurcuk korozyonuna maruz kalarak kısa zamanda bozunurlar. Hipoklorür içeren beyazlatıcılar da çukurcuk korozyonu açısından kontrolü oldukça zor olan ortamlardır. Florür ve iyodürlerin etkinliği ise bromür ve hipoklorürlere göre daha azdır. Buraya kadar olan kısım oksitleyici ortamlarla ilgilidir. Özetle bu tür ortamlar indirgenme yeteneğine sahip metal iyonlarını içermezler. Bu koşul oksijenin çukurcuk korozyonu açısından önemini ve gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çünkü katodik olay için tek olanak oksijen reaksiyonudur. Sonuç olarak oksitleyici özelliği olmayan ortamlarda çukurcuk korozyonu, artan oksijen miktarı ile hızlanır.

Ortamın pH değeri çukurcuk korozyonu etkinliğini belirleyen önemli bir parametredir. Çukurcuk korozyonu öncelikle nötr ortamlarda oluşur ama pH değeri düşürülürse yerini genel korozyona bırakır.

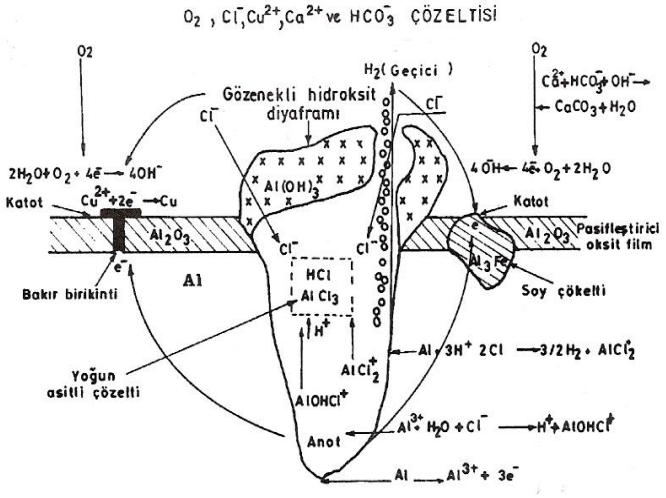
Oksitleyici metal iyonlarının klorürlerini içeren ortamlar çukurcuk korozyonu açısından tehlikeli ortamlardır. $FeCl_3$, $CuCl_2$ ve $HgCl_2$ ortamları ise bunların en tehlikelileridir. Bu ortamlardaki katodik olay, klorürlerden kaynaklanan metal iyonlarının indirgenmesidir. Oksijene gerek olmadığı gibi oksijen miktarının çukurcuk korozyonuna etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Çukurcuk korozyonunun en belirgin özelliklerinden birisi de çok az miktarda çözelti ile oluşmasıdır. Korozyonun yoğunlaştığı çukurcuk dipleri durgun olması korozyon oluşumunu artıracağından, durgun haldeki bir ortamın akış haline dönüştürülmesi çukurcuk korozyonu oluşumunu önemli ölçüde azaltabilir. Deniz suyunun pompalanması için kullanılan paslanmaz çelik pompalar, sürekli çalışma koşullarında herhangi bir problem göstermezken, çalışmaya bir süre ara verilmesi ile korozyona maruz kalması bu duruma örnek olarak verilebilir.

Çukurcuk korozyonunun başlaması ve devam etmesi için gerekli koşulların kendiliğinden oluşması sebebiyle bu korozyon olayının oto katalitik olarak geliştiği söylenebilir. Hava içeren NaCI çözeltisi içinde alüminyum oksit yüzeyinde çukurcuk oluşumunun elektrokimyasal mekanizması şu şekilde gerçekleşir;

Çukurcuk içinde metal hızla çözünürken metal yüzeyinde oksijen indirgenir. Bu olay kendiliğinden başlar ve gelişir. Çukurcuk içinde metalin hızla çözünmesiyle çok miktarda artı yüklü iyonlar oluştuğundan elektriksel nötrlük koşulunu korumak için çukurcuk içine klorür iyonları göç eder. Çukurcuk içinde alüminyum klorür derişimi artınca hidroliz sonucu hidrojen iyonu derişimi artar. Pasifleşme potansiyeli genel olarak yükselir. Hidrojen ve klorür iyonlarının her ikisi de birçok metal ve alaşımlarının çözünmelerini tetikler. Derişik çözeltilerde oksijen çözünürlüğü gerçekte sıfır olduğundan çukurcuk içinde oksijen indirgenmez, metal yüzeyinde indirgenir. Bu oksijen indirgenmesi korozyonu azaltır yani bir anlamda metal yüzeyinde oluşan bu çukurcuklar metalin geri kalan kısmını katodik olarak korurlar. Çukurcuğun ağzında kubbe veya tümsek biçiminde oluşan hidrat katmanı, çukurcuk içindeki çözeltinin seyrelmesini önler ve böylece korozyonu hızlandıran etkileri güçlendirir.

Çukurcuk korozyonu katotta oluşan bazın etkisiyle pasifleşir ve özellikle ortamda Ca ve HCO_3 iyonlarının bulunması bu etkiyi arttırır. Ortamda daha soy metal iyonları varsa bunlar yerel katotlar üzerinde metal olarak ayrılarak (bakır gibi) katodik etkiyi arttırırlar. Böylece katot potansiyeli çukurcuk potansiyelinin üstünde kalır. Çukurcuk içindeki potansiyel aktif bölgedir. Çukurcuk içinde pasifleşme potansiyeli hidrolizle yükseldiğinden bu aktif potansiyelin sürdürülmesi ile korozyon ilerler. Bu çukurcuğun kendi kendine nasıl büyüdüğünü açıklamaktadır. Şekil 3.32'de alüminyum yüzeyinde gerçekleşen çukurcuk büyüme mekanizması görülmektedir.



Şekil 3.32. Alüminyum yüzeyinde çukurcuk büyümesinin elektrokimyasal mekanizması **(**Handbook**,** 1987)

Çukurcuk korozyonuna karşı alınacak önlemlerin öncelikle malzeme açısından ele alınması gerekmektedir. Korozyon dayanımı yüksek malzemeler seçilmelidir.

Ortamın pasifleştirme kabiliyetini artırıcı ilaveler yapılmalıdır. Bunlar korozyon başlamadan önce ve yeterli miktarda yapılmalıdır. Ayrıca korozyonu tamamen durduracak özellikte olmalıdır. Tüm bunlara ek olarak aralık korozyonundan korunmak amacıyla uygulanan tedbirler burada da geçerlidir.

*** Taneler arası korozyon**

Taneler arası korozyon, korozyon olayının malzemenin tane sınırları yakınında yoğunlaşması sonucu ortaya çıkan bozunma türü olarak tanımlanabilir. Tane sınırları korozyonu özellikle ostenitik yapılı krom nikel çeliklerinde ve alüminyum bakır alaşımlarında görülür. Ferritik paslanmaz çelikler ancak çok sınırlı bazı koşullarda bu korozyon türüne duyarlılık gösterirler.

Tane sınırları korozyonunun en belirgin özelliği ağırlık kaybına karşın korozyon hızının tane sınırları yakınında çok yüksek değerlere ulaşabilmesidir. Bu durum parçaların kısa sürede tüm kesit alanı boyunca korozyona uğrayarak bozunmalarına yol açar. Taneler boyutlar ve şekillerini korurken taneler arası bağ bozunmaya uğrar.

Korozyonun etkin olduğu bölgede mekanik dayanımın ise sıfıra indiği görülür. Taneler arası korozyona uğrayan ostenitik krom nikel çeliğinin üzerine hafif bir şekilde bastırıldığında toz haline getirmek mümkündür. Parçaların dış görünümünde önemli bir değişiklik gözlenememesi nedeniyle tane sınırları korozyonunu izlemek ve kontrol etmek oldukça zordur.

*** Gerilmeli korozyon**

Korozif ortamlarda bulunan ve çalışan makine parçaları ve metal parçalarının çoğu mekanik gerilmeler altındadır. Yüksek basınçlı kaplar buhar kazanları içten yanmalı motorların silindir gömlekleri ve pompa mili gibi örnekler verilebilir. Gerilimli korozyon, mekanik etkilerin ve korozyonun aynı anda etkin olmasıyla oluşan bozunma türü olarak tanımlanabilir.

Bir metalin hidrojen çıkışı ile korozyona uğradığı ve aynı zamanda bazı kısımlarının gerilim altında bulunduğu bir durumda, metal içine giren hidrojen, gerilimin aşırı olduğu yerlerde çatlamaya sebep olur ve korozyon olayı oluşan bu çatlaklarda etkin hale gelir. Metal üzerinde meydana gelen bir çatlak metal yüzeyinden farklı hareket eder. Dolayısıyla bozunma, parça yüzeyinde mevcut çatlaklar ya da

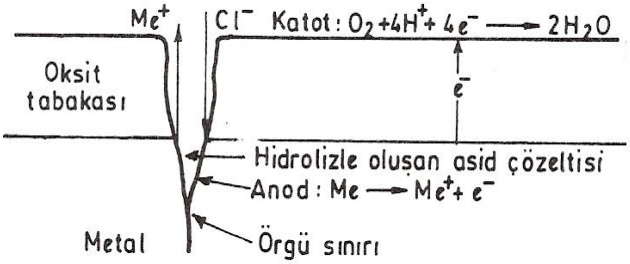
gerilim yoğunlaşmasına olanak sağlayan diğer geometrik düzensizliklerle başlar. Çatlaklar, mekanik gerilmelerin büyüklüğü ve çevresel koşulların etkenliğine bağlı olarak belirli hızlarla malzeme içine doğru hareket ederler. Parça kesitinin mevcut yükleri taşıyamayacak ölçüde daralması sonucu ani kopmalar meydana gelir (Jones, 2017).

Gerilimli korozyonun en önemli özelliği kimyasal ve mekanik etkilerin birbirlerini destekler nitelikte gelişmeleridir. Bu nedenle aynı zamana rastlamayan korozif ve mekanik etkilerin toplamı, gerilimli korozyon olarak nitelendirilemez. Gerilimli korozyonun oluşabilmesi için gerekli koşullar;

- Duyarlı malzeme
- Etken bir ortam
- Çekme gerilimi
- Zaman

Gerilimli korozyon için malzeme ile ortam arasında bir uyum olmalıdır. Pirinç alaşımı amonyum içeren ortamlarda duyarlılık gösterirken, klor içeren atomlardan neredeyse hiç etkilenmez. Paslanmaz çeliklerin tutumu ise tam tersidir. Paslanmaz çelikler klor içeren ortamda gerilimli korozyona uğramalarına rağmen buna karşın amonyum içeren ortamlarda dayanımları yüksektir. Bu şekilde sınırlamalar sebebiyle gerilimli korozyon önemsiz gibi görülmektedir fakat önemsiz değildir. Yapılan araştırmalara göre makine ve diğer yapılarda kırılma olaylarının %22 sinin gerilimli korozyondan kaynaklandığı görülmektedir. Bunun nedeni korozyona dayanıklı malzemelerin hemen hepsinin belirli ortamlarda duyarlık göstermeleridir.

Her ortam ve malzeme bileşimi için bir minimum sıcaklık gereksiniminden söz etmek mümkündür. Ancak bazı malzeme ve ortam bileşimlerinde oda sıcaklığı çatlama için yeterli iken diğerlerinde ortamın kaynama sıcaklığına çıkmak gerekebilir. Genel bir yaklaşım olarak malzeme ve ortam bileşimlerinde 100°C ve üstünün gerilimli korozyona sebep olduğu söylenebilir. Şekil 3.33'de oksit kaplı bir yüzeyde gerilmeli korozyon çatlaması gösterilmektedir.



Şekil 3.33. Oksit Kaplı Bir Yüzeyde Gerilmeli Korozyon Çatlaması

Korozyona uğrayan bir metalin tümüne elastik sınırlarda bir gerilim uygulandığında, gerilme ortadan kalktığında parça eski haline dönmese de, gerilme dağılımı eski haline dönmediği için bazı bölgelerde gerilme yığılmaları oluşabilir. Bu gerilme yığılmaları, imalat sırasında ya da kullanım sırasında oluşabilir. Bu durum da korozyon hızlandırılmış olur.

Gerilimli korozyon, dış ya da iç gerilim kuvvetleri ile yerel korozyonların ortak etkisi sonucudur. Basma kuvveti ise gerilimli korozyon üzerine inhibitör etkisi yapar. Gerilimli korozyon, çekme gerilimi altında oluşur. Çekme gerilimleri malzemeye dışarıdan uygulanabildiği gibi bazı imalat işlemlerinin sonucu olarak da malzeme içinde mevcut olabilirler. Çatlak ve benzeri düzensizlikler içinde yığılan korozyon ürünleri de çekme gerilimine yol açabilir. Çekme gerilimlerinin kaynağı, gerilim kırılma zamanı ilişkisini etkilemez. Önemli olan çekme geriliminin büyüklüğüdür. Bu ilişkinin iki önemli özelliği vardır;

- Kırılma zamanı; parçanın ömrü artan gerilmeler ile kısalmakta azalan gerilmeler ile uzamaktadır. Gerilimin yüksek olduğu hallerde gerilimli korozyon koşullarından uzaklaşılır.
- Gerilim kırılma zamanı ilişkisi; artan zamanla bir sınır değere yaklaşmaktadır. Bu sınır değer, gerilimli korozyonun oluşabilmesi için gerekli minimum gerilim seviyesini tanımlar. İlk bakışta gerilimin bu sınır değer altında tutulmasıyla gerilimli korozyon tehlikesinin önlenebileceği ileri sürülebilir fakat gerilimli korozyon dayanımı olarak tanımlanan bu değer ortamın özelliklerine karşı oldukça duyarlıdır. Ortamın bileşiminde yer alan ufak bir değişim gerilimli korozyon dayanımında beklenmedik ölçüde azalmalara yol açabilir. Gerilimli korozyon dayanımı, malzeme ve ortama bağlı olarak malzeme akma sınırının %10-70'i arasında değişmektedir.

Gerilmeli korozyondan korunmak için aşağıdaki metotlar uygulanabilir.

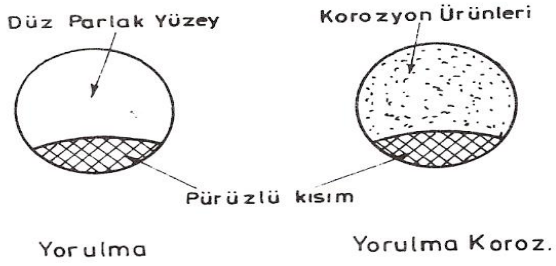
- Gerilimin azaltılması. Gerilimin azaltılması parçaya uygulanan yükün azaltılması veya yük taşıyıcı kesitin büyütülmesi, iç gerilmelerin uygun ısıl işlemlerle giderilmesi ve uygun tasarımlar ile çatlak ucundaki gerilim şiddet faktörünün mümkün olan en düşük düzeyde tutulması ile sağlanır.
- Ortamın etkenliğinin azaltılması; Ortama korozyon yavaşlatıcı maddeler eklenmesi ve ortamın etkinliğini sağlayacak kritik maddelerden arınması ile sağlanabilir.
- Daha az duyarlı malzemeler kullanılması; ilk iki maddenin uygulanamadığı anlarda uygulanacak tek yoldur.
- Katodik koruma; bu önlem etkili olmakla beraber yüksek dayanımlı malzemelerde dikkatle kullanılmalıdır. Katodik koruma sırasında üretilen hidrojen bu tür malzemelerde hidrojen kırılganlığına yol açabilir.
- Diğer önlemler; Bazı malzeme – ortam bileşimlerinde soğuk şekillendirme bazılarında ise ısıl işlem yararlı bulunmuştur. Ayrıca duyarlılığa yol açan ısıl işlem ve ısıl etkinliklerden kaçınmak gerekir.

*** Yorulmalı korozyon**

Değişken zorlamalar altında makine elemanlarında meydana gelen hasara yorulma hasarı denir. Yorulma olayında en belirgin görünüş, metal yüzeyinin geniş bir kısmının parlak düz bir yüzey olarak kalması, küçük bir kısmının pürüzlü ve kristalleşmiş gibi görünmesidir. İncelemeler yorulma çatlağının gelişmesi sırasında belirli bir çevrimle uygulanan gerilimin metal yüzeyine çekiçleme ya da darbeleme gibi etkidiğini göstermiştir. Metaldeki çatlağın genişlemesiyle metal ara kesit yüzeyi küçülür. Bu küçülme öyle bir noktaya gelir ki uygulanan gerilimle metal kırılır. Metalin kırılan yüzeyinin görünüşü pürüzlüdür.

Korozyonlu yorulma korozif bir ortamda yorulma direncinin düşmesi olarak tanımlanır. Şekilde de görüldüğü üzere korozyonlu yorulmada korozyon ürünleri ile kaplı geniş bir bölge ve son kırılma sonucu küçük bir pürüzlü bölge görülür. Yorulma ile kırılma noktasında görülen her korozyon ürünü korozyonlu yorulmayı göstermez.

Adi yorulma kırılması süresince yüzeysel bir paslanma olabilir (Stephens ve ark., 1995). Bu durum şekil 3.34' de gösterilmektedir.



Şekil 3.34. yorulmalı korozyon hasar yüzeyi şematik görüntüsü (Handbook, 1987)

Gerilimli korozyona karşı uygulanan önlemler korozyonlu yorulma için de geçerlidir. Bunlara ek olarak yüzeyde kalıcı basma gerilimi oluşturan işlemler (püskürtmeli sertleştirme vb.) ve yüzey kaplamalarının etkili oldukları belirlemiştir. Metal ya da alaşımın çekme dayanımının arttırılması korozyonlu yorulma için çok zararlıdır. Yüksek çekme mukavemeti gösteren malzemelerde bir kez çatlak başlayınca düşük dayanımlı malzemelere kıyasla daha hızlı ilerler. Korozyonlu yorulma süresinde korozif etki ile bir çatlak kolay bir şekilde başlayabilir. Korozyonlu yorulma, bileşenler üzerindeki gerilmenin düşürülmesi ile giderilebilir. Konstrüksiyonun değiştirilmesi ile ve/veya gerilimden kurtarıcı ısıl işlemlerin uygulanması ile yapılabilir. Daha aktif metal kaplamalar (çeliğin çinko ile kaplanması) yanında yavaşlatıcı pigmentler içeren organik kaplamalar sık uygulanan yöntemlerdir. Kaplama esnasında gerilme oluşturan koşullardan ve metal içine hidrojen girişinden kaçınılmalıdır.

*** Sürtünme korozyonu**

Birbirine değen ve bir yük altında bulunan iki malzeme arasında titreşim ve sürtünme hareketi ile oluşan aşınmaya sürtünme korozyonu denir. Bu korozyonun meydana geldiği metal yüzeyinde korozyon ürünleri ile çevrilmiş çukurcuk ve oluklar görülür. Sürtünme korozyonu makine üzerinde, cıvatalı parçalarda görülür. Sürtünme korozyonu, erozyon korozyonunun özel bir hali olarak da kabul edilir. Ancak sulu ortamlardan çok havada ortamında gerçekleşir. Sürtünme korozyonunda metal parçalanır ve oksit parçacıkları oluşur. Aşınma sonucu bağlantılar gevşer. Ayrıca sürtünme, yorulma kırılmalarına neden olabilir. Çünkü sürtünme sonucu oluşan çukurlar gerilmeyi arttırırlar. Örneğin demiryolları raylarında cıvata ile birbirine bağlanmış

kısımlardaki aşınma verilebilir. Bunların sık sık sıkıştırılmaları gerekir, çünkü bu kısımlar yağlanmazlar ve sürtünme korozyonu hızla ilerler (Geringer ve ark., 2009).

Sürtünme korozyonunun olması için bazı şartlar sağlanmalıdır. Bunlar;

- Ara kesit yük altında bulunmalıdır.
- İki yüzey arasında titreşim ya da yenilenen bağıl hareket olmalıdır.
- Ara yüzeydeki yük ve bağıl hareket yüzeyde biçim değiştirme ya da kaynama sağlayacak bir büyüklüğe ulaşmalıdır.

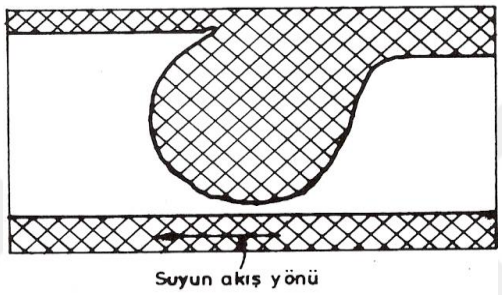
Sürtünme korozyonuna sebep olabilecek bağıl hareket çok küçüktür. 10^{-8} cm gibi küçük bir yer değiştirme sürtünme hasarı doğurabilir. Sürtünme korozyonu için yenilenen bağıl hareket gereklidir. Örneğin mil yatağı gibi sürekli hareket eden yüzeyde sürtünme korozyonu oluşmaz fakat bağıl olarak yenilenen küçük hareketlerin olduğu bölgelerde oluşur. Bu nokta en iyi uzun süren demir yolu ya da gemi taşımacılığı ile otomobil taşınması sırasında otomobil millerinde gözlenen sürtünme korozyonu ile açıklanabilir. Bu aşınma, taşınma sırasında bu yüzeylerdeki yük ile sürekli titreşim ya da sallantı nedeniyle olur. Sürtünme korozyonu nemli havada değil kuru havada meydana gelir.

Sürtünme korozyonunun mekanizması, metal yüzeyinde oluşan oksit katmanının sürtünme ile ovalanması ya da ovalanan küçük metal parçaların sürtünme sonucu yükselen sıcaklıkta oksit oluşturmaları ile açıklanabilir. Oksijen, birçok malzemenin özellikle demirli alaşımların sürtünme korozyonunu arttırmaktadır. Sürtünme korozyonunu önlemek için viskozitesi küçük, sağlamlığı yüksek yağ ve greslerle yağlama yapılması yapılabilir. Yağlama, temas yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi azaltır ve oksijeni dışarıda tutma eğilimi gösterir. Yağlama dışındaki bir diğer önlem ise, fosfat kaplamadır. Bu kaplama gözeneklidir ve yağlar için depo görevi görür. Son olarak, birbirine temas etmekte olan malzemelerden bir veya ikisinin sertliği arttırılır. Bu sert malzemeler ya da sert alaşım çiftleri seçerek yapılır. Soğuk çalışma ile yüzey sertliğinin arttırılması, sürtünme korozyonuna karşı direnci de arttırır.

*** Erozyon korozyonu**

Malzeme yüzeyi ile ortam arasındaki bağıl hızın yüksek değerlere ulaştığı sistemlerde görülen bozunma türüdür. Erozyonlu korozyon durağan koşullara oranla metal kayıp hızının önemli ölçüde artması ile kendini göstermektedir. Hızlı aşınma ile iç

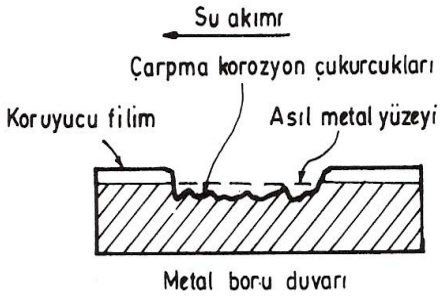
basınca dayanamayacak ölçüde incelen borular çatlayarak görevlerini yapamayacak duruma gelmeleri bu duruma örnek olarak verilebilir. Metal kaybı, metalin iyonlarına dönüşmesi veya yüzeyde oluşan oksit tabakalarının uzaklaştırılarak ortama karışması ile gerçekleşir. Yerel korozyon durgun koşullarda oluşuyorsa, ortamdaki hareket, korozyonu azaltır. Bu erozyon korozyonu değildir, çünkü parçalanma artmamaktadır. Erozyon korozyonunun kendine özgü bir görünüşü vardır. Yivler, hendekler, dalgalar, yuvarlak delikler, oluklar, at nalı biçimi gibi çeşitli biçimlerde olanları vardır ve bunlar yönlenmiş olarak bulunurlar. Şekil 3.3'de evlerdeki sıcak su boruları içinde oluşan erozyon korozyonu gösterilmiştir (Barik ve ark., 2005).



Şekil 3.35. Erozyon korozyonu (Handbook, 1987)

Erozyonlu korozyonun rastlandığı haller oldukça yaygındır. Gaz ve sıvıların pompalanması ve uzak mesafelere taşınmasında kullanılan teçhizat ve boru hatları, (kömür ve maden cevherlerinin toz halinde su ile karıştırılarak uzak mesafelere pompalandığı boru hatları), sıcak su ve buhar hazırlama tesisleri verilebilecek örneklerdir. Pompa gövdesi ve kanatları, valfler ve valf yuvaları, kazan ve kondenser boruları, türbin kanatları, erozyonlu korozyonun gözlemlendiği parçalara örnek olarak verilebilirler.

Durağan koşullar altında yeterli korozyon dayanımına sahip malzemelerin hemen hepsi erozyonlu korozyona karşı belirli ölçüde duyarlık gösterirler. Bu duyarlık malzemeye korozyon dayanımını sağlayan yüzey tabakalarının uzaklaştırılması sonucu ortaya çıkar. Yüzey tabakasının bozunduğu yerlerde metal aktif duruma geçerek yüksek hızlarda çözünür. Yüzeyi bozulmuş malzemenin gösterdiği erozyonlu korozyon şekil 3.36'da gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere metal üzerindeki koruyucu tabakanın yıpranması veya hasar görmesi metal ve alaşımların hızla erozyon korozyonuna uğramasına neden olur.



Şekil 3.36. Yüzeyi bozuk malzemede gözlemlenen erozyonlu korozyon (Handbook, 1987)

Erozyonlu korozyonun hızını belirleyen önemli etmenlerden birisi ortamın akım hızıdır. Akım hızı genellikle belirli kritik değerlerin aşılması neticesinde etkinliğini ortaya koyar. Akım türü ise dikkate alınması gereken bir diğer etmendir. Bazı gözlemlere göre türbülans akım için gerekli Reynolds sayılarının aşıldığı durumlarda erozyonlu korozyon yoğun bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Türbülanslı akımda sıvı daha hızlı bir şekilde metal yüzeyine çarpar. Akış tipi sıvının miktarına, hızına, ekipmanın geometrisi ve dizaynına bağlıdır. Akım doğrultusunun değişikliğe zorlandığı dirsek, vana ve flanş gibi parçalar erozyonlu korozyona özellikle duyarlıdır. Çünkü akım doğrultusunun malzeme yüzeyine paralel olmamasından kaynaklanan çarpma etkisi erozyonlu korozyona sebebiyet verir. Çarpma malzeme yüzeyini örten koruyucu tabakayı kısmen uzaklaştırarak etkenliğin büyük ölçüde azalmasına yol açar. Bu kısımlar yüzey tabakalarının etkinliğini sürdürdüğü diğer bölgelere oranla anodik tutum kazanacaklarından hızla çözünürler.

Sistemde erozyonlu korozyona yol açan diğer bir etmende galvanik eşlemedir. Durağan koşullarda çoğu kez problem çıkarmayan galvanik eşlemeler akım hızının artması ile etkinlik kazanarak elektrokimyasal bakımdan daha aktif kısımların öncelikle aşınmasına neden olurlar.

Ortamda bulunan katı parçacıklar erozyonlu korozyonun hızını büyük ölçüde artırırlar. Bunlar oksit tabakalarının uzaklaştırılmasını hızlandırırlar. Ayrıca çarptıkları yüzey için aşındırıcı özellikte de olabilirler. Katı parçacıkların etkenliği ortam içindeki miktarlarına, tane büyüklüğüne, sertliklerine, şekillerine ve malzemeye oranla elektrokimyasal tutumlarına bağlıdır.

Aşağıdaki maddeler erozyonlu korozyon oluşumunu önlemek için uygulanabilirler.

- Dayanımı yeterli malzeme kullanmak: bir malzemenin erozyonlu korozyona gösterdiği mukavemet genel korozyon dayanımı ve sertliği ile tanımlanır.

- Tasarım yönünden alınabilecek bazı önlemler vardır. Erozyonlu korozyona sebep olabilecek her türlü dizayndan mümkün olabildiğince kaçınılmalıdır. Türbülansı azaltmak için malzeme yüzeyindeki düzensizlikleri gidermek ve boru çapını artırarak hızı düşürmek, dirsek, vana ve flanş gibi erozyonlu korozyona özellikle duyarlı olan parçaları hızın yeterli miktarda düşebileceği şekilde boyutlandırmak erozyonlu korozyonu önlemede etkin olabilecek tedbirlere örnek olarak verilebilir.
- Ortamın etkinliğini azaltıcı önlemler alınabilir. Ortamın korozyon bakımından etkenliğini azaltmak için oksijenden arınma veya korozyon yavaşlatıcılarının (inhibitörlerin) kullanılması gerekmektedir.
- Yüzey kaplamaları erozyonlu korozyonu önlemek için kullanılır. Durağan koşullarda malzeme ile ortamın temasını kesmek amacıyla uygulanan yüzey kaplamaları kalınlık ve sertliklerinin çoğu kez yeterli olmaması nedeniyle ancak sınırlı ölçüde etkindirler fakat sert ve korozyona dayanıklı malzemelerden üretilen astarlar daha etkin olarak kullanılırlar.
- Katodik koruma, sistemde bulunan duyarlı parça ve bölümlerin galvanik anotlar yardımı ile katodik olarak korumak özellikle anotların değiştirilmesinin kolay olduğu hallerde başvurulan bir yöntemdir.

3.4. Polimerlerin Bozulması

Polimerler çevresel etkileşimler neticesinde bozunmaya uğrarlar. İstenmeyen etkileşimler neticesinde ortaya çıkan bu olay, bozunma olarak nitelendirilmekle birlikte, temel oluşum süreçleri korozyonunkine benzemediği için korozyondan biraz farklıdır. Birçok metalin korozyon reaksiyonu elektrokimyasal iken, polimerin bozunması fiziko kimyasaldır yani hem fiziksel hem de kimyasal olayları içerir. Ayrıca polimerlerin bozunması, geniş bir yelpazede farklı reaksiyonlar ve bazı olumsuz sonuçlar nedeniyle de oluşabilirler. Polimerler şişme ve çözünme ile bozunabilir ve özelliklerini kaybedebilirler. Polimer yapıda ısı enerjisi, kimyasal reaksiyonlar ve radyasyon etkilerinin bir sonucu olarak kovalent bağın kopması ve buna bağlı olarak da mekanik bütünlükte azalma meydana gelebilir. Polimer yapılarının kimyasal karmaşıklıkları nedeniyle bozunma mekanizmaları henüz tam olarak anlaşılmış değildir (Callister Jr ve Rethwisch, 2012).

Polimer malzemelerin en önemli karakteristiklerinden birisi camsı geçiş (Tg) sıcaklığıdır. Bu geçiş sıcaklığı, polimerin bu sıcaklığın altında cam gibi gevrek ve kırılgan bir yapıda olduğunu, bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda ise esnek ve zor kırılır bir yapıda olduğunu belirtir. Çünkü bu sıcaklığın altına inildiğinde polimer içerisinde bulunan zincirlerin hareketlerinin kısıtlanması ve/veya durması sebebiyle kilitlenme olur ve polimer gevrekleşir. Bu sebeple Tg sıcaklığının polimerin mekanik özelliklerini üzerine önemli oranda etkisi vardır.

Polimer yapısı lineer ve düzenli ise Tg'nin üzerindeki sıcaklıklarda kristal yapıya dönüşür ve gevrekleşir fakat polimer düzenli yapıda değil ise Tg'nin üzerinde elastik özellik gösterir (Temiz, 2003)

Dallanma ve çapraz bağlanma seviyesi, polimerlerin camsı geçiş sıcaklığını etkileyen en önemli faktörlerdir. Dallanma polimerlerin ana zincirlerinde oluşur. Dallanma neticesinde moleküller birbirine kenetlenir ve hareketleri zorlaşır. Böylelikle hacim artar, yoğunluk azalır. Bu durum Tg sıcaklığının da azalmasına yol açar. Çapraz bağlanma ise komşu zincirlerin çapraz bağ vazifesi yapan atom veya molekül yardımıyla birbirlerine bağlanması ile oluşur. Zincirlerin kayma hareketleri de böylece önlenmiş olur. Çapraz bağlanmanın gerçekleşmesi için zincirde polimerizasyon sonunda doymamış C atomlarının olması gerekir ve çapraz bağlanma bu noktada gerçekleşir (Aran, 2008).

Herhangi bir polimer molekülünün veya küçük moleküllerin sık istiflenmesinin gözlemlendiği sıcaklıktır. Kristal yapılar amorf yapılara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler (Bhattacharyya ve ark., 2003). Küçük moleküller için kristalizasyon piki, ergime sıcaklığı ile aynıdır ve sabit sıcaklıkta gerçekleşir. Polimerlerde ise belirli bir sıcaklık aralığında gözlemlenir. Kristalizasyon sıcaklığı, ergime sıcaklığı ile camsı geçiş sıcaklığı arasındadır. Termogramda ekzotermik reaksiyon olarak gözlemlenir. Kristalizasyon noktası ve pik alanı yardımıyla hesaplanan kristalizasyon enerjisi malzeme tanımlanmasında önemlidir (Ekrem, 2015).

Ergime, kristal yapıya ait endotermik bir faz geçişi olarak tanımlanabilir. Isı emilmesi neticesinde moleküller arasında oluşan kohezyon kuvvetleri etkisini yitirir ve moleküller birbirlerinin üzerinden kaymaya başlar. Bu olay küçük moleküllere sahip bileşiklerde sabit sıcaklıklar altında gözlemlenirken, polimerlerde belirli bir sıcaklık aralığında gözlemlenir. Zincirlerin farklı uzunluklarda olması, zincirler arasında gerçekleşen etkileşimler ve dolanmalar bu durumunun nedenleri olarak söylenebilir. Poli(etilen) reçineler için artan sıcaklığa bağlı olarak bağıl hacımdaki artış belirli bir

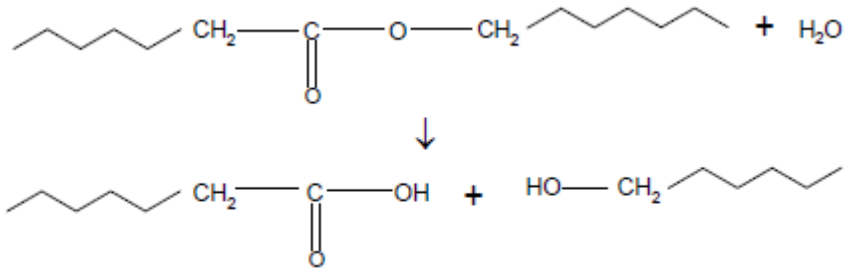
sıcaklık aralığında gözlemlenmektedir. Ergime piki, termogramda endotermik olarak belirlenir. Ergime noktası ve ergime eğrisinin altında kalan alan ile hesaplanan ergime enerjisi malzeme karakteristiklerinden olması sebebiyle malzemelerin tanımlanması esnasında önemlidir (Ekrem, 2015).

Bu bölümde polimerlerinin bozunması ile ilgili mekanizmalar ve polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı, ergime sıcaklığı, bozunma sıcaklığı gibi karakteristik özellikleri konularında bilgiler verilmektedir.

3.4.1. Oksidatif bozunma

Polimerler ergime noktasının üzerinde ve termal bozunma sıcaklığının altında olan bir sıcaklıkta hava veya oksijen atmosferinde bekletildiğinde okside olarak bozunurlar. Tüm polimerlerin belirli bir sıcaklıkta oksijene dayanma süresi vardır. Polimerlerin, belirli bir sıcaklıkta oksijene maruz kalması ile beraber okside olmaya başladığı ana kadarki süre oksidatif kararlılık süresidir. Bu değer, plastik, ambalaj hammadde ürünlerinin tanınmasında ve dayanıklılıklarının karşılaştırılmasında yol göstericidir (Sırımoglu, 2012)

Işık, ısı ve su oksidatif bozunmayı etkileyen en önemli faktörler olarak sıralanabilir. Havada bulunan oksijene en az dayanıklı polimerler, yapılarında π bağları bulunan polimerlerdir. Bu reaksiyonların ışık etkisi ile hızlanmaları sebebiyle, bunların içine anti oksidan veya ultraviyole ışınlarının emilimini sağlayan bileşikler ilave edilerek, oksidatif bozunma engellenmiş olur (Bağda, 1976). Şekil 3.37’ de oksidatif bozunma reaksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 3.37. Oksidatif bozunma reaksiyonu (da Silva ve Sato, 2013)

3.4.2. Termal Bozunma

Termik bozunma ve oksidatif bozunma genellikle beraber oluşur. Yüksek sıcaklıklarda bazı polimerlerin moleküler zincirlerinin kimyasal reaksiyonlarının bir sonucu olarak gaz türleri üreterek ayrışması manasına gelir. Artan sıcaklıkla beraber polimer zinciri üzerinde öncelikle en kararsız gruplardan başlayarak kopmalar olur. Kopan grupların, entalpisine bağlı olarak bozunmanın ekzotermik veya endotermik olduğuna karar verilir. Bu reaksiyonlar malzemenin ağırlık kaybı göstermesiyle kendini gösterir ve bir polimerin ısıl kararlılığı, ayrışmaya karşı olan direnci ile ölçülür. Isıl kararlılık, öncelikle polimerin çeşitli atom bileşenleri arasındaki bağ enerjilerinin büyüklüğü ile ilgilidir. Dolayısıyla, ısıl olarak kararlı malzemeler, yüksek bağlanma enerjisine sahiptir. Örneğin C-F bağ enerjisinin büyüklüğü, C-H bağınınkinden, C-H bağının büyüklüğü C-Cl bağının büyüklüğünden fazladır. C-F bağına sahip florokarbonlar, ısıl direnci yüksek olan polimerik malzemeler arasındadır ve nispeten yüksek sıcaklıklar arasında kullanılabilirler. Ancak, zayıf C-Cl bağına sahip poli (vinil klorür) birkaç dakikalığına olsa bile 200˚C'ye ısıtılması durumunda rengi değişir ve beraberinde büyük miktarda HCl gazı ortaya çıkarır. Bu gaz ayrışmayı hızlandırıcı ve sürekli kılıcı bir etkiye sahiptir. ZnO gibi dengeleyiciler HCl ile reaksiyona girerek polivinil klorürün ısıl etkiye karşı direncini artırır.

Isıl etkilere en karşı en kararlı polimerlerden birisi merdivensi polimerlerdir. Bu polimer doğrudan aleve maruz kalsa bile yapısını muhafaza eder ve yüksek sıcaklık malzemelerinde sıkça kullanılırlar (Callister Jr ve Rethwisch, 2012).

3.4.3. Hidroliz

Hidroliz, en çok gözlemlenen bozunma şeklidir. Poli esterler, poli amidler, gibi hetero atomlar üzerinden bağlı moleküllerin oluşturdukları polimerlerde hidroliz reaksiyonu gerçekleşir.

Polimerler Sıvılara maruz kaldığında, bozunma olayı kendisini şişme veya çözünme şeklinde gösterir. Şişme olayında, sıvı veya çözelti polimer içine emilerek yayılır ve küçük moleküller halinde polimer molekülleri arasındaki konumlara (boşluklara) yerleşir. Böylece makro moleküllerden oluşan numune, genişlemek ya da şişmek zorunda kalır. Ayrıca polimer zincirindeki ayrılmalar ikincil moleküler arası bağ kuvvetlerinde azalmaya yol açar. Bunun sonucunda, malzeme daha yumuşak ve daha

sünek hale gelir. Sıvı çözeltiler polimerlerin camsı geçiş sıcaklığını düşürür ve ortam sıcaklığının oda sıcaklığının altına düşmesi durumunda, öncesinde daha dayanıklı olan malzeme lastiksi ve zayıf hale gelir (Pham ve Marks, 2004).

Sınırlı çözünürlüğü olan polimerlerde şişme olayı, çözücü etkisiyle kısmi bir çözünme olarak ele alınabilir. Çözünme olayı ise polimerin tamamen çözünmesi durumu için geçerlidir ve bu, şişmenin bir devamı olarak düşünülebilir. Genel bir kural olarak, çözücü ve polimerin kimyasal yapısı arasındaki benzerlik arttıkça, şişme ve/veya çözülme olasılığı da artar. Örneğin birçok hidrokarbon kauçuk kolayca organik sıvı çözücüleri absorbe edebilir.

Polimerin şişme ve çözünme davranışı, moleküler yapı özelliklerinin yanı sıra sıcaklıkla ilişkilidir. Genel olarak, molekül ağırlığı, çapraz bağlanma ve kristalleşme derecesindeki artış ve sıcaklıktaki azalmayla bozunmaya karşı direncin arttığı gözlemlenir.

Genel olarak asidik ve alkali çözeltilere karşı polimerlerin dayanımı, metallere göre daha yüksektir. Örneğin hidroflorik asit birçok metali korozyona uğratması, camı eritmesi ve kimyasal olarak aşındırması sebebiyle plastik şişeler de saklanır. (Callister Jr ve Rethwisch, 2012)

Fiziksel yaşlanma, polimerlerde gözlemlenen ve birçok mekanizmayı kapsayan bir işlemdir. Bu olay sabit sıcaklıkta, gerilmesiz olarak, bulunan numunelerin zamana bağlı değişimlerinin gözlemlenmesiyle belirlenir. Fiziksel yaşlanma neticesinde, özgül ağırlık, entalpi, mekanik ve dielektrik özellikler değişebilir. Son zamanlara kadar fiziksel olarak yaşlanmış numunelerin özelliklerinin geri kazanılamayacağı düşünülürken, artık geri kazanılabildiği bildirilmektedir (Hutchinson, 1995).

Bir polimer, camsı geçiş sıcaklığı Tg'nin üzerindeki bir sıcaklıkta sünek halde iken Tg'nin altındaki bir sıcaklığa soğutulduğunda kısa sürede termodinamik dengeye ulaşamaz (Kovacs ve ark., 1963). Soğuma halindeki bir polimer yapıda aşırı sıkışmış serbest hacimler bulunur. Fiziksel yaşlanma, makro moleküllerin serbest hacimlerinin denge haline gelmesi için aşamalı olarak bağlarını değiştiren ve Tg'nin altında gerçekleşen bir işlemdir.

Serbest hacim teorisi, serbest hacim miktarının dengeye gelmek için azalması ile zincir parçalarının hareketliliğinin engellenmesi olarak tanımlanır. Bu işlem neticesinde yapı daha da sertleşir. Fiziksel yaşlanma, bir camsı hal karakteristiğidir ve bütün polimer malzemelerde görülür (Struik, 1978) ve polimer malzemeler, hacimsel dengeye

ulaşıncaya kadar devam eder. Polimerlerin denge haline yaklaşma şekilleri polimerlerin mekanik özelliklerini önemli oranda etkiler (Hastie Jr ve Morris, 1992).

3.4.4. Kimyasal yaşlanma

Kimyasal yaşlanma, bir ısıl tersinmez işlem olup, kimyasal bozunma olarak ta adlandırılır. Termoplastik polimerlerin oksidasyonu esnasında oluşan kimyasal değişiklikler, esas ve yan zincirlerdeki kimyasal bağların kırılması ve moleküllerin ağırlığının azalması ile karakterize edilebilir. Çok yüksek sıcaklıklarda lineer polimerlerin ayrışmasına depolimerizasyon denir (Emanuel ve Buchachenko, 1987).

4. MATERYAL ve METOD

Bu bölümde çalışmada kullanılan numunelerin özellikleri, numunelerin yüzeylerinin hazırlanması, üretimi, şartlandırılması ve numunelere uygulanan deneyler hakkında bilgiler yer almaktadır.

4.1. Numunelerin Özellikleri

Bu bölümde, çalışmada kullanılan alüminyum, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler ve epoksi reçine hakkında genel bilgiler verilmektedir.

4.1.1 Alüminyum

Alüminyum doğada en çok bulunan 2. malzeme olması sebebiyle, endüstride demirden sonra en çok kullanılan ikinci malzemedir. Alüminyumun bu kadar çok kullanılmasının tek sebebi doğada fazla miktarda bulunması değil, bir arada bulunması zor olan birçok özelliği kullanıcıya sunmasıdır. Bu özellikler mukavemet-hafiflik-iyi ısı ve elektrik iletkenliği- yüksek korozyon dayanımı kolay şekillendirilebilirlik olarak sıralanabilir. En çok kullanılan demir türleriyle kıyaslandığında yaklaşık 3 kat daha hafif olmasına rağmen mukavemet olarak demirle kıyaslanabilir hatta bazı alüminyum alaşımları demirlerden daha yüksek mukavemete sahiptir (Handbook, 1990).

Alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği, bakıra göre daha azdır. Fakat spesifik elektrik iletkenliği (elektrik iletkenliği/ yoğunluk) ve spesifik ısı iletkenliği (ısı iletkenliği/ yoğunluk) değerleri karşılaştırıldığında bakırdan daha iyi olduğu görülür.

Bundan dolayı, hava elektrik hatlarında alüminyum alaşımları kullanılır. Ayrıca alüminyumun fiyatı da bakıra göre daha düşüktür. Korozif ortamlarda alüminyumun yüzeyi bir oksit tabakası ile kaplanarak, alüminyumun korozyona dayanıklılığını sağlar. Bu özelliğinden dolayı alüminyum pek çok korozif ortamda kullanılabilir (Toropova ve ark., 2017). Alüminyum alaşımlarının içindeki diğer elementler alüminyum ile galvanik pil oluşturmaya uygun olduklarından dolayı, korozyon açısından alüminyumun mümkün olduğu kadar saf olarak kullanılması tavsiye edilir. Fakat mekanik özelliklerindeki dayanım düşüklüğü (zayıflık) nedeniyle uygulamalarda saf Al kullanımı yaygın değildir. Alüminyumun, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyeti iyidir. Ekstrüzyon yöntemiyle çok karışık geometrik yapıya sahip alüminyum profiller üretilebilir. Kalınlığı birkaç mikrona ulaşılabilen folyolar üretilerek paketleme işlemlerinde kullanılabilir. Gıda endüstrisinde kullanılan paketleme folyoları saf alüminyumdan yapılır. Alüminyum, elektrolitik olarak oksitlendirilerek değişik renklerde üretilebilir. Eloksal denilen bu işlem ile hem korozyona dayanıklı hem de değişik renklerde mimaride kullanılan profiller üretilerek pencere, kapı vb. yapımında kullanılabilmektedir. Bazı durumlarda sertliği ve dayanımı yüksek alüminyum alaşımlarının üstü saf alüminyum ile kaplanarak korozyon özellikleri iyileştirilebilmektedir.

Alüminyum, yer kabuğunda silisyum oksijen ve demirle beraber bulunur. Bayer metoduyla boksit cevherinden alüminat elde edilir. İnce öğütülmüş boksit cevheri sodyum hidroksitle tepkimeye sokularak sodyum alüminata dönüştürülür. Daha sonra alüminyum hidroksitin [$Al_2(OH)_3$] çökelmesi için 25-35 ° C ‘ye yavaşça soğutulur.

Alüminyum hidroksit üretiminin ardından alüminyum oksit üretebilmek için 1100° C’de kalsine edilir (toz haline getirilir). Alüminyum oksit Na_3AlF_6 sıvısı içerisinde çözülür ve elektroliz edilir (Hall işlemi). Alüminyum içerisindeki oksijen karbon atomlarıyla birleşerek CO ve CO_2 oluşturur ve geriye empürite atomlarıyla birlikte (demir ve silisyum) %99,5-%99,9 oranında alüminyum kalır. Ortalama olarak 4 birim boksitten 2 birim alüminat ve 2 birim alüminattan 1 birim alüminyum elde edilir.
Alüminyum alaşımları, dökülebilir alüminyum alaşımları ve dövülebilir alüminyum alaşımları olmak üzere 2 ana kategoride toplanır. İki kategori arasındaki en önemli fark özellik gelişim mekanizmalarının birbirinden farklı olmasıdır. Her iki kategoriden de ısıl işlem görebilen ve göremeyen türler vardır. Isıl işlem görebilenlerin mekanik özellikleri ısıl işlem parametreleri ile kontrol edilirken, ısıl işlem göremeyen türler soğuk şekillendirme ile mukavemet kazanır.

Dövme alüminyum alaşımlarını adlandırmak için 4 basamaklı sayılar kullanılır. Son iki basamak alüminyum alaşımını veya alüminyum saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alüminyum modifikasyonunu veya empürite sınırlarını ilk basamak alaşım grubunu gösterir (2xxx Cu alaşım elementli alüminyum az miktarda Mg bulunabilir). Alüminyuma uygulanan işlemler çizelge 4.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Alüminyum malzemelere uygulanan ısıl işlemler

F	O	H	T-W
Fabrika edildiği gibi. Pekleşme kontrolü ve mekanik özellik sınırlaması yok.	Tavlanmış ve yeniden kristalleştirilmiş. En düşük dayanım ve en yüksek sünekliğe sahip temper.	Pekleştirilmiş	Kararlı temperler üretmek için ısıl işlem uygulanmış. **W** çözündürme uygulanmış **T** yaşlandırılmış

Bu çalışmada kullanılan alüminyum 2024-T3'de ki, **T3** işlemi çözündürme uygulanmış soğuk şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış anlamına gelmektedir.

4.1.2. Karbon Elyaf Takviyeli Tabakalı Kompozitler

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. Esas amacı, yapımında kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerini tek bir malzemenin bünyesinde toplayarak daha efektif bir kullanım sunmasıdır (Tsai, 2018). Kompozit malzemeler, metalik, organik, ya da inorganik bileşen ihtiva edebilir ve kendini meydana getiren malzemelerin her birinin taşıdığı özelliklerinden, daha iyi özelliklere sahiptirler. İki veya daha fazla malzeme makroskobik ya da mikroskobik boyutlarda gerçekleşebilir.

Günümüz şartlarıyla değerlendirildiğinde, kompozit malzeme yaklaşımının hiçbir monolitik (tek bileşenli) metal alaşımı, seramik ve polimerin sahip olmadığı geniş bir malzeme özelliği kombinasyonu imkânı sağladığı herkes tarafından kabul edilmiştir (Daniel ve ark., 1994). İleri teknoloji uygulamalarında özel ve sıra dışı özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin uçak mühendisleri artan bir şekilde düşük yoğunluklu yüksek dayanımlı, rijit, aşınma ve darbeye karşı dirençli aynı zamanda korozyona uğramayacak yapısal malzemelere ihtiyaç duyarlar. Bu özellikler çoğunlukla bir araya gelemeyecek özellik kombinasyonlarıdır ve ancak kompozit malzeme teknolojisi ile bir araya getirilebilirler. Son yıllarda ki hızlı teknoloji gelişiminin en önemli sebeplerinden birisi malzeme alanında yaşanan gelişme ve ilerlemedir. Malzeme alanındaki bu gelişim

ise istenilen amaca uygun malzeme tasarımına imkân sunan kompozit malzemelerin geliştirilmesi ile gerçekleşmektedir.

Kompozit malzemelerin yapımında malzemenin özelliklerini iyileştiren takviye malzemesi ile bu takviye malzemesini bir arada tutan matris malzemesi kullanılır. Matris malzemesi hacim olarak daha fazladır. Yapıyı bir arada tutmanın yanında malzemeye gelen darbeleri veya yükleri takviye elemanlarına aktarmak, kırılma tokluğunu iyileştirmek, takviye elemanı ile uyum sağlamak, takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı koruma görevleri de vardır. Takviye, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir (Hashim ve ark., 1999).

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, matris ile takviye elemanı arasındaki bağ oluşturabilme kabiliyeti ile doğrudan ilişkilidir. Matris ile takviye temas noktalarında oluşan ara yüzeyler ve ara fazlar kompozit malzemeden istenilen özellikleri önemli ölçüde etkiler. Çünkü bu temas noktaları malzemede oluşan kuvvetlerin takviye elemana aktarıldığı bölgelerdir. Bu temas bölgelerinde gerçekleşebilecek olası bir güçlü birleşme kompozit malzemenin katı ancak gevrek davranış göstermesine neden olur. Temas noktasındaki zayıf bağlantı ise malzemenin esnek aynı zamanda tok olmasını sağlar. Ara yüzey, matris yapıdan daha zayıf olursa, kırılma ve tabaka ayrılması meydana gelir. Çünkü taşınan yük doğrudan ara yüzey üzerinden ara faza aktarılır, dolayısıyla takviye elemanı matristen ayrılmış olur. Genel olarak ara yüzeyin sert ve zayıf sınırlar arasında bulunması istenir. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları çizelge 4.2'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.2. Kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları (Miracle/Donaldson, 2001)

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek dayanım	Daha yüksek maliyet
Yüksek rijitlik	İşleme güçlükleri
Düşük ağırlık	Geri dönüşümün genellikle olmayışı
Yüksek yorulma dayanımı	Kırılma uzamasının az olması
Yüksek aşınma direnci	Bazı kompozitler için üretim zorluğu
Yüksek korozyon direnci	
İstenen yönde ısıl ve termal özellikler	
Estetik görünüm	

Kompozitler, mikroskobik ve makroskobik olmak üzere ikiye, takviye tipine göre taneli, lifli ve tabakalı olarak üçe, malzeme tipine göre polimer, metal, seramik olmak üzere üçe ayrılırlar. Bu çalışmada kullanılan kompozit malzeme 0.90 yönlü sekiz kat karbon elyaf kumaştan üretilmiş karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır.

4.1.3. Epoksi Reçine

Bu çalışmada yapıştırıcı olarak kullanılan epoksi reçine ticari olarak bulunabilen ve Momentive firması tarafından sağlanmış olan MGS-L285 laminasyon reçinesidir. Bu reçine 600-900 mPas viskoziteli ve iki fazlı olup %80-90 diglisidil eter bisfenol A ve %10-20 alifatik diglisidil eter karışımını içermektedir. Kürleştiricisi ise yine Momentive firması tarafından sağlanan MGS-H285 %70-90 sikloalifatik amin ve %10-30 polioksil alkil amin karışımıdır. MGS-H285'in viskozitesi 50-100 mPas'dır. Jelleşme zamanı oda sıcaklığında firmanın belirttiği oranlarda kullanıldığında (ağırlıkça 100:40) yaklaşık 2 ile 3 saattir. Epoksi reçinenin DIN WL 5.3203-1:1978-11 standardına göre mekanik özellikleri çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri (Ekrem, 2015)

Yoğunluk (g/cm3)	1,18-1,20
Eğilme mukavemeti (MPa)	110-120
Çekme mukavemeti (MPa)	70-80
Basma mukavemeti (MPa)	120-140
Darbe mukavemeti (MPa)	45-55
Elastiklik modülü(kPa)	3.0-3.3
Kopma uzaması [%]	5.0-6.5
Yoğunluk (g/cm3)	1,18-1,20

4.2. Numunelerin üretilmesi ve şartlandırılması

Bu bölümde, yapıştırılan malzemelerin özellikleri, yapıştırılan malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması, yapıştırıcı reçinenin hazırlanması ve nano partikül takviyesinin yapılışı, çekme, SLJ ve DCB numunelerinin hazırlanışı konusunda bilgiler verilmektedir.

4.2.1. Alüminyum yüzeylerin hazırlanması

Bu çalışmada yapıştırılan malzeme olarak kullanılan alüminyum AISI AA2024-T3 olarak adlandırılmaktadır. Bu tip alüminyumlar yüksek dayanıma ve işlenebilme özelliklerine sahiptirler. Bu özelliklere ek olarak sahip oldukları yüzey kalitesi ile yapı malzemesi olarak havacılık sanayi, otomotiv, askeri uygulamalar ve daha birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada kullanılan alaşımın kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri çizelge 4.4 ve çizelge 4.5'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Alüminyum kimyasal kompozisyonu

Bileşenler	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
Ağırlık (%)	90,9-93,2	0,1	3,8-4,9	0,50	0,3-0,9	0,3-0,9	0,5	0,15	0,25

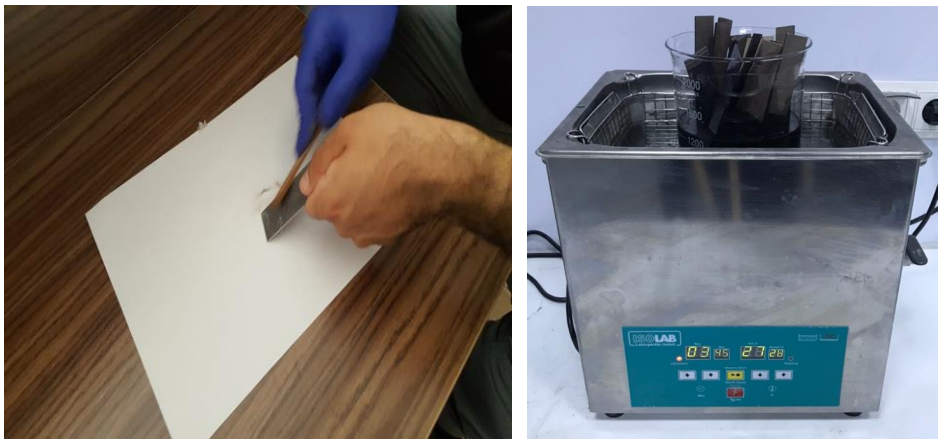
Çizelge 4.5. Alüminyum mekanik özellikleri

Bileşenler	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması %	Elastiklik modülü (MPa)	Poisson oranı	Kayma modülü (GPa)
A2024-T3	350	455	17	73	0.33	28

Endüstrideki yapıştırıcılı bağlantıların genellikle kayma ve soyulma gerilmelerine maruz kalması sebebiyle bu çalışmada kayma davranışını belirlemek için tek taraflı bindirmeli bağlantılar, kırılma (açılma) davranışını belirlemek için çift konsol kiriş bağlantıları oluşturulmuştur. Bu bağlantılar için gerekli boyutlandırma tek taraflı bindirmeli bağlantılar için ASTM D1002 standardına göre, çift konsol kiriş bağlantıları için ASTM D3433 standartlarına göre yapılmıştır.

Alüminyum levha, tek taraflı bindirmeli bağlantılar için 25x101.6 mm, çift konsol kiriş bağlantıları için 25x200 mm'lik dikdörtgenler halinden sayısal kontrollü lazer tezgahında azot gazı ile kesildi. Giyotin makas ile kesim esnasında ölçü farklılıkları ve kenar doğrusallıklarında sapmalar olması sebebiyle bu yöntem tercih edilmiştir. Kesim işlemlerinin ardından yapılan literatür incelemesine göre en etkili yüzey hazırlama yöntemi olduğu bildirilen anodizasyon işlemi ile alüminyum malzemelerin yüzeyler ASTM D2651 ve ASTM D3933 standartlarına göre hazırlandı.

Öncelikle alüminyum numunelerin kenarında yer alan çapaklar eğe ve zımpara yardımıyla temizlendi ve deiyonize su içerisinde ultrasonik banyoda 30 dk. karıştırıldı (şekil 4.1).



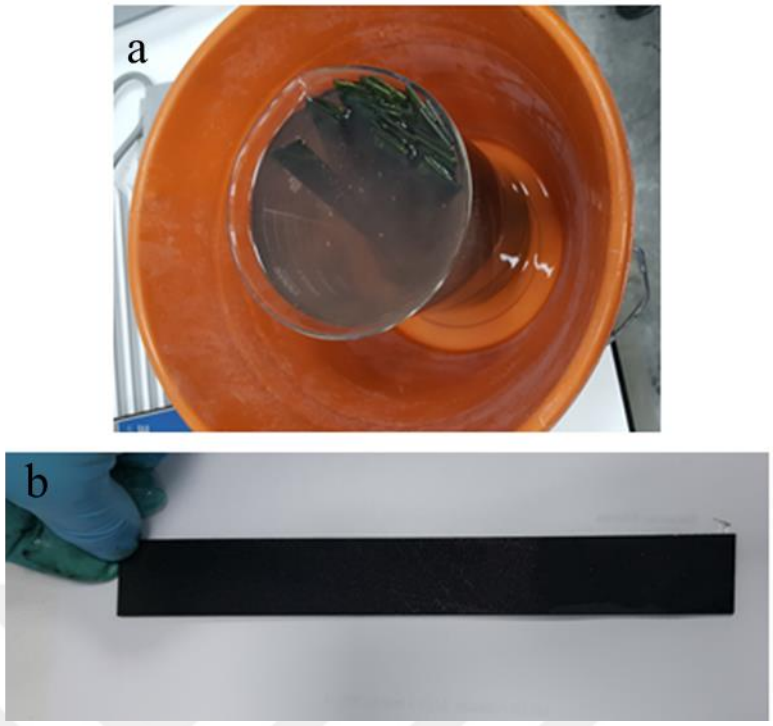
Şekil 4.1. Eğe ile numune çapaklarının temizlenmesi ve ultrasonik banyoda temizlik

Sodyum hidroksit (NaOH) ile hazırlanan ağırlıkça 4000:80'lık deiyonize su ve NaOH çözeltisi içerisinde 90˚ C 'de 15 dakika alkalin temizleme yapıldı (şekil 4.2).



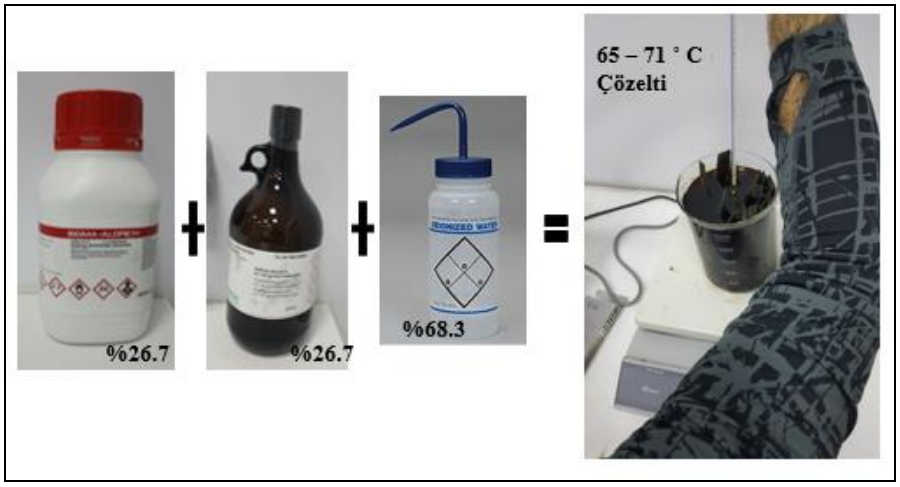
Şekil 4.2. Sodyum hidroksit ile temizlik

Sodyum hidroksit ile temizlenen numuneler 90˚C'de 5 dakika boyunca deiyonize su içerisinde yıkandı. Bu yıkama esnasında sodyum hidroksit içerisinden alüminyum numuneleri çıkarırken kurumamasına ve ıslak bir şekilde deiyonize su içerisine atılmasına dikkat edilmelidir (şekil 4.3 a). Numune yüzeylerinin bu aşamada homojen bir şekilde kararmış olması gerekmektedir (şekil 4.3 b).



Şekil 4.3. Sodyum hidroksit temizliğinden sonra numunelerin bekletilmesi (a) ve kararmış numune görüntüsü (b)

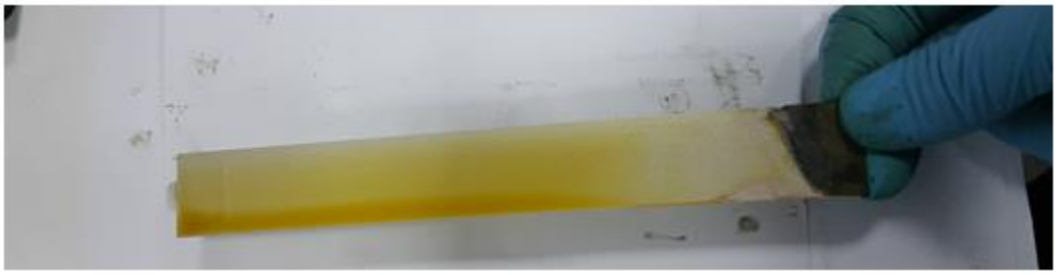
Bu işlemlerin ardından ağırlıkça %26,7 sülfirik asit, %5 sodyum dikromat ve %68,3 deiyonize su içeren çözelti hazırlanarak bu çözelti içerisinde 12 dk. beklenmiştir. Bekleme esnasında arada bir çalkalama yapılmıştır. Çözelti sıcaklığının 65-71 ˚ C aralığında olmasına dikkat edilmelidir (şekil 4.4).



Şekil 4.4. Sodyum dikromat çözeltisi içerisinde bekletme ve yüzeyin tamamen temizlenmesi

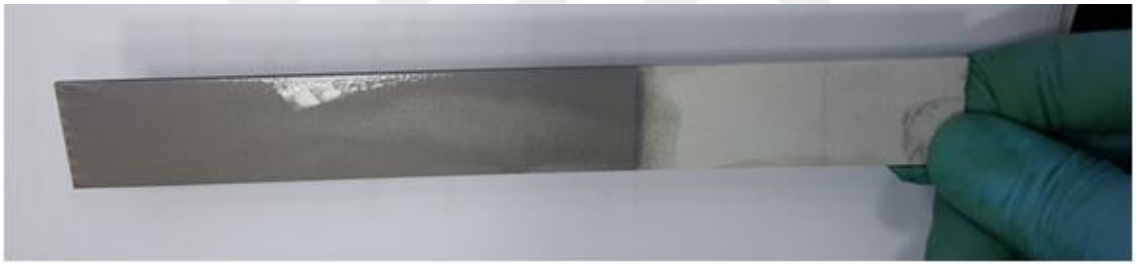
Sodyum dikromat çözeltisi içerisinden çıkarılan alüminyumların yüzeyleri parlak ve gri renktedir. Yüzeylerde kalan sodyum dikromat çözeltisi artıklarının (Şekil

4.5) iyi temizlenmesi gerekir. İyi temizlenmediği takdirde yüzeyde kalarak kuruyup yüzeyi tekrar kirletmektedir.



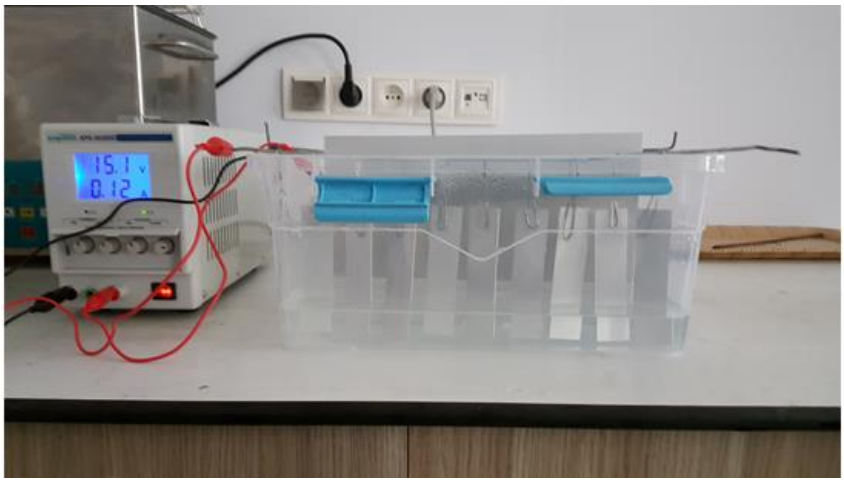
Şekil 4.5. sodyum dikromat çözeltisinden çıkarılan numunenin yüzey görüntüsü

Sodyum hidroksit kalıntılarını temizlemek için oda sıcaklığında deiyonize su içerisinde en az 5 dakika beklenilmelidir. Bu bekleme neticesinde sodyum hidroksit kalıntılarından arındırılan yüzey tamamen temiz hale gelir ve düzgün parlak gri bir görünüm kazanır (şekil 4.6).



Şekil 4.6. Deiyonize su içerisinde bekletilen ve sodyum dikromat artıkları giderilen alüminyum yüzeylerinin görüntüsü

Temizlenen numunelere homojen bir şekilde pürüzlendirme sağlanması (yüzeyle alüminyum oksit oluşturulması) için fosforik asit anotlama işlemi yapıldı. Fosforik asit çözeltisi ağırlıkça %9-12 fosforik asit ve %88-91 deiyonize su içermelidir. Çözelti içerisine 23 dakika boyunca daldırılan numuneler üzerine 14-16 volt akım verilerek anotlama işlemleri gerçekleştirildi. Araya alüminyum levha konularak levhanın her iki tarafına yerleştirilen numunelerin anotlama işlemi görüntüsü şekil 4.7'de gösterilmektedir. Bu işlem neticesinde yüzey, anotlanmayan kısma göre daha koyu bir görünüm kazanır.



Şekil 4.7 Alüminyum numunelerin anodizasyon işlemi

Anotlama işleminden sonra 70˚C'de 45 dakika boyunca fırında kurutma işlemi yapılarak yüzeyde kalan solüsyon artıkları uçurularak numuneler kurutulur (şekil 4.8).

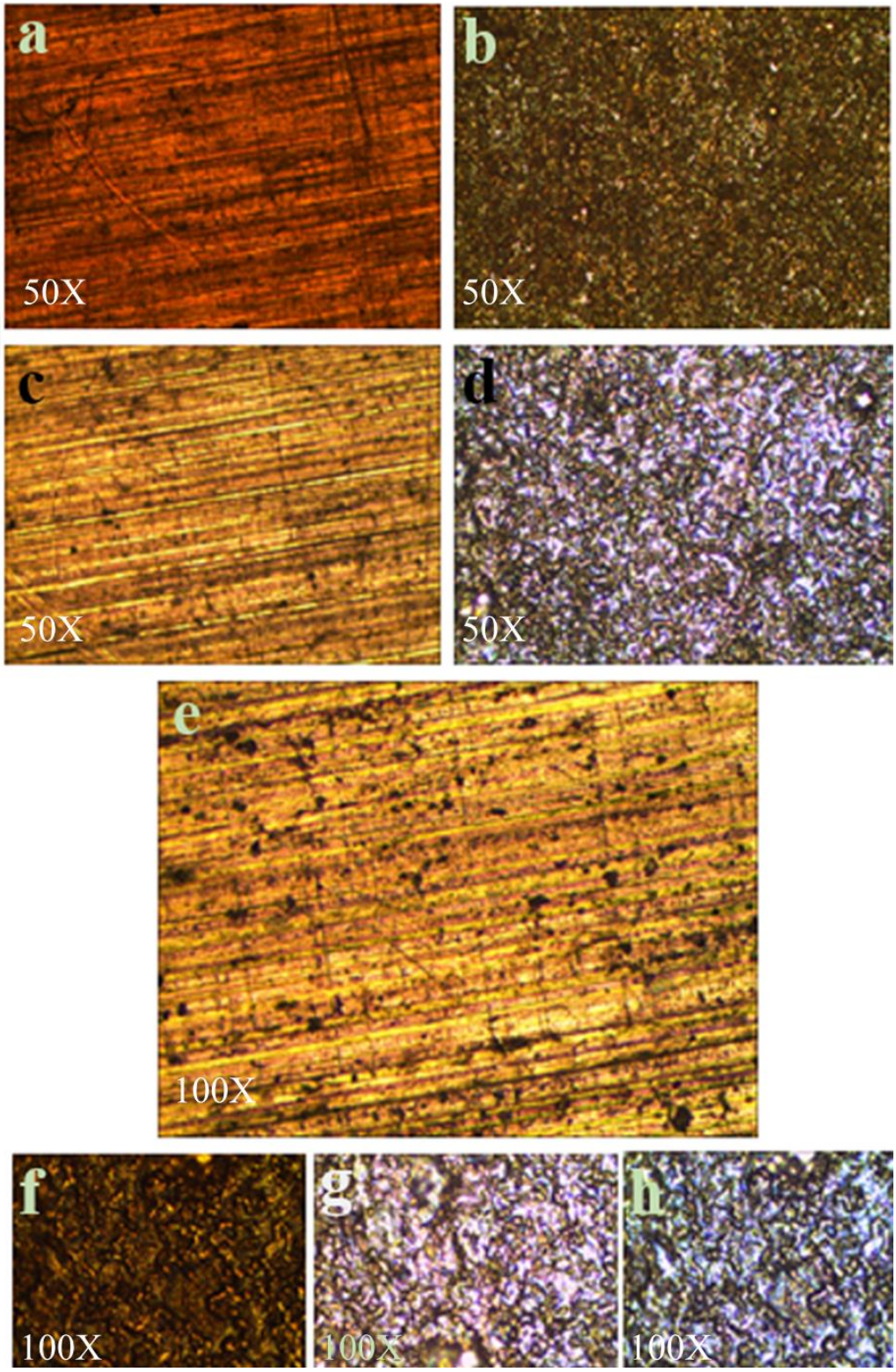


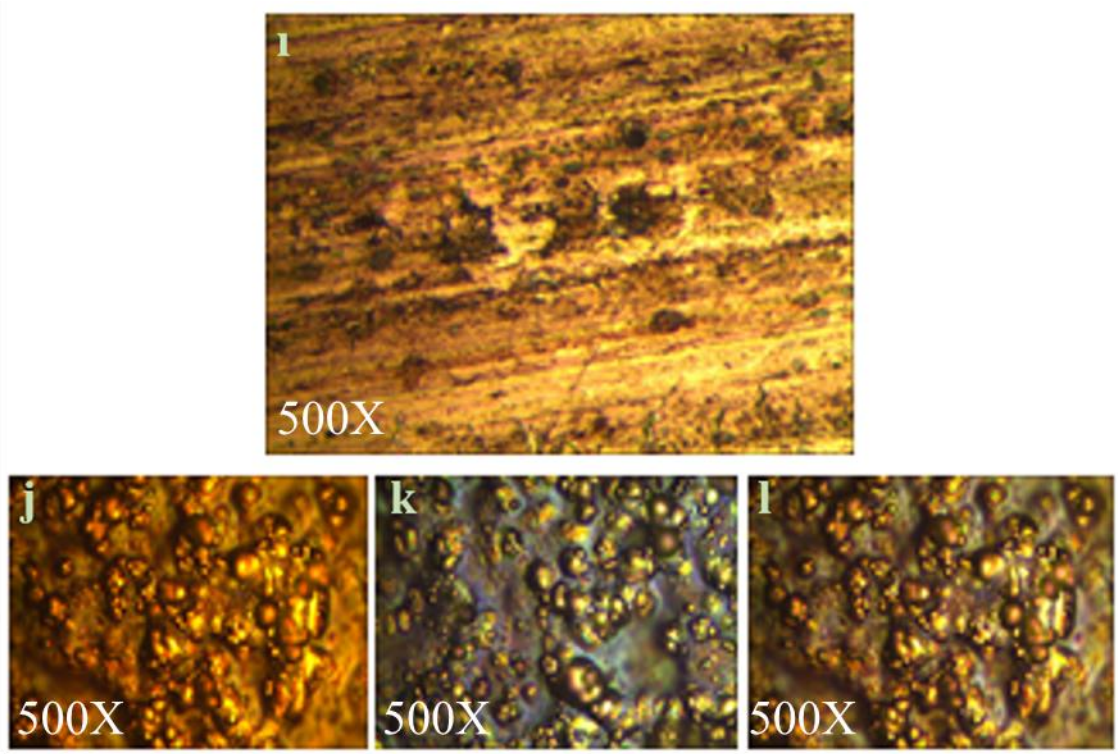
Şekil 4.8. Numunelerin kurutulması

Bu yöntemleri uygularken yapıştırılacak yüzeylere deiyonize suyla yıkama ve uygulanacak çözelti işlemleri dışında herhangi bir şeyle anotlama bitene kadar dokunulmaması gerekir. Çözelti işlemleri süresince, yani alkalin temizlemeden fosforik asit anotlamadan sonraki kurutma sonuna kadar işleme kesintisiz devam edilmeli ve yüzeylerin kurumaması sağlanmalıdır. Kurutma işleminin ardından yüzeyleri hazır olan numuneler 72 saat boyunca yapıştırılabilir. 72 saat içerisinde yapıştırılmayan numunelere aynı işlemlerin tekrar tekrar uygulanması gerekir.

Yüzey hazırlama işlemleri neticesinde elde edilen alüminyum yüzeyleri ile kirli alüminyum yüzeylerinin 50x 100x ve 500X büyütme oranlarındaki yüzey görüntüleri şekil 4.9'da verilmektedir. Şekil 4.9. a, c, e, ı' da farklı büyütme oranlarında temizlenmemiş alüminyum yüzeylerinin görüntüleri, şekil 4.9 b, d, f, g, h, ı, j, k, l de ise farklı büyütme oranlarında yüzeyleri hazırlanmış numunelerin görüntüleri gösterilmektedir.

Şekil 4.9a' da kirli alüminyum yüzeyi belirli bir yönde düz çizgilerden oluşurken şekil 4.9 b'de küresel oksitler oluşarak yüzey morfolojisinin tamamen değiştiği görülmektedir. Artan büyütme oranlarında bu durum git gide netleşirken, şekil 4.9 j, k, l de küresel oksitler ve oksitlerin dağılımlarının homojenliği net bir şekilde gözükmektedir.





Şekil 4.9. Temizlenmiş ve temizlenmemiş numune yüzeylerinin mikro yapı görüntüleri (**a, c, e, ı** Temizlenmemiş numune yüzeyleri), (**b, d, f, g, h, j, k, l** Temizlenmiş ve pürüzlendirilmiş yüzey görüntüleri **)**

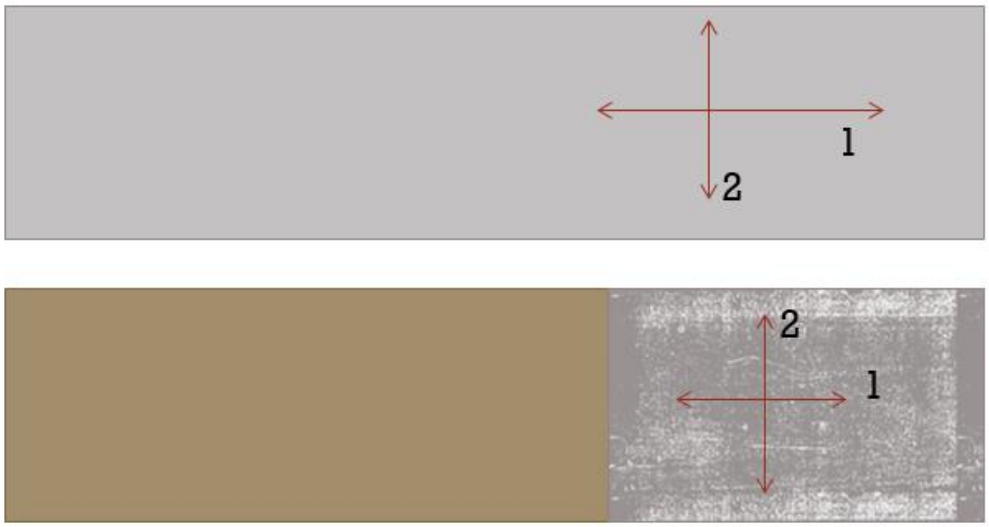
Yapılan yüzey hazırlama işlemleri neticesinde mikro yapı görüntüleri ile kontrol edilen yüzeyler, pürüzlülük ölçüm cihazı ile de kontrol edilerek yapılan işlemin uygunluğu teyit edilmiştir. Ölçümler Mitutoyo cihazında yapılmıştır. Ölçüm görüntüleri şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

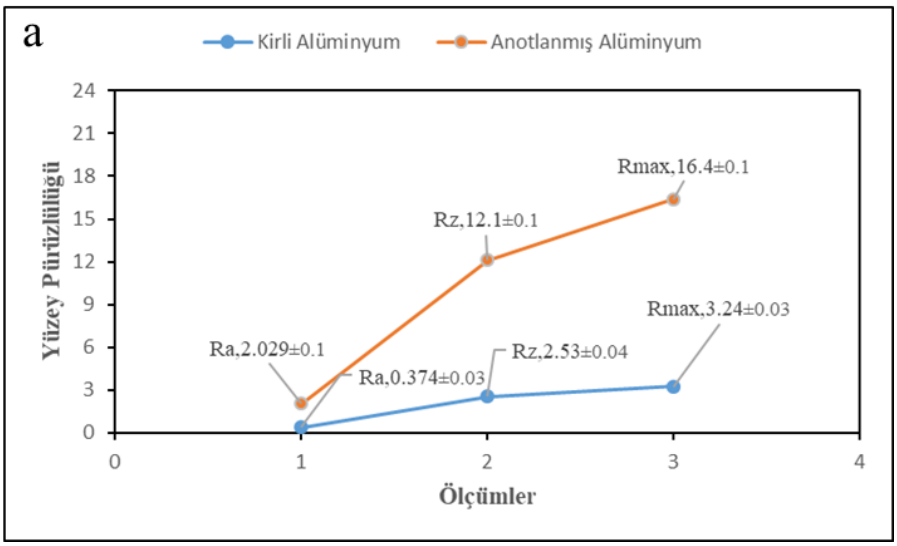
Pürüzlülük ölçümleri şekil 4.11'de gösterilen birbirine 90˚ konumlanmış iki doğrultu boyunca yapıldı. Deney güvenilirliğini sağlamak için ölçümler 5'er kez tekrar

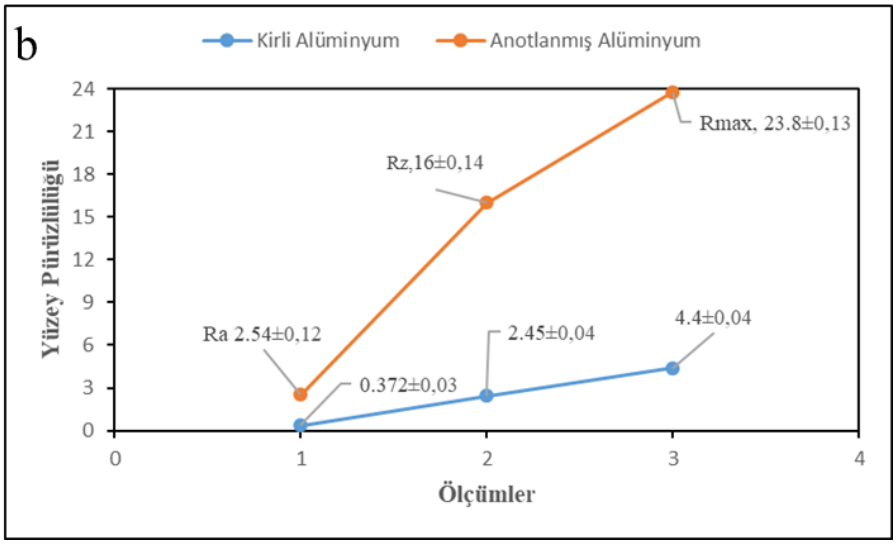
edilerek standart sapmaları ile beraber verilmektedir. Bir yönünde ve iki yönünde ölçülen pürüzlülük değerleri şekil 4.12 a ve b de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm doğrultuları

Grafiklere bakıldığında 1 yönünde ölçülen Ra pürüzlülük değeri 0.374'tem 2.029'a çıkarılmıştır. Rz değeri ise 2.53'ten 12.1'e çıkmıştır. Maksimum pürüzlülük değerlerine bakıldığında ise 3.24'ten 16.4'e çıkarılmıştır. 2 yönünde ölçülen pürüzlülük değerlerine bakıldığında da 1 yönü ile yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bu durum yapıştırma yüzeyi boyunca homojen bir pürüzlülük dağılımının elde edildiğinin göstergesidir.





Şekil 4.12. İki farklı doğrultudaki yüzey pürüzlülüğü grafikleri **a-** 1 doğrultusundaki yüzey pürüzlülüğü ölçümleri **b-** 2 doğrultusundaki yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

4.2.2. Kompozit yüzeylerin hazırlanması

Kompozit numuneler tek taraflı bindirmeli bağlantılar için ASTM D5868-01 standardına göre, çift konsol kiriş bağlantıları için ASTM 5528-01 standardına göre kesilerek boyutlandırılmıştır (115x25mm ve 200x25mm). Kesilen malzemelerin yüzey hazırlama işlemleri ise ASTM 2093-03 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Öncelikle zımpara ile köşelerde ve kenarlarda kalan çapaklar temizlendi. Ardından temiz ve nemli bir bez yardımıyla yüzeyler silinerek yağ kir ve toz artıkları temizlendi. Ardından aseton ile silinerek kurumaya bırakıldı.

İlk temizlik işleminin ardından 320 grid zımpara ile uygulanacak gerilmeye dik doğrultuda (dikdörtgen numunelerin kısa kenarının alt tarafından yukarıya doğru) ileri geri hareketler ile zımparalandı. Zımparalama işleminin ardından gözle muayene edilerek yüzey parlaklığının giderilip, mat bir yüzey görülünceye kadar zımparalamaya devam edildi. Zımparalanmış ve zımparalanmamış yüzeylerin görüntüleri şekil 4.13'de görülmektedir.



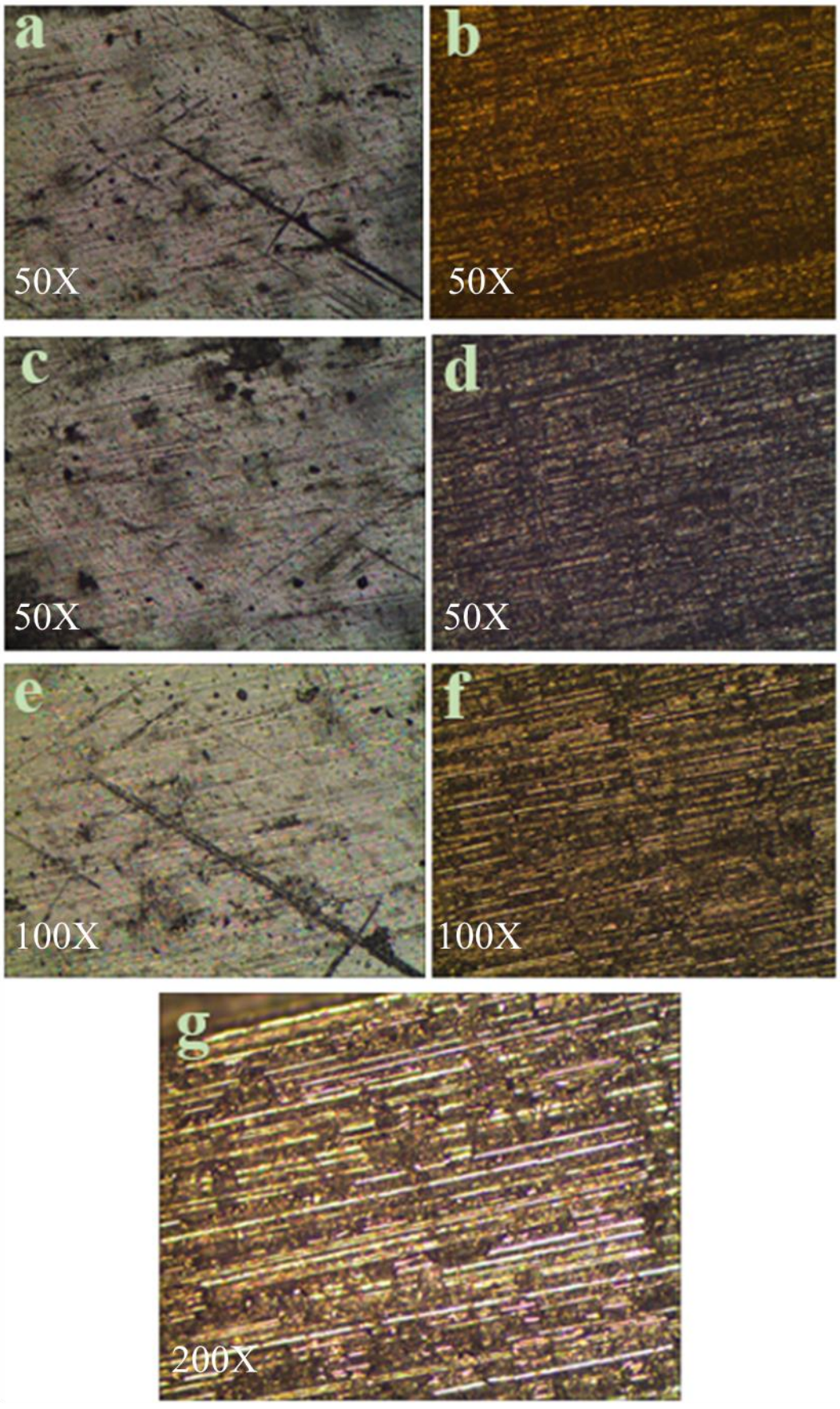
Şekil 4.13. Zımparalanmış ve zımparalanmamış yüzeylerin görüntüsü

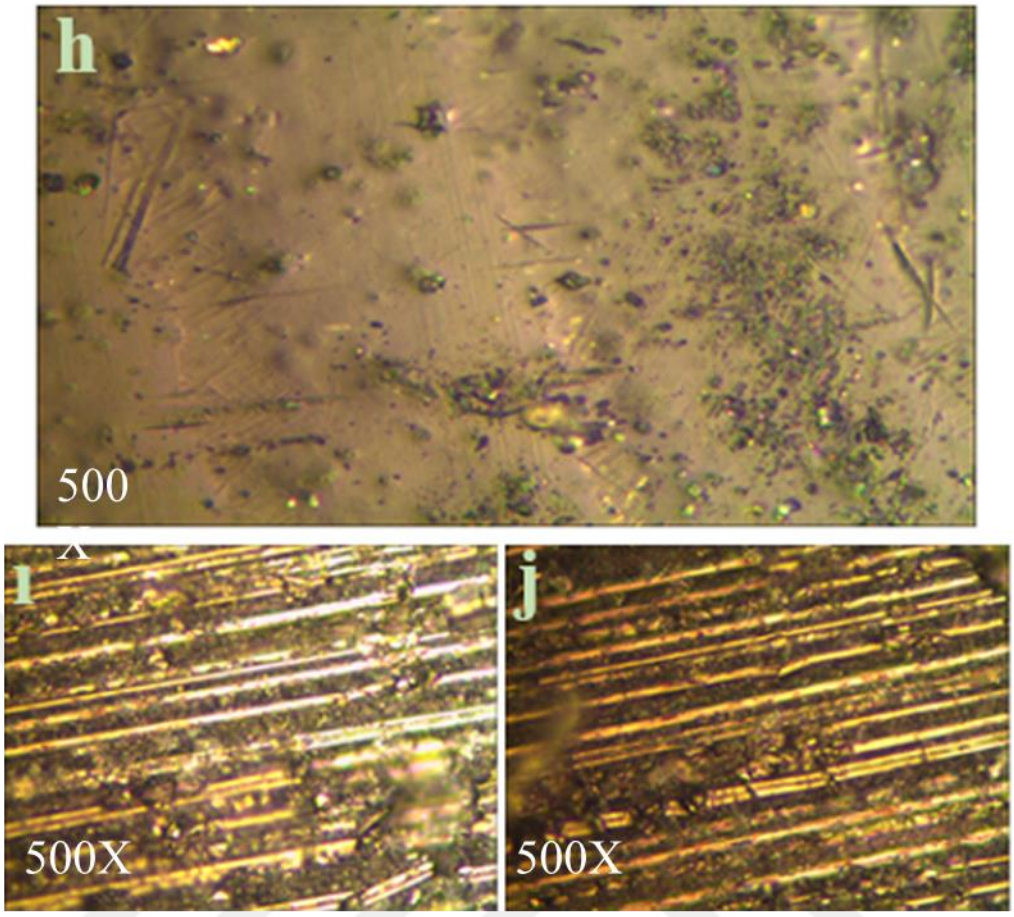
Tekrar asetonla silinen numuneler ultrasonik banyo içerisinde aseton çözeltisinde 15 dakika boyunca yıkanıp kurutularak bu işlem 3 kez tekrar edildi ve yüzey hazırlama işlemi tamamlandı. Yapılan yüzey hazırlama ve temizlik işlemleri şekil 4.14'de gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Yüzey hazırlama ve hazırlanmış numuneleri yıkama işlemleri

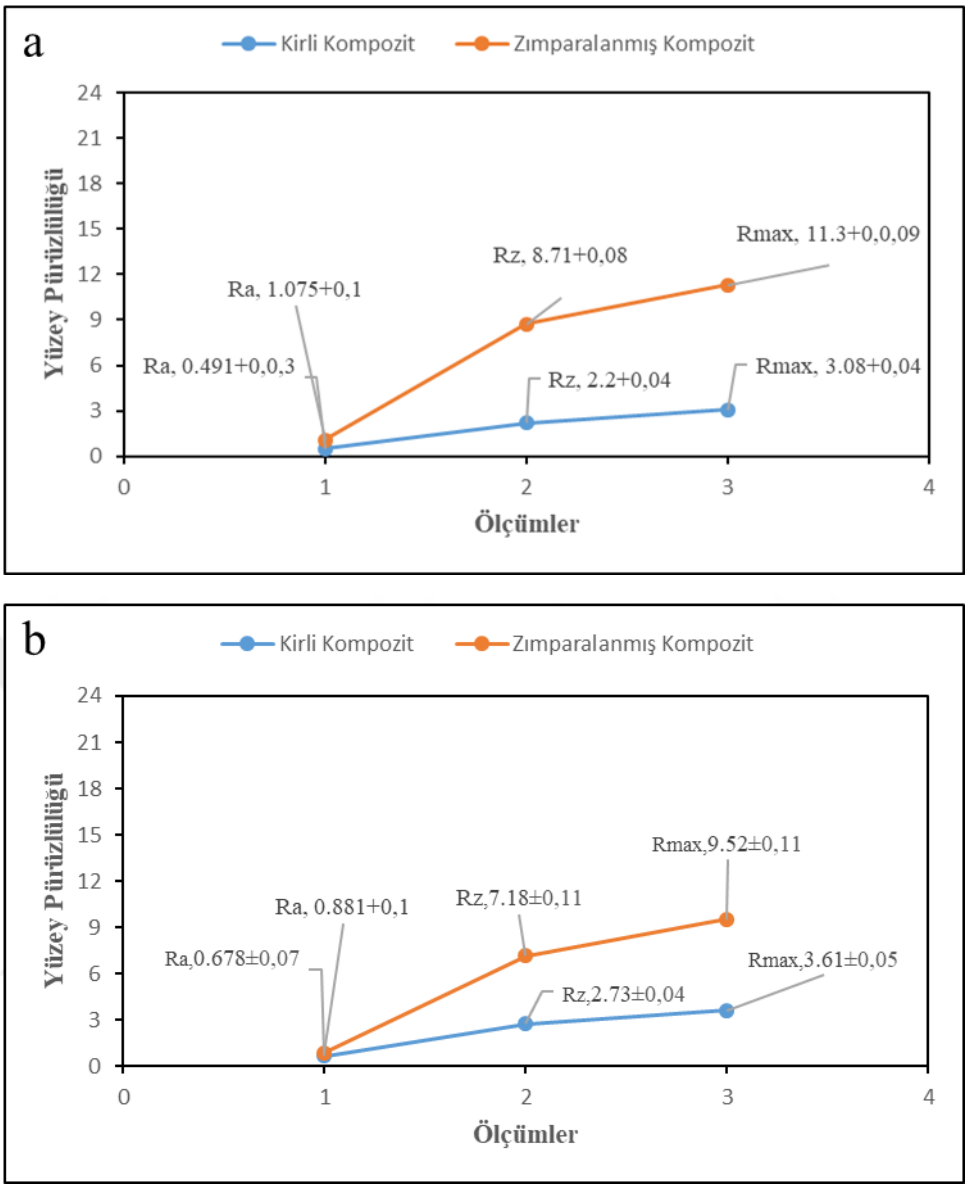
Temizlik ve yüzey pürüzlendirme işleminin ardından yüzeyler, optik mikroskop yardımıyla farklı büyütme oranlarında incelenerek temizlik ve yüzey pürüzlendirme işleminin uygunluğu incelenmiştir. Şekil 4.15 a, c, e, h da farklı büyütme oranlarında zımparalanmamış ve temizlenmemiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri, şekil 4.15 b, d, f, g, ı, j' de ise zımparalanmış ve temizlenmiş numunelerin mikro yapıları görülmektedir. 50 X büyütme oranından 500 x büyütme oranına doğru gidildikçe başlangıçta düz ve parlak olan numunelerin gerilme doğrultusuna dik ve düzgün şekilde pürüzlendirildiği görülmektedir.


a
50X
b
50X
c
50X
d
50X
e
100X
f
100X
g
200X



Şekil 4.15. Hazırlanmış (b, d, f, g, ı, j) ve hazırlanmamış (a, c, e, h) kompozit malzeme yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri

Mikro yapı incelemeleri neticesinde elde edilen pürüzlülük görüntüleri, pürüzlülük cihazı ile de kontrol edilerek kirli ve temiz numunelerin yüzeyinden ölçülen Ra, Rz ve Rmax değerleri grafikler halinde şekil 4.16' da gösterilmektedir. Bir yönünde ölçülen pürüzlülük değerlerine bakıldığında iki yönündeki ölçümlerden daha büyük pürüzlülük değerleri elde edilmektedir. Bu durum tek yönlü (uygulanan kuvvet yönüne dik) zımparalama işleminden kaynaklanmaktadır. Pürüzlülük değerlerine bakıldığında Ra değeri 0.491'den 1.075'e, Rz değeri 2.2'den 8.71'e, Rmax değeri ise 3.08'den 11.3'e çıkmaktadır. Bu ölçümlere göre kompozit malzemelere uygulanan yüzey hazırlama işlemlerinin uygun pürüzlülük değerlerinin elde edilmesini sağladığı ve malzemelerin yapıştırma işlemine hazır olduğu söylenebilir.



Şekil 4.16. Kompozit malzemelerin 1 (a) ve 2 (b) doğrultusunda ölçülen yüzey pürüzlülük değeri grafikleri

4.2.3. Epoksi ve takviyeli epoksi reçinelerin hazırlanması

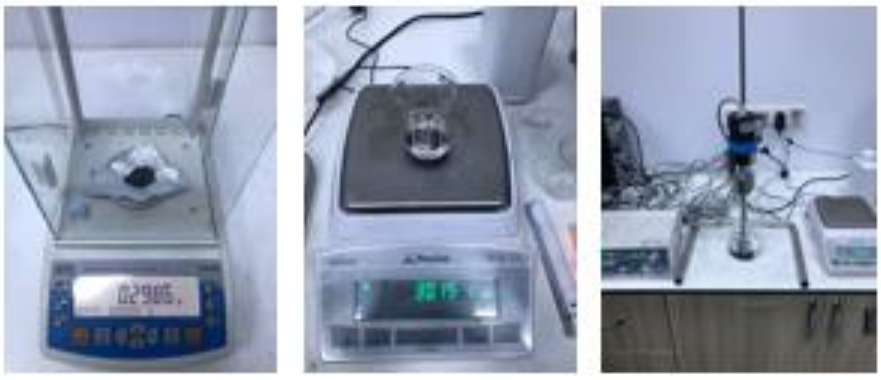
Bu çalışmada iki farklı tipte epoksi reçine kullanıldı. İlk olarak endüstriyel olarak kullanılan Momentive firmasının epoksi reçinesi ve reçineye uygun olarak temin edilen kürleştiricisi üretici firma talimatları doğrultusunda, ağırlıkça 100:40 oranında mekanik karıştırıcı yardımıyla 15 dakika karıştırılarak ve vakum ortamında bekletilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Vakum altında beklenilmesinin sebebi karıştırma esnasında reçine içerisine giren hava kabarcıkları yapışma esnasında ıslanabilme kabiliyetini azalttığı için bağlantı mukavemetinin azalmasına neden olur. Bu sebeple

gözeneklerin giderilmesi gerekir. Kullanılan reçine ve üretim aşaması şekil 4.17'de gösterilmektedir.



Şekil 4.17. Bu çalışmada kullanılan epoksi reçine ve üretim aşamaları

Bu çalışmada kullanılan ikinci yapıştırıcı ise ÇCKNT takviyeli epoksi reçinedir. Nano yapıştırıcının hazırlanışının ilk aşaması da benzer şekildedir fakat sertleştirici ilave edilmeden önce nanopartiküllerin reçine içerisine karıştırılıp tüm işlemleri bittikten sonra sertleştiricinin ilave edilmesi gerekir. Epoksi reçinenin ağırlıkça %1'i kadar ÇCKNT hassas terazide tartılarak 100 ml aseton içerisine homojenizatör ile 15 dakika karıştırılarak aseton içersine dağıtılmıştır (şekil 4.18).



Şekil 4.18. ÇCKNT partiküllerinin tartılıp karıştırılması

Bu aseton ve ÇCKNT karışımı epoksi reçine içerisine, buz banyosu içerisinde beşer dakikalık dört tekrar ile problu homojenizatör ile karıştırılarak ilave edildi. Bu işlem esnasında karışım çok fazla ısındığı için buz banyosu yardımıyla reçinenin

yaklaşık olarak oda sıcaklığında muhafaza edilmesi oldukça önemlidir. Bu sayede ÇCKNT partiküllerinin zarar görmesinin önüne geçilmiş olunur (şekil 4.19).



Şekil 4.19. ÇCKNT aseton karışımının epoksi reçineye karıştırılması ve karıştırıldıktan sonra fırında asetonun uçurulması

Aseton ÇCKNT ve epoksi reçine çözeltisi vakum fırını içerisinde 70˚ C de ve 0,75 bar vakum ortamında 24 saat bekletilerek aseton uçurulur ve geriye epoksi içerisinde homojen olarak dağılmış ÇCKNT partiküllerin olduğu reçine elde edilir. Bu karışım içerisine, saf epoksi reçine hazırlanırken olduğu gibi ağırlıkça 100:40 oranında kürleştirici ilave edilerek ve vakumda 10 dakika bekletilip reçine içerisindeki baloncuklar giderilerek reçine hazır hale getirildi.

4.2.4. Çekme Numunelerinin hazırlanması

ÇCKNT partikül takviyeli ve takviyesiz epoksi reçinelerin mekanik karakterizasyonları için çekme numuneleri hazırlandı (dog bone). Şekil 4.20'de görülen çekme numunesi kalıbı ASTM D638 standardına göre boyutlandırılarak hazırlanmıştır. Kalıplar ilk olarak spatula yardımıyla kazınıp temizlendi. Ardından reçinenin kalıptan kolay ayrılabilmesi için ayırıcı krem temiz bir bezle kalıp iç ve dış yüzeylerine uygulanarak alt ve üst kalıp birleştirildi. Birleştirilme esnasında cıvataların sıkılıkları titizlikle kontrol edilerek sıvı halde dökülen reçinenin alt ve üst yüzeyleri arasından akması engellendi.



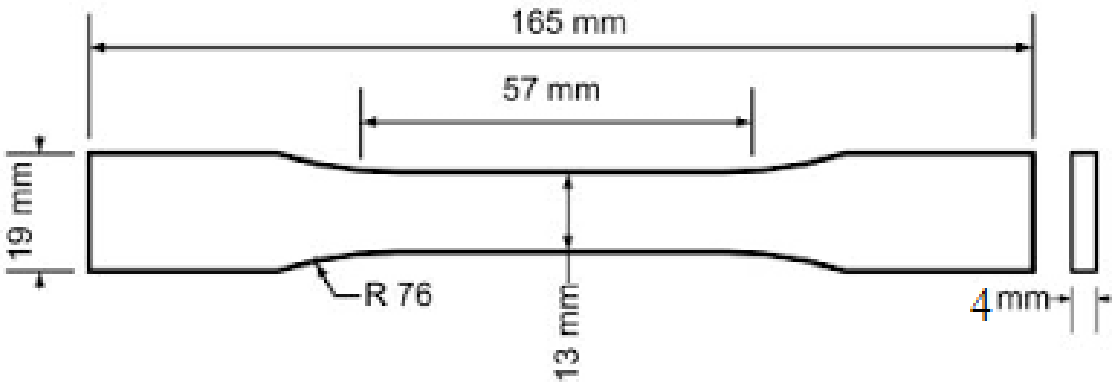
Şekil 4.20. Çekme numunelerinin üretildiği kalıbın birleştirilmemiş hali

Hazırlanan epoksi reçineler kalıba dökülerek 24 saat oda sıcaklığında ve 15 saat 80˚C'lik fırında bekletilerek kürleştirme işlemi tamamlandı ve kalıplardan çıkarıldı. Kalıptan çıkarılan numuneler şekil 4.21'de çekme numunelerinin geometrileri ise şekil 4.22'de gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Çekme ve kalıbı ve kalıptan çıkarılan numuneler

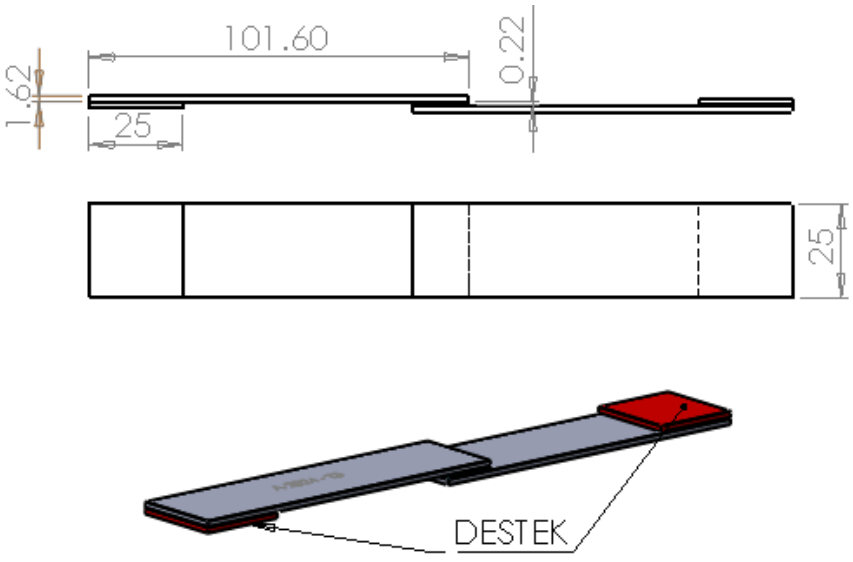
Kalıptan çıkarılan numunelerin yüzeylerinde, kenarlarında ve köşelerinde kalan çapaklar ve yüzey dalgalanmaları (varsa) ince zımpara ile zımparalanarak düzeltildi ve keskinlikleri alındı.



Şekil 4.22. Çekme numunelerinin geometrisi

4.2.5. Kayma Testi (SLJ) numunelerinin hazırlanması

Alüminyum malzemelerin tek taraflı bindirmeli bağlantıları ASTM D1002-10 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Bu standarda uygun olarak hazırlanan numunenin boyutları şekil 4.23'de gösterilmektedir. Daha önceden kesilen temizlenen ve yüzeyleri pürüzlendirilen numuneler tek taraflı bindirmeli bağlantı kalıbı yardımıyla yapıştırılmıştır. Bağlantı kalıbı kullanılmasının avantajları, yapıştırıcı kalınlığının düzgün olarak sağlanması, bağlantılar üzerine uygulanan yapıştırma basıncının her numunede aynı olması ve bağlantı kalınlığını sağlamak için bağlantı yüzeyinde kullanılan (cam bilye, tel.., vb.) aparatlara ihtiyaç duyulmamasıdır. Çünkü bu aparatlar yapışma yüzeyinde düzensizliğe neden olarak yapışma mukavemetini olumsuz yönde etkileyebilir.



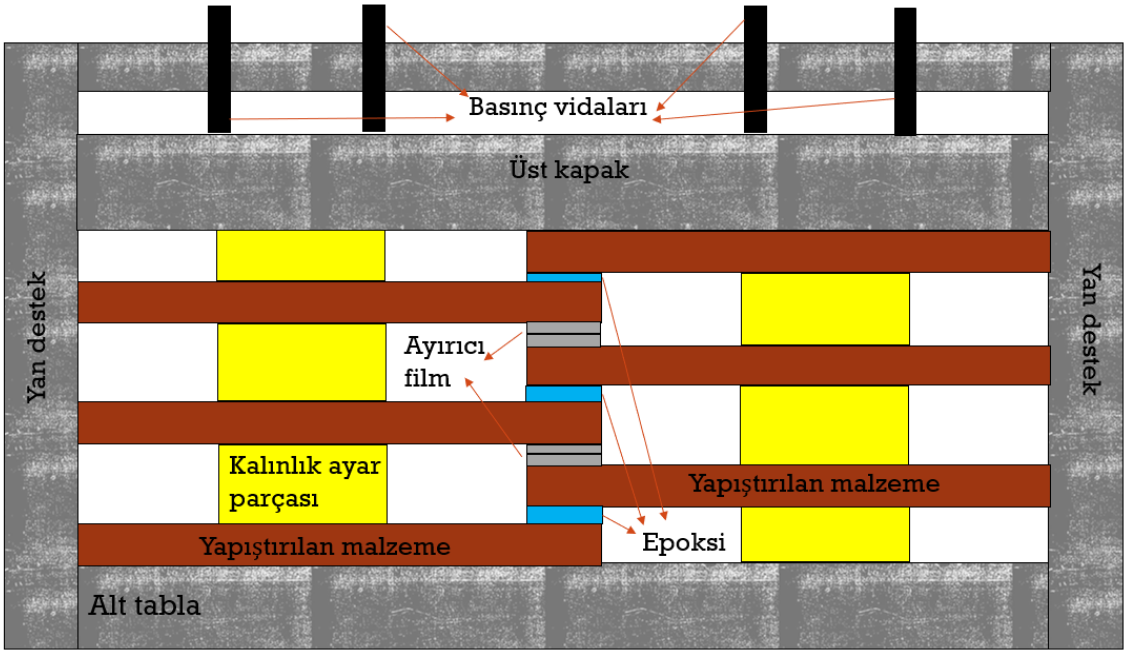
Şekil 4.23. SLJ (Kayma) numunelerinin ölçüleri

İlk olarak yüzeyleri hazırlanmış olan alüminyumların arka taraflarına yapışmayı önleyici bantlar yapıştırılır. Ardından yapıştırıcı kalınlığını sağlayacak olarak yardımcı aparatlar istenilen kalınlığa göre önce ayarlanır ve yapıştırma esnasında hazır bulundurulur (şekil 4.24).



Şekil 4.24. Alüminyum bağlantılarının yapıştırma işlemi öncesi hazırlıkları

Daha önceden hazırlanmış olan reçine malzeme yüzeylerine dikkatli bir şekilde uygulanarak yapıştırma kalıbına tek tek dizilir. Bu dizme işlemi esnasında malzeme yüzeylerine fazla yapıştırıcı sürülmemesine dikkat edilmelidir. Çünkü fazla yapıştırıcı sürüldüğünde bağlantıdan taşan reçine numunelerin birbirlerine ya da numunelerin kalıba yapışmasına sebebiyet verebilir. Numunelerin kalıba dizilme işi şematik olarak şekil 4.25'de gösterilmektedir.



Şekil 4.25. SLJ numunelerinin üretiminin yapıldığı kalıbın şematik görüntüsü

Kalıbın en üstüne kadar numuneler dizildikten sonra kalıbın üst kapağı konularak kalıp üzerinde bulunan vidalar dikkatli bir şekilde sıkılır. Tüm vidaların eşit bir şekilde numunelere temas ettiğinden emin olunmalıdır. Bu işlem şekil 4.26'da gösterilmektedir.



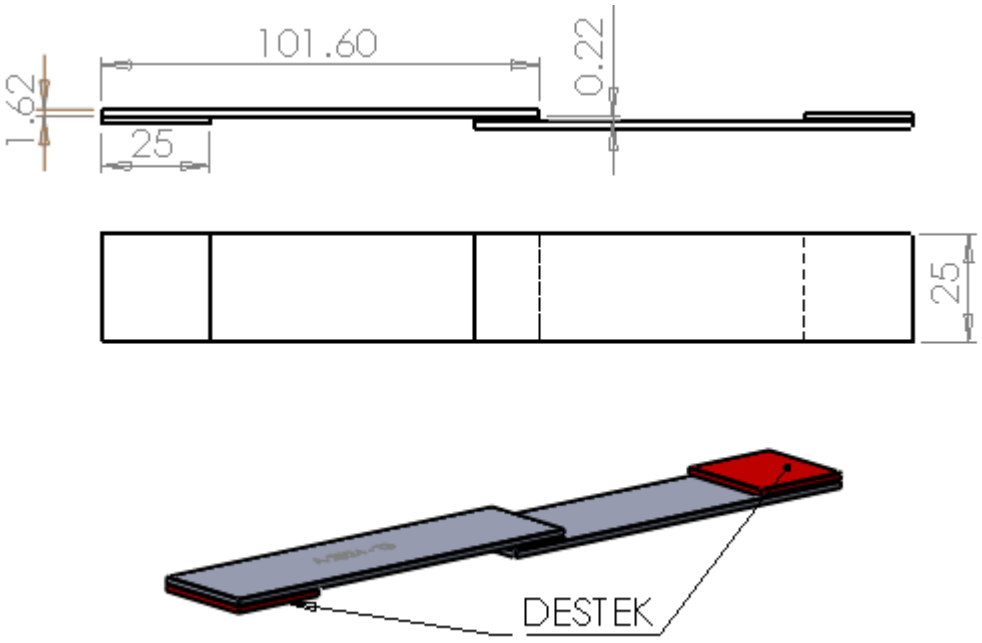
Şekil 4.26. Üretim kalıbı

Son olarak numunelerin sağdan soldan yukardan ve aşağıdan kontrol edilip fazla sürülen reçineler spatulanın ucuyla alındıktan sonra kalıbın kapakları kapatılarak oda sıcaklığında 24 saat ve 80˚C de 15 saat kürleşmeye bırakılır (şekil 4.27).



Şekil 4.27. Üretimi biten numunelerin oda sıcaklığında ve fırında kürleştirilmesi

Kompozit malzemelerde alüminyum malzemeler gibi aynı prosesle üretildiler. Yüzeyleri hazırlanan kompozit malzemelerin arka taraflarına yapışmayı önleyici bant yapıştırılır. Ardından yapıştırıcı kalınlığını sağlayacak yardımcı aparatlar kompozit malzemeye uygun şekilde hazırlanır. Sonra kompozit yüzeylerine yapıştırıcı sürülerek kalıba aparatlarla beraber yerleştirilerek kalıbın üst kapağı kapatılır ve vidalanır. 24 saat oda şartlarında ve 15 saatte fırında olmak üzere toplam 39 saat kürleştirilerek tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantıları oluşturulur. Kompozit malzemelerin tek taraflı bindirmeli bağlantı ölçüleri şekil 4.28'de gösterilmektedir.

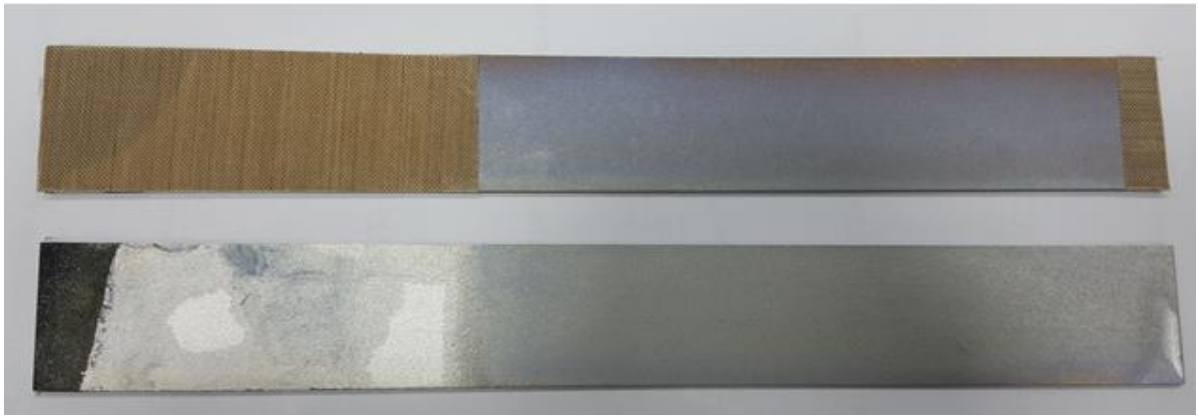


Şekil 4.28. Kompozit malzemelerin SLJ bağlantı geometrisi

4.2.6. Çift konsol kiriş testi (DCB) numunelerinin hazırlanması

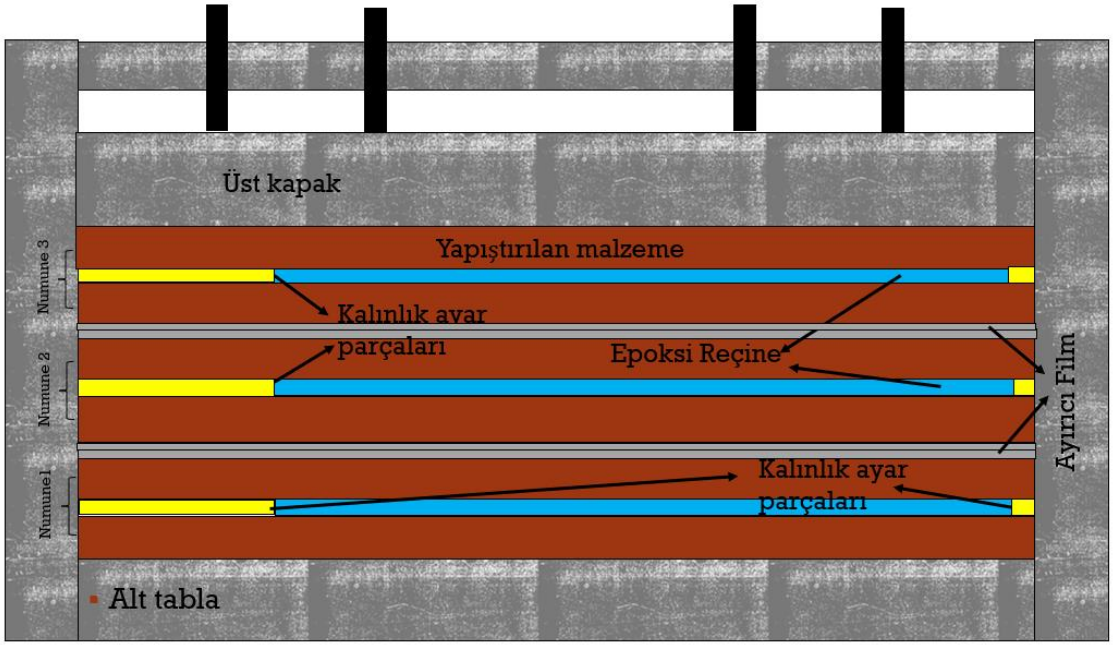
Hem alüminyum hem de kompozit malzemelerin çift konsol kiriş bağlantıları ASTM D5528 standardına göre boyutlandırıldı. Numune şekli, şekil 4.29' da gösterilmektedir.

Yüzeyleri hazırlanan malzemelerin 75 mm'lik bölümüne ve son 5 mm'lik bölümüne 0.11 mm kalınlığında yapışmaz politetrafloretilen film tabakası koyuldu. Bu işlem yardımıyla hem yapıştırıcı kalınlığı düzgün bir şekilde elde edildi hem de çift konsol kiriş bağlantılarının başlangıç çatlakları oluşturulmuş oldu. Bu işlem de şekil 4.29' da gösterilmektedir.



Şekil 4.29. DCB numuneleri

Politetrafloretilen bantların yapıştırılmasının ardından spatula yardımıyla yüzeye epoksi reçineler yüzeye sürüldü. Reçine sürülen iki malzeme reçineli olan yüzeyleri üst üste gelecek şekilde koyularak dizildi ve kalıbın üst kapağı kapatıldı. Ardından reçine kürleştirildi ve numuneler kalıptan çıkarıldı. Bu işlem ve kalıp görüntü şematik olarak ve gerçek görüntü olarak şekil 4.30'da gösterilmektedir.





Şekil 4.30. DCB numuneleri üretim kalıbı şematik ve gerçek görüntüleri

Çift konsol kiriş (DCB) numuneleri hazırlandıktan sonra test yapılabilmesi için numunelerin başlangıç çatlaklarının oldukları yerlere menteşeler yapıştırılmıştır. Menteşelerin yapıştırıldığı çift konsol kiriş numuneleri şekil 4.31'de gösterilmektedir.



Şekil 4.31. DCB numunelerine menteşelerin yapıştırılması

4.3. Numunelere uygulanan deneyler

Bu bölümde, üretilen numunelere uygulanan, kütle değişimi ölçümleri, FT-IR, DSC, TGA, çekme, SLJ (Kayma), DCB (çift konsol kiriş) testleri hakkında genel bilgiler yer almaktadır.

* Kütle değişimi testi

Kütle değişimi ölçümleri, zamana bağlı ölçümlerin yapıldığı numunelerde, ölçümleri yapılan numunelerin kütlesinde değişim olup olmadığını tespit etmek için uygulanır. Hassas bir terazi yardımıyla belirli zaman aralıklarında ölçümler alınarak % kütle değişimi zaman grafikleri çizilerek, zamana bağlı kütle değişimi karakteristiği belirlenir.

Bu çalışmada, cam levhaların arasında kürleştirilen epoksi reçinelerin kütle değişimi ölçümleri kaydedilmiştir. Şartlandırma ortamına temas eden yüzey alanı, kütle değişimini doğrudan etkileyen faktörlerden birisi olduğu için, cam levhalar kullanıldı. Cam levhalar arasındaki epoksi reçine kalınlığı, diğer bağlantılarda kullanılan yapıştırıcı kalınlığına göre belirlenerek üretildi. Kütle ölçümleri 24 saat boyunca yarım saat

aralıklarla, 24 saatten sonra 6 saatte bir ve daha sonrada 24 saatte bir ölçümler alındı. Kütle değişimleri sabitleninceye kadar bu işleme devam edildi ve tüm ortamlardaki numunelerde değişim sabitlenince ölçümler sonlandırıldı. Kütle değişimleri, zamana bağlı olarak çizilerek kütle değişim testi sonuçları kısmında gösterilmektedir. Şartlandırma etkilerini görsel olarak görebilmek için, şartlandırma ortamlarına renkli indikatörler eklenerek, ortamın yapıştırıcı içerisine nüfuziyeti gözlemlendi ve bu görsellerde sonuçlar bölümünde gösterilmektedir.

***FT-IR testi**

İnfrared spektroskopisi yöntemi, çok çeşitli organik, inorganik ve biyolojik numunelerin yapılarını açıklamak için kullanılan çok yönlü bir tekniktir (Turhan, 2008). IR spektroskopisinin temeli, numune tarafından salınan dalga boyunun bir fonksiyonu olarak emilen ışığın ölçülmesidir. IR ölçümleri transmitans veya reflektans olarak yapılabilmektedir ve transmitans olan daha yaygındır. IR ışığının dalga boyu aralığı 0,78-1000 μmdir (12500-10 cm^{-1} dalga sayısı). Bu aralık yakın (12500-4000 cm-1), orta (4000-100 cm-1) ve uzak (100-10 cm-1) infrared şeklinde bölünür. En çok kullanılan aralık yakın ve orta IR bölgesidir (Turhan, 2008).

Kovalent bağlar titreştikleri zaman, atomları birbirlerine bağlayan minik yaylar gibi hareket ederler. Atomlar sadece belirli frekanslarda, bu frekanslara ayarlanmış gibi titreşim yapabilirler. Bu nedenle kovalent bağlı atomların sadece belli başlı titreşim düzeyleri vardır.

Bir IR spektrumunda belirli bir gerilme titreşiminin frekansı iki etkene bağlı olabilir. Bunlar bağlı atomların kütleleri (hafif atomlar ağır olanlara kıyasla daha yüksek frekansta titreşirler) ve bağın bağıl sertliğidir. Üçlü bağlar ikili bağlara kıyasla daha serttir (ve daha yüksek frekansta titreşirler); ikili bağlar tekli bağlardan daha serttirler (ve daha yüksek frekansta titreşirler).

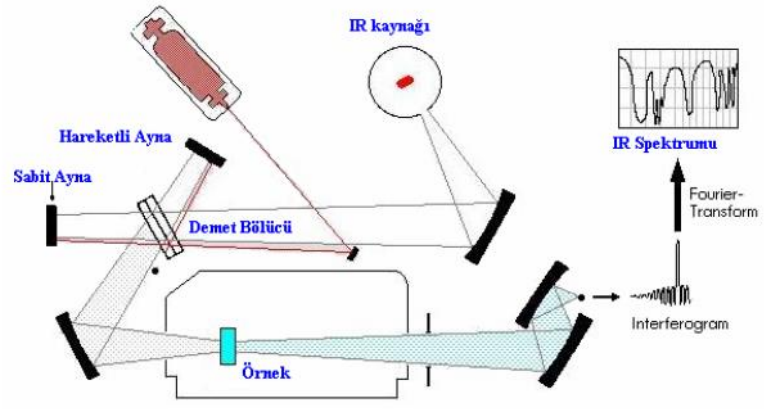
IR spektrumlarının çok fazla pik içermesi nedeniyle iki farklı bileşiğin aynı spektrumunun olması olasılığı oldukça düşüktür. Bir IR spektrumunun bir bileşiğin ‘parmak izi’ olduğunun söylenmesinin nedeni budur. Bu yüzden eğer IR spektrumları farklı iki saf organik bileşik varsa bunların farklı bileşik oldukları kesindir. Aynı IR spektrumunu veren bileşikler birbirinin aynısıdır (Solomons ve ark., 2002).

IR spektrumları sayesinde iki bilgi edilir. Birincisi, organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi verir. İkincisi de organik bileşiğin aynı

olup olmadığının anlaşılmasını sağlar. Bilinmeyen bir maddenin yapı tayini için IR spektrumunu değerlendirmek ve güvenilirliği fazla olan soğurma bantlarından, yapısındaki fonksiyonel grupların varlığına ya da yokluğuna karar vermek gerekir. İki bileşiğin spektrumlarının karşılaştırılması için bilinmeyen maddenin, her ikisinin IR spektrumlarının tamamen üst üste çakışabilir olup olmadığını belirlemek gerekir.

IR spektroskopisi moleküler yapıların açıklanmasında oldukça önemlidir. Poliatomik moleküllerin IR spektrumları, atomik kütlelerle ve bağ uzunluklarıyla ilişkili intra ve inter moleküler etkileşimlere özgü moleküler titreşimlerden kaynaklanır. Sonuç olarak organik bir bileşiğin IR spektrumu, izomerler de dahil olmak üzere diğer bileşiklerin IR absorpsiyonlarından ayrılabilen bir parmak izi gibi düşünülebilir. Eğer referans spektrum varsa çoğu bileşik, IR spektrumları yardımıyla tanınabilir. Hatta bir bileşiğin spesifik olarak belirlenmesi için karakteristik absorpsiyon bantları da kullanılabilir. IR'nin diğer spektroskopik tekniklere en önemli avantajı bütün bileşiklerin absorpsiyon göstermesi ve bu yüzden hem kalitatif hem de kantitatif analiz yapılabilmesidir (Turhan, 2008).

Fourier transform infrared cihazlarında monokromatör kullanılmaz. FT-IR spektroskopisinin IR spektroskopisine pek çok üstünlükleri vardır. Her dalga boyunu tek tek taramak gerekmediği için spektrum birkaç saniyede kaydedilir. Yarık veya prizma kullanılmadığı için duyarlılık değişmeden yüksek ayırmalı bir spektrum elde edilir. Sonuç olarak, hız ve duyarlılık açısından FT-IR spektroskopisinin belirgin bir üstünlüğü vardır. Diğer taraftan spektrum dijital bir şekilde kayıt edildiğinden bir karışımın analizinde bileşenlerden birinin spektrum verileri karışımın spektrum verilerinden çıkarılarak diğer bileşenleri spektrum verileri elde edilebilir (Erdik, 1998). Şekil 4.32'de FT-IR test cihazının çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.32. FT-IR spektrometresi şeması

Fourier Transform infrared cihazının geliştirilmesi neticesinde infrared spektroskopisinde bir devrim olmuştur. FT-IR spektroskopisi katı, sıvı ve gaz örnekleri için önemli kalitatif ve aynı zamanda kantitatif bilgiler vermektedir. Bu noktada IR'nin kantitatif amaçlar için kullanımının son yıllarda geliştiği ve arttığı söylenebilir.

Bu çalışmada, takviyeli epoksi ve saf epoksi reçineler, şartlandırma ortamlarına bırakıldıktan sonra, farklı şartlandırma ortamlarının reçineler üzerine etkisini ve şartlandırma zamanının reçine üzerine etkisini tespit etmek için FT-IR testi kullanıldı. 2 farklı reçine deiyonize su, tuzlu su, H_2SO_4 ve HCl ortamlarına bırakılarak 30 gün boyunca şartlandırıldı. Bu şartlandırma esnasında 1, 24, 168 ve 720. Saatlerde FT-IR numuneleri alındı. Numuneler eğe ve zımpara yardımıyla toz haline getirilerek teste uygun hale getirildi. Numune görüntüsü şekil 4.33'de gösterilmektedir. Fourier Dönüşümü Infrared (FTIR) spektrum ölçümleri, BRUKER-Vertex 70 spektro fotometre ile gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler 500 ile 4000 cm^{-1} arasında, oda sıcaklığında ve 2 cm^{-1} hassasiyetinde yapılmıştır. Analiz sonuçları FT-IR testlerinin sonuçları bölümünde grafikler ve tablolar halinde gösterilmektedir.



Şekil 4.33. FT-IR numuneleri

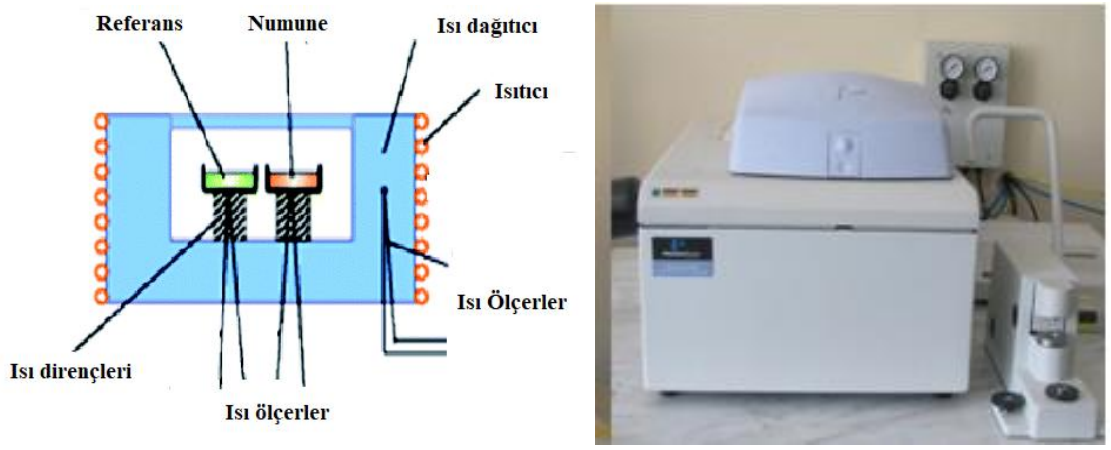
*** DSC testi**

Kalorimetre deneysel olarak ısı değişiminin ölçümü demektir. Fiziksel ve kimyasal reaksiyonların çoğu ısı salınımı ya da emilimi gösterdiği için kalorimetrik yöntemler bu tür ısı farklılıklarını ölçmek için kullanılan yöntemlerdir (Weyer ve ark., 2001). İki yüz yılı aşkın süredir kullanılmakta olan kalori ölçüm yöntemleri günümüzde çok daha hızlı ve hassas bir yöntem haline gelmiştir. DSC (differantial scanning calorimetry) cihazı bu anlamda kullanılan önemli cihazlardan birisidir. DSC yöntemi,

belirli bir hızla ısıtılan bir numunenin ısı akışının zamana bağlı olarak takip edildiği bir ısıl analiz yöntemi olarak tanımlanabilir (Lee ve Lee, 1995).

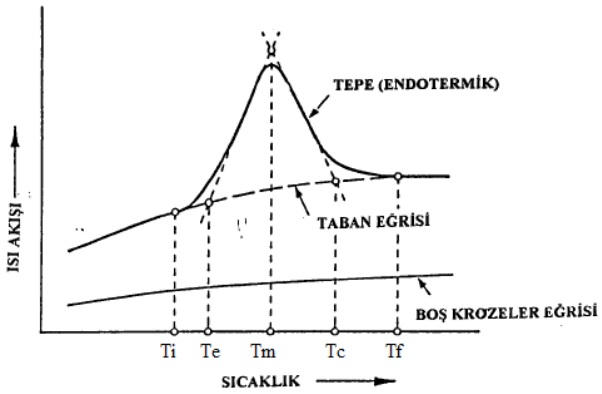
DSC cihazları ısı akışlı ve güç dengelemeli olmak üzere iki farklı prensibe göre çalışırlar. Her iki yöntemde de diferansiyel yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, ölçüm yapılan büyüklüğün değerinin, bu değerden farklı olduğu bilinen aynı türden bir başka değerle karşılaştırılması şeklinde uygulanır. Diferansiyel yöntemin en önemli avantajı dışardan gelen bozucu etkilerin her iki sistemi de ortak etkilemesi neticesinde oluşan farklarında aynı olması şeklinde ortaya çıkar. DSC dinamik bir y0öntem olduğu için sabit hızda ısıtma veya soğutma uygulanabilir. Ayrıca DSC ile ölçümü yapılan değişim ısı akış hızıyla orantılı olduğundan her hangi bir fiziksel geçişin zamana göre değişimi belirlenebilir (Du Pasquier ve ark., 1998).

Isı akışlı DSC sistemleri, tür olarak ısı değişim kalorimetreleri sınıfındadır. Bu cihazlarda örnek ve referans maddeleri arasındaki sıcaklık farkı ölçülür ve bu fark ısı akış hızıyla orantılı olduğundan faz geçişi ya da reaksiyon bölgelerinde endotermik veya ekzotermik tepeler olarak gözlemlenir. Bu yöntemle ölçüm yapan DSC cihazları, disk tipi sistemler veya silindirik tip sistemler olarak iki sınıfta toplanabilir. Şekil 4.34' de disk tipi bir DSC cihazının çalışma prensibi ve ölçüm yapılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 4.34. Disk tipi DSC cihazı

DSC eğrilerinde numunelerin erime, buharlaşma, polimerin camsı geçiş sıcaklıkları gibi olaylar, endotermik, ekzotermik, kristallenme, bozunma, oksidasyon gözlemlenir. Şekil 4.35.'de bazı önemli noktalar ve eğriler görülmektedir.



Şekil 4.35. (Durmuş, 2001)

Burada T_i sıcaklığı sıcaklık farkının başladığı başlangıç sıcaklığı, T_e sıcaklığı, tepenin ilk bölgesindeki eğimle doğrusal olduğu kısmın kesişme noktası (onset sıcaklığı), T_m, maksimum sıcaklık, T_c tepenin ikinci bölgeye doğrusal olduğu kısmın kesişme noktası, T_f ise tepe son sıcaklığı olarak tanımlanabilir.

Bu çalışmada, takviyeli epoksi ve saf epoksi reçineler, şartlandırma ortamlarına bırakıldıktan sonra, farklı şartlandırma ortamlarının reçineler üzerine etkisini ve şartlandırma zamanının reçine üzerine etkisini tespit etmek için DSC testi kullanıldı. 2 farklı reçine Deiyonize su, tuzlu su, H_2SO_4 ve HCl ortamlarına bırakılarak 30 gün boyunca şartlandırıldı. Bu şartlandırma esnasında 1, 24, 168 ve 720 saatlerde DSC numuneleri alındı. Numuneler gravür yardımıyla 1-2 mm'lik partiküller şeklinde alınarak testler gerçekleştirildi. Numune görüntüsü şekil 4.36'da gösterilmektedir. DSC ölçümleri, Perkin Elmer Instruments cihazı ile yapılmıştır. Test sıcaklığı 25˚C'den 400˚C'ye kadar 20˚C/dakika ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı ve özgül ısı kapasitesi de 20 ml/dakika azot akışı koşulları altında belirlenmiştir. Analiz sonuçları DSC testlerinin sonuçları bölümünde grafikler ve tablolar halinde gösterilmektedir.

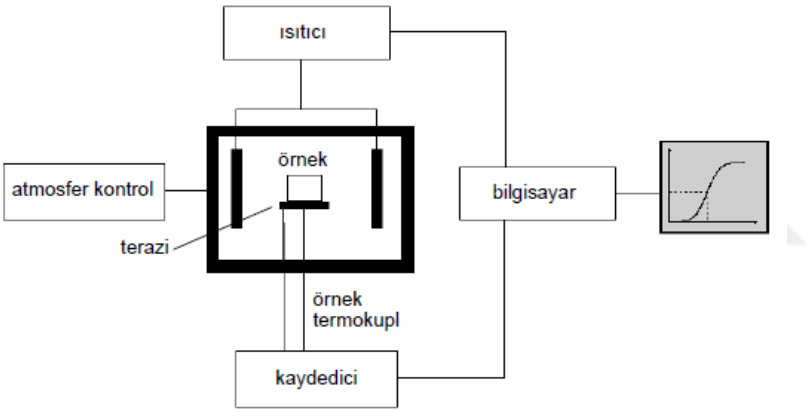


Şekil 4.36. DSC numuneleri

*** TGA testi**

Termogravimetrik bir analizde, numune sıcaklığı oda sıcaklığından başlayarak 1200 ˚C ‘ye kadar ulaşabilen sıcaklıklara (uygulanan deney metoduna bağlı olarak) kadar ısıtılırken ağırlığı sürekli takip edilir. Kütlenin sıcaklığa göre değişimi şeklinde çizilen grafiğe termogram adı verilip ve kalitatif/kantitatif tayinlerde sıkça kullanılır.

Termogravimetrik analiz cihazında, hassas bir analitik terazi, bir fırın, bir fırın sıcaklığı kontrol edici ve programlayıcı ve bir de kaydedici bulunur. Kaydedici, numune ağırlığının sıcaklığa karşı grafiğini çizer. İnert bir atmosfer (azot veya argon vb. ortamlar) gerektiği hallerde bunu sağlayacak yardımcı sistemlere de gereksinim olabilir. TGA yardımıyla numunelerin saflığı, bozunma davranışı ve kimyasal kinetiği incelenir. Şekil 4.37’de laboratuvarlarda kullanılmakta olan bir TGA cihazının çalışma prensibinin şematik görüntüsü gösterilmektedir (Skoog ve ark., 2017).

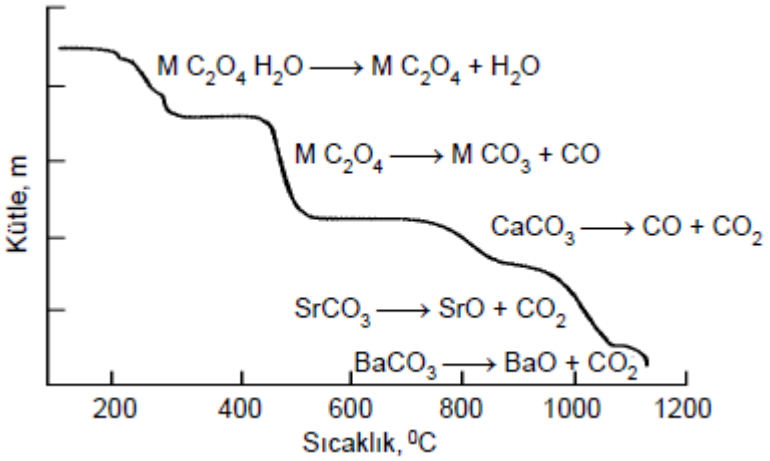


Şekil 4.37. DSC numuneleri

Termogravimetrik sistemlerde Cahn elektromanyetik terazisi kullanılmaktadır. Numune, D'Arsonval galvanometre sarımına bağlı olan bir kol üzerine koyulur. Numune kültesindeki değişim, ışının normal konumundan sapmasına neden olur ve bu sapma fotoelektrik olarak algılanır. Böylece oluşan fotoakım yükseltilir ve ışını tekrar eski konumuna getirecek bir yönde galvanometre sarımına beslenir. Yükseltilen akım aynı zamanda kaydedici bir kalemin konumunu da belirler. Bu yöntemle çalışan ve en fazla 2.5 g ve 100 g örneğin kullanılabildiği iki tip terazi vardır. Bunlardan 2.5 g ‘lık olanının kullanım alanı daha fazladır. 200 mg veya daha az miktardaki külte değişimi %0,1 rölatif hassasiyet ile saptanabilir.

Termogravimetrik bir cihazın fırını, sıcaklığı önceden belirlenen bir hızla (0.5-25 ˚C/dk. gibi) doğrusal olarak yükseltilecek şekilde programlanır. Cihazların çoğu, ortam sıcaklığından 1200 ˚C ‘ye kadar çalışabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Sıcaklık numuneye en yakın noktada bulunan bir termokupl ile izlenir. Terazinin ısınmaması için fırının dış kısmı izolasyonlu ve soğutma ceketlidir.

Termogravimetrik yöntemlerin en önemli uygulamaları polimerlerdir. Çeşitli polimerik maddelerin bozunma mekanizmaları, termogramlardan alınan bilgilerle açıklanabilir. Ayrıca her tip polimer için karakteristik olan bozunma davranışlarından polimerlerin teşhisinde yararlanılır. Şekil 4.38’de bir TGA testi neticesinde elde edilen örnek bir termogram gösterilmektedir.

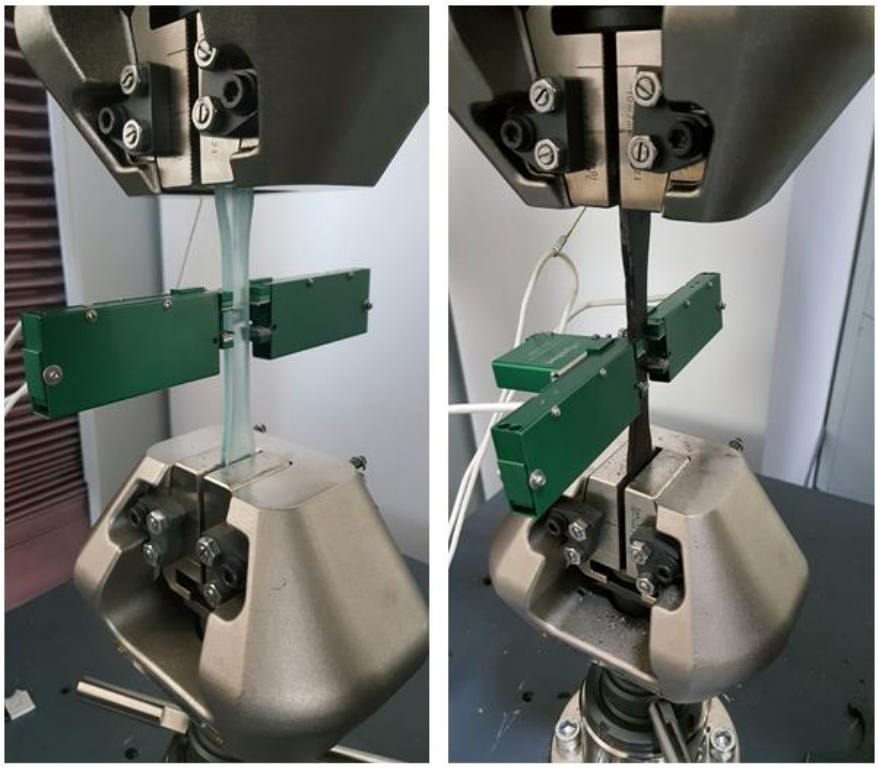


Şekil 4.38. Örnek termogram

Bu çalışmada, takviyeli epoksi ve saf epoksi reçineler, şartlandırma ortamlarına bırakıldıktan sonra, farklı şartlandırma ortamlarının reçineler üzerine etkisini, ve şartlandırma zamanının reçine üzerine etkisini tespit etmek için DSC testi kullanıldı. 2 farklı reçine deiyonize su, tuzlu su, H_2SO_4 ve HCl ortamlarına bırakılarak 30 gün boyunca şartlandırıldı. Bu şartlandırma esnasında 1, 24, 168 ve 720 saatlerde TGA numuneleri alındı. Numuneler gravür yardımıyla 1-2 mm’lik partiküller şeklinde alınarak testler gerçekleştirildi. TGA ölçümleri, Perkin Elmer Instruments cihazı ile yapılmıştır. Test sıcaklığı 25˚C’den 400˚C’ye kadar 20˚C/dakika ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı ve özgül ısı kapasitesi de 20 ml/dakika azot akışı koşulları altında belirlenmiştir. Analiz sonuçları TGA testlerinin sonuçları bölümünde grafikler ve tablolar halinde gösterilmektedir.

*** Çekme testi**

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetlerini belirlemeden önce, yapıştırma için kullanılan reçinenin ve şartlandırma ortamlarının reçinenin mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için çekme testleri yapılmıştır. Çekme deneyleri ASTM D638 standardına uygun olarak 10000 N kapasiteli Shımadzu AGS-X (şekil 3.76) cihazında 2mm/dk. çekme hızında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup numunelerin uzamaları Epsilon ekstansometre ile ölçülmüştür. Her bir parametre için deneyler üç kez tekrar edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda numunelerin, maksimum gerilme, % uzama, statik tokluk, şekil değiştirme ve elastisite modülü değerleri belirlenmiştir. Saf ve takviyeli epoksi için çekme testi görüntüleri şekil 4.39'da gösterilmektedir.

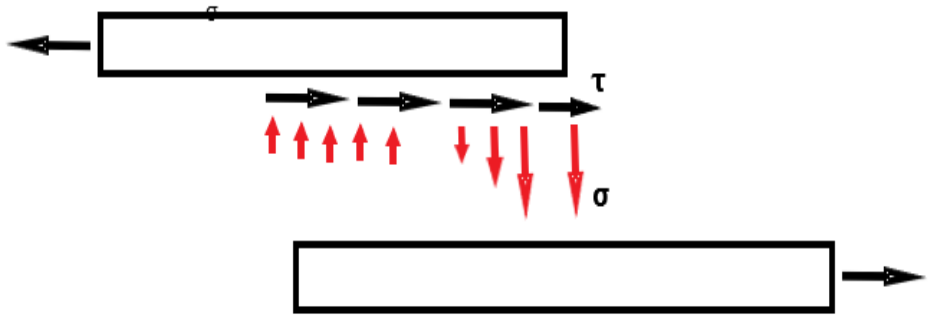


Şekil 4.39. Çekme testi görüntüleri

*** SLJ testi**

Yapıştırıcı bağlantıların dayanımı, bağlantı içerisindeki gerilme dağılımına bağlıdır. Gerilme dağılımı ise bağlantının geometrisi ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Soyulma ve makaslama gibi bazı gerilmeler minimize edilebilirken kayma ve basma gibi gerilmeler ise maksimum olur. Şekil 4.40'da gösterildiği gibi tek taraflı bindirmeli bağlantıyla ilişkili sorunlardan biri üst üste binme uçlarındaki gerilme dağılımının (kayma ve soyulma)

yoğunlaşmasıdır. Yükleme durumunda, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyinde üst üstte bindirme uzunluğunda kayma gerilmesi (τ) yapıştırma boyunca oluşurken, üst üstte bindirme uzunluğunda dönmeden dolayı oluşan soyulma gerilmesi bağlantının uç kısmında maksimum çekme gerilmesi, bağlantının diğer uçunda ise basma gerilmesi oluşur. Soyulma (çekme-basma) gerilmesi yapıştırma bağlantısının merkezinde sıfırlanmaktadır (Ekrem, 2015)



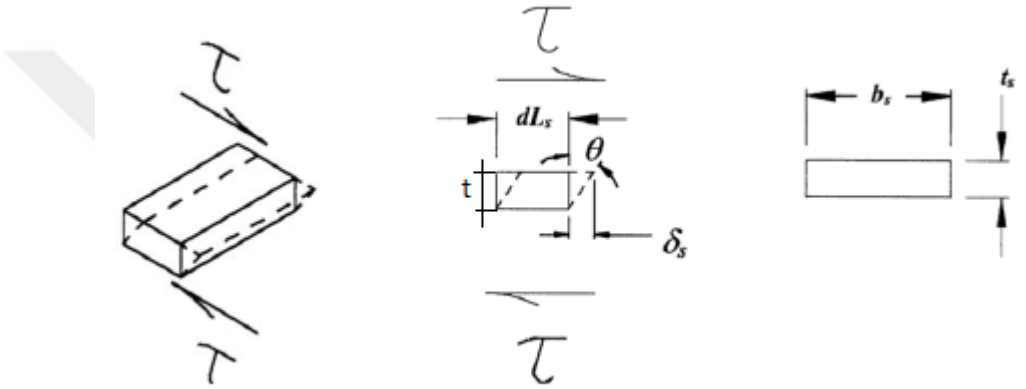
Şekil 4.40. Tek taraflı bindirmeli bağlantılarda gerilme dağılımları

Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantılarında kayma gerilmesini ve kayma modülünün bulunabilmesi için ASTM D1002-10 standardına uygun olarak kayma deneyleri yapılmıştır. Kayma deneyleri 10000 N kapasiteli Shımadzu AGS-X (şekil 4.41) cihazında 1mm/dk. çekme hızında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup numunelerin uzamaları Şekil 4.41'de gösterildiği gibi epsilom ekstansometre ile ölçülmüştür.



Şekil 4.41. SLJ testi görüntüleri

Basit lineer elastik analiz, pratikte en yaygın bağlantılardan biri olan tek taraflı bindirmeli bağlantılarının analizinde ve hesaplamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu analizde yapıştırıcının, sadece kayma yönünde deforme olduğu ve yapıştırılan malzemelerin ise rijit olduğu kabul edilir. Soyulma ve eğilme gerilmeleri ihmal edilir. Şekil 4.42'de gösterildiği gibi, yapıştırıcının kayma gerilmesi (τ), üst üste binme uzunluğu boyunca sabittir ve $\tau = P/ b.l$ formülü ile hesaplanır (Owens ve Lee-Sullivan, 2000). Burada P uygulanan kuvvet, b bağlantının genişliği, l ise bağlantı uzunluğudur. Kayma gerilmesi değeri, yapıştırıcı tabaka üzerinde etkili olan ortalama kayma gerilmesi olarak değerlendirilebilir. Yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi şekil 4.42'de gösterilmektedir.



Şekil 4.42. Kayma yer değiştirmesi (Ekrem, 2015)

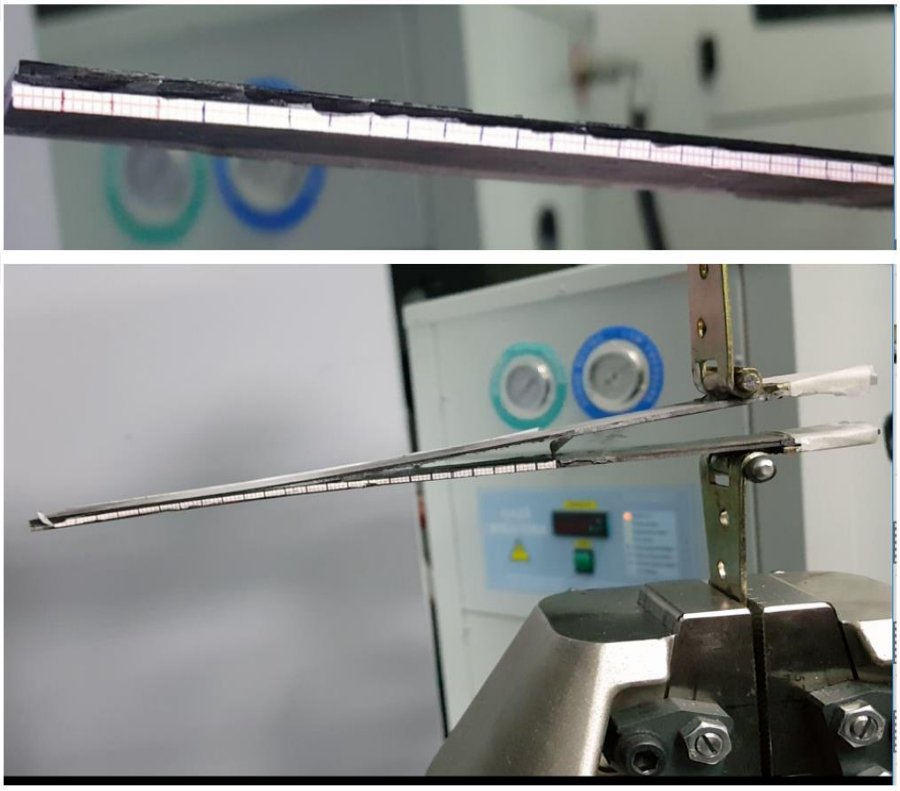
Şekil 4.42'de görüldüğü üzere yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi δs olarak elde edilebilir ($\gamma = \tan\theta = \delta_s / t_s$). Burada γ, kayma birim şekil değiştirmesi, θ kayma düzlemi nedeniyle oluşan kayma açısı, δs kayma düzlemine göre yapıştırıcının eksenel yer değiştirmesi ve ts ise yapıştırıcının kalınlığıdır. Elastik şekil değişimi, kayma gerilmesi ve kayma modülü içinde $\gamma = \tau /G$, $\tau = P/ A_{kayma}$ ve $\delta_s = \tau . (t_s/G)$ denklemleri kullanılabilir. Burada τ, yapıştırıcının kayma gerilmesi, G yapıştırıcının kayma modülü A_{kayma} yapıştırıcının kayma alanı ve P yapıştırılan malzemeye uygulanan çekme kuvvetidir. Bu yöntem dışında Volkersen yöntemi, Goland ve Reissner yöntemi, Adams ve Peppiat yöntemi, Hart-Smith yöntemi, Crocombe ve Bigwood yöntemi de gerilme analizleri için kullanılan çeşitli yöntemlerdir.

Her bir mekanik deney 5 kez tekrar edilmiştir. Deneyler neticesinde maksimum kuvvet, uzama tespit edilmiş, bu veriler yardımıyla, maksimum kayma gerilmesi, birim şekil değiştirme, kayma modülü, statik tokluk değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen

sonuçlar grafikler ve tablolar halinde SLJ (kayma testi) sonuçları bölümünde verilerek yorumlanmıştır. Kırık yüzeyleri hasar analizleri gözle, optik mikroskopla ve sem analizi ile incelenerek mekanik test sonuçlarıyla ortak olarak değerlendirilip SLJ testi sonuçları bölümünde görüntülerle beraber verilmiştir.

*** DCB testi**

Bu tez çalışmasında farklı şartlandırma ortamlarının ve nano partikül takviyesinin alüminyum ve kompozit bağlantıların kırılma tokluğu değerlerine etkisini tespit etmek için çift konsol kiriş (Mod I) testleri yapılmıştır. DCB (çift konsol kiriş) testi ASTM D3433-99 standardına göre Shımadzu AGS-X (şekil 4.43) cihazında 3 mm/dk. çekme hızında, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

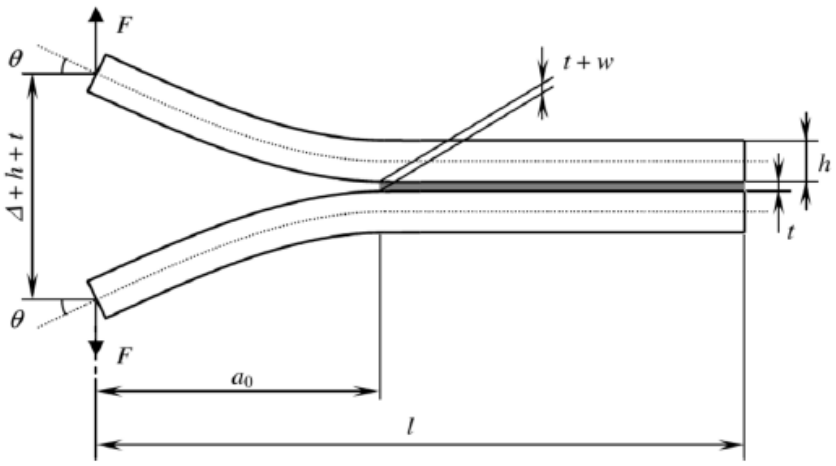


Şekil 4.43. DCB testi görüntüleri

Kenarları milimetrik kağıtlarla kaplanan numuneler deney esnasında video ile de kaydedilerek çatlak ilerlemeleri kaydedilmiştir. Deney neticesinde, sabit yer değiştirme durumunda iki tabaka arasındaki çatlağın ilerlemesi sırasında sabit genişlikli bir numunedeki kritik enerji olarak tanımlanan kritik kırılma tokluğu (G_{IC}) değerleri hesaplanmıştır. G_{IC} denklem 3.1'e göre hesaplanır. Birimi J/m^2 dür.

$$G_{IC} = \frac{4F^2max}{Eb^2} \cdot \left(\frac{3a^2 + h^2}{h^3}\right) \quad \text{..... 3.1}$$

Denklemde F_{max} maksimum yük (N); E, yapıştırılan malzemenin elastikiyet modülü (MPa); b, numunenin genişliği (mm); a, çatlak uzunluğu (mm); h, yapıştırılan malzemenin kalınlığı (mm) dir (Şekil 4.44).



Şekil 4.44. DCB numunesi ölçüleri

Her bir parametre için beşer tane çift konsol kiriş numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Test sonrasında kuvvet- çatlak ilerlemesi, kritik kırılma tokluğu çatlak ilerlemesi grafikleri çizilip hasar yüzeyleri ile birlikte yorumlanarak DCB (çift konsol kiriş testi sonuçları) bölümünde verilmektedir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde kütle değişimi sonuçları, FT-IR testi sonuçları, DSC testi sonuçları, TGA testi sonuçları, Çekme, SLJ ve DCB testi sonuçları grafikler ve tablolar halinde verilerek yorumlanmaktadır. Mekanik deneylerin hasar yüzeyleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobuyla incelenerek mekanik deneyler ile aralarında bağlantı kurularak verilmektedir. Birbirleriyle ilişkili deneyler arasında bağlantı kurularak ilgili bölümlerde detaylı bir şekilde verilmektedir. Elde edilen bulgular literatürde bulunan çalışmalarla kıyaslanarak ilgili bölümlerde gösterilmektedir.

5.1. Kütle değişimi sonuçları

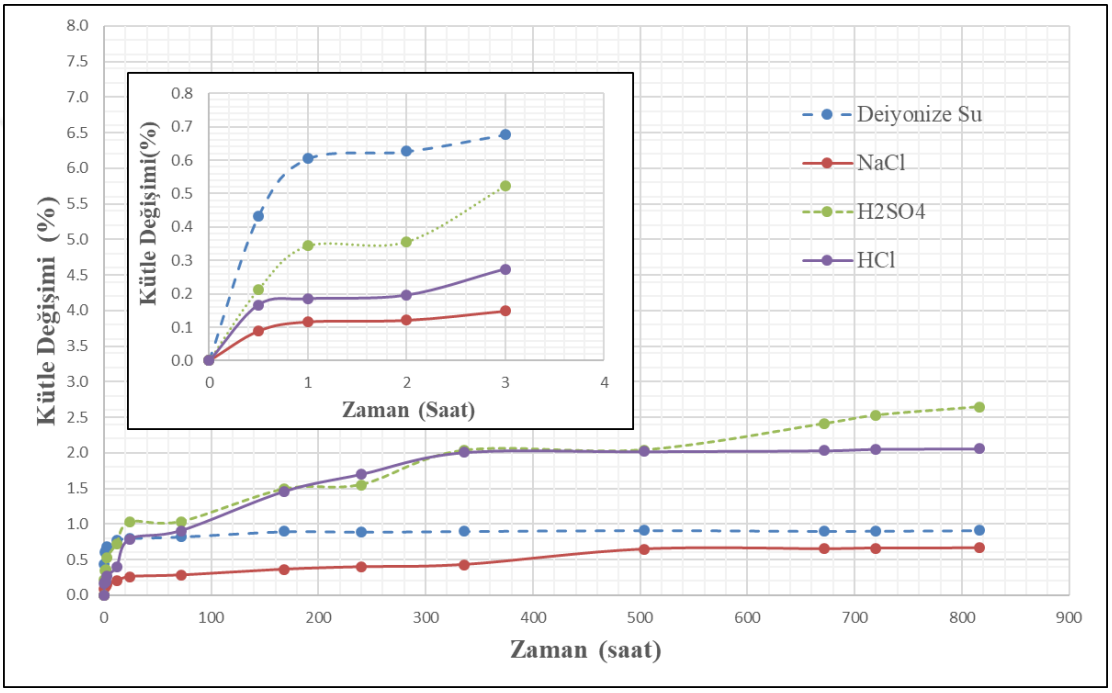
Bu bölümde saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin 4 farklı ortamda şartlandırılması sonucundaki kütle değişimi sonuçları gösterilmektedir.

Şekil 5.1'de saf epoksi reçinelerin deiyonize su, NaCl, H_2SO_4 ve HCl ortamlarında şartlandırılması ile ortaya çıkan kütle değişimleri gösterilmektedir. Şekil 5.1'e bakıldığında deiyonize su ve NaCl çözeltisi ortamlarında şartlandırılan numunelerin 24 saat içerisinde ortamla dengeye geldiği ve sıvı absorpsiyonunu tamamladığı görülmektedir. Deiyonize su ortamında şartlandırılan numunede %0,7 artış olurken, NaCl ortamındaki numunede %0,3'lük bir artış görülmektedir. NaCl ortamındaki numunede sıvı absorpsiyonunun daha az çıkmasının sebebi, reçine içerisine nüfuz eden tuz kristallerinin sıvı emilimini zorlaştırmasıdır (Merah ve ark., 2010). Bu durum numunelerin sem görüntülerinde (çekme numuneleri sonuçları bölümünde) görülmektedir. Tuz kristallerinin yüzeye tutunması (Park ve ark., 2016) tarafından yapılan çalışmada bildirilmektedir.

HCl ortamında şartlandırılan numunelere bakıldığında, ilk 100 saat içerisinde sıvı emiliminin sınırlı olduğu fakat 100 saatten sonra sıvı emiliminin artarak % 2 seviyelerine kadar çıktığı görülmektedir. 300 saatlik şartlandırmanın ardından sıvı emiliminin durduğu ve kütlenin değişmediği görülmektedir. HCl ortamında şartlandırılan numunelerin kütle artışının fazla olması, epoksi reçinenin HCl asit ortamına duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. FT-IR testi sonuçlarına bakıldığında, epoksi reçineni zinciri içerisindeki bazı yapıların HCl ortamı ile etkileşime girerek

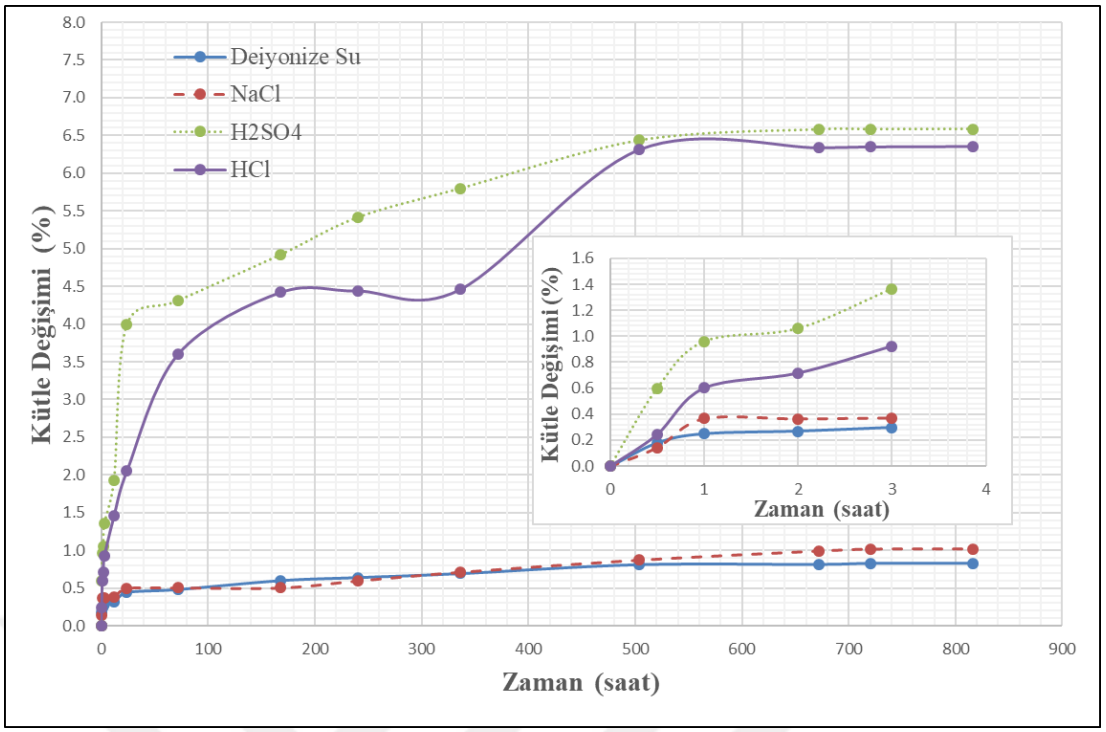
polimer zincirinin oksitlendiği ve bazı yapıların çözüldüğü görülmektedir. Bu durum sıvı emilimini artırmaktadır.

H_2SO_4 çözeltisi ortamına bakıldığında 500 saate kadar HCl ortamında şartlandırılan numunelerle benzer bir karakteristik gösterdiği görülmektedir. 500 saatten sonra % 2,5 seviyesine kadar sıvı emilimi devam etmektedir. Dolayısıyla en çok sıvı emilimi bu ortamda görülmektedir. Diğer deneylerin sonuçlarıyla da kıyaslandığında en fazla tahribatın sülfirik asit ortamında şartlandırılan numunelerde görülmesi, bu ölçümleri destekler niteliktedir.



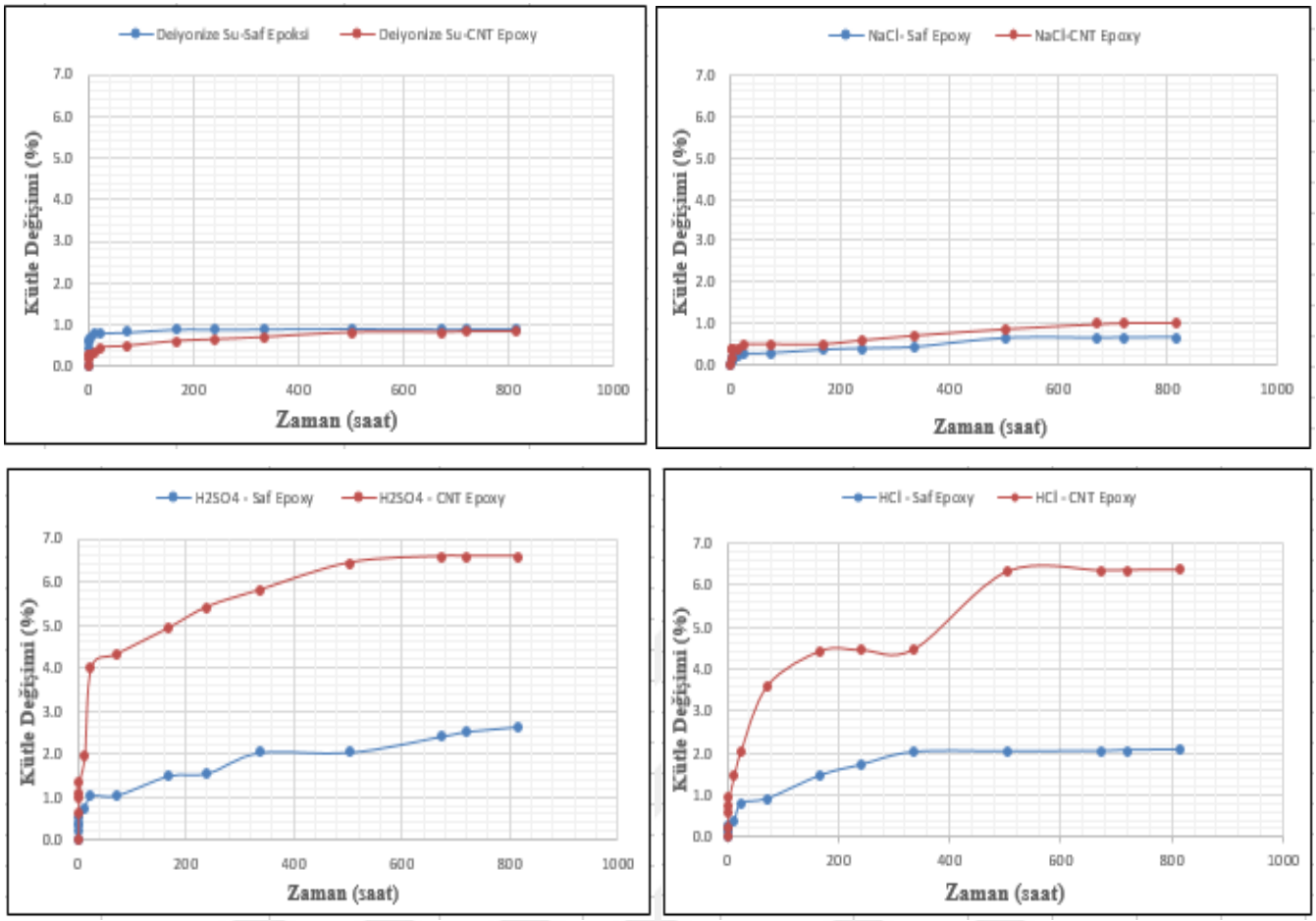
Şekil 5.1. Saf epoksi reçinenin 4 farklı ortamdaki kütle değişimleri

Şekil 4.2'de ÇCKNT partikülleri ile takviye edilen epoksi reçinelerin deiyonize su, NaCl, H_2SO_4 ve HCl ortamlarında şartlandırılması ile ortaya çıkan kütle değişimleri gösterilmektedir. Şekil 5.2'ye bakıldığında deiyonize su ve NaCl ortamlarında şartlandırılan numunelerin benzer bir karakteristik gösterdikleri ve ilk 10 saatte %0,5 seviyesine kadar sıvı absorbe ederek ortamla dengeye geldikleri görülmektedir. HCl ortamındaki numunelere bakıldığında 500 saate kadar sıvı emiliminin devam ettiği ve 500 saatten sonra %6,4 seviyesinde sabitlenmektedir. H_2SO_4 ortamındaki numuneye bakıldığında ise çok daha hızlı bir emilim gerçekleştiği ve yine 500 saatlerde %6,5 seviyesinde sabitlendiği görülmektedir.



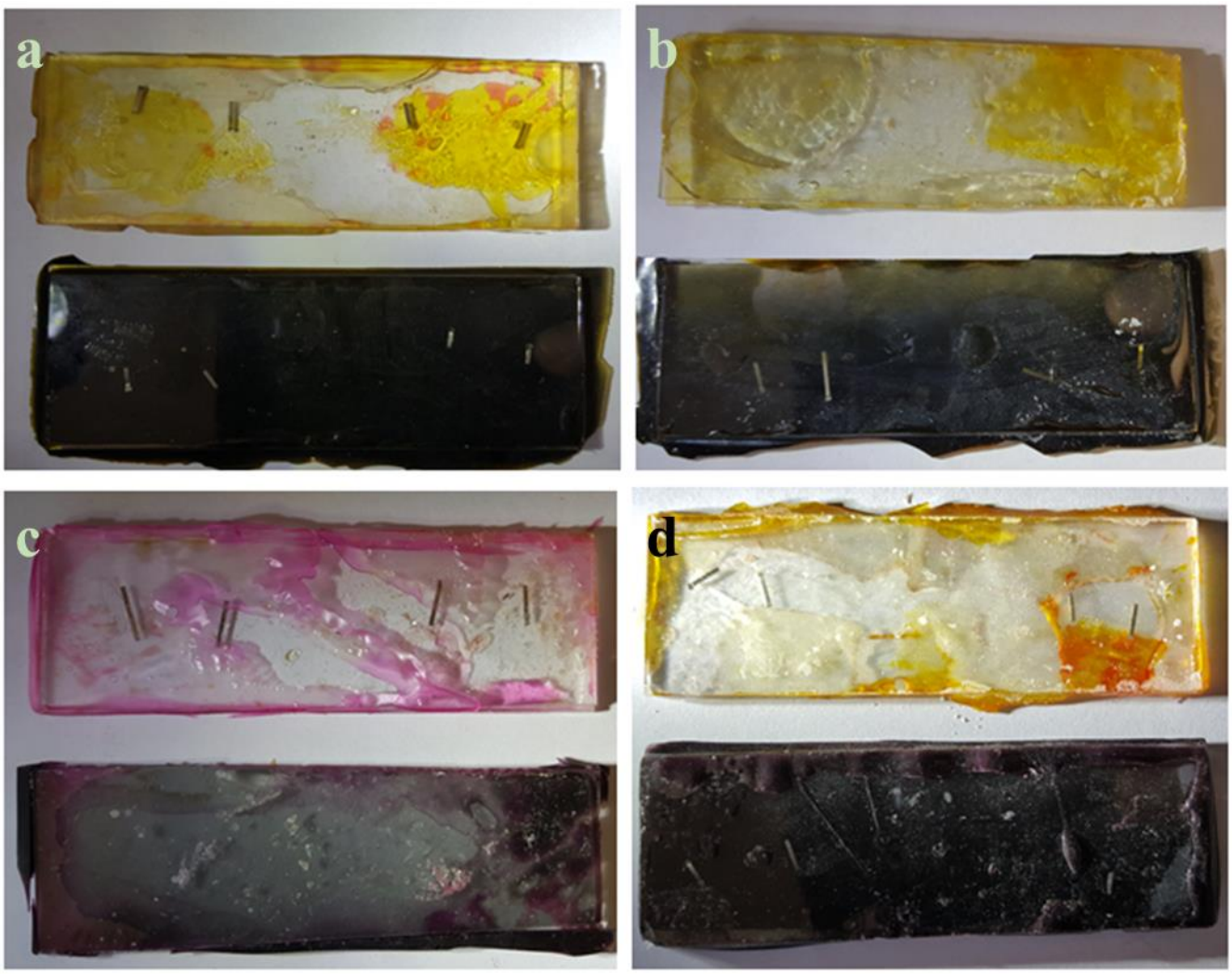
Şekil 5.2. ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin 4 farklı ortamdaki kütle değişimleri

Şekil 5.3'de saf ve ÇCKNT takviyeli numunelerin 4 farklı ortamda şartlandırılarak ölçülen kütle değişimi grafikleri gösterilmektedir. Grafiklerde şartlandırılma ortamları sabit tutularak iki farklı reçinenin kütle değişimleri birbirleri ile kıyaslanmaktadır. Deiyonize su ortamına bakıldığında sıvı emiliminin 2 kat azaldığı, NaCl ortamında şartlandırılan numunelerin ise 2 kat arttığı görülmektedir. Sülfirik asit ortamında şartlandırılan numunelerde 3 kata yakın, hidroklorik asit ortamında şartlandırılan numunelerde ise 3 kattan fazla artış olduğu görülmektedir. Deiyonize su ortamı dışında sıvı emiliminin artması, ÇCKNT partiküllerinin ortam ile etkileşime girdiğini ve epoksi reçinenin zincir yapısını ve çapraz bağ yoğunluğunu etkilediğini göstermektedir. Özellikle asidik ortamlarda sıvı emiliminin fazla artması, ÇCKNT partiküllerinin asidik ortamlarda fonksiyonelleşerek bulunduğu yerde nano ve mikro gözenekler oluşturması sebebiyledir. Bu gözenekler şartlandırılan ortamdaki çözeltinin iç bölgelere kadar nüfuziyetini kolaylaştırmaktadır. Bu durumlar mekanik test sonuçlarındaki SEM görüntülerinde ve FT-IR testleri sonuçlarında detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 5.3. İki farklı reçinenin aynı ortamdaki kütle değişimlerinin kıyaslanması

Şekil 5.4'de şartlandırılan numunelere, şartlandırma ortamının nüfuziyeti gösterilmektedir. Şekil 5.4 a'da deiyonize su ortamındaki numune, b'de NaCl ortamındaki numune, c'de H_2SO_4 ortamındaki numune, d'de ise HCl ortamındaki numune gösterilmektedir. Numuneler incelendiğinde 30 gün sonunda şartlandırma ortamının numunenin tüm yönlerden merkeze kadar geldiği görülmektedir. Bu durum şartlandırma süresinin doğru olarak belirlendiğinin bir göstergesidir. Numune kalınlıklarının mekanik testlerde kullanılan numunelerle aynı seçilmesi, seçilen süresinin sadece bu numuneler için değil, yapıştırılan numuneler için de uygun olacağının bir göstergesidir.

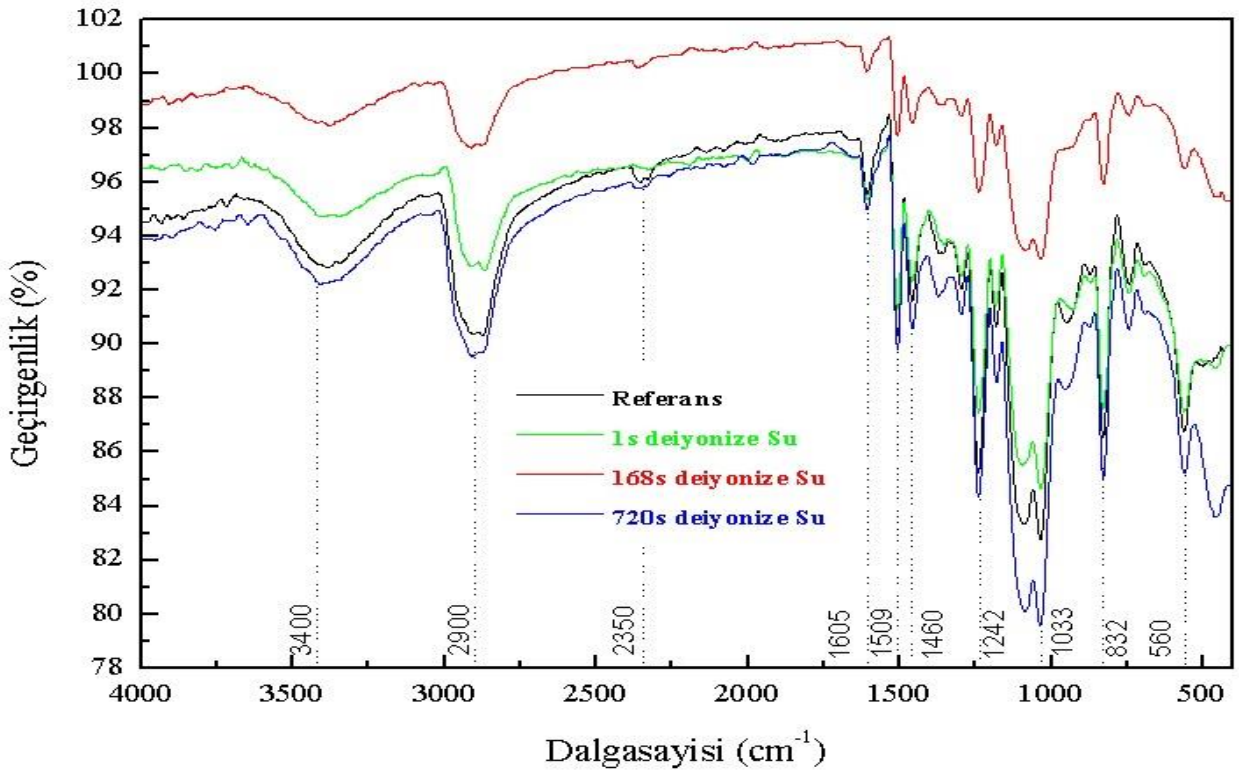


Şekil 5.4. Şartlandırma ortamlarının numune içerisine nüfuziyeti **a-**deiyonize su ortamındaki numune, **b-** NaCl ortamındaki numune, **c-** H_2SO_4 ortamındaki numune, **d-** HCl ortamındaki numune

5.2. FT-IR sonuçları

Bu bölümde saf epoksi ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin 4 farklı zaman aralığında ve 3 farklı ortamda şartlandırılması neticesinde elde edilen FT-IR spektrumları gösterilerek birbirleriyle kıyaslanmıştır. Grafiklerdeki piklerin 4000-1500 cm^{-1} arasında olduğu bölgeler fonksiyonel bölgeler, 1500-800 cm^{-1} arasında olan pikler ise parmak izi bölgesi pikler olarak adlandırılır (Karabulut, 2017).

Şekil 5.5'de deiyonize su ortamında 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış olan epoksi reçinenin ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin FT-IR spektrumu gösterilmektedir.



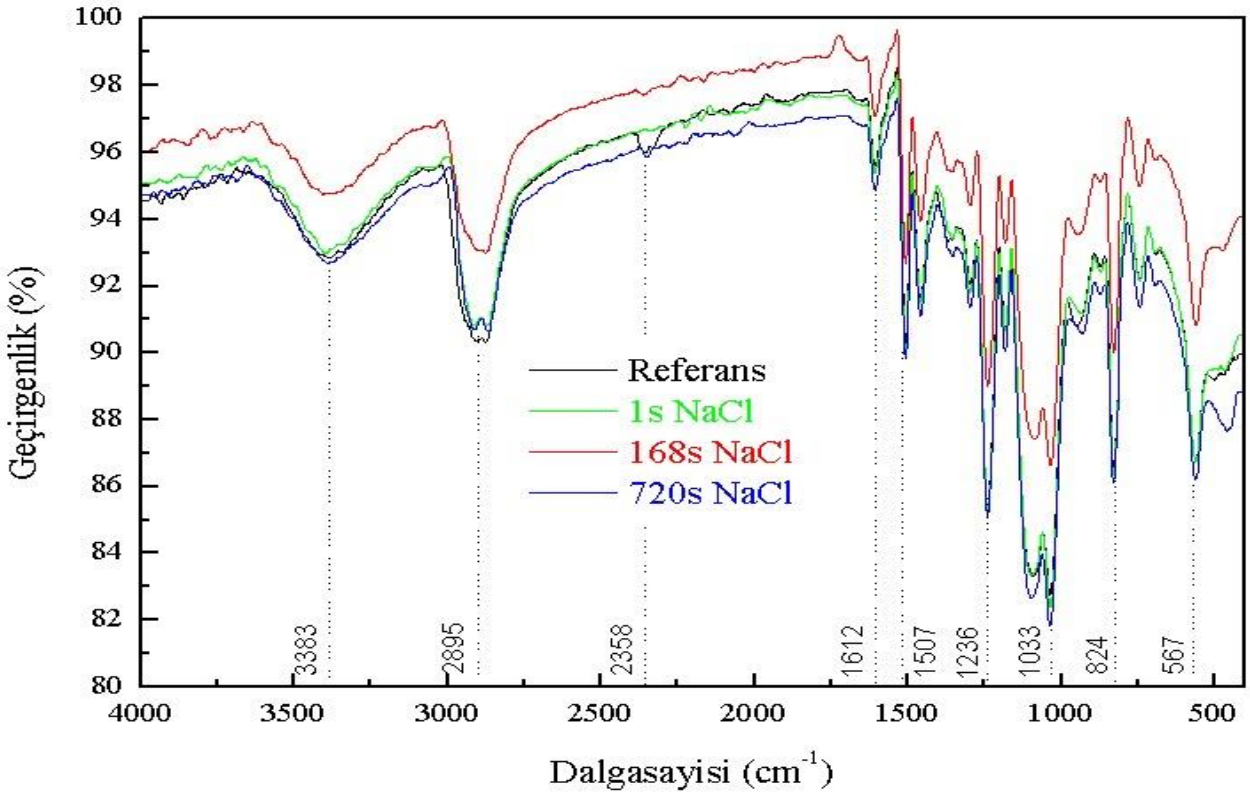
Şekil 5.5. Deiyonize su ortamında şartlandırılan saf epoksi numunelerin FT-IR spektrumları

Fonksiyonel bölgedeki 3400 cm^{-1} bandında yer alan pikler -OH bağına aittir (Yazman, 2018) (Fan ve Li, 2014) Bu reaksiyon, A ve B epoksi zincirleri içerisindeki kimyasal gruplar olmak üzere, ~A – B~ + H_2O → ~A – OH + ~ B - H şeklinde gerçekleşir. Suya maruz kalan epoksi gruplarının bir kısmı -OH ile diğer kısmı ise -H ile bağlanır (Jojibabu ve ark., 2017). 3200 ile 3600 cm^{-1} bölgelerinin farklı oksidasyon bölgeleri içerdiği bildirilmektedir (Fan ve Li, 2014). Şekil 5.5' deki 3200-3600 cm^{-1} bölgesi incelendiğinde pik noktalarındaki küçük yer değiştirmeler, zamana bağlı olarak

farklı oksidasyon ürünlerinin oluştuğunun bir göstergesidir (Fan ve Li, 2014), (Delor-Jestin ve ark., 2006). 2900 cm^{-1} bölgesi C-H, CH_2 bağlarını ve simetriklerini göstermektedir (Yazman, 2018), (Fan ve Li, 2014), (Cholake ve ark., 2014) 720 saat şartlandırma neticesinde buradaki metil veya metilenlerin pik derinliklerinin artmasını epoksi içerisindeki metil ve metilen gruplarının oksitlenmesinin ve epoksi içerisinde absorbe edilmiş olan suyun varlığının göstergesidir (Zhang ve ark., 2016). Ayrıca, 2923 (C-H) pikinin derinliği azalırken, 1730 cm^{-1} (C=O) pikinin oluşmaya başlaması, C-H bağlarının oksitlenmesinin ve yapıdaki aldehit, keton, ester veya asit yapılarının buharlaşarak form değiştirdiğinin bir göstergesidir ((Pei ve ark., 2011), (Wolfrum ve ark., 2009)

2350 cm^{-1} piki CO_2 bağına ait bir titreşimdir (González ve ark., 2012). Referans eğrisinde belirgin şekilde gözüken pik 1 saatten 720 saate gidildikçe azalmaktadır. Pik derinliğinin azalması bağ kuvvetinin azaldığının bir göstergesidir. 720 saat şartlandırılma neticesinde ortaya çıkan 1644 cm^{-1} piki de, oksidasyon göstergesidir (Barbosa ve ark., 2017). 1644 cm^{-1} piki suyun polimer zincirine saldırması ile bağ yoğunluğunun artmasına sebep olması ile ortaya çıkmıştır. 1605 cm^{-1} piki C=C bağlarına ait bir titreşimdir. Bu bağın şiddetinin referans eğrisine kıyasla 168 saate doğru azaldığı ve 720 saatte arttığı gözlemlenmektedir.(Lin ve ark., 2006).1509 cm^{-1} pikleri aromatik halkalardaki C-C bağına aittir. Burada da 720 saate doğru piklerin derinleştiği görülmektedir. Epoksi içerisindeki bu bölge pik noktalarının derinliklerinin değişmesi, fonksiyonel grupların modifiye edildiğinin bir göstergesidir (Carrasco ve ark., 2005). Yapıdaki 1460 cm^{-1} piki de C-C benzen gruplarına aittir ve buradaki derinleşme de 1509 cm^{-1} pikinde ki değişimleri desteklemektedir (Fan ve Li, 2014) . 1242 cm^{-1} piki C-C-O-C bağına 1033 cm^{-1} ise eter gruplarında yer alan C-O-C yapısına aittir (sırasıyla alkilaril simetrik bağ gerilmesi ve dialkil eter titreşim gerilmesi (Karabulut, 2017), (Bouvet ve ark., 2017). Her iki titreşimin de 720 saate doğru gidildikçe piklerinin derinleştiği görülmektedir. Ayrıca bu pikler şartlandırma zamanı arttıkça soldan sağa doğru çok hafif kaymaktadır. Bu durum bağ kuvvetlerinin nispeten zayıfladığının bir göstergesidir (Bouvet ve ark., 2017). 1140 cm^{-1} bölgesindeki pikler C-N bağına aittir ve bu pikin derinleşmesi şartlandırma neticesinde gerçekleşmektedir (Barbosa ve ark., 2017). 832 cm^{-1} piki aromatik bölgedeki hidrojenlerin eğilme titreşimlerinin göstergesidir (Yazman, 2018), (Jojibabu ve ark., 2017). Buradaki pik yoğunluğunun da zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Bu durumun şartlandırma ile alakalı olduğu (Jojibabu ve ark., 2017) tarafından yapılan çalışmada da bildirilmiştir.

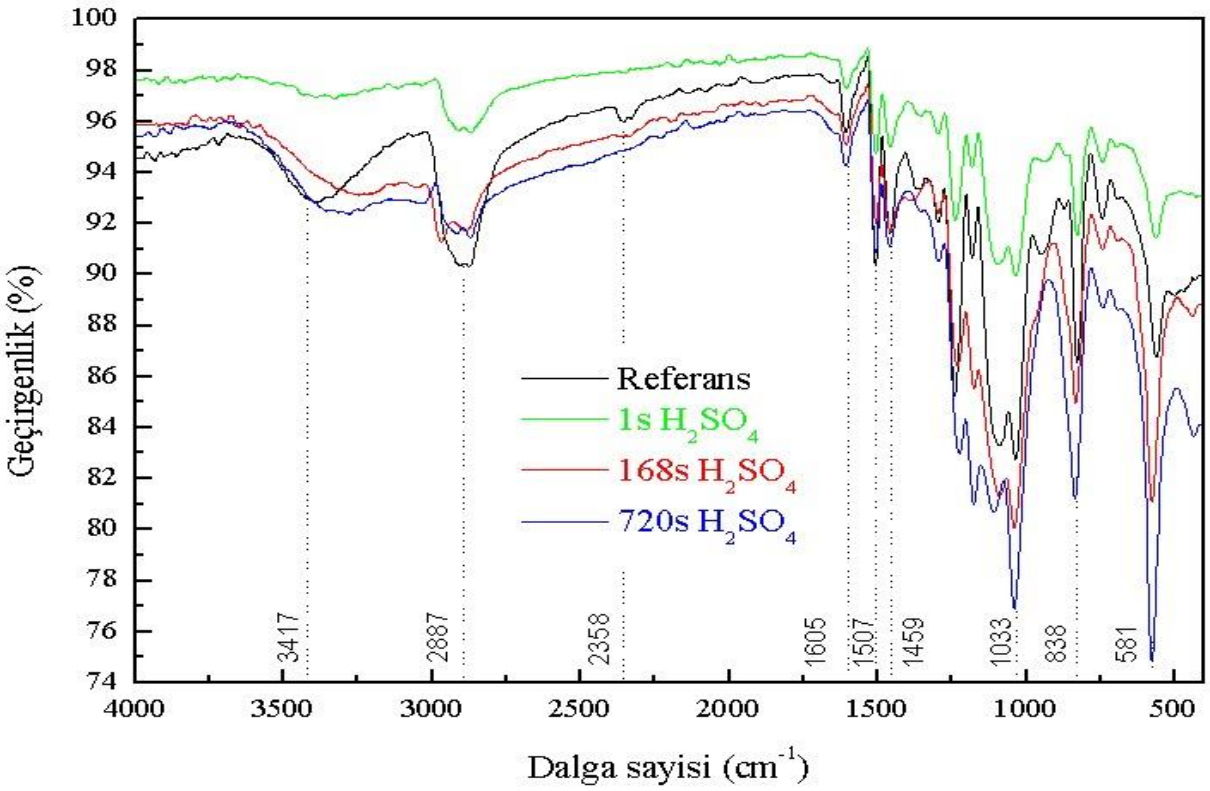
Şekil 5.6'da NaCl çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış olan epoksi reçinenin ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. 3340 ile 3500 cm^{-1} dalga sayısında oluşan hidroksil grupları NaCl ortamında şartlandırılmış numunelerde de gözlemlenmektedir fakat deiyonize su ortamındaki kaymalar burada gözlemlenmemektedir ve hidroksil pikleri üst üste çakışıktır. Referans eğrisinde 2350 cm^{-1} de gözlemlenen CO_2 piki şartlandırma zamanına bağlı olarak kaybolmaktadır. 1644 cm^{-1} dalga boyunda, şartlandırma ortamının polimer zinciriyle etkileşimi neticesinde ortaya çıkan oksidasyon pikleri burada biraz daha belirgin hale gelmiştir. 1507 cm^{-1} C-C bağlarının derinliğinde deiyonize suya kıyasla artış olduğu gözlemlenmektedir. 1236 cm^{-1} pikinde gözlemlenen C-C-O-C bağının pik derinliğinde artış olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.6. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi numunelerin FT-IR spektrumları

Deiyonize su ortamında 832 cm^{-1} de gözlemlenen H pikleri yerine 824 cm^{-1} pikler oluşmuştur. Bu pikler NaCl içerisindeki Cl' un C ile bağ yapması neticesinde oluştuğu düşünülmektedir. 600 cm^{-1} bandı ise C-H bağına aittir ve buradaki pik derinlikleri de artmaktadır.

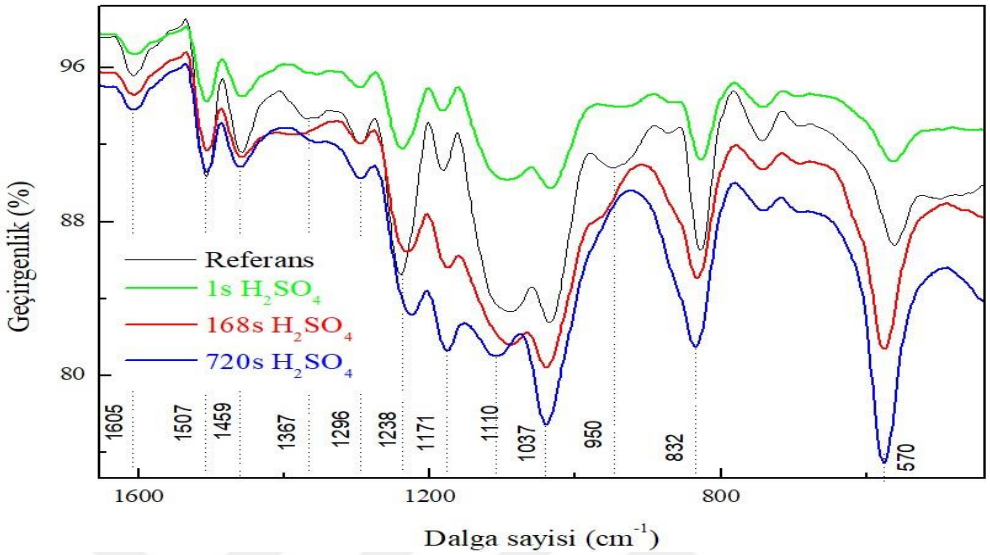
Şekil 5.7'de H_2SO_4 çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Deiyonize su ve NaCl çözeltileri ile karşılaştırıldığında 3400 cm^{-1} bandında çakışık bir şekilde oluşan -OH bağlarında kaymalar gözlemlenmektedir. -OH yapısını temsil eden piklerin sağa doğru kayması, bu yapıların bağ kuvvetinin azaldığının bir göstergesidir. Referans eğrisinde 3400 dolaylarında net bir şekilde gözlemlenen -OH piki, şartlandırma zamanının artmasıyla düzgün bir şekilde sağa doğru kayma ve pik derinliği azalmaktadır. 2900 cm^{-1} bandında gözlemlenen CH ve CH_2 bağlarının derinlikleri de referans eğrisinde oldukça fazlayken, şartlandırma süresi arttıkça azalmaktadır. Bu sebeple asidik ortamın C-H ve CH_2 yapılarını tahrip ederek bağ kuvvetini azalttığı söylenebilir. NaCl ve Deiyonize su ortamlarında olduğu gibi, sülfirik asit ortamında da 2358 cm^{-1} CO_2 yapısı, şartlandırma etkisi neticesinde kaybolmaktadır.



Şekil 5.7. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi numunelerin FT-IR spektrumları

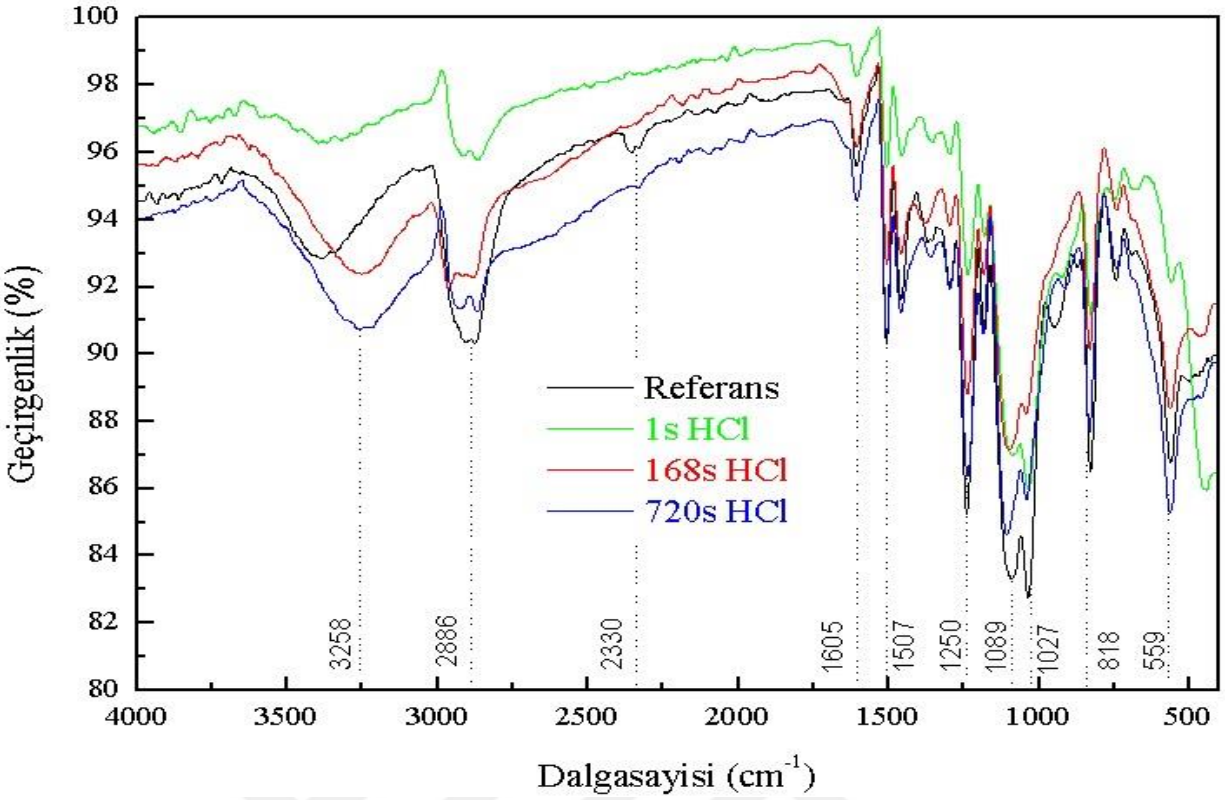
Sülfirik asit içerisinde bulunan kükürt 1171 ve 1078 cm^{-1} dalga sayısında epoksi polimer zincirindeki oksijen ile O=S=O bağının asimetrik ve simetrik titreşimleri görülmektedir. Bu bağlar referans eğrisi ve şartlandırmanın ilk zamanlarında 1090 cm^{-1} dalga sayısında gözlemlenirken, 168 saatlik numunede ve 720 saatlik numunede de pik

1071 cm^{-1} bölgesine yaklaşmaktadır. Şekil 5.8'de detay görüntüsü gösterilen bu durum epoksi reçinenin ortamdaki sülfirik asit ile reaksiyona girerek sülfirik asit içerisindeki kükürtü bağladığını ve epoksinin içerisindeki bağların tahrip olduğunu göstermektedir.



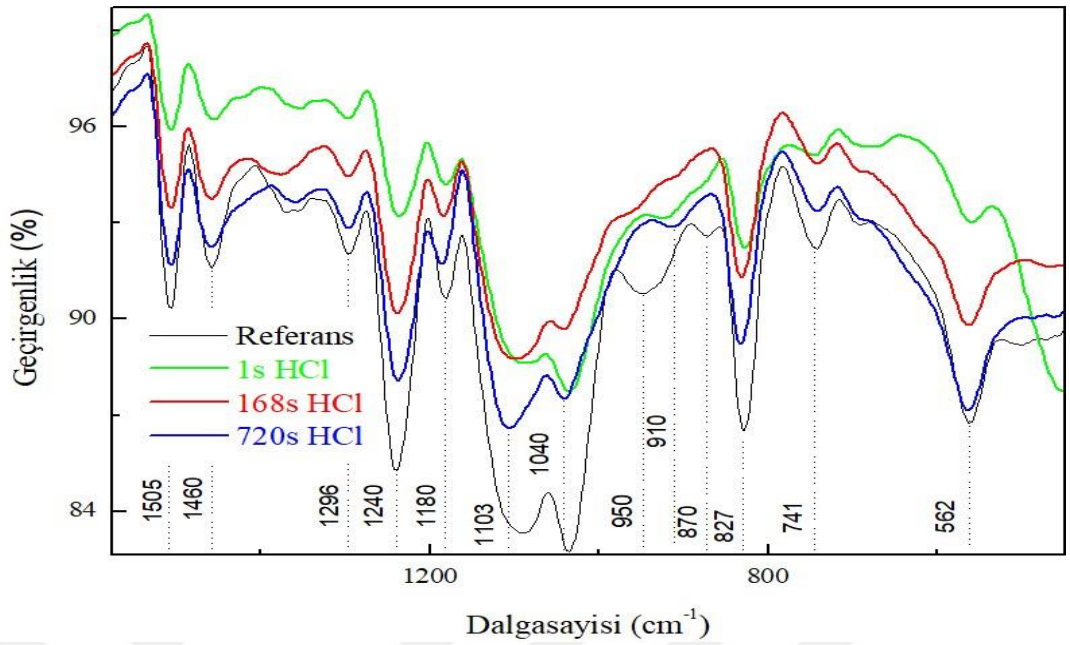
Şekil 5.8. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi numunelerin FT-IR spektrumlarının detaylı görüntüsü

Şekil 5.9'da HCl çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Spektrum eğrileri incelendiğinde 3400 cm^{-1} bandında gözlemlenen -OH pikinin, 1 saatlik kısa şartlandırma neticesinde bile derinliğini kaybettiği görülmektedir. 168 saat ve 720 saat ile birlikte -OH piki sağa doğru kayarak 3258 cm^{-1} bandına gelmiştir. Burada ki piklerin sağa doğru kayması, -OH bağlarının zayıfladığının bir göstergesidir (Bouvet ve ark., 2017). 2900 cm^{-1} dalga sayısında oluşan CH ve CH_2 bağlarını gösteren pik derinliklerinin şartlandırma süresine bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Pik derinliklerinin azalması bu bağların da zayıfladığının bir göstergesidir. 2330 cm^{-1} dalga sayısında oluşan CO_2 yapısı bu şartlandırma ortamında da kaybolmuş fakat 720 saatlik şartlandırma neticesinde pik derinliği daha az olmak üzere yeniden oluşmaya başlamıştır. 1605 cm^{-1} de oluşan C=C bağlarının derinliğinin 1 saat sonunda azaldığı, 1 saatten sonra arttığı görülmektedir.



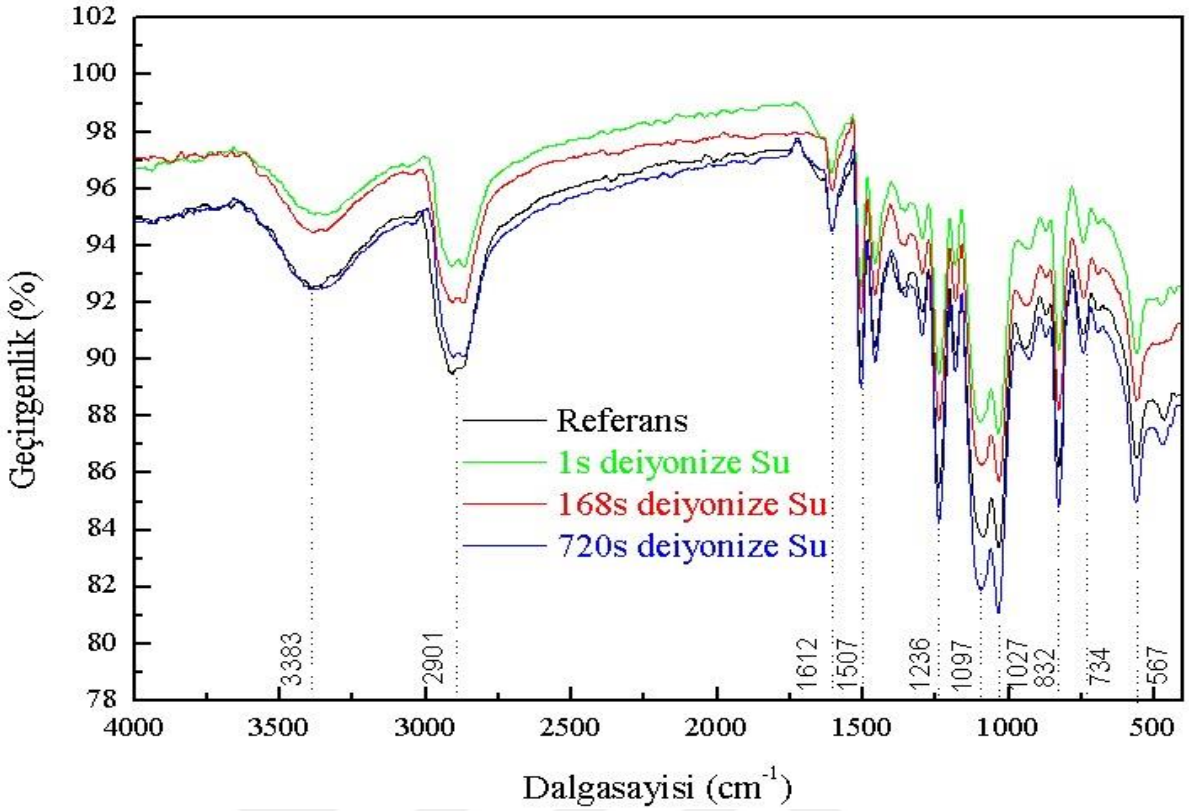
Şekil 5.9. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi numunelerin FT-IR spektrumları

Şekil 5.10'da, şekil 5.9'da gösterilen spektrumun parmak izi bölgesi detaylı bir şekilde görülmektedir. Aromatik halkaların pik derinlikleri (1509 cm^{-1}) şartlandırma neticesinde azalmaktadır. C-C bağlarının bu ortamdan etkilendiği söylenebilir. 1460 cm^{-1} de görülen pik derinliği azalması da bu durumu desteklemektedir. 1240 cm^{-1} bandında görülen pik derinliği azalmasının oksitlenme ürünleri oldukları düşünülmektedir (Bouvet ve ark., 2017; Karabulut, 2017). $CH=CH_2$ bağlarını temsil eden 910 cm^{-1} piki referans numunesinde gözlemlenirken, şartlandırılmış numunelerin tamamında kaybolmuştur. Referans eğrisinde gözlemlenen 870 cm^{-1} piki de şartlandırma neticesinde kaybolmuştur. Epoksinin karakteristik piklerinden olan 826 cm^{-1} pikinin şiddetinin de şartlandırma etkisi ile azaldığı görülmektedir. 750 -850 cm^{-1} bandındaki pik derinliği değişimlerinin epoksi reçinenin HCl içerisinde bulunan klor ile etkileşime girmesi neticesinde oluşabileceği düşünülmektedir.

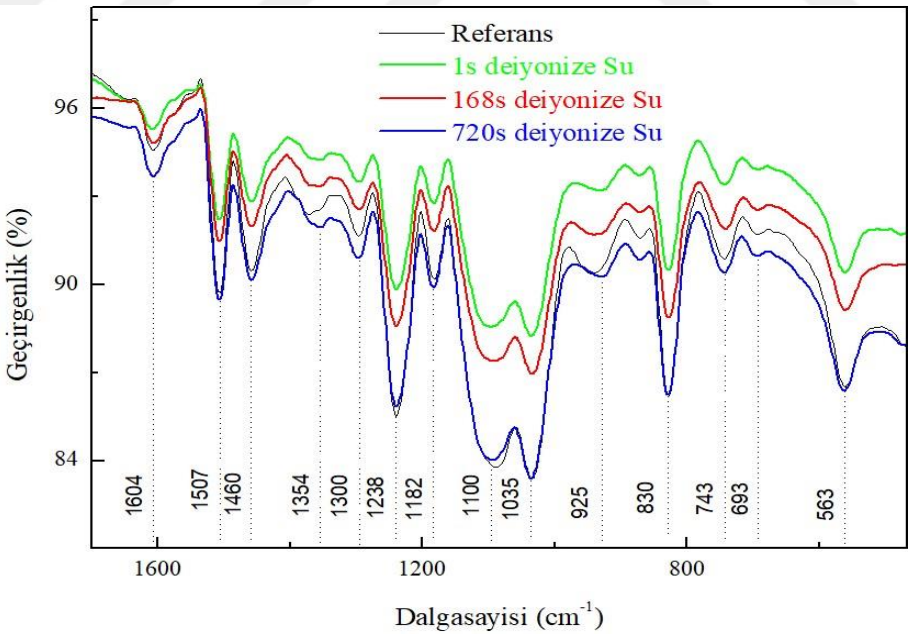


Şekil 5.10. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi numunelerin FT-IR spektrumlarının detaylı görüntüsü

Şekil 5.11'de deiyonize su içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin FT-IR spektrumu şekil 5.12 'de de bu spektrumun parmak izi bölgesinin detaylı görünümü gösterilmektedir. Spektrum ve parmak izi bölgesi görüntüleri incelendiğinde yeni bir pik oluşumu gözlemlenmemektedir. 2901 cm^{-1} bandında gözlemlenen CH, CH_2 bağlarının, reçinenin ilk zamanlarda gösterdiği hızlı sıvı absorpsiyonu neticesinde oksitlenerek pik derinliklerinin azaldığı, artan zaman neticesinde sıvı absorpsiyonunun sabitlenmesiyle de referans eğrisine yakın noktaya geldiği söylenebilir. ÇCKNT takviyesinin deiyonize su içerisindeki takviyeli epoksinin kimyasal davranışı üzerine kimyasal olarak çok fazla etkisinin olmadığı söylenebilir.



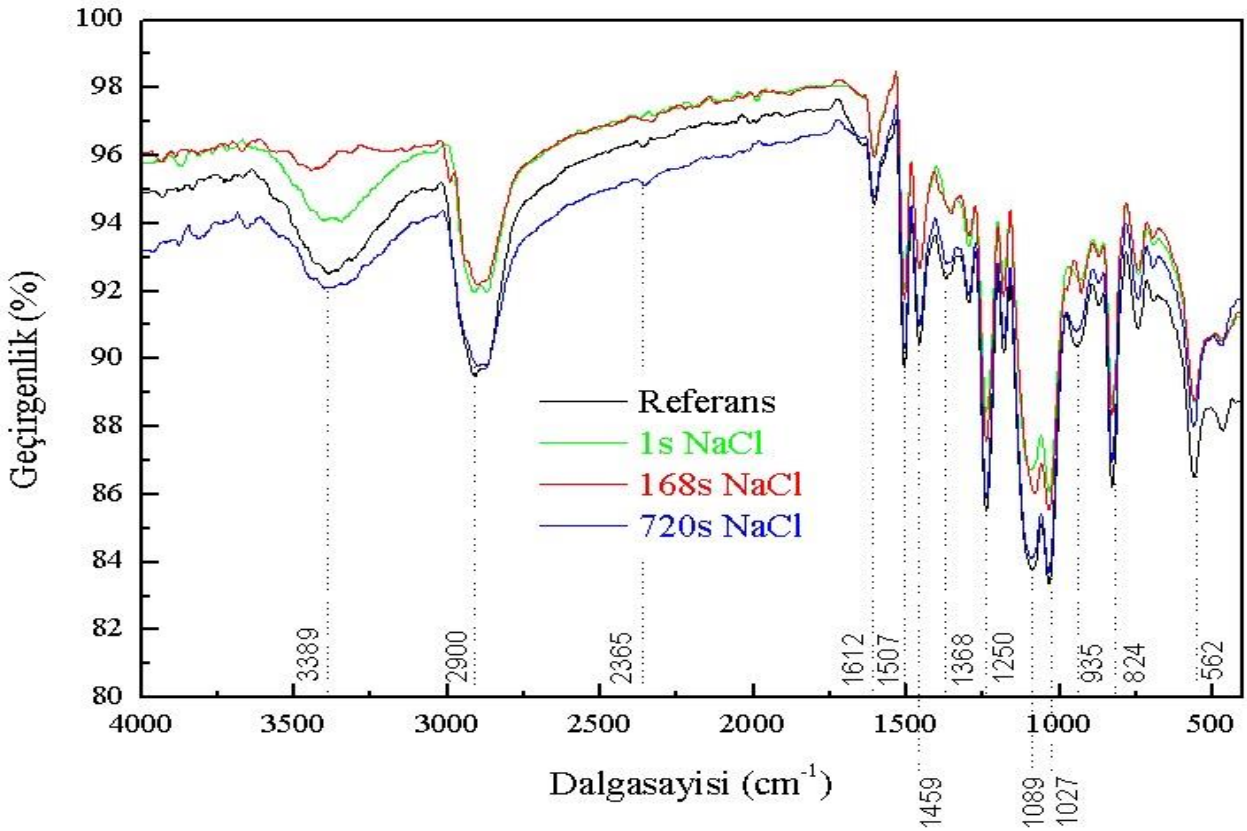
Şekil 5.11. Deiyonize su ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumları



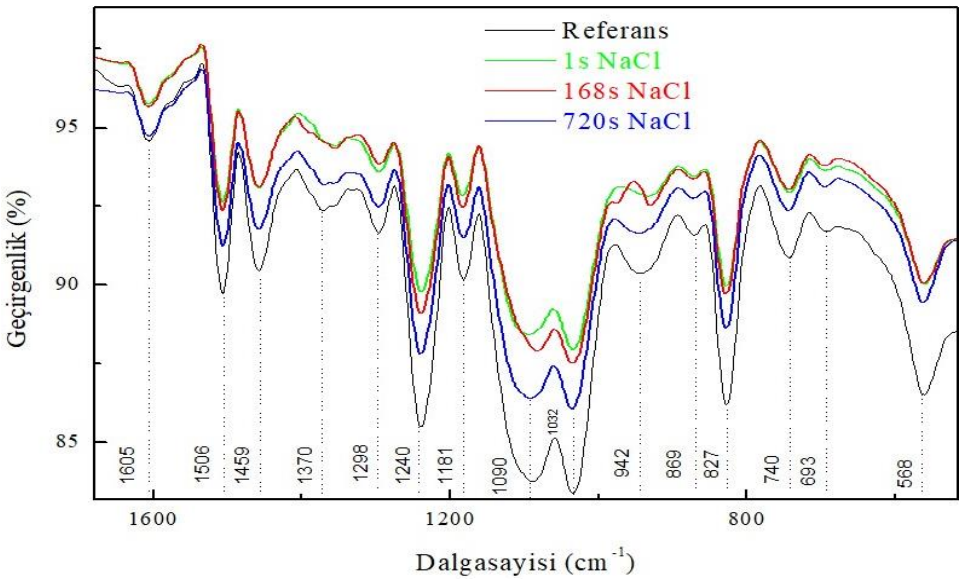
Şekil 5.12. Deiyonize su ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumlarının detaylı görünümü

Şekil 5.13'de NaCl çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin FT-IR

spektrumu şekil 5.14 ‘de de bu spektrumun parmak izi bölgesinin detaylı görünümü gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde fonksiyonel bölgedeki pik derinliklerinde ve yerlerinde dikkate değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Fakat Deiyonize su ortamına kıyasla ÇCKNT ün NaCl ortamına daha duyarlı olduğu söylenebilir. 1240 cm^{-1} pikinin derinliğinde azalma olması, C-C-O-C bağlarının etkileşime girdiğini ve bağ kuvvetinin azaldığını göstermektedir. 1090 ve 1032 cm^{-1} pik derinliklerinde de düşüş olduğu görülmektedir. 942 cm^{-1} de referans eğrisinde var olan pik derinlik olarak ve konum olarak değişmiştir. 827 ve 562 cm^{-1} pik derinliklerinde de düşüş gözlemlenmektedir.

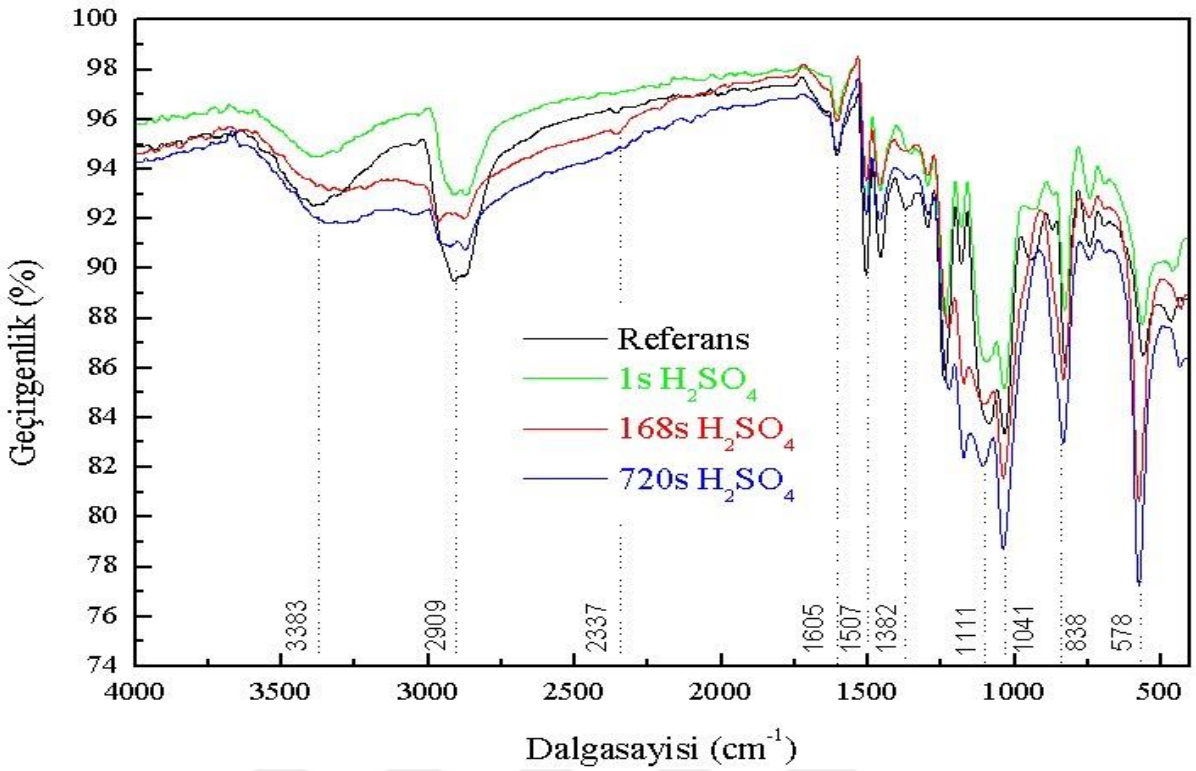


Şekil 5.13. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumları

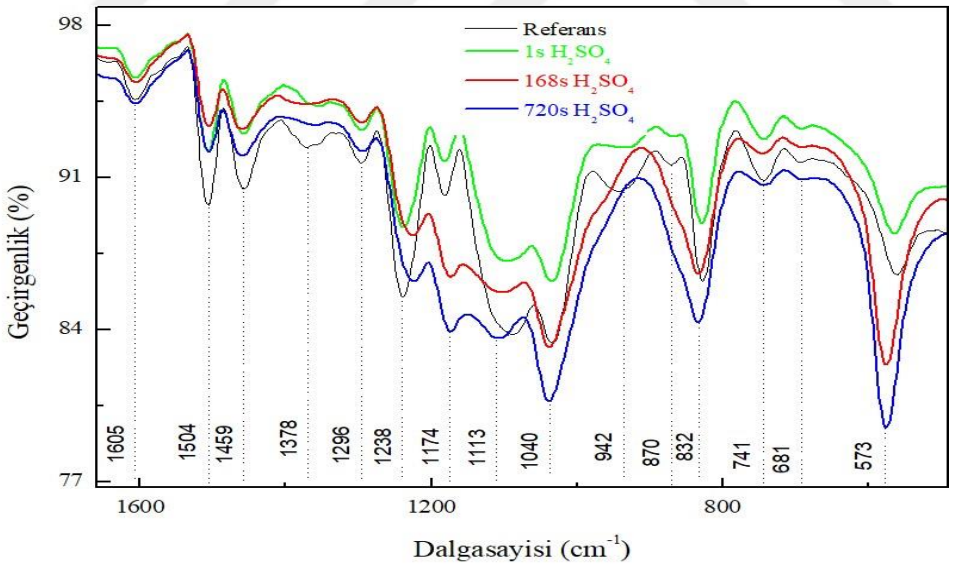


Şekil 5.14. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumlarının detaylı görüntüleri

Şekil 4.15'de H_2SO_4 çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin FT-IR spektrumu şekil 5.16'da da bu spektrumun parmak izi bölgesinin detaylı görünümü gösterilmektedir. Saf epoksi reçinede olduğu gibi burada da 3400 cm^{-1} bandında sağa doğru kaymalar gözlemlenmektedir fakat saf epoksi reçineye kıyasla daha az kaymalar olmuştur. Bu durumun ÇCKNT partiküllerinin, bu bölgedeki bağların oksitlenme dayanımını artırmasından kaynaklanabilir. 2909 cm^{-1} piklerinin derinliklerinde azalma görülmektedir. Bu azalma bağ kuvvetlerinin azaldığının bir göstergesidir. 1504 cm^{-1} pikindeki C-C bağlarının görüldüğü pik derinliklerin de de azalma görülmektedir. Referans eğrisinde bulunan 1378 cm^{-1} pikindeki bağlar şartlandırma süresine bağlı olarak kaybolmuştur. Sülfirik asit ortamında, saf epoksi reçine de olduğu gibi ÇCKNT takviyeli epoksi reçinede de referans eğrisi ile en dikkate değer farklılaşma 1238 – 870 cm^{-1} arasındaki piklerde gerçekleşmektedir. Bu bölgedeki piklerin hem derinliklerinde hem de konumlarında değişiklikler görülmektedir. 741 cm^{-1} de bulunan pik derinliklerinde azalma, 573 cm^{-1} de ise artış gözlemlenmektedir.



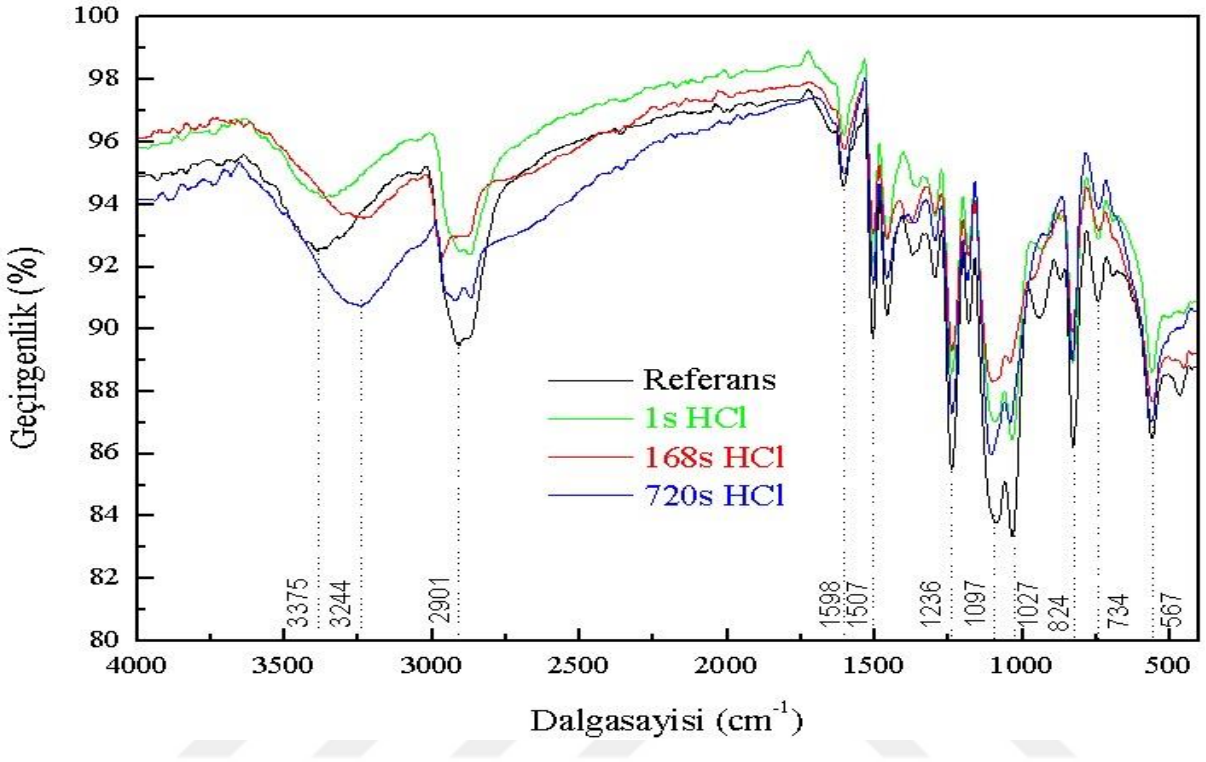
Şekil 5.15. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumları



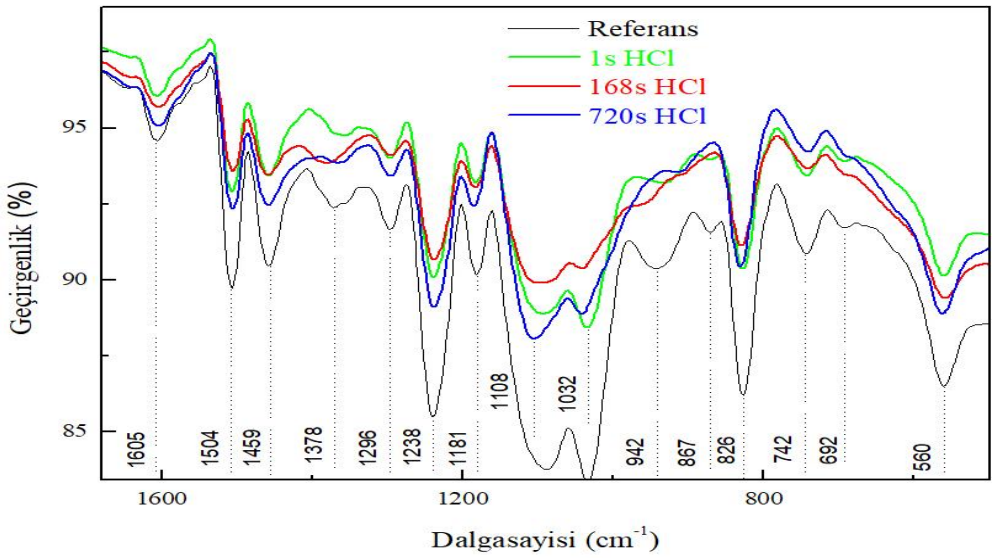
Şekil 5.16. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumlarının detaylı görüntüsü

Şekil 4.17'de HCl çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat boyunca şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin FT-IR spektrumu şekil 4.18'de de bu spektrumun parmak izi bölgesinin detaylı görünümü gösterilmektedir. 3375 cm^{-1} pikinde görülen -OH bağları, şartlandırma süresi arttıkça sağa doğru kaymakta ve 720

saatlik şartlandırma neticesinde 3244 cm^{-1} de durmaktadır. 2901, 1504, 1460, 1378, 1296, 1238, 1181, 1032, 826, 742 ve 560 cm^{-1} piklerinin derinliğinde azalma görülmektedir.



Şekil 5.17. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumları



Şekil 5.18. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi numunelerin FT-IR spektrumlarının detaylı görüntüsü

942 cm^{-1} pikinde oluşan bağlar, şartlandırma sonucunda kaybolmaktadır. 692 cm^{-1}'deki pik derinliklerinde oldukça azalmakta ve kaybolmak üzeredir.

Tüm FT-IR grafikleri beraber değerlendirildiğinde genel olarak, Deiyonize su ve tuzlu su içerisinde şartlandırılan numunelerde, bazı bağlarda oksitlenmeler görülürken, yeni bir bağ oluşması veya bağ kaybolması durumları gözlemlenmemektedir. Sülfirik asit ve hidroklorik asit çözeltilerinde şartlandırılan numunelerde ise nerdeyse tüm piklerde sağa ve sola kaymalar, pik derinliklerinde değişiklikler ve referans eğrisinde görünen bazı piklerin şartlandırma neticesinde kayboldukları görülmektedir. Bu durum kütle değişimi ölçümleri sonuçları ile de örtüşmektedir. Epoksi reçine ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçine, deiyonize su ve NaCl çözeltisi ortamlarında çok kısa sürede doyuma ulaşırken, HCl ve H_2SO_4 ortamlarında daha uzun sürede etkileşime girmiştir. Fakat bu ortamlarda emilen sıvı miktarı Deiyonize su ve tuzlu suya oranla oldukça fazladır. Bu durum reçine içerisinde daha fazla tahribata neden olarak hem fiziksel yapısında, hem de kimyasal yapısında farklılıklara neden olmuştur.

5.3. DSC testi sonuçları

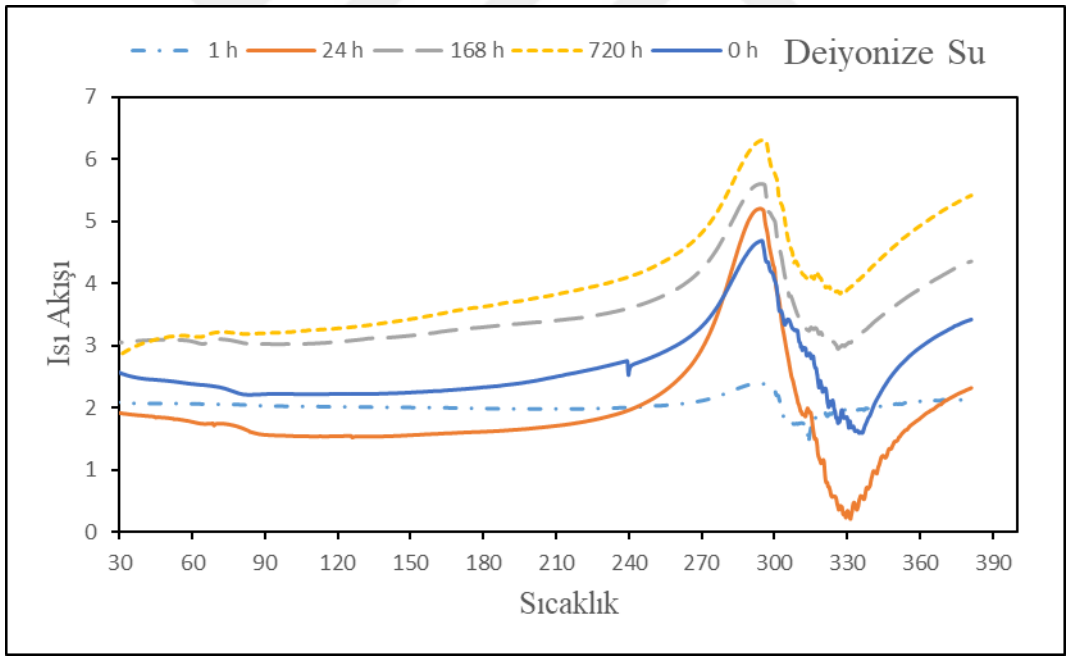
Bu bölümde saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin 1, 24, 168, 720 saat boyunca 4 farklı ortamda şartlandırılarak elde edilen DSC eğrileri grafikler halinde verilerek yorumlanmaktadır. DSC eğrilerinde, epoksi reçinelerin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), özgül ısı değerleri (ΔC_p), termal kararlılık (T_k), erime sıcaklığı (T_m) ve bozunma sıcaklığı (T_b) tablolar halinde gösterilmektedir.

Şekil 5.19'da 4 farklı zamanda deiyonize su ortamında şartlandırılan epoksi reçine ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. Polimerlerde genel olarak moleküler ağırlık, matris partikül ara yüzey alanı, çapraz bağ yoğunluğu ve partikül yönlenmesi gibi parametrelerin camsı geçiş sıcaklığı üzerine önemli etkilerinin olduğu belirtilmektedir (Goyat ve ark., 2018), (Sun ve ark., 2004). Camsı geçiş sıcaklıkları incelendiğinde şartlandırmanın başlarında camsı geçiş sıcaklıklarının, referans (şartlandırılmamış epoksi reçine) camsı geçiş sıcaklığına kıyasla arttığı fakat 720 saat şartlandırma neticesinde yeniden düştüğü görülmektedir. Camsı geçiş sıcaklığının artması FT-IR sonuçlarından da anlaşıldığı kadarıyla, çapraz bağ yoğunluğuyla ilişkilidir. Şartlandırmanın ilk zamanlarında camsı geçiş sıcaklığında artışlar söz konusu olabilir (Fan,2014) fakat ilerleyen zamanla zincir çözülmeleri

gerçekleşmeye başladığı için camsı geçiş sıcaklıklarında düşüş gözlemlenmektedir (Pei ve ark., 2011), (Leveque ve ark., 2005).

Polimerin kırılgan yapıdan yumuşak bir yapıya geçebilmesi için polimer zincirlerinin kendi etraflarında eğilip-bükülme hareketlerini yapabilmeye yetecek kadar bir hacme gereksinimleri vardır. Serbest hacim, toplam polimer hacmi içerisinde polimer zincirlerinin kendi hacimleri dışında kullanabilecekleri diğer boş yerlerin tamamı anlamındadır. Dolayısıyla şartlandırmanın ilk zamanlarında, şartlandırma etkisi ile oluşan şartlandırma ürünleri, epoksi içerisindeki serbest molekülleri bağlayarak çapraz bağ yoğunluğunu artırmış ve buda camsı geçiş sıcaklığının artmasına neden olmuştur. Ancak, ilerleyen zamanlarda geçici olarak oluşan çapraz bağlar yeniden bozunarak epoksi içerisindeki serbest hacim artmış ve buda camsı geçiş sıcaklığının düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu durum, ÇCKNT partiküllerinin varlığının makro moleküller arasındaki serbest boşluğu azaltarak mobiliteyi veya esnekliği azaltmasından kaynaklanmaktadır (Chen ve ark., 2009),(Jin ve Park, 2012), (Zakaria ve ark., 2016).

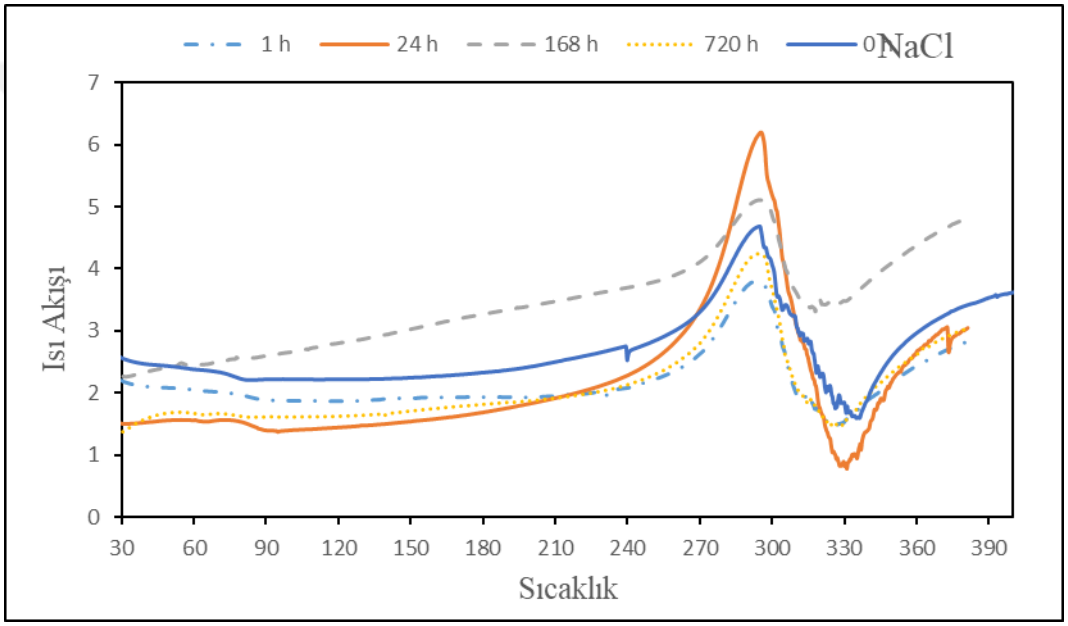
.



Şekil 5.19. Dört farklı zamanda deiyonize su ortamında şartlandırılan numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları

Şekil 5.20'de 4 farklı zamanda NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan epoksi reçine ve şartlandırılmamış epoksi (0 h) reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. Şartlandırmanın ilk zamanlarında camsı geçiş sıcaklığının önemli oranda arttığı görülmektedir. Kütle değişimi deneyleri ile beraber yorumlandığında, ilk birkaç saatlik

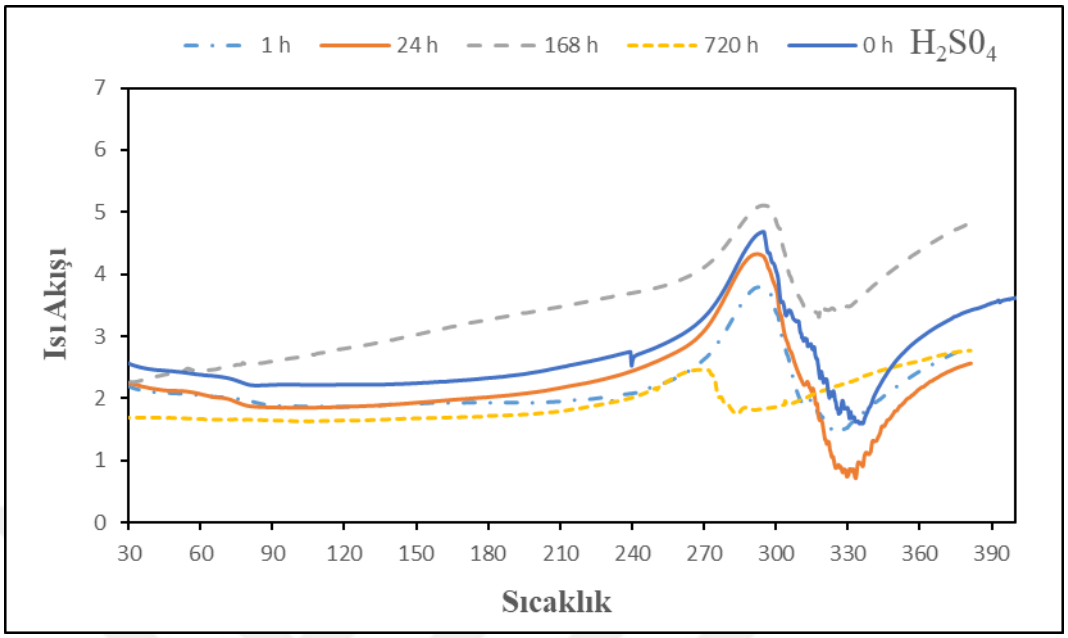
sürede gerçekleşen hızlı sıvı absorpsiyonu, yapı içerisindeki serbest hacimleri bağlayarak camsı geçiş sıcaklığını artırmaktadır. Ardından tekrar dengeye gelen yapıda sıcaklık tekrar düşmüş olsa da yine de ilk halinden %10 daha yüksek bir sıcaklığa ulaşmaktadır. FT-IR grafikleri de bu durumu destekler niteliktedir. Epoksi reçine zaman bağlı olarak farklı bağ yapıları gösterdiği için zamana bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığındaki artış ve azalışlar beklenen bir durumdur. Gerek deiyonize su ortamında gerekse NaCl ortamında sıvı emilimi kısa sürede gerçekleşmekte ve sabitlenmektedir. Bu sabitlenmenin ardında epoksi içerisinde devam eden reaksiyonlar olsa da bu reaksiyonlar, epoksinin camsı geçiş sıcaklığını artırıcı yönde etki etmiştir.



Şekil 5.20. Dört farklı zamanda NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları

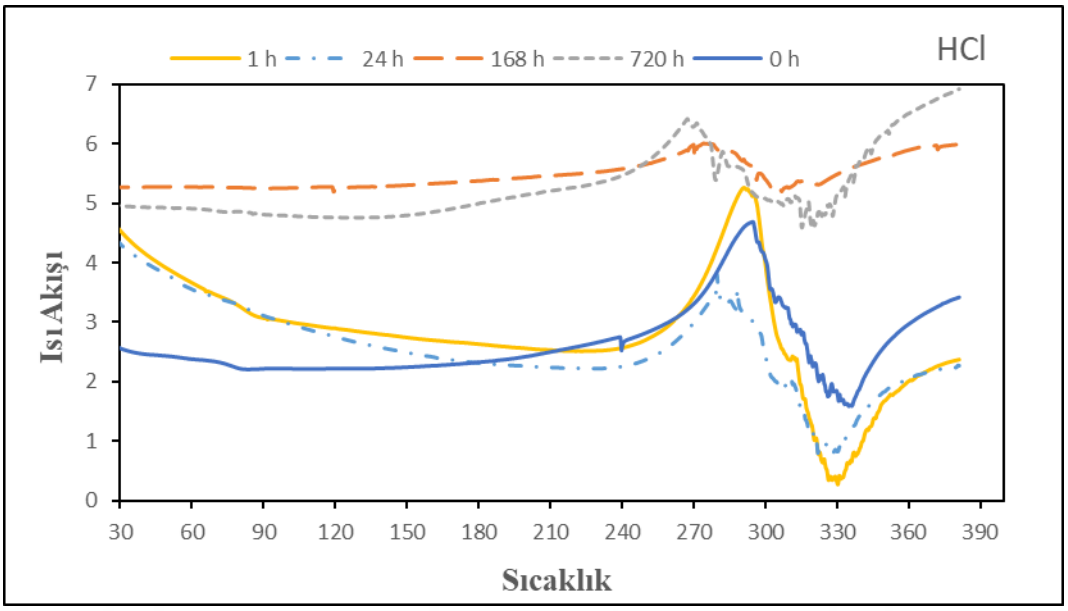
Şekil 5.21'de 4 farklı zamanda H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan epoksi reçine ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. 1 saatlik şartlandırma neticesinde camsı geçiş sıcaklığında 4˚C'lik bir düşüş olmasına rağmen, ilerleyen sürelerde referans sıcaklığının %10 üzerinde sıcaklıklara kadar bir artış gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar kütle değişimi ve FT-IR grafikleri ile beraber değerlendirildiğinde, şartlandırmanın ilk zamanlarında gerçekleşen reaksiyonların sıvı emilimini önlediği ve ilerleyen zamanlarda gerçekleşen reaksiyonlarla sıvı emiliminin hızlı bir şekilde arttığı ve buna bağlı olarak oksitlerin ve çeşitli şartlandırma ürünlerinin

oluşmasıyla epoksi içerisindeki serbest hacmin azalarak camsı geçiş sıcaklığını artırdığı düşünülmektedir.

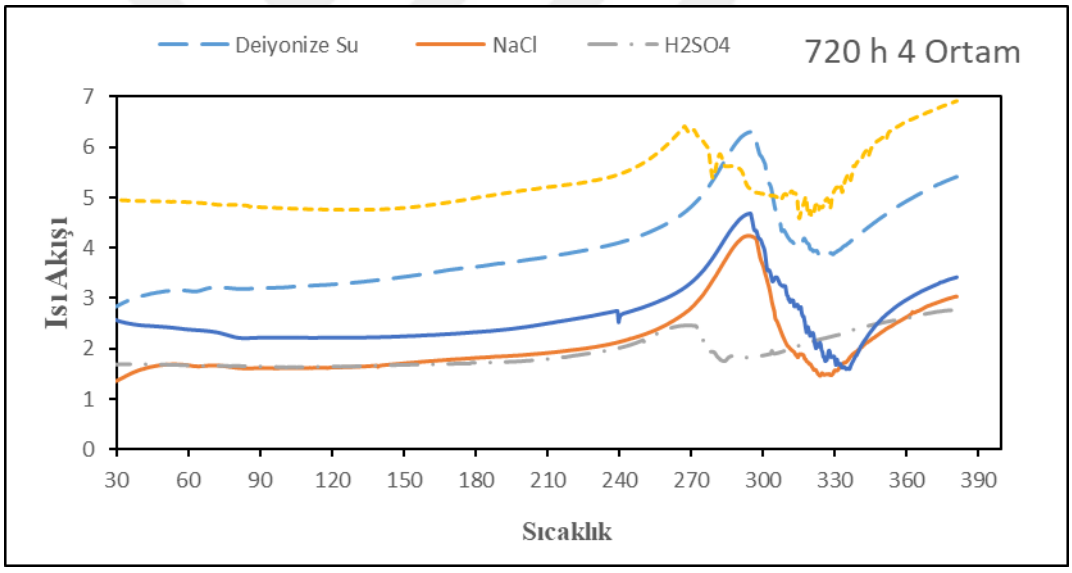


Şekil 5.21. Dört farklı zamanda H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları

Şekil 5.22'de 4 farklı zamanda HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan epoksi reçine ve şartlandırılmamış epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. 4 farklı şartlandırma ortamı içerisinde (şekil 5.23) camsı geçiş sıcaklığının en fazla düşüş gösterdiği ortam HCl çözeltisi ortamıdır. 72,71 ˚ C olarak camsı geçiş sıcaklığı ölçülen epoksi reçinenin şartlandırılma işlemi ile beraber, camsı geçiş sıcaklığı 64,7 ˚C'ye kadar düşmektedir. En çok sıvı absorpsiyonunun olduğu ortamlardan birisi olan HCl ortamı, epoksi içerisindeki zincir yapısını etkileyerek, epoksinin serbest hacmini artırdığı ve bunun da camsı geçiş sıcaklığını düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 5.22. Dört farklı zamanda HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları



Şekil 5.23. Dört farklı ortamda 720 saat şartlandırılan ve referans numunesinin DSC eğrilerinin kıyaslama grafiği sonuçları

Çizelge 5.1'de gösterilen saf epoksi reçinenin termal kararlılığının bozulmaya başladığı sıcaklıklar (T_k), ergime sıcaklığı (T_m) ve bozunma sıcaklıkları (T_b) incelendiğinde , NaCl ve deiyonize su ortamlarının erime ve bozulma sıcaklığı üzerine etkisinin az olduğı görülmektedir. Sülfirik asit ve hidroklorik asit ortamlarının ergime ve bozunma sıcaklıklarına etkisi incelendiğinde ise, şartlandırmanın ilk zamanlarında çok fazla bir etkisi görülmezken, ilerleyen zamanlarda 43˚ C'ye kadar düşüş olduğu gözlemlenmektedir. H_2SO_4 ve HCl ortamlarındaki sıvı absorpsiyonunun fazla olması ve

FT-IR sonuçlarında görüldüğü gibi bağ derinliklerinde farklılaşmalar oluşması, epoksi içerisindeki çapraz bağların ve epoksi serbest hacminin değiştiğini göstermektedir. Bu durum epoksi reçinenin ergime ve bozunma sıcaklıklarının etkileyerek düşürmektedir. Ergime ve bozunma sıcaklıklarında gözlemlenen düşüşler, epoksi reçinenin şartlandırma ortamlarından olumsuz olarak etkilendiğini göstermektedir.

Çizelge 5.1. DSC testleri saf epoksi reçine için ile elde edilen veriler

Ortamlar (1 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**72,71**	**0,410**	**255**	**295**	**333**
Deiyonize Su	78,5	0,381	270	299,15	315
NaCl	88,54	0,268	245	289,83	330
H_2SO_4	68,71	0,244	245	297,33	329
HCl	65,83	0,394	250	296,1	330

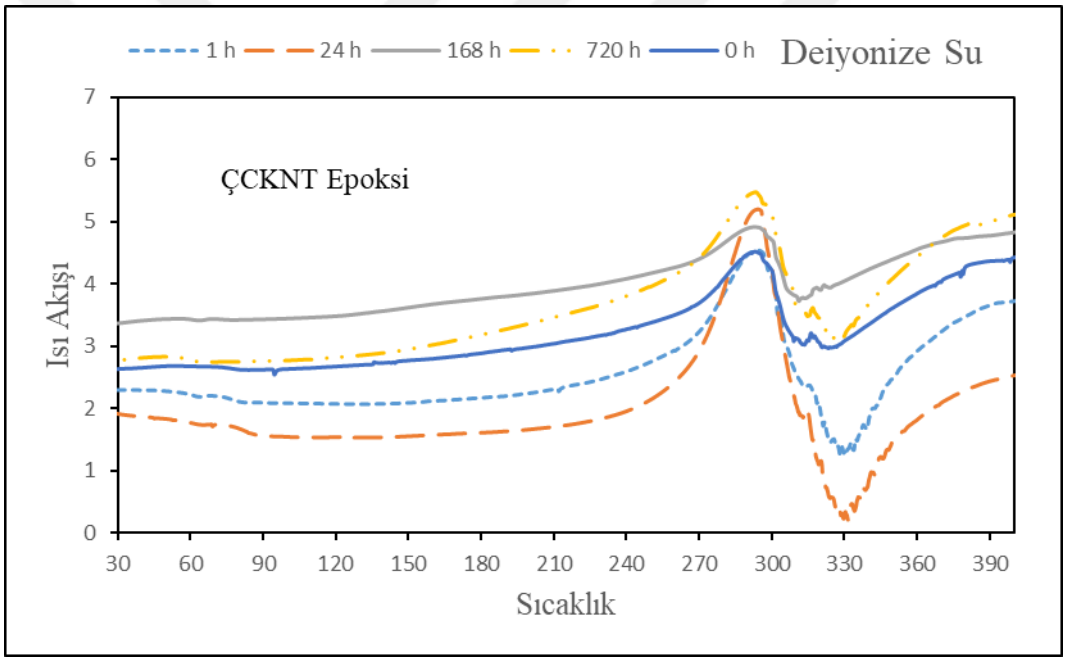
Ortamlar (24 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**72,71**	**0,410**	**255**	**295**	**333**
Deiyonize Su	84,81	0,239	255	297,5	330
NaCl	86,52	0,289	245	296,5	330
H_2SO_4	80,52	0,472	255	293,4	320
HCl	67,19	0,234	250	291,5	328

Ortamlar (168 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**72,71**	**0,410**	**255**	**295**	**333**
Deiyonize Su	87,60	0,297	255	295,6	327
NaCl	80,66	0,302	265	301,5	324
H_2SO_4	82,5	0,287	265	298,3	322
HCl	64,7	0,307	260	277,66	305

Ortamlar (720 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**72,71**	**0,410**	**255**	**295**	**333**
Deiyonize Su	75,37	0,301	265	297,4	326
NaCl	79,73	0,316	255	300,4	330
H_2SO_4	80,14	0,277	230	269,1	290
HCl	72,41	0,405	240	276,2	320

Şekil 5.24'de 4 farklı zamanda deiyonize su ortamında şartlandırılan ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. ÇCKNT takviyesi neticesinde saf epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığına kıyasla bir artış elde edilmiştir. Bu durum, nanopartiküllerin polimer zincirlerinin hareketini kısıtlaması ve nano partiküllerin fiziksel çapraz bağlayıcılık fonksiyonları sebebiyle ortaya çıkmaktadır (Goyat ve ark., 2018). Fakat şartlandırma neticesinde camsı geçiş sıcaklığı, saf epoksi reçineye kıyasla şartlandırma süresi arttıkça farklı bir karakteristik

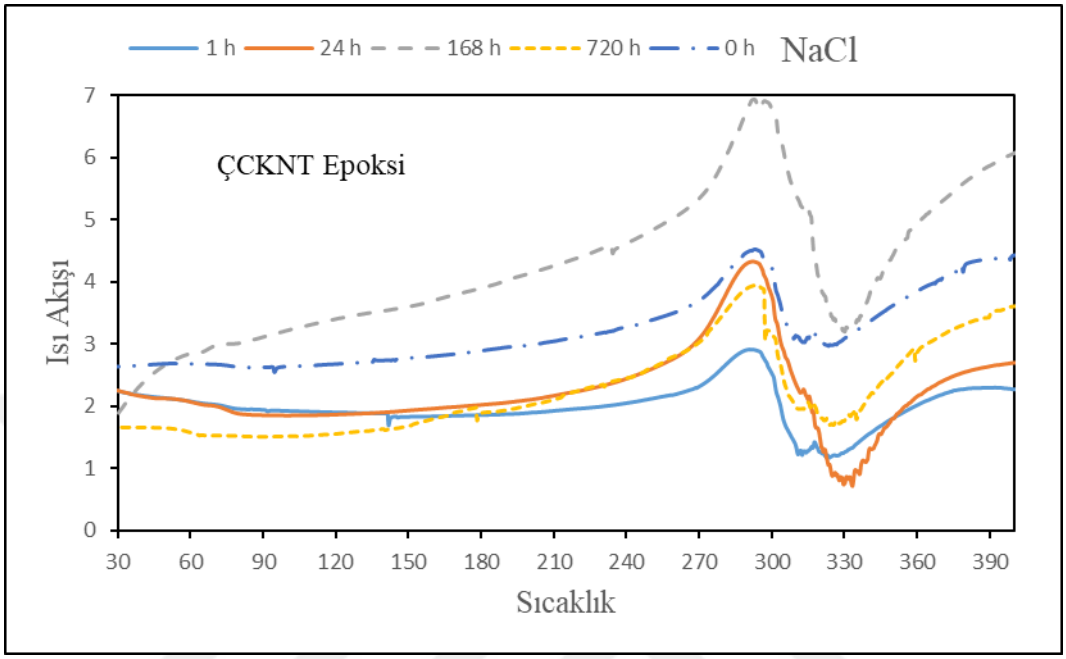
göstermektedir. Şartlandırmanın ilk zamanlarda hızla düşen camsı geçiş sıcaklığı, sonra az bir artış gösterip tekrar düşmeye devam etmektedir. Bu durum, epoksi içerisindeki ÇCKNT partiküllerinin deiyonize su ile etkileşime girerek yapı içerisinde çözünmelere ve yapı içerisindeki serbest hacim oranının artması neticesinde ortaya çıkmaktadır. ÇCKNT partiküllerinin epoksi reçine içerisindeki varlığının, epoksi içerisindeki oksitlenme şeklini ve bağ yapılarını etkilediği FT-IR testleri ile de görülmektedir. Kütle değişimi ölçüm sonuçları, FT-IR sonuçları ve camsı geçiş sıcaklığı değerleri beraber değerlendirildiğinde, epoksi reçine içerisindeki suyun bulunduğu zamana bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığını artırdığı fakat ÇCKNT partiküllerinin varlığı suyun emilimini azalttığı için (şekil 5.3) bunun camsı geçiş sıcaklığının düşmesine neden olduğu söylenebilir.



Şekil 5.24. Dört farklı zamanda deiyonize su ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları

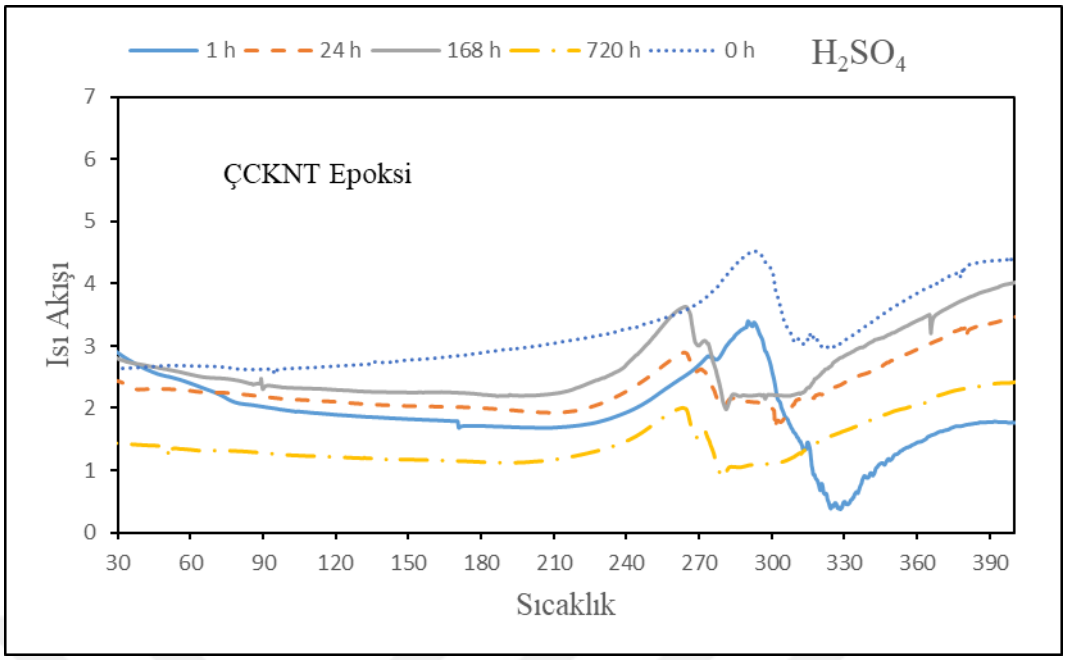
Şekil 5.25'de 4 farklı zamanda NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. NaCl çözeltisi içerisinde şartlandırılan numunelerin camsı geçiş sıcaklığının yaklaşık 12.5˚C düştüğü gözlemlenmektedir. Aynı ortamda şartlandırılan saf epoksi ile kıyaslandığında, ÇCKNT ün camsı geçiş sıcaklığı üzerine olumsuz etkileri olduğu görülmektedir. Kütle değişimi grafikleri incelendiğinde (şekil 5.3) ÇCKNT takviyesinin NaCl ortamında sıvı emilimini artırdığını ve sıvı emilimi neticesinde

epoksi ile etkileşime girerek çapraz bağlarda çözülmelere sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Çapraz bağ yoğunluğunun azalması ise camsı geçiş sıcaklığının düşmesine neden olur.



Şekil 5.25. Dört farklı zamanda NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları

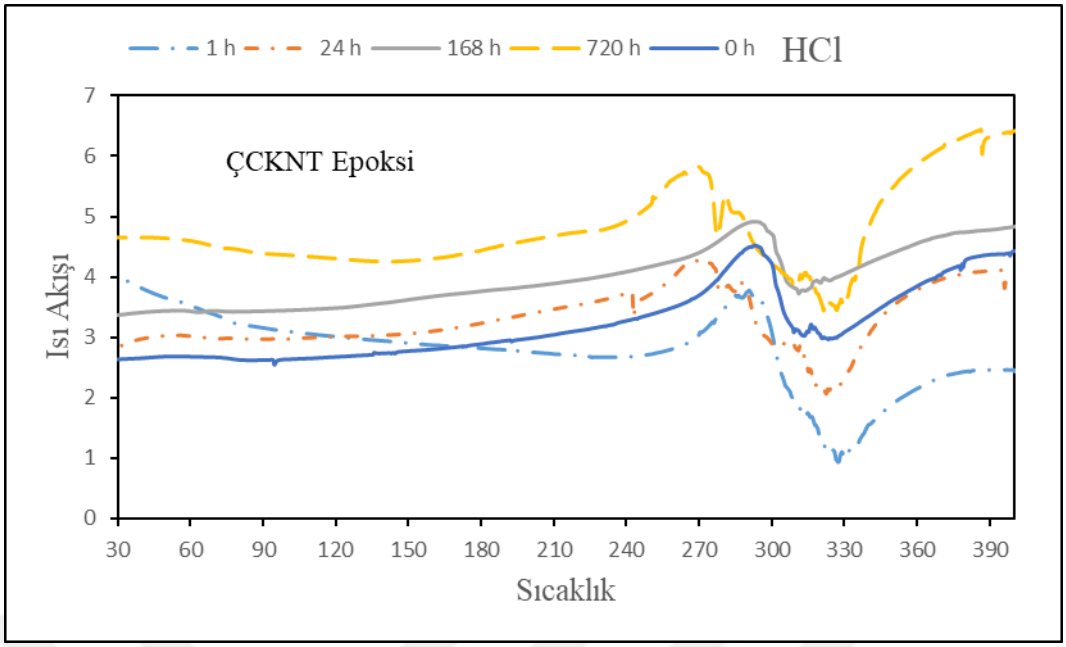
Şekil 5.26'da 4 farklı zamanda H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin camsı geçiş sıcaklığı, şartlandırma neticesinde 6˚C'lik bir düşüş olsa da zamana bağlı olarak bu sıcaklığın değişmediği söylenebilir. Saf epoksi reçine sülfirik asit ortamına oldukça duyarlıyken, ÇCKNT takviyesi ile bu ortamın camsı geçiş sıcaklığı üzerine olumsuz etkilerinin azaltıldığı görülmektedir.



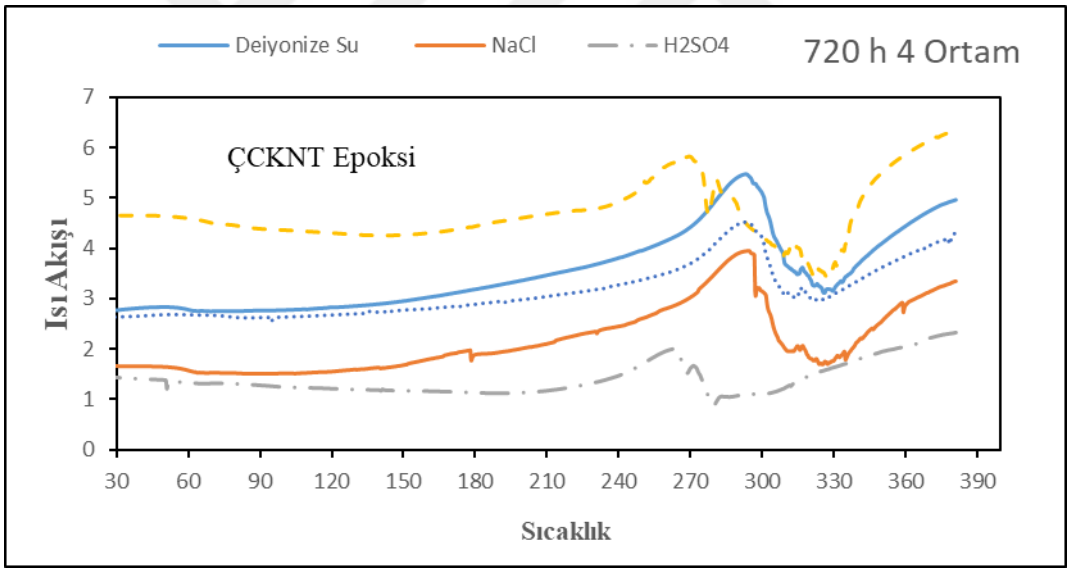
Şekil 5.26. Dört farklı zamanda H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları

Şekil 5.27'de 4 farklı zamanda HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin DSC eğrileri gösterilmektedir. HCl ortamında şartlandırılan numunelerde camsı geçiş sıcaklıkları 5˚C civarında düşüş gösterse de saf epoksi reçineye kıyasla camsı geçiş sıcaklığının daha az etkilendiği görülmektedir.

Şekil 4.28'de gösterilen 4 grafik kıyaslandığında da genel olarak ÇCKNT partiküllerinin varlığının asidik ortamlarda sıvı emilimi artırmasına rağmen camsı geçiş sıcaklığının düşmesini engelleyici yönde etki etmiştir. Bu durumun, ÇCKNT takviyesi, epoksi içerisindeki bağ yapısını etkilese de şartlandırma işleminin sonunda serbest hacim miktarını fazla düşürmediği için camsı geçiş sıcaklığını muhafaza ettiği düşünülmektedir.



Şekil 5.27. Dört farklı zamanda HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli numuneler ile referans numunesinin DSC testi sonuçları



Şekil 5.28. Dört farklı ortamda 720 saat şartlandırılan ve referans numunesinin DSC eğrilerinin kıyaslama grafiği sonuçları

Çizelge 5.2'de ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin termal kararlılığının bozulmaya başladığı sıcaklıklar (T_k), egime sıcaklığı (T_m) ve bozunma sıcaklıkları (T_b) gösterilmektedir. Saf epoksi reçinenin ergime ve bozunma sıcaklıkları incelendiğinde H_2SO_4 ve HCl ortamlarının ergime ve bozunma sıcaklığındaönemli düşüşlere neden olduğu görülmektedir. Geniş yüzey alanlarına sahip olan ÇCKNT partiküllerinin takviye olarak kullanılması neticesinde asidik ortamların olumsuz etkileri azaltılmıştır.

ÇCKNT partikülleri, epoksi reçine içerisinde çapraz bağlanmayı artırarak polimer zincirleri arasında fiziksel bir bariyer gibi davranmaktadır. Bu durum ergime sıcaklığının ve bozunma sıcaklığının aşırı düşmesini engellemektedir.

Çizelge 5.2. DSC testleri ÇCKNT takviyeli epoksi reçine için ile elde edilen veriler

Ortamlar (1 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**78,13**	**0,354**	**260**	**296**	**320**
Deiyonize Su	67,16	0,198	247	295	330
NaCl	69,87	0,254	270	297	322
H_2SO_4	78,24	0,272	261	296	302
HCl	76,67	0,400	265	286	330

Ortamlar (24saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**78,13**	**0,354**	**260**	**296**	**320**
Deiyonize Su	73,57	0,247	250	299	331
NaCl	76,24	0,284	251	300	333
H_2SO_4	71,66	0,328	245	267	302
HCl	74,35	0,261	255	285	328

Ortamlar (168 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**78,13**	**0,354**	**260**	**296**	**320**
Deiyonize Su	68,83	0,273	267	294	316
NaCl	69,45	0,251	270	295	335
H_2SO_4	72,33	0,247	235	266	285
HCl	73,83	0,273	275	293	325

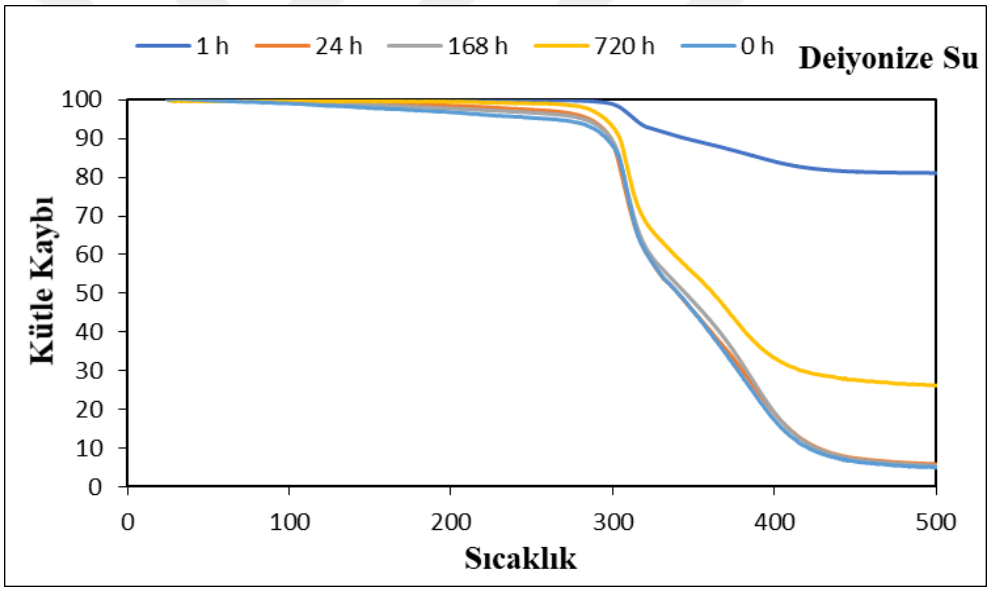
Ortamlar (720 saat)	**T_g**	**ΔC_p**	**T_k**	**T_m**	**T_b**
Referans	**78,13**	**0,354**	**260**	**296**	**320**
Deiyonize Su	65,13	0,251	267	285	330
NaCl	67,5	0,426	268	291	328
H_2SO_4	71,12	0,235	245	265	285
HCl	72,25	0,221	245	272	327

5.4. TGA sonuçları

Bu bölümde 4 farklı zamanda ve 4 farklı ortamda şartlandırılmış saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin TGA testi sonuçları gösterilmektedir. TGA testi oda sıcaklığından başlatılarak 500 ˚ C'ye kadar devam ettirilmiştir. Polimerlerin bozunma sıcaklıkları (T_{onset}) ve yanma neticesinde kalan kütle miktarları (K.M) grafikler ve tablolar halinde verilmektedir.

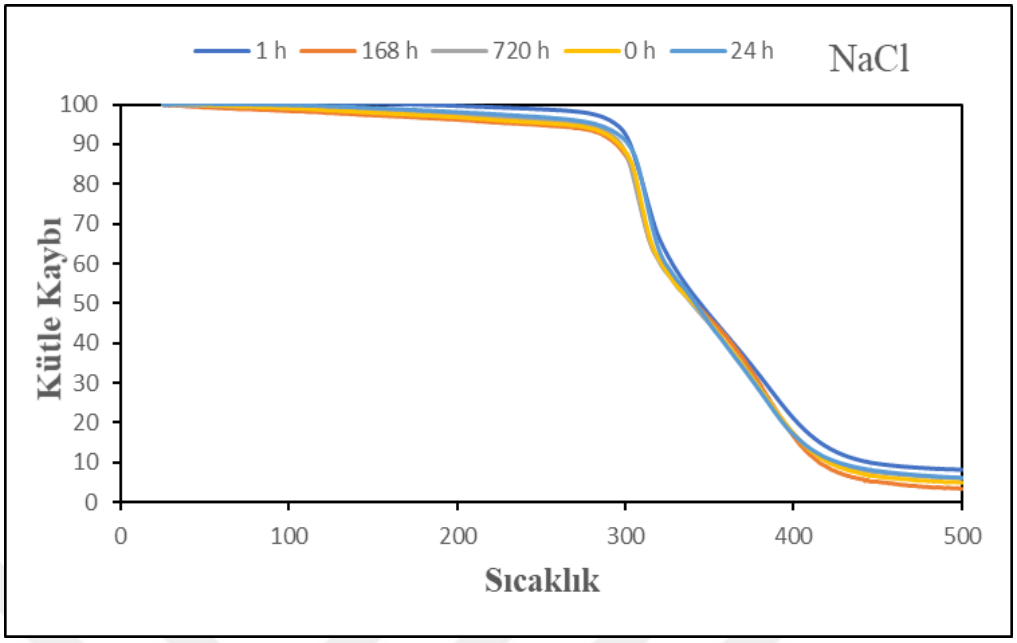
Şekil 5.29'da dört farklı zamanda deiyonize su içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış epoksi (referans) reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde deiyonize su şartlandırma ortamının genel olarak epoksi reçinelerin termal kararlılığını çok fazla etkilemediği söylenebilir. Isıtma neticesinde geri kalan kütle miktarlarında ise epey farklılıklar vardır. 1 saat şartlandırılan epoksi reçinenin kütlesinin büyük kısmı (%80) yanmadan kalmıştır. 720 saat şartlandırılan numunenin ise %26,5'luk kısmı kül olarak kalmaktadır. Şartlandırılmamış epoksi reçinede ise geriye %6 lık kısmı kül olarak kalmaktadır. Geriye kalan kül miktarlarındaki artışların şartlandırma neticesinde ki oksitlerden ve şartlandırma ürünlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuçlar DSC sonuçlarını da destekler niteliktedir. DSC testinden elde edilen bozunma sıcaklıkları ile TGA testinden elde edilen bozunma sıcaklıkları arasında %10'luk bir değişkenlik gözlemlenmesine rağmen, her iki deneyde de şartlandırma ortamlarının etkisi birbirleri ile kıyaslandığında değişikliklerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



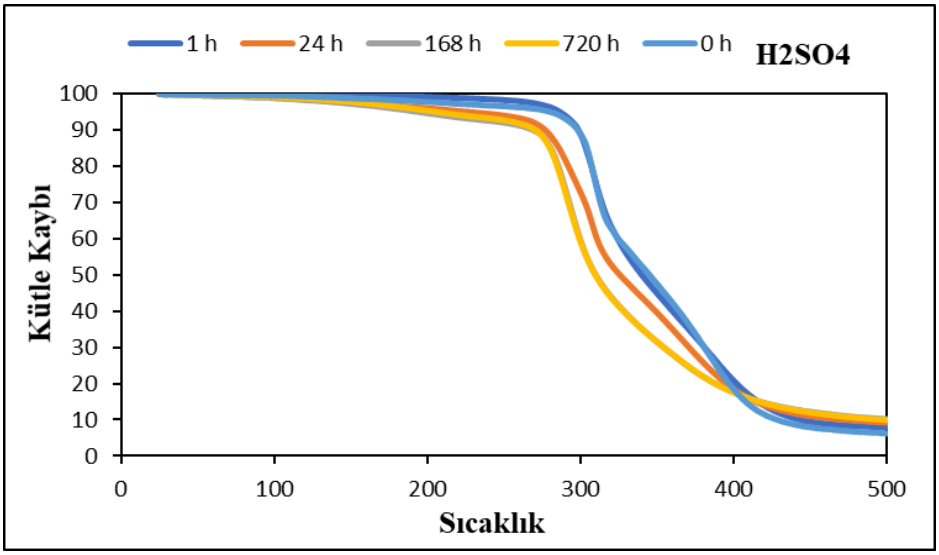
Şekil 5.29. Deiyonize su ortamında şartlandırılan saf epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

Şekil 5.30'da 4 farklı zamanda NaCl çözeltisi içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış epoksi (referans) reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir. NaCl ortamında şartlandırılan numunelerin de deiyonize su ortamında olduğu gibi, termal kararlılığında fazla bir değişiklik görülmemektedir. Bozunma sıcaklığında gerçekleşen küçük değişikliklerin de şartlandırma neticesinde ortaya çıkan oksitlerden ve reçine içerisindeki bağ yoğunluğunun değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde, deney neticesinde elde edilen kömürleşme miktarında da fazla bir değişiklik gözlemlenmemektedir.



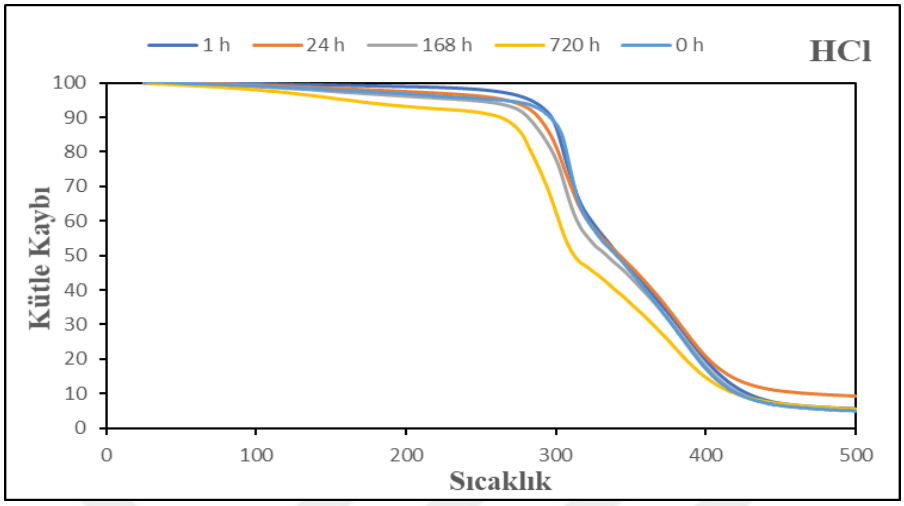
Şekil 5.30. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

Şekil 5.31'de 4 farklı zamanda H_2SO_4 çözeltisi içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış epoksi (referans) reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir. Deiyonize su ve NaCl ortamlarına kıyasla bu ortamda şartlandırma ortamına bağlı olarak epoksi reçinenin termal kararlılığını kaybetmeye başladığı görülmektedir. Şartlandırmanın ilk zamanlarında (1 saat) sıvı emilimi az olduğu için termal kararlılıkta kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemektedir fakat ilerleyen zamanlar termal kararlılıkta %12'lik düşüş oluşmakta ve T_{onset} sıcaklığı 259˚C'ye düşmektedir. Kül miktarlarında ise dikkate değer bir değişiklik gözlemlenmemektedir.



Şekil 5.31. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

Şekil 4.32'de 4 farklı zamanda HCl çözeltisi içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış epoksi (referans) reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 5.32. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan saf epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

HCl ortamı, sülfirik asit ortamına benzer şekilde epoksi reçinenin termal kararlılığını etkilemektedir. 720 saatlik şartlandırma neticesinde bozunma sıcaklığında %20'ye yakın bir düşüş gözlemlenmektedir. FT-IR sonuçlarından da anlaşıldığına göre HCl asit ortamı epoksi reçine içerisindeki bağ yapısını oldukça etkilemiştir. Bu etkileşim epoksi reçineyi olumsuz etkileyerek T_{onset} sıcaklığının düşmesine neden olmuştur. Kömürleşme miktarında ise kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir.

Epoksi reçinenin ortamlara ve şartlandırma sürelerine göre bozunma sıcaklıkları ve kül miktarları çizelge 5.3'de , dört farklı ortamın kıyaslanabilmesi için epoksi reçinenin maksimum süre boyunca şartlandırılması neticesinde elde edilen TGA grafiği ise şekil 5.33'de gösterilmektedir. Grafiktende görüleceği gibi termal kararlılığın en olumsuz etkilendiği ortam HCl çözeltisi ortamıdır. Genel olarak deiyonize su ve tuzlu su ortamlarının termal kararlılığa önemli bir etkisinin olmadığı, asidik ortamların ise önemli oranda etkilediği şekil 5.33'de görülmektedir.

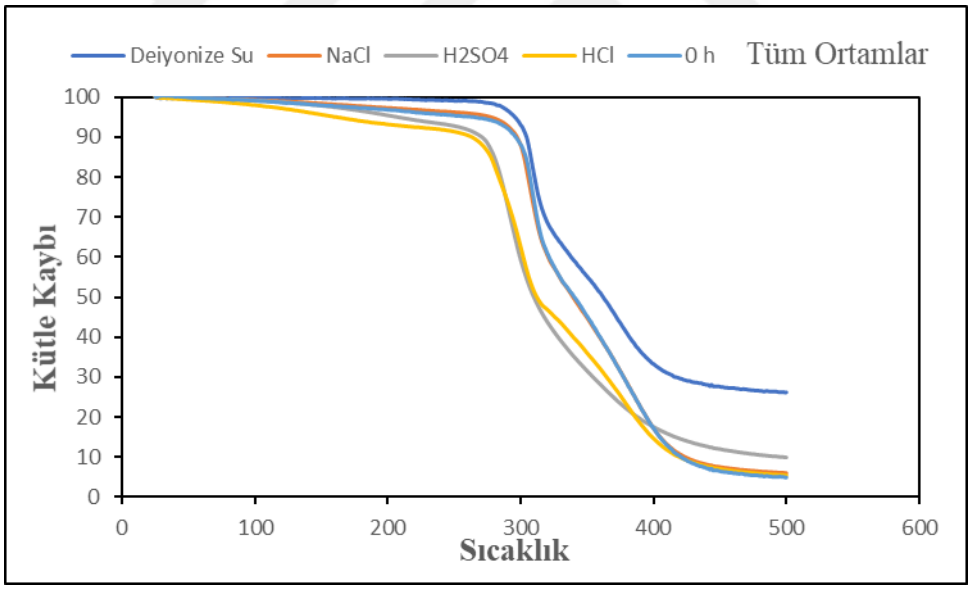
Çizelge 4.3. TGA testleri ile saf epoksi reçine için ile elde edilen veriler

Ortamlar (1 saat)	**T_{onset}**	**K.M**
Referans	**283**	**6,20**
Deiyonize Su	302	81,1
NaCl	294	6,50
H_2SO_4	280	5,15
HCl	268	5,20

Ortamlar (24 saat)	T_{onset}	K.M
Referans	**283**	**6,20**
Deiyonize Su	281	6,10
NaCl	287	6,30
H_2SO_4	262	10,41
HCl	260	9,50

Ortamlar (168 saat)	T_{onset}	K.M
Referans	**283**	**6,20**
Deiyonize Su	281	6,0
NaCl	287	5,60
H_2SO_4	262	6,5
HCl	260	5,10

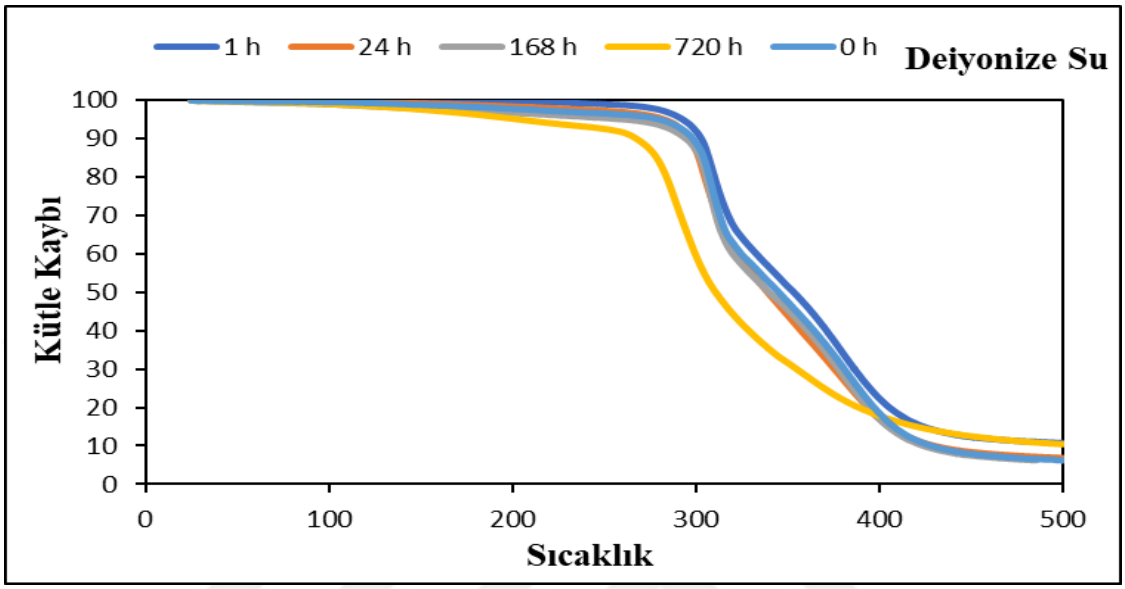
Ortamlar (720 saat)	T_{onset}	K.M
Referans	**283**	**6,20**
Deiyonize Su	286	26,5
NaCl	286	5,10
H_2SO_4	259	5,38
HCl	248	5,03



Şekil 4.33. Dört farklı ortamında şartlandırılan saf epoksi reçinelerin ve referans numunesinin TGA testi snuçları

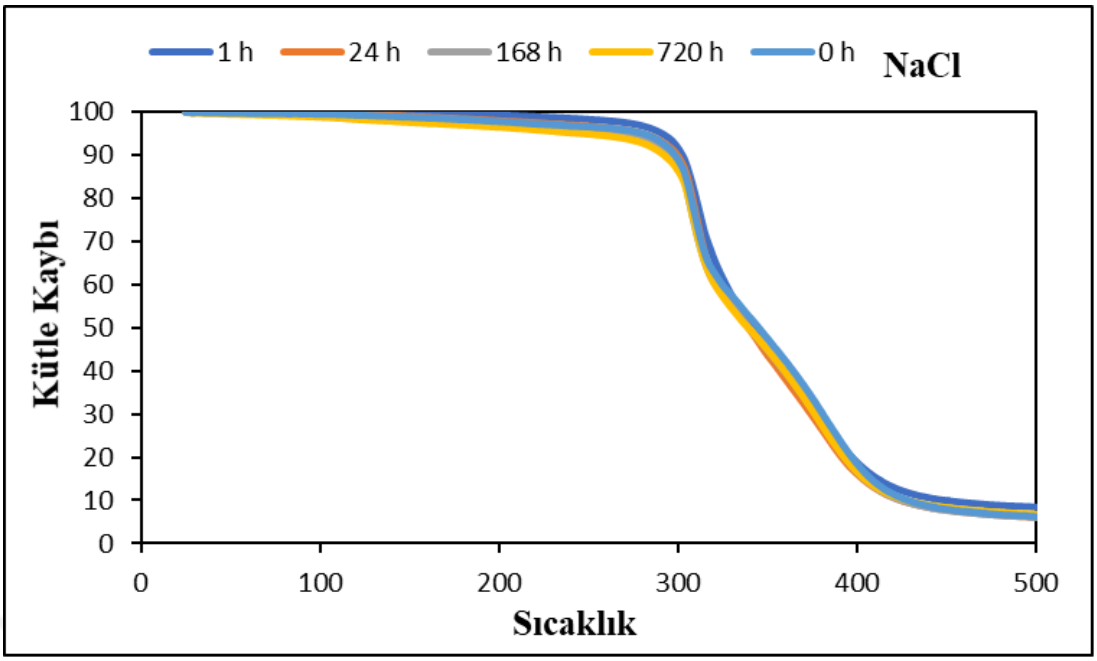
Şekil 5.34'de 4 farklı zamanda deiyonize su çözeltisi içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir. Aynı ortamda şartlandırılmış saf epoksi reçineye kıyasla ÇCKNT takviyesi, epoksi reçinenin bu ortama olan duyarlılığını bir miktar artırmaktadır. Şartlandırma neticesinde reçinenin bozunma sıcaklığı %10 civarında düşerek 255˚C

olmaktadır. Kütle değişimi sonuçları ile beraber değerlendirildiğinde, reçine 24 saatten sonra sıvı emmeyi bıraksa bile iç yapıda bağ çözünmesi ve oksitlenmenin devam etmesi neticesinde bozunma sıcaklığı düşmektedir. Kül miktarında ise dikkate değer bir değişim gözlemlenmemektedir.



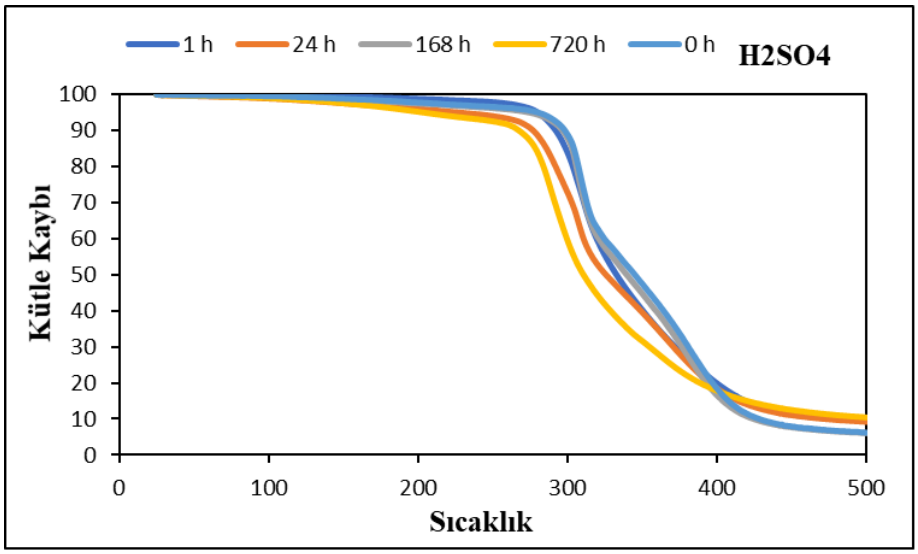
Şekil 5.34. Deiyonize su ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

Şekil 5.35'de dört farklı zamanda NaCl çözeltisi içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir. ÇCKNT takviyesinin NaCl ortamında termal kararlılığa ve kül miktarlarına dikkate değer miktarda bir etkisinin olmadığı görülmektedir. NaCl ortamında şartlandırılan numunenin FT-IR ve kütle değişimleri ile beraber TGA sonuçları değerlendirildiğinde, reçine içerisinde bağ yoğunluklarında zamana bağlı olarak artış ve azalışlar gözlemlense de termal kararlılığın dikkate değer oranda etkilenmediği söylenebilir.

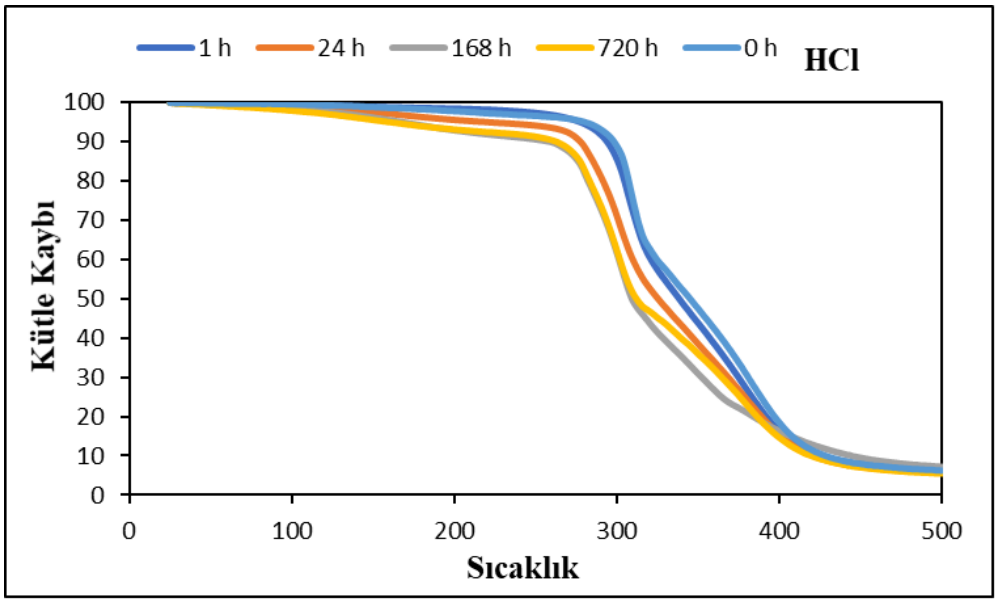


Şekil 5.35. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

Şekil 5.36'da 4 farklı zamanda H_2SO_4 çözeltisi içerisinde, şekil 5.37'de de HCl çözeltisi içerisinde şartlandırılmış ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin TGA testi sonuçları gösterilmektedir. Aynı ortamlarda şartlandırılan saf epoksi reçine kıyasla, ÇCKNT takviyesinin her iki ortamda da termal kararlılığı artırdığı söylenebilir. ÇCKNT takviyesi neticesinde termal kararlılık yaklaşık olarak 15 ˚C artırılmıştır. Kül miktarlarında ise dikkate değer bir değişiklik gözlemlenmemektedir. Çizelge 5.4'de tüm ortamlardaki bozunma sıcaklıkları ve kül miktarları gösterilmektedir.



Şekil 5.36. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin TGA testi snuçları



Şekil 5.37. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin TGA testi snuçları

Çizelge 5.4. TGA testleri ile ÇCKNT takviyeli epoksi reçine için ile elde edilen veriler

Ortamlar (1 saat)	**T_{onset}**	**K.M**
Referans	**281**	**6,20**
Deiyonize Su	283	9,4
NaCl	280	6,50
H_2SO_4	275	6,4
HCl	278	6,4

Ortamlar (24 saat)	**T_{onset}**	**K.M**
Referans	**281**	**6,4**
Deiyonize Su	279	6,4
NaCl	275	7,0
H_2SO_4	274	7,0
HCl	268	6,4

Ortamlar (168 saat)	**T_{onset}**	**K.M**
Referans	**281**	**6,4**
Deiyonize Su	277	6,5
NaCl	276	7,2
H_2SO_4	261	9,4
HCl	262	6,4

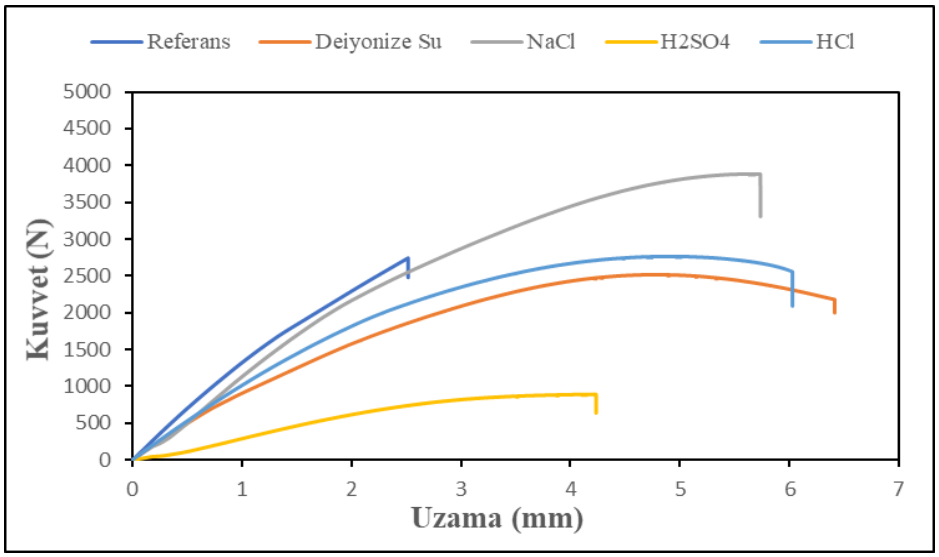
Ortamlar (720 saat)	**T_{onset}**	**K.M**
Referans	**281**	**6,4**
Deiyonize Su	255	9,5
NaCl	274	7,0
H_2SO_4	254	9,5
HCl	260	6,3

TGA testleri sonuç olarak değerlendirildiğinde, ÇCKNT takviyesinin şartlandırma ortamlarında numunelerin sıvı emilimini artırsada, termal kararlılıklarını olumsuz etkilememiştir. Özellikle asidik ortamlarda şartlandırılan saf epoksi reçinelerin termal kararlılıkları düştüğü fakat ÇCKNT takviyesi ile asidik ortamların olumsuz etkilerinin azaltılarak epoksi reçinenin termal kararlılığının iyileştirildiği söylenebilir.

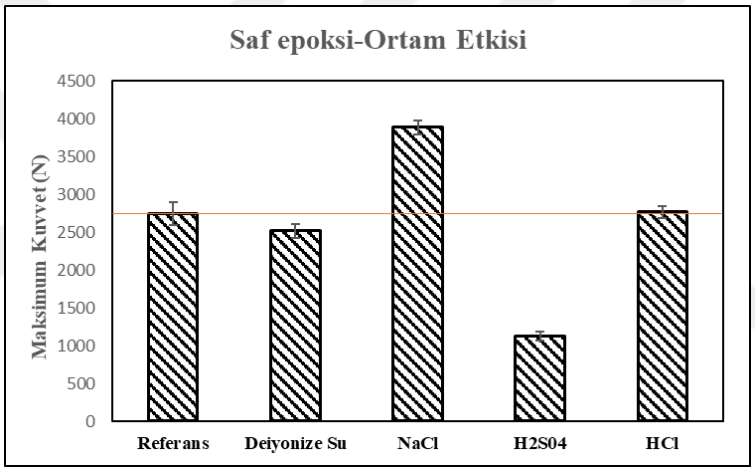
5.5. Çekme testi sonuçları

Bu bölümde 4 farklı ortamda şartlandırılan saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin çekme deneyi sonuçları verilmektedir. Çekme deneyi neticesinde elde edilen Kuvvet – uzama, gerilme- şekil değiştirme grafikleri hem saf hem de ÇCKNT takviyeli epoksi reçine için verilerek yorumlanmaktadır. Deney güvenilirliğini sağlamak için deneyler üçer kez tekrar edilmiş ve hata çubukları ilgili grafikler üzerine eklenmiştir. Şartlandırma ortamlarının, deney neticesinde elde edilen maksimum kuvvet değerlerine etkilerini kıyaslayabilmek için, maksimum kuvvetlerin ortamlara bağlı olarak grafikleri saf ve takviyeli epoksi reçine için ayrıca verilmektedir. Hasar yüzeylerinin makro fotoğrafları, optik mikroskop görüntüleri ve sem görüntüleri de verilerek mekanik deney sonuçları ile beraber değerlendirilmektedir.

Şekil 5.38’de dört farklı ortamda şartlandırılan ve şartlandırılmamış epoksi reçinelerin çekme deneyi neticesinde elde edilen kuvvet-uzama grafiği, şekil 5.39’da maksimum kuvvet grafiği ve şekil 5.40’da de gerilme şekil değiştirme grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.5‘de de maksimum kuvvet, maksimum gerilme, maksimum uzama ve şekil değiştirme, tokluk ve elastisite modülü değerleri gösterilmektedir. Şartlandırma neticesinde, tüm şartlandırma ortamlarında uzama değerlerinde artış görülmektedir. Şartlandırılmamış epoksi reçine de uzama değeri 2,5 mm iken, şartlandırma neticesinde 6,4 mm değerine kadar bir artış görülmektedir.

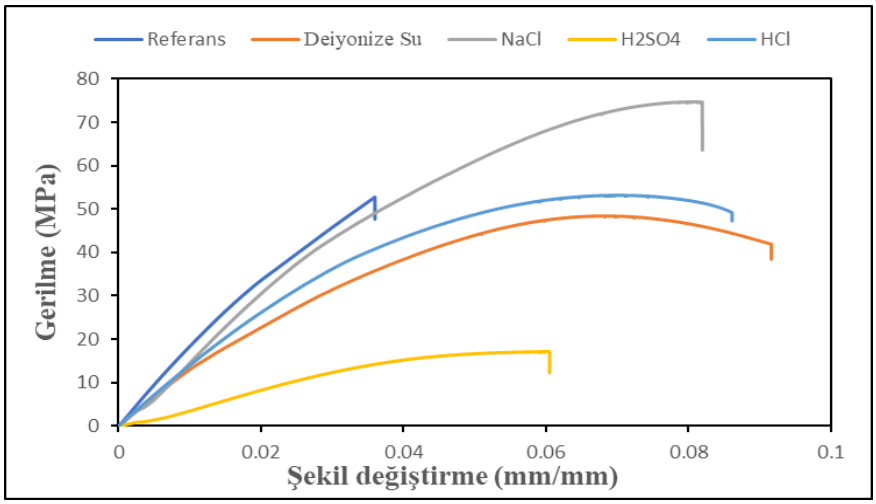


Şekil 5.38. Dört farklı ortamda şartlandırılan epoksi reçinelerin ve referans numunesinin kuvvet-uzama grafikleri



Şekil 5.39. Referans numunesi ile şartlandırılan numunelerin çekme deneyi ile elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması

Kuvvet değerlerinde ise H_2SO_4 ortamında %70'lik bir kuvvet kaybı gözlemlenirken, diğer ortamlarda kuvvet artışı gerçekleşmiştir (şekil 4.39). NaCl ortamında şartlandırılan numune de %50'lik bir kuvvet artışı, HCl ortamında şartlandırılan numune de ise %10'luk bir kuvvet artışı görülmektedir. Kuvvet ve uzama artışlarına bağlı olarak tokluk değerlerinde de artışlar olduğu görülmektedir. Bu durum, şartlandırma neticesinde zincir yapısı ve bağ yoğunluğu değişen epoksi reçinenin sadece fiziksel ve kimyasal olarak değişmediğini, mekanik olarak ta önemli oranda etkilendiğini göstermektedir. Şekil 4.40'da verilen gerilme şekil değiştirme grafiğini incelediğimizde, referans eğrisinin lineer bir yapı gösterdiğini fakat şartlandırma neticesinde tüm numunelerin gerilme birim şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal olmadığı görülmektedir.



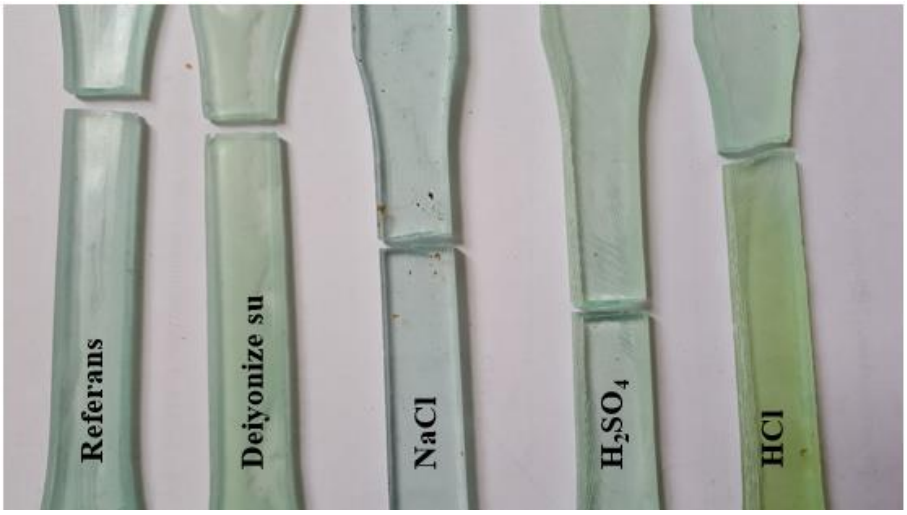
Şekil 5.40. Dört farklı ortamda şartlandırılan epoksi reçinelerin ve referans numunesinin kuvvet-uzama grafikleri

Şartlandırma ortamlarının fiziksel ve kimyasal olarak ortaya çıkan olumsuz etkilerine rağmen, (bozunma, camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı, termal kararlılık) mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmediği görülmektedir. Epoksi reçinenin sülfirik asit ile girdiği reaksiyonlar neticesinde mukavemet açısından olumsuz etkilendiği görülmektedir fakat uzama değerinde gözlemlenen önemli orandaki artış, bu ortamda şartlandırılan reçinenin saf epoksi reçine ile aynı tokluk değerine sahip olmasını sağlamaktadır.

Çizelge 5.5. Saf epoksi reçinelerin çekme testi sonuçları

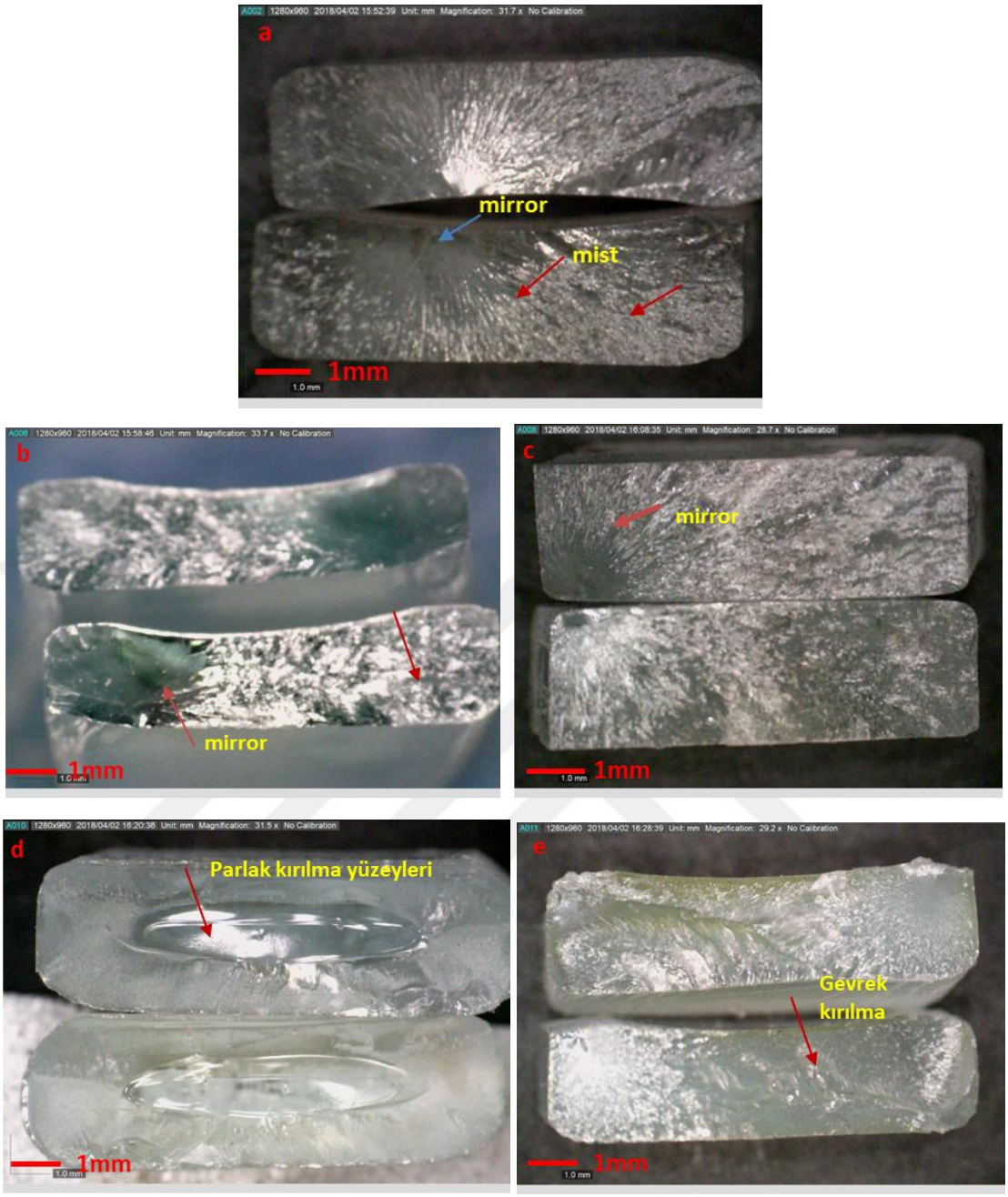
Parametreler	**Referans**	**Deiyonize Su**	**NaCl**	**H_2SO_4**	**HCl**
Maks. Kuvvet (N)	2545	2515	3877	821	2765
Maks. Gerilme (MPa)	50	48	73	16,5	53
Maks. Uzama (mm)	2,5	6,4	5,7	4,2	6
Maks. Şek. Değ. (mm/mm)	0,035	0,09	0,08	0,06	0,08
Tokluk (kJ/m3)	10.28	74.59	86.01	10.75	73.06
Elastisite Modülü (GPa)	1.94	1.37	1,26	0,308	1,47

Şekil 5.41'de 4 farklı ortamda şartlandırılan epoksi reçinelerin çekme deneyi neticesindeki görüntüleri, şekil 5.42'de de mikroskobik hasar yüzeyi görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 5.41. Saf Epoksi çekme numuneleri

Termoset polimerlerde çekme deneyi neticesinde gevrek kırılan yüzeylerde mirror, mist ve hackle olmak üzere 3 farklı bölge oluşmaktadır. Mirror bölgesi şekil 5.42 a, b ve c de net bir şekilde görülmektedir. Mirror bölgesi hasarın başlangıçı ve mikro çatlakların dallanmaya başladığı bölge olarak tarif edilmektedir. Kırılma bölgelerin diğer taraflarına kıyasla daha pürüzsüz ve düzdür. Şartlandırılmamış saf epoksi reçinenin orta kısmında görülen mirror bölgesi içerisinden başlayan mikro çatlaklar üniform bir şekilde etrafa dağılarak hasar yüzeyini oluşturmaktadır. Mirror bölgesinden uzaklaştıkça oluşan bu mikro çatlaklar, mist bölgesi adı verilen düz fakat donuk bir görüntüye sahip bölgeyi oluşturur. Bu bölge klivaj adımları ve akıntı çizgileri bulunmaktadır. Daha sonra akıntı çizgilerinin devamında pürzülü ve kaba bir yüzey olan nihai hasar (hackle) bölgesi oluşur. Şartlandırılmamış epoksi de net bir şekilde gözlemlenen bu bölgeler, şartlandırma neticesinde oldukça farklılaşmaktadır. Deiyonize su ortamında şartlandırılan numunede yan yüzeyde gözlemlenen mirror bölgesinden diğer yüzeye doğru bir hasar ilerleyişi söz konusudur. NaCl ortamında şartlandırılan numune de ise mirror bölgesi çok küçülmüş ve bu bölgeden etrafa yayılan çatlaklar görülmektedir. Sülfirik asit ve hidroklorik asit ortamında şartlandırılan numunelerde mirror bölgesi gözlemlenmemektedir (Greenhalgh, 2009).



Şekil 5.42. Saf epoksi çekme numunelerinin hasar yüzeylerinin optik mikro yapı görüntüleri **a-** Referans **b-** Deiyonize su, **c-**NaCl, **d-** H_2SO_4 çözeltisi, **e-** HCl çözeltisi

Polimer malzemelerin mekanik testleri neticesinde oluşan hasar yüzeyleri için bazı terimlerin bilinmesi gerekmektedir. Crazing, mozaik şeklinde oluşan yüzey çatlamaları olarak tanımlanır ve polimerler hasar mekanizmasının açıklanmasında sıkça kullanılmaktadır (Baljon ve Robbins, 2001). Crazing yüzeyi, çekme yüküne maruz bırakılan polimerlerin çekme yüküne dik doğrultuda oluşan mikro boşluklar, mikro düzeyde homojenliği bozar (Lee ve ark., 2006). Bu boşluklar, polimer zincirlerinin plastik deformasyonu ile kalıcı hale gelir. Devam eden yükleme neticesinde hasar

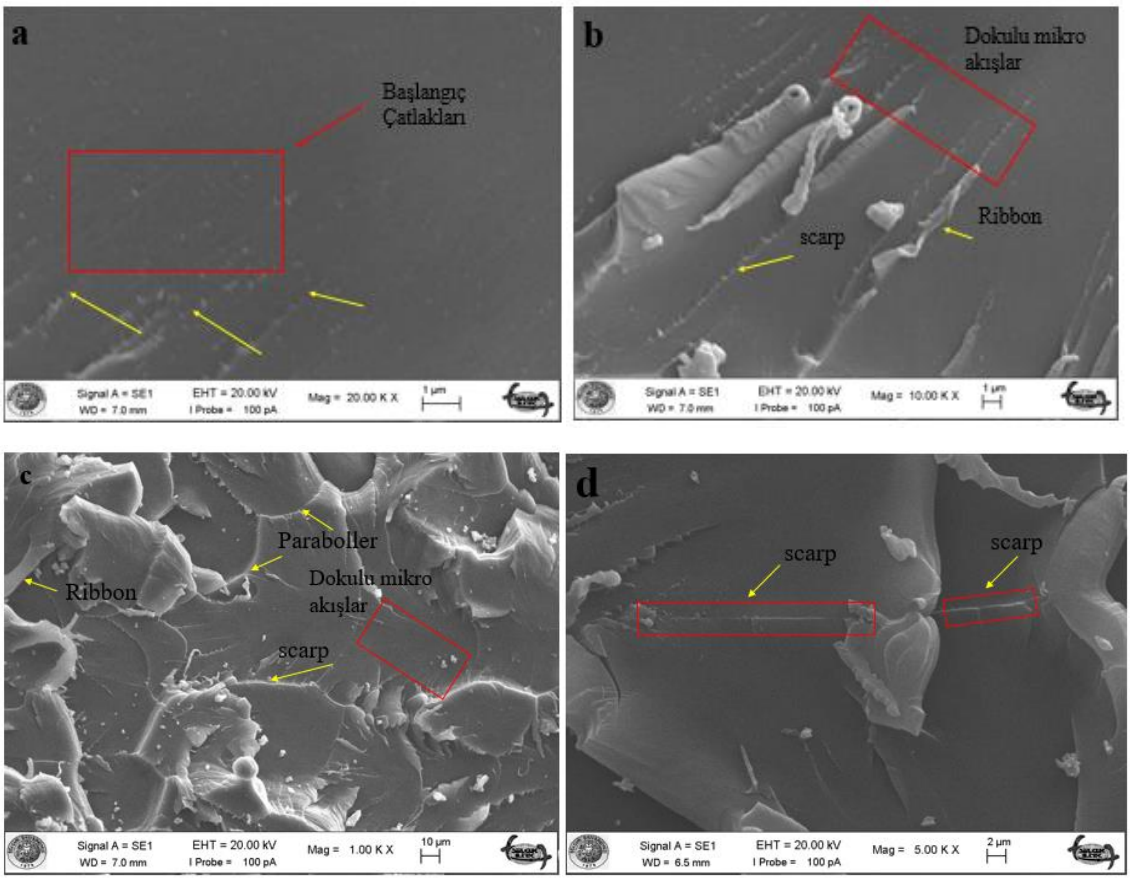
gerçekleşir. Crazing, özet olarak bir başlangıç kırılma mekanizmasıdır ve yüklemenin devamında gelişen hasar morfolojisini doğrudan etkiler.

Gevrek matrisli polimerlerde, kırılma enerjisi oldukça düşüktür ve bu enerji neticesinde hasar gerçekleşirken küçük deformasyonlar gerçekleşir. Bu durum klivaj olarak adlandırılır. Bir diğer hasar yüzeyi durumu ise dokulu mikro akışlar (textured micro flow) olarak adlandırılır. Kırılma neticesinde 30 nm ve üstü boyutlarda nodüller oluşur. Bu nodüller 0.1 μm'lik hatlar üzerinde kümelenir ve bunun neticesinde granüler bir doku oluşur. Dokulu mikro akışlar genellikle gevrek matrislerde sıkça gözlemlenirken, nispeten sünek yapılarda da nadiren gözlemlenebilir. Paraboller, dokulu mikro akışlar içerisinde gözlemlenen bir diğer önemli yapıdır. Bu durum, birincil çatlaklar ilerlerken, ikincil çatlakların da oluşmaya başlaması ile çatlakların çakışması neticesinde oluşur. Bu çakışmalar neticesinde parabolik sınırlar oluşur.

Scarp (klivaj adımları), en önemli matris hasarlarından birisidir (Purslow, 1986). Bu durum, çatlak başlangıcından farklı düzlemlerde birden fazla çatlak ilerlemesi neticesinde oluşur. Ribbons yapısı ise çatlakların scarp formunu oluşturmak için çakışmasından önce birleşmesi ile oluşur (Zhong ve ark., 2007).

Riverlines yapısı, en önemli hasar yüzeylerinden birisidir (Sethi ve ark., 2015). Çatlak düzlemlerinin birleşmesi ve scarp yapısının gelişiminin doğal bir şekilde ilerlemesi neticesinde oluşur (Greenhalgh, 2009)

Şekil 5.43'de deiyonize su ortamında, şekil 5.44'de NaCl ortamında, şekil 5.45'de H_2SO_4 ortamında, şekil 5.46'da ise HCl ortamında şartlandırılmış ve çekme deneyleri yapılmış polimerlerin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde yüklemenin başladığı andan itibaren başlangıç çatlaklarının oluşmaya başladığı ve devamında dokulu mikro akışlı yüzeylerin oluştuğu söylenebilir (şekil 5.43 a ve b). Daha sonra, gevrek malzemelerin hasar yüzeylerinde gözlemlenen parabolik sınırlar, scarp ve ribbon yapıları görülmektedir.

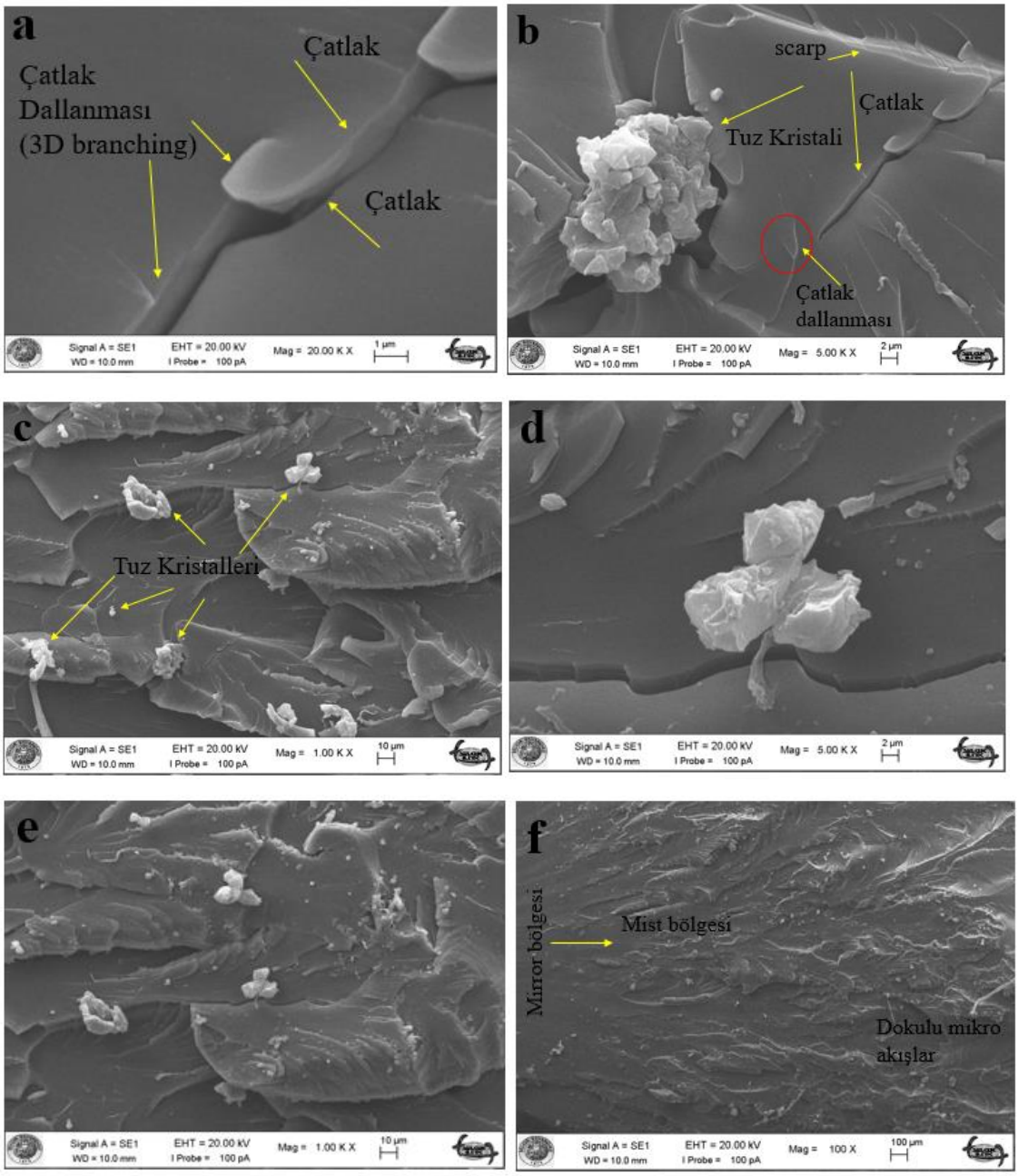


Şekil 4.43. Deiyonize su ortamında şartlandırılan çekme numunelerinin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

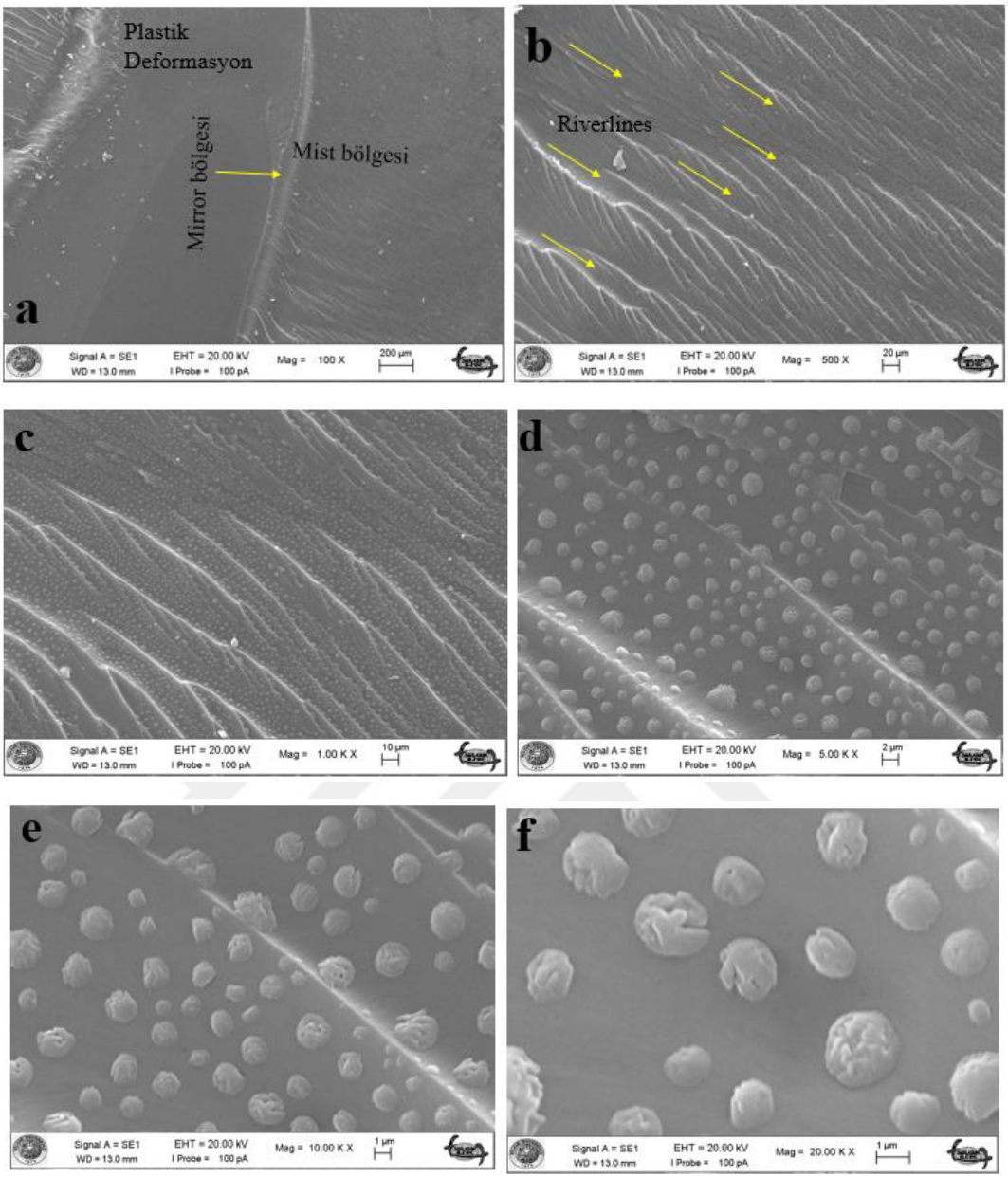
Yüklemenin devamında gözlemlenen üç boyutla çatlak dallanması (3d branching) neticesinde (Gao ve ark., 2012) hasar ilerlemiş ve kırılma gerçekleşmiştir. NaCl ortamında şartlandırılan numunelerin maksimum kuvvetlerinde gözlemlenen artışın, tuz kristallerinin çatlaklar içerisine girerek çatlak saptırıcı ve/veya çatlak durdurucu gibi davranması neticesinde gerçekleştiği düşünülmektedir (şekil 5.44 b ve c). Ayrıca mirror bölgesinin küçülerek mist bölgesinin artışı, maksimum kuvvet değerinin artmasının bir göstergesidir (Sugiman ve ark., 2016).

Asidik ortamlarda şartlandırılan numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde, asidik ortamların epoksi içerisinde bazı yapılarla etkileşime girerek, epoksi yapısının değişmesine ve iç bölgede plastik şekil değişimlerinin oluşmasına neden olduğu düşülmektedir. Sülfirik asit ortamında gözlemlenen riverlines yapısı (şekil 5.45 a, b, c) çatlak dallanmasının arttığını gösterir. Oluşan çok sayıda çatlağın sülfirik asit ortamında şartlandırılan numunenin çekme dayanımını oldukça aşağı çekerek kısa sürede hasara uğramasına sebep olduğu söylenebilir. HCl asit ortamında şartlandırılan numunenin

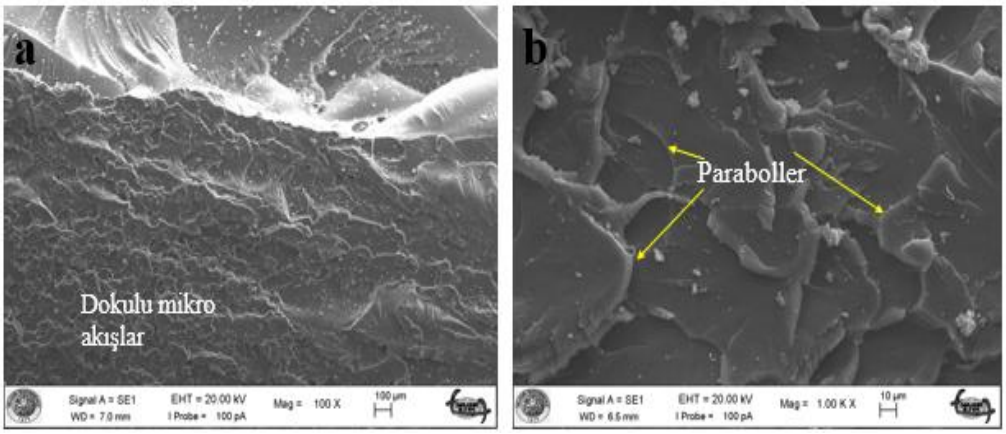
hasar yüzeyine bakıldığında parabolik oluşumlar görülmesi ikincil çatlakların oluşumunu göstermektedir (şekil 5.46 a, b).



Şekil 5.44. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan çekme numunelerinin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri



Şekil 5.45. H_2SO_4 çözeltisinde şartlandırılan çekme numuneleri hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri



Şekil 5.46. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan çekme numunelerinin hasar yüzeyleri SEM görüntüleri

Deiyonize su ortamı açısından bakıldığında, mukavemette fazla bir kayıp olmaması ve tokluğun artması, polimerin sünekliğindeki artıştan kaynaklanmaktadır. FT-IR testlerinde tespit edilen çeşitli şartlandırma ürünleri ve polimer zincirinde meydana gelen değişiklikler, polimer zincirinin şekil değiştirme kabiliyetini artırarak daha tok bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Epoksi reçinenin bozunma sıcaklığında ve erime sıcaklığında dikkate değer bir değişim olmaması, yapının kimyasal olarak fazla bir değişiklik göstermediğini ve söz konusu sünekliğin zincir yapısı ile ilgili olduğunu göstermektedir. Bu numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde referans numunesinde görülen hasar yapılarının değiştiği ve yer yer sünek kırılma belirtilerinin oluşması süneklik artışının bir diğer göstergesidir.

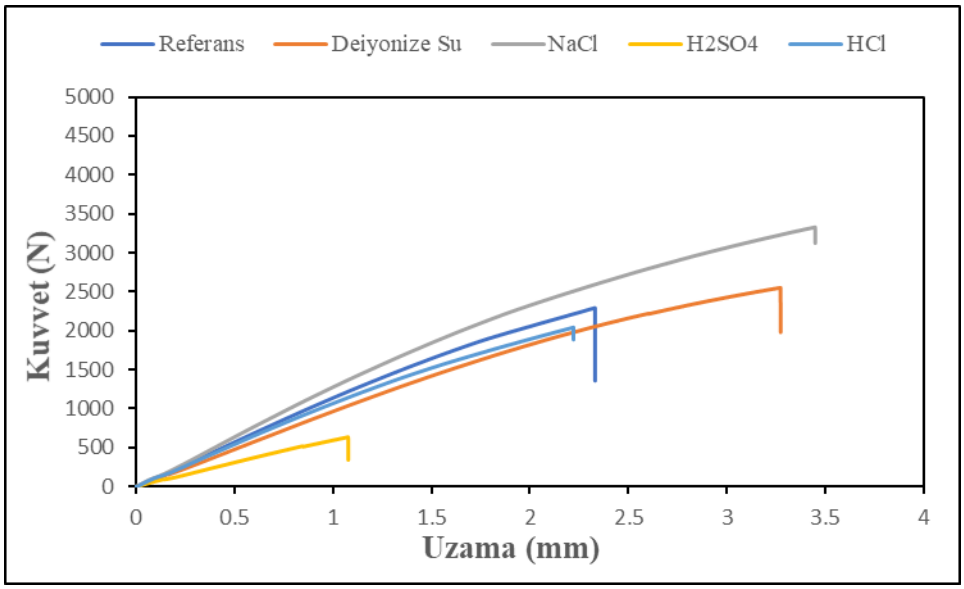
NaCl ortamında şartlandırılan numunelerin mukavemetinde ve tokluğunda artış olduğu görülmektedir. FT-IR sonuçları neticesinde bazı bağ kuvvetlerinin arttığı tespit edilmişti. DSC testleri neticesinde de camsı geçiş sıcaklığının artış göstermesi, polimer zincirindeki bazı bağların güçlendiğinin bir diğer göstergesidir. Deney neticesinde ortaya çıkan hasar yüzeyleri incelendiğinde, çözeltide ki tuz kristallerinin reçine de meydana gelen mikro ve nano çatlakların aralarına ve üzerlerine gelerek çatlak ilerleyişini kısıtlayıcı yönde etki etmektedir. Bu durum mukavemet artışının en önemli sebebi olarak gösterilebilir.

H_2SO_4 ortamında şartlandırılan numunede önemli oranda bir mukavemet düşüşü olduğu görülmektedir. FT-IR sonuçlarına bakıldığında nerdeyse tüm polimer zincirinin sülfirik asit ile etkileşime girdiği ve birçok bağ kuvvetinin azaldığı görülmektedir. DSC testleri neticesinde tespit edilen bozunma sıcaklığında da 40˚C civarında düşüş olması, bu ortamdaki epoksi reçine yapısının şartlandırmadan olumsuz etkilendiğini göstermektedir. Bu testler, mukavemetin neden düştüğünü de nispeten açıklamaktadır. Polimer zincir yapısının tahribatına bağlı olarak bir düşüş gözlemlenmiş fakat mukavemetteki bu düşüş uzamayı artırdığı için tokluk az da olsa artmıştır. Ayrıca hasar yüzeyleri incelendiğinde, çok sayıda mikro çatlaklar ve bunların dallanması neticesinde bir hasar oluşumu söz konusudur.

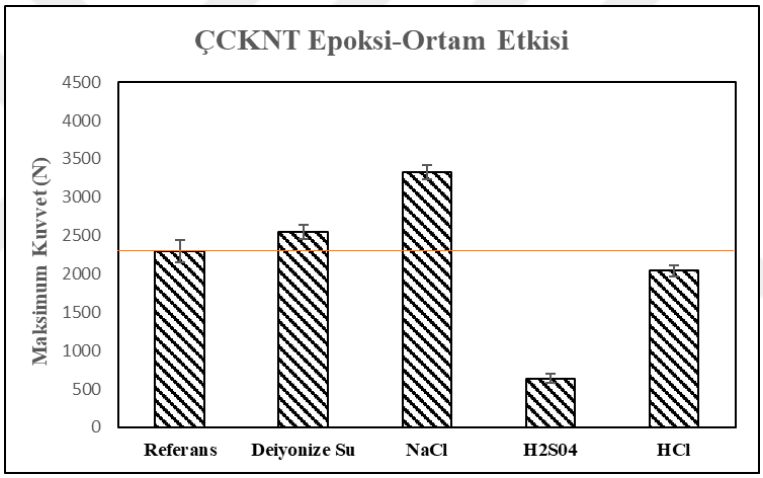
HCl ortamında şartlandırılan numuneler incelendiğinde hem mukavemetinde hem de tokluğunda artış olduğu görülmektedir. FT-IR sonuçlarına bakıldığında, çapraz bağ yoğunluklarında değişiklikler tespit edilmesine rağmen, bozunma sıcaklığının fazla etkilenmemesi, epoksinin yapısal bütünlüğünü muhafaza ettiğinin bir göstergesidir. Hasar yüzeyleri incelendiğinde tespit edilen mikro ve nano boşluklar plastik deformasyonu kolaylaştırarak tokluk artışına neden olmaktadır. Hasar yüzeyinde

gözlemlenen parabolik yüzeylerin ise gerilme doğrultusundaki çatlak ilerleyişini kısıtlayarak mukavemeti artırdığı düşünülmektedir.

Şekil 5.47'de dört farklı ortamda şartlandırılan ve şartlandırılmamış ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin çekme deneyi neticesinde elde edilen kuvvet uzama grafiği, şekil 5.48'de maksimum kuvvetler grafiği ve şekil 5.49'da da gerilme şekil değiştirme grafiği gösterilmektedir. Çizelge 5.6'da ise maksimum kuvvet, maksimum gerilme, maksimum uzama ve şekil değiştirme, tokluk ve elastisite modülü değerleri gösterilmektedir. ÇCKNT takviyesi sonrasında, deiyonize su ve NaCl çözeltisi içerisindeki reçinelerin maksimum kuvvet ve uzama değerleri artarken, asidik ortamlardaki maksimum kuvvet değerleri azalmaktadır (şekil 5.48). Bu değişimlere bağlı olarak tokluk değerleri de deiyonize su ve NaCl çözeltisinde artarken, asidik ortamlarda azalmaktadır. Elastisite modülü değerlerinin ise tamamında düşüş olduğu görülmektedir. ÇCKNT takviyesi, Deiyonize su ortamında emilimi zorlaştırmakta ve buna bağlı olarak ta, polimer zincirinin şartlandırma ortamı tarafından tahribatını sınırlandırarak reçinenin mukavemetini artırmaktadır. Asidik ortamlarda ÇCKNT takviyesi ise, epoksi reçinenin fiziksel ve kimyasal direncini bir miktar artırırken, mekanik direncini olumsuz etkilemektedir. Kütle değişimi grafikleri ile beraber değerlendirildiğinde, asidik ortamlarda şartlandırılan numunelere ÇCKNT eklendiğinde, sıvı emiliminin oldukça arttığı tespit edilmişti. ÇCKNT ilavesi ile sıvı emiliminin artması, ÇCKNT partiküllerinin asidik ortamlarla (özellikle H_2SO_4 ortamı) etkileşime girerek dallanması ve nano gözenekler oluşturarak sıvı emilimini kolaylaştırmaktadır. Bu duruma bağlı olarak mukavemet değerlerinde de düşüş gözlemlenmektedir. Diğer bir deyişle, ÇCKNT partiküllerinin kimyasal ortamlara duyarlı olması ve şeklinin değişmesi neticesinde, etrafında küçük boşluklar oluşturarak mekanik düzensizlik oluşturması ve buna bağlı olarak ta mekanik kilitlenme mekanizmasını bozucu yönde davranması ile gerçekleştiği düşünülmektedir.

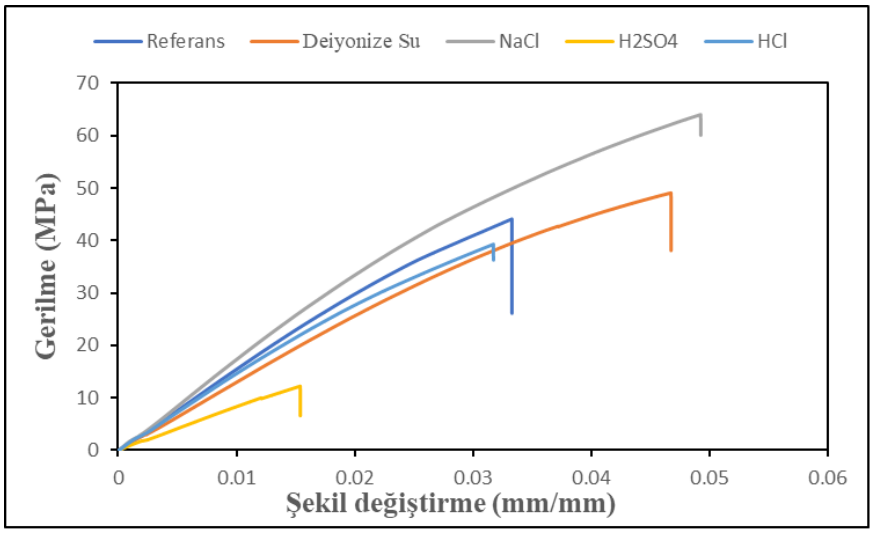


Şekil 5.47. Dört farklı ortamda şartlandırılan ÇCKNT epoksi reçinelerin ve referans numunesinin kuvvet-uzama grafikleri



Şekil 5.48. Referans numunesi ile şartlandırılan ÇCKNT takviyeli numunelerin çekme deneyi ile elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.49'da görülen gerilme- şekil değiştirme grafiğine bakıldığında, referans eğrisinin lineer bir karakteristiği olduğunu, şartlandırma neticesinde de bu durumunun değişmediğini ve reçinelerin lineer karakteristik gösterdiği görülmektedir. Buna bağlı olarak ta şekil değiştirmenin kısıtlandığı da görülmektedir. ÇCKNT ilavesi polimer zincirinin hareketini kısıtlayarak, sünekliğin ve buna bağlı olarakta tokluğun azalmasına neden olmaktadır.

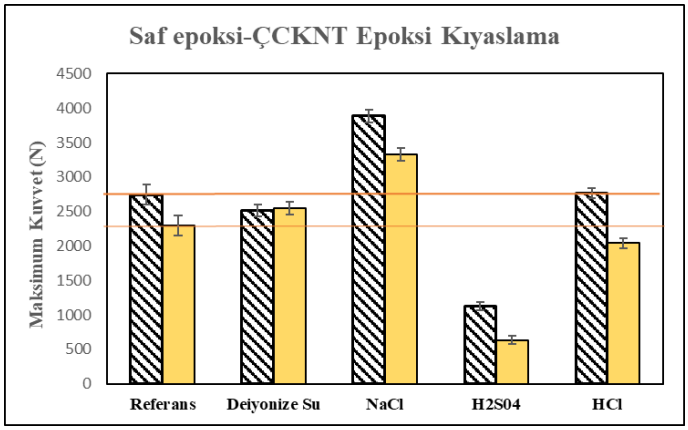


Şekil 5.49. Dört farklı ortamda şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin ve referans numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Çizelge 5.6. ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin çekme testi sonuçları

Parametreler	Referans	Deiyonize Su	NaCl	H2SO4	HCl
Maks. Kuvvet (N)	**2292.8**	2551.19	3327.8	634,33	2042.2
Maks. Gerilme (MPa)	**44.09**	49.06	63.99	12.19	39.27
Maks. Uzama (mm)	**2.33**	3.28	3.45	1.07	2.22
Maks. Şek. Değ. (mm/mm)	**0.033**	0.047	0.049	0.015	0.031
Tokluk (kJ/m^3)	**7.34**	16.56	24.27	0.416	5.94
Elastisite Modülü (GPa)	**1.49**	1.18	1.44	0.88	1.38

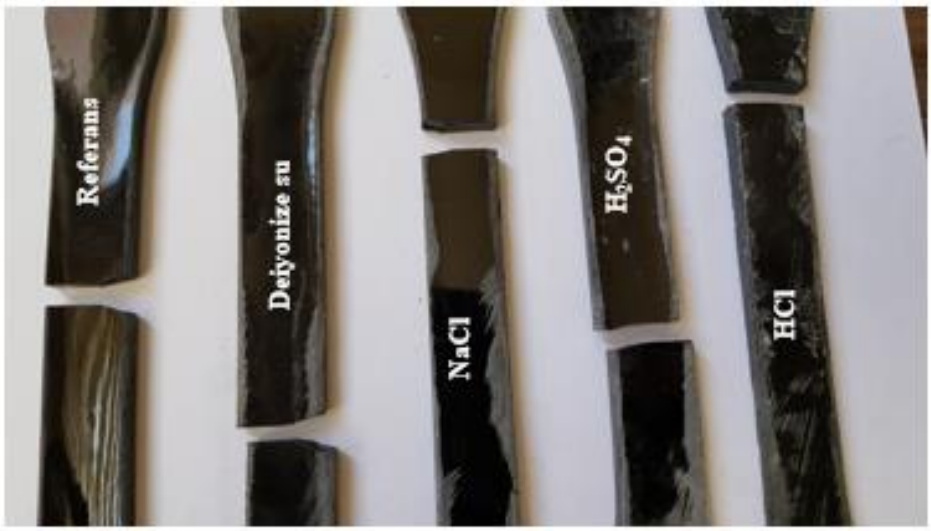
Şekil 5.50'de saf epoksi ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin maksimum kuvvetlerinin kıyaslanması gösterilmektedir. Nanopartikül takviyesi, deiyonize su ortamında şartlandırılan numunenin dayanımını artırırken, asidik ortamlarda ise mukavemeti düşürücü yönde etki etmiştir. NaCl ortamında ise saf epoksiyle yakın sonuçlar göstermektedir.



Şekil 5.50. Saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin maksimum kuvvetleri kıyaslama grafiği

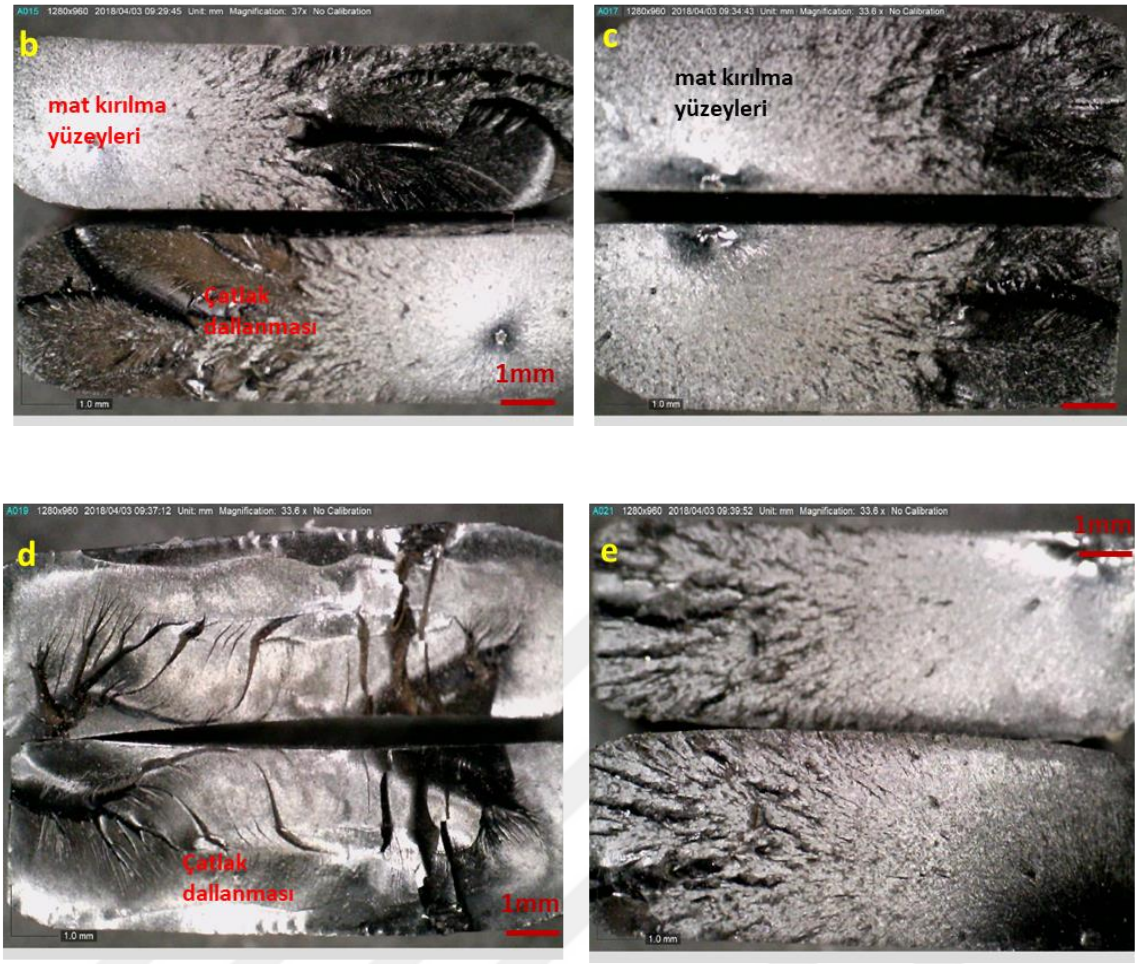
Şekil 4.51'de çekme deneyleri yapılan ÇCKNT takviyeli kırık numuneler, şekil 5.52'de ise bu numumelerin hasar yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri gösterilmektedir. Referans numunede küçük bir mirror bölgesinden başlayan çatlak ilerlemesi mirror bölgesi etrafında mist ve hackle bölgelerine doğru ilerlemektedir. Hackle bölgesinin devamında daha büyük çatlaklar oluşup numune kırılmaktadır.

Şartlandırılmış numunelerde mirror bölgesi küçülmektedir. Deiyonize su ve NaCl ortamında şartlandırılan numunelerde oluşan yüzeyler referans numuneye bir miktar benzese de, asidik ortamlarda ki numunelerde çatlaklar derinleşmekte ve büyümektedir. Özellikle sülfirik asit ortamında şartlandırılan numunelerin yüzeylerindeki makro çatlaklar, bu ortamda şartlandırılan numunelerin mukavemetinin neden düşük olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 5.51. ÇCNKT takviyeli epoksi çekme numuneleri





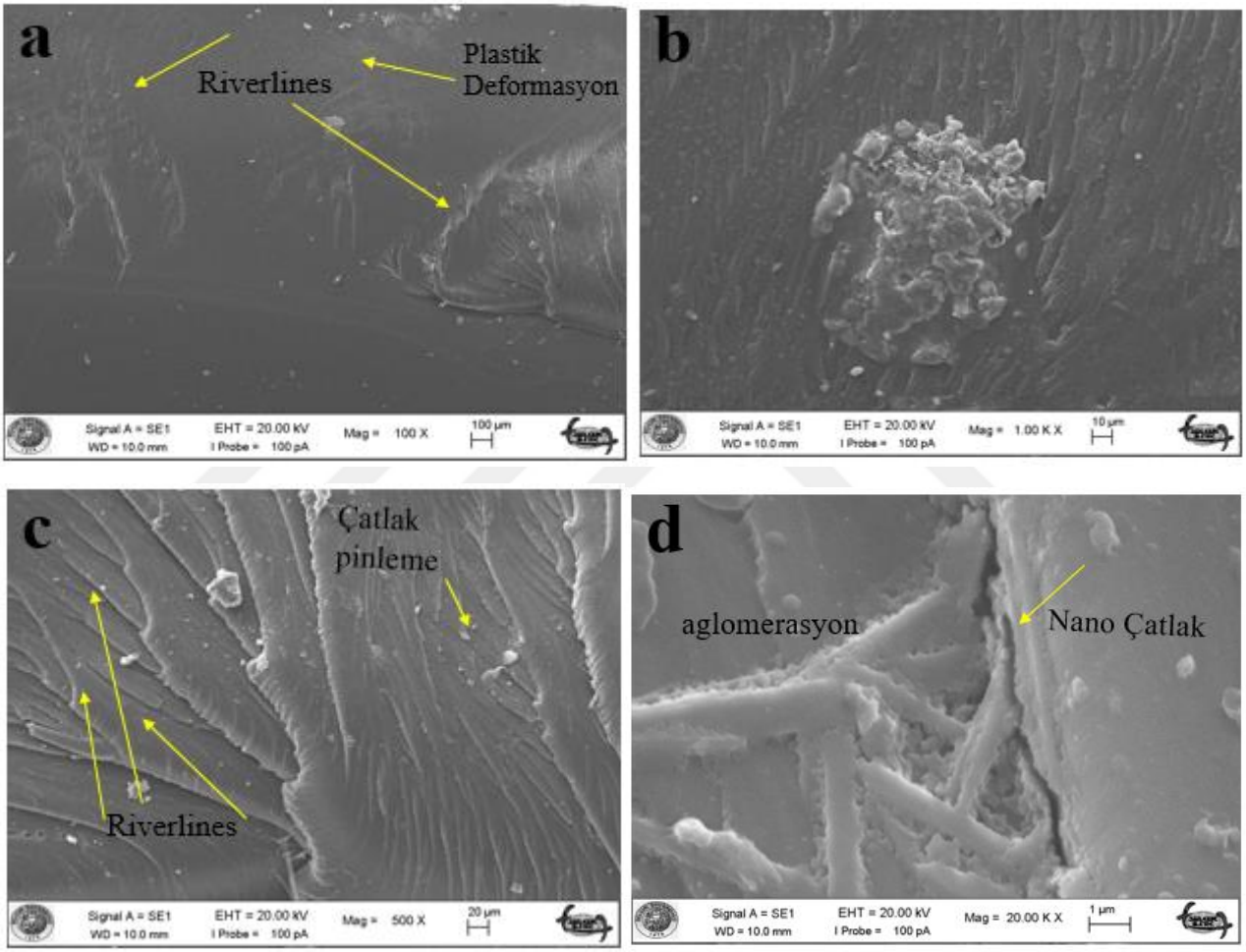
Şekil 5.52. Saf epoksi çekme numunelerinin hasar yüzeylerinin optik mikro yapı görüntüleri **a-** Referans **b-** Deiyonize su, **c**-NaCl, **d-** H2SO4 çözeltisi, **e-** HCl çözeltisi

Şekil 5.53'de deiyonize su ortamında, şekil 5.54'de NaCl ortamında, şekil 5.55 'de H_2SO_4 ortamında, şekil 5.56'da ise HCl ortamında şartlandırılmış ve çekme deneyleri yapılmış polimerlerin hasar yüzeylerinin sem görüntüleri görülmektedir. ÇCKNT takviyesi ile bazı mikro çatlaklar, karbon nano tüpler ile körlenmektedir (şekil 5.53 c) fakat bazı karbon nanotüp partikülleri aglomere olarak homojenliği bozmaktadır (şekil 5.53 b, d). Karbon nanotüpler, çatlak pinleme davranışına ek olarak çatlak köprülemesi yaparak dayanım artırmaktadır (şekil 5.54 e, f). Hasar yüzeyinde gözlemlenen mikro ve nano boşluklar (şekil 5.55 c) plastik deformasyon oluşmasını sağlamaktadır. Polimer malzemelerde gözlemlenen riverlines (şekil 5.54 a, şekil 5.54 c, şekil 5.56 b) ve dokulu mikro akışlar (şekil 5.54 b ve şekil 5.56 b) gevrek bölgelerde görülmektedir.

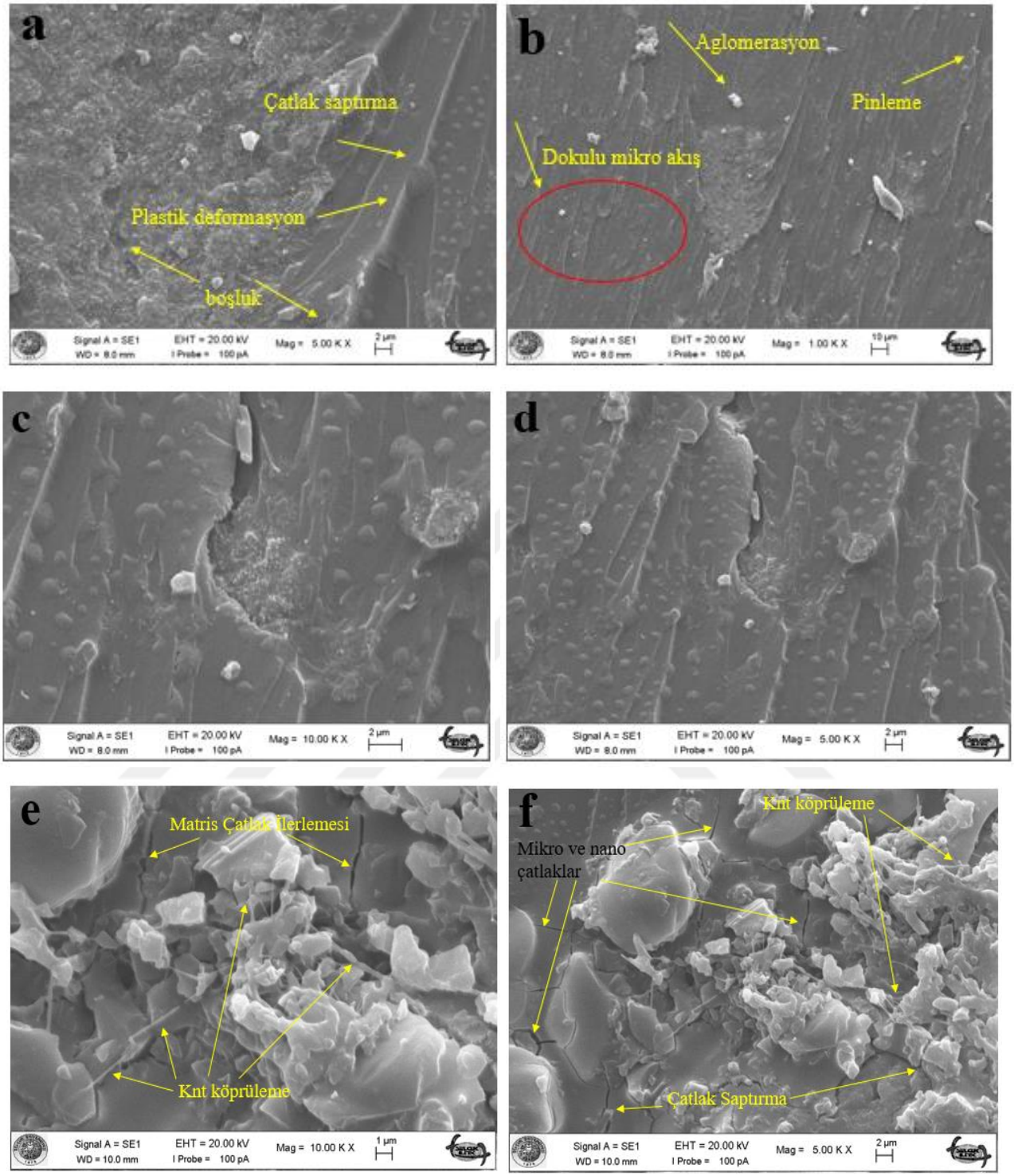
Deiyonize su ve NaCl ortamlarında yer yer gözlemlenen plastik deformasyonlar, şekil değiştirme miktarının neden daha yüksek olduğunu göstermektedir. NaCl

ortamında, tuz kristallerinin çatlak ilerleme mekanizmasına kısıtlayıcı şekilde davranmasına ek olarak gözlemlenen ÇCKNT köprülenmeleri mukavemetin artışını açıklamaktadır.

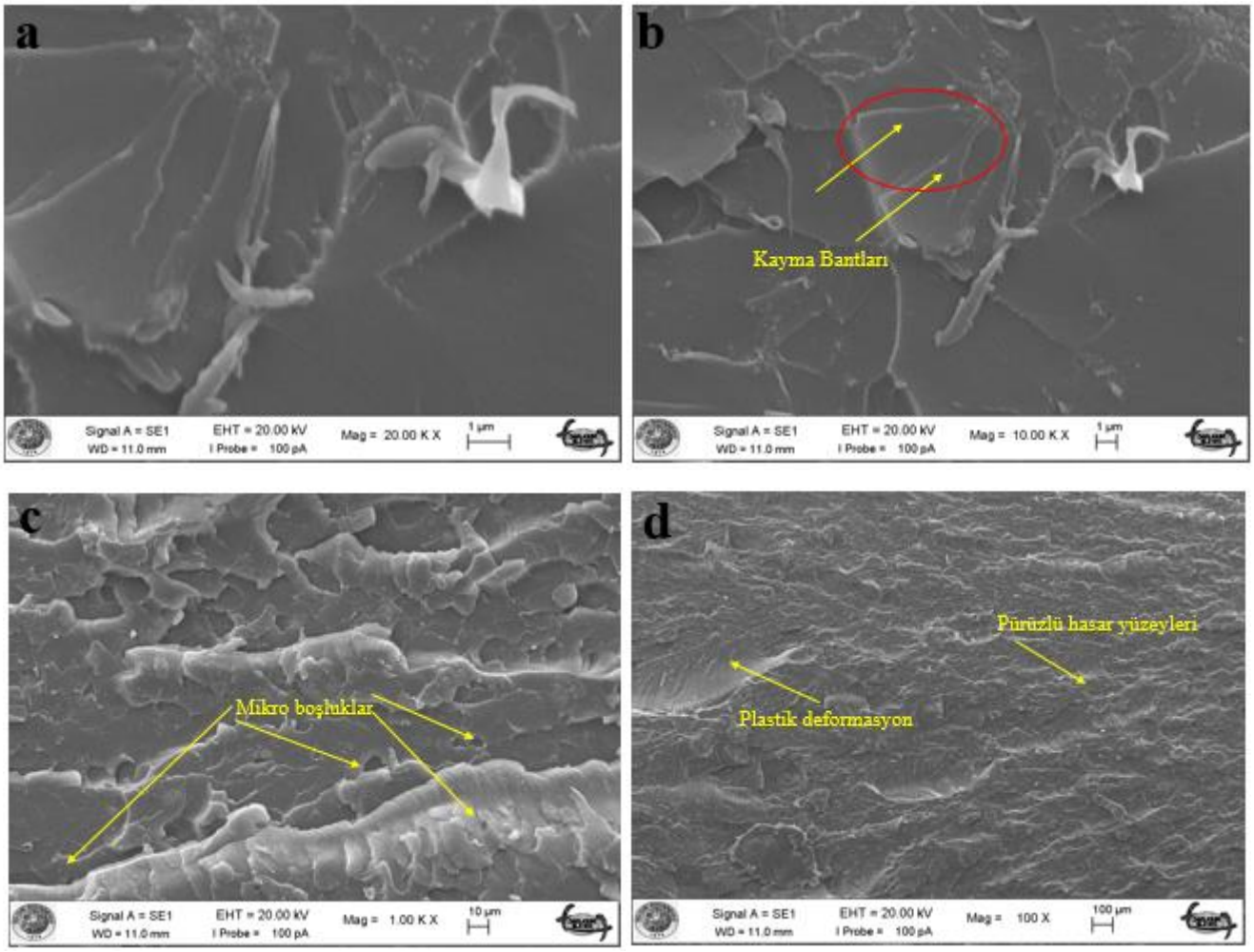
H_2SO_4 ortamında, hasar yüzeyinde gözlemlenen mikro ve nano boşluklar, şartlandırma ortamının reçineyi oldukça tahrip ettiğini göstermektedir. Bir taraftan bu boşluklar oluşurken diğer yandan şekil değiştirmenin kısıtlı olması sebebiyle çok az plastik deformasyon gerçekleşmesi ile numuneler gevrek bir karakteristik göstererek kırılmaktadır.



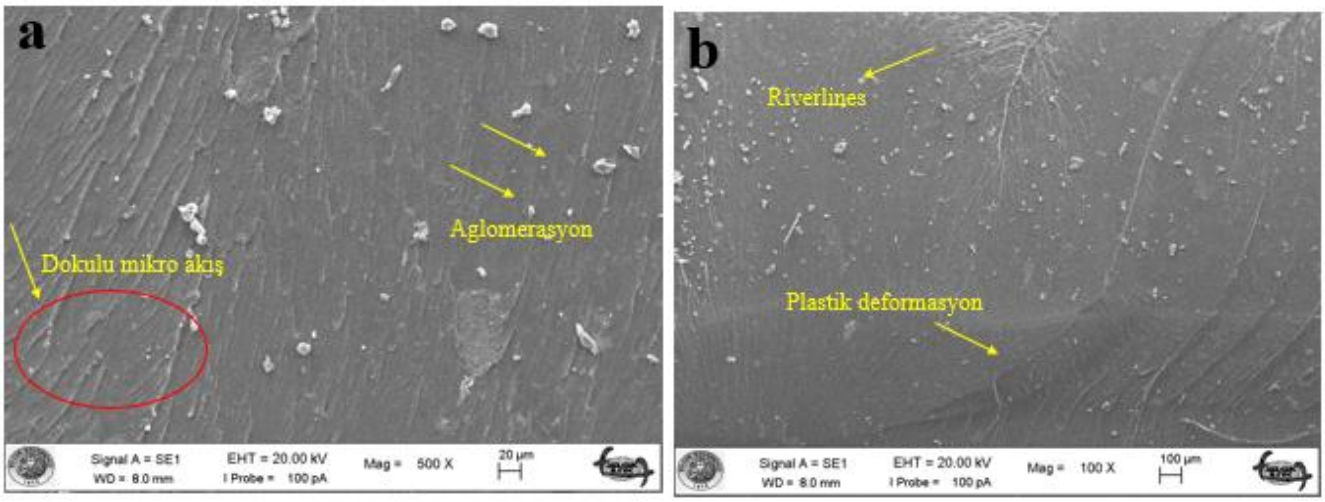
Şekil 5.53. Deiyonize su ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi çekme numunelerinin çekme deneyi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a-** riverlines ve plastik deformasyon görüntüsü, **b-** aglomerasyon **c-**çatlak pinleme ve riverlines, **d-** aglomerasyon ve nano çatlak

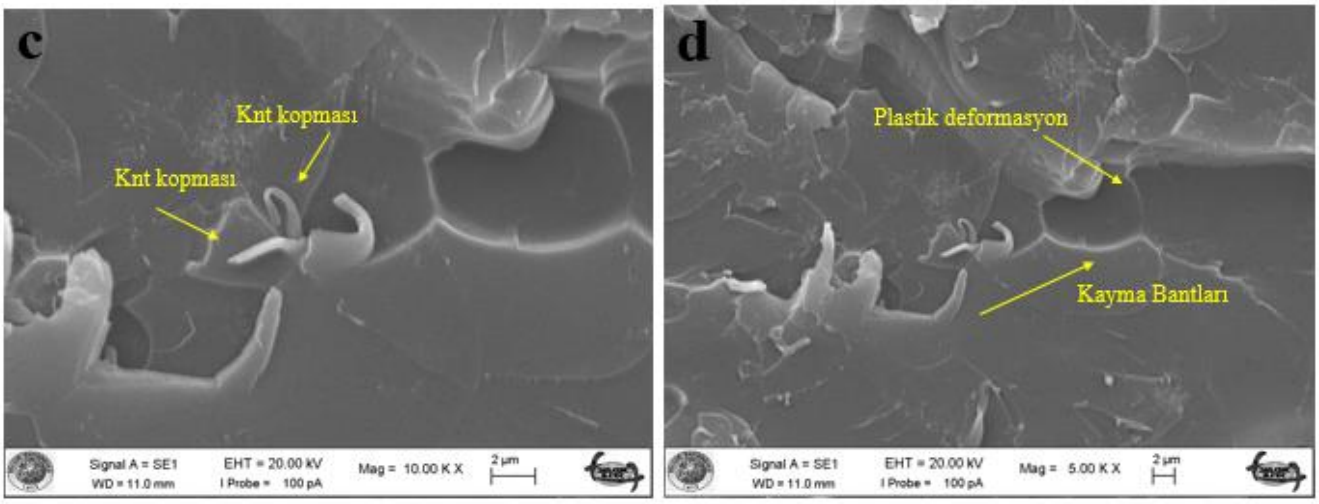


Şekil 5.54. NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi çekme numunelerinin çekme deneyi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a-** çatlak saptırma ve plastik deformasyon görüntüsü, **b-** aglomerasyon **c-d** nano çatlak ve riverlines, **e-** matris çatlak ilerlemesi ve ÇCKNT köprüleme, **f-** çatlak saptırma



Şekil 5.55. H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi çekme numunelerinin çekme deneyi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a, b**- kayma bantları **c**-mikro boşluklar, **d**- plastik deformasyon ve pürüzlü hasar yüzeyleri





Şekil 5.56. HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan ÇCKNT takviyeli epoksi çekme numunelerinin çekme deneyi sonrası hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a-** dokulu mikro akış, **b-** riverlines ve plastik deformasyon **c-**ÇCKNT kopması, **d-** plastik deformasyon ve kayma bantları

5.6. SLJ testi sonuçları

Bu bölümde 4 farklı ortamda şartlandırılan saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinelerin SLJ (mod II kayma testi) testi sonuçları verilmektedir. SLJ testleri neticesinde elde edilen Kuvvet – uzama, gerilme- şekil değiştirme grafikleri hem saf hem de ÇCKNT takviyeli epoksi reçine ile yapıştırılan alüminyum ve kompozit bağlantıları için verilerek yorumlanmaktadır. Deney güvenilirliğini sağlamak için deneyler üçer kez tekrar edilmiş ve hata çubukları ilgili grafikler üzerine eklenmiştir. Şartlandırma ortamlarının, deney neticesinde elde edilen maksimum kuvvet değerlerine etkilerini kıyaslayabilmek için, maksimum kuvvetlerin ortamlara bağlı olarak grafikleri saf ve takviyeli epoksi reçine için alüminyum ve kompozit malzemeler için ayrı ayrı verilmektedir. Hasar yüzeylerinin makro fotoğrafları, optik mikroskop görüntüleri ve SEM görüntüleri de verilerek hasar mekanizmaları tespit edilmektedir. Bu bölüme kadar yapılan diğer deneylerle SLJ testlerinin sonuçları birlikte değerlendirilmekte ve ilgili bölümlerde gösterilmektedir.

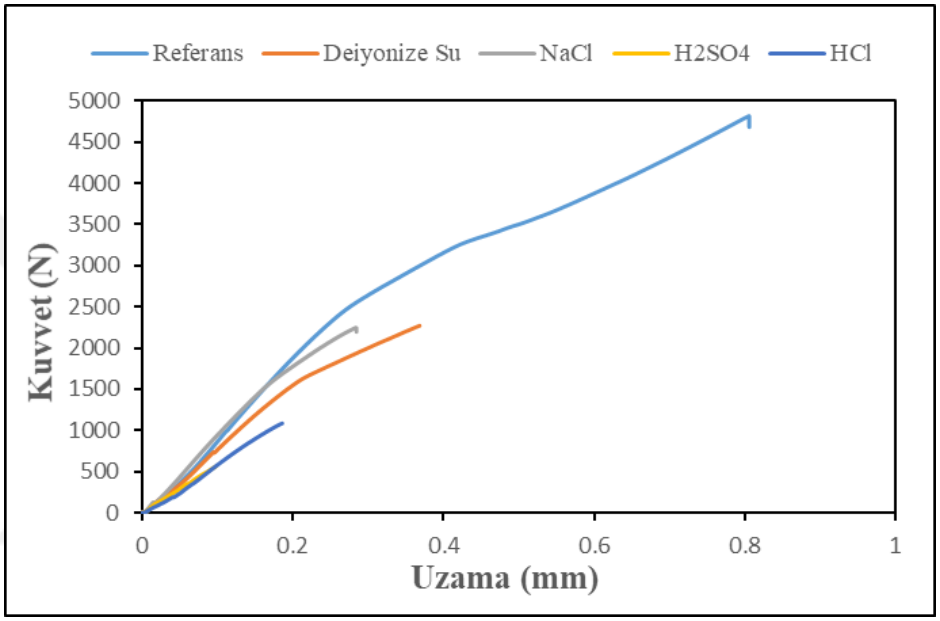
Yapıştırma bağlantılarının kalitesi birleştirme metodu, yapıştırıcı ve yapıştırma malzemelerinin özellikleri, yapıştırıcı kalınlıkları, yüzey hazırlama yöntemleri gibi birçok parametreye bağlıdır. Bunlara ek olarak şartlandırma davranışının da bu parametrelere dahil olması, sonuçların değerlendirilmesini zorlaştırdığı için, yüzey hazırlama, yapıştırıcı kalınlığı ve geometrik parametreler ve partikül takviyesi oranı gibi parametreler sabit tutularak şartlandırmanın bağlantı kalitesi üzerine etkisi incelenmiştir.

Bağlantı kalitesinin analizini yapabilmek için hem polimerin kendisinin şartlandırma davranışını belirlemek hem de bağlantının davranışını belirlemek gerekmektedir. Bu bölümden önce polimerlerin kimyasal, termal ve mekanik özellikleri belirlenerek ilgili bölümlerde değerlendirildikten sonra, yapılan tespitle ve değerlendirmelerin ışığında bağlantı kalitesi sorgulanmaktadır.

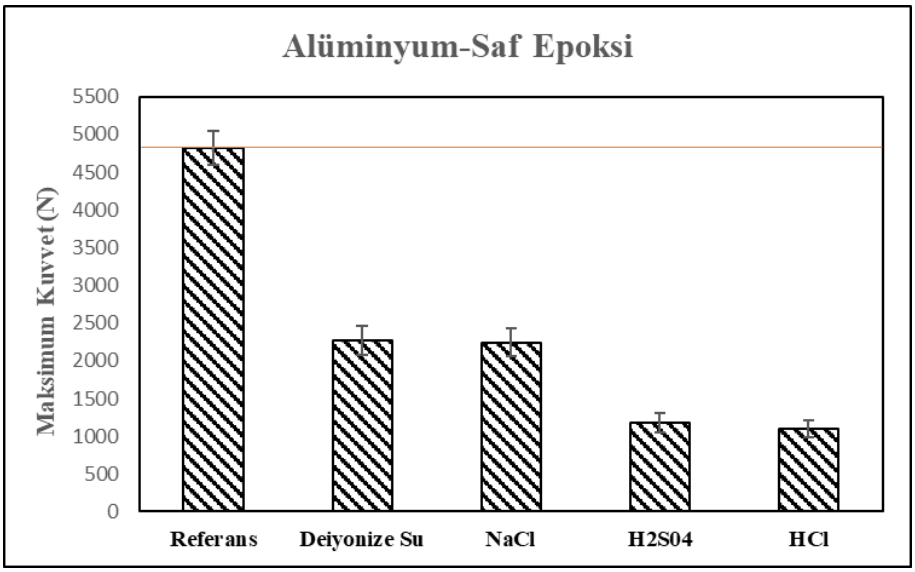
Şekil 5.57'de alüminyum saf epoksi tek taraflı bindirme bağlarının SLJ testleri neticesinde elde edilen kuvvet uzama grafikleri, şekil 5.58'de bu grafiklerden elde edilen maksimum kuvvet değerleri, şekil 5.59'da gerilme şekil değiştirme grafikleri, çizelge 5.7'de de bu deneylerden elde edilen değerler gösterilmektedir. Bu bağlantıda kullanılan epoksi reçinenin (kendisinin) şartlandırma davranışına bakıldığında NaCl ve HCl ortamlarında artış gözlemlenirken, deiyonize su ortamında ve H_2SO_4 ortamında mukavemet kaybı olduğu tespit edilmişti (Çizelge 5.5). Bağlantı mukavemetlerine bakıldığında ise %50'den daha fazla düşüş oluştuğu gözlemlenmektedir. Referans numunesinin hasara uğradığı kuvvet 4818 N olarak ölçülürken, en fazla düşüş sırasıyla 1094 (%77) N ile HCl ortamında, 1177 (%75) N ile H_2SO_4 ortamında, 2246 (% 54) N ile NaCl ortamında ve 2271 (% 52) ile deiyonize su ortamında gözlemlenmektedir. Ayrıca uzama miktarlarında da benzer oranlarda düşüş oluşmaktadır. Bağlantı mukavemetlerinde oluşan bu durum yapıştırıcının kendisinin şartlandırma sebebiyle olumsuz etkilenmesinden ziyade, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin yüzey durumundan kaynaklandığını göstermektedir. Çünkü özellikle NaCl ortamında şartlandırılan numune de referans numunesine göre mukavemet artışı gözlemlenirken, bu yapıştırıcını kullanıldığı bağlantı da böyle bir düşüş meydana gelmesi, şartlandırma ortamlarının doğrudan alüminyum yapıştırıcı ara yüzeyini hedef alarak, bağlantı mukavemetini düşürmektedir.

Alüminyum yüzeyleri yapıştırılmadan önce bir dizi işlem yardımıyla oluşturulan alüminyum oksitlerin homojen bir şekilde yüzeye dağıtılması ile, yapıştırıcının yüzeye tutunması sağlanmaktadır. Bu tutunma neticesinde ise mekanik olarak kilitlenen yapıştırıcı ve yapıştırma yüzeyi mukavemetli bir bağlantı oluşturmaktadır. Ancak, alüminyum yüzeyi üzerinde oluşturulan bu düzenli oksit dağılımı oldukça hassastır ve çevresel şartlara duyarlıdır. Yüzeyleri hazırlanan alüminyumlar 72 saat içerisinde yapıştırılmadığında atmosfer ortamında bile bozularak yüzey pürüzlülüğü homojenliği kaybolmakta ve kontrolsüz bir şekilde yüzey oksitlenmektedir. Atmosfer şartlarında bile böyle bir durum göz önünde bulundurulduğunda, böylesine agresif ortamlarda bekletilen numunelerin yüzey durumlarının olumsuz etkilenmesi oldukça

kolaylaşmaktadır. Özelikle asidik ortamlara oldukça duyarlı olan alüminyum yüzeyleri, şartlandırma ortamına maruz kaldıkça, yüzeyde oluşturulan mekanik kilitlenme mekanizması olumsuz etkilenerek, yapıştırıcının yüzeye tutunmasını zorlaştırmaktadır. Buna ek olarak yapıştırıcı içerisinde oluşan mikro ve nano boşluklar kuvvet aktarımını daha da zorlaştırarak bağlantıların çok düşük kuvvetler altında bile hasara uğramasına neden olmaktadır. Şekil 4.61'de görülen hasar mekanizması grafiği incelendiğinde hasar tipinin kohezifden adezif hasara doğru ilerlemesi de bu düşünceleri destekler niteliktedir.

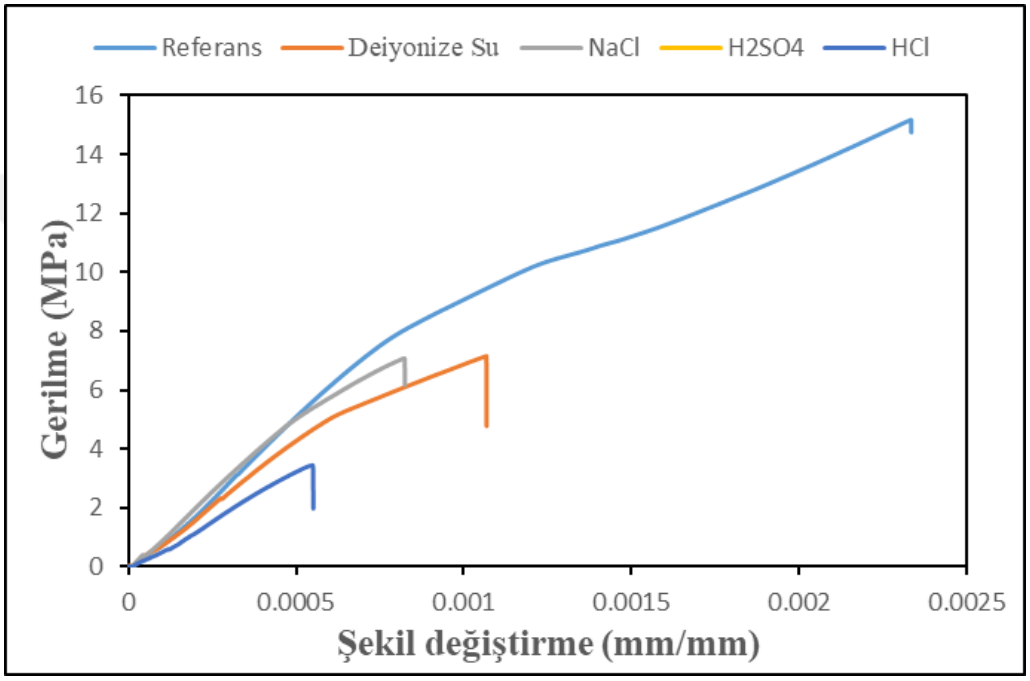


Şekil 5.57. Alüminyum saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen kuvvet uzama grafiği



Şekil 5.58. SLJ testinde elde edilen maksimum kuvvetler kıyaslama grafiği

Yapıştırıcının yük altında, hasara uğrayıncaya kadar tuttuğu toplam enerji olarak tarif edilen tokluk değerleri açısından bakıldığında da kuvvet değerlerine benzer durumlar oluştuğu görülmektedir. Referans numunesinin tokluğu 17.48 k J/ m^3 olarak hesaplanırken, HCl ortamında %95, H_2SO_4 ortamında %93, NaCl ortamında %83, deiyonize su ortamında ise %76 oranında düşüş oluştuğu görülmektedir. Tokluk değerlerinde daha fazla düşüş oluşması, maksimum kuvvet değerlerine ek olarak şekil değiştirmenin de düşmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.59. Alüminyum saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen gerilme şekil değiştirme grafiği

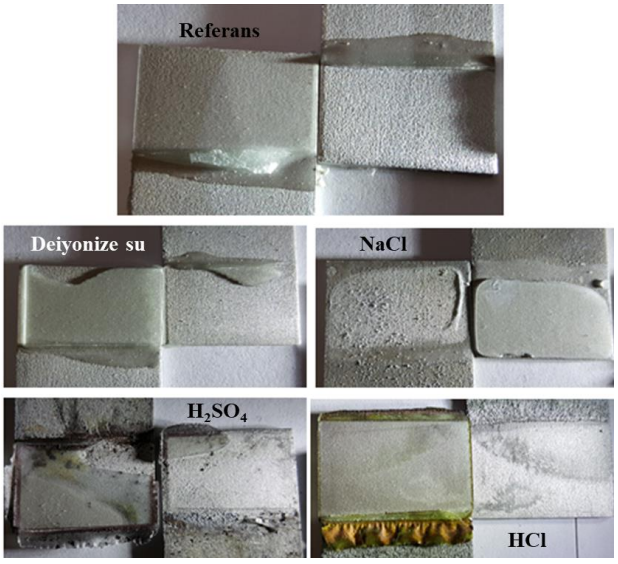
Çizelge 5.7. Alüminyum saf epoksi bağlantılarının SLJ testi sonuçları

Parametreler	Referans	Deiyonize Su	NaCl	H_2SO_4	HCl
Maks. Kuvvet (N)	4818	2271	2246	1177	1094
Maks. Gerilme (MPa)	15.17	7.15	7.10	3.70	3.44
Maks. Uzama (mm)	0.805	0.369	0.284	0.15	0.19
Maks. Şek. Değ. (mm/mm)	0.0023	0.0010	0.00082	0.00064	0.00061
Tokluk (kJ/m3)	17.48	4.11	2.91	1.18	0.96
Elastisite Modülü (MPa)	103.6	78.85	101.14	70.12	74.58

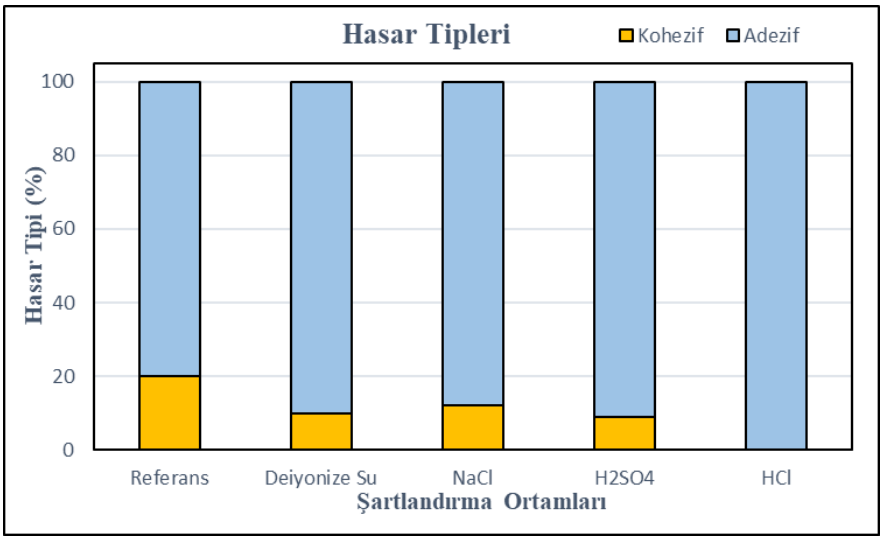
Şekil 5.60'da 4 farklı ortamda şartlandırılan ve şartlandırılmamış alüminyum/ saf epoksi bağlantılarının SLJ testi neticesinde oluşan hasar yüzeylerinin makro hasar yüzeyi görüntüleri görülmektedir. Yapıştırıcılı bağlantılarda yüksek mukavemet ve tokluk elde edilebilmesi için hasar tipinin kohezif hasar olması gerekmektedir. Çünkü

kohezif hasar oluşumu neticesinde gerçekleşen kırılma, yapıda kırılmaya sebep olan çatlakların reçine içerisinde daha fazla yol almasını sağlayarak kırılma enerjisini artırmaktadır. Kırılma enerjisine bağlı olarakta mukavemet ve tokluk değerleri artmaktadır. Kohezif hasar oluşu için ise yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeylerin birbirine iyi tutunması gerekmektedir.

Makro hasar yüzeyleri ve şekil 5.61'de gösterilen hasar grafiği incelendiğinde, referans numunesinde gözlemlenen kohezif hasar tipinin, şartlandırma etkisi ile beraber adezif hasar tipine dönüştüğü görülmektedir. Bu durum, şartlandırıma sıvılarının doğrudan bağlantı arayüzeyini hedef aldığının göstergesidir. Asidik ortamda şartlandırılan numunelere bakıldığında, hasar yüzeylerinde renk değişimleri ve alüminyum bölgelerde daha parlak yüzeylerin oluştuğu görülmektedir. Yapıştırma işleminden önce yüzeyde oluşturulan düzenli alüminyum oksit dağılımları yıkılarak şartlandırma ürünlerinin oluşması, bağlantıda elde edilen mekanik kilitlenmenin zayıflamasına ve numunelerin yüzeyden hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca kırılma yüzeylerinde görülen yapıştırıcı yüzeylerine bakıldığında oldukça parlak olduğu ve hasar ilerleyişinin tamamen ara yüzeyden ilerlediğini göstermektedir. Diğer bir deyişle yapıştırıcı üzerinde herhangi bir deformasyon oluşturacak kuvvet değerlerine ulaşılamadan hasar gerçekleşmiştir. Bu nedenle gevrek yapıştırıcı kırılma yüzeyleri oluşmaktadır. Oysa reçinenin çekme testi sonuçlarına bakıldığında tüm ortamlarda, yapıştırıcının şekil değiştirme miktarının arttığı görülmektedir. Oysa bu bağlantılarda yükleme etkisi ile ara yüzeyde oluşan başlangıç çatlağı, yapıştırıcı ile karşı yüzey arasındaki mekanik kilitlenmenin bir anda çözülmesine neden olmaktadır.



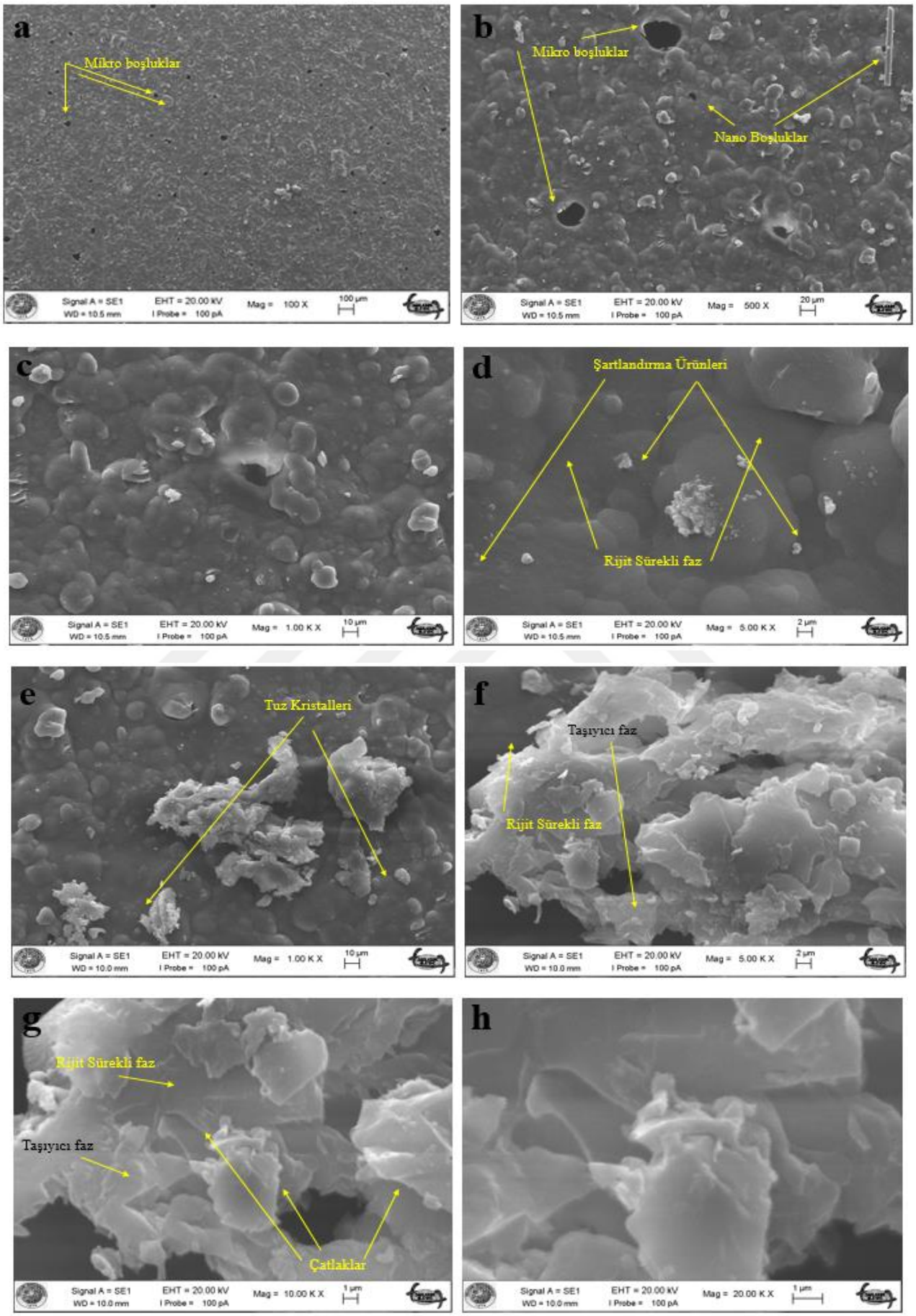
Şekil 5.60. Alüminyum saf epoksi bağlantılarının hasar yüzeyleri

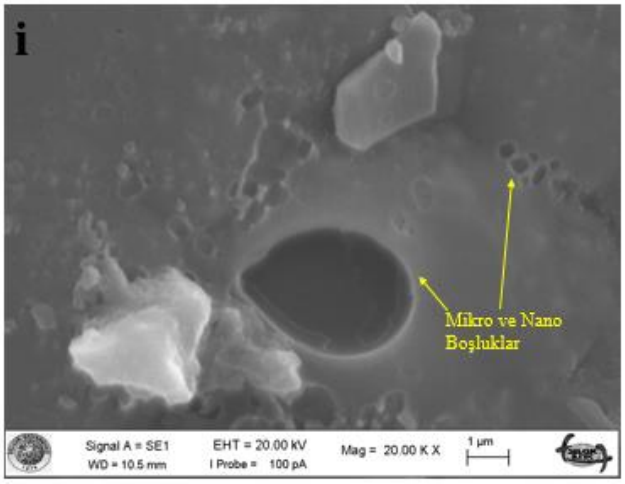


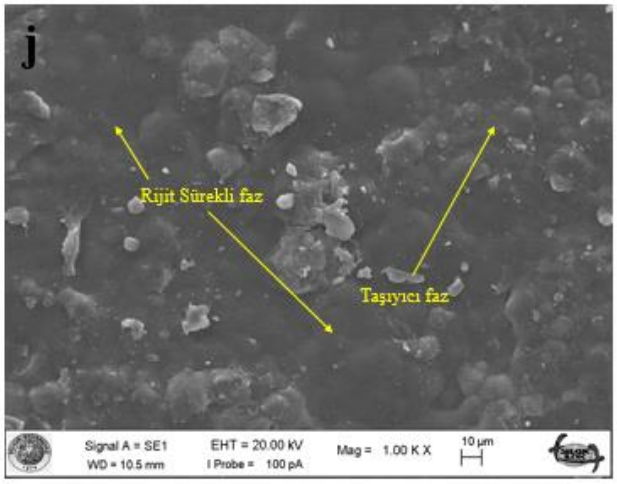
Şekil 5.61. Alüminyum saf epoksi bağlantılarının hasar tipi grafiği

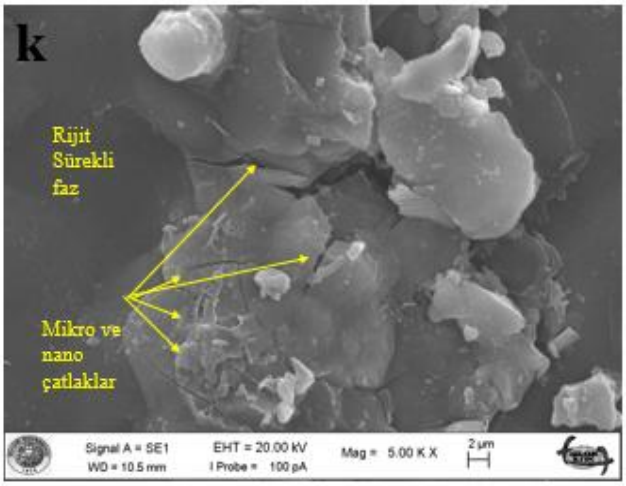
Bağlantıların hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri şekil 5.62'te görülmektedir. Referans numunesine bakıldığında (şekil 5.62 k) kohezif hasar sebebiyle oluşan taşıyıcı faz görülmektedir. Taşıyıcı fazın sol tarafından itibaren ise adezif hasar göstergesi olan rijit sürekli faz bulunmaktadır. Taşıyıcı faz içerisinde oluşan mikro ve nano çatlaklarlar, rijit sürekli faz bölgesine doğru dallanarak bu bölgenin başlangıcında gevrek kırılma sebebiyle kaybolmaktadır. Referans numunesi dışında, nispeten daha az mukavemet kaybının gözlendiği deiyonize su ve tuzlu su ortamlarında (şekil 5.62 e,f,g,h,j) az miktarda taşıyıcı fazlar bulunmaktadır. Bu bölgeler, alüminyum yüzeylere daha güçlü bir şekilde tutunduğu için, kısıtlı da olsa kuvvet aktarımına olanak sağlamaktadır. Asidik ortamlarda ise (şekil 5.62 a,d,l,m,n,o,ö) hasar yüzeyinin tamamı rijit sürekli faz bölgelerinden oluşmaktadır. Ayrıca, yüzeyde mikro ve nano boşluklar oluştuğu görülmektedir. Bu boşluklar üretim kaynaklı oluşabileceği gibi, asidik ortamların tahribat gücünün yüksek olması sebebiyle, yüzeyle etkileşime giren çözeltilerin oluşturması da muhtemeldir. Kütle değişimi grafiklerinde asidik ortamlarda artan sıvı emilimi miktarı bu düşünceyi destekler niteliktedir.

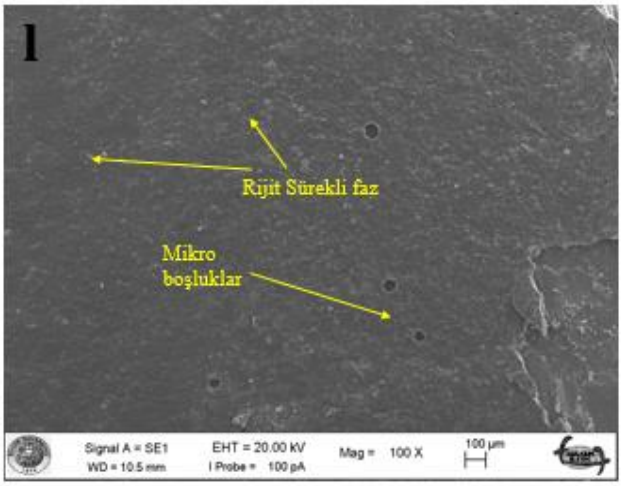
Yüzeydeki nano boşluklar bir araya geldiklerinde, yüke maruz kalınca nano çatlakların oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu nano çatlaklar yapı içerisinde ilerleyemeden hasar gerçekleşmektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi, oluşan çatlaklar düşük kırılma enerjilerine sahiptir. Çatlakların ilerlemesinin kısıtlı olması tokluk değerlerinin neden düşük olduğunu açıklamaktadır.

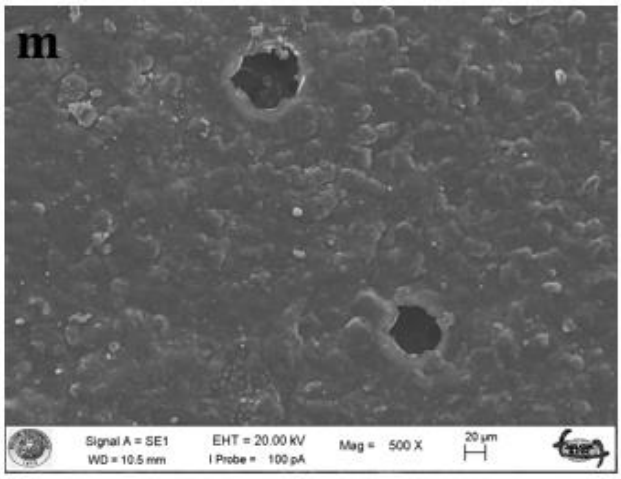

a
Mikro boşluklar
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 100 X
100 µm
b
Mikro boşluklar
Nano Boşluklar
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 500 X
20 µm
c
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 1.00 K X
10 µm
d
Şartlandırma Ürünleri
Rijit Sürekli faz
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 5.00 K X
2 µm
e
Tuz Kristalleri
Signal A = SE1
WD = 10.0 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 1.00 K X
10 µm
f
Taşıyıcı faz
Rijit Sürekli faz
Signal A = SE1
WD = 10.0 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 5.00 K X
2 µm
g
Rijit Sürekli faz
Taşıyıcı faz
Çatlaklar
Signal A = SE1
WD = 10.0 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 10.00 K X
1 µm
h
Signal A = SE1
WD = 10.0 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 20.00 K X
1 µm

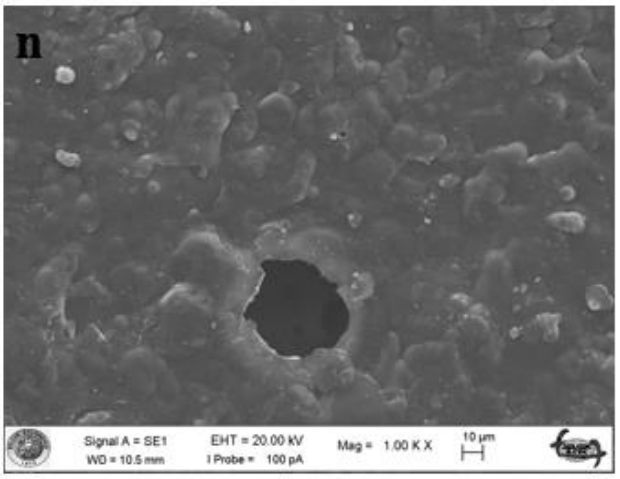

i
Mikro ve Nano Boşluklar
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 20.00 K X
1 µm

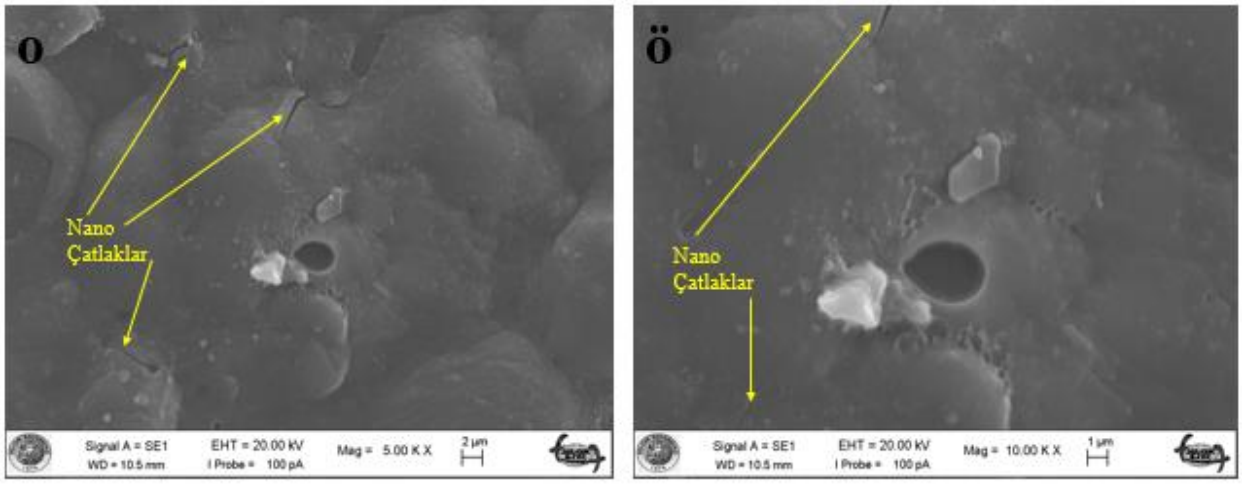

j
Rijit Sürekli faz
Taşıyıcı faz
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 1.00 K X
10 µm


k
Rijit Sürekli faz
Mikro ve nano çatlaklar
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 5.00 K X
2 µm


l
Rijit Sürekli faz
Mikro boşluklar
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 100 X
100 µm

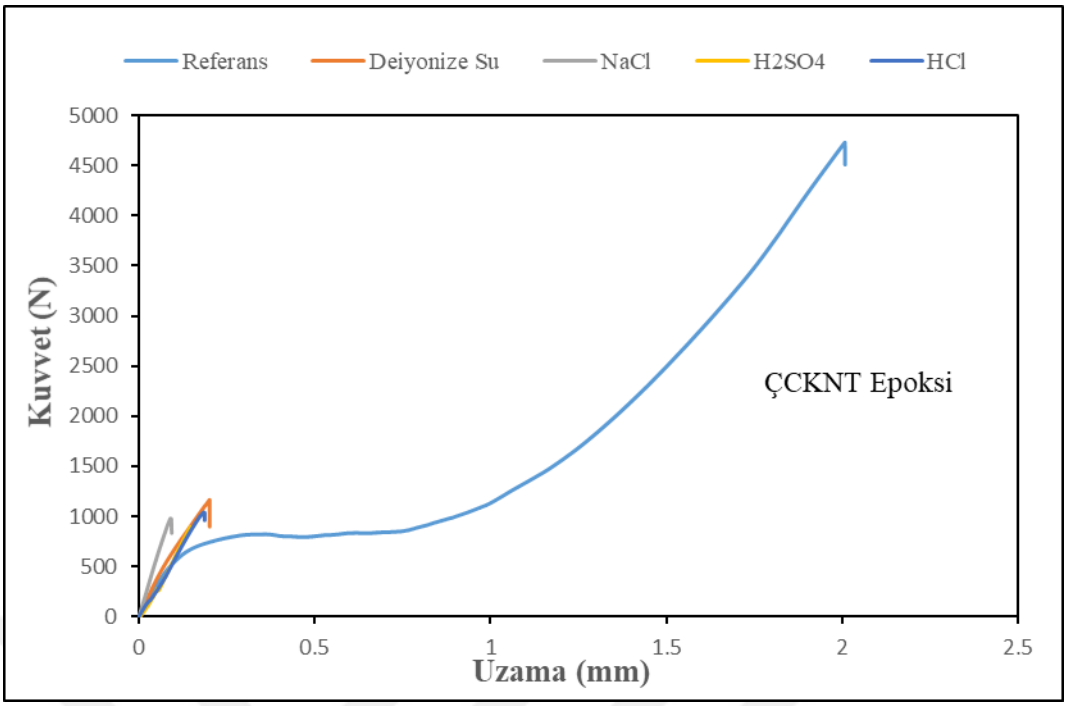

m
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 500 X
20 µm


n
Signal A = SE1
WD = 10.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 100 pA
Mag = 1.00 K X
10 µm

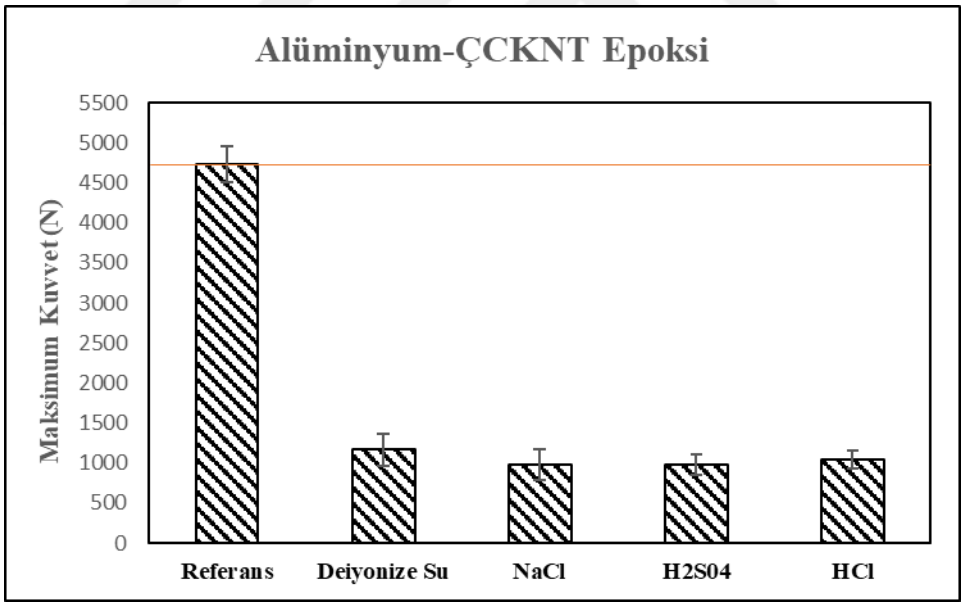


Şekil 5.62. Alüminyum saf epoksi yapıştırıcı bağlantılarının SLJ testi sonunda elde edilen hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a, b-** mikro ve nano boşluklar, **c, d-** şartlandırma ürünleri ve rijit sürekli faz, **e, f, g, h-** tuz kristalleri, taşıyıcı faz, **i, j, k, l, m, n-** mikro ve nano boşluklar ve fazlar

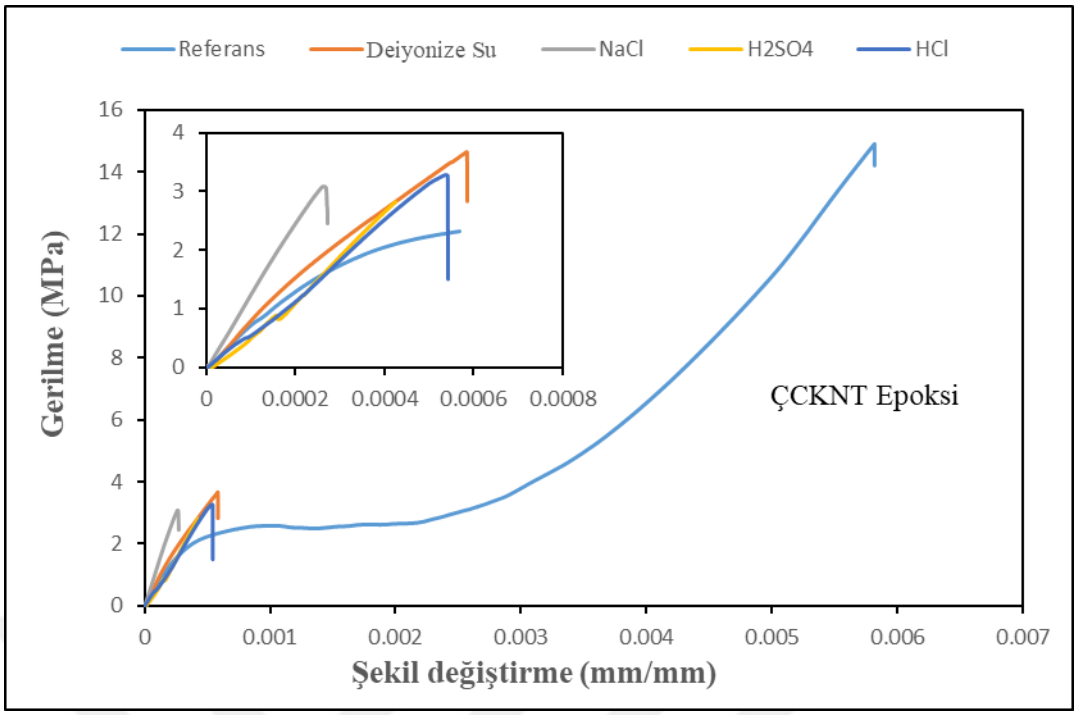
Şekil 5.63'de alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi tek taraflı bindirme bağlantılarının SLJ testleri neticesinde elde edilen kuvvet uzama grafikleri, şekil 5.64'de bu grafiklerden elde edilen maksimum kuvvet değerleri, şekil 5.65'de gerilme şekil değiştirme grafikleri, çizelge 5.8'de de bu deneylerden elde edilen tüm değerler gösterilmektedir. Bu bağlantıda kullanılan ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin (kendisinin) şartlandırma davranışına bakıldığında deiyonize su ve NaCl ortamlarında artış gözlemlenirken, HCl ve H_2SO_4 ortamlarında mukavemet kaybı olduğu tespit edilmişti. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların mukavemetine bakıldığında tüm şartlandırma ortamlarının dayanımı düşürdüğü görülmektedir. Referans numunesinin maksimum kuvveti 4731 N iken, deiyonize su ortamında %75 oranında, NaCl ortamında %79 oranında, H_2SO_4 ortamında %78 oranında , HCl ortamında ise %76 oranında düşüş olduğu görülmektedir. Mukavemete ek olarak, şekil değiştirme miktarlarında ve buna bağlı olarakta tokluk değerlerinde büyük oranda düşüş görülmektedir. Referans numunesinin tokluk değeri 37.2 k J/m^3 seviyelerinde iken 1 k J/m^3 seviyelerine kadar düşmektedir. Epoksi reçineye ÇCKNT ilavesinin sıvı emilimini (özellikle asidik ortamlarda) artırdığı, kütle değişimi grafiklerinde belirtilmişti. Bir diğer husus ise alüminyum yüzeylerinin şartlandırma prosesine olan duyarlılığıdır. Bu iki tespit birleştirildiğinde, yapıştırıcı ve alüminyum ara yüzeyinin aşırı sıvı temasına bağlı olarak tahrip olduğu söylenebilir.



Şekil 5.63. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen kuvvet uzama grafiği



Şekil 5.64. SLJ testinde elde edilen maksimum kuvvetler kıyaslama grafiği

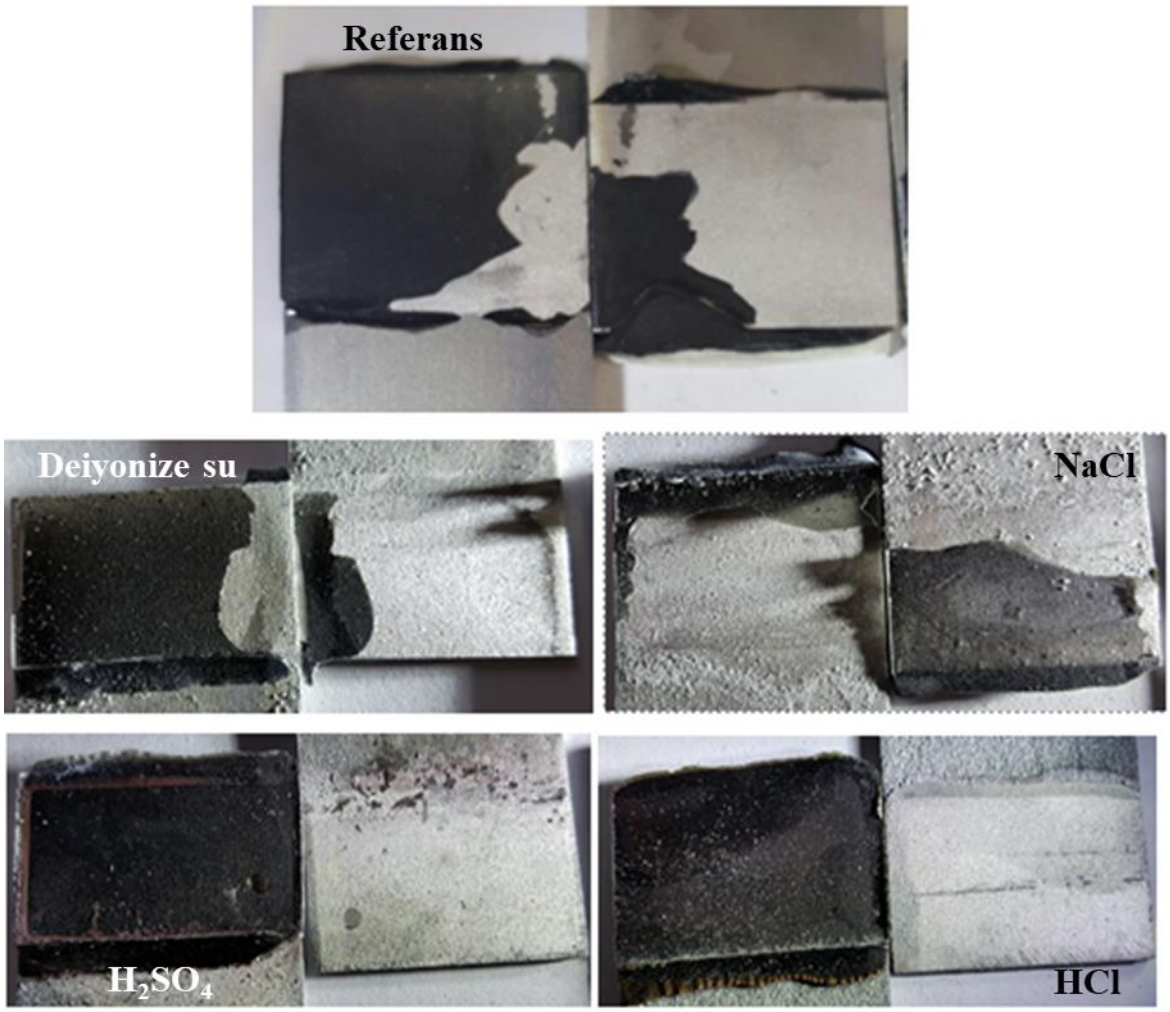


Şekil 5.65. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen gerilme şekil değiştirme grafiği

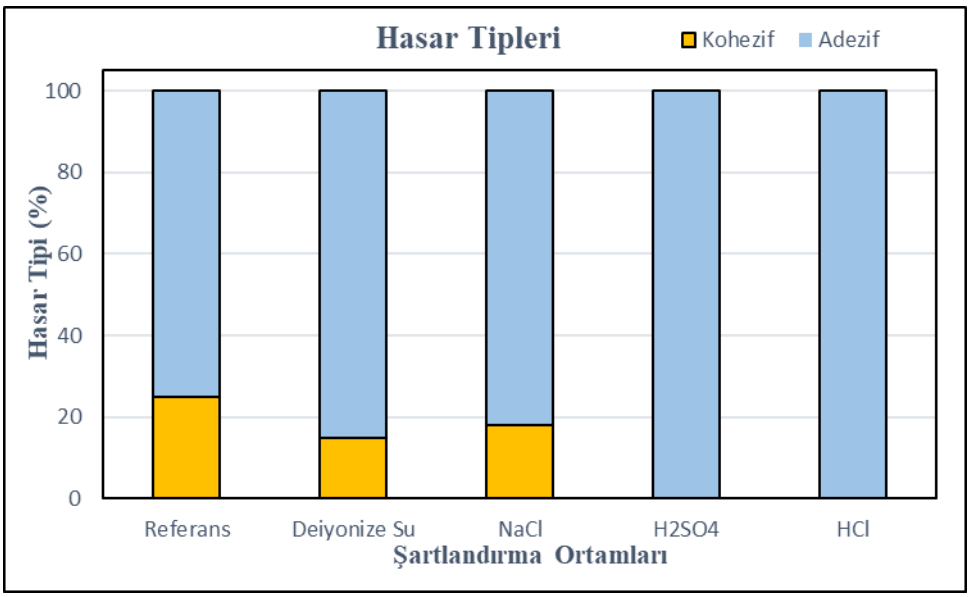
Çizelge 5.8. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının SLJ testi sonuçları

Parametreler	Referans	Deiyonize Su	NaCl	H_2SO_4	HCl
Maks. Kuvvet (N)	**4730.55**	1164.89	978.19	982.82	1039.64
Maks. Gerilme (MPa)	**14.90**	3.66	3.08	3.09	3.27
Maks. Uzama (mm)	**2.001**	0.202	0.15	0.14	0.187
Maks. Şek. Değ. (mm/mm)	**0.0058**	0.00058	0.00027	0.00050	0.00055
Tokluk (kJ/m^3)	**37.2**	1.12	0,51	0,61	0,86
Kayma Modülü (MPa)	**46.65**	71.91	131.5	78.15	70.05

Şekil 5.66'da 4 farklı ortamda şartlandırılan ve şartlandırılmamış alüminyum/ saf epoksi bağlantılarının SLJ testi neticesinde oluşan hasar yüzeylerinin makro hasar yüzeyi görüntüleri, şekil 5.67'de de hasar mekanizması grafiği görülmektedir. Referans numunesinde, deiyonize su ve NaCl ortamlarında şartlandırılan numunelerde kohezif hasar gözlemlenirken asidik ortamlarda tamamen adezif hasar görülmektedir. Hasar yüzeylerindeki alüminyum alanlara bakıldığında bütün yüzeylerin pürüzlülüğünü kaybettiği görülmektedir. Bu durum, şartlandırma ortamlarının doğrudan arayüzeyi hedef aldığının bir diğer göstergesidir. Buna ek olarak, ÇCKNT takviyesinin sıvı emilimini artırması ve buna bağlı olarak reçineyi tahrip etmesi sebebiyle reçine içerisinde de makro, mikro ve nano seviyelerde gözenekler oluştuğu görülmektedir. Bu gözenekler de bağlantının yük aktarımını zorlaştırmaktadır.



Şekil 5.66. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının hasar yüzeyleri

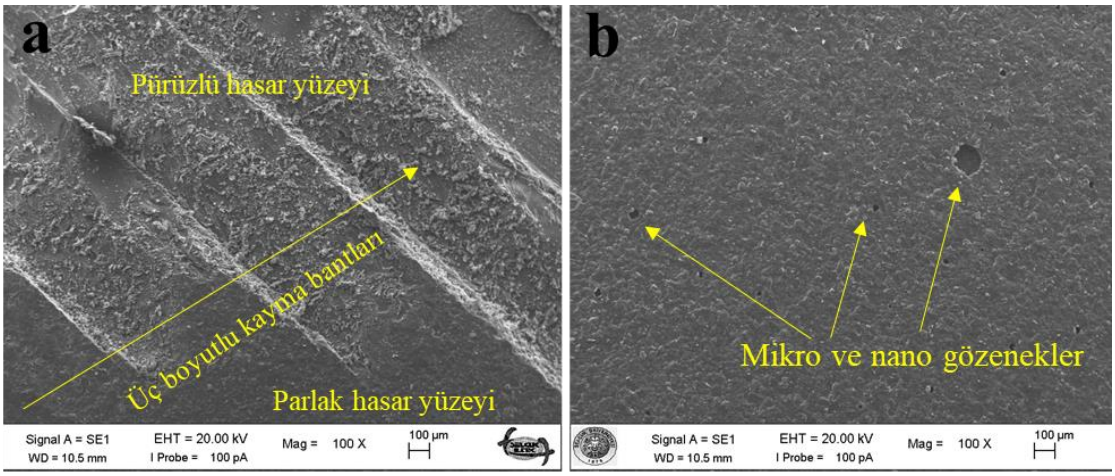


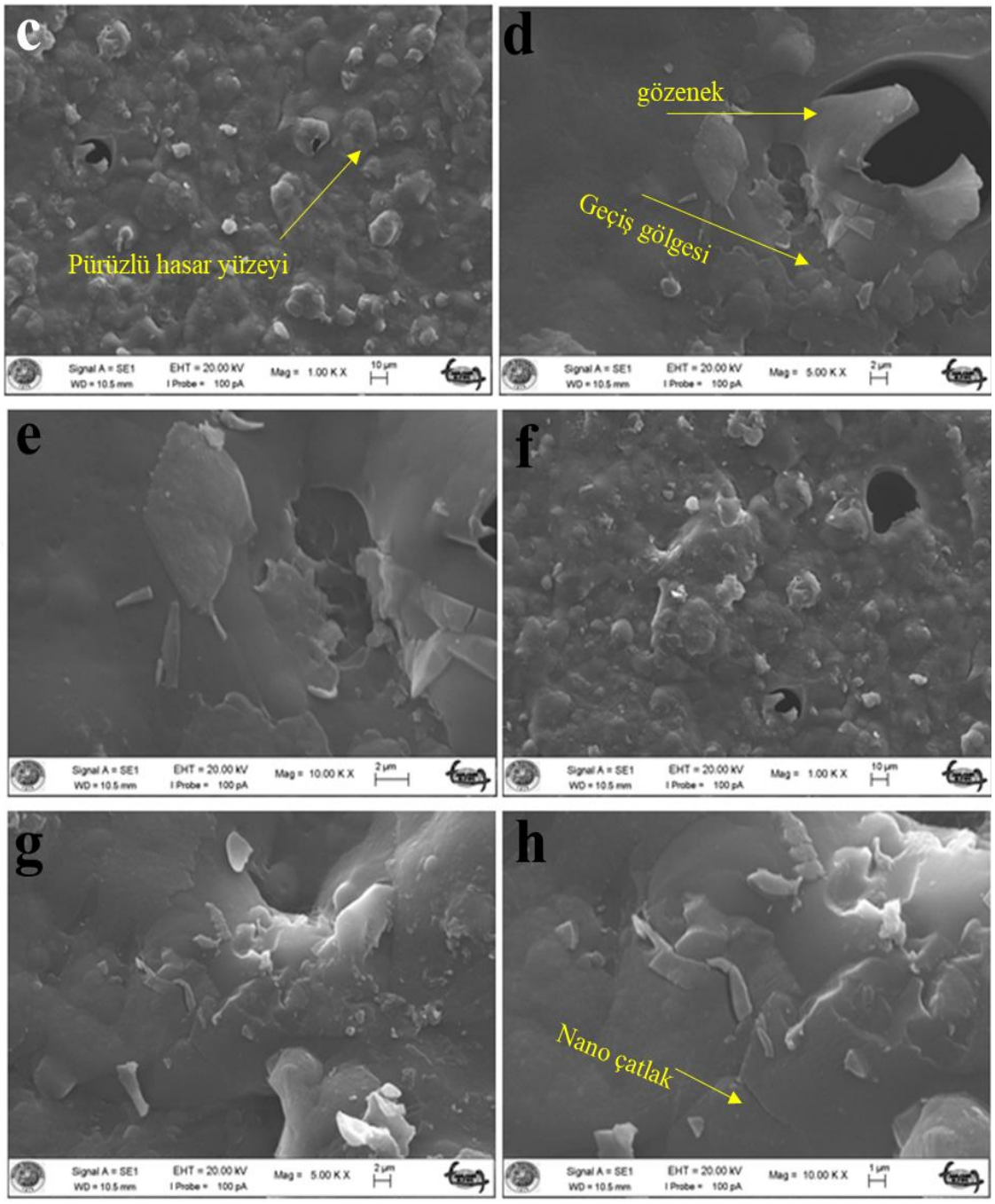
Şekil 5.67. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının hasar tipi grafiği

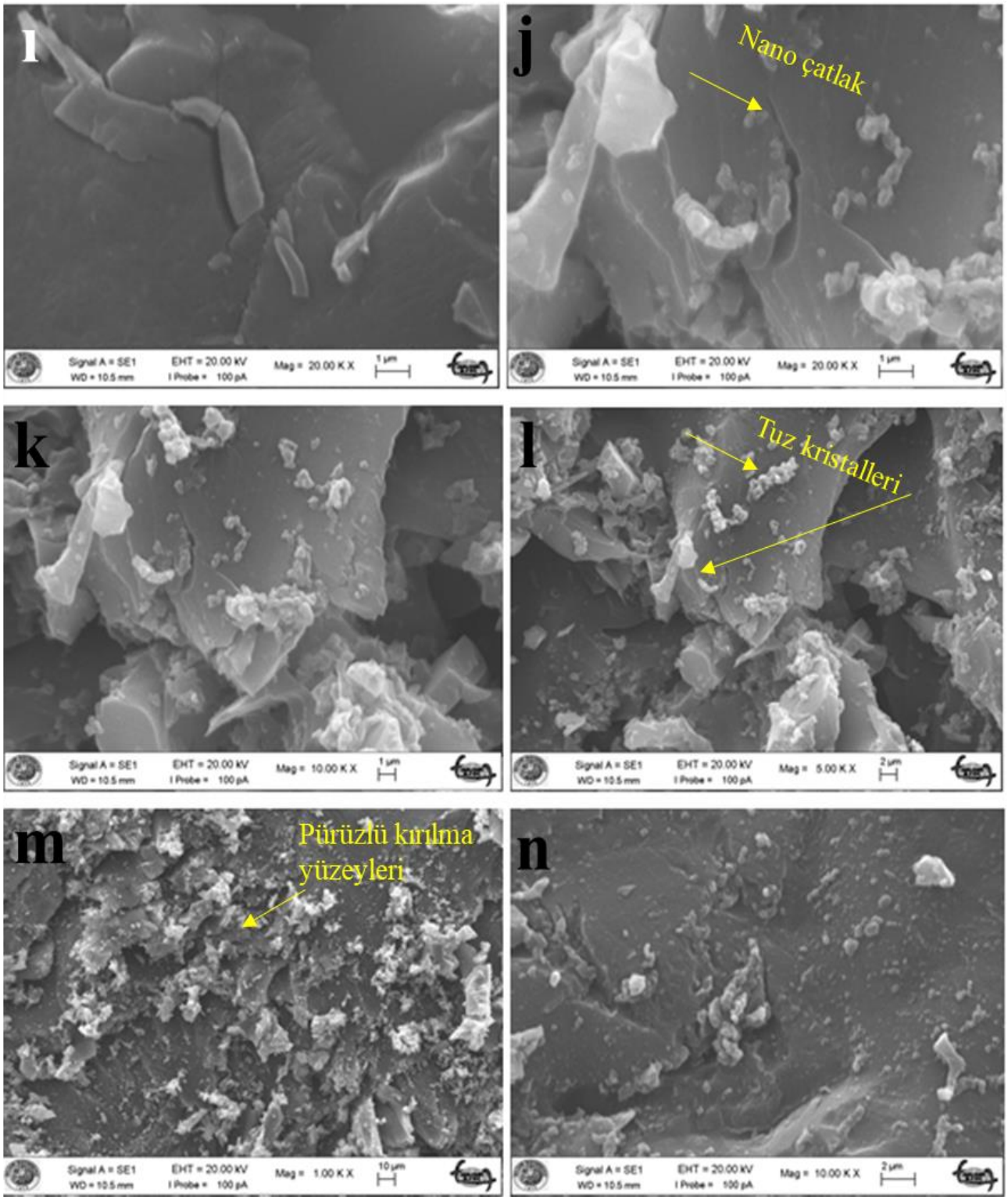
Şekil 5.68'de alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi reçine bağlantılarının hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. Makro hasar yüzeylerinin yorumlandığı bölümde bahsedilen farklı boyutlardaki gözenekler, şekil 5.68 (b, c, d, f,) de görülmektedir. Kohezif hasar tipinin görüldüğü bölgelerde, kısmi plastik deformasyonların oluştuğu görülmektedir. Ayrıca referans numunesinin kohezif bölgeleri incelendiğinde, net bir şekilde oluşan 3 boyutlu kayma bantları, uygulanan kuvetin bir yüzeyden diğerine doğru düzgün bir şekilde aktarılabileceğinin bir göstergesidir (şekil 5.68 a). Bu tespite göre, eğer alüminyum - yapıştırıcı arayüzeyinin korozif ortamlardaki tahribatı önlenebilirse, bu bağlantı şeklinde etkili bir yük aktarımının sağlanabileceği söylenebilir. Adezif hasarın görüldüğü bölgelerdeki yüzeylere baklıdığında parlak yüzeylerin oluştuğu görülmektedir (şekil 5.68 b, e, ı). Bu durum, yüke maruz kalan bağlantının uygulanan yükü aktaramadan gevrek kırılma oluşmasından kaynaklanmaktadır.

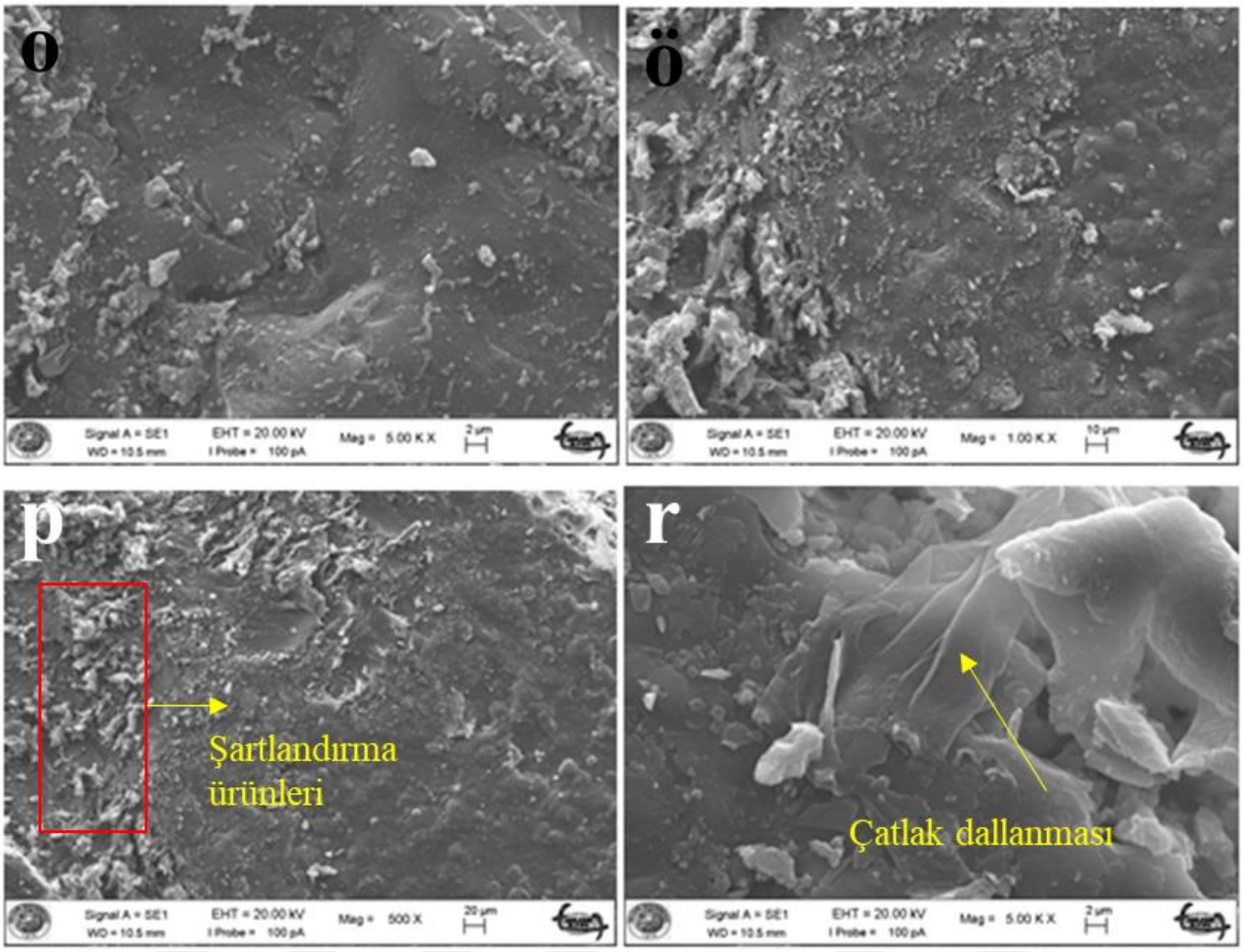
Farklı büyütme oranlarındaki ve farklı ortamlardaki tüm yüzeylere bakıldığında çok az sayıda çatlak oluştuğu (şekil 5.68 h, j, r) ve oluşan çatlakların ilerleyemediği görülmektedir. Bu durum, uygulanan kuvvetin zayıf arayüzeyi hedef alarak (kohezif bölgeler dışında) epoksinin şekil değiştirmesine zaman bırakmadan hasarın gerçekleşmesine neden olmaktadır.

Şartlandırma neticesinde oluşan şartlanırma ürünleri ve oksitler şekil 5.68 o, ö, p' de gösterilmektedir.




c
Pürüzlü hasar yüzeyi
d
gözenek
Geçiş gölgesi
e
f
g
h
Nano çatlak

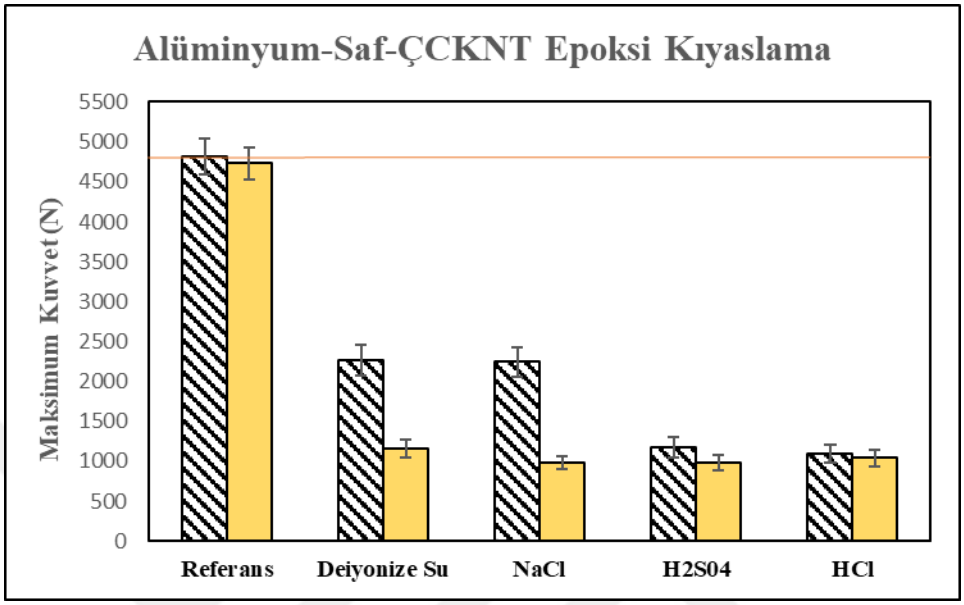

I
j
Nano çatlak
k
l
Tuz kristalleri
m
Pürüzlü kırılma yüzeyleri
n



Şekil 5.68. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcı bağlantılarının SLJ testi sonunda elde edilen hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a, b, c, d, e, f-** Pürüzlü hasar yüzeyleri, üç boyutlu kayma bantları ve gözenekler, **g, h, ı, j-** mikro ve nano çatlaklar, **k, l, m, n, o, ö, p, r-** şartlandırma ürünleri ve çatlak dallandırması

Şekil 5.69'da saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi ile yapıştırılan alüminyum bağlantılarının maksimum kuvvetlerinin kıyaslama grafiği görülmektedir. Grafiğe bakıldığında, deiyonize su ve NaCl ortamlarında %50 civarında, asidik ortamlarda ise %8 civarında mukavemet kaybı olduğu görülmektedir. Sadece polimerin mukavemetine ve termal özelliklerine bakıldığında ÇCKNT takviyesinin reçinenin özelliklerini iyileştirdiği önceki bölümlerde belirtilmişti. Dolayısıyla tek taraflı bindirmeli bağlantılarda mukavemetin düşük çıkması yapıştırıcının mukavemetinin düşmesinden değil, ara yüzey bağlantısının zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Bu durumun, KNT partiküllerinin elektriksel iletkenliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Sandler ve ark., 1999). Şartlandırma ortamlarının iyonik ortamlar olması sebebiyle alüminyum yüzeyinde düzenli bir şekilde oluşturulan alüminyum oksitleri (anotlama işlemi) hedef

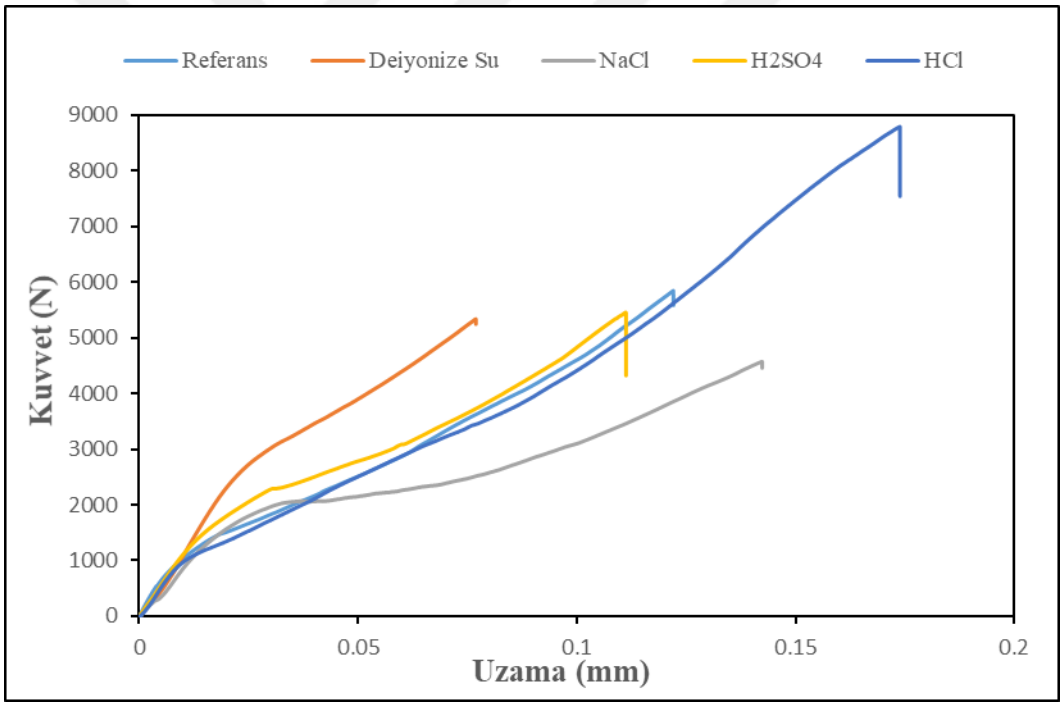
alarak yüzeyi tahrip ettiği bildirilmişti. Buna ek olarak ÇCKNT partiküllerinin ortamın elektriksel iletken olması sebebiyle uyarıldığı ve yüzeye tutunmalarının kısıtlandığı düşünülmektedir.



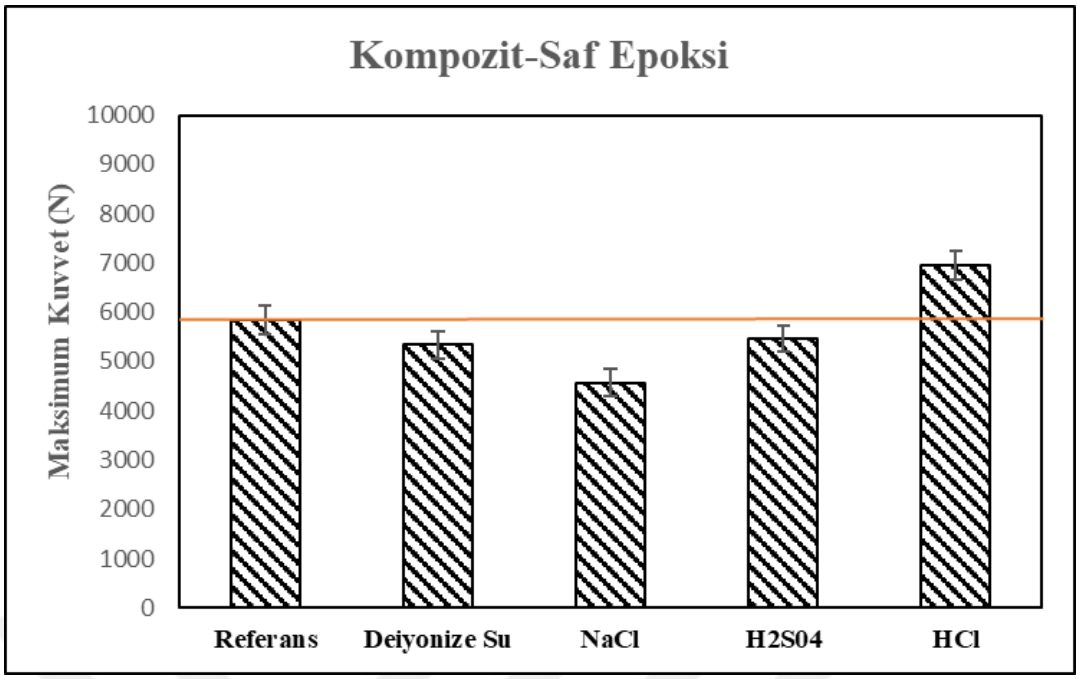
Şekil 5.69. Alüminyum tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testleri sonucunda elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması

Şekil 5.70'de karbon elyaf takviyeli kompozit – saf epoksi tek taraflı bindirme bağlarının SLJ testleri neticesinde elde edilen kuvvet uzama grafikleri, şekil 5.71'de bu grafiklerden elde edilen maksimum kuvvet değerleri, şekil 5.72'de gerilme şekil değiştirme grafikleri, çizelge 5.9'da da bu deneylerden elde edilen tüm değerler gösterilmektedir. Bu bağlantıda kullanılan epoksi reçinenin (kendisinin) şartlandırma davranışına bakıldığında NaCl ve HCl ortamlarında artış gözlemlenirken, deiyonize su ortamında ve H_2SO_4 ortamında mukavemet kaybı olduğu tespit edilmişti. Deiyonize ortamında şartlandırılan numunenin mukavemet değerine bakıldığında %8'lik bir düşüş oluştuğu, NaCl ortamında %21'lik bir düşüş olduğu, H_2SO_4 ortamında %6 lık bir düşüş olduğu, HCl ortamında ise %33'lük artış olduğu görülmektedir. Uzama değerlerinde ise sırasıyla %37'lik düşüş, %17'lik artış, %9'luk düşüş ve %30'luk artış olduğu görülmektedir. Deiyonize su ve sülfirik asit ortamlarda az miktarda düşüş olsa da genel olarak kompozit yüzeyinin şartlandırma ortamları karşısında kararlı bir yapı göstererek iyi bir kuvvet aktarımı sağladığı söylenebilir. Özellikle asidik ortamlara bakıldığında hem reçinenin hem de bağlantı yüzeyinin (alüminyum bağlantılarda) olumsuz etkilendiği tespit edilmesine rağmen, kompozit bağlantılarda bu durumun tam tersi

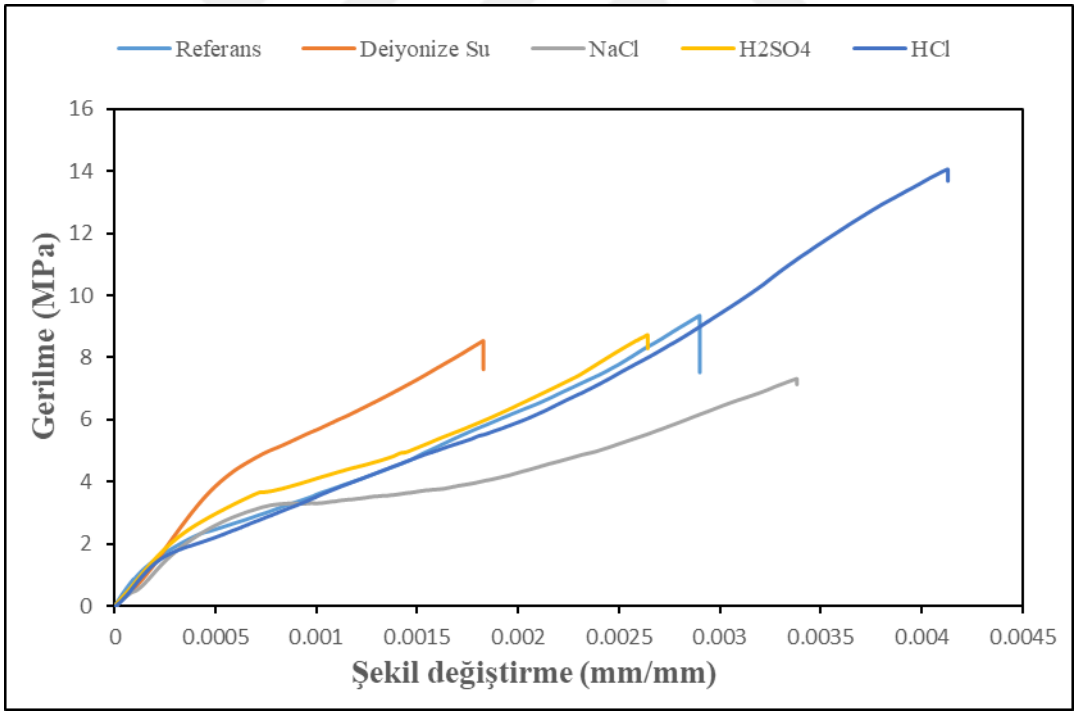
olduğu görülmektedir. Sülfirik asit ortamı fiziksel, kimyasal termal açıdan epoksi reçineyi en olumsuz etkileyen ortam olmasına rağmen, bağlantı mukavemetinin referans numuneye yakın sonuçlar vermesi, bağlantı ara yüzeyinin asit nüfuziyetinden olumlu etkilendiğini göstermektedir. Bu duruma ek olarak HCl ortamında mukavemetin oldukça artması da bu düşünceyi destekler niteliktedir. Bu durum, asidik ortamların epoksi reçinede emilimi artırmasından kaynaklanmaktadır. Asidik ortamlarda daha fazla sıvı emen reçine, emilen sıvının kompozit ara yüzeyiyle etkileşime girerek, kompozit yüzey alanını artırması ve reçinenin yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamaktadır. Deiyonize su ortamında ise emilim kısıtlı olduğu için ve kompozit yüzeyinin kararlı yapısı sebebiyle mukavemet çok fazla etkilenmemektedir. NaCl ortamında ise, kompozit- yapıştırıcı ara yüzeyine nüfuz eden tuz kristallerinin, ara yüzeyde düzensizlik oluşturarak mukavemet düşüşüne neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.70. Kompozit saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen kuvvet uzama grafiği



Şekil 5.71. Kompozit saf epoksi bağlantılarının SLJ testinde elde edilen maksimum kuvvetler kıyaslama grafiği



Şekil 5.72. Kompozit saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen gerilme şekil değiştirme grafiği

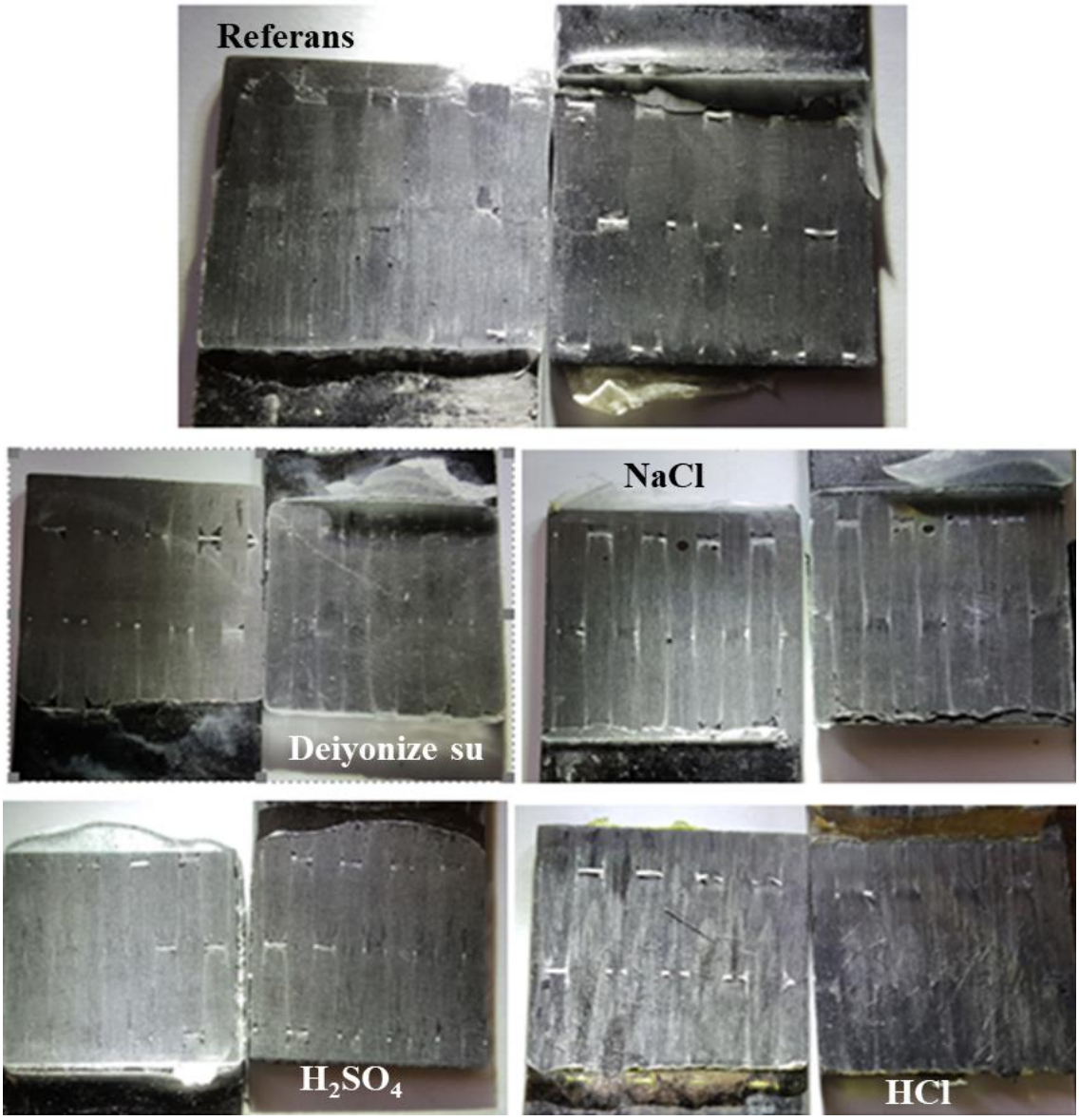
Çizelge 5.9. Kompozit saf epoksi bağlantılarının SLJ testi sonuçları

Parametreler	Referans	Deiyonize Su	NaCl	H_2SO_4	HCl
Maks. Kuvvet (N)	5845.18	5337.44	4573.74	5456.49	8790.39
Maks. Gerilme (MPa)	9.35	8.53	7.31	8.73	14.06
Maks. Uzama (mm)	0.122	0.076	0.142	0.111	0.174
Maks. Şek. Değ. (mm/mm)	0.0029	0.0018	0.0034	0.0026	0.0041
Tokluk (kJ/m^3)	13.5	8.5	14.5	10.5	28.9
Kayma Modülü (MPa)	82.13	73.14	61.58	85.15	86.85

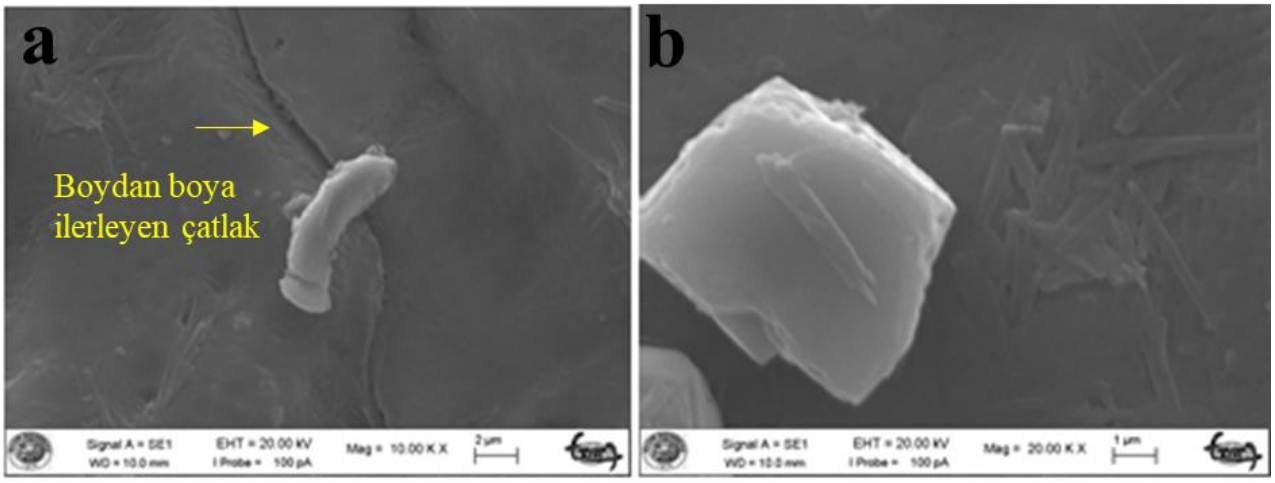
Şekil 5.73'de kompozit- saf epoksi bağlantılarının SLJ testleri makro hasar görüntüleri, şekil 5.74'de de bu yüzeylerin SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.74'e bakıldığında, referans numunesinin ve HCl ortamında şartlandırılan numunelerin hasar yüzeylerinde uygulan yüke paralel çizgiler oluştuğu görülmektedir. Hatta HCl ortamındaki numunede bu durumun daha belirgin olduğu ve kompozit yüzeyindeki elyafların bir kısmının dağıldığı görülmektedir. Bu durumun aksine mukavemetin nispeten düşük çıktığı diğer numunelerde gevrek kırılmaya bağlı olarak daha parlak yüzeyler oluştuğu görülmektedir.

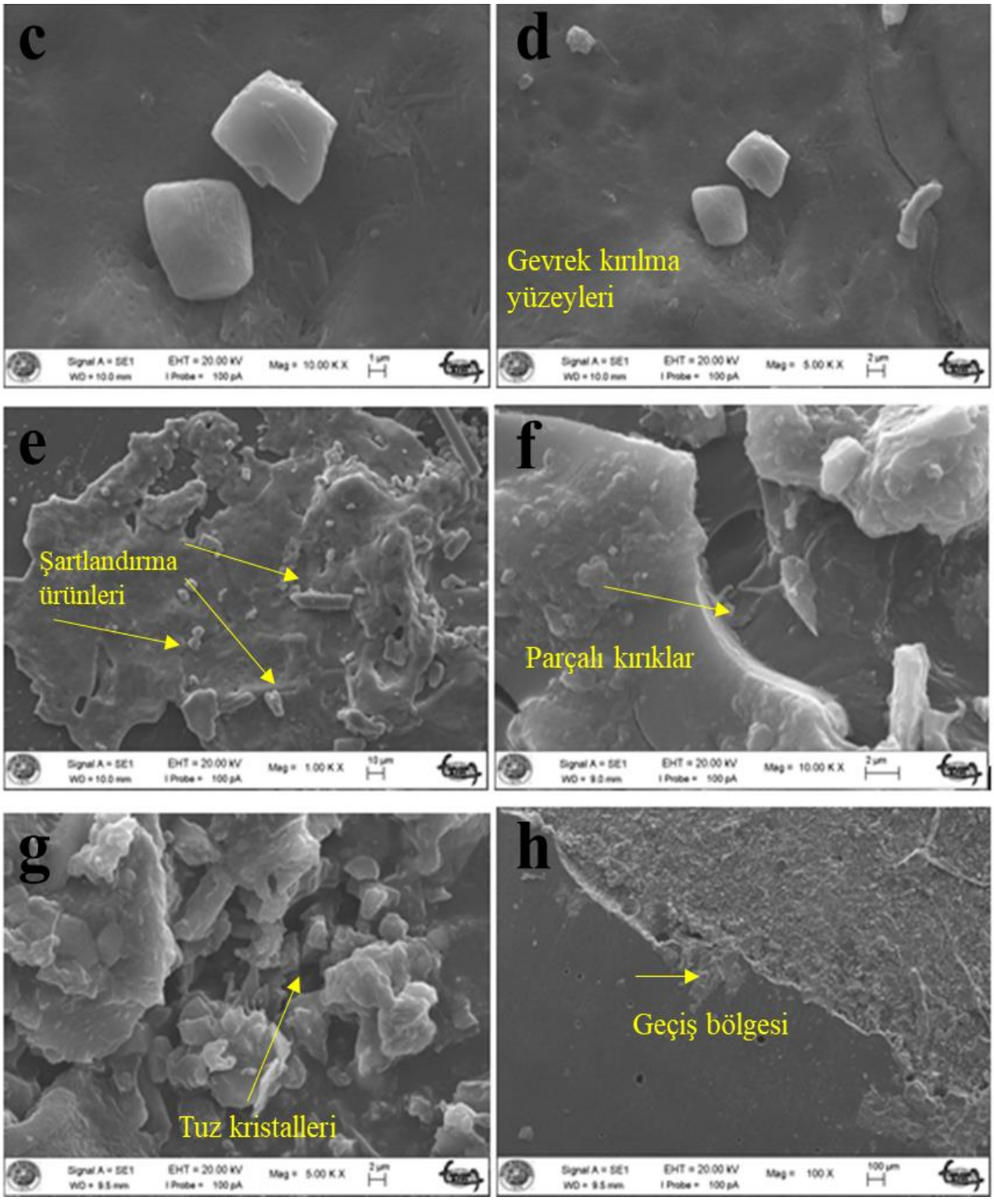
Mukavemeti yüksek çıkan numunelerin hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılma yüzeylerinin oldukça pürüzlü olduğu görülmektedir. Numuneye uygulanan yük üç boyutlu çatlak ilerleyişine neden olarak parçalı kırıklar oluşturmaktadır. Oluşan bu parçalı kırıklar şekil 5.74 e, f, g'de görülmektedir. Şekil 5.74 a ve d de bir uçtan diğerine ilerlemeye devam eden çatlaklar olduğu görülmektedir. Bu durum, uygulanan yükün yapıştırıcı üzerinden aktarıldığının bir göstergesidir. Şekil 5.74' h'de de kompozit yüzeyinden yapıştırıcı bölgesine geçiş bölgesi görülmektedir. Yapıştırmadan önce uygulanan yüke dik olarak zımparalanan yüzeylerde çizgiler şeklinde yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuştu. HCl aside maruz kaldıktan sonra yüzey durumu değişerek görüntüdeki hale gelmektedir (şekil 5.74 ı, j). Bu durum yapıştırıcı için ekstra mekanik kilitlenme alanı oluşturarak mukavemeti artırmaktadır.

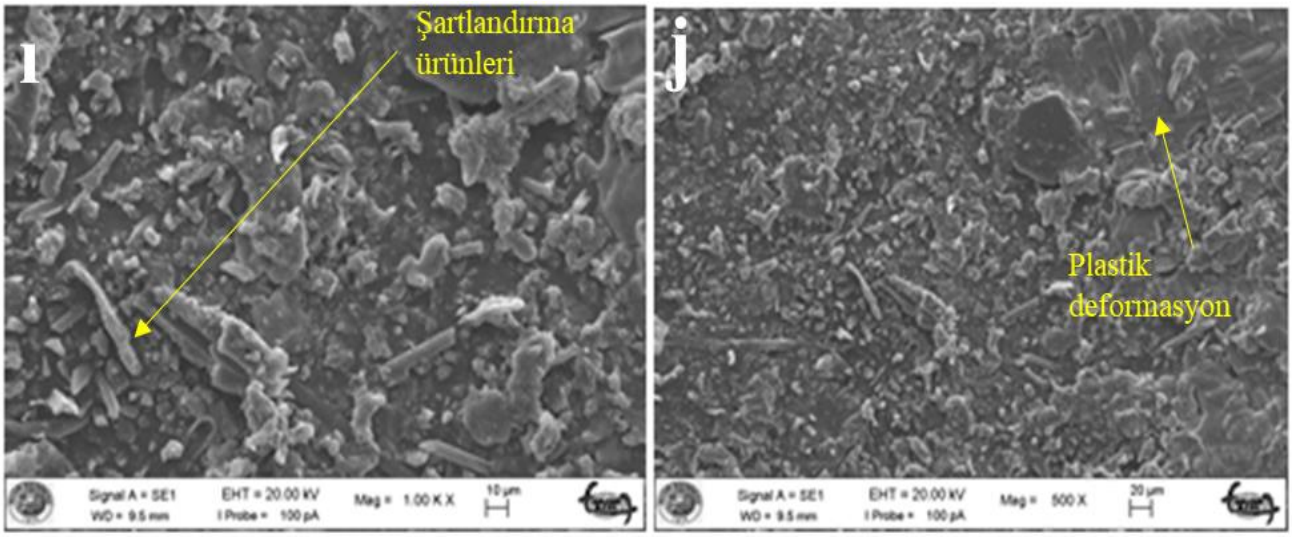
Şekil 5.74 g'de NaCl ortamında şartlandırılan numunenin hasar yüzeyine bakıldığında tuz kristallerinin yüzeyle reçine arasına girdiği görülmektedir. Bu durum yapıştırıcı ile kompozit arasında zayıf ara bölgeler oluşturarak çatlağın burdan ilerlemesini sağlayarak daha düşük yüklerde bağlantının hasara uğramasına neden olmuştur.



Şekil 5.73. Kompozit saf epoksi bağlantılarının hasar yüzeyleri




c
d
Gevrek kırılma yüzeyleri
e
Şartlandırma ürünleri
f
Parçalı kırıklar
g
Tuz kristalleri
h
Geçiş bölgesi

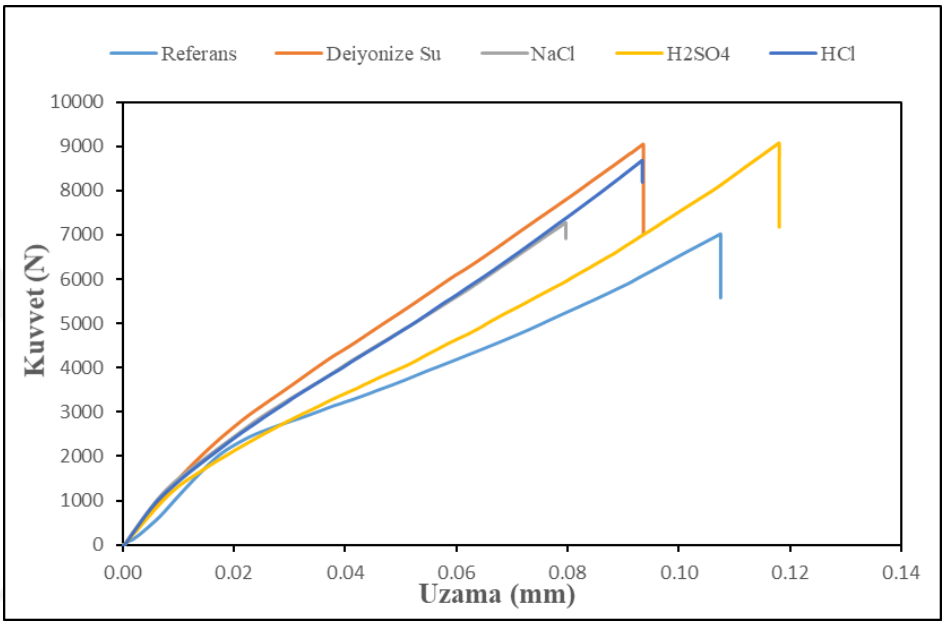


Şekil 5.74. Kompozit saf epoksi yapıştırıcı bağlantılarının SLJ testi sonunda elde edilen hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri

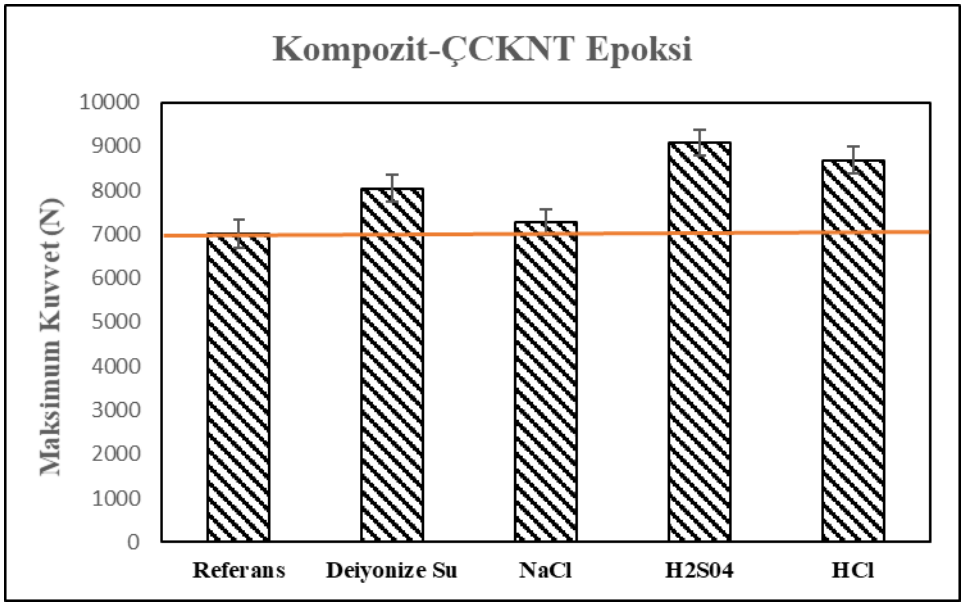
Şekil 5.75'de karbon elyaf takviyeli kompozit – ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcı tek taraflı bindirme bağlantılarının SLJ testleri neticesinde elde edilen kuvvet uzama grafikleri, şekil 5.76'da bu grafiklerden elde edilen maksimum kuvvet değerleri, şekil 5.77'de gerilme şekil değiştirme grafikleri, çizelge 5.10'da da bu deneylerden elde edilen tüm değerler gösterilmektedir. Referans eğrisinin maksimum kuvvet değeri 7020 N olarak tespit edilirken, deiyonize su ortamında şartlandırılan numunede %23 lük, NaCl ortamında %3 lük, H_2SO_4 ortamında %24 lük, HCl ortamında ise %19 luk artış tespit edilmiştir. Şekil değiştirme değerlerinde ise H_2SO_4 ortamı dışında düşüş olduğu görülmektedir. Gerilme ve şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak tokluk değerlerine bakıldığında, deiyonize su (%19), H_2SO_4 (%54) ve HCl (%18) ortamlarında artış, NaCl (%15) ortamında ise azalış görülmektedir.

ÇCKNT partikülleri ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler birbiriyle uyumlu olarak çalışabilen yapılardır. Kompozit malzemelerin üretiminde sıklıklıkla kullanılan karbon nano tüp partikülleri, elyafları bir arada tutan matriks malzemeye ilave edilerek, elyaf ve reçinenin bağlantısını güçlendirmektedir (Vivet ve ark., 2011). FT-IR neticesinde ÇCKNT takviyesi sebebiyle epoksi reçine bazı değişimler olduğu ve şartlandırma etkisiyle de bu değişimlerin farklılaştığı açıklanmıştı. Buna ek olarak, ÇCKNT takviyesinin sıvı emilimini atırdığı da belirtilmişti. Alüminyum bağlantılarının SLJ testleri sonucunda ise, bağlantı yüzeyinin şartlandırma neticesinde deforme olduğu ve bu bölgedeki ÇCKNT'lerin fiziksel olarak etkilenerek yüzeye tutunma kabiliyetinde azalma olduğu tespit edilmişti fakat bu durum aynı zamanda alüminyum karşı yüzeyin

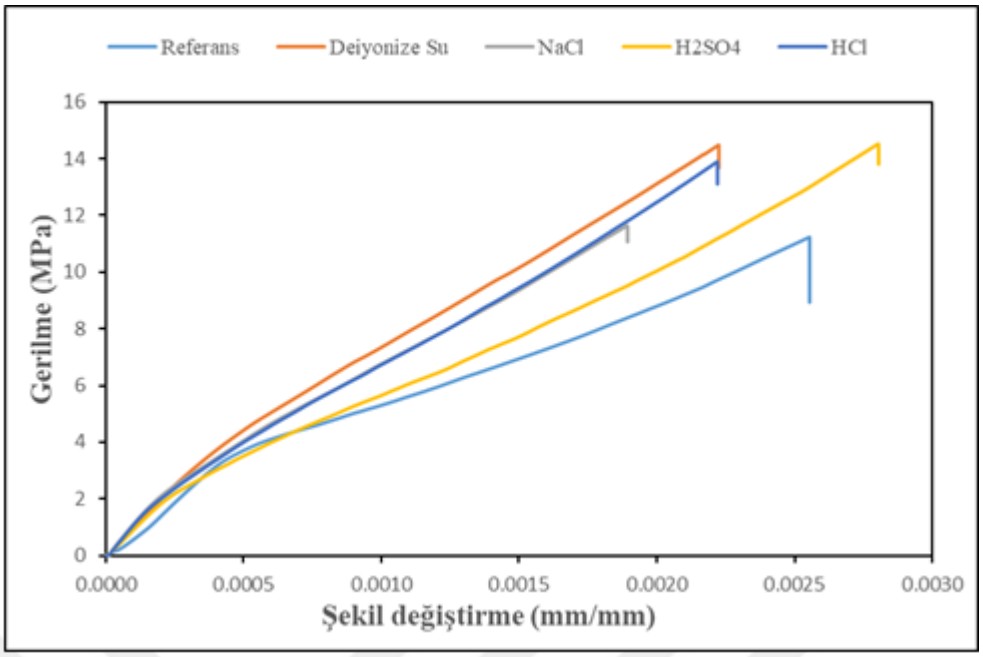
bozulmasındanda kaynaklanıyordu. Kompozit-saf epoksi bağlantıların da ise şartlandırma neticesinde kompozit yüzeyinin deforme olmadığı gibi daha da pürüzlenerek mekanik kilitleneme mekanizmasını güçlendirdiği görülmüştü. Tüm bu bilgiler ışığında kompozit malzeme yüzeylerinin şartlandırma ortamı yardımıyla iyileşmesi, karbon nano tüplerinde fiziksel olarak fonksiyoneleşmesi ile yüzeye tutunma kabiliyetinin artması neticesinde bağlantı mukavemetlerinin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 5.75. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen kuvvet uzama grafiği



Şekil 5.76. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının SLJ testinde elde edilen maksimum kuvvetler kıyaslama grafiği



Şekil 5.77. Kompozit saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi ile elde edilen gerilme şekil değiştirme grafiği

Çizelge 5.10. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının SLJ testi sonuçları

Parametreler	Referans	Deiyonize Su	NaCl	H_2SO_4	HCl
Maks. Kuvvet (N)	**7019.37**	9047.69	7271.93	9074.92	8681.18
Maks. Gerilme (MPa)	**11.23**	14.47	11.63	14.52	13.88
Maks. Uzama (mm)	**0.108**	0.094	0.079	0. 118	0.093
Maks. Şek. Değ. (mm/mm)	**0.0026**	0.0022	0.0019	0.0028	0.0022
Tokluk (kJ/m^3)	**13.1**	16.1	11.1	20,30	15,7
Kayma Modülü (MPa)	**71.08**	117.15	134.28	106.21	132.28

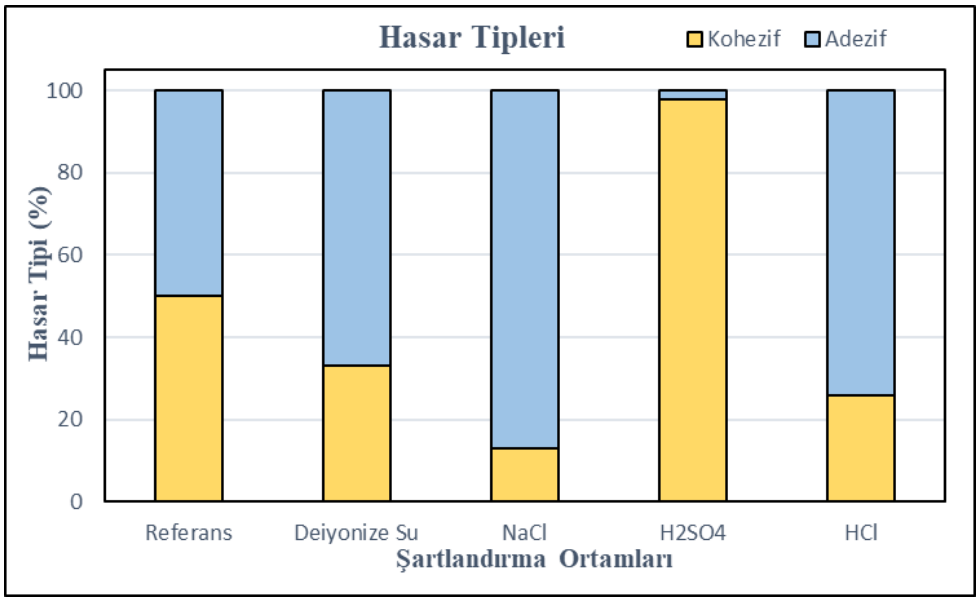
Şekil 5.78'de bağlantıların makro hasar yüzeyi görüntüleri, şekil 5.79'da hasar tipi grafiği, şekil 5.80'de de hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri görülmektedir. Hasar yüzeylerine ve hasar tipi grafiğine bakıldığında, mukavemeti yüksek olan numunelerde kohezif hasar yüzdesinin arttığı, mukavemet azaldıkça hasarın adezife doğru mod değiştirdiği görülmektedir. Bu durum, mukavemet artışının doğrudan bağlantı yapıştırıcı ara yüzeyi ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Şekil 5.78 a'da görülen makro çatlaklar ve üç boyutlu parçalı kırıklar, uygulanan yükün düzgün bir şekilde bağlantı üzerinden aktarıldığının bir göstergesidir.

Şekil 5.80'de gösterilen SEM görüntüleri incelendiğinde, ÇCKNT partiküllerinin hem çatlaklar arasında hem de yüzeye etkin bir şekilde tutunduğunu ve hasarın ÇCKNT partiküllerinin kırılması ile gerçekleştiği görülmektedir. Bu çalışmada

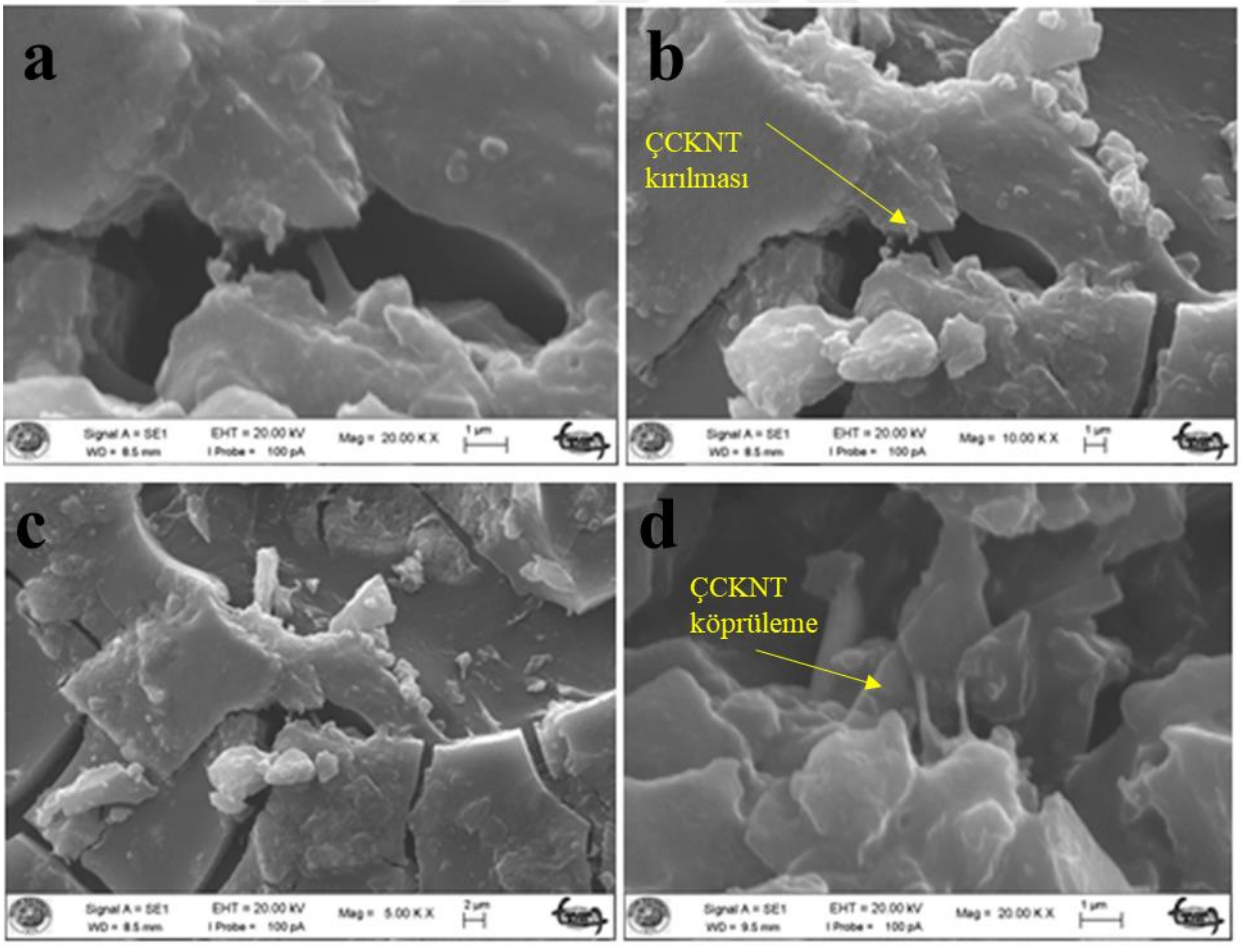
incelenen SLJ bağlantılarının tamamı göz önüne alındığında, hasar yüzeyinde gözlemlenen en yoğun çatlak oluşumu, ilerlemesi ve dallanması, kompozit yapıştırıcı bağlantısının oldukça efektif olduğunu göstermektedir. Bağlantı kalitesinin yüksek olması ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin (çekme testinde) şartlandırma neticesinde sünekliğinin artması sebebiyle, çok sayıda dallanma, plastik deformasyon ve sünek kırılma bölgeleri görülmektedir. En az mukavemet artışının gözlemlendiği NaCl ortamında daha az pürüzlü kırık yüzeyleri görülmektedir fakat orada bile kısıtlı da olsa çatlak oluşumları ve plastik deformasyon bölgelerinin oluşumu, etkili bir kuvvet aktarımının gerçekleştiğinin göstergesidir.

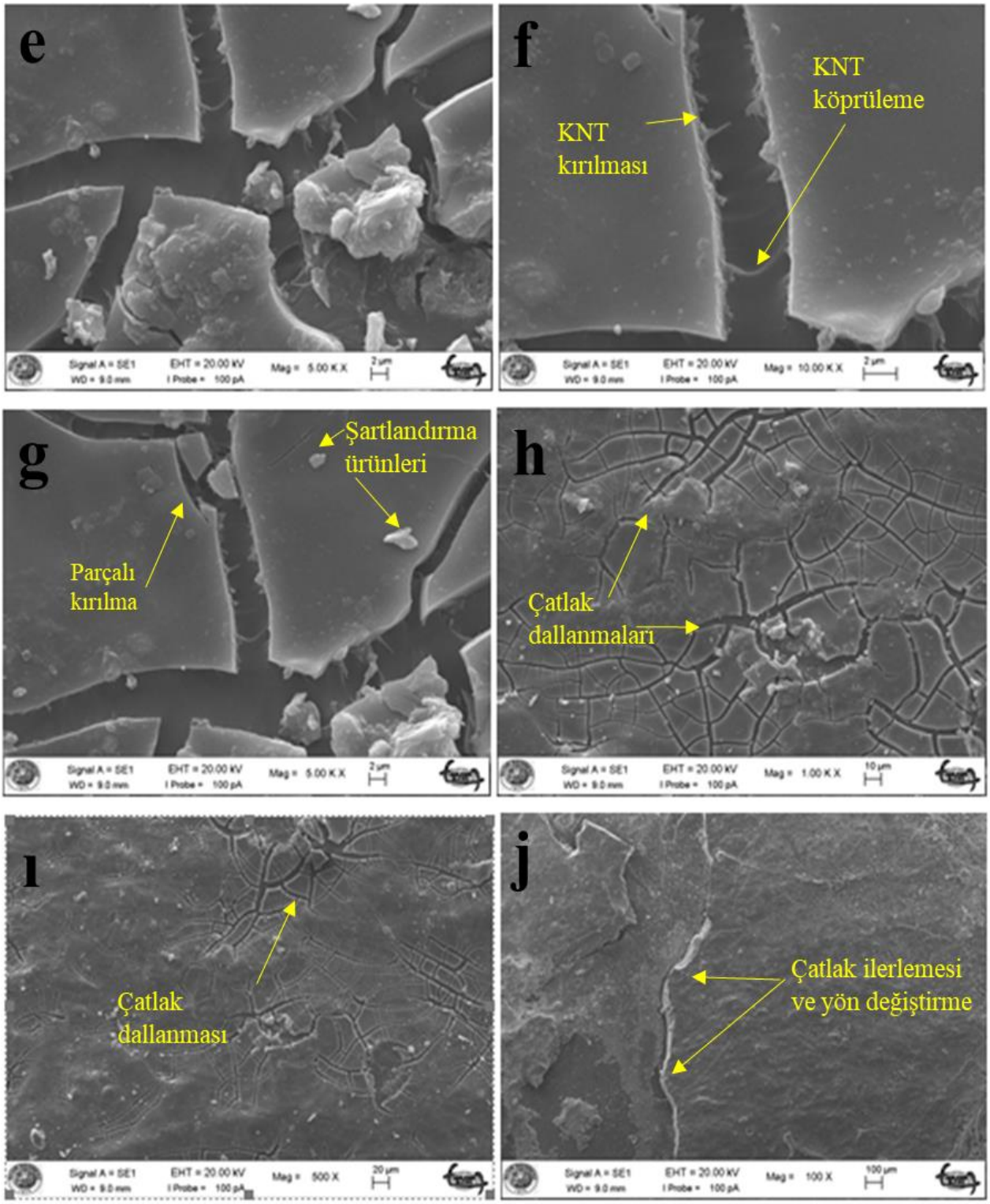


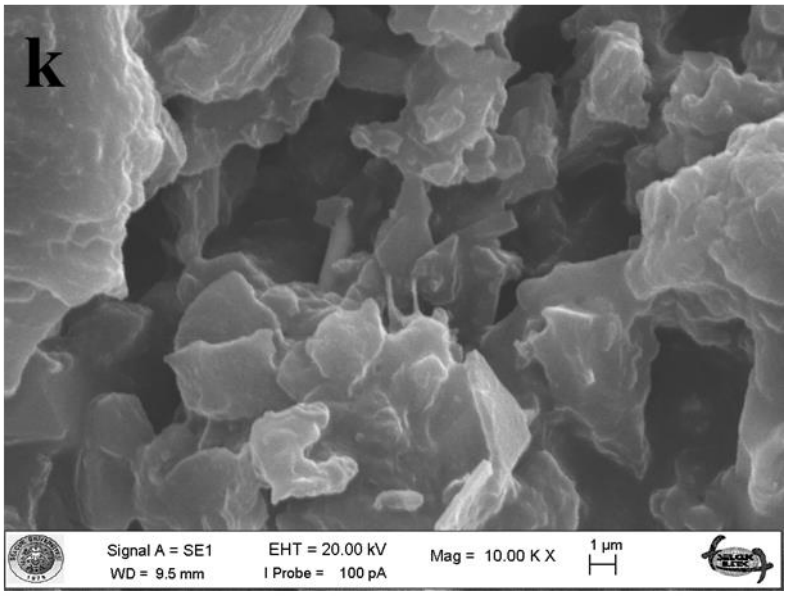
Şekil 5.78. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının makro hasar yüzeyleri



Şekil 5.79. Kompozit ÇCKNT takviyeli tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testleri sonucunda oluşan hasar yüzeyleri

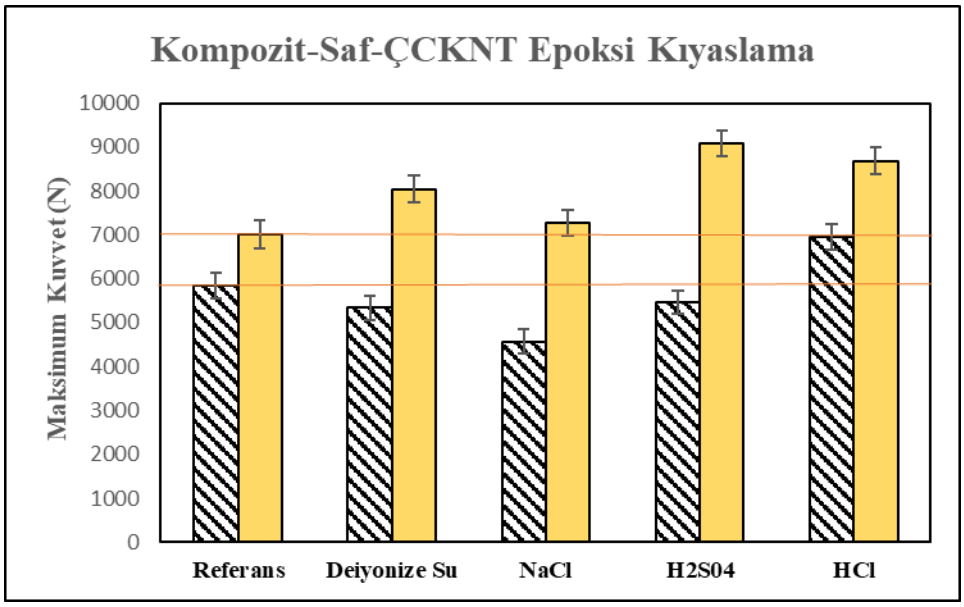



e
f
KNT
köprüleme
KNT
kırılması
g
Şartlandırma
ürünleri
Parçalı
kırılma
h
Çatlak
dallanmaları
ı
Çatlak
dallanması
j
Çatlak ilerlemesi
ve yön değiştirme



Şekil 5.80. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcı bağlantılarının SLJ testi sonunda elde edilen hasar yüzeylerinin SEM görüntüleri **a, b, c, d, e, f-** ÇCKNT kırılması ve köprülemesi **g, h, ı, j, k-** Çatlak dallanmaları, parçalı kırılmalar, çatlak sapma ve şartlandırma ürünleri

Şekil 5.81'de Kompozit malzemelerin saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçineli bağlantılarının maksimum kuvvet kıyaslama grafiği görülmektedir. Referans numunelerine bakıldığında ÇCKNT takviyesinin mukavemeti %20 oranında artırdığı, şartlandırma neticesinde bu artışın yükselerek %50 mertebelerine geldiği görülmektedir. ÇCKNT takviyesi dışında hiçbir farklı olamayan bu numunelerde ortaya çıkan bu fark doğrudan ÇCKNT takviyesinin yüzeye tutunma kalitesini artırmasından kaynaklanmaktadır. En dikkat çekici sonuçlardan birisi de neredeyse tüm deneyle sülfirik asit ortamının en düşük sonuçları gösterdiği görülürken, kompozit bağlantısında bu durumun tam tersi olmasıdır. Bu ÇCKNT partiküllerinin fonksiyonelleşmesinden kaynaklanmaktadır. Karbon nanotüpler, asidik fonskiyonelleştirme ve oksidatif fonksiyonelleştirme gibi yöntemlerle, kullanılacağı ortama göre fonksiyonelleştirilerek etkinliği artırılmaktadır (Balasubramanian ve Burghard, 2005). Asidik fonksiyonelleştirme de ise sülfirik asit ve hidroklorik asit sıkça kullanılmaktadır. Bu bilgiler ışığında asidik ortamlarda ÇCKNT partiküllerinin fonksiyonelleştiği ve bu fonksiyonelleşmeye bağlı olarak uyumlu davranış gösterdiği kompozit karşı yüzeyine daha iyi tutunduğu söylenebilir.



Şekil 5.81. Kompozit ÇCKNT takviyeli tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testleri sonucunda elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin kıyaslanması

5.7. DCB testi sonuçları

Bu bölümde saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçineler ile yapıştırılan alüminyum-alüminyum ve karbon elyaf takviyeli kompozit- kompozit malzeme bağlantılarının dört farklı ortamda şartlandırılması ile elde edilen numunelerin DCB (mod I çift konsol kiriş testi) testi sonuçları verilmektedir. DCB testleri neticesinde elde edilen (P-COD), Gı- Δa grafikleri, kritik Gıc grafikleri tüm numuneler için incelenerek yorumlanmaktadır. Deney güvenilirliğini sağlamak için deneyler üçer kez tekrar edilmiştir. Hasar yüzeylerinin makro fotoğrafları da verilerek yorumlanmaktadır. Ayrıca bu bölüme kadar yapılan diğer deneylerle DCB testlerinin sonuçları birlikte değerlendirilmekte ve ilgili bölümlerde gösterilmektedir.

Şekil 5.82'de alüminyum saf epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının şartlandırılmış ve şartlandırılmamış bağlantılarının P-COD grafikleri gösterilmektedir. Referans eğrisine bakıldığında (şekil 5.82 a), epoksi reçineye ait kararlı çatlak ilerlemesi 6.2 mm'ye kadar devam ederek maksimum 50 N'luk kuvvete ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan itibaren kuvvetin artış ve azalış göstererek devam ettiği bir kararlı çatlak ilerleyişi gözlemlenmekte ve 23N'da ilk kararsız çatlak ilerlemesi gerçekleşmektedir. Bu noktadan itibaren ise 13 N seviyesinde 37 mm'de kopma gerçekleşmektedir.

Şekil 5.82 b' de deiyonize su ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Grafiğe bakıldığında kararlı çatlak ilerlemesinin 2 mm devam ettiği ve

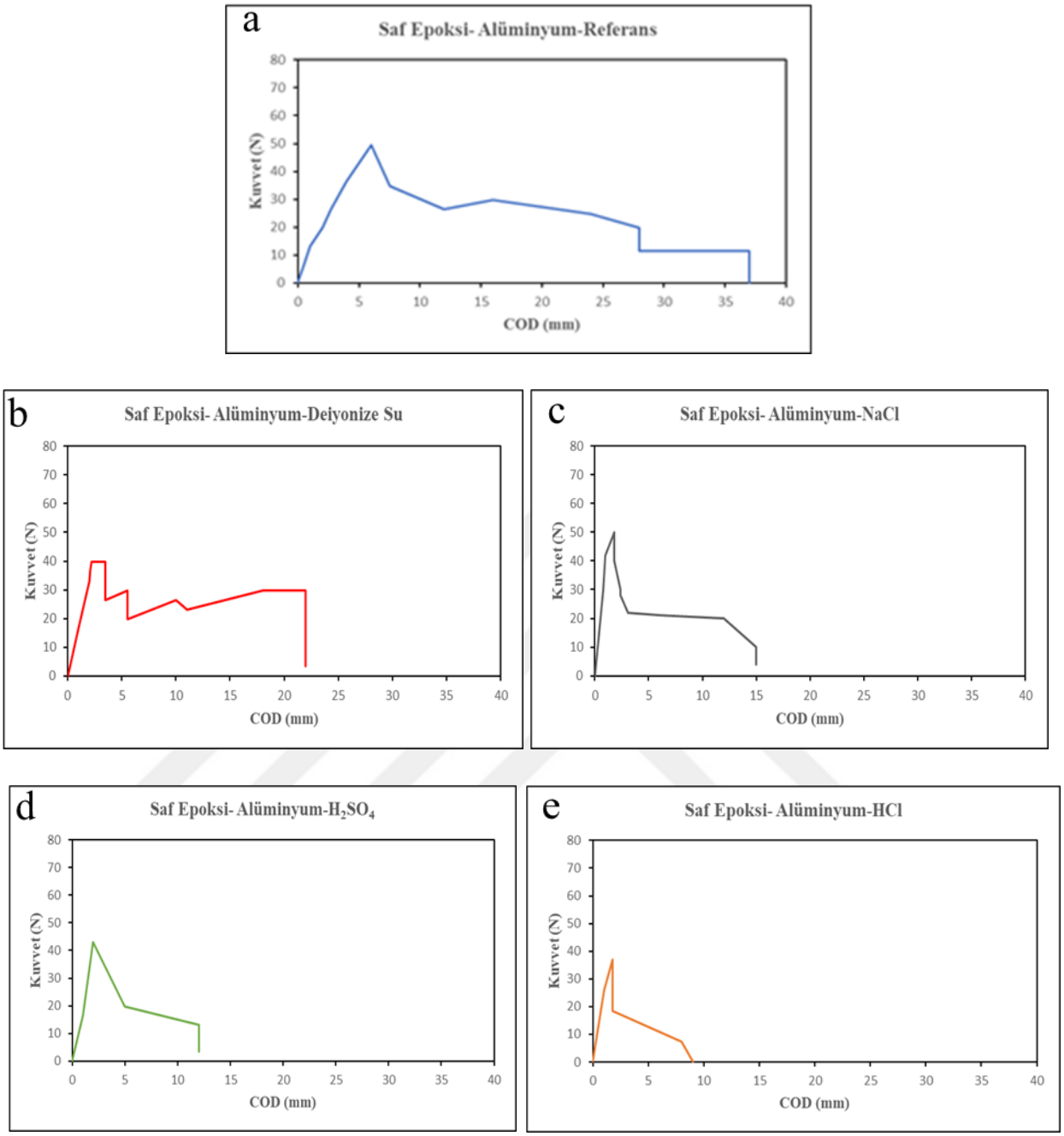
bu noktada 40 N'luk maksimum kuvvet seviyesine ulaştığı görülmektedir. Bu noktadan itibaren kararsız çatlak ilerleyişi başlamış ve kuvvet 27 N seviyesine düşmüştür. 3 mm'lik bir kararlı çatlak ilerleyişinin ardından kuvvet 30 N seviyesine yeniden çıkarken tekrar kararsız çatlak ilerleyişi oluşmakta ve kuvvet 20N'a düşmektedir. Bu noktadan sonra 3 farklı kararlı çatlak ilerlemesi gösteren numune 29 N 22 mm de kırılmaktadır. Deiyonize su ortamında şartlandırılan numunede referans numunesine kıyasla kuvvette %20'lik, çatlak ilerleyişinde ise %18'lik bir düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 5.82 c'de NaCl ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Yük uygulanmaya başladığı andan itibaren 1.8 mm ye kadar kararlı bir şekilde ilerleyen çatlak, 50 N da durmakta ve kararsız bir şekilde 23 N a kadar düşmektedir ve 10N'da tamamen kırılmaktadır.

Şekil 5.82 d 'de H_2SO_4 ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Yük uygulanmaya başladığı andan itibaren 2.5 mm'ye kadar kararlı ilerleyen çatlak, 42 N seviyesine ulaşınca tekrar 20 N seviyesine düşüş göstermiştir. Bir süre daha uzamaya devam eden numune 17 N seviyesinde aniden kompaktadır.

Şekil 5.82 e'de HCl ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Bu ortamdaki hasar ilerleyişi, H_2SO_4 ve NaCl ortamlarına benzer şekilde gerçekleşmiştir. İlk yükleme ile 1.5 mm ilerleyen kararlı çatlak 38 N noktasından sonra kararsız moda girerek kuvvette ani düşüşe sebep olmakta ve 11 N da kırılma gerçekleşmektedir.

SLJ testlerine bakıldığında şartlandırma ortamlarının doğrudan yapıştırıcı alüminyum ara yüzeyini hedef alarak mod II kayma mukavemetini oldukça aşağı çektiği ve bağlantıların gevrek bir şekilde kırılarak adezif hasarlar oluştuğu tespit edilmişti. DCB testlerinde de benzer bir durum olduğu görülmektedir. Hem maksimum kuvvet değerlerinde hem de uzama değerlerinde önemli oranda azalmalar olduğu görülmektedir. Şartlandırma ortamlarının tamamında, başlangıç çatlağının oluştuğu anda numunelerde yük değerinde düşmeler olmuştur. Bu durum, çatlağın matris içerisinde yayılmaya başladığının göstergesidir. Çatlak yayılmaya başladığı andan itibaren çok kısa mesafelerde tekrar kararsız çatlak ilerlemelerinin görülmesi ise kırılmanın gevrek olduğunun bir göstergesidir.



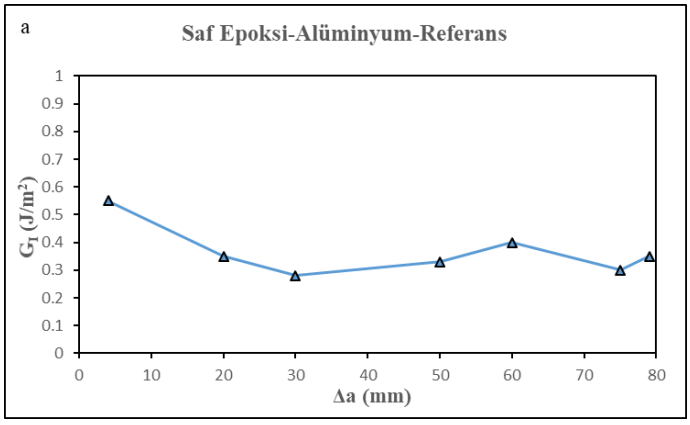
Şekil 5.82. Alüminyum saf epoksi reçine çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (P-COD grafikleri) **a-** Alüminyum/saf epoksi **b-** Alüminyum/saf epoksi /deiyonize su **c-** Alüminyum/saf epoksi / NaCl **d-** Alüminyum/saf epoksi /H_2SO_4 **e-** Alüminyum/saf epoksi / HCl

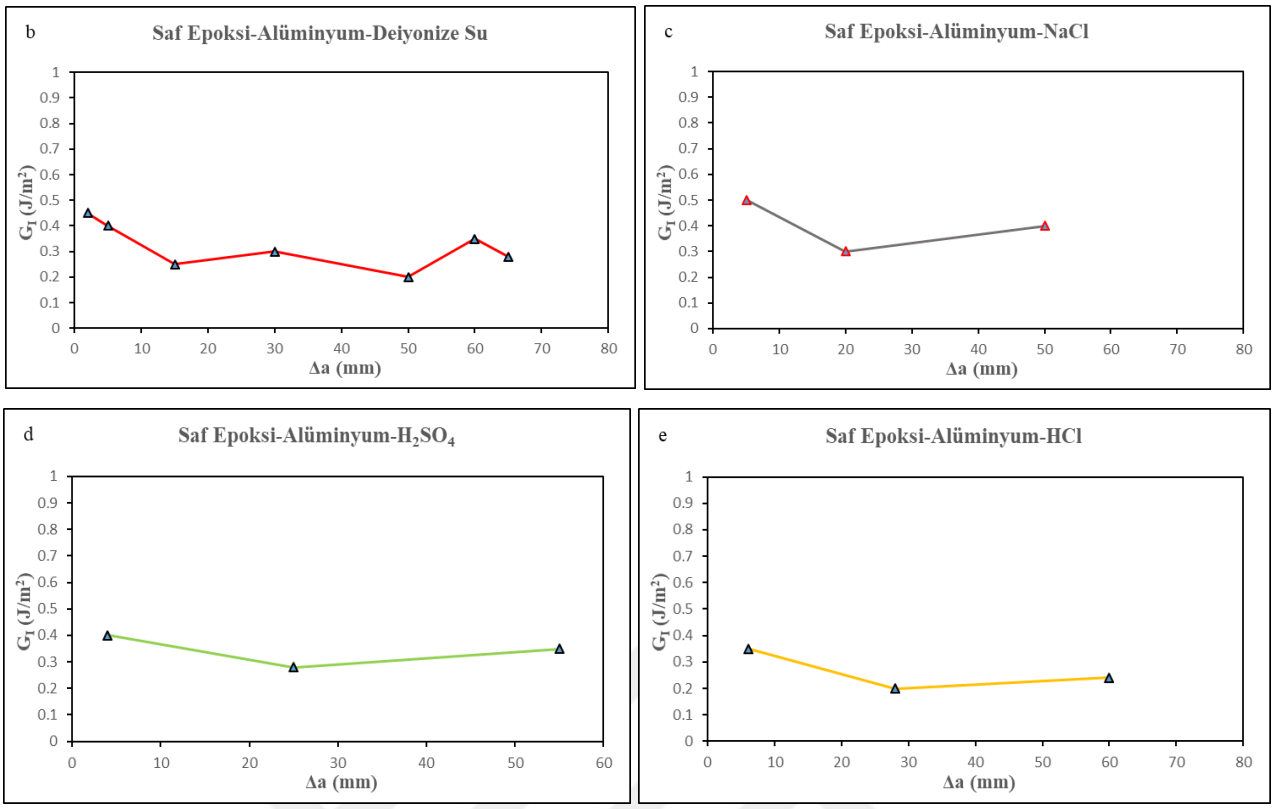
DCB deneylerinde çatlak ilerleyişinde kararsız davranışlar gözlemlendiği için, şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı (G_I) değerleri ani yük düşüşünün gözlemlendiği noktanın hemen öncesindeki en büyük yük kullanılarak hesaplanır. DCB numuneleri kullanılarak Mod I durumu için G_I-Δa grafikleri Şekil 5.83'te, en büyük

kritik şekil değiştirme enerjisi (Gıc) değerlerinin kıyaslandığı grafik ise şekil 5.84'de gösterilmektedir.

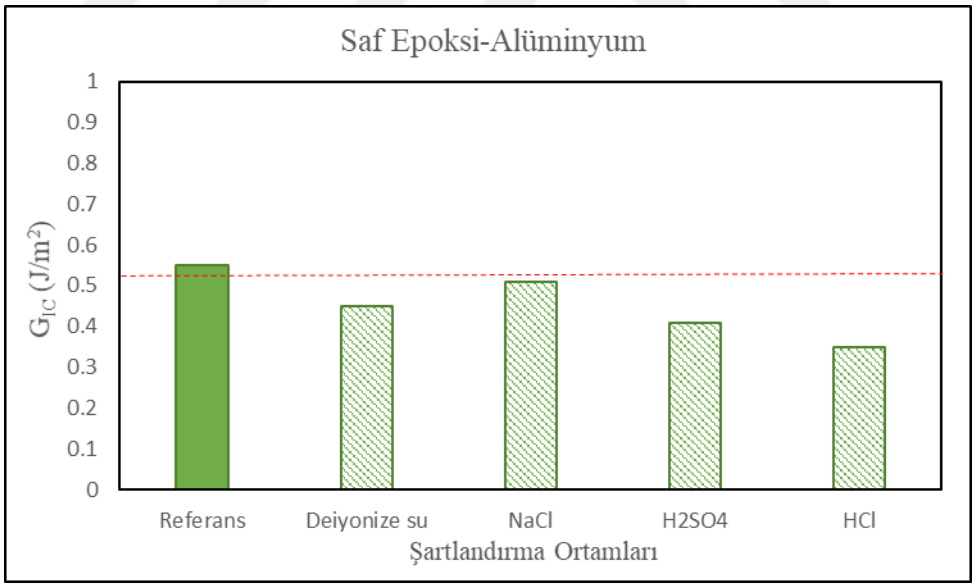
Referans eğrisine bakıldığında hızlı bir çatlak ilerleyişinin olduğu ve çatlak ilerlemesinin 80 mm'ye kadar devam ettiği görülmektedir. Referans eğrisine en yakın davranışı ise deiyonize su ortamında şartlandırılan numune göstermektedir fakat şartlandırma bağlı olarak çatlak ilerlemesi 64 mm'ye düşmektedir. NaCl ortamında ve asidik ortamlarda şartlandırılan numunelerin P-COD grafiklerinde olduğu gibi, Gı- Δa grafiklerinde de benzer bir karakteristik olduğu ve çatlak ilerleyişinin sırasıyla 50, 55 ve 60 mm'ye kadar devam ettiği görülmektedir. Şartlandırma ortamları bağlantıyı gevrekleştirdiği için çatlak ilerleyişini oldukça hızlandırmış ve %20 ile %40 arasında çatlak mesafesi düşüşleri oluşturmaktadır. Kritik şekil değiştirme enerjisi (Gıc) değerlerine bakıldığında, referans numunesinin Gıc değeri 0.55 J/m^2 olarak ölçülmüştür. Bu durum (Steinbrecher ve ark., 2006) tarafından yapılan çalışmadaki değerlerle benzer niteliktedir. Şartlandırma neticesinde ise tüm ortamların referans numunesinden düşük olduğu, en fazla düşüşün de asidik ortamlarda şartlandırılan numunelerde gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum SLJ testlerinden elde edilen sonuçları da destekler niteliktedir. SLJ testlerine göre de asidik ortamların, alüminyum yapıştırıcı ara yüzeyini oldukça etkilemesi neticesinde şekil değiştirme ve mukavemet değerlerinde büyük oranda düşüşler olduğu tespit edilmişti.

Referans numunesine ait kırılma tokluğu-çatlak uzunluğu eğrisinin en belirgin karakteristik özelliği eğrilerin düz olmayıp testere şeklinde oluşudur. Bu davranış yapıştırıcının yüzeye etkili yapışması nedeniyle çatlağın ilerlerken sürekli matris içerisinde yön değiştirmesi sonucu enerji kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Şartlandırma neticesinde ise, matris yapısının gevrekliği sebebiyle çatlağın matris içerisinde çok fazla yön değiştirememesi sebebiyle kırılma gerçekleşmiş ve referans eğrisinin karakteristik özelliğini değiştirmiştir.





Şekil 5.83. Alüminyum saf epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (G_I-Δa grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl

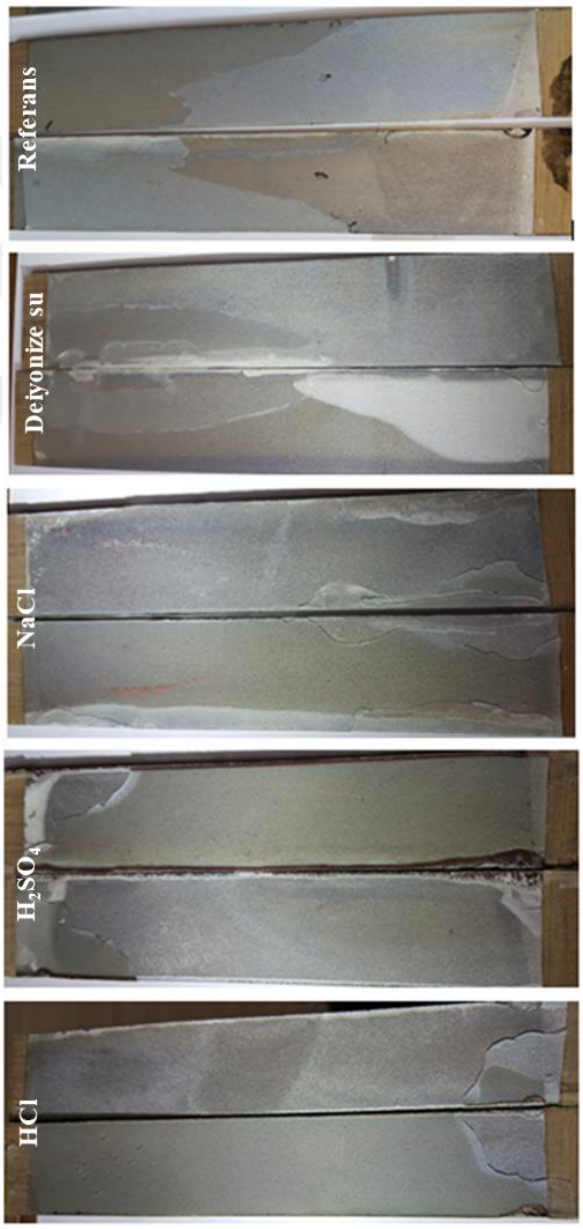


Şekil 5.84. Alüminyum saf epoksi bağlantılarının G_{IC} kıyaslama grafiği

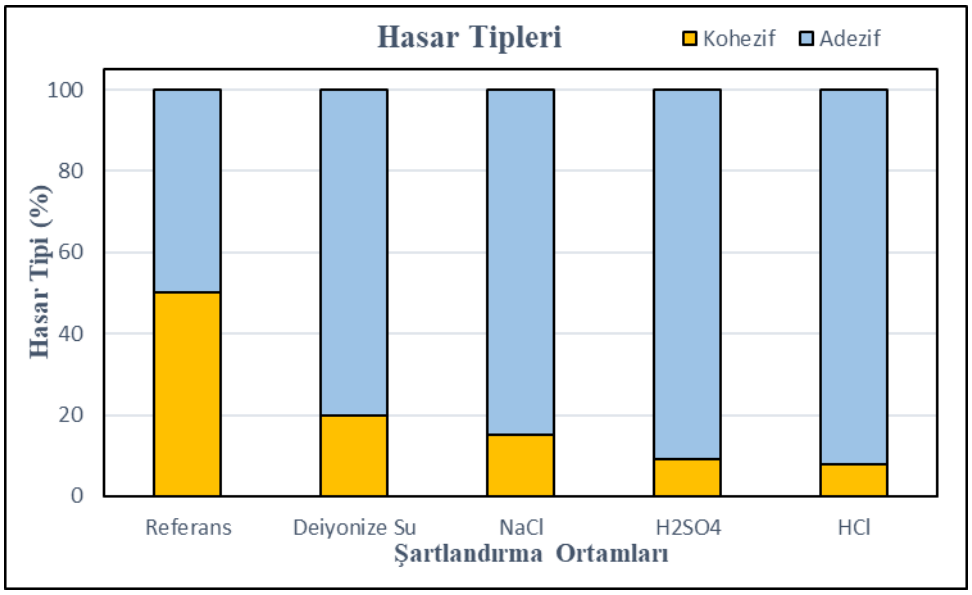
Şekil 5.85'de alüminyum saf epoksi bağlantılarının DCB testlerinden elde edilen hasar yüzeylerinin makro görüntüleri, şekil 5.86'da da hasar tiplerinin grafiği görülmektedir. Normal şartlarda kararlı ve kararsız çatlak ilerleyişinin hasar yüzeylerinin belirli bölgelerinde görülmesi gerekmektedir fakat korozif ortamların alüminyum yüzeyini çok fazla etkilemesi sebebiyle bu görüntüler kaybolmaktadır. Şekil

5.85'de ki NaCl, H_2SO_4 ve HCl ortamlarındaki numunelerin görüntülerine bakıldığında şartlandırma ortamı sebebiyle yüzeyde oluşan oksidasyon ve diğer şartlandırma ürünleri sebebiyle bazı renk değişimleri tespit edilmiştir. Kuvvet uygulanmaya başladığı andan itibaren uygulanan yük bu bölgelerden iç tarafa doğru ilerlerken, çatlak matris içerisinde ilerleyemeden hasar gerçekleşmiştir.

Hasar tipi grafiğine bakıldığında referans numunesinde %50 oranında kohezif hasar oluşumu gözlemlenirken, asidik ortamlara doğru adezif hasar tipi artmaktadır. Adezif hasar tipinin artışı bağlantı kalitesinin azaldığının bir göstergesidir. Buna bağlı olarak çatlak uzunluğu ve hasar kuvveti değerleri de azalmaktadır.



Şekil 5.85. Alüminyum saf epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının hasar yüzeyleri



Şekil 5.86. Alüminyum saf epoksi bağlantıları DCB testi hasar tipleri

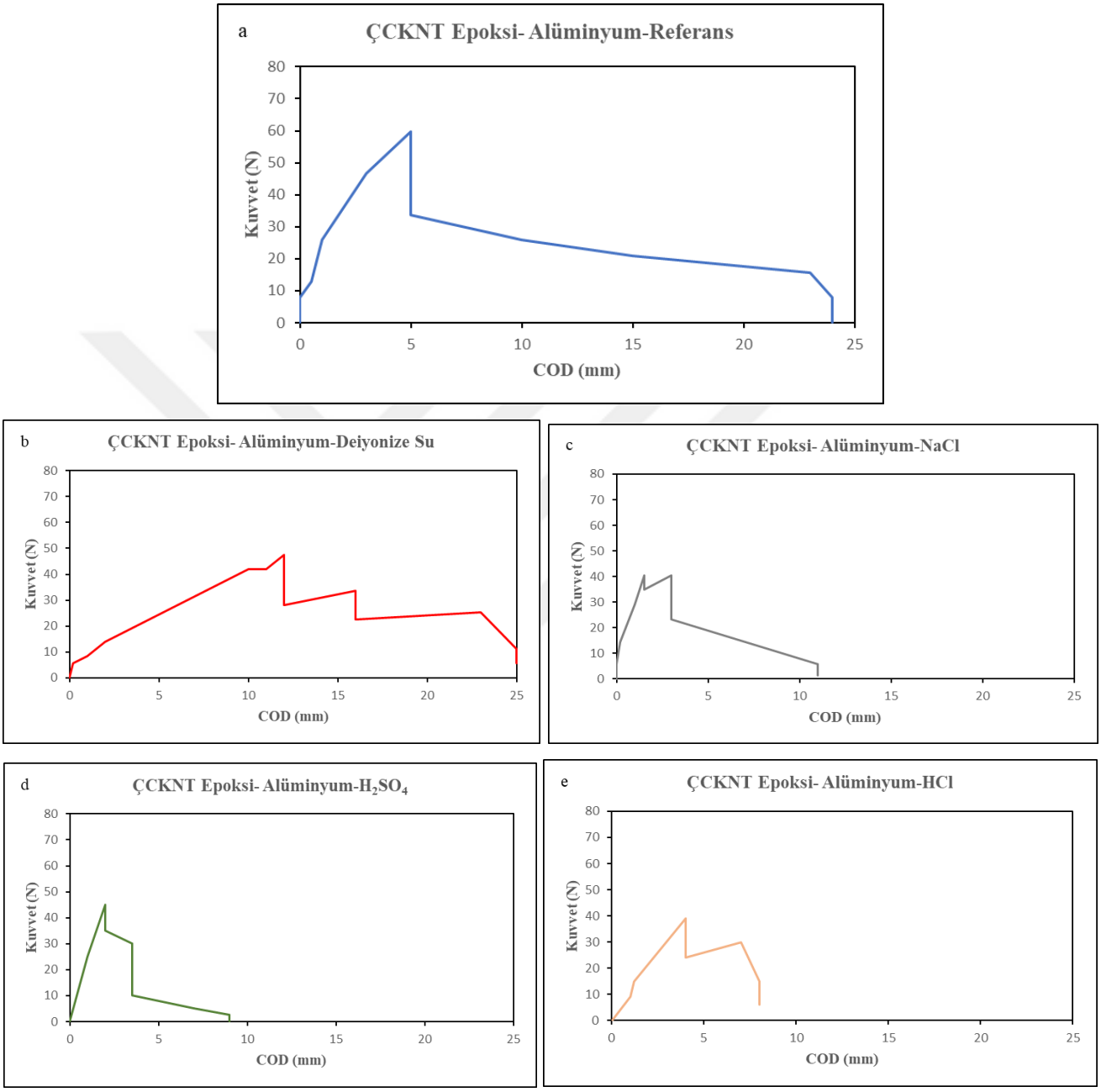
Şekil 5.87'de ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan alüminyum çift konsol kiriş bağlantılarının şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerinin P-COD grafikleri gösterilmektedir. Referans eğrisine bakıldığında (şekil 5.87 a) yük uygulanmaya başladığı andan itibaren 5 mm'lik bir kararlı ilerleme sonucu kuvvet 59 N'a ulaşıp ani bir kararsız düşüşle 35 N a indiği görülmektedir. Bu noktadan itibaren azalmaya devam eden kuvvet 20 N'a kadar düşerek bu noktada kırılma gerçekleşmiştir.

Şekil 5.87 b' de deiyonize su içerisinde şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Yük uygulanmaya başladığında 11.5 mm ye kadar kararlı bir şekilde ilerleyen çatlak 48 N'a ulaşmaktadır. Buradan itibaren kararsız çatlak ilerlemesi başlamış olup kuvvet 26 N a kadar düşmektedir. Yeniden kararlı ilerleyiş gösteren bir çatlak kuvveti 32N 'a çıkarmakta ve bu noktadan itibaren tekrar kararsız çatlak ilerlemesi göstererek 14 N seviyelerinde kırılma gerçekleşmiştir. Deiyonize ortamında şartlandırılan numunenin kırılma davranışı ve eğri karakteristiği referans eğrisinden oldukça farklıdır. Dolayısıyla bu durum doğrudan şartlandırma ile ilgilidir.

Şekil 5.87 c' de NaCl ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Kararlı bir şekilde ilerleyen çatlak 40 N seviyesine gelince kısa bir kararsız ilerleme gösterip tekrar kararlı bölgeye girmiştir. Kararlı bölge de kısa bir ilerleyişin ardından tekrar kararsız bölgeye girerek kuvvet 8 N a kadar düşmüş ve hasar gerçekleşmiştir.

Şekil 5.87 d ve e' de H_2SO_4 ve HCl ortamlarında şartlandırılan numunelere ait grafikler gösterilmektedir. Her iki ortamın eğri karakteristiği birbirine benzemektedir.

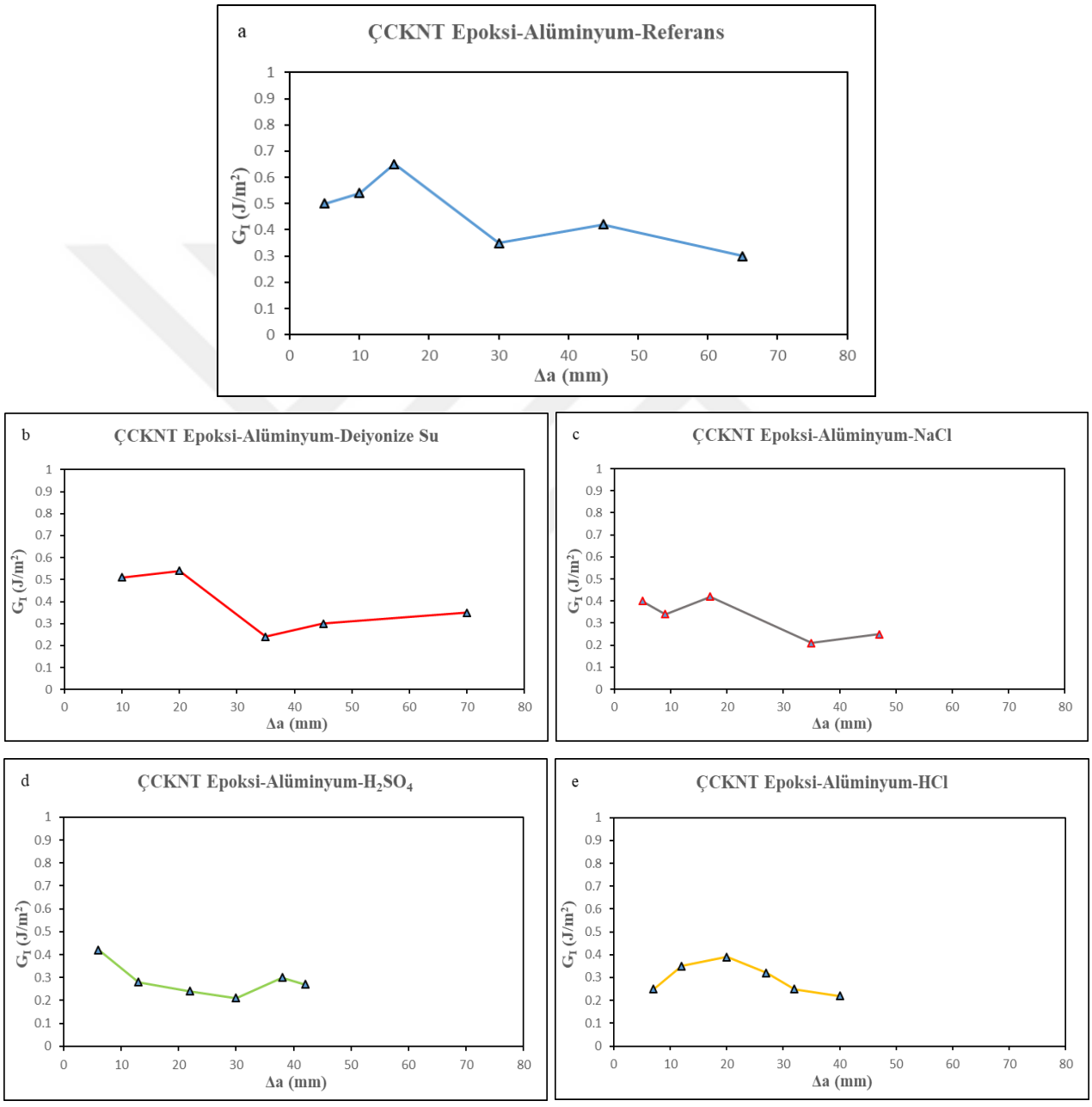
H_2SO_4 ortamında şartlandırılan numune de maksimum kuvvet 43 N'a ulaşırken, HCl ortamında 39 N a ulaşmaktadır. H_2SO_4 ortamında hasar 4 N da gerçekleşirken, HCl ortamında 9 N da gerçekleşmektedir.



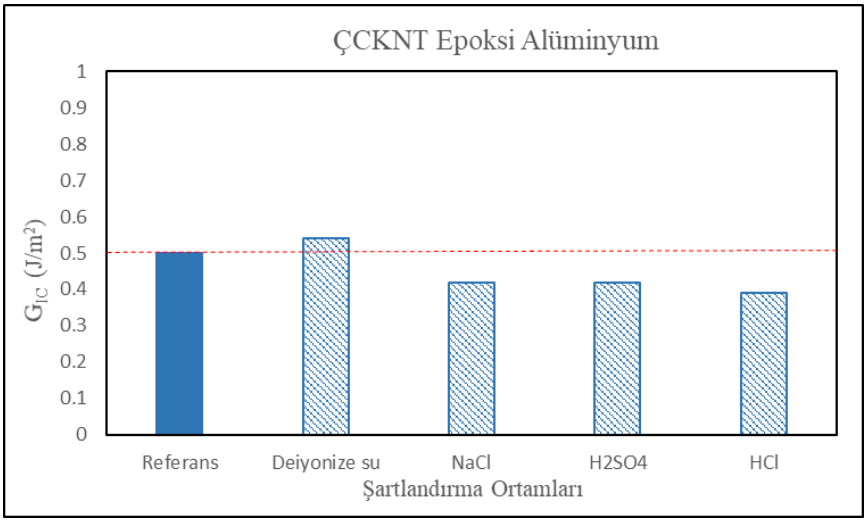
Şekil 5.87. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi reçine çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (P-COD grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl

Şekil 5.88'de alüminyum ÇCKNT takviyeli bağlantılara ait GI-Δa grafikleri, en büyük kritik şekil değiştirme enerjisi (Gıc) değerlerinin kıyaslandığı grafik ise şekil 5.88'de verilmektedir. Grafikler incelendiğinde çatlak ilerleme miktarlarında, deiyonize

su ortamında %4 artış (şekil 5.88 b), diğer ortamlarda ise sırasıyla %30 (şekil 5.88 c), %35 (şekil 5.88 d) ve %38 (şekil 5.88 e) oranında azalışlar olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak kritik kırılma enerjilerinde ise deiyonize su ortamında artış, diğer ortamlarda düşüş olduğu görülmektedir. Hem çatlak ilerleyişi değerlerinin azalması hem de kritik kırılma değerlerinin azalması, bağlantının gevrekleştiğinin ve çatlağın matris içerisinde kararlı bir ilerleyiş gösteremediğinin bir göstergesidir.

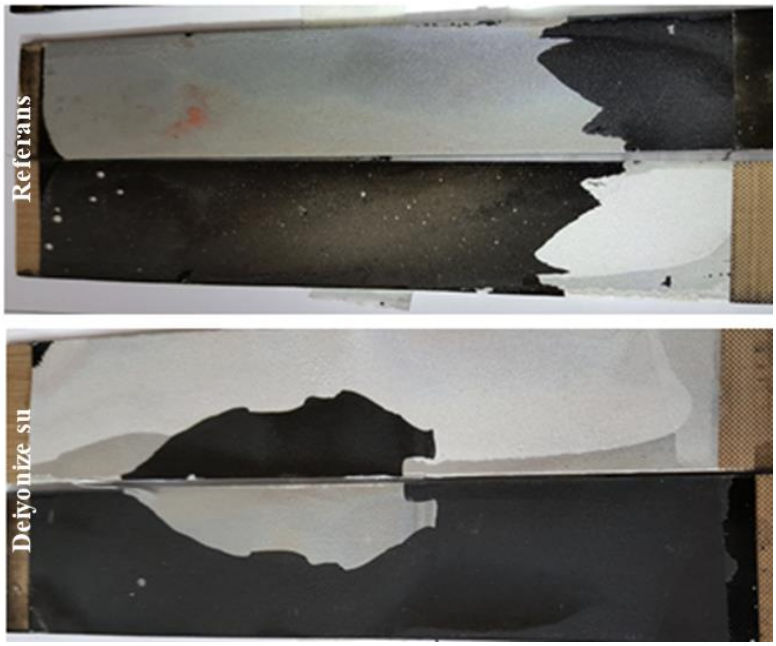


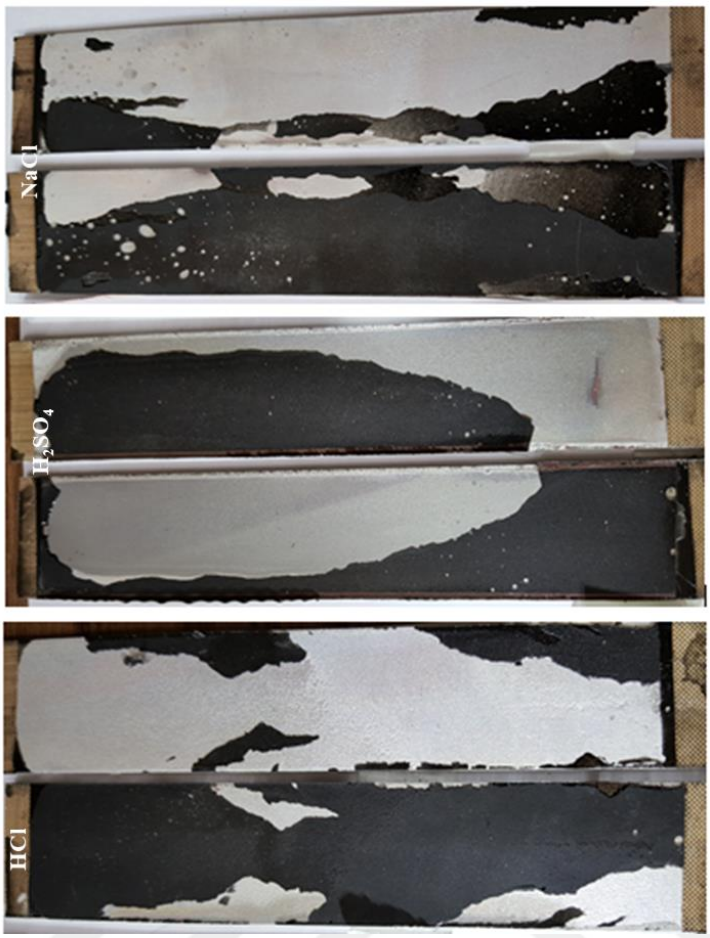
Şekil 5.88. Alüminyum ÇCKNT epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (G_I-Δa grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl



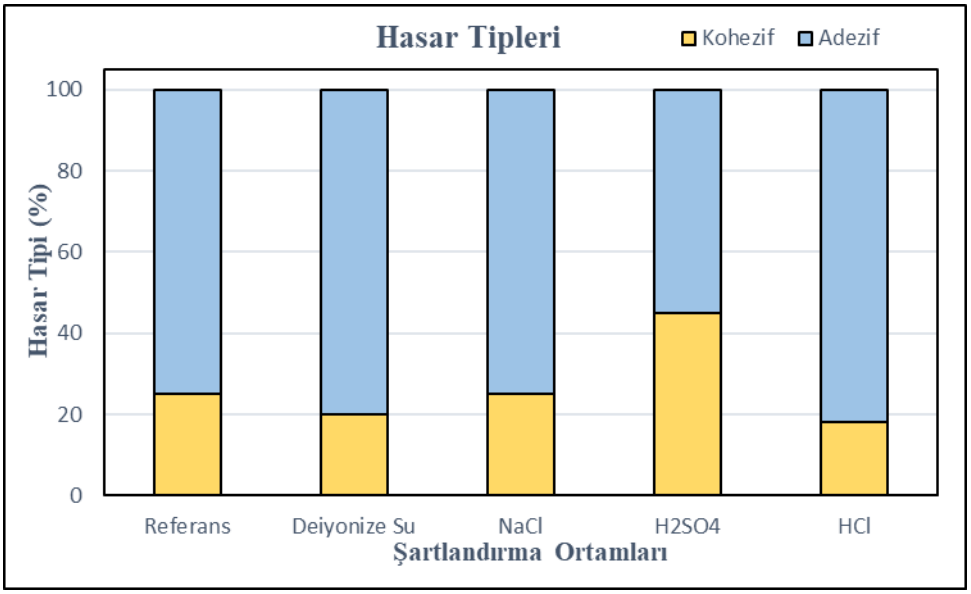
Şekil 5.89. Alüminyum ÇCKNT bağlantılarının G_{IC} kıyaslama grafiği

Şekil 5.90'da alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının DCB testlerinden elde edilen hasar yüzeylerinin makro görüntüleri, şekil 5.91'de de hasar tiplerinin grafiği görülmektedir. Hasar yüzeylerine bakıldığında şartlandırma işlemine bağlı olarak yüzeylerde oluşan tahribat, renk değişimleri şeklinde görülmektedir. NaCl ortamında şartlandırılan numune yüzeyine bakıldığında, tuz kristallerinin iç bölgelere nüfuziyeti sebebiyle lokal gözenekler oluşmaktadır. Şekil 5.91'de gösterilen hasar tipi grafiğine bakıldığında ise sülfirik asit ortamı dışında hasar tipinin referans eğrisine yakın olduğu, sülfirik asit ortamındaki numunede ise kohezif hasar yüzdesinin arttığı görülmektedir.





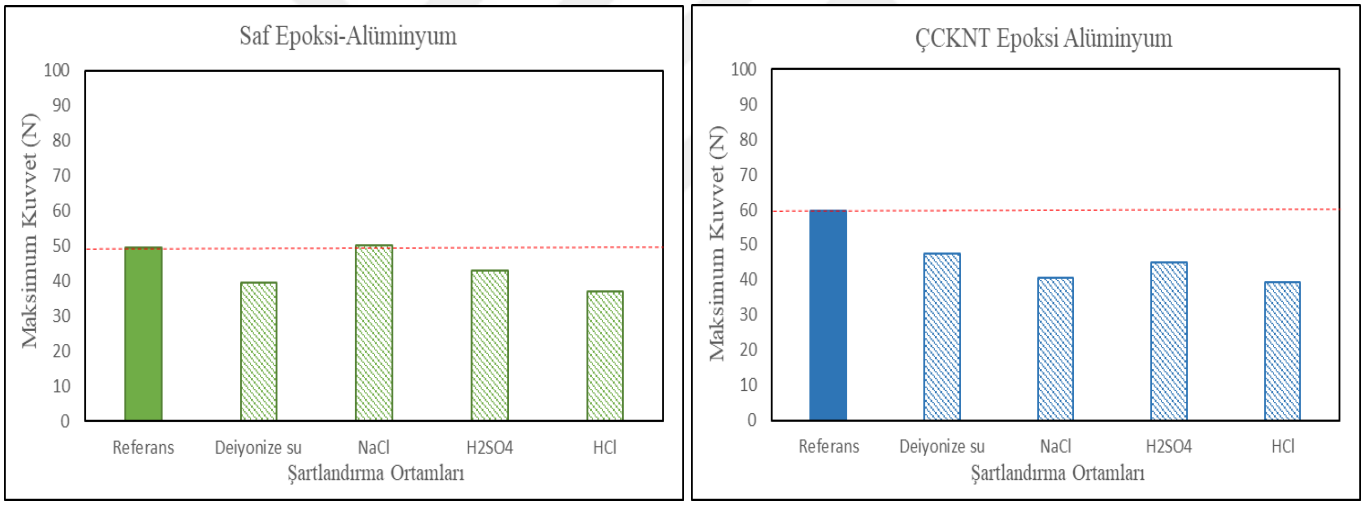
Şekil 5.90. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının hasar yüzeyleri



Şekil 5.91. Alüminyum ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantıları DCB testi hasar tipleri

Şekil 5.92'de saf epoksi ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçineli bağlantılarının DCB testleri neticesinde ölçülen maksimum kuvvet değerleri kıyaslama grafikleri gösterilmektedir. SLJ testlerine bakıldığında ÇCKNT takviyesinin bağlantı

mukavemetini olumsuz etkilediği ve yapıştırıcının yüzeye tutunmasını zorlaştırdığı tespit edilmişti. DCB testlerine bakıldığında ise gerek referans numuneleri (saf ve ÇCKNT takviyeli şartlandırılmamış numuneler) açısından gerekse şartlandırılan numunelerde ÇCKNT takviyesinin bağlantı kuvvetinin arttığı fakat, ÇCKNT takviyesinin reçine şekil değiştirmesini kısıtlaması sebebiyle çatlak ilerleyişini azalttığı söylenebilir. Bu durum, bağlantıya uygulanan gerilme tipinin farklılaşması sebebiyle oluşmaktadır. SLJ testlerinde bağlantılar kayma gerilmesine, DCB testlerinde ise çekme gerilmesine maruz bırakılmaktadır. Bağlantıların çekme gerilmesine maruz bırakılması ise ÇCKNT takviyesinin bu tip yükleme durumunda bağlantının maksimum kuvvet açısından iyileşmesine neden olmaktadır. Bu sebeple alüminyum bağlantılarında, ÇCKNT takviyesi kullanmak için, bağlantının yükleme yönünün ve şartlandırma ortamının tipinin de önemli olduğu ve takviye kullanılıp kullanılmayacağına buna göre karar vermek gerekmektedir.



Şekil 5.92. Saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi alüminyum bağlantılarının DCB testinde ölçülen maksimum kuvvet kıyaslama grafiği

Şekil 5.93'de karbon elyaf takviyeli kompozit saf epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerinin P-COD grafikleri gösterilmektedir. Tüm numunelerde zikzaklar oluşturan testere karakteristiğine sahip eğriler oluştuğu görülmektedir. Derin zikzak oluşumları, yapının gevrekleştiğinin bir göstergesi iken, zikzakların sığlaşması ise yapının sünekleştiğinin bir göstergesidir.

Referans eğrisine bakıldığında (şekil 5.93a) 2 mm'lik bir kararlı çatlak ilerleyişi görülerek ani ve derin bir kararsız çatlak ilerleyişi gerçekleşerek kuvvetin 71 N'dan 43 N'a düştüğü görülmektedir. Ardından tekrar kararlı olarak ilerleyen çatlak yeniden 71 N

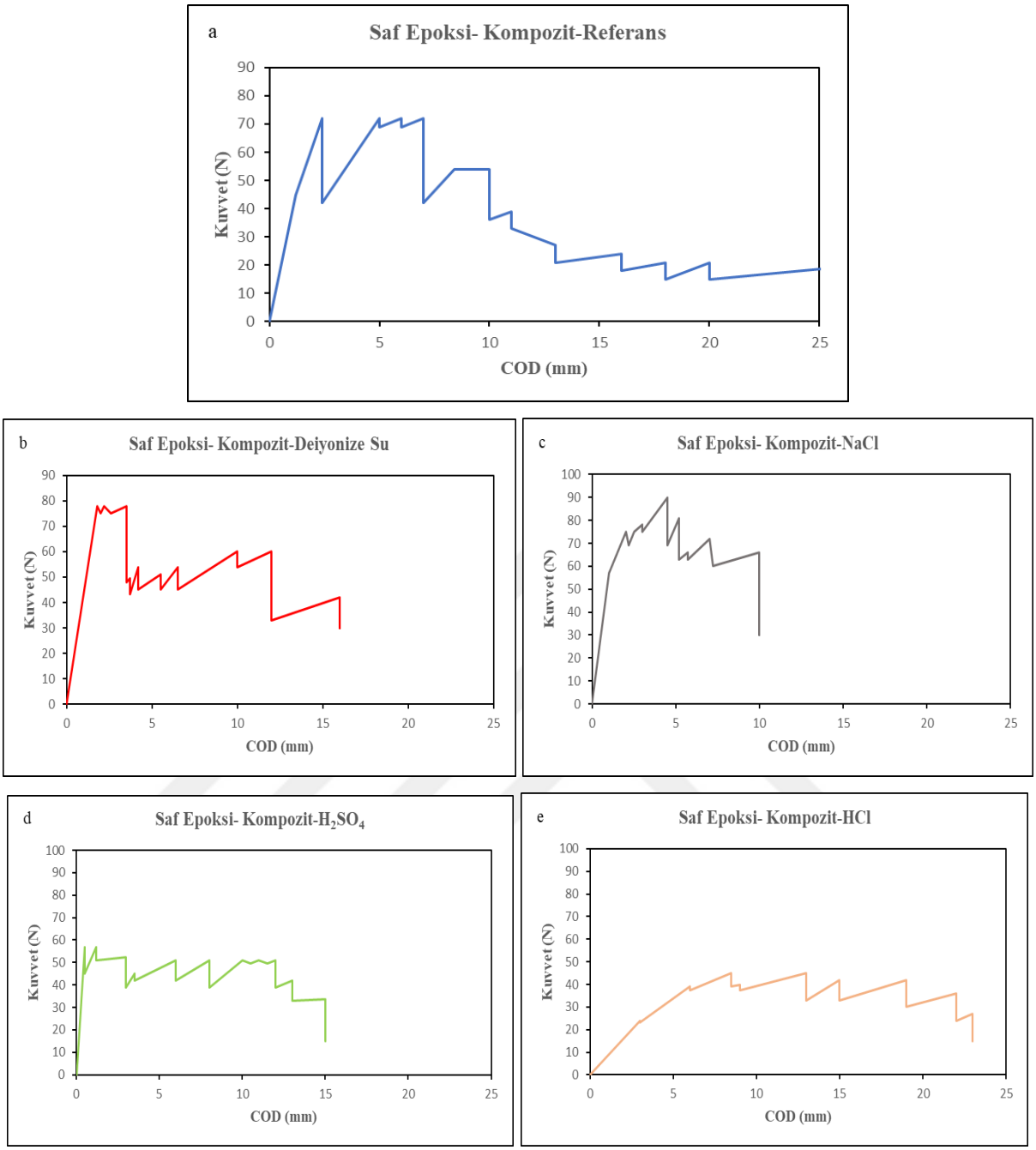
seviyesine ulaşıp çok küçük kararlı ve kararsız çatlak ilerlemeleri gösterip tekrar derin bir kararsız çatlak ilerlemesi göstererek 43 N'a düşmektedir. Bu noktadan itibaren arka arkaya kararlı ve kararsız çatlak ilerlemeleri göstererek 20 N seviyesinde kırılmıştır. Derin zikzaklar göstermesi sebebiyle referans eğrisinin gevrek bir karakteristiği olduğu söylenebilir.

Şekil 5.93 b'de deiyonize su ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik gösterilmektedir. Bağlantının 2 mm'lik kararlı çatlak ilerlemesi göstererek 78 N seviyesine ulaşıp 2 mm'lik bir kararsız bölge gösterip ardından uzun bir kararsız çatlak ilerlemesi neticesinde kuvvet 50 N seviyesine düşmektedir. Ardından küçük zikzaklar şeklinde kararlı ve kararsız çatlak ilerleyişi gösteren numune, tekrar derin bir kararsız çatlak ilerleyişi göstererek 30 N seviyelerinde kırılmaktadır. Referans eğrisi ile kıyaslandığına maksimum kuvvet miktarında %10'luk bir artış olduğu fakat çatlak ilerleme değerinde ise düşüş olduğu görülmektedir.

Şekil 5.93c'de NaCl ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında 4 mm'lik bir kararlı çatlak ilerleyişi ile beraber 91 N seviyesine çıkan kararlı çatlak ilerlemesi, kararsız bölgeye girerek 70 N seviyesine düşmüş ve birbirini takip eden kararlı ve kararsız ilerleyişlerin ardından 62 N seviyesinde hasara uğramıştır. NaCl ortamında şartlandırılan numune diğer iki numuneyle kıyaslandığında, maksimum kuvvet değeri artarken, uzama değerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.93d'de H_2SO_4 ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında, 1 mm'lik bir kararlı çatlak ilerleyişi ile beraber kuvvetin 55 N seviyesine ulaştığı ve bu bölgenin ardından yakın kuvvet seviyelerinde birbirini takip eden kısa kararlı/kararsız çatlak ilerlemeleri görülmektedir. Kuvvet 35 N da iken numune hasara uğramıştır. Diğer numunelerle kıyaslandığında maksimum kuvvet değerinin azaldığı görülmektedir.

Şekil 5.93e'de HCl ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik gösterilmektedir. 8 mm'lik bir kararlı başlangıç çatlağının ardından 46 N seviyesine ulaşan kuvvet değeri, birbirini takip eden kısa kararlı/kararsız çatlak ilerleyişlerini ardından 25 N'a kadar düşerek kırılma gerçekleşmektedir.

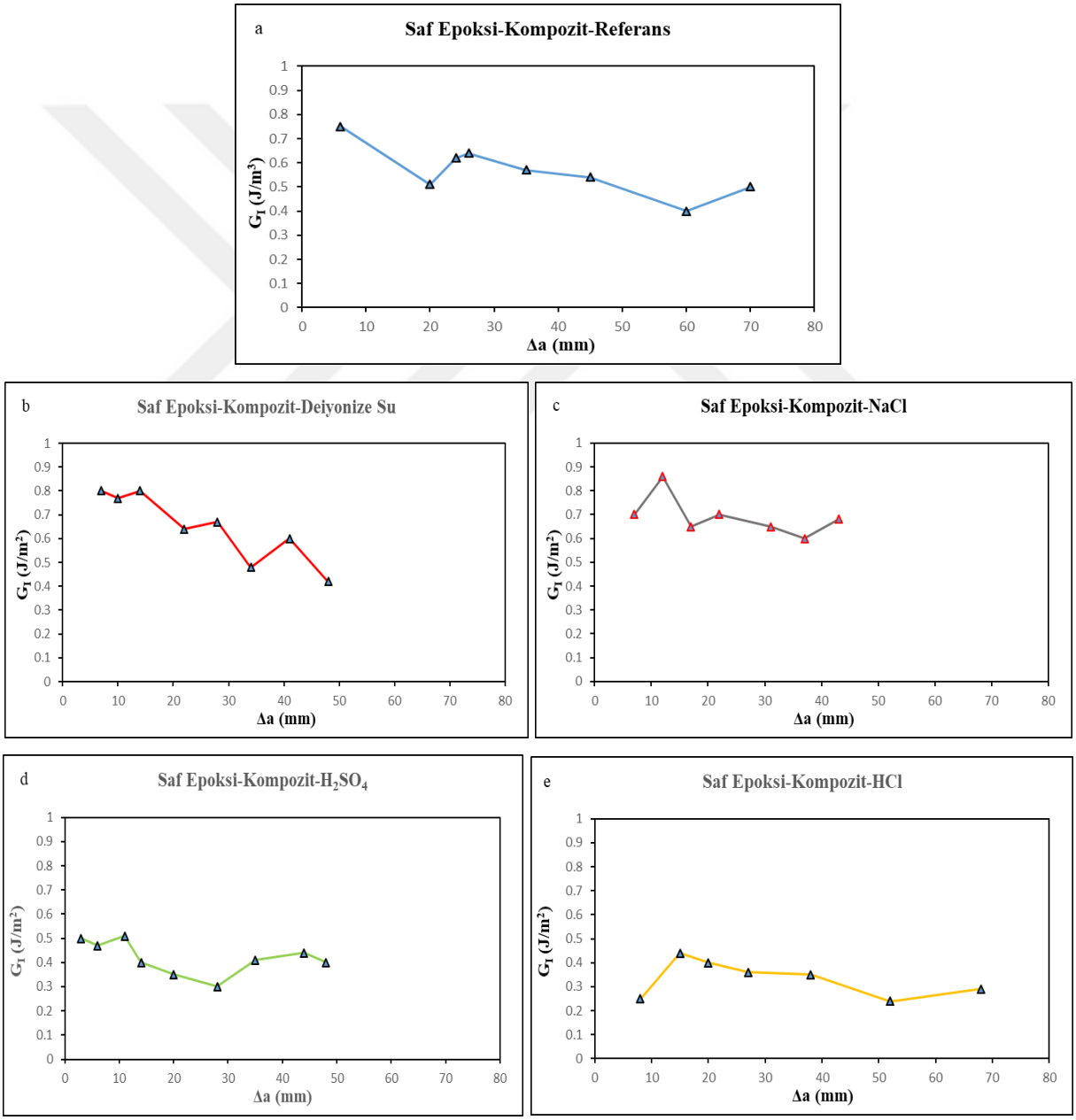


Şekil 5.93. Alüminyum saf epoksi reçine çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (P-COD grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl

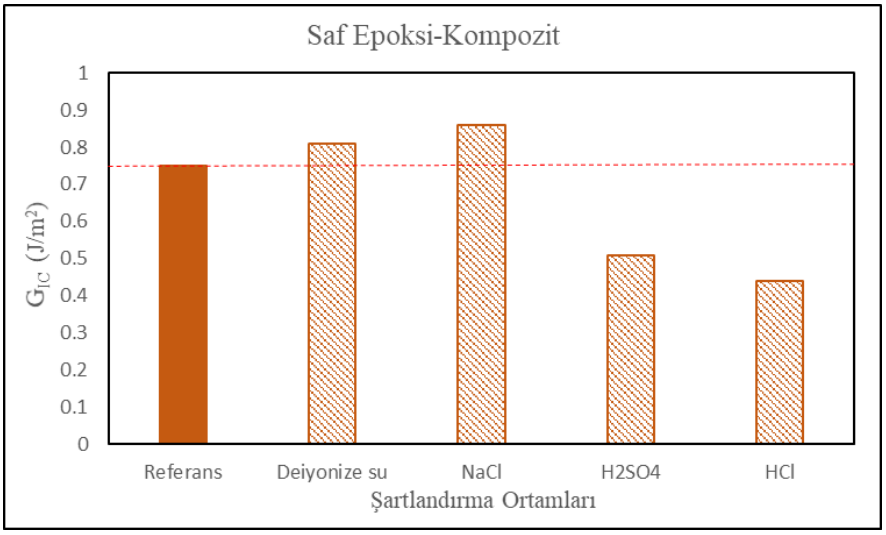
Şekil 5.94'de alüminyum ÇCKNT takviyeli bağlantılara ait GI-Δa grafikler, kritik şekil değiştirme enerjisi (Gıc) değerlerinin kıyaslandığı grafik ise şekil 5.95'de verilmektedir. Referans eğrisine bakıldığında (şekil 5.94 a) çatlak uzamasının 71 mm diğer ortamlarda ise sırasıyla 49 (şekil 5.94 b), 42 (şekil 5.94 c), 48 (şekil 5.94 d) ve 69 (şekil 5.94 e) mm'ye düştüğü görülmektedir. Bu durum bağlantının, referans numunesine göre daha da gevrekleştiğinin bir göstergesidir. Özellikle tuzlu su ortamında şartlandırılan numuneye bakıldığında, maksimum kuvvet noktasından

itibaren hızlı bir çatlak ilerleyişi olduğu görülmektedir. Bu durum tuzlu su çözeltisinin epoksi, kompozit ara yüzeyine nüfuz ederek bu bölge kararsız yapılar oluşturmasından ve uygulanan kuvvetin bu kararsız yapılar üzerinde hızla aktarılması neticesinde hasara uğramasından kaynaklanmaktadır.

Kritik kırılma tokluğu değerlerine bakıldığında, referans numunesine ait değer, 0.75 J/m^{2}iken, diğer ortamlardaki değerler sırasıyla 0.80 J/m^2, 0.83 J/m^2, 0.51 J/m^{2}ve 0.42 J/m^{2}olarak görülmektedir. Bu durum deiyonize su ve tuzlu su ortamlarında şartlandırılan numunelerin gevrek bir karakteristik göstermesinden kaynaklanmaktadır.

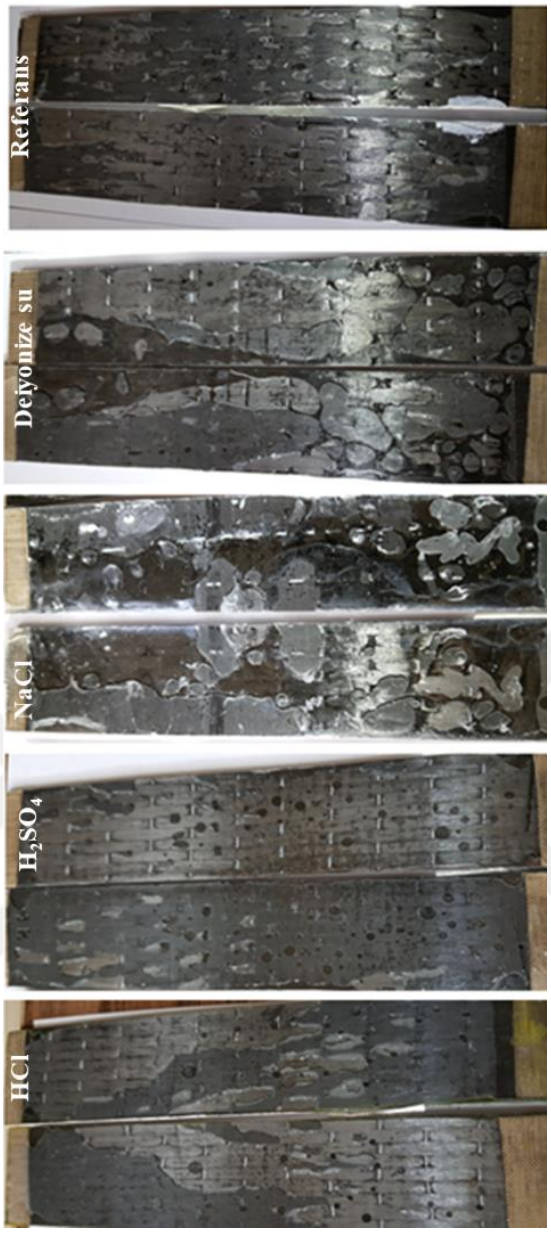


Şekil 5.94. Kompozit saf epoksi reçine çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (G_I-Δa grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl

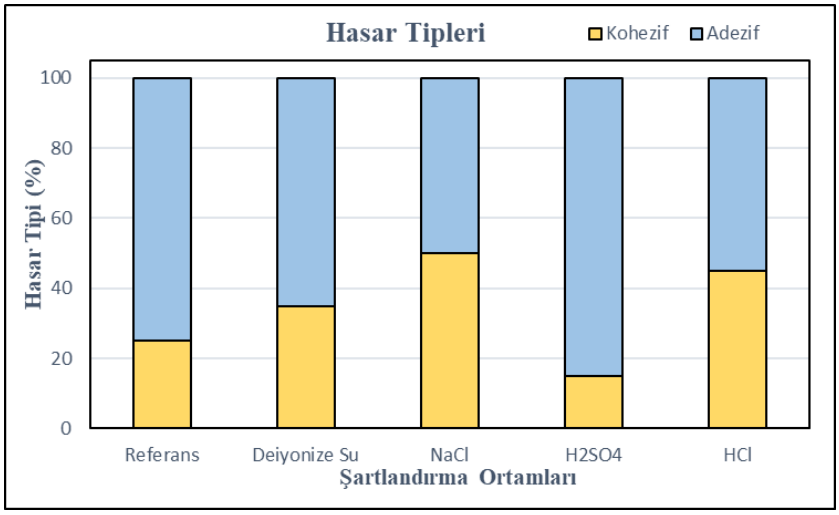


Şekil 5.95. Kompozit saf epoksi bağlantılarının G_{IC} kıyaslama grafiği

Şekil 5.96' da saf epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan kompozit malzemelerin DCB testleri neticesinde elde edilen makro hasar görüntüleri, şekil 5.97'de ise hasar tipi grafiği görülmektedir. Referans eğrisinde görülen yaklaşık %23 oranındaki kohezif hasar tipi, deiyonize su ve tuzlu su ortamında şartlandırılan numunelerde %50 seviyelerine kadar artmaktadır. Bu durum, bu ortamlardaki kritik kırılma enerjisi artışını da açıklar niteliktedir. Deiyonize su ve NaCl ortamında şartlandırılan numunelere bakıldığında, çatlak ilerleyiş miktarının neden azaldığı görülmektedir. Şartlandırma etkisi ile yapıda oluşan kararsız şartlandırma ürünleri özellikle tuzlu su ortamındaki numunede zayıf bölgeler oluşturarak, bağlantıdaki çatlağın bu bölgelerden kolay bir şekilde ilerlemesini sağlamıştır. Bu durum, numunenin çatlak ilerleyişinin başladığı bölge de değil numunenin ilk üçte birlik bölümünden sonra artmaktadır. Bu durum, P-COD grafiklerindeki kısa küçük zik zak oluşumlarını açıklamaktadır.



Şekil 5.96. Kompozit saf epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının hasar yüzeyleri



Şekil 5.97. Kompozit saf epoksi bağlantıları DCB testi hasar tipleri

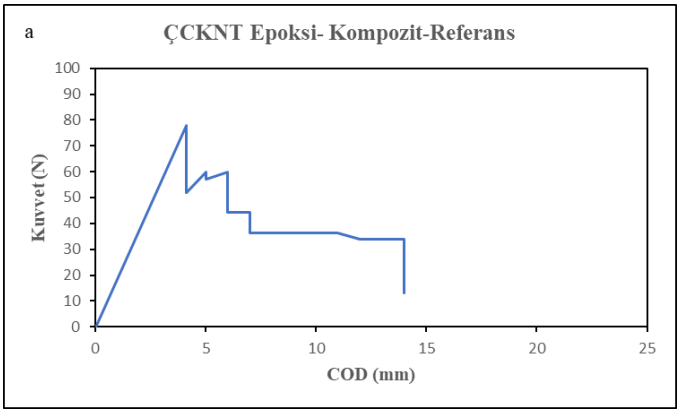
Şekil 5.98'de karbon elyaf takviyeli kompozit saf epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının şartlandırılmış ve şartlandırılmamış numunelerinin P-COD grafikleri gösterilmektedir. Referans numunesine bakıldığında, 3.4 mm'lik bir kararlı çatlak ilerleyişinin ardından 79 N seviyesine ulaşan kuvvet, keskin bir kararsız çatlak ilerleyişle beraber 52 N a düşmektedir. Tekrar kararlı bir şekilde ilerleyen çatlak sonucu kuvvet 58 N'a ulaşmakta ve ardından kararsız çatlak ilerlemesiyle beraber 39 N'a düşerek kırılma gerçekleşmektedir.

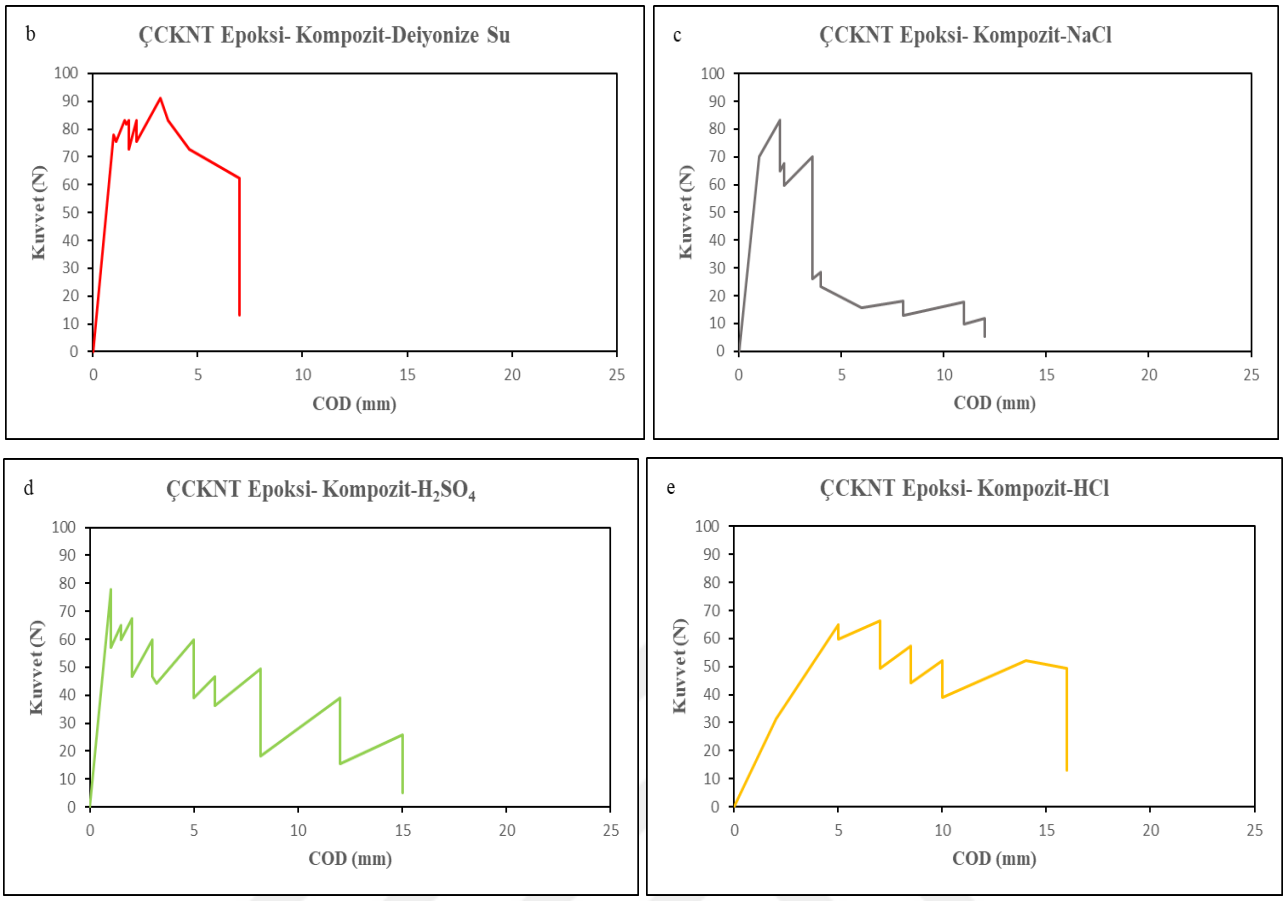
Şekil 5.98b'da deiyonize su ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. 1 mm boyunca kararlı ilerleme gösteren çatlak 79 N'a ulaşıp kısa aralıklarla kararlı ve kararsız ilerleyiş gösterip tekrar kararlı trende girerek 91 N'a ulaşmaktadır. 91 N a ulaştıktan sonra 67 N'a kadar düşüp kırılma gerçekleşmektedir.

Şekil 5.98c 'de NaCl çözeltisi ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. Numune içerisindeki çatlak 2 mm kararlı bir şekilde ilerleyip 82 N da durmakta ve kararsız bölgeye girerek 61 N a düşmektedir. Tekrar kararlı bölgeye giren çatlak 70 N kadar tırmanıp keskin bir kararsız düşüş ile 30 N a düşmektedir. Bu noktadan itibaren kısa ve birbirini takip eden kararlı kararsız ilerleyişin ardından 17 N'da kırılma gerçekleşmektedir.

Şekil 5.98 d'de H_2SO_4 çözeltisi ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. 1 mm'lik kararlı çatlak ilerleyişi ile 77 N'a çıkan kuvvet değeri, kısa bir kararsız bölge göstererek 60 N'a düşmektedir. Çok sayıda kısa ve birbirini takip eden kararlı/kararsız çatlak ilerleyişlerinin oluşumu sonrasında 23 N'da kırılma gerçekleşmektedir.

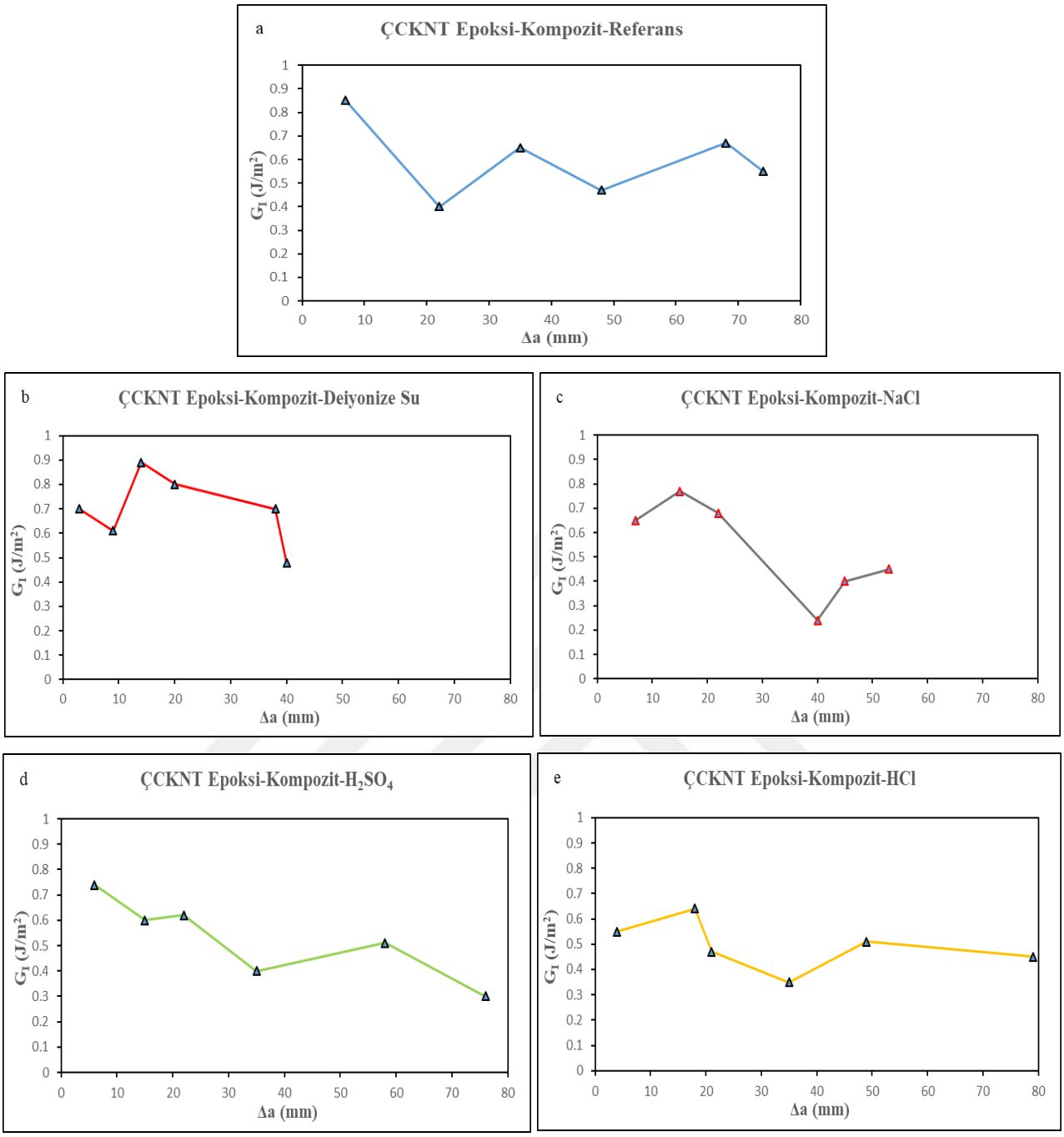
Şekil 5.98e'de HCl çözeltisi ortamında şartlandırılan numuneye ait grafik görülmektedir. 8 mm'lik bir kararlı çatlak ilerleyişinin ardından 67 N a ulaşan kuvvet, kararsız çatlak ilerlemesi sonucu 50 N'a düşmektedir. Birbirini takip eden eşit uzunluktaki çatlak ilerlemelerinin ardından 49 N da hasar gerçekleşmektedir.



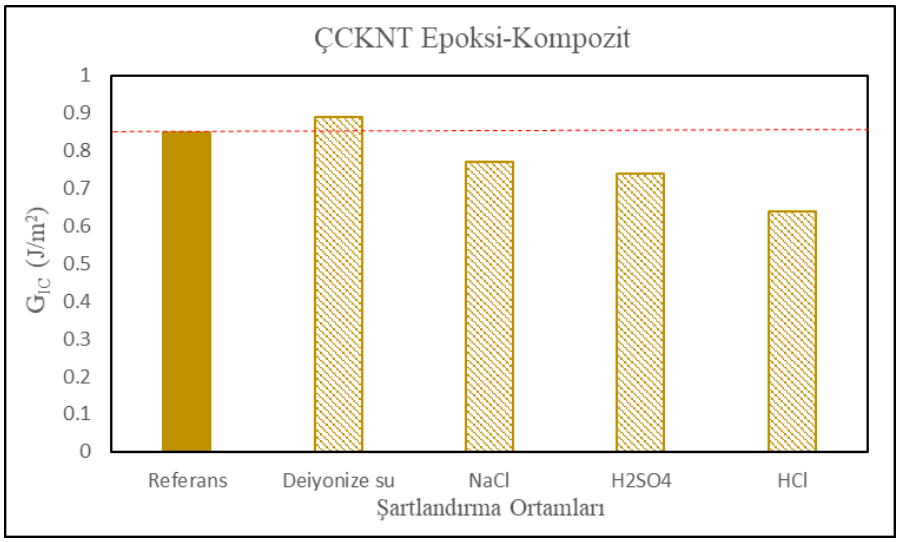


Şekil 5.98. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi reçine çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (P-COD grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl

Şekil 5.99'da kompozit ÇCKNT takviyeli bağlantılara ait kırılma enerjisi çatlak uzunluğu grafikleri, şekil 5.100'de de en büyük kritik kırılma enerjisi değerlerinin kıyaslama grafiği görülmektedir. Referans eğrisinin kritik kırılma enerjisi, 0,85 J/m^2 seviyesinde iken, deiyonize su ortamında şartlandırılan numune de %5 artış diğer ortamlarda da sırasıyla %5, %11 ve %20 azalma görülmektedir. Çatlak ilerleme değerleri ise referans numunesinde 75 mm iken, deiyonize su ortamında 40 mm, NaCl ortamında 52 mm, H_2SO_4 ortamında 76 mm ve HCl ortamında 79 mm dir. Deiyonize su ve NaCl ortamında şartlandırılan bağlantıların referans numunesine göre gevrekleştiği, asidik ortamlarda şartlandırılan numunelerin ise sünekleştiği söylenebilir. Asidik ortamlardaki numunelerde, bağlantının sünekleşmesine bağlı olarak çatlağın çok fazla dirençler karşılaşmadan matris içerisinde rahat bir şekilde ilerlediği görülmektedir.

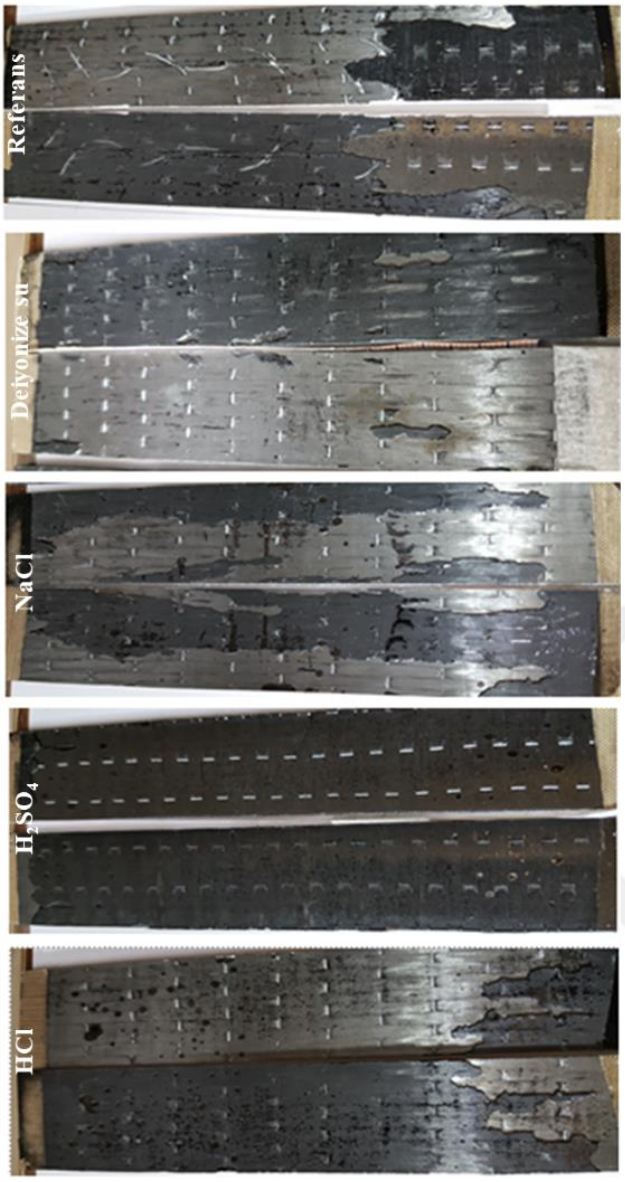


Şekil 5.99. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi reçine çift konsol kiriş bağlantılarının DCB testi sonuçları (G_I-Δa grafikleri) **a**-Referans **b**-deiyonize su **c**- NaCl **d**- H_2SO_4 **e**- HCl

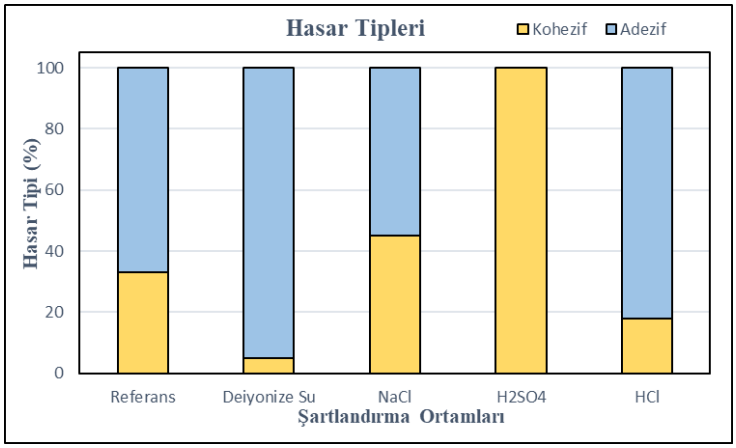


Şekil 5.100. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantılarının G_{IC} kıyaslama grafiği

Şekil 5.101'de numunelerin hasar yüzeylerinin makro görüntüleri şekil 5.102'de ise görülmektedir. Referans eğrisinde %36 civarında gözlemlenen kohezif hasar oluşumu görülmektedir. Deiyonize su ortamında şartlandırılan numune de hasar tipi adezif hasara dönüşmektedir. Bu durum, kritik kırılma tokluğu artışını ve çatlak mesafesinin azalması sonucunu desteklemektedir. NaCl ortamında şartlandırılan numune de kohezif hasar miktarı biraz daha artmış ve yapıştırıcı bağlantı yüzeyine dağılmıştır. H_2SO_4 ortamında şartlandırılan numune yüzeyine bakıldığında hasarın tamamen kohezif olduğu görülmektedir. Bu durum yapıştırıcının yüzeye iyi tutunduğunu ve çatlağın tamamen matris içerisinden ilerlediğini gösterir.

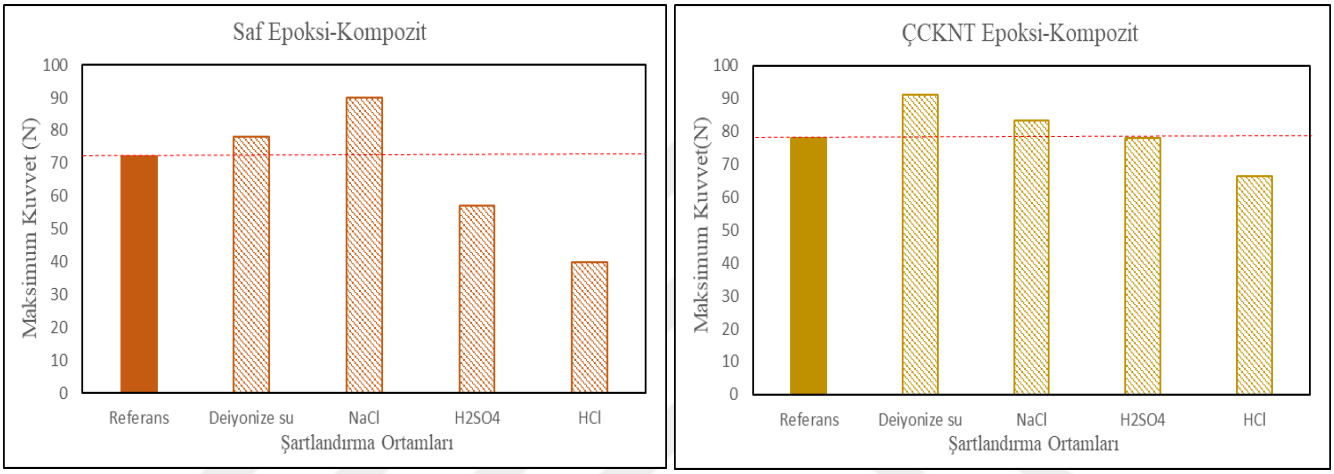


Şekil 5.101. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi çift konsol kiriş bağlantılarının hasar yüzeyleri



Şekil 5.102. Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi bağlantıları DCB testi hasar tipleri

Şekil 5.103'de iki farklı yapıştırıcı ile yapıştırılan numunelerin DCB testleri neticesinde edilen maksimum kuvvet değerleri kıyaslanmaktadır. Grafiklere bakıldığında ÇCKNT takviyeli yapıştırıcı ile yapıştırılan numunelerin referans numunesinden daha iyi ya da referans numunesine yakın sonuçlar gösterdiği görülmektedir. Ayrıca referans numunelerine bakıldığında ÇCKNT takviyesinin bağlantıyı iyileştirdiği görülmektedir. SLJ test sonuçlarında olduğu gibi bu bağlantı tipinde de ÇCKNT takviyesinin şartlandırmanın olumsuz etkilerini azalttığı ve bazı numunelerde ise daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.



Şekil 5.103. Saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi kompozit bağlantılarının DCB testinde ölçülen maksimum kuvvet kıyaslama grafiği

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kompozit malzeme üretiminde ve metal-metal, metal-kompozit yapıştırıcılı bağlantılarda endüstride sıkça kullanılan epoksi reçinenin termal kimyasal ve mekanik özellikleri belirlenmektedir. Ardından bu bağlantıların ve malzemelerin kullanıldığı ortamların epoksi reçineye etkisini belirleyebilmek için deiyonize su, NaCl çözeltisi, H_2SO_4 çözeltisi, HCl çözeltisi ortamlarında şartlandırılan numunelere aynı testler tekrar uygulanarak korozif ortamların epoksi reçineye etkileri tespit edilmektedir. Gerek endüstriyel uygulamalarda gerekse bilimsel çalışmalarda epoksi reçineler, nano partiküller ile takviye edilmektedir. Nano partikül takviyesinin epoksi reçinenin kimyasal ve mekanik özelliklerine etkisini ve nano partikül takviyesinin korozif ortamlardaki davranışı ne şekilde etkilediğini belirlemek için ÇCKNT takviyeli epoksi numuneler aynı ortamlarda şartlandırılıp aynı deneyler uygulanarak sonuçlar saf epoksi reçine ile kıyaslanmaktadır. Üretilen ve şartlandırılan numunelerin bağ yapısını ve kimyasal değişimlerini tespit edebilmek için FT-IR testleri, termal kararlığı ve bozunma sıcaklığını tespit edebilmek için DSC ve TGA testleri, şartlandırma ortamlarındaki absorpsiyonu tespit edebilmek için kütle değişimi ölçümleri ve mekanik özellikleri tespit edebilmek tek eksenli çekme testleri yapılmaktadır. Testlerin ardından elde edilen hasar yüzeyleri, optik mikroskop ve taramalı mikroskop yardımıyla incelenerek hasar tipi tespit edilmektedir. Testler neticesinde elde edilen sonuçlar ve görüntüler ilgili bölümlerde gösterilmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında kimyasal ve mekanik özellikleri belirlenen saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçine yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. İki farklı yapıştırıcı ile yapıştırılan alüminyum-alüminyum ve kompozit-kompozit bağlantıları oluşturarak SLJ (mod I kayma) ve DCB (mod II) testleri yapılmaktadır. Bu deneyler yardımıyla çevresel şartların sadece reçineye etkisi değil, bağlantıya etkisi de belirlenmektedir. Deneyler sonrasında bağlantıların mekanik özellikleri belirlenip ardından hasar yüzeyleri incelenerek hasar tipi tespit edilmektedir.

Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar maddeler halinde bölüm 5.1'de ve bu çalışma ile öneriler ve tavsiyeler bölüm 5.2'de maddeler halinde verilmektedir.

6.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerden elde edilen tüm sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmektedir.

- Saf epoksi reçinenin kütle değişimi sonuçlarına bakıldığında deiyonize su ve NaCl çözeltisi ortamlarındaki numunelerin 24 saat içerisinde ortamlarla dengeye gelerek sıvı emiliminin tamamlandığı görülmektedir. Sıvı emilimi miktarları sırasıyla %0,7 ve 0,3'tür.
- Asidik ortamlardaki numunelerin 500 saate kadar sıvı emilimine devam ettiği, 500 saattin ardından ortamla dengeye gelmeye başladığı görülmektedir. H_2SO_4 ortamındaki numunede sıvı emilimi %2, HCl ortamındaki numunelerde ise %2,5'dur.
- NaCl ortamındaki numunelerin sıvı emiliminin az olması, tuz kristallerinin sıvı emilimini kısıtlamasından kaynaklanmaktadır.
- Asidik ortamdaki numunelerin sıvı emiliminin yüksek çıkması, asidik ortamların reçine zincir yapısını ve çapraz bağ yoğunluğunu etkileyerek sıvı emilimini artırmaktadır.
- ÇCKNT partikül takviyeli epoksi reçinenin deiyonize su ortamındaki sıvı emilimi %0,85'e, NaCl ortamındaki numune, %1'e, H_2SO_4 ortamındaki numunede %6,6, HCl ortamındaki numunede ise %6,5 seviyesine çıkmaktadır. Bu sonuçlar çerçevesinde ÇCKNT takviyesinin tüm ortamlarda sıvı emilimini artırdığı söylenebilir. Bu durum ÇCKNT takviyesinin reçinenin bağ yapısını etkilediğini göstermektedir.
- 30 günlük şartlandırma sonucunda, şartlandırma ortamlarının, bağlantıların merkezine kadar ilerleyebildiği görülmektedir.
- FT-IR spektrumları sonuçları değerlendirildiğinde, polimer zincirlerinde oksitler oluştuğu ve farklı oksit ürünlerinin bulunduğu, epoksi reçinenin karakteristik piklerinin birçoğunda pik derinliklerinde değişmeler olduğu ve konumlarında sağa sola kaymalar oluştuğu söylenebilir.
- Bu değişimler, deiyonize su ve tuzlu su ortamlarında bu değişimler çok fazla değilken, asidik ortamlarda bu durum artmaktadır.
- ÇCKNT takviyesinin de pik derinliklerini değiştirdiği söylenebilir.

- Bu sonuçlara göre epoksi reçinede hem fiziksel yapısında hem de kimyasal yapısında farklılıklara neden olduğu söylenebilir.
- FT-IR spektrumları neticesinde şartlandırma işleminin özellikle 1600 cm^{-1} den sonra oluşan bağları etkilemediği söylenebilir. 824 cm^{-1} ve 567 cm^{-1} dalga boylarında oluşan pikler en fazla etkilenen piklerdir fakat bu bölgedeki piklerin analizi ve sınıflandırması yapılamadığı için hangi bağların etkilendiği tespit edilememektedir.
- DSC test sonuçlarına bakıldığında, zamana bağlı olarak camsı geçiş sıcaklıklarının aynı ortam içerisinde artıp azalabildiği görülmektedir. Bu çapraz bağ yoğunluğunun zamana bağlı olarak artıp azalabildiğini göstermektedir. Deiyonize su ortamında 1 saat şartlandırılan numunenin camsı geçiş sıcaklığı 6˚C, 24 saat sonrasında 12˚C, 168 saat sonra 15˚C artmakta fakat 720 saat sonrasında tekrar düşmektedir. Camsı geçiş sıcaklığı, doğrudan polimerin çapraz bağ yoğunluğuyla ve polimer serbest hacmi ile ilgili olduğu için, zamana bağlı olarak camsı geçiş sıcaklığının değişmesi, sadece şartlandırma ortamının kimyasal yapısının değil, zaman parametresinin de şartlandırma davranışı üzerine önemli bir etkisinin olduğunun göstergesidir.
- NaCl ortamında da benzeri bir durum söz konusudur. Asidik ortamlarda da zamana bağlı bir davranış gözlemlenir fakat özellikle HCl asit ortamında şartlandırılan numunenin camsı geçiş sıcaklığında düşüş olduğu görülmektedir.
- Saf epoksi reçinenin şartlandırma neticesinde bozunma sıcaklıklarına bakıldığında, deiyonize su ve tuzlu su ortamındaki numunelerin camsı geçiş sıcaklığının çok fazla etkilenmediği fakat asidik ortamlardaki numunelerde %15'lik bir düşüş olduğu görülmektedir.
- ÇCKNT takviyeli epoksi reçine numunelerin şartlandırma sonrasındaki camsı geçiş sıcaklıklarına bakıldığında, 1 saatlik sürede deiyonize su ve tuzlu su ortamlarındaki numunelerde 10˚C'lik bir düşüş olduğu görülmektedir. Asidik ortamlardaki numunelerde ise 1 saatte dikkate değer bir değişiklik gözlemlenmemektedir. Bu durum kütle değişimi ölçümleri ile de örtüşmektedir. Bu durum ÇCKNT partiküllerinin çok kısa sürelerde bile suya ve tuzlu suya duyarlı olduğunu göstermektedir. 720 saate kadar şartlandırılan numunelere de bakıldığında, deiyonize su

ve tuzlu ortamlarında aynı trend devam etmektedir. Sonuç olarak ÇCKNT takviyesinin, saf epoksi reçinenin asidik ortamlardaki kararlığını artırdığını fakat deiyonize su ve tuzlu su ortamlardaki kararlılığını düşürdüğünü göstermektedir.

- ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin bozunma sıcaklığına bakıldığında en çok sülfirik asit ortamındaki numunenin etkilendiği, diğer ortamlarda ise artış olduğu görülmektedir. Bu durum da ÇCKNT takviyesinin reçine üzerindeki olumlu etkilerinden birisi olarak söylenebilir.
- Saf epoksi reçinenin TGA testi sonuçlarına bakıldığında, numunelerin termal kararlılığının asidik ortamlarda %20'ye kadar azaldığı görülmektedir. Deiyonize su ve tuzlu su ortamlarındaki numunelerde ise dikkate değer bir değişiklik olmadığı görülmektedir. TGA sonrası kalan kül miktarların da ise deiyonize su ortamındaki numunede bir artış olurken, diğer numunelerde herhangi bir artış olmadığı söylenebilir.
- ÇCKNT takviyeli numunelerin TGA testi sonuçlarına bakıldığında DSC sonuçlarında olduğu gibi deiyonize su ortamındaki termal kararlılığın olumsuz etkilendiği fakat asidik ortamlardaki numunenin termal kararlılığının saf epoksi reçineye göre iyileştiği görülmektedir.
- Şartlandırılmış saf epoksi reçinenin çekme testi sonuçlarına bakıldığında tüm numunelerin uzama değerlerinin arttığı görülmektedir. Maksimum kuvvet değerlerinde ise NaCl ve HCl ortamındaki numunelerde artış, deiyonize su ve sülfirik asit ortamlarında ise düşüş gözlemlenmektedir. Fakat uzama değerleri çok arttığı için kuvvet değerleri düşse bile tüm numuneler tokluğu artmaktadır. Gerilme şekil değiştirme grafiğine bakıldığında şekil değiştirme artışına bağlı olarak numunelerin tümünün sünekleştiği söylenebilir.
- Elastisite modüllerinde ise referans eğrisine kıyasla tüm numunelerde düşüş olduğu görülmektedir.
- Numunelerin hasar yüzeylerinin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında, referans eğrisinde tipik polimer hasar mekanizmaları gözlemlenirken, süneklik artışına bağlı olarak bölgesel plastik deformasyonlar ve sünek kırılma görüntüleri görülmektedir.

- SEM görüntülerine bakıldığında scarp, ribbons, riverlines, parabolik yapılar, 3 boyutlu çatlak dallanmaları, dokulu mikro akışlar görülmektedir.
- NaCl ortamındaki numunelere bakıldığında çatlaklar arasına dolan tuz kristallerinin mukavemeti artırdığı görülmektedir.
- ÇCKNT takviyeli numunelerin şartlandırma neticesindeki çekme testleri sonuçlarına bakıldığında deiyonize su ve tuzlu ortamlarındaki numunelerin maksimum kuvvetlerinde artış, sülfirik asit ve hidroklorik asit ortamlarında ise azalış olduğu görülmektedir.
- Uzama ve tokluk değerlerinde ise referans numunesine kıyasla deiyonize su ve NaCl ortamlarındaki numunelerde artış, asidik ortamlarda ise düşüş görülmektedir.
- Hasar yüzeylerinin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında referans numunesinde tipik hasar yüzeyi özellikleri gözlemlenirken şartlandırılan numunelerde (özellikle H_2SO_4 ortamında) derin, geniş ve dallanmış çatlaklar bulunmaktadır.
- SEM görüntülerine bakıldığında, deiyonize su ortamındaki numunelerde gözlemlenen plastik deformasyonlar tokluk artışını açıklamaktadır. Tuzlu su ortamındaki numunelerde tuz kristalleri ile beraber ÇCKNT partiküllerinin de çatlak köprüleme ve pinlemeye neden olması dolayısıyla mukavemet artışları oluşmaktadır. Asidik ortamlardaki numunelerde gözlemlenen mikro ve nano boşluklar mukavemeti aşağı çekmektedir.
- Saf epoksi ile ÇCKNT numuneleri birbirleriyle kıyaslandığında ÇCKNT takviyesinin reçinenin şekil değiştirme kabiliyetini kısıtladığı söylenebilir.
- Genel olarak ÇCKNT takviyesi, epoksi reçinenin termal ve kimyasal özelliklerini iyileştirirken mekanik özellikleri az da olsa olumsuz etkilemektedir.
- Alüminyum saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantılara bakıldığında, deiyonize su ve tuzlu su ortamlarında yarı yarıya, asidik ortamlarda ise %75 oranında mukavemet kaybı olduğu görülmektedir.
- Uzama miktarlarında, tokluk değerlerinde, elastisite modüllerinde de benzer şekilde düşüş olduğu görülmektedir.

- Hasar tiplerine bakıldığında referans numunesinden HCl asit ortamına doğru gidildikçe hasar tipi de kohezif hasardan adezif hasara doğru gitmektedir.
- Hasar yüzeylerine bakıldığında, mikro ve nano boşluklar ve gevrek (parlak) kırılma yüzeyleri görülmektedir. Kırılma yüzeylerinde çeşitli şartlandırma ürünleri ve oksitler görülmesi, şartlandırma çözeltisinin numune merkezlerine kadar gittiğini göstermektedir.
- Yapıştırıcıların şartlandırma sonrası mekanik özelliklerine bakıldığında çok fazla bir kayıp olmadığı hatta bazı ortamlarda artış olduğu görülmüştü. Şartlandırma neticesinde SLJ bağlantılarının tamamının mukavemetinin düşmesi, yapıştırma işleminde sadece yapıştırıcı durumunun değil bağlantı yüzeyinin de önemini göstermektedir. Yapıştırıcı ve alüminyum ara yüzeyi şartlandırma işleminden yapıştırıcının kendisinden daha çok etkilendiği için mukavemet oldukça düşmektedir.
- Alüminyum ÇCKNT takviyeli tek taraflı bindirmeli bağlantılara bakıldığında tüm ortamlarda mukavemetin %75'e kadar düştüğü görülmektedir. ÇCKNT takviyesi şartlandırma ortamı çeşidinden bağımsız olarak tüm numunelerin mukavemetini aynı seviyeye indirmektedir.
- Uzama ve tokluk değerlerinde de referans eğrisine kıyasla büyük düşüşler olduğu görülmektedir. ÇCKNT takviyesi yapıştırıcının alüminyum yüzeyine tutunmasını zorlaştırmaktadır. Çünkü yapıştırma sürecinde, yapıştırıcının yüzeye tutunmasını artırmak için alüminyum yüzeyinde oluşturulan düzenli alüminyum oksitler, şartlandırma işlemi ile bozularak alüminyum yüzeyini düzensiz bir hale getirmektedir. Alüminyum yüzeyinde oluşan bu durum ÇCKNT partiküllerinin yüzeye tutunmasını daha da zorlaştırarak bağlantı mukavemetini düşürmektedir.
- Hasar tiplerine bakıldığında da hasar tipinin asidik ortamlara doğru gidildikçe adezif hasar oluşumunun arttığı görülmektedir.
- Bu numunelerin SEM görüntülerine bakıldığında, parlak kırılma yüzeyleri ve çeşitli şartlandırma ürünleri görülmektedir. Bu durum ÇCKNT partiküllerinin sıvı emilimini artırmasından kaynaklanmaktadır. Parlak kırılma yüzeylerinin varlığı ise, uygulanan kuvvetin yapıştırıcı

içerisinden değil bağlantı ara yüzeyinden aktarıldığının göstergesidir. Kuvvet bağlantı ara yüzeyinden aktarıldığı için yapıştırıcıda çatlak dallanmaları gözlemlenmemektedir.

- Kompozit saf epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi sonuçlarına bakıldığında, deiyonize su, tuzlu su ve sülfirik asit ortamlarında mukavemet düşüşü, hidroklorik asit ortamında ise mukavemet artışı görülmektedir fakat düşüş olan ortamlarında ki düşüşler az miktardadır (alüminyum bağlantılarına kıyasla). Tokluk değerlerinde de tuzlu su ve hidroklorik asit ortamlarında artış, diğer ortamlarda düşüş görülmektedir.
- Hasar yüzeylerinin SEM görüntülerine bakıldığında, çatlak dallanmaları, pürüzlü kırılma yüzeyleri ve parçalı kırılmalar görülmektedir.
- Kompozit epoksi reçine bağlantılarında bağlantı kalitesinin artmasının sebebi, kompozit yüzeyinin şartlandırma ortamından olumsuz etkilenmemesinden kaynaklanmaktadır. Kompozit yüzeyi alüminyum kadar duyarlı olmadığı için şartlandırma ortamında, yüzey pürüzlülüklerini kaybetmemekte ve böylelikle de bağlantı mukavemetini muhafaza etmektedir. Hatta HCl asit ortamındaki numunede, kompozit yüzeyi yapıştırıcıya uygun olarak dallandığı için yapıştırıcının daha iyi tutunmasına neden olmaktadır.
- NaCl ortamında şartlandırılan numunelerde mukavemetin düşmesi ise, tuz kristallerinin yapıştırıcının yüzeye tutunmasını olumsuz etkilemesi sebebiyle uygulanan kuvvetin yapıştırıcı kompozit ara yüzeyinden ilerlemesinden kaynaklanmaktadır.
- Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi sonuçlarına bakıldığında tüm ortamlardaki numunelerin mukavemetlerinin arttığı görülmektedir. Tokluk değerlerinin de NaCl ortamı dışında arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar ÇCKNT takviyesinin yapıştırıcının kompozit yüzeyine tutunmasını artırdığını göstermektedir.
- Kompozit ÇCKNT takviyeli epoksi tek taraflı bindirmeli bağlantıların SLJ testi sonrası hasar yüzeylerine bakıldığında kohezif hasar oranlarının arttığı görülmektedir. SEM görüntülerinde ise çok fazla ve derin çatlak dallanmaları, parçalı kırılma yüzeyleri, karbon nanotüp çatlak köprülenmeleri olduğu görülmektedir.

- Diğer üç farklı tek taraflı bindirmeli bağlantılara bakıldığında yapıştırılan yüzey durumunun bağlantı kalitesi açısından önemi görülmüştü. Bu bağlantı tipindeki artış da hem kompozit yüzeyinden hem de yapıştırıcı yapısının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Karbon nanotüpler, çeşitli uygulamalarda asidik fonksiyonelleştirme işlemlerine tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada da asidik ortama maruz kaldığı için yapıştırma karşı yüzeyine uygun olarak fonksiyonelleşmekte ve tutunma kalitesini artırmaktadır.
- Alüminyum saf epoksi bağlantılarının DCB sonuçlarına bakıldığında referans numunesine kıyasla maksimum kuvvet ve uzama değerlerinin ve çatlak ilerleme şeklinin değiştiği görülmektedir. Bunlara bağlı olarak kritik kırılma enerjisi değerlerinde de azalma görülmektedir. Hasar modu, kohezifden adezife doğru kaymaktadır. Bu durum SLJ testlerini doğrular niteliktedir. Alüminyum saf epoksi ara yüzeyi şartlandırma ortamından etkilenerek alüminyum yüzeylerinin bozunması sonucu kırılma davranışını değiştirmekte ve kararlı çatlak ilerleyiş miktarlarını azaltmaktadır.
- Alüminyum ÇCKNT takviyeli numunelerin DCB testi sonuçlarına bakıldığında çatlak ilerlemesi değerlerinde azalma görülmektedir fakat ÇCKNT takviyeli numunelerle saf epoksi reçineli numuneler kıyaslandığında maksimum kuvvet değerlerinin arttığı görülmektedir. SLJ testlerinde ise bu durumun tam tersi görülmektedir. Bu iki durumdaki farklılık, numunelere uygulanan gerilme tipinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. SLJ testinde oluşan gerilme kayma gerilmesi, DCB testinde ise çekme gerilmesidir. Dolayısıyla ÇCKNT partiküllerinin çekme yüküne maruz bırakılan numunelerde şartlandırmanın olumsuz etkilerini bir miktar azalttığı fakat kayma yüküne maruz bırakılan numunelerde tam tersi bir durum oluştuğu sonucuna varılabilir.
- Kompozit saf epoksi bağlantılarının DCB testi sonuçlarına bakıldığında deiyonize su ve NaCl ortamındaki numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin arttığı asidik ortamlarda ise düştüğü görülmektedir. Çatlak ilerleme değerlerinde ise tüm ortamlarda düşüş görülmektedir. Kritik

kırılma enerjisinde de maksimum kuvvet sonuçlarına benzer sonuçlar olduğu söylenebilir.

- Kompozit ÇCKNT takviyeli numunelerin DCB testleri sonuçlarına bakıldığında sadece HCl ortamındaki numunelerin maksimum kuvvet değerlerinin düştüğü fakat diğer ortamlarda arttığı görülmektedir. SLJ testlerinde olduğu gibi DCB testlerinde de ÇCKNT partiküllerinin bağlantı kalitesini artırdığı görülmektedir fakat gerilme tipinin farklı olması burada da sonuçları etkilemektedir.
- Özet olarak şartlandırma neticesinde sadece yapıştırıcının değil, bağlantı ara yüzeyinin de önemli oranda etkilerinin olduğu, bağlantıya uygulanan gerilme tipinin şartlandırma davranışına etkilerinin olduğu ve bu etkilerin de şartlandırma ortamına göre değişebildiği, yapıştırılan yüzeylerin de şartlandırma işleminden etkilerinin farklı olduğu tespit edildiği için, yapıştırıcılı bağlantıların çalışma ortamına göre tasarlanması, buna uygun bağlantı tipinin seçilmesi, bu ortama uygun malzeme, yapıştırıcı ve nano partikül takviyesi ile şartlandırma işleminin olumsuz etkileri azaltılabileceği gibi bazı şartlarda şartlandırma yardımıyla daha kaliteli bağlantılar bile elde edilebileceği söylenebilir.

6.2 Öneriler

Bu çalışma kapsamında edinilen bilgiler ışığında aşağıda maddeler halinde verilen tavsiyeler detaylı bir şekilde incelenerek bu konudaki çalışmalar ilerletilebilir.

- Epoksi reçine içerisine farklı oranlarda farklı nano partiküller ilave edilerek, farklı nano partiküllerin ve oranlarının korozif ortamlara etkisi belirlenebilir.
- Endüstride ve bilimsel çalışmalarda kullanılan farklı tipteki epoksi reçinelerin ve/veya başka tipteki yapıştırıcıların korozif ortamlardaki davranışları belirlenebilir.
- Şartlandırma ortamların derişimleri değiştirilerek derişim oranının polimer yapısı üzerine etkileri incelenebilir.
- Sadece çözelti içerisinde şartlandırma davranışına ek olarak sıcaklık değişimlerinin (sıcak ve soğuk ortamlar) polimerlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri üzerine etkileri belirlenebilir.

- Radyoaktif ortamların polimerler üzerine etkileri belirlenerek radyoaktif şartlandırma konusu çalışılabilir.
- Yapıştırılan numunelerin yüzey durumlarının yapıştırma kalitesine önemli oranda etkilerinin olduğu görüldüğü için, farklı yüzey hazırlama tekniklerinin şartlandırma davranışına etkileri belirlenebilir.
- Kompozit ve alüminyum bağlantılarına ek olarak, farklı tiplerdeki alüminyum ve kompozit malzemelerin, çelik malzemelerin yapıştırılması ile elde edilen bağlantıların şartlandırma davranışları belirlenebilir.
- Şartlandırma prosesinin bağlantı yüzeylerini oldukça etkilediği görüldüğü için, bağlantı yapıldıktan sonra ortamın bağlantıya nüfuziyetini azaltmak için çeşitli astarlar kullanılarak bu durumun bağlantı kalitesine etkileri araştırılabilir.
- Bağlantı tipi farklılıkları bağlantıya uygulanan gerilme tipinin bağlantı kalitesini etkilediği tespit edildiği için, tek taraflı bindirmeli ve çift konsol kiriş bağlantılarına ek olarak, farklı tipteki bağlantıların şartlandırma davranışları belirlenebilir.
- Çekme ve kayma testlerine ek olarak, şartlandırma işleminin bağlantıların eğilme ve darbe davranışlarına etkileri belirlenebilir.
- Şartlandırma süresinin yapıştırıcının kimyasal ve fiziksel yapısı üzerinde önemli etkilerinin olduğu görüldüğü için numunelere farklı sürelerde şartlandırma işlemi uygulanarak şartlandırma süresinin etkileri belirlenebilir.
- Yapıştırıcılı bağlantıların mukavemetlerini tespit etmek için sonlu elemanlar analizleri kullanılmaktadır. Korozif ortamlardaki bağlantı davranışları belirlenerek sonlu elemanlar analizinde veri olarak kullanılıp korozif ortamların etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenebilir.
- Şartlandırılan yapıştırıcılı bağlantıların test edildikleri sıcaklıklar değiştirilerek farklı test sıcaklıklarındaki şartlandırma davranışları belirlenebilir.
- Şartlandırma davranışı zamana bağlı bir davranış olduğu için bağlantıların yorulma davranışına önemli etkilerinin olduğu düşünülmektedir. Yorulma hasarı da mekanik açıdan zamana bağlı bir davranış olduğu için şartlandırma davranışının yorulma hasarı üzerine etkileri incelenebilir.

- Yapıştırıcı kalınlığının, şartlandırma süresine ve de dolayısıyla şartlandırma davranışına etkisinin olduğu bilindiği için, yapıştırıcı kalınlığının şartlandırma davranışına etkileri belirlenebilir.
- Üretilen numune sayıları ve deney tekrarları artırılarak istatiksel analizler yapılabilir.
- Yapıştırıcılı bağlantılar şartlandırıldıktan sonra belirli zamanlarda ve ortamlarda kurutularak şartlandırma etkilerinin ne kadarının kalıcı ne kadarının geçici olduğu tespit edilebilir.
- Şartlandırma işlemi iyonik ortamlarda yapıldığı için numunelerin elektriksel iletkenlikleri değişebilir. Bu nedenle şartlandırma ortamlarının numunelerin elektriksel özelliklerine etkileri belirlenebilir.
- Şartlandırma işlemi ile termal özelliklerin etkilendiği belirlendiği için şartlandırma işleminin termal iletkenlik ve ısıl genleşme katsayılarına etkileri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

Açık, M., 2017, Fracture behaviors of epoxy adhesively bonded composite joints reinforced with graphene and nylon 6.6 nanofibers, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Adams, R. D. ve Wake, W. C., 1984, The Nature and Magnitude of Stresses in Adhesive Joints, In: Structural Adhesive Joints in Engineering, Eds: Springer, p. 14-114.

Adams, R. D., Adams, R. D., Comyn, J., Wake, W. C. ve Wake, W., 1997, Structural adhesive joints in engineering, Springer Science & Business Media, p.

Adams, R. D., 2005, Adhesive bonding: science, technology and applications, Elsevier, p.

Adin, H., 2007, Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzemelerinin Mekanik Analizi, *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Adlakha-Hutcheon, G., Khaydarov, R., Korenstein, R., Varma, R., Vaseashta, A., Stamm, H. ve Abdel-Mottaleb, M., 2009, Nanomaterials, nanotechnology, In: Nanomaterials: Risks and Benefits, Eds: Springer, p. 195-207.

Akderya, T., Kemiklioğlu, U. ve Sayman, O., 2016, Effects of thermal ageing and impact loading on tensile properties of adhesively bonded fibre/epoxy composite joints, *Composites Part B: Engineering*, 95, 117-122.

Akkurt, M., 2012, Makine Elemanları Cilt 1, Birsen Yayınevi, p.

Akkuş, H., 2016, Bal peteği yapıların mekanik davranışlarının nano parçacık takviyeli yapıştırıcı kullanılarak deneysel ve teorik olarak araştırılması, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Al-Harthi, M., Kahraman, R., Yilbas, B., Sunar, M. ve Aleem, B. A., 2004, Influence of water immersion on the single-lap shear strength of aluminum joints bonded with aluminum-powder-filled epoxy adhesive, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18 (15-16), 1699-1710.

Alessi, S., Di Filippo, M., Pitarresi, G., Scafidi, M. ve Toscano, A., 2015, Fracture toughness of hydrothermally aged epoxy systems with different crosslink density, *Procedia Engineering*, 109, 507-516.

Aran, A., 2008, Malzeme Bilgisi ders notları, *İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, İstanbul*.

Arefinia, R., Shojaei, A., Shariatpanahi, H. ve Neshati, J., 2012, Anticorrosion properties of smart coating based on polyaniline nanoparticles/epoxy-ester system, *Progress in Organic Coatings*, 75 (4), 502-508.

Aslan, A., 2018, bronz ve dökme demir talaşlarının geri dönüştürülmesiyle prizmatik şekilli makine elemanı üretimi ve mekanik karakterizasyonu, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2018 (2018).

Aydin, M. D., Özel, A. ve Temiz, Ş., 2005, The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19 (8), 705-718.

Bağda, E., 1976, Polimer Kimyası, *Institut für Grenzflöchen und bioverfahrenstechnik Stuttgart Almanya*.

Baker, A., 2012, Bonded repair of aircraft structures, Springer Science & Business Media, p.

Balasubramanian, K. ve Burghard, M., 2005, Chemically functionalized carbon nanotubes, *Small*, 1 (2), 180-192.

Baldan, A., 2012, Adhesion phenomena in bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38, 95-116.

Baljon, A. ve Robbins, M. O., 2001, Simulations of crazing in polymer glasses: Effect of chain length and surface tension, *Macromolecules*, 34 (12), 4200-4209.

Banea, M. ve da Silva, L. F., 2009, Adhesively bonded joints in composite materials: an overview, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223 (1), 1-18.

Bao, L.-R. ve Yee, A. F., 2002, Moisture diffusion and hygrothermal aging in bismaleimide matrix carbon fiber composites—part I: uni-weave composites, *Composites Science and Technology*, 62 (16), 2099-2110.

Barbee, K. A., Mundel, T., Lal, R. ve Davies, P. F., 1995, Subcellular distribution of shear stress at the surface of flow-aligned and nonaligned endothelial monolayers, *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 268 (4), H1765-H1772.

Barbosa, A. P. C., Fulco, A. P. P., Guerra, E. S., Arakaki, F. K., Tosatto, M., Costa, M. C. B. ve Melo, J. D. D., 2017, Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, 110, 298-306.

Barik, R., Wharton, J., Wood, R., Stokes, K. ve Jones, R., 2005, Corrosion, erosion and erosion–corrosion performance of plasma electrolytic oxidation (PEO) deposited Al2O3 coatings, *Surface and coatings technology*, 199 (2-3), 158-167.

Bartz, K. W., Higgins, J. J., Berejka, A. J. ve Di, C. A. J., 1975, Thermoplastic adhesive compositions, Google Patents.

Batchelor, A. ve Stachowiak, G., 1988, Predicting synergism between corrosion and abrasive wear, *Wear*, 123 (3), 281-291.

Bauer, R. S., 1979, Epoxy resin chemistry, ACS Publications, p.

Bhattacharyya, A. R., Sreekumar, T., Liu, T., Kumar, S., Ericson, L. M., Hauge, R. H. ve Smalley, R. E., 2003, Crystallization and orientation studies in polypropylene/single wall carbon nanotube composite, *Polymer*, 44 (8), 2373-2377.

Bikerman, J. J., 1967, Causes of poor adhesion: weak boundary layers, *Industrial & Engineering Chemistry*, 59 (9), 40-44.

Bouvet, G., Cohendoz, S., Feaugas, X., Touzain, S. ve Mallarino, S., 2017, Microstructural reorganization in model epoxy network during cyclic hygrothermal ageing, *Polymer*, 122, 1-11.

Çakır, A., 1991, Metalik korozyon ilkeleri ve kontrolü, Makina Mühendisleri Odası, p.

Callister Jr, W. D. ve Rethwisch, D. G., 2012, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach, John Wiley & Sons, p.

Carpenter, M. W., 2000, Characterizing the chemistry of yellow-poplar surfaces exposed to different surface energy environments using DCA, DSC, and XPS.

Carrasco, F., Pagès, P., Lacorte, T. ve Briceño, K., 2005, Fourier transform IR and differential scanning calorimetry study of curing of trifunctional amino-epoxy resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 98 (4), 1524-1535.

Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N., Schlagenhauf, L., Nüesch, F. ve Chu, B., 2012, Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites, *Carbon*, 50 (15), 5380-5386.

Chen, C.-H., Jian, J.-Y. ve Yen, F.-S., 2009, Preparation and characterization of epoxy/γ-aluminum oxide nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (4), 463-468.

Chen, J.-Y., Yu, G.-P. ve Huang, J.-H., 2000, Corrosion behavior and adhesion of ion-plated TiN films on AISI 304 steel, *Materials chemistry and physics*, 65 (3), 310-315.

Cholake, S. T., Mada, M. R., Raman, R. S., Bai, Y., Zhao, X., Rizkalla, S. ve 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.

Christensen, S. F. ve McKinley, G. H., 1998, Rheological modelling of the peeling of pressure-sensitive adhesives and other elastomers, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18 (5), 333-343.

Cruz, C., García, P. G., Gutiérrez, S. S., Taha-Tijerina, J. J. ve Llerenas, R. R., Scanning electron microscopy, atomic force microscopy and optical profilometry applied to adhesive bonding technologies.

Da Silva, L. F., Öchsner, A. ve Adams, R. D., 2011, Handbook of adhesion technology, Springer Science & Business Media, p.

da Silva, L. F. M. ve Sato, C., 2013, Design of adhesive joints under humid conditions, Springer, p.

Daly, H. E., 1990, Toward some operational principles of sustainable development, *Ecological economics*, 2 (1), 1-6.

Daniel, I. M., Ishai, O., Daniel, I. M. ve Daniel, I., 1994, Engineering mechanics of composite materials, Oxford university press New York, p.

Davis, J. R., 1993, Aluminum and aluminum alloys, ASM international, p.

Delasi, R. ve Whiteside, J., 1978, Effect of moisture on epoxy resins and composites, In: Advanced Composite Materials—Environmental Effects, Eds: ASTM International, p.

Deligianni, D. D., Katsala, N., Ladas, S., Sotiropoulou, D., Amedee, J. ve Missirlis, Y., 2001, Effect of surface roughness of the titanium alloy Ti–6Al–4V on human bone marrow cell response and on protein adsorption, *Biomaterials*, 22 (11), 1241-1251.

DeLollis, N. J., 1970, Adhesives for metals: theory and technology, Industrial Press, p.

Delor-Jestin, F., Drouin, D., Cheval, P.-Y. ve Lacoste, J., 2006, Thermal and photochemical ageing of epoxy resin–Influence of curing agents, *Polymer Degradation and Stability*, 91 (6), 1247-1255.

Deng, H.-x., Gong, X.-l. ve Wang, L.-h., 2006, Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer, *Smart materials and structures*, 15 (5), N111.

Deniz, M. E., Ozdemir, O., Ozen, M. ve Karakuzu, R., 2013, Failure pressure and impact response of glass–epoxy pipes exposed to seawater, *Composites Part B: Engineering*, 53, 355-361.

Dieter, G. E. ve Bacon, D. J., 1986, Mechanical metallurgy, McGraw-hill New York, p.

Drzal, L. T., Rich, M. J. ve Lloyd, P. F., 1983, Adhesion of graphite fibers to epoxy matrices: I. The role of fiber surface treatment, *The Journal of Adhesion*, 16 (1), 1-30.

Du Pasquier, A., Disma, F., Bowmer, T., Gozdz, A., Amatucci, G. ve Tarascon, J. M., 1998, Differential Scanning Calorimetry Study of the Reactivity of Carbon Anodes in Plastic Li-Ion Batteries, *Journal of the Electrochemical Society*, 145 (2), 472-477.

Durmuş, 2001, Şekillendirilmiş poliolefinlerin DSC ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul.

Eberhart, M., Donovan, M., MacLaren, J. ve Clougherty, D., 1991, Towards a chemistry of cohesion and adhesion, *Progress in Surface Science*, 36 (1), 1-34.

Ebnesajjad, S., 2010, Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing, William Andrew, p.

Ekrem, M., 2015, Karbon nanotüp ve polivinil alkol nanoelyafla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcıların alüminyum bağlantılar üzerindeki kırılma davranışları, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

El Yagoubi, J., Lubineau, G., Traidia, A. ve Verdu, J., 2015, Monitoring and simulations of hydrolysis in epoxy matrix composites during hygrothermal aging, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 184-192.

Emanuel, N. N. M. ve Buchachenko, A. L., 1987, Chemical physics of polymer degradation and stabilization, VSP, p.

Erdik, E., 1998, Organik kimyada spektroskopik yöntemler, Gazi Büro Kitabevi, p.

Fan, W. ve Li, J. l., 2014, Rapid evaluation of thermal aging of a carbon fiber laminated epoxy composite, *Polymer Composites*, 35 (5), 975-984.

Fitriah, S., Majid, M. A., Ridzuan, M., Daud, R., Gibson, A. ve Assaleh, T., 2017, Influence of hydrothermal ageing on the compressive behaviour of glass fibre/epoxy composite pipes, *Composite structures*, 159, 350-360.

Fowkes, F. M., 1964, Contact angle, wettability, and adhesion, ACS Publications, p.

Fu, S.-Y., Feng, X.-Q., Lauke, B. ve Mai, Y.-W., 2008, Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 39 (6), 933-961.

Gao, J., Li, J., Benicewicz, B. C., Zhao, S., Hillborg, H. ve Schadler, L. S., 2012, The mechanical properties of epoxy composites filled with rubbery copolymer grafted SiO2, *Polymers*, 4 (1), 187-210.

Gent, A. ve Lin, C.-W., 1990, Model studies of the effect of surface roughness and mechanical interlocking on adhesion, *The Journal of Adhesion*, 32 (2-3), 113-125.

Geringer, J., Atmani, F. ve Forest, B., 2009, Friction–corrosion of AISI 316L/bone cement and AISI 316L/PMMA contacts: Ionic strength effect on tribological behaviour, *Wear*, 267 (5-8), 763-769.

Gerson, A. L., Bruck, H. A., Hopkins, A. R. ve Segal, K. N., 2010, Curing effects of single-wall carbon nanotube reinforcement on mechanical properties of filled epoxy adhesives, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41 (6), 729-736.

Ghadami, F., Dadfar, M. ve Kazazi, M., 2016, Hot-cured epoxy-nanoparticulate-filled nanocomposites: Fracture toughness behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, 162, 193-200.

Giampaoli, M., Terlizzi, V., Rossi, M., Chiappini, G. ve Munafò, P., 2017, Mechanical performances of GFRP-steel specimens bonded with different epoxy adhesives, before and after the aging treatments, *Composite structures*, 171, 145-157.

Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B. ve 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. ve Baselga, J., 2012, Applications of FTIR on epoxy resins-identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake, In: Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology, Eds: InTech, p.

Goyat, M., Rana, S., Halder, S. ve Ghosh, P., 2018, Facile fabrication of epoxy-TiO2 nanocomposites: A critical analysis of TiO2 impact on mechanical properties and toughening mechanisms, *Ultrasonics sonochemistry*, 40, 861-873.

Grandbois, M., Beyer, M., Rief, M., Clausen-Schaumann, H. ve Gaub, H. E., 1999, How strong is a covalent bond?, *Science*, 283 (5408), 1727-1730.

Greenhalgh, E., 2009, Failure analysis and fractography of polymer composites, Elsevier, p.

Guzmán, D., Ramis, X., Fernández-Francos, X. ve Serra, A., 2014, New catalysts for diglycidyl ether of bisphenol A curing based on thiol–epoxy click reaction, *European polymer journal*, 59, 377-386.

Handbook, A., 1987, vol 13: Corrosion, *ISBN: 0-08170-019-0. ASM International, USA*.

Handbook, A., 1990, 2: properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, *ASM international*, 889-896.

Hart-Smith, L., 1985, Designing to minimize peel stresses in adhesive-bonded joints, In: Delamination and debonding of materials, Eds: ASTM International, p.

Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M., 1999, Metal matrix composites: production by the stir casting method, *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 1-7.

Hastie Jr, R. ve Morris, D., 1992, The effect of physical aging on the creep response of an off-axis thermoplastic composite, *7th International Congress on Experimental Mechanics*, 183-191.

Haussling, R., 1991, Method of making a sound absorbing laminate, Google Patents.

Hernández-Pérez, A., Avilés, F., May-Pat, A., Valadez-González, A., Herrera-Franco, P. ve Bartolo-Pérez, P., 2008, Effective properties of multiwalled carbon nanotube/epoxy composites using two different tubes, *Composites Science and Technology*, 68 (6), 1422-1431.

Higgins, A., 2000, Adhesive bonding of aircraft structures, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20 (5), 367-376.

Hihara, L. ve Latanision, R., 1992, Galvanic corrosion of aluminum-matrix composites, *Corrosion*, 48 (7), 546-552.

http://www.turksail.com, http://www.turksail.com:

Hutchinson, J. M., 1995, Physical aging of polymers, *Progress in Polymer Science*, 20 (4), 703-760.

Jin, F.-L. ve Park, S.-J., 2012, Thermal properties of epoxy resin/filler hybrid composites, *Polymer Degradation and Stability*, 97 (11), 2148-2153.

Jojibabu, P., Ram, G. J., Deshpande, A. P. ve Bakshi, S. R., 2017, Effect of carbon nano-filler addition on the degradation of epoxy adhesive joints subjected to hygrothermal aging, *Polymer Degradation and Stability*, 140, 84-94.

Jones, D. A., 1992, Principles and prevention of corrosion, Macmillan, p.

Jones, R. H., 2017, Stress-Corrosion Cracking, Materials performance and evaluation, ASM international, p.

Karabulut, E., 2017, Filaman sarım karbon elyaf/epoksi boruların dinamik davranışına karbon nanotüp ve bor nitrür nano partikül ilavesinin etkisi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.

Karakuzu, R., Kanlioglu, H. ve Deniz, M. E., 2014, Environmental Effects on Mechanical Properties of Glass-Epoxy Composites, *Materials Testing*, 56 (5), 355-361.

Kaya, 2004, Ana Hatlarıyla Yapıştırıcılar, *İstanbul*, Birsen Yayınevi, p.

Kerr, C., MacDonald, N. ve Orman, S., 1967, Effect of certain hostile environments on adhesive joints, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 17 (3), 62-65.

Khoee, S. ve Hassani, N., 2010, Adhesion strength improvement of epoxy resin reinforced with nanoelastomeric copolymer, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (24-25), 6562-6567.

Kinloch, A., Lee, J., Taylor, A., Sprenger, S., Eger, C. ve Egan, D., 2003, Toughening structural adhesives via nano-and micro-phase inclusions, *The Journal of Adhesion*, 79 (8-9), 867-873.

Klapper, I. ve Dockery, J., 2006, Role of cohesion in the material description of biofilms, *Physical Review E*, 74 (3), 031902.

Knox, E. ve Cowling, M., 2000, A rapid durability test method for adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20 (3), 201-208.

Komorek, A., Przybyłek, P. ve Kucharczyk, W., 2016, Effect of sea water and natural ageing on residual strength of epoxy laminates, reinforced with glass and carbon woven fabrics, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.

Kovacs, A., Stratton, R. A. ve Ferry, J. D., 1963, Dynamic mechanical properties of polyvinyl acetate in shear in the glass transition temperature range, *The Journal of Physical Chemistry*, 67 (1), 152-161.

L'hermite, R. ve Bresson, J., 1971, Synthetic resins in construction, *Rilem colloquium. Edition Peyrolles, Paris*.

Ladhari, A., Daly, H. B., Belhadjsalah, H., Cole, K. C. ve Denault, J., 2010, Investigation of water absorption in clay-reinforced polypropylene nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, 95 (4), 429-439.

Lee, D. J. ve Lee, S. F., 1995, Measurement of bound water content in sludge: the use of differential scanning calorimetry (DSC), *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 62 (4), 359-365.

Lee, J.-Y., Zhang, Q., Emrick, T. ve Crosby, A. J., 2006, Nanoparticle alignment and repulsion during failure of glassy polymer nanocomposites, *Macromolecules*, 39 (21), 7392-7396.

Leger, R., Roy, A. ve Grandidier, J., 2013, A study of the impact of humid aging on the strength of industrial adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44, 66-77.

Leveque, D., Schieffer, A., Mavel, A. ve Maire, J.-F., 2005, Analysis of how thermal aging affects the long-term mechanical behavior and strength of polymer–matrix composites, *Composites Science and Technology*, 65 (3-4), 395-401.

Li, J. ve Dasgupta, A., 1993, Failure-mechanism models for creep and creep rupture, *IEEE Transactions on Reliability*, 42 (3), 339-353.

Lin, Y., Chen, X., Zhang, H. ve Wang, Z., 2006, Effects of hygrothermal aging on epoxy-based anisotropic conductive film, *Materials letters*, 60 (24), 2958-2963.

Loh, W., Crocombe, A., Wahab, M. A., Watts, J. ve Ashcroft, I., 2002, The effect of moisture on the failure locus and fracture energy of an epoxy–steel interface, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 16 (11), 1407-1429.

Lunder, O., Olsen, B. ve Nisancioglu, K., 2002, Pre-treatment of AA6060 aluminium alloy for adhesive bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 22 (2), 143-150.

Macdonald, M. ve Calder, A., 1982, Bonded steel plating for strengthening concrete structures, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2 (2), 119-127.

Mansourian-Tabaei, M., Jafari, S. H. ve Khonakdar, H. A., 2014, Lap shear strength and thermal stability of diglycidyl ether of bisphenol a/epoxy novolac adhesives with nanoreinforcing fillers, *Journal of Applied Polymer Science*, 131 (6).

Masuda, H. ve Fukuda, K., 1995, Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina, *Science*, 268 (5216), 1466-1468.

Mattsson, E., 1989, Basic corrosion technology for scientists and engineers, Ellis Horwood Chichester, p.

May, M., Wang, H. ve Akid, R., 2010, Effects of the addition of inorganic nanoparticles on the adhesive strength of a hybrid sol–gel epoxy system, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30 (6), 505-512.

McBain, J. ve Hopkins, D., 1925, On adhesives and adhesive action, *The Journal of Physical Chemistry*, 29 (2), 188-204.

Meiser, A. ve Possart, W., 2011, Epoxy-metal interphases: chemical and mechanical aging, *The Journal of Adhesion*, 87 (4), 313-330.

Merah, N., Nizamuddin, S., Khan, Z., Al-Sulaiman, F. ve Mehdi, M., 2010, Effects of harsh weather and seawater on glass fiber reinforced epoxy composite, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (20), 3104-3110.

Merrill, R. G. ve Roberts, C. W., 1977, Photophysical processes and interactions between poly (ethylene terephthalate) and 1-amino-2-(2-methoxyethoxy)-4-hydroxy-9, 10-anthraquinone, *Journal of Applied Polymer Science*, 21 (10), 2745-2768.

Min, K. J., Choi, J.-U. ve Ho-Sung, L., 2015, A Study on Accelerated Thermal Aging of High Modulus Carbon/Epoxy Composite Material, *MATEC Web of Conferences*.

Miracle/Donaldson, 2001, ASM Handbook volume 21: Composites, ASM International, p.

Mittal, K., 1977, The role of the interface in adhesion phenomena, *Polymer Engineering & Science*, 17 (7), 467-473.

Molitor, P., Barron, V. ve Young, T., 2001, Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21 (2), 129-136.

Möller, E., Middelstädt, L., Grieger, F., Lindemann, A. ve Wilde, J., 2015, Investigation on the suitability of electrically conductive adhesives for die-attachment of power devices, *Microelectronics Packaging Conference (EMPC), 2015 European*, 1-5.

Mubashar, A., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W. ve Crocombe, A., 2009, Moisture absorption–desorption effects in adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29 (8), 751-760.

Muthukumar, T., Aravinthan, A., Lakshmi, K., Venkatesan, R., Vedaprakash, L. ve Doble, M., 2011, Fouling and stability of polymers and composites in marine environment, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65 (2), 276-284.

Myshkin, N., Petrokovets, M. ve Kovalev, A., 2005, Tribology of polymers: adhesion, friction, wear, and mass-transfer, *Tribology International*, 38 (11-12), 910-921.

Naceri, A., 2008, Moisture diffusion properties of fabric composite (glass fiber/epoxy resin), *International Journal of Engineering-Transactions B: Applications*, 22 (2), 205-210.

Owens, J. F. ve Lee-Sullivan, P., 2000, Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II. Experimental, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20 (1), 47-58.

Özel, T. ve Karpat, Y., 2005, Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (4-5), 467-479.

Panigrahi, S. ve Zhang, Y., 2011, Investigation of damage growth in single lap joints of composite laminates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25 (11), 1223-1244.

Park, J.-M., Shin, P.-S., Wang, Z.-J., Kwon, D.-J., Choi, J.-Y., Lee, S.-I. ve DeVries, K. L., 2016, The change in mechanical and interfacial properties of GF and CF

reinforced epoxy composites after aging in NaCl solution, *Composites Science and Technology*, 122, 59-66.
Parvatareddy, H., 1997, Durability of Polyimide Adhesives and Their Bonded Joints for High Temperature Applications, *Virginia Tech*.
Pei, Y.-m., Wang, K., Zhan, M.-s., Xu, W. ve Ding, X.-j., 2011, Thermal-oxidative aging of DGEBA/EPN/LMPA epoxy system: Chemical structure and thermal–mechanical properties, *Polymer Degradation and Stability*, 96 (7), 1179-1186.
Petrie, E., 1975, Plastics and adhesives as adhesives, *Handbook of plastics and elastomers*.
Petrie, E. M., 2002, Plastics and elastomers as adhesives, *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, 397.
Pham, H. Q. ve Marks, M. J., 2004, Epoxy resins, *Encyclopedia of polymer science and technology*.
Pitarresi, G., Scafidi, M., Alessi, S., Di Filippo, M., Billaud, C. ve Spadaro, G., 2015, Absorption kinetics and swelling stresses in hydrothermally aged epoxies investigated by photoelastic image analysis, *Polymer Degradation and Stability*, 111, 55-63.
Pocius, A. V. ve Dillard, D. A., 2002, Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications, Elsevier, p.
Pocius, A. V., 2012, Adhesion and adhesives technology: an introduction, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, p.
Prolongo, S., Burón, M., Gude, M., Chaos-Morán, R., Campo, M. ve Ureña, A., 2008, Effects of dispersion techniques of carbon nanofibers on the thermo-physical properties of epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 68 (13), 2722-2730.
Purslow, D., 1986, Matrix fractography of fibre-reinforced epoxy composites, *Composites*, 17 (4), 289-303.
Reis, P. N., Ferreira, J. ve Antunes, F., 2011, Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31 (4), 193-201.
Revie, R. W., 2008, Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering, John Wiley & Sons, p.
Rocha, I., Raijmaekers, S., Nijssen, R., van der Meer, F. ve Sluys, L., 2017, Hygrothermal ageing behaviour of a glass/epoxy composite used in wind turbine blades, *Composite structures*, 174, 110-122.
Rogers, N. L., 1966, Surface preparation of metals for adhesive bonding, *Structural Adhesives Bonding-Applied Polymer Symposia*, 327-340.
Roland, F., Manzon, L., Kujala, P., Brede, M. ve Weitzenböck, J., 2004, Advanced joining techniques in European shipbuilding, *Journal of Ship Production*, 20 (3), 200-210.
Sabbineni, K., 2015, Investigation of polymer nanocomposites reinforced with nanocarbon, Lamar University-Beaumont, p.
Sambell, R., Bowen, D. ve Phillips, D., 1972, Carbon fibre composites with ceramic and glass matrices, *Journal of materials science*, 7 (6), 663-675.
Sancaktar, E. ve Simmons, S. R., 2000, Optimization of adhesively-bonded single lap joints by adherend notching, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14 (11), 1363-1404.
Sandler, J., Shaffer, M., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K. ve Windle, A., 1999, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer*, 40 (21), 5967-5971.

Savvilotidou, M., Vassilopoulos, A., Frigione, M. ve Keller, T., 2017, Effects of aging in dry environment on physical and mechanical properties of a cold-curing structural epoxy adhesive for bridge construction, *Construction and Building Materials*, 140, 552-561.

Schummer, J., 2004, Multidisciplinarity, interdisciplinarity, and patterns of research collaboration in nanoscience and nanotechnology, *Scientometrics*, 59 (3), 425-465.

Scognamiglio, F., Travan, A., Rustighi, I., Tarchi, P., Palmisano, S., Marsich, E., Borgogna, M., Donati, I., de Manzini, N. ve Paoletti, S., 2016, Adhesive and sealant interfaces for general surgery applications, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 104 (3), 626-639.

Şekercioğlu, T., 2001, Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi*.

Şekercioğlu, T. ve Özenç, M., 2012, METALLERİN YAPIŞTIRILMASINDA YÜZEY HAZIRLAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ, *Engineer & the Machinery Magazine* (627).

Sethi, S., Rathore, D. K. ve Ray, B. C., 2015, Effects of temperature and loading speed on interface-dominated strength in fibre/polymer composites: an evaluation for in-situ environment, *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 617-626.

Shaojie, C., 2008, Composite Technology and Large Aircraft [J], *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 3, 015.

Shields, J., 1974, Adhesive bonding, Oxford University Press, p.

Shreir, L. L., 2013, Corrosion: corrosion control, Newnes, p.

Sırımoglu, 2012, Plastik Ambalaj Malzemeleri için Uygulanan Kalite Kontrol Testleri, *İzmir, Petkim Petrokimya Holding A.Ş*, 1-10.

Skeist, I., 2012, Handbook of adhesives, Springer Science & Business Media, p.

Skoog, D. A., Holler, F. J. ve Crouch, S. R., 2017, Principles of instrumental analysis, Cengage learning, p.

Snogren, R., 1974, Handbook of surface preparation–Palmerton, *Nova York*.

Solomons, T. G., Fryhle, C. B., Okay, G. ve Yıldırır, Y., 2002, Organik kimya, Literatür, p.

Song, H.-W. ve Saraswathy, V., 2006, Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—an overview, *Journal of Hazardous Materials*, 138 (2), 226-233.

Srivastava, V., 2011, Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and C/C–SiC ceramic fibre composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31 (6), 486-489.

Steinbrecher, G., Buchman, A., Sidess, A. ve Sherman, D., 2006, Characterization of the mode I fracture energy of adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26 (8), 644-650.

Stephens, R., Schrader, C. ve Lease, K., 1995, Corrosion fatigue of AZ91E-T6 cast magnesium alloy in a 3.5 percent NaCl aqueous environment, *Journal of engineering materials and technology*, 117 (3).

Strausberg, R. L. ve Link, R. P., 1990, Protein-based medical adhesives, *Trends in biotechnology*, 8, 53-57.

Struik, L. C. E., 1978, Physical aging in amorphous polymers and other materials, Citeseer, p.

Sugiman, S., Putra, I. K. P. ve Setyawan, P. D., 2016, Effects of the media and ageing condition on the tensile properties and fracture toughness of epoxy resin, *Polymer Degradation and Stability*, 134, 311-321.

Sulong, A. B., Muhamad, N., Sahari, J., Ramli, R., Deros, B. M. ve Park, J., 2009, Electrical conductivity behaviour of chemical functionalized MWCNTs epoxy nanocomposites, *European Journal of Scientific Research*, 29 (1), 13-21.

Sun, Y., Zhang, Z., Moon, K. ve Wong, C., 2004, J. of Polymer Sci., Part B, *Polymer Physics*, 42 (21), 38493858.

Sydlik, S. A., Lee, J.-H., Walish, J. J., Thomas, E. L. ve Swager, T. M., 2013, Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives, *Carbon*, 59, 109-120.

Tang, J., Shao, Y., Guo, J., Zhang, T., Meng, G. ve Wang, F., 2010, The effect of H2S concentration on the corrosion behavior of carbon steel at 90 C, *Corrosion Science*, 52 (6), 2050-2058.

Tang, L.-c., Zhang, H., Han, J.-h., Wu, X.-p. ve Zhang, Z., 2011, Fracture mechanisms of epoxy filled with ozone functionalized multi-wall carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 72 (1), 7-13.

Temiz, M., 2003, Review of electromagnetic fields and powers in terms of the normalized propagation constant on the optical mode inside waveguide on double heterojunction constructions, *Laser Physics*, 13 (9), 1123-1137.

Toropova, L., Eskin, D. G., Kharakterova, M. ve Dobatkina, T., 2017, Advanced aluminum alloys containing scandium: structure and properties, Routledge, p.

Tsai, S., 2018, Introduction to composite materials, Routledge, p.

Turhan, O., 2008, Bazı organik reaksiyonların ve metal ligant etkileşmelerinin FT-IR ile eşzamanlı incelenmesi.

Tysarczyk, J., Budzik, M., Jumel, J., Imielińska, K. ve Shanahan, M., 2010, Reliable method of assessing fracture properties of asymmetric bonded joints, *Advances in Materials Sciences*, 10 (1), 43-52.

Van Ooij, W., 1985, Industrial Adhesion Problems, Orbital Press Oxford.

Verbruggen, M. L., 1987, Aramid reinforced aluminium laminates: Arall: adhesion problems and environmental effects. Volume A: Adhesion and delamination.

Vivet, A., Doudou, B. B., Poilâne, C., Chen, J. ve Ayachi, M. H., 2011, A method for the chemical anchoring of carbon nanotubes onto carbon fibre and its impact on the strength of carbon fibre composites, *Journal of materials science*, 46 (5), 1322-1327.

Weyer, S., Merzlyakov, M. ve Schick, C., 2001, Application of an extended Tool–Narayanaswamy–Moynihan model: Part 1. Description of vitrification and complex heat capacity measured by temperature-modulated DSC, *Thermochimica Acta*, 377 (1-2), 85-96.

Wingfield, J., 1993, Treatment of composite surfaces for adhesive bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 13 (3), 151-156.

Wolfrum, J., Eibl, S. ve Lietch, L., 2009, Rapid evaluation of long-term thermal degradation of carbon fibre epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 69 (3-4), 523-530.

Wu, S., 1982, Polymer interface and adhesion, M. Dekker, p.

Yalçın, H. ve Koç, T., 1998, Mühendisler için korozyon, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Kimya Mühendisleri Odası, p.

Yazman, Ş., 2018, Karbon Nanotüp ve seramik nanopartikül takviyeli hibrit nano kompozit yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi*, Konya.

Yıldırım, 2008, Termal Yaşlandırmanın Ahşap ve Ahşap Yapıştırıcılarına Etkilerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Karabük.

Yu, H. N., Kim, S. S. ve Hwang, I. U., 2008, Application of natural fiber reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes, *Composite structures*, 86 (1-3), 285-290.

Yu, S., Tong, M. N. ve Critchlow, G., 2010, Use of carbon nanotubes reinforced epoxy as adhesives to join aluminum plates, *Materials & Design*, 31, S126-S129.

Zakaria, M. R., Akil, H. M., Kudus, M. H. A. ve Othman, M. B. H., 2016, Compressive properties and thermal stability of hybrid carbon nanotube-alumina filled epoxy nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 91, 235-242.

Zhai, L., Ling, G., Li, J. ve Wang, Y., 2006, The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive, *Materials letters*, 60 (25-26), 3031-3033.

Zhai, L., Ling, G. ve Wang, Y., 2008, Effect of nano-Al2O3 on adhesion strength of epoxy adhesive and steel, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28 (1-2), 23-28.

Zhang, M., Sun, B. ve Gu, B., 2016, Accelerated thermal ageing of epoxy resin and 3-D carbon fiber/epoxy braided composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85, 163-171.

Zhang, Z., Yang, J.-L. ve Friedrich, K., 2004, Creep resistant polymeric nanocomposites, *Polymer*, 45 (10), 3481-3485.

Zhong, W., Wang, Y., Yan, Y., Sun, Y., Deng, J. ve Yang, W., 2007, Fabrication of shape-controllable polyaniline micro/nanostructures on organic polymer surfaces: obtaining spherical particles, wires, and ribbons, *The Journal of Physical Chemistry B*, 111 (15), 3918-3926.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Abdullah ASLAN
Uyruğu	**:**	Türk
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	18.02.1990 Konya
Telefon	**:**	554 662 67 42
Faks	**:**	
e-mail	**:**	aaslan@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Karatay S.D.M.P. Anadolu lisesi	2008
Üniversite	:	Niğde Üniversitesi- Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniverstesi	2015
Doktora	:	Selçuk Üniversitesi	2018

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2012	Eriell Group	Arge Sorumlusu
2013	Selçuk Üniversitesi	Proje asistanı
2014	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Abdullah Aslan, Hayrettin Düzcükoğlu, Ömer Sinan Şahin,Effect of MWCNT content upon swelling of epoxy resin immersed in harsh environment, *ICCE-25*, 16-22 July 2017, Rome, Italy.

Abdullah Aslan, Hayrettin Düzcükoğlu, Ömer Sinan Şahin, Mürsel Ekrem, Uğur Özmen Effect of corrosive environment on neat epoxy resin, International students science Congress, 03-05 May 2018, İzmir, Turkey.