



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARBON NANOTÜP VE POLİVİNİL ALKOL NANOELYAFLA GÜÇLENDİRİLMİŞ EPOKSİ YAPIŞTIRICILARIN ALÜMİNYUM BAĞLANTILAR ÜZERİNDEKİ KIRILMA DAVRANIŞLARI

Mürsel EKREM

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalını

Ocak-2015
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mürsel EKREM tarafından hazırlanan "KNT ve PVA Nano Elyafla Güçlendirilmiş Epoksi Yapıştırıcıların Alüminyum Bağlantılar Üzerindeki Kırılma Davranışları" adlı tez çalışması 19/01/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Prof. Dr. Onur SAYMAN	.....
Danışman Prof. Dr. Ahmet AVCI	.....
Üye Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR	.....
Üye Prof. Dr. Handan KAMIŞ	.....
Üye Doç. Dr. Hüseyin İMREK	.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Aşır GENÇ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü tarafından 11201052 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Ahmet DÖNERTAŞ

29.01.2015



ÖZET

DOKTORA TEZİ

KARBON NANOTÜP VE POLİVİNİL ALKOL NANOELYAFLA GÜÇLENDİRİLMİŞ EPOKSİ YAPIŞTIRICILARIN ALÜMİNYUM BAĞLANTILAR ÜZERİNDEKİ KIRILMA DAVRANIŞLARI

Mürsel EKREM

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2015, 147 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Onur SAYMAN
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Handan KAMIŞ
Doç. Dr. Hüseyin İMREK

Bu tez çalışmasında, elektro-eğirme yöntemiyle polivinil alkol (PVA) nano elyaf ve ağırlıkça % 1, 3, ve 5 Çok Cidarlı Karbon Nano Tüpler (ÇCKNT) ihtiva eden PVA nano elyaflar üretilmiştir. Ayrıca epoksi reçinenin ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcıda üretilmiştir. Daha sonra ÇCKNT, PVA nano elyaf ve farklı oranlarda ÇCKNT takviye ederek üretilen PVA nanoelyafla güçlendirilen yapıştırıcıların tek taraflı bindirmeli ve çift konsol kiriş (ÇKK) test bağlantıları oluşturulmuştur. Yapıştırılan malzeme olarak Al 2024-T3 levha kullanılmıştır. Oluşturulan bağlantıların kayma dayanımları ve kırılma toklukları incelenmiştir. Modifiyeli yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tek taraflı bindirmeli bağlantısı ASTM D1002-10 standardına ve ÇKK testleri ise ASTM D3433-99 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma şekil değiştirmeleri deneysel olarak ölçülmüştür ve bu sonuçlar analitik yöntemle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. PVA nano elyaf ve ÇCKNT ile takviye edilen PVA nano elyafların karakterizasyonu fourier dönüşümlü infrared spektrometre (FT-IR), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile incelenmiştir. Epoksi yapıştırıcının kuvvetlendirilmesinde kullanılan ÇCKNT'lerin dağılımı ile PVA nano elyaf ve farklı oranlarda ÇCKNT takviyeli nano elyaf numunelerin kırılma yüzeylerin morfolojisi SEM ile görüntülenmiştir. Ayrıca kırılma yüzeylerin, hasar mekanizmaları ile kırılma tokluğuna etki eden faktörler araştırılmıştır.

Tek taraflı bindirmeli ve ÇKK test bağlantılarında ağırlıkça % 1 ve 3 oranlarında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyafla güçlendirilmiş yapıştırıcıların kayma dayanımları ve kırılma toklukları önemli ölçüde artmıştır. ÇKK test deney sonucunda ÇCKNT takviyeli PVA nanoelyaf köprülenmesi ve sıyrılması, kırılma adımları, mekanik kilitleme gibi mekanizmalar ile nano elyaf takviyeli yapıştırıcıların kırılma tokluğu değerlerinde büyük artışlar sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Analitik yöntem, çift konsol kiriş bağlantısı, elektro-eğirme, kayma dayanımı, kırılma mekaniği, nano elyaflar, tek taraflı bindirmeli bağlantı, yapıştırıcı bağlantıları

ABSTRACT

PhD DISSERTATION

FRACTURE BEHAVIOR OF EPOXY ADHESIVES REINFORCED WITH CARBON NANOTUBES AND POLYVİNYL ALCOHOL NANOFIBERS IN ALUMINUM JOINTS

Mürsel EKREM

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

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2015, 147 Pages

Jury
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Onur SAYMAN
Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Handan KAMIŞ
Assoc. Prof. Dr. Hüseyin İMREK

In this dissertation, polyvinyl alcohol (PVA) nano fibers and PVA nano mats with 1-3-5% by weight multi walled carbon nano tubes (MWCNT) were produced by electro spinning method. Besides, MWCNT reinforced epoxy adhesive, which was 1% of epoxy resin by weight, was produced. Then, single lap and double cantilever beam test joints of adhesives reinforced with MWCNT, PVA nano fibers and PVA nano fibers consolidated with various rates of MWCNT were formed. Al 2024-T3 sheets were used as adherend. The shear strengths and fracture toughness of formed joints were determined. In order to determine the mechanical properties, the adhesive joints were subjected to single lap shear tests and double cantilever beam tests in accordance with ASTM D1002-10 and ASTM D3433-99 standards. Shear strains for single lap joint test specimens were experimentally measured and obtained results were compared with analytical results. The characteristics of PVA nano fibers and PVA nano fibers consolidated with MWCNT were investigated by using Fourier transforms infrared spectroscopy (FT-IR), differential scanning calorimetry (DSC) and scanning electron microscopy (SEM). The dispersion of MWCNTs used for reinforcement of epoxy adhesive, fracture surface morphologies of PVA nano fibers and PVA nano fibers consolidated with various rates of MWCNT were examined by using SEM. Factors affecting fracture surface, fracture toughness and damage mechanisms were also investigated.

It is observed that in single lap and DCB test joints, shear strengths and fracture toughness of adhesives reinforced with PVA nano fibers consolidated with 1% and 3% MWCNT by weight have increased considerably. DCB test revealed that considerable increase was achieved in fracture toughness values of adhesives reinforced with nano fibers with mechanisms like bridging and pull-out of PVA nano fiber reinforced with MWCNT, fracture steps, mechanical interlocking.

Keywords: Analytical method, double cantilever beam, electro spinning, shear strength, fracture mechanics, nano fibers, single lap joints, adhesive joints

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya minnet ve şükranlarımı sunarım.

TİK Üyelerim Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR ve Prof. Dr. Handan Kamış'a tez çalışmam boyunca önerileri ve yardımları dolayısıyla minnetlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen; yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılarımın mekanik deneylerimdeki yardımları için Arş. Gör. Okan DEMİR'e, Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanotermodinamik Araştırma Laboratuvarında yapmış olduğum çözelti hazırlama çalışmalarımda ve elektro eğirme yöntemiyle nanokeçe üretimimdeki yardımlarından dolayı Dr. Mehmet Okan ERDAL'a ve FT-IR ve DSC analizlerindeki desteğinden dolayı Bircan HASPULAT'a bu teze yaptıkları katkılardan dolayı ve tüm arkadaşlarıma en içten duygularımla teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için deney numunelerin temin edilmesi ve incelenmesi gibi konularda 11201052 nolu proje ile maddi destek veren Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, her zaman yanımda olan ve benden desteklerini hiç esirgemeyen sevgili aileme ve tüm arkadaşlarıma en içten duygularımla teşekkür ederim.

Mürsel EKREM
KONYA-2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **5**

2.1. Yapıştırıcılar, Yapıştırılan Malzemeler, Çift Konsol Kiriş ve Kayma Gerilmesi . 6
2.2. Epoksi Reçine İçine Nano Parçacıklar Katılması 9
2.3. Elektro-Eğirme Yöntemiyle Nano Elyaf Üretilmesi 12
2.4. Analitik Yaklaşımlar 15

3. KURAMSAL TEMELLER **20**

3.1. Yapışma, Yapıştırıcı ve Yapıştırıcı Bağlantılarının Kuramsal Temelleri 20
3.1.1. Yapışma 20
3.1.2. Birleştirmede kullanılan yapıştırıcıların avantaj ve dezavantajları 20
3.1.3. Yapıştırma bağlantıları 22
3.1.4. Yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler 23
3.1.5. Yapışma teorileri 26
3.1.6. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar mekanizmaları 33
3.1.7. Polimerlerin bozulması 35
3.1.8. Yapıştırıcılara ilave edilen katkı maddeleri 38
3.1.9. Yapıştırmayı etkileyen faktörler 40
3.1.10. Yüzey hazırlama 40
3.1.11. Yapıştırıcıların sınıflandırılması 46
3.1.11.2. Kimyasal bileşimine göre 47
3.2. Nanoteknoloji 53
3.2.1. Karbon nanotüplerin morfolojisi ve atomik yapısı 54
3.2.2. Karbon nanotüplerin sentezlenmesi 56
3.2.3. Karbon nanotüplerin polimer içerisinde dağıtılması 57
3.3. Elektro-eğirme Yöntemiyle Nanokeçe Üretimi 63
3.3.1. Elektro-eğirme üretim yöntemi 64
3.3.2. Elektro-eğirme işlemlerinin modellemesi 67
3.3.3. Elektro-eğirme işlemine etki eden faktörler 70
3.4. Analitik Yaklaşımlar 76
3.4.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantıları 76
3.5. Çift Konsol Kiriş Test Metodu 83

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **86**

4.1. Bu Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri 86
4.1.1. Yapıştırılan malzeme 86
4.1.2. Yapıştırıcı 87
4.1.3. Çok Cidarlı Karbon Nanotüpler 88
4.1.4. Polivinilalkol ve yüzey aktif madde 89
4.2. Alüminyum Bağlantı Numunelerinin Yüzeylerinin Hazırlanması 89
4.3. Nano Yapıştırıcının Hazırlanması 92
4.4. Elektro-Eğirme Yöntemiyle PVA Nano Elyaf Keçe Üretimi 93
4.5. Elektro-Eğirme Yöntemiyle ÇCKNT+PVA Nano Elyaf Keçe Üretimi 95
4.6. Bağlantıların Kayma ve Çift Konsol Kiriş Test Deneylerinin Belirlenmesi 95
4.6.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma deneyi 96
4.6.2. Mod I açılma için çift konsol kiriş test deneyleri 98

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 100

5.1. PVA Nano Elyaf Keçe Üretimi ve Özellikleri 100
5.1.1. PVA çözeltilerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi 100
5.1.2. PVA nano elyaf keçenin SEM görüntüleri 101
5.1.3. PVA nano elyafların DSC Analizleri 103
5.1.4. ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflarla modifiye edilmiş epoksi yapıştırıcıların DSC analizleri 105
5.1.5. PVA nano elyafların FT-IR Analizleri 106
5.1.6. ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflarla modifiye edilmiş epoksi yapıştırıcıların FT-IR Analizleri 107
5.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Mekanik Özellikleri 108
5.3. Bağlantıların Birim Şekil Değiştirmelerinin Analitik ve Deneysel Yöntemler ile Karşılaştırılması 114
5.4. Çift Konsol Kiriş Yöntemiyle Kırılma Tokluğu Analizleri 115
5.5. Kırılma Yüzeylerinin Analizleri 121

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 133

6.1 Sonuçlar 133
6.2 Öneriler 135

KAYNAKLAR 136

EKLER 145

ÖZGEÇMİŞ 147

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	:	mm	Çatlak uzunluğu
a_o	:	mm	Başlangıç çatlak uzunluğu
δ	:	mm	Yer değiştirme
G_{IC}	:	kJ/m^2	Mod I durumu için kritik kırılma tokluğu
h	:	mm	ÇKK testi numune kalınlığı
l	:	mm	Üst üste bindirme uzunluğu
M	:	Nmm	Eğilme momenti
P	:	N	Uygulanan yük
Ra	:	µm	Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Rz	:	µm	Ortalama pürüz yüksekliği
t	:	mm	Yapıştırılan malzemenin kalınlığı
τ	:	MPa	Kayma gerilmesi
γ	:	mm/mm	Kayma şekil değiştirme
σ	:	MPa	Soyulma gerilmesi
ν	:	mm	Kayma yönündeki deformasyon miktarı
w	:	mm	Soyulma yönündeki deformasyon miktarı

Kısaltmalar

AC	:	Doğru akım
AFM	:	Atomik kuvvet mikroskopu
Al	:	Alüminyum
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
CAA	:	Kromik asit anodizasyon
ÇCKNT	:	Çok cidarlı karbon nanotüp
ÇKK	:	Çift konsol kiriş testi
DGEBA	:	Di glisidil eter bisfenol-A
DSC	:	Diferansiyel taramalı kalorimetri
FE	:	Sonlu elemanlar
FPL	:	Forest Products Laboratory
FT-IR	:	Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi
KET	:	Karbon elyaf takviyeli
KNT	:	Karbon nanotüp
LEKM	:	Lineer elastik kırılma mekaniği
Mod I	:	Açılma modu
Mod II	:	Kayma modu
PAA	:	Fosforik asit anodizasyon
PA6	:	Polimaid 6
PVA	:	Polivinil alkol
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
T_g	:	Camsı geçiş sıcaklığı
XSEM	:	Yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskopu
WAXD	:	Geniş açılı X ışını difraksiyonu

1. GİRİŞ

Eskiden olduğu gibi, bugünde malzemeleri birbirine eklemek, birleştirmek ve onları bir bütün olarak tüm ömürleri boyunca bir arada tutmak amacıyla birçok malzeme ve teknik kullanılmaktadır. Bunların arasında cıvata, perçin ve çivi gibi malzemeler, kaynak ve lehim gibi teknikler bulunmaktadır. Ancak bu malzeme ve yöntemlerden daha düşük üretim maliyeti, daha düşük tasarım ağırlığı ve kullanımı daha basit olan malzemeler bulunmaktadır. "Yapıştırıcı" olarak adlandırılan bu malzemeler, plastik, kauçuk vb. malzemelerden yapılmaktadır. Yapıştırıcı, yapıştırılacak olan malzemeleri bir arada bağlamak ve tutturmak için malzemelerin yüzeylerine uygulanan kimyasal bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilebilir. Yapıştırılacak olan malzemeler birleştirilirken yüzeyler arasındaki çekimi ifade etmek için çoğunlukla yapışma terimi kullanılır.

Yapıştırıcıların makine ve yapı elemanlarının bağlantılarında kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle uzun zaman periyotlarında bağlantı güvenirliliğinin gerektirdiği havacılık, uzay, otomotiv, altyapı sistemi, tıp, elektronik paketleme, spor, inşaat ve deniz endüstrilerinde yapıştırıcılar, gün geçtikçe geleneksel bağlantı yöntemleri olan cıvata, perçin, lehim ve kaynağın yerini almaktadır.

Günümüz dünyasında sistemlerin enerji tüketimini azaltmak için birçok sebep vardır. Yakıtta tasarrufa gitmenin başlıca yollarından bir tanesi sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı sistemleri daha hafif hale getirmiştir (Kaya, 2004).

Metaller mükemmel mekanik ve dayanım özelliklerinden dolayı en fazla tercih edilen malzemelerdir. Hâlbuki metallerin tasarımı büyük oranda korozyondan dolayı sınırlanır. Korozyon, metallerin çevresel faktörler etkisinde bozulması olarak tanımlanabilir (Mercer, 1990). Yapısal uygulamalarda kullanılan metallerin çoğu, oksijenli ortamlarda korozyona eğilimlidir ve bu eğilim yüksek sıcaklıklarda daha da artar. Korozyona uğrama oranı sulu ortamlarda daha hızlanır. Çünkü su, korozyonda birincil süreç olan elektrokimyasal reaksiyonlar için uygun bir ortam sağlar. Bisikletlerden köprülere, kovalardan büyük savaş gemilerine bütün yapıların çalışma ömürleri korozyon nedeniyle azalmaktadır (Ashby ve Jones, 1980). Mekanik borularla akışkanın taşındığı bir sistemde, borular korozyona uğradığı zaman, hasarlı bölgenin incelenmesi ve onarımı için sistem durur. Hasar fazla değilse, genellikle onarım için

kaynak tercih edilir ve kusurlu parça genellikle değiştirilir. Eğer hasar onarılamayacak kadar fazla ise, kusurlu parça kesinlikle değiştirilmelidir. Sistem onarım için dururken, zaman, işgücü ve onarım maliyeti gibi kayıplar oluşur. Ayrıca ekonomik kayıpların yanında kaynakla onarımda patlama gibi tehlikeler söz konusudur. Mesela kusurlu bölge su altında akışkan taşınan bir taşıma ağında ise, kaynak yapmanın zorluğu daha da artar. Su altında kaynak, gemi teknolojisi gibi zor ve uğraştırıcı çevre şartlarında kaynak yapabilen teknik eleman gerektirir. Bunun gibi kaynak yapmadaki zorluklar ve ekonomik sebepler, yeni ve alternatif bir birleştirme ve onarım metodunu zorunlu kılmıştır (Lian, 1998).

1900'den beri bitkisel yapıştırıcılar, kâğıt gibi gözenekli malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmasına rağmen, elli yıl öncesine kadar hayvansal esaslı olanlar, büyük öneme sahiptiler. Kasein yapıştırıcılar, I. Dünya Savaşı'nda ahşap uçak kontrüksiyonları için kullanılmış, ancak bu tip yapıştırıcıların neme karşı düşük mukavemet ve dirence sahip oldukları görülmüştür. Endüstride yapıştırıcıların kullanımında hızlı artış, doğal ürünlerde sınırlama tanımayan ve metalleri diğer metal olmayan gözeneksiz malzemelere bağlayabilen sentetik reçinelerin gelişmesinden kaynaklanmaktadır. En önemli ilk sentetik reçine, kerestelerin birleştirilmesinde kullanılan fenol formaldehittir. II. Dünya Savaşı esnasında uçaklarda yapısal metallerin bağlanması epoksi reçinelerin ve fenoliklerin kullanılmasıyla kendine önemli bir yer edinmiştir. Bu yer edinme sayesinde gün geçtikçe dayanım ve uzama kabiliyeti artarak yorulma dayanımları da iyileştirilmiştir. Aynı zamanda titreşimi sönümleyen ve esneklik özelliklerinde iyileşmeler sağlayan, her geçen gün daha iyi yapıştırıcılar ve yapışma bağlantıları elde edilmiştir (Şekercioğlu, 2001).

İngiltere'de, Denizcilik Araştırma Kurumu tarafından rapor edilen bazı araştırmalara göre Kuzey Denizinde kıyıdan çok uzaklarda, denizin ortasında yapıştırıcı kullanılarak çelik yapılar onarılmıştır (Bowditch ve ark., 1987). Bu tip onarımlarda yapıştırıcı kullanılmadan önce, hem bulk (mekanik özellikleri öğrenmek için çekme numunesi şeklinde kalıba dökülen yapıştırıcı malzemesi) yapıştırıcı ve hem de bağlantıdaki yapıştırıcının mekanik özelliklerine çevre ve ortamın etkilerinin iyi bir şekilde araştırılması ve bilinmesi gerekir. Aksi takdirde su altında yapıştırma bağlantılarının nasıl davranacağı bilinemez.

Yapıştırıcılar, yüzeylere sürülüp katılaştırıldığında parçaları birbirine bağlama özelliğine sahiptir. Yapıştırıcılar birkaç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Form açısından; tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar, iki bileşenli sıvı yapıştırıcılar, film yapıştırıcılar ve

köpükler gibi fiziksel hallerine göre sınıflandırmayı; metal-metal yapıştırıcılar, kâğıt yapıştırıcılar ve ahşap yapıştırıcılardır. Bu malzemeye göre sınıflandırmaktır. Epoksi yapıştırıcılar, siyanoakrilit yapıştırıcılar ve polikloropen yapıştırıcılar da kimyasal formlarına göre sınıflandırmaya birkaç örnektir. Yapıştırma şartlarına göre sınıflandırmaya ise çözücü ile katılaşan yapıştırıcılar, soğuk katılaşan yapıştırıcılar ve erimiş durumda uygulanan ve soğuyup sertleştiğinde yapışma sağlayan (hot-melt) yapıştırıcılar örnek gösterilebilir (Kinloch, 1987a).

Yapıştırma bağlantıları, kullanılmadan önce bağlantı yapılacak koşullar iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bağlantının mukavemeti, maruz kalacağı yüke, uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırıcıya ait özelliklere, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine ve yapışma işleminin sağlıklı yapılıp yapılmadığına bağlıdır.

Bu çalışmanın ana amacı, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen polivinil alkol (PVA) nano elyaf ve ağırlıkça % 1, 3, ve 5 ÇCKNT'ler ihtiva eden PVA nano kompozit keçelerin epoksi yapıştırıcı ile bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantılarında kayma gerilmesi ve çift konsol kiriş (ÇKK) testi ile kırılma tokluğuna olan etkisi incelenmiştir. Yapıştırıcı olarak epoksi reçine (DiGlisidil Eter Bisfenol A- DGEBA) ve yapıştırılan malzeme ise Al 2024-T3 levha kullanılmıştır. Modifiyeli yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D1002-10 standardına göre tek taraflı bindirmeli bağlantısı ve ASTM D3433-99 standardına göre ise ÇKK (Mod I; açılma) testlerine maruz bırakılmıştır. Bu deneyler sonucunda ÇCKNT'ler ile takviyelenmiş epoksi reçinenin, PVA nano elyafların ve PVA nano kompozit keçelerin kayma gerilmesi ve kırılma tokluğu üzerine etkileri araştırılmıştır.

Ayrıca, PVA nano elyafların ve PVA nano kompozit keçelerin karakterizasyonu fourier dönüşümlü infrared spektrometri (FT-IR), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) analizleri ile incelenmiştir. Epoksi yapıştırıcı içerisindeki ÇCKNT'lerin dağılımı ve hasar mekanizmasının incelenmesi için kırık yüzeylerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) ile numunelerin kırılma yüzeyleri araştırılmıştır.

İkinci bölümde yapmış olduğumuz tez çalışmamızla kaynak araştırması yapılarak ilgili literatür özetleri aşağıda maddeler halinde verilen başlıklar altında sunulmuştur.

a) Yapıştırıcılar, yapıştırılan malzemeler, çift konsol kiriş ve kayma gerilmesi
b) Epoksi reçine içine nano parçacıklar katılması

c) Elektro-eğirme yöntemiyle nano elyaf üretilmesi

d) Analitik yaklaşımlar

Üçüncü bölümde yapıştırma ve yapıştırıcılar, nano kompozit malzemeler, elektro-eğirme ve analitik yaklaşımlarla ilgili kuramsal temeller anlatılmıştır. Dördüncü bölümde epoksi reçine, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen polivinil alkol (PVA) nano elyaf ve ağırlıkça % 1, 3, ve 5 ÇCKNT'ler ihtiva eden PVA nano kompozit keçelerin üretimi karakterizasyonuna ait malzemeler ve yöntemler ortaya konulmuştur. Üretilen nanokeçelerin yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma gerilmesi, kırılma tokluk değerleri ve kırılma yüzeyleri de bu bölümde incelenmiştir. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçların nedenleri ortaya koyularak tartışılmış ve değişikliklere neden olan mekanizmalar ortaya konulmuş ve ayrıca literatürdeki mevcut analitik modellerin uygulanmasını kolaylaştırmak amacıyla elde edilen deneysel sonuçları ile her biri için uygulanabilirlik koşullarının doğruluğunu tespit etmek amacıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar ve bu tezde elde edilen sonuçlara göre ileride yapılması düşünülen çalışmalar açıklanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapıştırıcıların birçok avantajlarından dolayı çoğu çalışmalara konu olmuşlardır. Yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyindeki süreksiz yapı ve ortamın geometrisinin karmaşıklığı, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizini güçleştirir. Bu nedenle yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar birçok bilim adamı ve araştırmacının bu alana yönelmesine neden olmuştur. Dolayısıyla bu alanda yapılan araştırmalar esnasında analitik, nümerik ve deneysel yöntemler kullanılmıştır.

Yapıştırma işleminin tanımı, avantajları, dezavantajları, birleştirme geometrileri, yapıştırıcı malzemeler ve özellikleri, yapıştırılacak malzeme özellikleri, yüzey hazırlama, yükleme şekillerinin etkisi vs. konular Shields (1974) tarafından incelenerek referans kitap olarak yayınlanmıştır.

Kinloch (1987b) tarafından adhezyon olayının açıklanmasında kullanılan teoriler incelenerek, adhezyon olayının tek bir teori ile açıklamanın yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır. Adhezyon teorilerinden birkaçının bir araya gelmesiyle oluştuğu belirtilmiştir. Yapıştırılacak malzemelerinin yüzeylerinin hazırlanması ve yapıştırıcıların sertleşme mekanizmaları hakkında bilgiler vermişlerdir. Dahası yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışları ve kırılma mekaniği hakkında açıklamalar yapışmıştır. Yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik yükleme durumları hakkında bilgiler verilmiştir.

Birleştirme işlemine başlarken, yapıştırıcının birleştirilecek yüzeylerle iyi bir temasın sağlanması için sıvı formda olması gerekir. İyi bir temasın sağlanması ıslatma ya da yayılma olarak tanımlanır ve güçlü bir yapıştırma bağlantısının sağlanmasında çok önemli bir faktördür. Yapıştırıcı, yapıştırılan malzemenin yüzeyini iyice ıslattıktan sonra katı hale geçer. Yapıştırıcının sıvı halden katı hale dönüşümü, çözücünün uzaklaşması, yapıştırıcının soğuması ya da kimyasal reaksiyonlarla sağlanır (Bowditch ve ark., 1987).

Yapmış olduğumuz tez çalışmamızla ilgili literatür özetleri aşağıda maddeler halinde verilen başlıklar altında sunulmuştur.

a) Yapıştırıcılar, yapıştırılan malzemeler, çift konsol kiriş (Mod I çatlak açılması) ve kayma gerilmesi (Mod II, kayma),
b) Epoksi reçine içine nano parçacıklar katılması,
c) Elektro-eğirme yöntemiyle nano elyaf üretilmesi,
d) Analitik yaklaşımlar,

2.1. Yapıştırıcılar, Yapıştırılan Malzemeler, Çift Konsol Kiriş ve Kayma Gerilmesi

Venables (1984), pürüzlülük ve gözeneklilik gibi yüzey karakteristiklerinin bağlantı mukavemetinde kritik bir rol oynadığını ifade etmiştir. Yüksek çözünürlüklü Taramalı Elektron Mikroskobu (XSEM) kullanarak alüminyum ve titanyumun oksitlenme morfolojisini çalışmış olup pürüzlü ve gözenekli yüzeylerle elde edilen yapıştırma bağlantılarının mekanik iç kilitlenmeden dolayı daha mukavemetli olduğunu belirlemiştir.

Adams ve ark. (1997) tarafından yapılan çalışmada, mühendislik alanında kullanılan yapıştırıcılar incelenmeye çalışılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerindeki teoriler (Lineer Elastik, Volkensen, Goland ve Reissner Analizleri) incelenmiştir. Bindirme, köşe ve silindirik yapıştırma bağlantılarında dikkat edilmesi gereken geometri ve yükleme şartları, tahribatlı ve tahribatsız test metotları araştırılmıştır. Polimer yapıştırıcıların kimyasal, termal ve mekanik deformasyon özellikleri verilmiştir. Yüzey hazırlama esnasında dikkat edilecek hususlar ve uygun yapıştırıcı seçimi hakkında bilgiler verilerek, servis şartları altındaki davranışları incelenmiştir.

Alüminyum alaşımlarının da yüzey hazırlama yöntemlerinin yapıştırma bağlantısının yaşlanmasına etkisini Lunder ve arkadaşları (2002) araştırmıştır. Yapılan çalışmada alüminyum alaşımlarında çok yaygın olarak kullanılan kromik-sülfürik asit çözeltisi de dâhil 7 farklı yüzey temizleme yönteminin etkileri 40ºC'de ve % 82 bağıl nem ortamında 50 gün bekletilerek farklı testlerle araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda en iyi yüzey hazırlama yönteminin sıcak sülfürik asit içerisinde AC anodize etme yöntemi olduğu, kromik-sülfürik asit ile yüzey temizleme yönteminde de anodize yöntemiyle aynı sonuçları verdiği fakat sadece çekme mukavemetinde anodize yöntemine göre kayıp olduğunu tespit etmişlerdir.

Tek taraflı bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde iki farklı bölge oluşmaktadır. Serbest uçlarda ayrılma, orta bölgelerde ise kayma gerilmeleri oluşur. Eğer yapıştırıcı kalınlığı arttırılırsa, kayma gerilmelerin değeri büyümektedir. Malzeme kalınlığındaki artış ile eşdeğer gerilmenin serbest uçlardan merkeze doğru yayılmasına neden olmakta ve malzeme kalınlığı arttığında bağlantı dayanımı da artmaktadır. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında çatlak oluşumu kenarlardan başlayarak orta bölgelere doğru ilerleyerek rapor edilmiştir (Aydin ve ark., 2005).

Özellikle havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin birleştirilmesinde de yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak darbelere ve yüklenmelere verdiği tepkiler deneysel olarak incelenmiştir. Bunun sonucunda yapışkan tabakasında çatlak başlangıcı olduğu, gerilme türüne bağlı olarak Mod I ve Mod II çatlak durumları oluşmaktadır. Asıl sebebi ise soyulma ve ayrılma gerilmelerinin etkileridir. Uygulanan kuvvetler sonucunda daha yüksek mukavemetli yapıştırıcı kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Vaidya ve ark., 2006).

Yapılan çalışmada bağlantıdaki gerilme yığılmaları ile oluşan çatlağın başlaması ve ilerlemesini incelenmiştir. Gerilme yığılmaları belli bir sınırı aştıktan sonra çatlak başlamış Mod I ve Mod II kırılma davranışı gözlemlenmiştir. Gerilme hızının artması ile çatlak ilerleme hızı da artmıştır. Aynı yapıştırıcı ile daha sağlam bir bağlantı gerçekleştiğinde statik halde iken etkilenmediği görülmüştür (Deng ve Lee, 2007).

Moura ve ark., (2009) yaptıkları çalışmada epoksi yapıştırıcıların Mod I ve Mod II kırılma davranışları incelenmiştir. Gerilim dağılımları sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda bindirme uzunluğundan kaynaklanan eşit olmayan gerilme yığılmaları oluştuğu görülmektedir.

Alüminyum alaşımlarının yüzeylerine uygulanan ön işlem, alüminyum/epoksi bağlantılarında yapıştırıcı dayanımı düzenleyen en önemli faktörlerden biridir. Genellikle, çok sayıda alüminyum ön işlem prosedürleri vardır. En çok yaygın olarak uygulanan kimyasal işlemler kromik-sülfirik asitle dağlama yöntemidir. Bundan dolayı faklı dağlama işlemlerine saf alüminyum (A1050) ile Mg ve Cu alaşımlı (A2024) alüminyumun ayrı ayrı yapıştırma için yüzeylerine ön işlemler uygulanmıştır. Uygulanan dağlama işlemleri alüminyum alaşımlarının yüzey karakteristiklerini etkilediği görülmüştür. Uygulanan dağlama işlemleri alaşımın doğallığına bağlı olarak kalınlıkları, bileşenleri, yönü ve oluşan oksit tabakasının gözenekliliğini etkiler. Kayma test sonuçları, uygulanan ön işlemlerin etkinliği sadece alüminyumun niteliğine değil aynı zamanda yapıştırıcının niteliğine de bağlı olduğu görülmektedir. İncelenen yapıştırıcılar karşılaştırıldığında ölçülen yapışma dayanımını belirleyen en önemli parametreler, uygulama sıcaklığında yapıştırıcının viskozitesi ve çapraz bağlama derecesi olduğu görülmektedir (Prolongo ve ark., 2008).

Mühendislik uygulamalarında dikkat gerektiren yapıştırıcıyla bağlanmış yük taşıyan bağlantıların artan kullanımından dolayı yapıştırıcıların başarısızlık özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Yapıştırıcı bağlantılarının kırılma testleri yapıştırıcılar arasında karşılaştırmalı analizler için kullanılan mühendislik verilerini elde

etmek için geliştirilmiştir ve ayrıca farklı yapıştırılan malzemeler kullanılmıştır. Yapıştırma bağlantılarında lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) bağlı olarak çift konsol kiriş testlerin (Mod I, açılma modu) sonucunda, yapıştırıcının kırılma tokluğu (G_{IC}) incelemiştir. İdeal olarak yapıştırıcının karakteristik bir özelliği olan kırılma tokluğu, geometriden bağımsız bir değer olmalıdır (Lamut ve ark., 2008).

Yoon ve ark., (2010) yaptıkları çalışmada epoksi reçine içerisinde E cam elyaflarının oryantasyonu ve hacimsel oranlarıyla ilgili alüminyum yapıştırıcı bağlantılarının kırılma tokluğu ve çatlak direnci -150^{o}C kriyojenik sıcaklıkta ölçülmüştür. ÇKK yapıştırıcı bağlantılarında çatlak ilerlemesi eğilimini gözlemlemek için iki farklı hızda test oranları kullanılarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda, E-cam elyafları ile takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı ÇKK bağlantılarında sadece düşük çatlak ilerleme hızında kararlı çatlak ilerlemesi değil, aynı zamanda -150°C kriyojenik bir sıcaklıkta güçlendirilmemiş epoksi yapıştırıcıyla ÇKK bağlantılarıyla bağlanmış numunelerden daha yüksek kırılma tokluğu ve çatlak direnci göstermiştir.

Reis ve ark., (2011) tarafından yapılan çalışmada farklı yapıştırılan malzemelerin tek taraflı bindirme bağlantılarının kayma dayanımları karşılaştırılmıştır. Yapıştırılan malzeme olarak karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit, yüksek elastik çeliği (Docol 1000) ve 6082-T6 (AlMgSi1) alaşımlı alüminyum kullanılmıştır. Bağlantının kayma dayanımı yapıştırılacak olan malzemenin sertliği ile etkilenmektedir ve en yüksek kayma dayanımı, yüksek sertliğe sahip yapıştırılacak olan malzemelerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Üst üste bindirme uzunluğu yapışacağı malzemelere bağlı olarak farklı şekillerde kayma mukavemetini etkilemiştir.

Kırılma özelliklerini ölçme ve değerlendirme, emniyet moduna ulaşmak için yapıştırıcı bağlantılarında çok önemlidir. Havacılık, uzay ve otomotiv sektöründe en yaygın kullanılan yapıştırma bağlantılarından ve kırılma tokluğunu ölçmek için en yaygın olarak kullanılan yöntem çift konsol kiriş (ÇKK)'dir. Bu nedenle yüklemedeki kırılmayı değerlendirmek için 10 kat karbon elyaf takviyelendirilmiş polimer kompozit ile alüminyum alaşımlı plakalar epoksi reçine (Araldite LY-2015) ile yapıştırma bağlantısı Mod I (açılma modu) araştırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar (FE) analizi ile karşılaştırıldığında doğrulanmıştır. Deney sonuçları ve sayısal analizler oldukça uyumlu olduğu ve önerilen deneysel ve sayısal yöntemlerin etkinliğini göstermiştir (Khoshravan ve Mehrabadi, 2012).

Çift konsol kirişi (ÇKK) testi, yapısal yapıştırıcı bağlantılarının nitelemek için en yaygın kullanılan tahrip edici testlerden biridir. Yük ile yüklenmiş örnekler Mod I'de

kuvvete karşı çatlak ilerlemesini ölçerek yapıştırıcının kritik kırılma tokluğu (G_{IC}) tespit edilebilir. Ürün kalitesi ve tokluğu, alt tabaka kalınlığı, yapıştırıcının mekanik özellikleri, yapıştırıcı kalınlığı gibi birçok parametreler ÇKK testlerin sonuçlarını etkiler. ÇKK test sonuçlarına yüzey durumunun etkisi incelenmiştir. Bu nedenle karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin alt tabaka yüzeyine, kirletici maddeler ve ön yüzey işlemleri uygulanmıştır. Yüzeyler, temas açısı ölçümleri ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile karakterize edilmiştir. ÇKK testlerin sonucu kırılma yüzeyi ile ilişkili olarak analiz edilmiş ve tek taraflı bindirmeli bağlantı kullanarak da kayma dayanımlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra yapıştırıcının kırılma enerjisi alan yöntemi kullanılarak Δa çatlak ilerlemesi belirlendi ve böylece G_{IC}'de kararsız çatlak büyümesinden hesaplanmıştır (Wetzel ve ark., 2013).

Çekme yükü altında yapıştırıcıyla bağlanan farklı alt ve üst yapıştırılan malzemelerin tek taraflı bindirme bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Yapıştırılan malzeme olarak A2024-T3 ve 16 tabakalı karbon elyaf takviyeli kompozit levhalar, yapıştırıcı olarak ise iki bileşenli DP 460 yapısal epoksi kullanılmıştır. Deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar farklı elyaf oryantasyonlu kompozit malzemeler, yapıştırılan malzemelerin farklı kalınlıkları ve yapıştırma uzunluğu, bağlantının kopma kuvvetini ve gerilme dağılımlarının etkilediği görülmüştür (Ozel ve ark., 2014).

2.2. Epoksi Reçine İçine Nano Parçacıklar Katılması

Khoee ve Hassani (2010) yaptıkları çalışmada nanoelastomeric kopolimer takviye ederek epoksi reçinenin yapışma mukavemetini iyileştirmeye çalışmışlardır. Nano-boyutlu kopoli (stiren-bütil akrilat-etilen glikol dimetilakrilat: St-BA-EGDMA) parçacıklar, kürleştirici maddesi piperidin kullanılarak epoksi reçinesinin (diglisidil eter bisfenol A; DGEBA) tokluğunun geliştirilmesi için farklı içerikler ilave edilmiştir. Farklı oranlarda elastomerik nano parçacıklar ile takviye edilmiş ve edilmemiş epoksi yapıştırıcı kullanılarak farklı yapıştırılan malzemelerin yapışma dayanımlarını karşılaştırmak için tek taraflı bindirmeli bağlantı testleri yapılmıştır. Tarama elektron mikroskopi (SEM) ve FTIR, epoksi reçinenin ve yapıştırılan malzemenin ara yüzey morfolojisi ve kimyasal bileşimi araştırmak için kullanılmıştır.

Sonuç olarak yapışma mukavemeti, epoksi reçine ile karşılaştırıldığında nanoparçacıkların eklenmesiyle önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Yüksek

yapışma mukavemeti ağırlıkça % 20 elastomer nanoparçacıkları ile elde edilmiştir. Bu nanoparçacıkların takviyesiyle kırılma tokluğu iyileştirdiği bulunmuştur.

May ve ark., (2010) tarafından inorganik nano parçacıklarının (ÇCKNT ve nano γ-Al_2O_3) bir kombinasyonunu, hibrid sol-jel yöntemiyle DGEBA esaslı değiştirilmiş epoksi reçine güçlendirici olarak ilave edilmiştir. Farklı epoksi reçine/sol jel yöntemleri yapıştırıcı dayanımlarını değerlendirmek için hazırlanmıştır. Farklı formülasyonların mekanik performansları, değiştirilmiş epoksi/hibrid sol-jelin yapıştırıcı mukavemeti performansı üzerinde nano-dolguların etkisini tanımlamak için kayma ve çekme deneyleri ile karakterize edilir. Elde edilen sonuçlar epoksi/sol-jel yapıştırıcıdaki inorganik nanoparçacıkların belirlenmiş oranlarda karıştırılması, alt-tabaka yüzeyleri arasındaki yapışma performansının iyileştirdiğini göstermektedir. Saf epoksi reçine ile karşılaştırıldığında, sol-jel yöntemiyle değiştirilmiş epoksinin kayma mukavemetinde önemli bir artış gözlenmiştir. Aynı zamanda epoksi/sol-jel yapıştırıcı mukavemeti, yumuşak çelik ve Al2024-T3 alt tabakalar için kür sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yumuşak çeliğin tek taraflı bindirmeli bağlantı dayanım, üç farklı kür sıcaklıklarda anlamlı bir değişiklik göstermemesine rağmen, yapıştırıcı dayanımı Al alt-tabaka üzerinde artan kür sıcaklığında azalma göstermiştir.

Gkikas ve arkadaşları (2012) epoksi reçine içerisine ağırlıkça % 0.5-1 oranlarında ÇCKNT ilave ederek tek taraflı bindirmeli bağlantı kullanarak uçakların tamirini yapıştırmayla geliştirmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, ÇCKNT'leri epoksi reçine içerisine ilave edilmesiyle a) alüminyum alt tabakasının yüzeyine elektrolitin girişi önleyen ve böylece bölgesel alüminyum korozyonunu özellikle geciktirdiği veya engellediği etkin korozyon bariyeri olarak hareket edebilir, b) uyumlu bileşenlerle galvanik olarak hibrid sisteme yol açabilir ve c) alaşımın alt tabakasına yapıştırıcının yapışmasını arttırabilir. Elektrokimyasal ölçümler, epoksi reçine içerisine ÇCKNT dahil edilmesi alt tabaka ile kaplama arasındaki galvanik etkiye aracılık etmediğini göstermiştir. Oysaki galvanik etki polimer matrisi içine sınırlı bölgesel bozunma olgusunu başlatır. Ancak, yapıştırıcının eşit korozyon hızını düşürmüştür. Kayma testi ile ÇCKNT'lerin ilave edilmesiyle yapıştırma dayanımın arttığını göstermiştir.

Epoksi içerisine üç farklı fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNT'ler çoklu kovalent fonksiyonlandırma yöntemleriyle tek taraflı bindirmeli bağlantıları ASTM D1002 standartları göre hazırlanmıştır. Yapıştırıcı özellikleri üzerinde farklı kimyaların etkisi ağırlıkça % 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 oranlarında fonksiyonelleştirilmiş ve

fonksiyonelleştirilmemiş ÇCKNT'ler kullanılarak epoksi reçine (Hexion 4007) ile karşılaştırılmıştır. Ağırlıkça %1 oranındaki fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNT ile kayma dayanımını, epoksi reçineye göre %36 ve ağırlıkça %1 oranındaki modifiye edilmemiş ÇCKNT bir kontrol numunesine göre ise %27 arttırdığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak çekme testleri, ağırlıkça %1 fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNT'ler saf epoksi reçineye ilave edildiği zaman ise %50 çekme dayanımında iyileştirme görülmüştür (Sydlik ve ark., 2013).

KNT takviyeli yapıştırıcılar elektrik ve mekanik özellikleri birçok araştırmacı tarafından saf epoksi reçineden üstün olduğu bildirilmiştir (Li ve Lumpp, 2007; Rosca ve Hoa, 2011; Ulus ve ark., 2014). ÇCKNT'ler ağırlıkça % 0.5, 1, 2 konsantrasyonlarında kalenderleme tekniği ile epoksi reçine içerisinde dağıtılmıştır. Karbon nanotüp takviyeli epoksi reçine yapıştırıcısıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli alüminyum bağlantılarını yorulma yüklerine tabi tutarak yapıştırıcı bütünlüğü değerlendirilmiştir. Ayrıca yorulma yükleme sırasında bağlantının elektriksel direnci de izlenmiştir (Mactabi ve ark., 2013).

Mansourian-Tabaei ve ark., (2014) nano takviye dolgu malzemeleri üstün mekanik özelliklere sahip ve yaygın olarak yüksek performanslı uygulamalar için polimer matrisler ile ilişkili malzemelere takviye olarak kullanmışlardır. Bu çalışmada, ÇCKNT'ler, nano Al_2O_3, nano SiO_2 ve talk takviyeli epoksi reçineli yapıştırıcılar geliştirilmiştir. Diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) yapıştırıcıların, farklı tipteki etkileri ve yapıştırıcı içindeki nano dolguların içeriği, kopmadaki uzaması, termal kararlılık (hava ve azot atmosfer altında) araştırılmıştır. Epoksi matris içerisinde nano dolguların düzgün ve uygun dispersiyonla yapıştırıcı hazırlamak için basit ve etkili bir yaklaşım, ultrasonikasyon ile birlikte mekanik karıştırma olduğu bulunmuştur (Tang ve ark., 2013b). Transmisyon elektron mikroskobik ve taramalı elektron mikroskobik araştırmalar, nano dolguların yüklemelerde optimum nano dolgular epoksi matris içinde homojen olarak dağılmış olduğunu ortaya koymuştur. Kayma mukavemeti, yüklemelerde ÇCKNT'ler ve nano AI_2O_3 bir fonksiyonu olarak tek taraflı bindirmeli bağlantı ile ölçülmüştür. Sonuçlarda kayma mukavemetinin önemli ölçüde ÇCKNT'ler ve nano-Al2O3 sırasıyla belirli bir seviyesine kadar eklenmesi ile yaklaşık % 50 ve % 70 artış olduğunu göstermiştir.

Wernik ve Meguid'in (2014) yaptıkları çalışmada, karbon nanotüp takviyeli epoksi yapıştırıcıların mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmalar, nano takviyeli yapısal epoksi yapıştırıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerini

karakterize etmek ve dahası bu malzemeler ile ilişkili bazı kompleks olayları vurgulamak için tasarlanmıştır. Çalışmada epoksi reçine içerisinde karbon nano tüpleri dağıtmak ve yapıştırılacak malzemelerin yüzeyini hazırlama, yapıştırıcı kalınlığını kontrol etmek ve yapıştırıcının kürleşme koşulları ile ilgili bilgi sağlamak için kullanılan dağıtma yöntemleri tarif edilmiştir. Buna ek olarak i) yapıştırıcının (dogbone) çekme testi, ii) yapıştırıcı bağlantısı çekme testi, iii) çift taraflı bindirmeli bağlantı, iv) çift konsol kiriş kırılma tokluğu testleri açıklanmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen özelliklerinde en büyük iyileştirme ağırlıkça % 1 çok cidarlı karbon nanotüp yoğunluğunda ve bu konsantrasyonda ÇCKNT'ler nispeten eşit ve homojen bir dağılım göstermektedir. Bu kritik değeri aşan konsantrasyonlarda özellikleri bozulmaya ve dahası bazı durumlarda saf epoksinin altındaki seviyelere düşmeye başlayabilir. Gelişmiş elektron mikroskop teknikleri ve reolojik değerlendirmeler bu artan reçine viskozitesi ve bunun sonucunda dağılma direncinin bir sonucu olarak daha yüksek konsantrasyonlarda ÇCKNT'ün yığılmasından kaynaklandığını göstermektedir. KNTlerin artan mevcudiyeti ve onların moleküller arası etkileşimleri polimer zincirlerinin molekül hareketini kısıtlar. Böylece gerekli olan dağıtma (kayma) kuvvetleri başlatmak için problu ultrasonikasyonun kabiliyetini sınırlar.

2.3. Elektro-Eğirme Yöntemiyle Nano Elyaf Üretilmesi

Naebe ve ark., (2007) tarafından elektro eğirme yöntemiyle üretilen PVA nano elyafların yapıları ve özellikleri üzerine ÇCKNT'lerin etkilerini araştırmışlardır. PVA nano elyaflar ile ağırlıkça % 4.5 ÇCKNT içeren PVA nano kompozitler elektro eğirme yöntemiyle üretilmiş olup, ÇCKNT'lerin etkileri ve çekme özelliklerindeki post-eğirme işlemleri tarafından tetiklenen PVA'nın morfolojisi değişimleri, nano elyafların yüzey hidrofilliği ve termal kararlılığı incelenmiştir. Diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ve geniş açı X-ışını difraksiyonu ile (WAXD) karakterizasyonları boyunca karbon nanotüplerin varlığı, ÇCKNT'ler/ PVA kompozit elyaflardaki PVA'nın kristalizasyonunu çekirdeklendirilebilmekte olduğu ve bu yüzden önemli ölçüde elyaf çekme dayanımını iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, PVA içerisindeki karbon nanotüplerin varlığı elyaf çapı ve nano elyaf keçenin yüzeyinin hidrofilikliğini azaltır. ÇCKNT'ler/PVA kompozit nano elyaflar ve saf PVA nano elyaflar, sırasıyla PVA kristalliğini yükseltmeye ve çapraz bağlı bir PVA ağı kurma amacıyla metanol

içerisinde ıslatılması ve glutarik dialdehid ile çapraz bağlantı gibi post-eğirme işlemleri farklı cevap verilmiştir. Karbon nanotüplerin varlığı metanol işlemler sırasında PVA kristalleşme hızı azalır fakat önlenen kristallik hızının azalması çapraz bağlama reaksiyonuna neden olmaktadır. Çapraz bağlama reaksiyonu ile karşılaştırıldığında metanol işlemi, elyafın çekme dayanımında daha iyi iyileşme ve çekmedeki şekil değiştirmede ise daha az azalma ile sonuçlandı. Buna ek olarak karbon nano varlığı kompozit nano elyafların başlangıç ayrışma sıcaklığını düşürür fakat post-eğirmeyle işlenmiş nano elyafların termal bozunması kararlıdır. Hem metanol hem de çapraz bağlama reaksiyonu ile işlenmiş ÇCKNT'ler / PVA kompozit nano elyaflar elyaf çekme mukavemeti, su temas açısı ve termal kararlılığı en büyük artış sağlamıştır.

Genellikle epoksi matris malzemelere nano parçacıklar takviye edilerek yeni ve farklı özelliklere sahip nano kompozitler oluşturulmaktadır. Ancak nano parçacıklar belirli bir orana kadar takviye edilmektedir. Bu durum nano parçacıkların kompozit malzeme içerisinde kullanımını kısıtlamaktadır. Ayrıca nano parçacıkların üretiminin oldukça zor olması başka bir etken olarak görülmektedir. Bu yüzden kompozit malzemelerde nano parçacıkların yerine nano elyaflar ve nano teller kullanılmaktadır. Nano elyafların kolay bir şekilde üretilebilmesi ve kompozit malzemelere uygulandığında mekanik özelliklerin artırması uygulamalardaki etkisini öne çıkartmaktadır (Teo ve Ramakrishna, 2009).

Elektro eğirme yöntemiyle üretilen polimer nano elyaflar porozlu yapıya sahiptirler. Polimer nano elyafların rastgele yönlenmesi gözenekli bir yapının oluşmasına ve yüksek bir yüzey alanına yol açmaktadır. Nano elyafların porozlu bir karakteristik göstermesi, önemli bir şekilde geçirgenliği sağlayarak reçine akışını kolaylaştırmaktadır. Bu durum takviye edici yapının tamamen ıslatılmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda bu yapıya sahip nano elyaflar kompozit malzemelerde kırılma tokluğunu artırmaktadır. Kompozit prepreglerin yüzeyine yerleştirilen nano elyaflara ön ıslatma yapılması reçinenin tamamen katılaşmamasına neden olmaktadır. Karbon dokuma kumaşların üzerine doğrudan nano elyaflar yerleştirildikten sonra epoksinin ilave edilmesi reçine tabakasının tamamen ıslatılmasını sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2010).

Elektro eğirme işlemleri süresince elyaflardaki kristalik yapı ve moleküler yönlenme gibi yapısal oluşumun değişimi malzemeye eşsiz fiziksel özellikler katarak elyafların deformasyon davranışlarında önemli yere sahip olmaktadır. Amorf yapıya sahip olan elyaflar elastomerik özellikler sağlarken kristalik yapıya sahip olanlar ise

boyutsal kararlılık gösterirler. Elyaf yapısındaki kristalik ve amorf fazının rastgele ve düzenli olması malzemenin mekanik karakteristiğini etkileyen başlıca etkenlerin başında gelmektedir. Bunun yanı sıra elyaf yapısı, elyafların geometrik dizilimi, bireysel elyaf özellikleri ve elyaflar arasındaki etkileşim elyaf matın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu özellikleri Elektro eğirme işlemleri süresince kontrol etmek oldukça zordur. Bu yüzden tek elyafın gerilme deformasyonun belirlenmesi önemlidir (Baji ve ark., 2010).

Elektro eğirme yöntemi yeni bir alan olmasına rağmen nano elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimi hızlı bir şekilde artmaktadır. Tek elyafın mekanik özelliklerinin artması, matriste yer alan nano elyafın kontrolü ve elyaf-matris bağının kontrolü gibi özelliklerde yeni kompozit malzemelerinin oluşumuna önemli bir katkı sağlamaktadır. Elektro eğirme yöntemiyle elyaflar polimer solüsyonlarından elde edilmektedirler. Polimerlerin hem yapısal takviyelendirmeye uygunluğu ve hem de yüksek mekanik özelliklere sahip olması istenilmektedir. Bu yüzden polimer seçimi kompozit malzemeler için oldukça önemlidir. Ayrıca polimerlere karbon nanotüp ilave edilerek farklı nano elyaflar de elde edilmektedir. Karbon nanotüplerin yüksek dayanıma, esnekliğe, yüksek termal ve iletkenliğe sahip olması polimer solüsyonuna farklı özellikler katarak kompozit malzemelerdeki uygulanabilirliğini artırmaktadır. Karbon nanotüplerin yanı sıra farklı nano parçacıklar, seramikler, karbon siyahı nano parçacıklar katılarak, yeni nano elyafların mekanik özelliklerinin artırılması için araştırmalar yapılmaktadır (Zucchelli ve ark., 2011).

Elyaf takviyeli polimer kompozitlere uyumlu ara yüzler oluşturmak için elyafları polimer matrisi içine etkin emdirme işlemi gerektirir. Bu çalışmada, optimum mekanik özelliklere sahip nano kompozitlerin üretimi için elektro eğirme yöntemiyle üretilen elyaf keçeler ile çözelti etkileşimleri incelenmiştir. Dokunmamış polyamid 6 (PA6) nano elyaflar, solüsyon bazlı işlem yöntemini kullanarak dokunmamış keçe içindeki PVA matrisi kullanılarak elde edilmiştir. Kompozit en yüksek kopma gerilmesi, PVA çözeltisinin en uygun ağırlıkça %16 için belirtilmiştir. Bu oran hem çözücünün buharlaştırılmasından sonra PVA matris ile sözü edilen ağın tüm gözenekleri doldurulur hem de nano elyaf ağlar emdirilerek PVA çözeltisi olarak elde edilen bileşikteki boşlukların kaldırıldığını göstermektedir. Bu işleme yöntemleri optik açıdan saydam elektro eğirmeli nano elyaf kompozitler için daha fazla işlevsellik gösteren, tutarlı nano elyaf-matris ara yüzeyleri elde etmek için etkili olmaktadır (Stachewicz ve ark., 2012).

Phong ve ark., (2013) yaptıkları çalışmada nano PVA elyafların karbon fiber/epoksi kompozitlere eklenmesiyle oluşan kompozit malzemenin mekanik performansını araştırmışlardır. Çapı yaklaşık 40-80 nm olan nano polivinil alkol elyafları (nPVA) elektro eğirme tekniği kullanarak imal edildi. Tamamen kuruduktan sonra, nPVA karbon elyaf takviyeli (KET)epoksi matris kompozitlerin arasına dağıtıldı. nPVA ağırlıkça % 0.03, 0.05 ve 0.1 içeren KET/Epoksi matris takviyeli kompozitleri çekme, Mod-I kırılma tokluğu ve gerilme/çevrim sayısı gibi yorulma testleri farklı mekanik testlerle karakterize edilmiştir. Test sonuçları nPVA içeriğinin ağırlıkça % 0.1 oranında, Mod I tabakalar arası kırılma tokluğunu önemli ölçüde hem çatlak başlangıcında % 65 hem de çatlak ilerlemesinde % 73 geliştirdiğini göstermiştir. Çekme mukavemeti az oranda artarken yorulma ömrü ise önemli ölçüde yüksek çevrimli yorulmada takviyelenmemiş kompozit olanlardan 10-30 kat daha uzun artmıştır.

Kriyojenik ortamda yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, düşük termal genleşme katsayısı takviyesiyle ve kriyojenik sıcaklıkta malzemeler oldukça kırılgan olduğu için yüksek kırılma tokluğu geliştirilmiş olmalıdır. Aramid elyaflar, düşük düşük termal genleşme katsayısı belirtilmiştir ve olan termoset reçinelerin düşük termal genleşme katsayısı kontrol etmek için kullanılmıştır. Ancak aramid elyaflar, kimyasal olarak inert ve yetersiz fonksiyonel grup içerdiği için aramid elyaflar ile reçine arasında zayıf bir yapışma sergiler. Bu çalışmada çekirdek-kabuk yapılı meta aramid ile epoksi yapıştırıcı nano elyaf keçeler kriyojenik sıcaklık altında elyaf ve yapıştırıcı arasında ara-yüz bağlanmayı geliştirmek için polimer karıştırma yöntemi ile elektro eğirme ve çok düşük sıcaklık altında elyaflar arasındaki, polimer karıştırma yöntemi ile elektro eğirmeyle üretilmiştir. Nano elyaflı keçeler ile takviye edilerek güçlendirilmiş epoksi reçinenin düşük termal genleşme katsayısı ölçüldü ve yapışma mukavemetinin etkisi kriyojenik sıcaklıkta tek taraflı bindirmeli bağlantılarda araştırılmıştır. Yapıştırıcı bağlantılarının kırılma tokluğu, çift konsol kiriş (ÇKK) testi kullanılarak ölçülmüştür (Oh ve ark., 2014).

2.4. Analitik Yaklaşımlar

Bindirme bağlantılarında bağlantı mukavemetinin başarılı olarak tahmini için ilk adım, yük altında zayıflamaya neden olan gerilme, şekil değiştirme ve yapışma mekanizmasını iyi anlamaktır. En basit gerilme analizi, iki rijit plakayı (yapıştırılan) ve aralarında sadece kayma tesiriyle şeklini değiştiren yapıştırıcıyı göz önüne alır.

Bindirme bağlantılarında; bindirme bölgesi boyunca yapıştırılan parçaların çekme deformasyonları, bindirme uçlarında kayma gerilmelerinin yığılmasına neden olur. Volkersen (1938) "diferansiyel şekil değiştirme" olarak bilinen bu tesiri ilk göz önüne alan araştırmacıdır. Bu çalışmada tek bindirmeli bağlantılar, sadece yapıştırıcı tabakası kayma deformasyonlarına maruz ve deforme olmayan yapıştırılan malzemelerden oluşan bir boyutlu çubuk kabulüyle basit kayma modeli altında analiz edilmiş ve tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantısının tam kayma gerilmesi altında olduğu kabul edilen bir klasik mekanik yaklaşım kullanılmıştır. Ancak bu bağlantılarda yük hattı ile simetri ekseninin çakışmaması, bağlantının dönmesine neden olur. Dolayısıyla yapıştırıcı bağlantısı, bindirme uçlarında kayma gerilmelerine ilaveten soyulma gerilmelerine de sahiptir. Bu nedenle yapıştırılan malzemeler çekme etkisinden başka eğilme momentlerine de maruzdur. Goland ve Reissner (1944), Volkersen'in analizinde ihmal edilen bu eğilme momentlerini de göz önüne alarak teoriyi düzeltmişler ve eksantrik yükleme etkilerini içeren tek bindirme bağlantısı için bir deformasyon modeli sunmuşlardır. Ancak Benson (1969), Goland ve Reissner'in teorisinde eğilme momenti faktörünün türetilmesinde bindirme bölgesinin dönmesine müsaade ettiğini, ancak dönme olayının olmadığını kabul ederek bağlantıda iç gerilmeler türettiğini ve bunun düşük yükler için mümkün olmadığını ifade etmiştir.

Adams ve Peppiat (1974), yapıştırıcı bağlantısının genişliği boyunca önemli gerilmelerin mevcut olduğunu tespit etmiş ve yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcıdaki kayma gerilmelerinin uygulanan yük doğrultusuna dik yönde de mevcut olduğunu ve yapıştırılan malzemelerde bu gerilmelere Poisson oranının sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Renton ve Vinson (1977), yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bağlantılarda daha gerçekçi sonuçların alınabilmesi için kayma ve normal gerilmeleri dikkate alarak modellenmesi gerektiğini açıklamışlardır. Bu konudaki ilk çalışmayı yapmışlardır. Çalışmalarında düzlem içi yüklere maruz tek taraflı bindirme bağlantısı tarzında birbirine birleştirilmiş iki tabakalı kompozit plakanın lineer elastik davranışını belirlemek için bir analiz metodu sunmuşlardır. Bu analizde şu sonuçlara varmışlardır;

- Yapıştırıcıdaki normal gerilmeler, bindirme bölgesinin uçlarında en yüksek değere ulaşır. Bağlantılar simetrik olmadığı için eğilme oluşur ve düzlem içi yükleme ile artar.

• Aynı tür malzemeler yapıştırılınca kayma ve çekme etkisiyle birleşir. Bağlantı uçlarında yüksek gerilmeler oluşur. Bu gerilmeleri azaltmak için daha az direngen bir yapıştırıcı kullanmak gerekir.

• Yapıştırılan malzemelerin yük kaldırma kabiliyetinin arttırılması kopmanın yapıştırıcıda meydana gelmesine sebep olacaktır. Aksi takdirde yapıştırıcıda kopma beklenmez.

• Bindirme boyu arttırılırsa (bağlantını geri kalan kısmının toplam boyu sabit olması şartıyla) yapıştırıcıda oluşan kayma ve normal gerilmeleri azalacaktır. Ancak belirli bir bindirme boyundan sonra bu etki ortadan kalkacaktır.

Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirme bağlantılarındaki gerilme dağılımında yapıştırıcı kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Kayma gerilmesi denklemlerinde bazı katsayıları düzenleyerek yapıştırıcıda oluşan soyulma gerilmesi için diferansiyel denklemde ve sınır şartlarında tamamen yeni terimler elde etmişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığı ne kadar ince olursa olsun, yapıştırıcı kalınlığı boyunca kayma gerilmesi dağılımının tahmin edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Kayma gerilmesinin yapıştırıcı kalınlığı boyunca değişimine ilaveten, kayma gerilmelerinin yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı ara yüzeyinin iki uç noktasında en yüksek değere ulaştığını ortaya konulmuştur (Ojalvo ve Eidinof, 1978).

Tsai ve Morton (1994), yapıştırmanın yapıldığı bölgenin serbest uçlarındaki momentlerin hesaplanması üzerine büyük dönmelerin etkisini analiz etmişler ve yapılan yapıştırma bağlantısı kısa ise, serbest uçlarda oluşan momentler üzerine dönmelerin etkisinin ihmal edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte büyük bindirme uzunlukları için doğru sonuçlar vermediğini, kısa bindirme uzunluklarında ise oldukça doğru sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Bu doğruluk büyük deformasyonları içermediğinden halen kısa bindirme uzunlukları için geçerlidir. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirme bağlantısında geometrik olarak lineer olmayan deformasyonların ve yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımlarının deneysel, sayısal ve teorik analizini yapmışlar ve her üç yöntemle elde ettikleri sonuçların uyum içinde olduğunu ifade etmişlerdir.

Sawa ve arkadaşları (2000), çekme yüküne maruz farklı yapıştırılan malzemelerin yapıştırılması ile oluşturulmuş tek taraflı bindirme bağlantısını iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak analiz etmişlerdir. Ara yüzeyde oluşan gerilme dağılımı üzerine, yapıştırılan malzeme kalınlığı, yapıştırıcı tabakasının kalınlığı ve yapıştırılan malzemelerin elastisite modül farklarından oluşan etkileri analiz etmişlerdir.

Yapıştırılan malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün yapıştırmanın yapıldığı bölgenin serbest uçlarında oluşan gerilme dağılımları üzerine son derece büyük bir etkisinin olduğunu göstermişlerdir.

Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirme bağlantıları için geliştirilen analitik çözümler üzerine yapılan bu çalışmalar yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının anlaşılmasına yönelik önemli bir bakış açısı sağlar. Ayrıca, tasarım kıstaslarının kurulması parametrik çalışmalarda ve deney planlamasında oldukça faydalıdır. Bununla birlikte, gerçek uygulamalarda bu yöntemlerin kullanımı kısıtlayıcı varsayımları ve teorinin kurulduğu geometrilerden dolayı oldukça sınırlıdır. Bu yöntemlerin çoğu üç boyutlu analizin gerekli olduğu yerlere direkt olarak uygulanamaz.

Büyük yer değiştirmelerin etkisini dikkate alarak yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirme bağlantısında yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin ısıl özelliklerindeki uyumsuzluktan dolayı oluşan ısıl gerilmeleri, sonlu eleman yöntemiyle incelemişlerdir. Yaptıkları detaylı analizlerin sonucunda, bağlantıdaki en kritik bölgenin yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeylerinin serbest uçları olduğunu, alt ve üst yapıştırılan malzeme yüzeylerinde büyük ısıl gerilmelerin oluştuğunu ifade etmişlerdir (Apalak ve Gunes, 2002).

Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin tek ve çift takviyeli yapıştırma bağlantıların gerilme davranışlarını deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Deneysel olarak yapılan çalışmada farklı bindirme uzunlukları ve kapak kalınlıklarının hasar modu, rijitlik ve hasar yüküne etkisi araştırılmıştır. Tamir sonrası bağlantının davranışını anlamak için, rijitlik ve kapağı yüzeyden kaldıracak yükleri verecek şekilde nümerik simülasyon yapılmıştır. Sünek yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Mod I, Mod II ve karışık modlu kohesive hasar modelini içeren kohesive elemanlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada en iyi sonuçlar 15 mm bindirme uzunluğundaki çift takviyeli kapaklar üzerinde oluşmuştur. Diğer taraftan kapak kalınlığının dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gözlemişlerdir (Campilho ve ark., 2009).

Sayman (2012) yaptığı bu çalışmada, analitik elasto-plastik gerilme analizi sünek yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bağlantıda kayma gerilmesi belirlemek için önerilmiştir. DP460 yapıştırıcısı kullanılmıştır. Von-Mises ölçütü yapıştırıcı malzemenin akma durumunu kontrol etmek için kullanılmıştır. Çözümde, kayma gerilmesi yapıştırıcının kalınlığı boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Eğilme momenti

çözümde ihmal edilmiştir. Analitik sonuçlar sonlu elemanlar analizi kullanılarak kontrol edildi. Analitik ve nümerik çözümler iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur.

Yapıştırıcı ile bağlanmış bağlantılarda hasar başlangıcının ve yayılmasının simülasyonunu sağlayan Mod I ve Mod II hasar modeli sunulmuştur. Bu model, yükleme sırasında rijitliğin kademeli bozunmasının benzetimini yaparak hasar başlamasını ve kırılma mekaniği ölçütü belirlemek için gerilme ölçütüne dayanmaktadır. Böylece çatlak ucunun çevresinde zarar gören bölgelerde hacimsel şeklini belirlenmesini sağlayan iki boyutlu katı elemanlara uygulanmaktadır. Buna ek olarak bu model, kullanılan kriterlerin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkan çatlak bükülmesini tahmin edebilir (Chousal ve de Moura, 2013).

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Yapışma, Yapıştırıcı ve Yapıştırıcı Bağlantılarının Kuramsal Temelleri

3.1.1. Yapışma

Yapışma işlemi, yapıştırıcı ile yapıştırılacak malzeme arasında meydana gelen çekiciliğe denir (Kinloch, 1987b). Bu işlem, yapıştırıcıyı, yapıştırılacak malzemeyi, malzemeye uygulanan uygun yüzey işlemlerini ve yapıştırıcı/yapıştırılan malzeme arasında oluşan ara yüzey/ara fazı kapsamaktadır. Yapıştırma bağlantılarının fiziksel ve kimyasal dayanıklılığını değerlendirmek için, bu bileşenlerin dış yüklere, mekanik ya da çevresel faktörlere karşı nasıl tepki vereceğinin iyi anlaşılması gerekir. Yapıştırma bağlantıların performansı ve dayanıklılığı, bunların dışında malzeme ve yapıştırıcı özelliklerine, malzeme ve yapıştırıcı arasındaki fiziksel-kimyasal iç etkileşime, bağlantı şartlarına, bağlantı geometrisine, bağlantıdaki artık gerilmelere ve yapıştırma hattındaki kusurlara bağlıdır. İyi bir yapışma ve uygun değer bağlantı performansı verecek yapıştırıcı-malzeme kombinasyonu için yukarıdaki faktörlerin hesaba katılması gerekir (Parvatareddy, 1997).

İyi bir yapıştırmanın temel gereksinimleri (Petrie, 1975);

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

3.1.2. Birleştirmede kullanılan yapıştırıcıların avantaj ve dezavantajları

Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları üzerine yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Bu çalışmalardan birinde yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Ebnesajjad, 2010).

Avantajları:

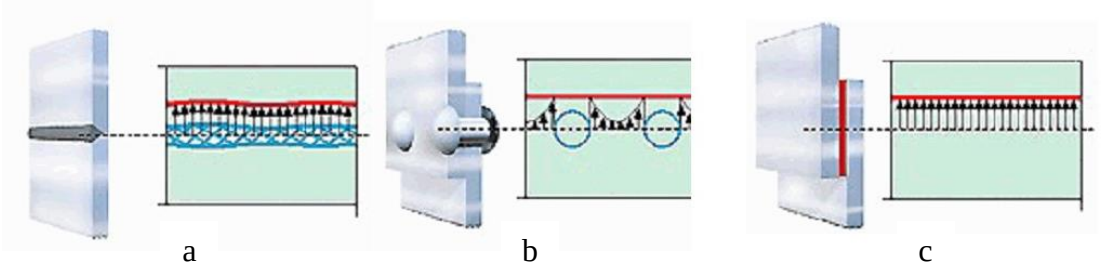
- Herhangi bir şekle sahip ince ve kalın malzemeleri birleştirilebilir,

- Mekanik (perçin ve cıvata gibi) ve termal (kaynak ve lehim gibi) birleştirmelerde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının azaltılması ile tüm yapışma alanı boyunca daha düzenli gerilme dağılımı elde edilmesi (Şekil 3.1)
- Daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi (Sharpe, 1966; Petrie, 1975),
- Aynı veya farklı malzemeleri birleştirir,
- Farklı malzemeler arasındaki elektrokimyasal (galvanik) korozyonu engeller veya en aza indirir,
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı,
- Esas malzemelerin (adherend) özellikleri bozulmaz,
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir,
- Isı transferi ve elektrik iletimine karşı yalıtkandır (bazı durumlarda yapıştırıcılar iletkenlik sağlamak için dizayn edilir),
- Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranı,
- Maliyet yönünden etkili ve uygun bir tekniktir,
- Mekanik bağlama işlemi daha ucuz ve/veya daha hızlıdır,
- Daha pürüzsüz aerodinamik yüzeyler elde edilir,
- Ağırlığı azaltır,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümleme kabiliyeti.

Dezavantajları:

- Yapışma, yapıştırma alanını görsel olarak incelenmesine izin vermez (yapıştırılan malzeme şeffaf olmadıkça) (DeLollis, 1970),
- Dikkatli yüzey hazırlama, genellikle korozif kimyasallarına karşı yapıştırma dayanımı elde etmek için gereklidir,
- Uzun kürleşme süreleri gerekli olabilir, özellikle yüksek kürleşme sıcaklıklarında kullanılmazlar,
- Üst kullanma sıcaklıkları genellikle yaklaşık olarak 177˚C ile sınırlıdır. Ama özel yapıştırıcılar 371^0C'ye kadar sınırlı kullanım için uygundur fakat genellikle bu yapıştırıcılar daha pahalıdır.
- Temizliğin üzerinde durulması dahil rijit işlem kontrolü, çoğu yapıştırıcılar için gereklidir,
- Yapıştırıcı bağlantıların kullanım ömrü maruz kaldığı çevreye bağlıdır,
- Yapıştırıcı çözücüsü veya temizlenmesinde kullanılan çözücülere maruz kalmak sağlık sorunlarına neden olabilir,

- Düşük soyulma dayanımı ve darbe dayanımı mevcuttur.



Şekil 3.1. Birleştirme bağlantılarında gerilim dağılımları a) kaynaklı, b) perçinli ve c) yapıştırma (Reis ve ark., 1998)

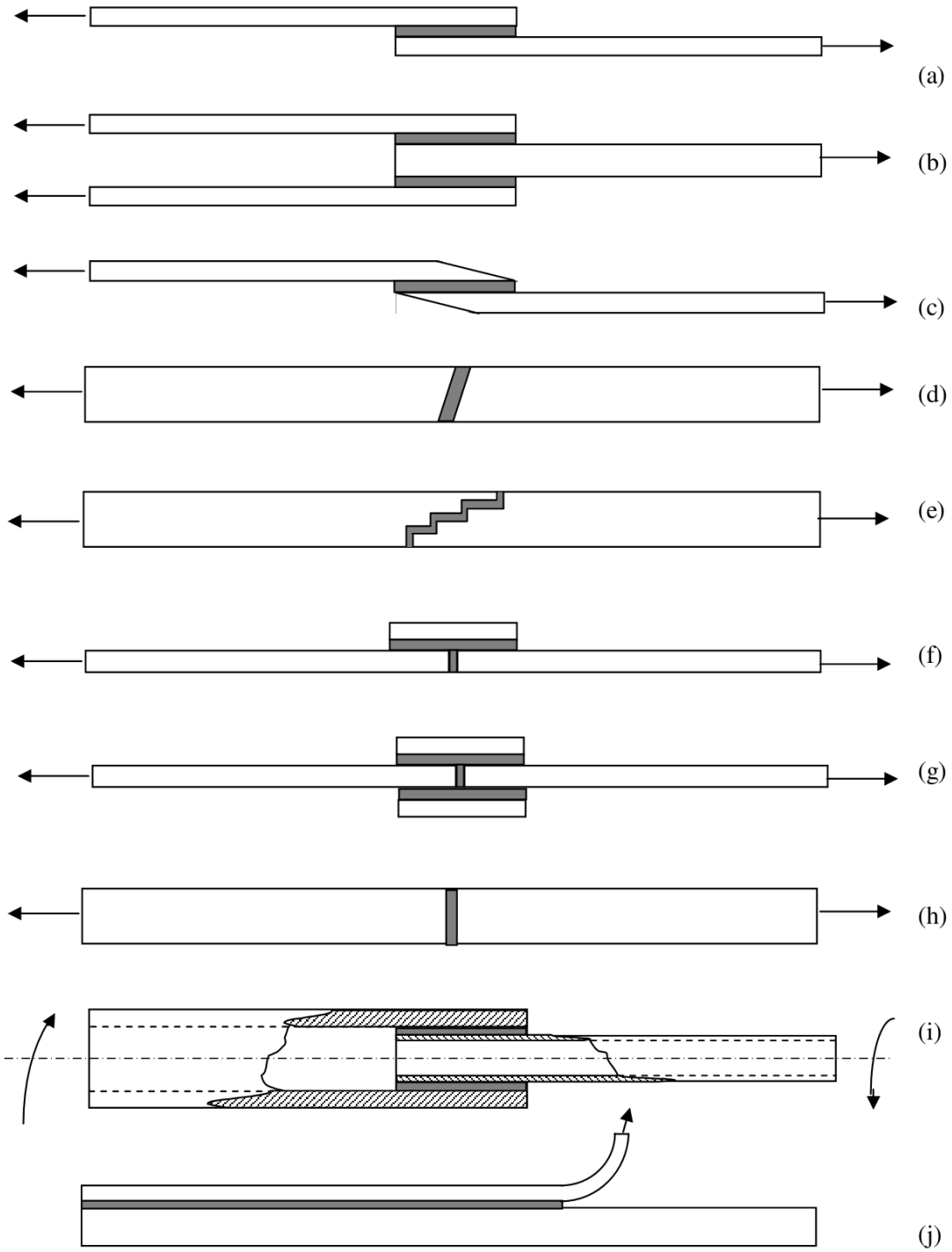
3.1.3. Yapıştırma bağlantıları

Yapısal mühendislik tasarımın rasyonel temeli, bir yükleme durumunda yükleri belirleyebilmek ve oluşacak gerilmeleri pratik olarak hesaplayabilmek olmalıdır. Yükleme sistemi genellikle bir fonksiyon ile tanımlanır, fakat mühendis en uygun ve maliyet açısından en etkili çözüme ulaşacak en iyi malzeme ve tasarım tekniğini kullanma becerisine sahip olmalıdır. Bu da sürekli olarak teknolojide ilerlemeyi gerektirir ve yapısal yük ve gerilmeleri ölçecek modern mühendisliğin önemini artırır (Adams ve ark., 1997)

Yapıştırma yoluyla birleştirilecek parçaların bağlantı şekilleri özel olarak tasarlanmalıdır. Gerilme ve yükleri düşünmeksizin yapıştırma bağlantısını tasarlamak hatalıdır. Bağlantı tasarımı genelde iki ana faktöre bağlıdır:

- Çalışma sırasında bağlantının maruz kalacağı kuvvetlerin ve yüklerin yönüne,
- Bağlantının oluşturulabilme kolaylığı ise parçaların imalat yöntemine (döküm, taşlama vb.) ve kullanılan malzemeye bağlıdır (Adin, 2007).

Eğer yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcının çalışma şartlarına uygun olacak şekilde tasarlanırsa cıvata, perçin, vb. metotlarla sağlanan bağlantılardan daha emniyetli olduğu görülür. Şekil 3.2.'de yapıştırma bağlantı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2. 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)

3.1.4. Yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler

Yapıştırma bağlantılarında dört önemli gerilme etkili olur (Şekil 3.3.). Bunlar; kayma (shear), çekme (butt), soyulma (peel) ve çekme-makaslama (cleavage)dır.

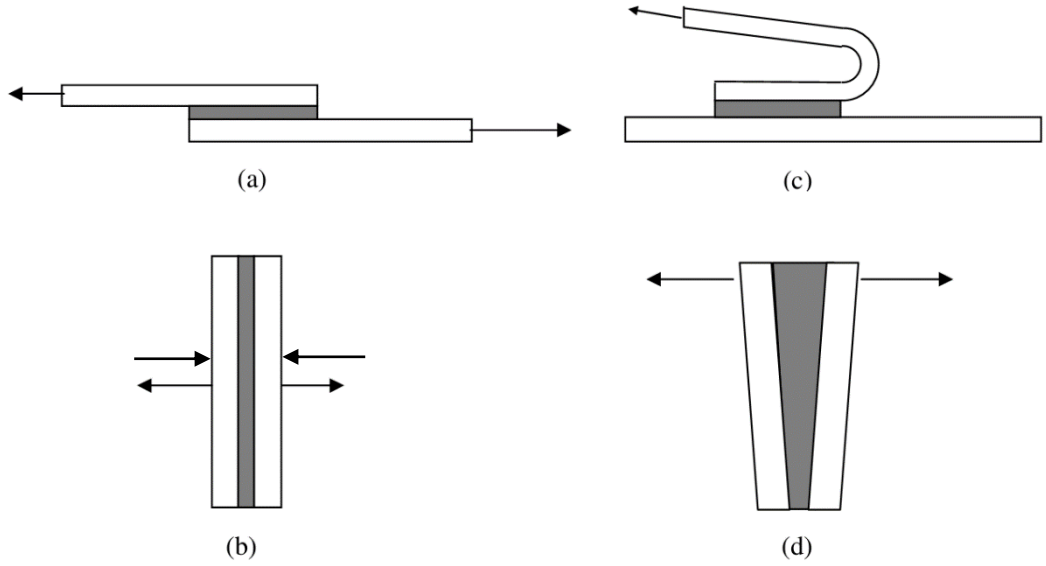
Bağlantı mukavemetinden en yüksek verim elde etmek için bu gerilme çeşitleri göz önünde bulundurulmalıdır.

3.1.4.1. Kayma gerilmesi

Kayma gerilmesi, yapıştırılan malzemeyi ayırmak için çalıştığınızda yapıştırıcının düzlemine etkili olan kuvvetler ile sonuçlanır. Kayma yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder (Şekil 3.3a). Bu tür yüklemede yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar ve pratikte yaygın olarak kullanılır. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar yükün büyük bir kısmı kayma yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır. Çünkü yapıştırıcılar genellikle bağlı alanın tümünde bağlantı mukavemetine katkı sağladığından dolayı kayma gerilmesi altında çok kuvvetlidir (Petrie, 1975).

3.1.4.2. Çekme ve basma gerilmeleri

Şekil 3.3.b'de görüldüğü gibi çekme gerilmesi, bağlantı düzlemine dik olarak etki eden tüm kuvvetler bağlanmış alanın tümü üzerinde düzgün olarak dağıtıldığında geliştirir. Ama bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etkidiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Gerilme, yapıştırıcı dış kenarlarında yüksek gerilme bölgesi oluşur. Eğer bu gerilmeler eksenden kaçık olarak etkimekte ise o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılma avantajı kaybolacak ve bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Önemli olan diğer bir nokta da yapıştırılan malzemenin kalın olması gerektiğidir. Maruz kaldığı yük etkisi ile fark edilir oranda bir çekme-makaslama oluşmamalıdır. Eğer durum böyle değilse o zaman gerilme dağılımı eşit olmayacaktır (Petrie, 1975; Temiz, 2003).



Şekil 3.3. Gerilme tipleri (a) kesme (b) çekme (c) soyulma (d) çekme-makaslama

Basma yükler ise çekmenin zıttır. Çekme yükünde olduğu gibi, basma yükü yapıştırıcıda sadece basma gerilmesi görmek için aynı doğrultuda yükleri muhafaza etmek önemlidir. Basma yüklemesi altındaki bir yapıştırıcının başarısızlığı mümkün değildir ancak düzensiz gerilim dağılımlarının nedeniyle zayıf noktalar çatlayabilir. Aslında," saf" sıkıştırma yüklenen bir bağlantıda neredeyse herhangi bir tür bağ gerekmiyor. Eğer basma kuvveti yeterince yüksek ve parçaların herhangi birinde hareket yoksa yapıştırıcı kohezyon olarak kopmadıkça, parçaların birbirlerine göre aynı konumda kalabilir.

3.1.4.3. Soyulma

Bu tür gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 3.3.c). Bu tür yüklemede bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı çabuk bozulacaktır. Mümkün oldukça bu tür yüklemeden kaçınılmalıdır.

3.1.4.4. Çekme-makaslama

Şekil 3.3.d'deki tip yükleme, ekseriyetle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucudur. Önceki gerilmelerin aksine bu gerilme, yapışma alanına eşit olmayan şekilde etkimekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi

karşılamak için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç vardır. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha fazla olduğu için bu tarz bağlantı tavsiye edilmez; çünkü maliyet artar (Adin, 2007).

3.1.5. Yapışma teorileri

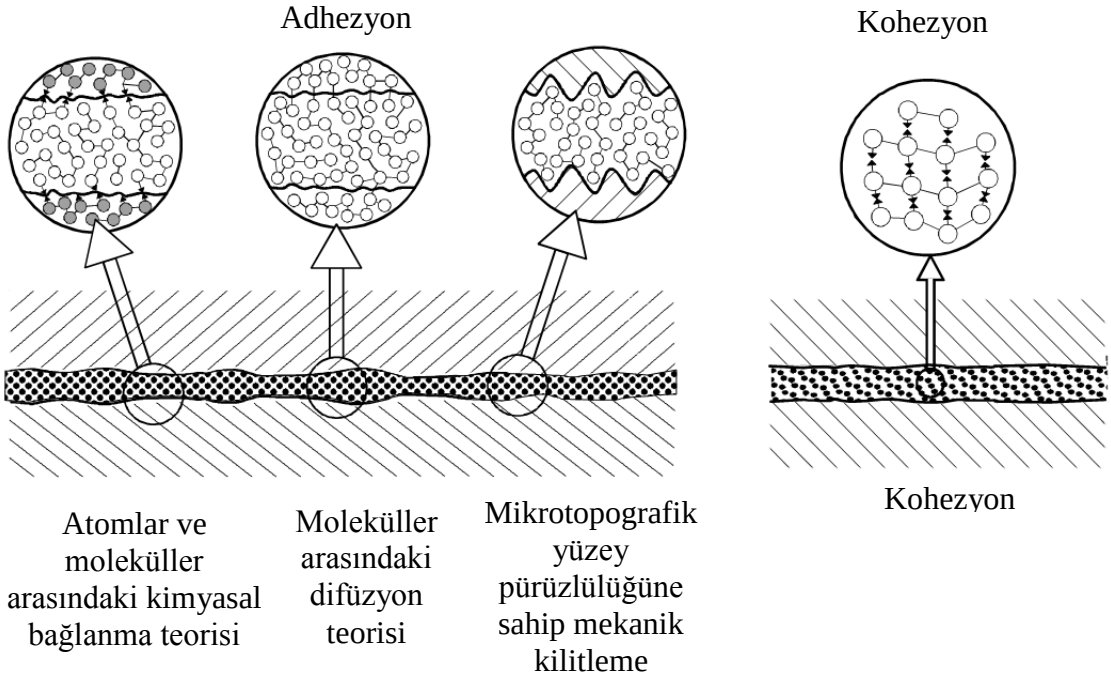
Geleneksel olarak mekanik kilitlenme, elektrostatik, difüzyon ve fiziksel adsorbsiyon teorileri, yapışma mekanizmalarını tanımlamak için doğru varsayılmıştır. Son zamanlardaki yapıştırıcı bağlama mekanizma teorileri ise Çizelge 3.1.' de gösterilmiştir. Bu teoriler, atomik, moleküler, mikroskobik ve makroskobik seviyelerdeki kavramları esas almışlardır. Burada bu teorilerden en kapsamlı olan altı teoriden bahsedilecektir. Bu teorilerin hiç birisi tek başına yapışma mekanizmasının bütün yönlerini açıklayamaz. Fakat bağlantının bir özelliğini açıklamak için bir ya da birkaç teoriden faydalanılabilir.

Çizelge 3.1. Yapışma teorileri

Geleneksel	Yeni	Ölçek
Mekanik kilitlenme	Mekanik kilitlenme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Fiziksel adsorbsiyon	Yüzey ıslatma	Moleküler/Atomik
	Zayıf sınır tabaka	Moleküler
	Kimyasal bağlanma	Atomik

3.1.5.1. Mekanik kilitlenme teorisi

McBain ve Hopkins (1925), bir katı yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı sürüldüğü zaman, yapıştırıcının gözeneklere gireceğini, mekanik tutunma olacağını ve dolayısıyla iyi bir yapışma meydana geleceğini söylemiştir. Mekanik tutunma, yapıştırıcının, malzeme yüzeyinden kalkmasını önler. Sun ve ark. (1980), yapıştırıcının mekanik tutunma ile yapışmasını artıran bazı alüminyum malzemelerin yüzey işlemlerinin, aslında yüzeyde gözenekleri arttırdığını göstermiştir. Gerçekte malzeme yüzeylerini pürüzlendirmek ve yüzeydeki yağ, pas ve benzeri kirleri temizlemek yüzey alanını arttırır ve yapıştırıcının yüzeye daha iyi yayılmasını ve ıslatmasını sağlar (Jennings, 1972). Şekil 3.4.'de mikrotopografik yüzey pürüzlülüğüne sahip mekanik kilitleme gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Yapışma teorileri (Fauner ve Endlich, 1979)

Son yapılan çalışmalarda ise yapışma, yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan ilişkili olduğu anlamına gelmektedir. Kumlama gibi mekanik veya anotlama gibi kimyasal pürüzlendirme, farklı yüzey pürüzlülük değerleri ve aynı zamanda farklı özellikler de oluşturur. Bu özelliklerin boyutu ve şekli yapıştırılan malzemeden yapıştırıcının ayrılmasını engelleyen tırtıklı bir yol sağlayarak yapışma üzerinde bir etkisi vardır (Fisher, 2005). Yüzey pürüzlülüğü, daha büyük yüzey alanı ve yüzeylerde oluşan mikro boşlukların yapıştırıcı malzeme ile kilitlenmesinden (kama etkisi) dolayı güçlü yapışma sağlar.

Literatürde, metal yapışma yüzeyleri için en uygun yüzey pürüzlülüğü olarak Ra= 1.5-2.5 μm alınması gerektiği belirtilmektedir. Pürüzsüz yüzeylerde, yapıştırıcının tutunma olasılığı azaldığı için mukavemet değerleri azalmaktadır. Çok kaba işlenmiş yüzeylerde de (Ra> 5 μm) tam ıslanma ve bağlantıda aşırı boşluklar oluşturacağından dayanımı düşürür (Şekercioğlu ve Özenç, 2012).

2.1.5.2. Elektrostatik teorisi

Bu teori, yapışmanın yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki elektrostatik etkilerinden dolayı gerçekleştiğini önermektedir (Mittal, 1979; Possart, 1988). Elektron

transferi, farklı elektronik bant yapıların bir sonucu olarak yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arsında olması beklenilir. Böylece elektriksel çift tabaka şeklinde elektrostatik kuvvetler yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin ara yüzeyinde oluşturulmasıdır (Allen, 2003). Bu kuvvetlerin ayrılması için direnç oluşturmak gerekmektedir. Bu teori, yapıştırıcının yüzeyden soyulduğu zaman elektrik boşalması gerçeği ile destek kazanıyor.

Elektrostatik mekanizma polimer-metal yapışma bağları için makul bir açıklamadır. Yapışma metalik olmayan sistemlerde elektronik mekanizmanın katkısı hesaplanmış ve kimyasal bağlanma ile karşılaştırıldığında zaman küçük olduğu bulunmuştur (Parker ve ark., 2002). Ayrıca kırılma deneyleri esnasında viskoelastik veya plastik olarak yayılan enerji, yapıştırıcının dayanımın ölçülmesinde önemli bir rol oynar, ancak yapışma, elektrostatik teorisinde kavramsal olarak dâhil değildir. Sonuç olarak, bu kopma işlemleri sırasında sık sık gözlenen elektrostatik olaylar oldukça yüksek yapışma dayanımına neden olduğu sonucuna varılmıştır (Pizzi ve Mittal, 2003).

3.1.5.3. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, biraz mekanik tutunma teorisine benzemektedir. Fakat difüzyon teorisi moleküler seviyededir. Voyutskii (1963) tarafından geliştirilen difüzyon teorisi iki polimer malzemenin birbirleri içindeki uzun zincir moleküllerinin yapıştırılacak malzeme içine kısmen veya tamamen nüfuz etmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 3.4.). Yapıştırıcı moleküllerinin yapışacak malzeme içine difüzyon derecesi, yapıştırılacak malzemenin serbest hacmine ve yapıştırıcı ile yapıştırılacak malzemenin moleküler uygunluğuna bağlıdır. Moleküler uygunluk ise yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin içindeki farklı polimerlerde mevcut olan fonksiyonel gruplar arasındaki çekimdir (Carpenter, 1999). Difüzyon teorisi, ara yüzey boyunca polimer zincirlerinin karşılıklı difüzyonu neticesinde oluşan adhezyonu ifade etmektedir.

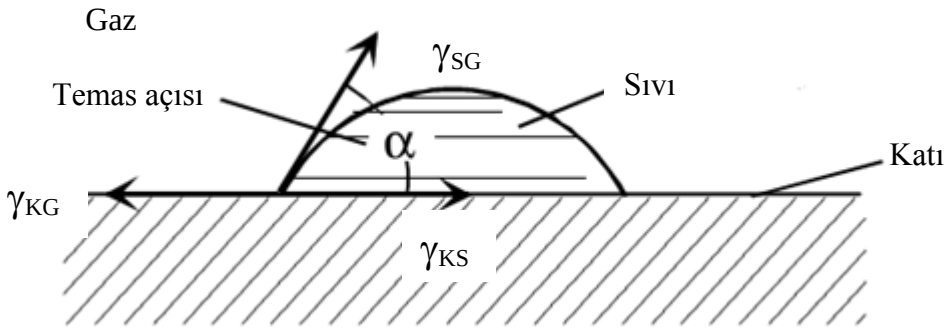
3.1.5.4. Yüzey ıslatma teorisi

Yapışmanın termodinamik modeli (Adsorsiyon veya yüzey ıslatma teorisi), kesinlikle şu anda yapışma bilimde en çok kullanılan yaklaşımdır (Sharpe ve Schonhorn, 1964). Islatma teorisi, çok yakın bir temasın gerçekleşmesi şartıyla, bir ara yüzeyinde etkili olan atomlar ve moleküler arası kuvvetleri içermektedir. Islatma teorisi

iki yüzeyin birbiri ile angstron düzeyinde temas ettiğinde, aralarında moleküler arası kuvvetlerin var olduğunu ifade etmektedir (Green ve ark., 1999). En yaygın ara yüzey kuvvetleri, Van der Waals ve Lewis asit-baz etkileşimi sonucundan oluşmaktadır. Genel olarak bu kuvvetlerin büyüklüğü, hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzemenin serbest yüzey enerjisi gibi temel termodinamik nicelikleri ile ilişkilidir. Bu çekim, hem yapıştırıcının yüzeyi ıslatması hem de katılaşma işlemi esnasında oluşur ve çok kuvvetli bağlar ortaya çıkarır.

Islatma ölçütleri, yüzey ve ara yüzey serbest enerjileri nicel olarak tanımlanır. Bir sıvı yüzeye damlatıldığı zaman yüzeyle sıvı arasında bir temas açısı oluşur. Statik bir sistemde temas açısı ölçülebilir. Şekil 3.5.'de katı yüzey homojen, pürüzsüz, düzlemsel ve sert ideal bir sistemde temas açısını göstermektedir. Ara yüzey gerilimleri γ olarak tanımlanan üç faz kesiştiği noktada denge değerleri temsil eder. K, S ve G indisleri sırasıyla katı, sıvı ve gaz fazları belirtmektedir. Young eşitliği (Young, 1805; Gibbs, 1961) yüzey serbest enerji (γ_{KG}) ve temas açısı (α), üç fazlı ıslatma noktası arasındaki ilişkiyi açıklar.

$$\gamma_{KG} = \gamma_{KS} + \gamma_{SG}.\cos\alpha \qquad (3.1)$$

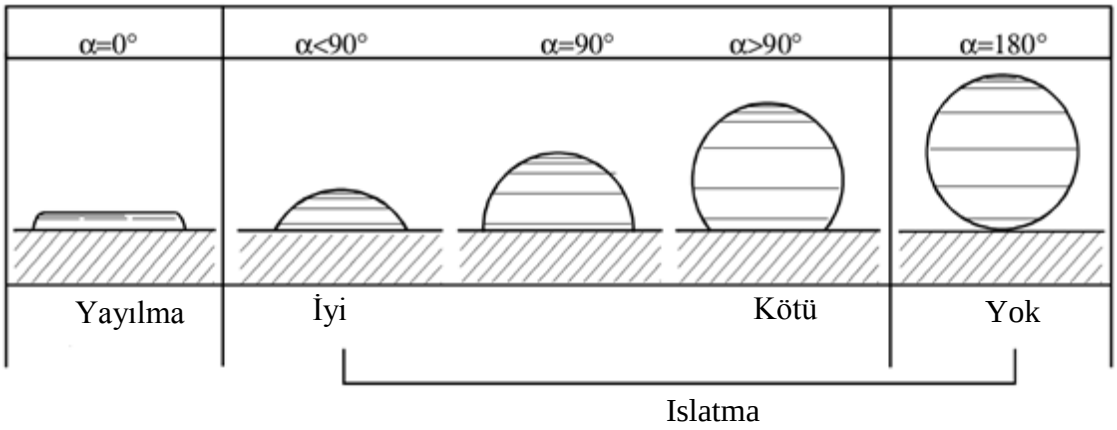


Şekil 3.5. Bir sıvı yüzeyi ıslattığı zaman meydana gelen etkileşimin şematik resmi.

Yapışma işi (W_A), Young-Dupre eşitliğinde (Gutowski, 1991) olduğu gibi sıvının katı yüzeyi ıslatması gerekir. Yapışma işi (W_A), katı ve sıvı fazların yüzey serbest enerjisi toplamı arasındaki fark olarak tanımlanır.

$$W_A = \gamma_{KG} + \gamma_{SG} - \gamma_{KS} \qquad (3.2)$$

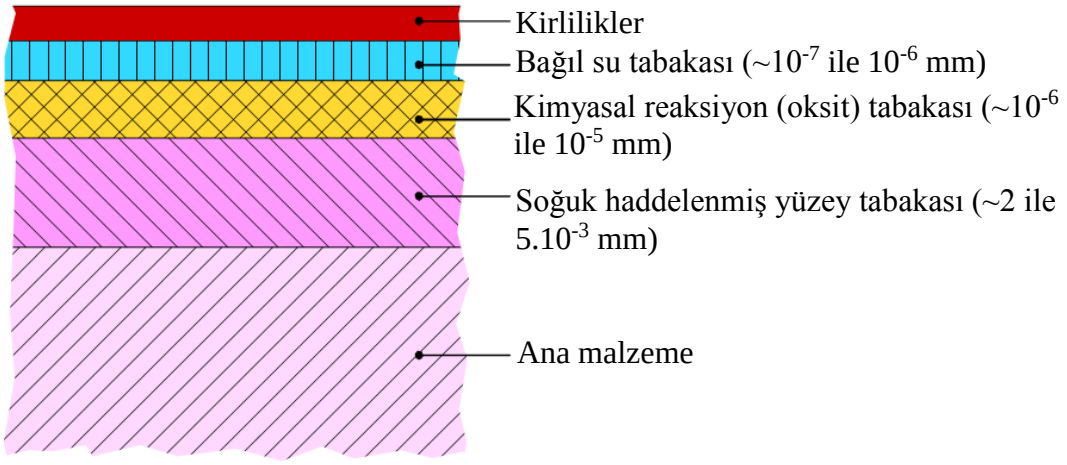
İyi bir ıslatma oluşabilmesi için yüzeyin serbest yüzey enerjisi sıvının yüzey enerjisinden büyük olmalıdır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Islatma açı ve ıslatma davranışları arasındaki ilişki

3.1.5.5. Zayıf sınır tabaka teorisi

Zayıf sınır tabaka teorisi, yapışmanın bir mekanizma değildir, ama birçok durumda yapışmanın eksikliğini açıklamayı sağlayan bir teoridir. Bu teori ilk olarak Bikerman (1967) tarafından ya kohezyon ya da zayıf sınır tabakası (adhezyon) kırılmasına yol açtığını belirtmiştir. Zayıf sınır tabakası, yapıştırıcı, yapıştırılacak malzemeler (oksit tabakalar), çevre (yağ, kir, vb.) ve bu faktörlerin bir kombinasyonundan kaynaklanabilir. Bu tabakalardan herhangi biri yapıştırılan malzemenin yüzeyinde mevcut ise, bağlantıda bu katman ile alt tabaka arasındaki yapışma başarısız olur. Yani yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde zayıf sınır tabakası oluşur. Yapıştırıcı bağlantılarında yapıştırıcı ve ara yüzey tabakasında oluşan kompozit sistemlerin dayanımı, bağlantıdaki bileşenlerinin hem geometrik tasarımına hem de yükleme tipine bağlıdır. Şekil 3.7.'de yapıştırılan malzemenin yüzeyinde oluşan tabakaların şematik resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Yapıştırılan malzemenin yüzeyinde oluşan tabakaların şematik resmi (Dorn ve Salem, 1993)

Polietilen ve metal oksitler doğal olarak, zayıf sınır katlarının içeren iki malzeme örnekleridir. Polimer boyunca düz bir şekilde dağıtılan polietilen, zayıf ve düşük molekül ağırlıklı bileşene sahiptir. Bu zayıf sınır tabakası, ara yüzde mevcut olur ve polietilen, yapıştırıcı veya bir yapıştırılan malzeme olarak kullanıldığı zaman düşük gerilime oluşmasına katkıda bulunur. Bazı metal oksitler, zayıf olarak ana metallere bağlıdırlar. Bu malzemelerden yapılmış yapıştırıcı bağlantıların hatası oksidin içerisinde kohezif oluşur. Alüminyum oksit gibi bazı oksitler çok güçlüdür ve önemli ölçüde bağlantının dayanımını bozmamaktadır. Polietilen ve metal oksitler gibi zayıf sınır tabakalar, çeşitli yüzey tedavileriyle kaldırılabilir veya güçlendirilebilir. Genellikle hava gibi bağlama ortamında oluşan, zayıf sınır tabakaları çok yaygındır.

Bu tür ara fazların varlığı çok bileşenli malzemelerin dayanımını kesinlikle değiştirebilir ve bu tabakaların özellikleri yapışma ölçüm verilerinin analizinde göz ardı edilmemesi gereken olduğu açıktır. Performans tahmini sağlayan yapışmayı tam olarak anlamamız, bu sınır tabakaların potansiyel oluşumunu hesaba almamız gerekir.

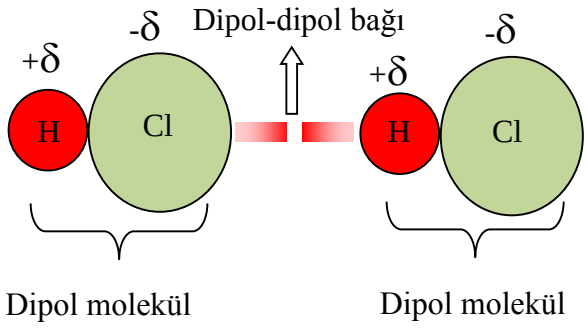
3.1.5.6. Kimyasal bağlanma teorisi

Bu mekanizma, yüzeye kimyasal kuvvetlerin bir yapışma bağın oluşumuna dayanır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında oluşan kovalent ve iyonik bağlar (birincil kuvvetler), dispersiyon çekim kuvvetlerinden (ikincil kuvvetler; Van der Waals gibi) daha güçlüdür. Birincil kuvvetlerin bağ enerjileri 60-1050 KJ/mol arasında değişirken ikincil kuvvetlerin bağ enerjileri 0.08-40 KJ/mol arasında değişir. Belirli bir yapıştırıcının bağ etkileşiminin gerçek yapısı, ara yüzün kimyasal bileşimine bağlıdır.

İkincil değerlilik bağı, hidrojen ve Van der Waals bağları ile örneklenen zayıf fiziksel kuvvetler dayanmaktadır. Bu kuvvetler poli olefinler gibi polar olmayan malzemelerden karboksilik asit grupları gibi polar grupları içeren malzemelerde daha fazla yaygındır. Aynı zamanda yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeleri bir arada tutan etkileşimler mekanik kilitleme, difüzyon veya elektrostatik mekanizmalardan katkılar alınabilir.

Moleküller arası etkileşimlerde kullanılan tanımlar aşağıda listelenmiştir:

- Dipol (polar molekül); yük dağılımı olan bir molekül (HCl gibi) ile temsil edilebilir (Şekil 3.8.).
- Dipol-dipol kuvvetler; pozitif ve negatif yüklü polar moleküller olup diğer polar moleküllerin eğiliminden sonuçlanan kuvvetlerdir. Bu kuvvetler Van-der Waals'e göre daha kuvvetlidir (Şekil 3.8.).
- London dağılma kuvvetleri; çekirdek hareketi sırasında elektronların farklı pozisyonları nedeniyle meydana gelen anlık dipollerden (uyarılan dipoller) kaynaklanan moleküller arası kuvvetlerdir.
- Hidrojen bağları; dipol-dipol kuvvetlerin özel bir tipi olup, polar bir molekülün pozitif yüklü hidrojen atomları ile diğer molekülün elektronegatif atomu (en yaygın olan F, O, N veya S) arasındaki güçlü çekimleri ifade etmektedir.
- Polarizasyon; bir atom veya molekülün elektron bulutu bozulması olarak tanımlanır. Genel olarak, kutuplanabilirlik bir atomun büyüklüğü ve bir atom üzerindeki elektron sayısı ile artar. London dağılım kuvvetlerinin önemi atom boyutu ve elektron sayısı ile artar.



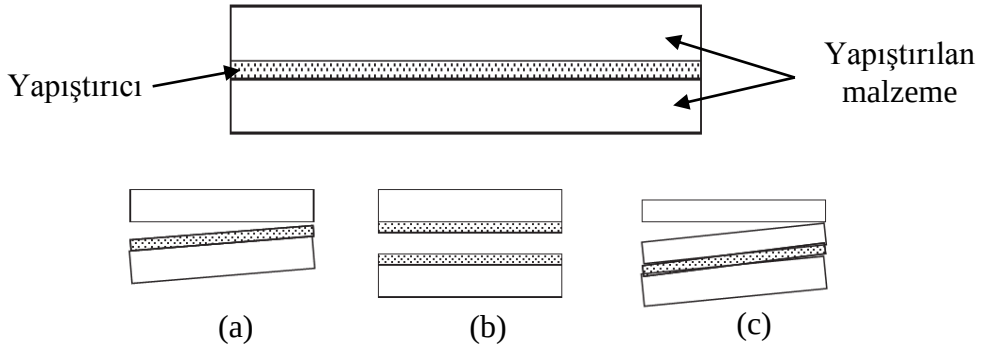
Şekil 3.8. Dipol molekülü ve dipol-dipol bağı

Kimyasal bağlar ara yüzey boyunca oluşturulabilir ve termoset kaplamalar ve çapraz bağlantılı yapıştırıcılarda oluşması muhtemeldir. Genellikle bu tip bağ en güçlü ve en dayanıklı olanıdır. Ancak karşılıklı olarak reaktif kimyasal grup olmasını gerektirir.

Yaygın olarak organosilanlar, reçine ve cam elyaf takviyeli plastik malzemeler arasındaki yapışmayı geliştirmek için cam elyaf üzerinde astar (primer) olarak kullanılır (Plueddemann, 1983). Ayrıca, metallerin ve plastiklerin reçinelere yapışmasını geliştirmek için primerler veya tamamlayıcı karışımlar olarak kullanılmaktadır. Esasen silanol grupları, daha sonra cam yüzeyindeki silanol gruplarıyla ya da muhtemelen diğer metal oksit gruplarıyla güçlü bir eter bağı oluşturmak için uygulama esnasında üretilir (Ebnesajjad, 2010).

3.1.6. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar mekanizmaları

Temel hasar modelinin tayini bir yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasını sağlar. Bir grup malzeme veya parçanın yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak üç tip hasar modeli ile karşılaşılır (Şekil 3.9.).



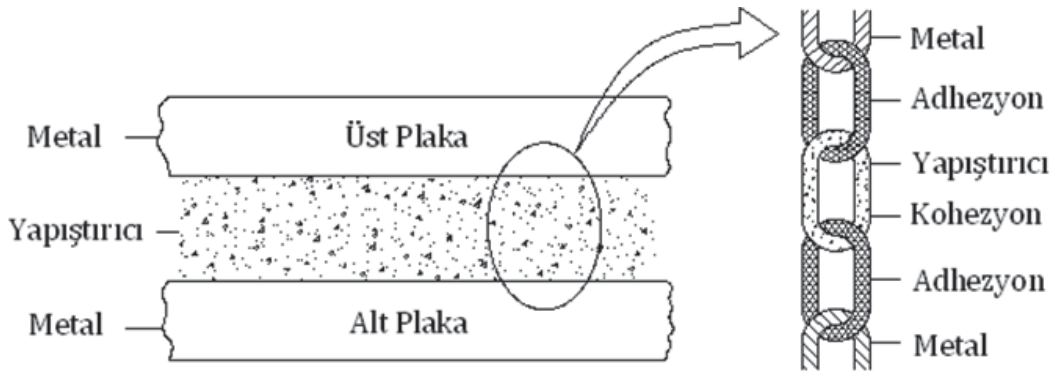
Şekil 3.9. Yapıştırma bağlantılarında hasar modeli; (a) adhezyon hasarı (b) kohezyon hasarı (c) yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı

Yapıştırıcı bağlantılarında adhezyon veya kohezyon hataları olabilir. Adhezyon hasarı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın oluştuğu kopma olayıdır. Çünkü yapışanın en zayıf olduğu noktalar bu temas yüzeyidir. Eğer yapıştırıcı, mekanik olarak zımparalanmış yüzeylere tam olarak ıslatmazsa,

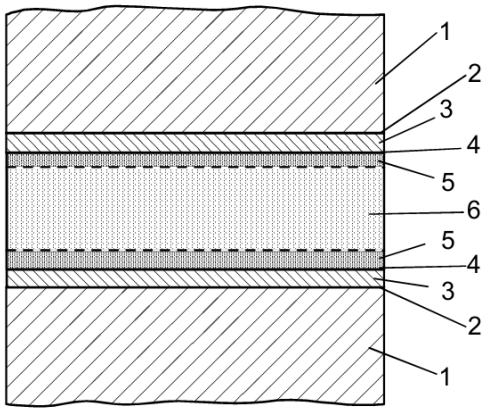
moleküller arası kuvvetler oldukça zayıflar. Bu nedenle yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Her iki durumda da kuvveti arttırmak için yüzeye uygun ön işlem yapılarak arttırılabilir.

Kohezyon hasarı, bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın oluştuğu kopma şeklidir. Moleküler arası çekim ve polimer moleküllerin kendi arasında kenetlenmesi kohezyon kuvvetlerine etki eder. Kopma işlemi sonucunda artık yapıştırıcı genellikle her iki yüzeyde de bulunur.

Yapıştırılan malzeme yapıştırıcıdan önce koptuğu zaman, yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı olarak bilinir. Yapıştırılan malzemenin kendi atomları arasında meydana gelebilecek hasar şeklidir. Yapıştırıcının atomları arasındaki bağ kuvvetinin malzemenin atomları arasındaki bağ kuvvetlerinden daha büyük olduğu zaman ortaya çıkar. Yapıştırıcının veya yapıştırılan malzemelerin içindeki kohezyon hasar mekanizmasının ideal tipidir. Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen adhezyon ve kohezyon modeli ile bir yapıştırıcı bağlantının yapısı Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilmiştir. Genellikle yapıştırıcı ile bağlanmış bağlantılarda bu hasar tiplerinin iki veya daha çok kombinasyonları bir arada görülür (Temiz, 2003).



Şekil 3.10. Metal-metal yapıştırma bağlantının zincir modelinin şematik görünüşü (Davis, 2002)



1- Yapıştırılacak malzeme

2- Yapıştırılacak malzemenin alt yüzeyi sınırı (Ana malzemenin oksit tabakası gibi…)

3- Yapıştırılacak malzemenin alt yüzey (oksit) tabakası

4- Yapıştırılacak malzemenin alt yüzeyi ile yapıştırıcının sınır tabakası

5- Yapıştırıcı tabakanın sınırındaki ara yüzü

6- Yapıştırıcının kohezyon tabakası

Şekil 3.11. Teorik yapıştırma sisteminde oluşan tabakaların şematik görünüşü (Dorn ve Salem, 1993)

3.1.7. Polimerlerin bozulması

3.1.7.1. Camsı geçiş sıcaklığı

Polimer malzemelerde en önemli sıcaklık, camsı geçiş sıcaklığı olup genellikle T_g ile gösterilir. Bu geçiş, polimerlere ait karakteristik bir özelliktir ve polimerler; T_g altındaki sıcaklıklarda cam gibi sert ve kırılgandır. Tg üzerinde ise esnek, bükülebilir ve zor kırılır bir yapıya geçer. Çünkü polimer malzemeler için, bu sıcaklığın altına inildiği zaman, polimer zincirlerinde hareketliliğin yavaşladığı ve böylece polimer zincirin hareketsiz hale geldiği bir sıcaklıktır. Mekanik özelliklerde, T_g'nin altında veya üstünde olmasıyla önemli değişikler olur. Polimer lineer ve çok düzenli ise T_g'nin üzerinde kristal yapıya dönüşür ve gevrekleşir. Fakat polimer kristal yapıda değil ise T_g'nin üzerinde elastik (lastik) formuna girer (Temiz, 2003; Kumar, 2010).

Yapısal yapıştırıcılar rijit yapılarda kullanılır ve mümkün olduğu kadar elastisite modüllerinin yüksek olması istenir. Bu da yapıştırıcıların T_g'nin altındaki bir sıcaklık ortamında kullanılmasını gerektirir. T_g Poli(stiren), Poli(metilmetakrilat) gibi polimerlerde oda sıcaklığının oldukça üzerinde gözlenir. %100 kristallenmiş bir polimerde T_g sıcaklığı gözlenemez, T_g, amorf yapıya ait bir özelliktir. Bu özellikten yararlanılarak, polimerin kristal yapısı hakkında bilgi edinilir. Ayrıca karakteristik T_g değerleri bize polimer tanımlanmasında ışık tutar (Sırımoğlu ve ark.).

Camsı geçiş sıcaklığını etkileyen faktörler; dallanma ve çapraz bağlanmadır. Dallanma, polimerin ana zincirinde oluşur. Dallanma sonucu moleküller birbirine kenetlenir, hareketleri zorlaşır, hacim artar, yoğunluk ve T_g azalır. Çapraz bağlanma,

komşu zincirler çapraz bağ görevi yapan bir molekül veya atom yardımıyla bağlanır. Böylece zincirlerin kayma hareketleri önlenir. Çapraz bağlanmanın olması için zincirde polimerizasyon sonunda doymamış C atomlarının bulunması gerekir ve bağlama bu noktalarda gerçekleşir (Aran, 2008).

3.1.7. 2. Oksidatif bozunma

Polimer numunesi; ergime noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta (ancak termal bozunma sıcaklığının altında) hava veya oksijen atmosferinde bekletildiğinde okside olarak bozunur. Her polimerin belirli bir sıcaklıkta oksijene dayanım süresi vardır. Polimerin, belirli bir sıcaklıkta oksijene maruz kalmasından itibaren okside olmaya başladığı ana kadar geçen süre oksidatif kararlılık süresi olarak belirlenir. Bu değer, plastik ambalaj hammadde ve son ürünlerinin tanınmasında ve dayanıklılıklarının karşılaştırılmasında yol göstericidir (Sırımoğlu ve ark.).

Oksidatif bozunma reaksiyonu ışık, ısı ve su ile etkilenir. Havanın oksijenine en az dayanıklı polimerler, yapılarında π bağları bulunduran polimerlerdir. Bu reaksiyon ışık etkisi ile hızlandıklarından, bunların içine anti oksidant veya UV ışınlarını absorbe eden bileşikler konularak oksidatif bozunması önlenmiş olur (Bağda, 1976).

3.1.7.3. Termal bozunma

Termik bozunma genellikle oksidatif bozunma ile beraber oluşur. Artan sıcaklıkla birlikte polimer zinciri üzerinde önce en kararsız gruplardan başlamak üzere kopmalar olur. Kopan grupların oluşma entalpisine bağlı olarak bozunma ekzotermik veya endotermik olur.

3.1.7.4. Hidroliz

Hidroliz, en çok oluşan bozunma şeklidir. Poli esterler, poli amidler, gibi hetero atomlar üzerinden bağlı temel moleküllerin oluşturdukları polimerlerde hidroliz reaksiyonu oluşur. Ortamda sudan başka asit veya baz bulunduğunda hidroliz reaksiyon hızı artar.

3.1.7.5. Fiziksel yaşlanma

Bir polimer, T_g'nin üzerindeki sünek halden T_g'nin altındaki bir sıcaklığa soğutulduğu zaman hemen termodinamik dengeye ulaşamaz (Kovacs ve ark., 1963). Soğuma halindeki bir polimerin karakteristiği yapıda aşırı sıkışmış serbest hacimler şeklindedir. Fiziksel yaşlanma, makro moleküllerin serbest hacimlerin denge haline gelmesi için kademeli olarak bağlarını değiştiren ve T_g'nin altında oluşan bir işlemdir.

Serbest hacim teorisi, dengeye gelmek için serbest hacim azalınca zincir parçalarının hareketliliği engellenir ve yapı daha da sertleşir. Fiziksel yaşlanma, bir camsı hal karakteristiğidir ve bütün polimer malzemelerde görülür (Struik, 1978). Polimer malzemeler, hacimsel dengeye ulaşıncaya kadar devam eder. Denge haline yaklaşma şekline göre polimerlerin mekanik özellikleri farklılık gösterir (Hastie ve Morris, 1992).

3.1.7.6. Kimyasal yaşlanma

Kimyasal yaşlanma, bir ısıl tersimez işlemi olup, kimyasal bozunma da denir. Termoplastik polimerlerin oksidasyonu esnasında oluşan kimyasal değişikler, esas ve yan zincirlerdeki kimyasal bağların kırılması ve moleküllerin ağırlığının azalması ile karakterize edilebilir. Çok yüksek sıcaklıklarda lineer polimerlerin ayrışmasına depolimerisazyon denir (Emanuel ve Buchachenko, 1987).

3.1.7.7. Kristalizasyon piki

Herhangi bir polimer molekülünün veya küçük moleküller topluluğunun sık istiflenmesinin gözlendiği sıcaklıktır. Kristal yapı amorf yapıya göre daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Küçük moleküller için bu ergime sıcaklığı ile aynıdır ve sabit sıcaklıkta olur. Polimerlerde ise bir sıcaklık aralığında gözlenir. Ergime sıcaklığı ile T_g arasındadır. Termogramda egzotermik pik olarak gözlenir. Kristalizasyon noktası ve pik alanı ile hesaplanan kristalizasyon enerjisi malzeme tanımlanmasında önemlidir.

3.1.7.8. Ergime sıcaklığı

Ergime, kristalin yapıya ait endotermik bir faz geçişidir. Isı absorblanması ile moleküller arasındaki kohezyon kuvvetler etkisini yitirir ve moleküller birbirlerinin üzerinden kaymaya başlar. Bu olay küçük moleküllü bileşiklerde sabit sıcaklıklarda gözlenirken, polimerlerde bir sıcaklık aralığında gözlenir. Bunun nedeni ise zincirler arasındaki etkileşimler, dolanmalar ve zincirlerin farklı uzunluklarda olmasıdır. Poli(etilen) için artan sıcaklıkla bağıl hacımdaki artış bir sıcaklık aralığında gözlenmektedir. Ergime piki, termogramda endotermik olarak belirlenir. Ergime noktası ve pik alanı ile hesaplanan ergime enerjisi malzeme tanımlanmasında önemlidir.

3.1.8. Yapıştırıcılara ilave edilen katkı maddeleri

Yapıştırıcılar organik ve inorganik esaslı maddelerin karışımından meydana gelebilirler. Polimerler arasında çok az sayıdaki polimer, yalnız başına yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Burada asıl amaç yapıştırıcıların atmosferik şartlara, yüke, düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanım ve tatbik edildiği malzemenin kullanım süreci boyunca kullanılması gibi şartlara bağlıdır. Yapıştırıcı malzemelerinde ilave edilen katkı maddeleri (Kaya, 2004);

- Seyrelticiler
- Katalizörler ve sertleştiriciler
- Hızlandırıcı ve yavaşlatıcılar
- Modifiye ediciler (dolgular, yumuşatıcılar, incelticiler, vb.)

3.1.8.1. Seyrelticiler

Seyrelticiler yapıştırıcıların yoğunluğunu ve viskozitesini azaltmada kullanılır. Böylece yapıştırıcıların düzgün ve ince tabaka halinde uygulanması ve yapıştırıcıların içine dolgu ilave etmek mümkün olur. Bazı durumlarda viskozite kontrolü için sıvı reçineler de kullanılır.

3.1.8.2. Katalizörler ve sertleştiriciler

Yapıştırıcının katılaşmasını hızlandıran elamanlardır. Katılaştırıcılar (dondurucular ve sertleştiriciler) monomerik, polimerik veya bileşimleri üzerine oluşturulmuş türlere sahiptirler. Etkisi kimyasal olarak ana elamanla birleşmesi sonucu ortaya çıkar. Katılaştırıcı / ana elaman oranı yapıştırıcıların fiziksel özelliklerini belirler. Mesela poliamid, epoksi reçinelerle birleşerek katılaşmayı hızlandırır ve belirli oranlarda reçinelere ilave edilir. Katılaştırıcılar sıvı veya toz halinde olabilirler. Katalizörler ise kendileri değişmezler ve aynı gaye ile termoset reçineler için kullanılırlar. Asitler, bazlar, tuzlar, kükürt bileşimleri ve peroksitler emniyetle kullanılan katalizörlerdir. Katılaşmayı hızlandırmak için gereken miktar katılaştırıcıların tersine daha azdır ama kritiktir. Eğer ana elaman olarak kullanılan reçineler az veya çok katalize edilirlerse bağlantı mukavemetleri zayıf olur.

3.1.8.3. Hızlandırıcı ve yavaşlatıcılar

Bu elemanlar katılaşma hızını kontrol ederler. Hızlandırıcılar katılaşma hızını artırırlar (katalizörler de aynı işi görür ama kimyasal kimliğini değiştirmez). Bu gibi bileşiklerin çoğu yıllar içinde geliştirilmiştir. Fakat en yaygın olarak kullanılan aromatik aminler, ortobenzoik sulfimide (sakarin) ve asetil fenil hidrazin bulunmaktadır. Yavaşlatıcılar katılaşma hızını azaltırlar ve yapıştırıcının depolama ve çalışma ömrünü artırırlar.

3.1.8.4. Modifiye ediciler

Modifiye ediciler, yapıştırıcı özelliklerini değiştiren, kimyasal inert elemanlardır. Örnek olarak ise doldurucular (filler), yumuşatıcı, genişletici, dengeleyici ve ısıtma elamanı verilebilir. Bunların her biri belli gayeler için kullanılır.

- Doldurucular, yapıştırıcı performansını ve mukavemetini geliştirmek için kullanılır. Kendi başına yapıştırıcı özelliği olmayan toz halindeki inorganik veya organik malzemelerdir.
- Yumuşatıcılar; yapıştırıcı esnekliğini artırmak ve plastik şekil değiştirme özelliğini geliştirmek için kullanılırlar. Termoplastik reçinelerin moleküler akışkanlığını artırmak için ekseriyetle yüksek kaynama noktasına sahip organik çözücüler kullanılır.

• Genişleticiler; birim yapışma alanı için gereken ana elamanın (yapıştırma maddesi) miktarını azaltırlar. Yapıştırma maddesinin boşluk doldurma(gap-filling) özelliklerini gösterirler. Kimyasal asal elamanlardır.

• Dengeleyiciler; yapıştırıcının şiddetli çalışma şartlarına karşı direncini artırmak için kullanılırlar ve yapıştırıcı özelliklerinde meydana gelecek değişiklikleri ya en aza indirirler yâda tamamen önlerler.

• Islatma elamanları; yapıştırıcının malzeme yüzeyini rahatça ıslatıp yayılmalarını sağlar (Kayacan, 1988).

3.1.9. Yapıştırmayı etkileyen faktörler

Bazı fiziki ve kimyasal faktörlerin etkisiyle yapıştırıcının içinde bulunan polimer malzemeler, yapışmayı sağlamaktadır. Yapışmanın gerçekleşmesinde bu faktörlerden biri veya birden fazlası etkili olabilmektedir. Bir yapıştırıcı için etkili olan faktör diğeri için geçerli olmayabilir. Bu sebeple, yapıştırıcıların yapıştırma fonksiyonlarını yerine getirmesinde yapışmayı sağlayan polimer malzemeler kadar yapışmadan sorumlu olan fiziksel ve kimyasal faktörlerde önemlidir. Yapıştırmayı etkileyen faktörler (Kaya, 2004);

- Sıcaklık
- Basınç
- Zaman
- Katalizör
- Oksijen
- Çözücü
- Nem ve su
- Ultraviyole ışınlar

3.1.10. Yüzey hazırlama

İyi yapışma özelliklerinin elde edilmesi için, birinci şart yapıştırılan malzemenin yeterli yüzey özelliklerinin mevcut olmasıdır. Islatma teorisinde belirtildiği gibi, alt-tabakanın yüzey serbest enerjisi yapıştırıcının yüzey geriliminden daha yüksek olmalıdır. Bazı durumlarda, özellikle yapıştırılacak malzemeler polimerler ya da

polimer matris kompozitler olduğu zaman, bu yüzeylerin yüzey serbest enerjisi geliştirmek için değiştirilmesi gerekir. Yüzeylerin homojenleştirmek, belirli kimyasal grupları oluşturmak, yüzey pürüzlülüğü arttırmak ya da zayıf sınır katmanları kaldırmak gibi sonuçların tekrarlana bilirliğini sağlamak için yapıştırma öncesi yüzey işlemlerini uygulamak diğer nedenlerdir.

Mekanik olarak (kumlama, zımparalama), kimyasal olarak (eloksal, asitle dağlama) veya enerjik olarak (plazma, lazer) gibi yüzey işlemlerinin birçok türleri vardır. Her durumda, en uygun yüzey işlemleri, yapıştırılacak malzemenin malzemesi, şekil ve boyut, yapıştırıcı ve üretim ile ilgili diğer koşulları dikkate alınarak seçilmelidir (Kumar, 2010).

Etkili sulu sistemler geliştirilmesine rağmen, metal yüzeyleri örneğin trikloretan, aseton, izopropilen, vb. organik bir çözücüyle buharlı yağ giderme ile temizlenir. Bu işlem, metal yüzeyi pürüzlendirilerek yapıştırıcının temas yüzey alanını artırmak için kumlama veya zımparalama gibi yöntemler takip edilir. Kimyasal dağlama metal yüzeyinden zayıf bağlı oksitler kaldırır ve yüzeye güçlü olarak bağlanmış bir oksit oluşturur. Başka yararlı bir adım yüzeyinin ıslatıla bilirliğini geliştirmek ve oksidasyondan korumak için malzemenin yüzeyinde astar oluşturur (Ebnesajjad, 2010).

En çok kullanılan yüzey hazırlama metotları (Snogren, 1974);

- Aşındırma
- Çözücüyle silme
- Buharla yağ giderme
- Ultrasonik buharla yağ giderme
- Dağlama (etching)

3.1.10.1. Aşındırma

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetine yüzey pürüzlülüğün önemli derecede etkisi vardır. Bu etki, malzemenin yüzey alanını arttırarak sağlanır. Böylece yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki kimyasal bağları arttırır.

Kum püskürtme, zımparalama veya taşlama gibi aşındırmada kullanılan yöntemlerdir. Kum püskürtme yönteminde ince ve temiz kum kullanılmalı ve püskürtme için kullanılan hava, kuru ve süzülmüş olmalıdır. Hava basıncı ve tane çeşidi

temizlenecek yüzeyin sertliğine bağlı olarak değişir. Kum püskürtme, en yaygın olarak floropolimer kaplamaların da iyi bir yapışma elde etmek için kullanılan bir yöntemdir.

Kum püskürtme yönteminde yüzey profilleri, 2.5 µm aşan önerilmekte ve sık sık 5.1 ile 6.5 µm arasında kullanılır. Sert yüzeylerde 40 ile 80 numaralı alüminyum oksit kum, genellikle 5.8 ile 7.3 kg/cm^2 arasında değişen basınçlarda havalı tabanca ile kullanılır. Alüminyum ve pirinç malzemelerin yapıştırılmasında genel olarak 5.8 ile 7.3 kg/cm^2 arasında değişen ya da altındaki hava basınçları kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik malzemelerinde maksimum hava basıncı 7.3 kg/cm^2 aşabilir.

Yaygın olarak yüzey pürüzlülüğü ölçen cihaz ile ölçülen profiller sadece profilin derinliğini gösterdiği unutulmamalıdır. Yüzey pürüzlülük cihazları ne tekdüzelik veya kumun kapsama bölgesi ne de doruklarındaki keskinliğini ölçer. Kum püskürtülmüş bütün alan düz bir açı ile bakıldığı zaman metal yüzeyinde parlaklığın eksikliğiyle gösterilir.

Püskürtme için seçilecek aşındırıcılar genellikle alüminyum oksit (alümina), Silisyum karbür, cam bilye, silikon dioksit (kum, silika) ve kuartz gibi kumlama araçlarıdır. Genel olarak alüminyum oksit ve silikon karbid, 16 ile 240 taneli boyut aralığında ve keskin kenarlı tanelidir. Silisyum karbür alüminyum oksitten daha fazla kırılgan son derece sert, keskin taneciklerdir. Silisyum karbür son derece sert malzemelerin kumlanmasında kullanılır ve pahalıdır (Ebnesajjad, 2010).

Zımparalama ise geniş yüzeyleri temizlemek için iyi bir yöntemdir. Literatürde 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 tutunması azaldığı için mukavemet değerleri azalmaktadır. Pürüzlülük değeri Ra>5µm'den büyük olan değerler, ıslatma ve adhezyon olayı sağlanmadığından ve bağlantıdaki boşluklar oluşturacağından aynı durum söz konusudur. Bu pürüzlülüklerde oluşan hava kürleşen yapıştırıcı içinde kalabilir (Şekercioğlu ve Özenç, 2012). Yüzey zımparalama izlerin ise kama etkisi oluşturmak için çekme yönüne dik olarak hazırlanmalıdır.

3.1.10.2. Çözücü ile silme

En çok kullanılan fakat en az başarılı olduğu düşünülen bir metottur. Yüzeyler, üzerine temiz çözücü damlatılmış bir bez veya kâğıtla silinerek temizlenir. Silinen yüzeylerde çizgi oluşması bezin veya çözücünün temiz olmadığını gösterir. Temizleme

işleminde kullanılan çözücüler tolüen, metil etil keton, etilen ve asetondur. Küçük parçalar için çözücü içinde ultrasonik banyoda 30 dakika çalkalama ve daha sonra fırında 80^0C'de 15 dakika kurutma silme işleminde daha etkili olacaktır.

3.1.10.3. Çözücü buharıyla yağ giderme

Buharla yağ giderme, özellikle de sıvı yağlar, gresler ve mumlar, talaşlar ve parçacık maddeler gibi metalik ve metalik olmayan parçalara yapışan çözünür kirlerin çıkarılması için bir çözücü temizlik işlemdir. Buhar yağ gidermenin temel prensibi sıcak çözücü buharları ile yüzeyleri temizlemedir. Çözücü buharının sıcaklığı kaynama noktasındadır ve yaygın olarak trikloroetilen (87^0C) veya perkloroetilen (121^0C) çözücüler kullanılır. Trikloroetilen buharına bir dakika daldırma, metallerin yağının tam olarak temizlenmesi için yeterlidir (Snogren, 1974).

3.1.10.4. Ultrasonik buharla yağ giderme

Buhar yağ gidericiler temiz çözücü durulama tankına yerleştirilmiş ultrasonik dönüştürücüler mevcuttur. Parçalar ilk olarak ya buhar durulamayla ya da kaynamış bir çözücü içine daldırma yoluyla temizlenir. Daha sonra parçalar buhar veya spreyli buhar ile yıkanır ve ardından ultrasonik yıkama içine daldırılır. Ultrasonik yıkama sırasında hızlı çalkalama ve çukurlaşma üretilerek, duyulamayacak kadar hafif yüksek frekanslı ses dalgaları (saniyede 18.000 devirden daha fazla), parçalar çözücüyle iletilir. Parçacıklı malzeme, çözünmeyen maddeler ve yapıştırılacak malzemenin güçlü kirleri, hızlı bir şekilde parçaların yüzeylerden ve kör deliklerden çıkarılır. Optimum temizlik için ultrasonik frekans ve yoğunluğu test ile seçilmelidir. Çıkarılan kir, özellikle temizlenen parçanın türüne ve sistemdeki 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.

3.1.10.5. Dağlama

Yüzeylerin kimyasal çözelti ile temizlenmesi en etkili yüzey temizleme metodudur. Bu temizleme metodu ile yüzeyin kimyasal ve fiziksel özellikleri değişerek ıslatma özelliğinin artmasını ve yüzeyin daha dayanıklı olmasını sağlar. Yapıştırılacak

malzemelerin farklılığına göre değişik kimyasal işlemler uygulanır. Yapıştırılacak yüzeyler hazırlanan asit çözeltisinin içine konulur ve belirli bir süre bekletilir. Çözeltinin sıcaklığı belirtilen sıcaklıklarda muhafaza edilmelidir.

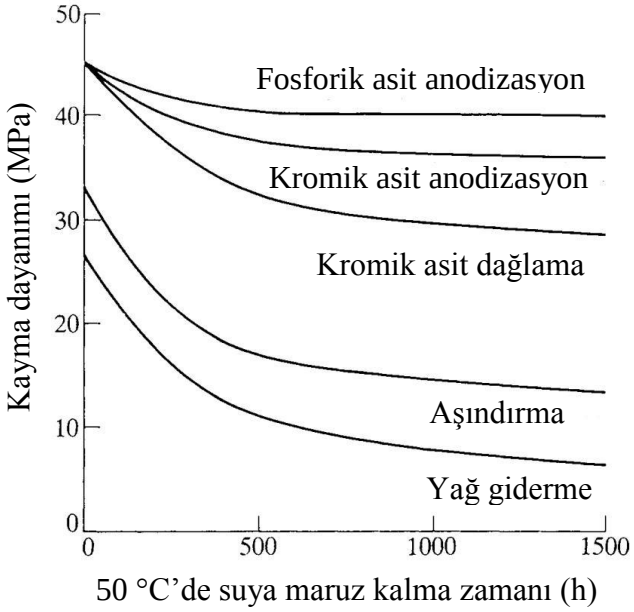
Yapışmadan önce alt plakaların yüzey hazırlığı yapıştırma işleminde en önemli faktörlerden biridir. Ön hazırlık işlemleri, yüzeyleri kolay bir şekilde ıslatılabilen ve güçlü birleştirme sağlamak için tasarlanmıştır. Yapıştırıcı alt tabakayı daha kolay ıslatabilsin diye yapıştırılacak malzemenin yüzeyinden pas, dökülen boya ve organik kirletici maddeler gibi serbest kirlilikler kaldırıldığı zaman yapıştırıcı bağlantının dayanımı önemli ölçüde artar. Tablo 3.2'de çok sayıda metallik yapıştırılan malzemelerin yapıştırıcı bağlantıların dayanımına yüzey hazırlamanın etkisini göstermektedir. Yüzey hazırlama ile sağlanan bağlama dayanımı, kullanılan yapışıcı türüne bağlı olduğu kadar yapıştırılan malzeme tipine bağlıdır.

Çizelge 3.2. Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılarda yüzey hazırlamanın yapıştırılan malzemelere göre etkileri (Petrie, 1975)

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

Yüzey işlemleri, yapıştırmadan önce alt-tabaka yüzeyi kontrol etmek ve korumak ve uygulama yerinde bağlantı montajı yapıldıktan sonra değişikliklerden yüzeyi korur. Bu nedenle, yüzey hazırlıkları başlangıç dayanımının yanı sıra bağlantının kalıcılığını etkiler. Şekil 3.12.'de 50 °C'de su içinde yaşlanmaya tabi tutulmuş

alüminyum alaşımlı epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının performansını yüzey ön işlemlerinin etkisini göstermektedir.



Şekil 3.12. 50 °C'de su içinde yaşlanmaya tabi tutulmuş alüminyum alaşımlı epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının performansını yüzey ön işlemlerinin etkisini (Kinloch, 1987b)

Alüminyum yüzeyler ya dağlama (etching) ya da asit solüsyon içinde anodizasyon yaparak havacılık uygulamalarında yapıştırmak için hazırlanılır. Daha az mukavemet ve dayanıklılık gereksinimleri için mekanik aşındırma yeterlidir. En yaygın olarak kullanılan yüzey hazırlama, en iyi genel bağlanma dayanımı elde etmek için gösterilmiş olan yapıştırılacak malzemenin morfolojisinin mikro-pürüzlüğü neden olur. Dört çeşit yüzey hazırlama Forest Products Laboratory (FPL), P2 dağlama işlemleri, Fosforik Asit Anodizasyon (PAA) ve Kromik Asit Anodizasyon (CAA) tanımlanmaktadır (Davis, 2002; ASTM, 2008; 2010; 2012)

FPL filmi kimyasal olarak ısıtarak, vakuma maruz bırakarak veya belirli organik nemlendirme önleyicileri ile tutarak uzaklaştırılabilen emilen suyun değişen miktarlarıyla oluşan şekilsiz Al_2O_3'tir. Bir FPL oksidin büyüme sonrasında magnezyum içeren alaşımların ısıl işlemi, magnezyum yayınıma ve MgO oluşmasına neden olabilir, ancak yüzey morfolojisini tamamen değiştirmez. FPL ile dağlamada küçük miktarlarda magnezyum mukavemetli bir yapıştırma için yararlı olabilir.

PAA oksit morfolojisi ise FPL yüzeyinden daha büyük mikro pürüzlülük bir derecesine sahiptir. Oksit, bariyer tabakasının üstünde iyi gelişmiş gözenek bir ağdan oluşur. Toplam oksit kalınlığı yaklaşık olarak 400 nm'dir. Bu mikro pürüzlülük derecesi

yapışma dayanımını ve dayanıklılığını iyileştirmek için yapıştırılan malzemeye uygulanan FPL yüzey davranışından daha fazla mekanik kilitleme sağlayabilir. Ancak mekanik kilitlemedeki bu artış sadece polimerik astarın veya yapıştırıcının oksit gözeneklerine nüfuz etmesiyle değil saf alüminyum alaşımların daha uzun ve kalın hücrelerinin birbirine geçmesi ile oluşur.

PAA filmi kimyasal olarak yüzeyde fosfat ile birleştirilen tek bir tabakanın eşdeğeriyle oluşan şekilsiz Al_2O_3'tir. Yapıştırılan malzemenin alaşım bileşenlerinde genellikle anodik oksit bulunmaz. Depolama koşullarına bağlı olarak bir miktar su yüzeyinde adsorbe olabilir ama kolayca ısıtma ya da bir hidrat giderici bir ortamda saklanması ile çıkarılır(Davis, 2007).

3.1.11. Yapıştırıcıların sınıflandırılması

Yapıştırıcılar, birçok yönteme göre sınıflandırılır ve bu sınıflandırma şemaların birçok hiyerarşik seviyeleri olabilir. Belki de, en geniş sınıflandırma şeması, ya sentetik ya da doğal olarak meydana gelen maddelerden üretilmiş olan bir yapıştırıcı olarak kategorize etmektir. Sentetik yapıştırıcılar polimer gibi insan yapımı malzemeden imal edilmiştir. Doğal yapıştırıcılar, hayvan veya tarımsal ürünler gibi doğal olarak oluşan malzemelerden imal edilir.

Birçok yapıştırıcılar organik polimerlerden oluşur. İnorganik kaynaklı yapıştırıcı sistemler de vardır. Yapıştırıcılar için kullanılan en eski polimerler doğal kökenli idi. Genellikle doğal olarak oluşan yapıştırıcılar, düşük mukavemeti nedeniyle sentetik polimerleri yakın olması ve işlemlerinde yeterli serbestliği düşünülmektedir. Yapısal zorlu uygulamada kullanılan modern epoksiler, üretanlar, akrilik ve diğer yapıştırıcı sistemler sentetik polimerlerden yapılır.

Sentetik ve doğal olarak oluşan yapıştırıcıların sınıflandırılma kategorileri genellikle birçok pratik amaçlar için çok fazla geniştir. Sanayide çoğu amaçları karşılayacak yapıştırıcıların sınıflandırılmasında çeşitli yaygın yöntemler yerleşmiştir. Bu sınıflandırmalar (Petrie, 2000);

- İşlevsel,
- Kimyasal bileşim,
- Uygulama veya reaksiyon metodu,
- Fiziksel şekli,

- Maliyet,
- Son kullanım.

Bu sınıflandırmaların ve ayrımların tümü bir dereceye kadar örtüşmektedir.

3.1.11.1. İşlevsel yapısına göre

Fonksiyonel sınıflandırma yapısal ya da yapısal olmayan yapıştırıcılar olarak tanımlanır. Yapısal yapıştırıcılar yüksek mukavemetli ve kalıcılığı olan malzemelerdir. Genel olarak yapısal yapıştırıcılar, en yaygın çalışma ortamlarına dirençli ve 7 MPa'dan fazla kayma dayanımına sahip olanlar olarak tanımlanır. Onların birincil işlevi yapıları birbirine tutturmak ve deformasyon olmadan yüksek yüklere mukavemetli olabilmesidir. Yapısal yapıştırıcılar genel olarak uygulamanın sağlam kalması için kabul edilir.

Yapısal olmayan yapıştırıcılar tam tersine yüksek yüklerini desteklemek için gerekli değildir fakat onlar sadece yapışma yerinde hafif malzemeleri tutmaktır. Yapısal olmayan yapıştırıcılar orta yük altında sürünür ve genellikle uzun süreli çevresel etkilenme ile bozulurlar. Genellikle, geçici ya da kısa süreli tutturmak için kullanılır. Belirli basınca duyarlı yapıştırıcı, sıcakta eriyen ve su emülsiyon yapıştırıcılar yapısal olmayan yapıştırıcıların örnekleridir. Çünkü bunlar düşük kayma mukavemet, yüksek sürünme, sıcaklık ve kimyasallara karşı düşük bir dirence sahiptir. Fakat bazen bu malzemeler uygulamanın ciddiyetine bağlı olarak uzun süreli uygulamalarda da kullanılabilir. Mekanik bağlantı elemanları ile uyumlu olarak yapısal olmayan yapıştırıcı kullanımı, normalde kullanılabilecek mekanik bağlantı elemanları sayısını azaltmak ve aynı zamanda titreşim sönümleme, sızdırmazlık veya izolasyon gibi montajda ek bir fayda sağlamak için izin verebilir.

3.1.11.2. Kimyasal bileşimine göre

Kimyasal bileşimlerine göre yapıştırıcıların sınıflandırması en geniş anlamıyla termoset, termoplastik, elastomer ve bunların alaşımları (hibrid) olan yapıştırıcılar ile tanımlanmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 3.3.'de tarif edilmiştir. Genellikle, kimyasal bileşim, epoksi, üretan, neopren ve siyanoakrilat gibi temel kimyasal türleri ya da her bir grup ailesinin içinde daha fazla gruplara ayrılır.

3.1.11.2.1. Termoset yapıştırıcılar

Termoset (ısıyla katılaşan) yapıştırıcılar ilk kürden sonra tekrar tekrar ısıtılmayan ve yumuşatılmayan malzemelerdir. Kürleşme ve çapraz bağdan sonra, bağ ısıyla biraz daha yumuşayabilir ama sertleştirmeden önceki mevcut akışkan durumuna getirilemez veya eritilemez. Termoset malzemeler erimeyen ve çözünmeyen malzemelerden oluştururlar. Bu yapıştırıcılar genel olarak oksidasyon ya da moleküler zincir sebebiyle yeterince yüksek sıcaklıklarda ısıtıldıklarında zayıflar ve bozulur.

Termoset yapıştırıcılar bazen fırça ya da sprey ile uygulamayı kolaylaştırmak için bir çözücü madde içinde temin edilmektedir. Ancak, aynı zamanda çözücü kullanılmayan sıvılar, macunlar ve katı kalıplar gibi yaygın olarak mevcutturlar. Epoksi, polyester, fenolik ve üretan yapıştırıcılar, termoset kimyasal ailesi içinde olan yaygın yapıştırıcıların örnekleridir.

Termoset reçinelerin molekülleri yoğun şekilde çapraz bağlı olduğu için, ısı ve çözücülere karşı direnci iyidir ve yükseltilen sıcaklıklarda yük altında küçük elastik deformasyon gösterir. Sonuç olarak çoğu yapısal yapıştırıcılar, ısı ile sertleşen bir molekül yapısına sahip polimer reçineler ile formüle edilebilir eğilimindedir.

3.1.11.2.2. Termoplastikler yapıştırıcılar

Termoplastik yapıştırıcılar kürleşmeyen veya ısı altında sertleşmemesiyle termosetlerden farklıdır. Termoplastikler başlangıçta katı polimerler olup, ısıtıldığı zaman sadece yumuşar ya da erirler. Molekül yapısı, düz ya da dallı da olabilir.

Çizelge 3.3. Kimyasal bileşimiyle sınıflandırılmıştır yapıştırıcılar

Termoplastik	Termoset	Elastomer	Hibrid
Selüloz asetat, selüloz asetat butirat, selüloz nitrat, polivinil asetat, polivinilklorür, polistiren, polivinil alkol, poliamid, akrilik fenoksi, polietilen, polipropilen,	Siyanoakrilat, poliester, üre formaldehit, melamin formaldehit, fenollikler, epoksi, poliimid, fenol formaldehit,	Doğal kauçuk, kauçuk, bütil, poliizobütilen, nitril, stiren-bütadien poliüretan, polisülfur, silikon, neopren	Epoksi-fenolik, epoksi-polisülfid, epoksi-poliamid, epoksi-naylon, nitril-epoksi, nitril fenolik, neopren fenolik, vinil-fenolik
Sıvı, bazıları kuru film	Sıvı, ancak tüm türlerde yaygın	Sıvı, bazıları film	Sıvı, pasta ve film
Araçla (çoğu çözücü dispersiyonlar veya su emülsiyonlarıdır)	Kür ihtiyaçları ile (en yaygını ısı ve / veya basınç, ancak bazı katalizör türleri vardır)	Kür ihtiyaçları ile (hepsi yaygın), ayrıca Araçla (çoğu çözücü dispersiyonlar veya su	Kür ihtiyaçları ile (bazı epoksi türleri dışında genelde ısı ve basınç); araç ile (çoğu çözücü

		emülsiyonlarıdır)	dispersiyonlar veya % 100 katı); ve yapışanların veya son servis koşulları tipine göre
65.5-93 °C iyi; zayıf sürünme dayanımı; makul soyulma dayanımı	93-260 °C iyi; iyi sürünme dayanımı; makul soyulma dayanımı	65.5-204 °C iyi; hiçbir zaman tam erime; düşük dayanımlı; yüksek esneklik	Formülasyonuna bağlı olarak diğer kimyasal grupların özelliklerinin dengeli bir kombinasyonu; geniş sıcaklık aralığında ve genellikle yüksek dayanım
Gerilmemiş bağlantılar; kapaklar, bindirmeler ve takviyeler ile tasarımlar	Hafifçe yükseltilmiş sıcaklıklarda gerilmeli bağlantılar	Hafif malzemelerde gerilmemiş bağlantılar; eğilmedeki bağlantılar	En yüksek ve sıkı son servis koşulların karşılanması gereken yerlerde; bazen askeri kullanımlar gibi maliyeti ne olursa olsun
Formülasyon aralığı tüm malzemeleri kapsar (ahşap, deri, mantar, kağıt, vb)	Çoğu malzemelerin yapısal kullanımlar için	Kullanılan birkaç lastik, kumaş, folyo, kağıt, deri, plastik filmler için; Ayrıca bantlar gibi. Çoğu modifiyeli sentetik reçineler	Metaller, seramikler, cam, termoset plastikler; (yani, yüksek mukavemetli, ısı)

Termoplastikler de akışkan solüsyon elde etmek üzere çözücü içinde eritilebilir ve daha sonra da çözücünün buharlaştırılması ile yeniden sertleştirilebilir. Termoplastik reçineler de lateks veya emülsiyon maddesi olarak su içerisinde dağıtılabilir. Bu ürünler suyun buharlaşmasıyla sertleşirler. Yaygın olarak kullanılan ahşap tutkalları, su içinde çözünen termoplastik reçinelerdir. Film biçimindeki yapıştırıcılar, reçinenin birleşmesi ve suyu buharlaştırılmasıyla sertleşir.

Termoplastik yapıştırıcılar, termoset türlerinden daha kısıtlı bir çalışma sıcak aralığına sahiptir. Bazı termoplastikler, nispeten düşük bir sıcaklıkta mükemmel kayma dayanımı sağlamasına rağmen bu malzemeler çapraz bağlı değildir ve daha düşük sıcaklıklarda yük altında sürünme eğilimindedir. Bu sürünme veya yük altında uzun süreli deformasyon, oda sıcaklığında hatta yapıştırıcıya bağlı olarak daha düşük sıcaklıklarda oluşabilir. Uzun süreli sürünme genellikle yapısal uygulamalar için kullanılan bu yapışkan engelleyen özelliğidir. Termoplastik yapıştırıcılar, termoset yapıştırıcılarda olduğu gibi çözücüler veya kimyasallar karşı genel dirence sahip değildirler.

3.1.11.2.3. Elastomer yapıştırıcılar

Elastomer yapıştırıcılar özel reolojik özelliklere sahip olduğu için bu tür yapıştırıcılar ayrı olarak sınıflandırılır. Elastomer yapıştırıcılar büyük tokluk ve uzamaya sahip olan sentetik ya da doğal olarak oluşan elastomer polimerlere dayanmaktadır. Bu yapıştırıcılar yüksek derecede genleştirme ve sıkıştırma kapasitesine sahip polimerik reçinelerden yapılmıştır. Yük kaldırıldıktan sonra başlangıçtaki boyutlarına ve şekline hızlı bir şekilde geri döner. Sonuç olarak elastomer yapıştırıcılar büyük bir enerji soğurucu özelliklere sahip ve düzgün olmayan yüklemelerde bağlantı tasarımlarında yüksek dayanım sunar. Elastomer yapıştırıcılar termoset veya termoplastik olabilir. Termoset tipleri bazı yapısal uygulamalarda kullanılabilir.

Elastomer yapıştırıcılar geniş bir uygulama yelpazesi için formüle edilebilir. Elastomerler yüksek viskoelastik malzemeler olduğu için yüksek derecede uzama, düşük modüllü ve yüksek tokluk ile karakterize edilir. Viskoelastik, yüksek soyulma mukavemeti ve farklı genleşme katsayılarıyla alt tabakalara bağlanarak yüksek esneklik dereceli yapıştırıcıları içerir. Elastomerler dolgu malzemeleri, titreşim sönümleyici ve ses yalıtımı için yapıştırıcı formülasyonunda yaygın biçimde kullanılır.

3.1.11.2.4. Hibrid yapıştırıcılar

Hibrid yapıştırıcılar tek bir yapıştırıcı formülasyona termoset, termoplastik veya elastomer reçinelerin birleştirilmesiyle yapılır. Hibrid, her bir bileşenin en yararlı özelliklerinden yararlanmak için geliştirilmiştir. Genel olarak yüksek sıcaklık ve rijit reçineler, iyileştirilmiş soyulma mukavemetini ve enerji emilmesini sağlamak için termoplastik veya esnek, tok elastomerler ile birleştirilir. Fakat bu kombinasyonların erken girişimleri genellikle en zayıf bileşeninden daha iyi bir yapıştırıcı ile sonuçlanmıştır. Ana reçinenin yüksek sıcaklık özellikleri her zaman esneklik kazandıran katkı maddesinin eklenmesi ile feda edilir.

Son zamanlarda gelişmiş hibrid yapıştırıcı sistemleri, yüksek sıcaklık özelliklerini azaltmadan termoset reçinelerin soyulma dayanımını ve tokluğunu arttırılması amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistemler;

- Reaktif hibritler, iki sıvı bileşenler sadece bir arada harmanlanmak yerine, birlikte reaksiyona sokulur,

- Dağınık fazlı hibritler, uygun esneklik kazandıran bir ortamda reçine matrisi içinde ayrı ayrı parçacıklar halinde dahil edilir.

Bu hibrid yapıştırıcı sistemler, artan sıcaklıklarda veya kimyasal direnç özelliklerinden ödün vermeksizin yüksek soyulma, darbe ve kayma dayanımlarının sahiptirler.

3.1.11.3. Reaksiyon metoduna göre

Yapıştırıcılar arasında yapılabilecek bir başka ayrımda, tepkimeye girmesi ya da katılaşma şekildedir. Yapıştırıcıların katılaşmasında birkaç yöntem vardır.

- Kimyasal reaksiyon ile sertleşen, (örneğin, vb, sıcaklık, radyasyon, yüzey katalizörü gibi bir dış enerji kaynağıyla ya da bir sertleştirici ile reaksiyona girmesi)
- Çözücü veya su kaybı ile sertleşen,(su ortamının ya da çözülmenin kaybolması ile sertleşirler)
- Eriyikten soğutmayla sertleşen, (erime koşulundan hızla soğuyarak sertleşirler)

3.1.11.4. Fiziksel şekline göre

Yapıştırıcılar arasında ayrımın en yaygın bir şekilde kullanılan yöntem fiziksel şekline göredir. Yapıştırıcı sistemler birçok şekillerde mevcuttur. En yaygın şekilleri,

- Çok bileşenli çözücüsüz (sıvı veya macun)
- Tek bileşenli çözücüsüz (sıvı veya macun)
- Tek bileşenli çözücülü (sıvı)
- Katı (toz, film, bant, vb.)

Yapıştırıcıların bazı belirli türleri örneğin epoksi gibi, bileşiminde küçük değişimler yoluyla birçok şekillerde mevcut olabilir. Çeşitli yapıştırıcı şekillerinin özellikleri ve avantajları, Çizelge 3.4.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Şekillerine göre sınıflandırılmış yapıştırıcılar

Şekil	Açıklamalar	Avantajlar
Sıvı	En yaygın şekli; Hemen hemen her formulasyona uygulanabilir. Prensip olarak çözücüde dağıtılır.	Kolay uygulanır. Akışkanlığı çoğu zaman kullanıcının kontrolü altındadır. Elle uygulama için önemli bir biçimdir

Macun	Kıvamlığı çok geniş aralıktadır. Sınırlı formülasyonlar; esas olarak modifiye epoksilerde % 100 katı	Daha az zaman beklemeye rağmen yüksek üretim kurulumları için oldukça rahattır. Yüksek kayma ve sürünme dayanımları sahiptirler.
Toz	Kürleştirmeyi etkinleştirmek için ısıtma ya da karıştırma gerektirir.	Daha uzun raf ömrü; gerekli miktarlarda karıştırılmış
Film, bant	Düz yüzeyler sınırlıdır, sertleştirme kolaylığı çok çeşitlidir.	Hızlı ve kolay uygulanır. Atık veya taşma olmaz; sabit kalınlıktadır.

3.1.11.5. Maliyetine göre

Maliyet genellikle yapıştırıcıların sınıflandırılmasının bir yöntemi olarak kullanılmaz. Fakat yapıştırıcının seçilmesinde önemli bir faktördür. Böylece maliyet, doğrudan olmasa bile en azından dolaylı olarak sınıflandırma ve seçimin bir yöntemi olmuştur. Hammadde maliyeti veya yapıştırıcının 'ilk maliyet' önemli ölçüde değişebilir.

Yapıştırıcıların kullanım maliyetini tahmin yaparken, bir tek yapıştırıcının fiyatını değil, aynı zamanda güvenilir ve tam bir bağlantı elde etmek için gerekli olan her şeyin maliyetini dikkate almamız gerekir. Bu nedenle yapıştırıcılar ile tutturma maliyetinin hesaplanmasında işçilik maliyeti, ekipmaların maliyeti, yapıştırıcıyı sertleştirmek için gerekli zaman ve kusurlu bağlantıların ıskarta nedeniyle ekonomik kayıplar içermelidir. Aşağıdaki parametreler bir yapıştırıcı sisteminin gerçek maliyet analizinde önemli olabilir:

- Bileşenlerin sayısı veya yapıştırma alanıyla bağlantılı olarak kapsamının verimliliği,
- Yapıştırma için gerekli işlem ekipmanları ve uygulama kolaylığı (fırınlar, presler, sürmeye yarayan aletler, vb.),
- Toplam işlem zamanı (montaj, kürleştirme, kurutma, yapıştırılanların hazırlanması, vb.)
- Bağlanacak parçaların montaj ve muayene için işçilik maliyeti,
- Yapıştırıcı katkılarının atıklarını ortadan kaldırmak için çevresel ve malzeme maliyetleri,
- Birleştirme diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında reddedilen malzeme miktarları.

3.1.11.6. Son kullanımına göre

Yapıştırıcılar ayrıca son kullanımlarına göre sınıflandırılabilir. Bu nedenle, metal yapıştırıcılar, ahşap yapıştırıcılar ve vinil yapıştırıcıları gibi bağlanacakları alt tabakalara göre adlandırılırlar. Benzer şekilde, asit-dayanıklı yapıştırıcılar, ısıya dayanıklı yapıştırıcılar ve hava koşullarına dayanıklı yapıştırıcılar da en uygun olduğu ortamları gösterir.

3.2. Nanoteknoloji

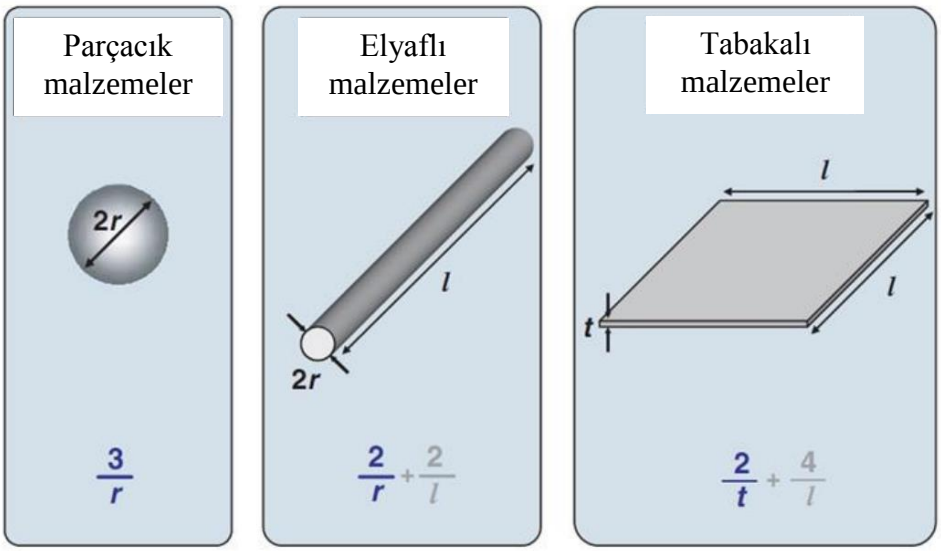
Günümüzde teknolojisi, insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak için devamlı olarak gelişmektedir. Bu gelişmelerden biri de boyutların küçültülmesiyle başlayan ve malzemelerin özelliklerini iyileştirmeye yönelik olan "nanoteknoloji"dir. Nanoteknoloji, atomik ölçekte gerçekleştirilen işleme teknolojisidir.

Nanoteknoloji genel olarak, nano ölçekli boyutu nedeniyle önemli ölçüde geliştirilmiş fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, işlevleri, olgular ve işlemler sergileyen, 0.1-100 nm arasında değişen boyutları ile malzeme, cihaz ve sistemlerin oluşturulması, işlenmesi, karakterizasyonu ve kullanımı olarak tanımlanır. Nanoteknolojinin ilgi alanları nano-biyoteknoloji, nano-sistemleri, nano-elektronik, ve nanokompozitin önemli bir parçası olan nano yapılı malzemeleri kapsar (Thostenson ve ark., 2001; Thostenson ve ark., 2005).

Parçacıklarda mikro boyuttan nano boyuta geçildiğinde fiziksel özelliklerde etkileyici değişikler gözlenir. Nano boyuttaki malzemeler sahip oldukları hacme göre oldukça büyük yüzey alanlarına sahiptir. Birçok önemli kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin yüzey ve yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiği bilindiğine göre, nano yapıdaki bir parçacık aynı bileşime sahip olduğu daha büyük boyutlardaki parçacıklardan farklı özelliklere sahip olacaktır. Bu duruma parçacıklar ve fiberler boyutundan bakıldığında, birim hacim için yüzey alanı malzemenin çapı ile ters orantılıdır. Bu nedenle, küçük çaplardaki malzemeler birim hacim için büyük yüzey alanlarına sahiptir.

Nanokompozitlerin yapı-özellik ilişkisinin anlaşılmasında temel öneme sahip olan morfolojik özellik, takviye malzemelerin yüzey alanı / hacim oranıdır. Nanokompozitler takviye malzemelerine göre üç kategoriye dayanmaktadır; i) Parçacıklar (silika, metal, diğer organik ve inorganik parçacıklar), ii) tabakalı

malzemeler (grafit, katmanlı silikat ve diğer tabakalı mineraller) iii) elyaflı malzemeler (nanolifler ve nanotüpler)'dir. Şekil 3.13'de gösterildiği gibi parçacık çapı, tabaka kalınlığı veya elyaflı malzemenin çap değişimleri, mikrometreden nanometreye büyüklük oranları değişir. Bu ölçekte genellikle malzeme özelliklerinin farklı boyut bağımlılığı vardır. Buna ek olarak kompozitin özellikleri, ara yüzey bölgesindeki büyük artış ile arayüz veya ara faz özelliklerine göre daha baskın olur (Thostenson ve ark., 2001; Thostenson ve ark., 2005).



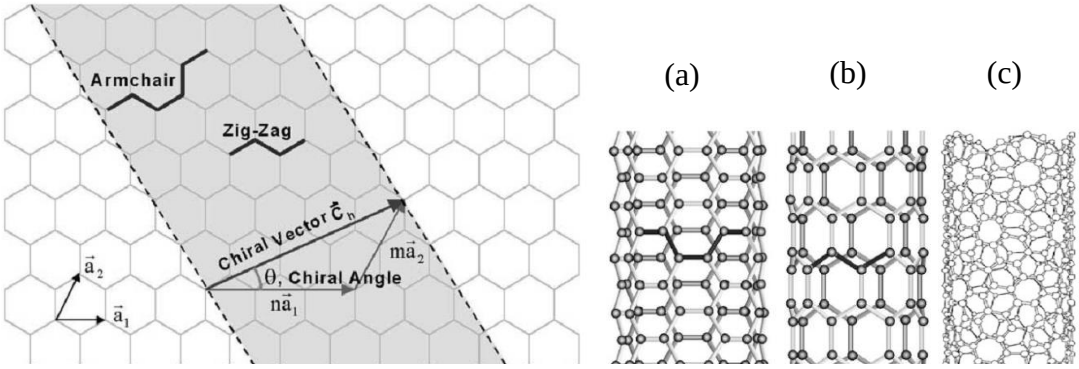
Şekil 3.13. Takviye geometrileriyle değişen yüzey alanı / hacim ilişkileri

Polimer matrikslerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için nanoparçacıkların dolgu malzemesi olarak kullanılması fikri son zamanlarda bilim adamları tarafından sıkça araştırılmaktadır. Nanometre boyutundaki bu parçacıkların yüzey alanları 1000 m^2/g bulabilmektedir (Gojny ve ark., 2005). Bu büyük yüzey alanları nedeni ile yükün matriksten nanoparçacığa transferi kolaylaşacak ve sonuçta matriksin mekanik özellikleri arttırılmış olunacaktır (Njuguna ve ark., 2007). Bu yük transferini gerçekleştirmeye en uygun adaylar nanotüpler, karbon nanoelyaflar, nanokiller, vb. nanoparçacıklardır.

3.2.1. Karbon nanotüplerin morfolojisi ve atomik yapısı

Karbon nanotüp'lerin (KNT) yapısı, tüp haline gelecek şekilde yuvarlatılmış bir grafen levha olarak düşünülebilir (Şekil 3.14.). Grafit C-C sp^2 bağlarına sahiptir. Bu

bağlar elmasın sahip olduğu C-C sp^3 bağlarından daha güçlüdür. Çünkü C-C sp^2 bağlarının boyları daha kısadır. Ancak, grafit tabakaları arasındaki nispeten çok zayıf olan van der Waals bağları, grafit tabakalarının birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kaymasına izin verir. Nanotüpler tek cidarlı veya çok cidarlı yapılarda bulunabilmektedir ve çok duvarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT'ler) basitçe eş merkezli tek cidarlı karbon nanotüplerden (TCKNT'ler) oluşmaktadır (Thostenson ve ark., 2001). TCKNT'ler, ÇCKNT'lere göre daha dayanıklıdır. Çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması ile oluşur (Fan, 2007). ÇCKNT'ler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüpler olup bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme ihtimalleri dayanımlarını düşürür (Lordi ve ark., 1999). KNT'lerin bir başka yapıda fulleren, beşgen ve altıgen oluşan, dışbükey kapalı kafes şeklindedir.



Şekil 3.14. Bir grafen levhasından değişik yapılara sahip nanotüp oluşumunun şematik gösterimi (a) Koltuk Tipi b) Zig-Zag Tipi c) Helisel Tip (chiral) (Thostenson ve ark., 2001; Ma ve ark., 2010)

KNT'ler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip nanomalzemeler Çizelge 3.5.'de bu özellikleri özetlenmiştir. KNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlenmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır.

Çizelge 3.5. Farklı karbon malzemelerin fiziksel özellikleri (Ma ve ark., 2010)

Özellikler	Grafit	Elmas	Fulleren	TCKNT	ÇCKNT
Özgül ağırlık (g/cm^3)	1.9–2.3	3.5	1.7	0.8	1.8
Elektrik iletkenliği (S/cm)	4000^p,3.3^c	10^{-2} -10^{-15}	10^{-5}	10^2 -10^6	10^3 -10^5
Elektron hareketliliği (cm^2/ (V s))	$2.0x10^4$	1800	0.5-6	~10^5	10^4 -10^5
Isı iletkenliği (W / (m K))	298^p, 2.2^c	900-2320	0.4	6000	2000
Isıl genleşme katsayısı (K^{-1})	$-1x10^{-6p}$ $2.9x10^{-5c}$	$(1\sim3)x10^{-6}$	$6.2x10^{-5}$	önemsiz	önemsiz
Havada termal kararlılığı (°C)	450–650	<600	~600	>600	>600

p: düzlem içi; c: c-ekseni

3.2.2. Karbon nanotüplerin sentezlenmesi

Karbon nano tüp sentezlenmesi için yıllar süren çalışmalar sonucunda belirli yöntemler ortaya çıkartılmıştır. Sentezleme yöntemlerinin her biri farklı uygulama ve kullanım istekleri doğrultusunda şekillendirilmiştir. Yüksek saflıkta üretim isteği, düşük sıcaklıklarda sentezleme ve üretim kapasitesinin artırılması üzerine yapılan çalışmalarla birçok değişik yöntemleri ortaya çıkmıştır (Kucukyildirim ve Eker, 2012). Bu yöntemler;

- Katı halde karbondan sentezleme,
- Gaz hâlde karbondan sentezleme,
- Diğer sentezleme yöntemleri, olarak belirtilmiştir.

3.2.2.1. Katı halde karbondan sentezleme

Katı hâlde karbondan sentezleme yöntemlerinde karbon kaynağı, katı halde bulunan grafit bir parça kullanılmaktadır. Grafit çubuğun geometrisi yöntemden yönteme değişmektedir. Bu yöntemlerde yüksek sıcaklıklar ve yüksek basınçlar söz konusu olmaktadır. Katı hâlde karbondan sentezleme yöntemleri,

- Lazerle Aşındırma Yöntemi
- Ark Boşaltma Yöntemi
- Solar Fırın Yöntemi

3.2.2.2. Gaz halde karbondan sentezleme

Bu yöntemlerde kullanılan karbon kaynakları çeşitli konvansiyonel gazlar olmaktadır. Yüksek miktarlarda KNT üretmek için sıklıkla kullanılan ve günümüze özellikle üzerinde durulan kimyasal buhar çökeltme (CVD) yöntemleri bu grup içerisindedir. Gaz hâlde karbondan sentezleme yöntemleri ise,

- Kimyasal Buhar Çökeltme
- Isıl Kimyasal Buhar Çökeltme
- Plazmayla Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Çökeltme
- Mikrodalga Plazmayla Kimyasal Buhar Çökeltme
- Buhar Fazında Büyütme

3.2.2.3. Diğer sentezleme yöntemleri

Bu yöntemler sıklıkla kullanılmamakla beraber, daha çok deneysel ve geliştirme aşamasındaki uygulama olan diğer sentezleme yöntemlerinde hidrotermal sentezleme ve elektroliz yöntemi olarak iki grupta irdelenebilir.

3.2.3. Karbon nanotüplerin polimer içerisinde dağıtılması

KNT'ler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elamanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı zorlukların üstesinden gelmek gerekir. KNT'lerin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matris tarafından ıslatılarak matris ile ara yüz etkileşimin arttırılması, adezyon gibi etkenler, karbon nanotüplerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen en önemli konulardır (Njuguna ve ark., 2007; Spitalsky ve ark., 2010). Çizelge 3.6.'da Al_2O_3 partikülleri, karbon elyaflar, grafit nanopleytler (GNPs) ve KNT'ler dahil olmak üzere yaygın olarak kullanılan dolgu maddelerinin boyutları ve 1.0 mm^3 kompozit içinde % 0.1 eş dağılımlı dolgu hacim oranına tekabül eden parçacık sayısı da karşılaştırılır.

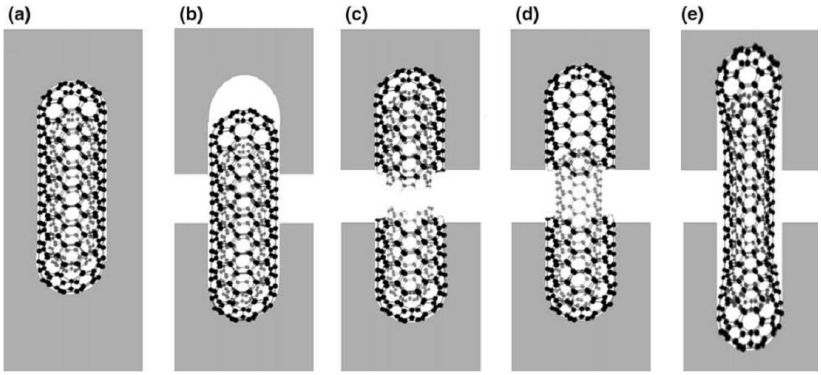
Çizelge 3.6. Farklı dolgular için kompozit parçacıkların boyutu ve parçacık sayısı

Dolgular	Dolguların ortalama çapı	Yoğunluk (g/cm^3)	N[a]	S[b]
Al_2O_3	100µm çapında (d)	4.0	1.9	$S=\pi d^2$
Karbon elyaf	5µm çapında (d) x 200µm uzunluğunda (l)	2.25	255	$S=\pi dl + \pi d^2/2$
GNP	450µm uzunluğunda (kare, l), 7.5nm kalınlığında (t)	2.2	$6.58x10^4$	$S=4l^2 + 2lt$
CNT	12 nm çapında (d) x 20µm uzunluğunda (l)	1.8	4.42×10^8	$S=\pi dl + \pi d^2/2$

[a] N: Hacimce %0.1'de 1.0 mm3 deki dolguların içeriği
[b] S: Bit tek parçacığın yüzey alanı

KNT'lerin ilavesi ile polimerin dayanımının arttırılmasında bir diğer önemli faktör matris ile KNT'ler arasındaki yük aktarımının etkinliğidir. Matris ve KNT'ler arasındaki ara yüzey bağlanması, yük aktarımının etkin bir şekilde çalışması için çok önemlidir. Birçok araştırmacı KNT'lerin ilavesi ile matrisin dayanımının beklenin altında kalmasını bu etkene bağlamıştır (Nan ve ark., 2003; Weisenberger ve ark., 2003). KNT'ler grafen tabakasından oluştuğunu düşünülürse, grafenin de zayıf

düzlemler arası etkileşime sahip oluşu ve kimyasal kararlılığı, matris ile KNT'ler arasındaki yapışmanın oluşmamasında önemli faktörlerdir (Khare ve Bose, 2005). KNT'lerin matris ile etkileşebilmesinin için üç yolu vardır; (i) elektrostatik ve van der Waals kuvvetleri (ii) yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak mekanik kilitlenme (iii) kimyasal bağlanma. Kimyasal bağlanma ve mekanik kilitlenme ile kıyas edildiğinde van der Waals kuvvetleri oldukça zayıf kuvvetlerdir. Bu yüzden diğer iki bağlanma çeşidi KNT'ler ile matris arasındaki yapışmada önemli bir rol oynarlar. KNT'ler ile matris arasındaki bağlanma, KNT'lerin yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi ile arttırıla bilinir. Şekil 3.15.'de yük etkisi altında matris içerisindeki yük aktarımı ve hasar mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.15. KNT'lerin matriks içerisindeki rastlanabilinecek hasar şekillerinin şematik gösterimi a) başlangıç hali, b) KNT'lerin zayıf ara yüzey yapışması nedeniyle sıyrılması, c) Güçlü ara yüzey yapışması ile yüksek ve hızlı şekil değişikliği nedeniyle KNT'lerin kırılması, d) Teleskopik sıyrılma: KNT'lerin dış yüzeyinin yüksek ara yüzey yapışması sonucu kırılması ile iç çeperlerin sıyrılması e) KNT'lerin çeperlerinin bir kısmının matristen ayrılması ancak kalan yüzeylerin mükemmel ara yüzey yapışması ile yük transferinin etkin bir şekilde gerçekleşmesi (Gojny ve ark., 2005)

KNT'lerin matris içerinde homojen bir şekilde dağıtılması matris ile karbon nanotüp ağı arasında etkin olarak yük aktarımının yapılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Karbon nanotüplerin matris içerisinde iyi bir şekilde dağıtılmış olması ile ayrıca homojen gerilme dağılımı elde edilir ve gerilme konsantrasyonu oluşturan bölgelerin azalmasını sağlar (Coleman ve ark., 2006). Saf KNT'leri matris içerisinde homojen olarak dağıtmanın zorluğu, büyük yüzey alanlarından kaynaklanan van der Waals kuvvetlerinin KNT'leri bir arada tutmasından ileri gelmektedir. KNT'ler matris içerisinde kümelenmesi ve yetersiz dağılım, karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesi sonucunu meydana getiren en

önemli etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır (Andrews ve Weisenberger, 2004; Gojny ve ark., 2005). Bu dağılım problemini çözmek için kullanılan yöntemler;

- Çözelti karıştırma,
- Eriyik karıştırma,
- In situ polimerizasyon,
- Bilyeli öğütme,
- Lateks teknolojisi
- Kimyasal fonksiyonelleştirme,
- Fiziksel fonksiyonelleştirme.

KNTlerin polimerin içinde dağıtılmasında kullanılacak yöntem temel olarak kullanılan polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır.

3.2.3.1. Çözelti karıştırma yöntemi

Çözelti karıştırma yöntemi, küçük numune boyutları için elverişli olduğu için KNT/polimer nanokompozitlerin üretimi için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir (Du ve ark., 2007; Tang ve ark., 2013b; Wernik ve Meguid, 2014). Tipik olarak çözelti karıştırma; mekanik karıştırma, ultrasonik banyo, manyetik çalkalama ya da aynı zamanda bir sonikatör olarak da bilinen ultrasonik prob ile uygun bir çözücü içinde KNTlerin dağılımı, dört ana adımdan oluşur. Çözücü ayrıca polimer reçinelerini de çözebilir. Daha sonra, dağılmış KNTler oda sıcaklığında veya yükseltilmiş sıcaklıklarda polimer matris ile karıştırılır. Nanokompozitler sonuç olarak çökeltici ya da karışımı dökülmesiyle elde edilir. Bu yöntem genellikle kompozit filmleri hazırlamak için de kullanılır. Termoset reçinelerin bir türü olan epoksi reçinelerde genellikle KNT/epoksi kompozitlerin dağıtımında çözelti karıştırma yöntemi kullanılır.

3.2.3.2. Eriyik karıştırma yöntemi

Eriyik karıştırma KNT/polimer nanokompozit imal etmek için yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntemdir. Polipropilen, polistiren, poli (etilen 2,6-naftalat) gibi termoplastik polimerler, bu yöntemle matris malzemeleri olarak işleme tabi tutulabilir (Zhang ve Chen, 2004; Kim ve Kim, 2006).

Bu yöntemin önemli bir avantajı, KNT dağıtmak için herhangi bir çözücünün kullanılmamasıdır. Eriyik karıştırma işleminde, yüksek sıcaklık ve polimer matris içinde KNTleri dağıtmak için yüksek kayma kuvveti kullanılır ve güncel endüstriyel uygulamaları için çok uyumludur. Yüksek bir sıcaklıkta çalışan ve yüksek kayma kuvvetleri üretebilen ekstrüzyon, enjeksiyon makineleri gibi özel cihazlar, KNT dağıtmak için kullanılır. Eriyik karıştırma veya bu tekniğin çeşitleri genellikle KNT / polimer kompozit elyafların üretilmesi için kullanılır. Çözelti karıştırma yöntemleri ile karşılaştırıldığında bu teknik, genel olarak çözelti karıştırmaya göre polimerlerin içinde KNTleri dağıtmak için daha az etkili olduğu ve aynı zamanda bu tekniğin uygulaması termoplastik matris de düşük dolgu maddesi konsantrasyonları ile sınırlıdır (Moniruzzaman ve Winey, 2006).

3.2.3.3. In situ polimerizasyon yöntemi

In situ polimerizasyon yöntemi, termoset polimer içinde KNTlerin homojen bir dağılım gerçekleştirmek için etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde KNT bir çözücünün varlığı veya yokluğunda, monomerler ile karıştırılır ve daha sonra bu monomerler yüksek bir sıcaklıkta kürleştirme veya sertleştirme araçları ekleme ya da yoğunlaştırma reaksiyonları ile polimerize edilir. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri kovalent bağın fonksiyonelleştirilmiş KNTler ve polimer matrisi arasında oluşturulabilir olmasıdır. Bu da güçlü ara yüzey bağlar aracılığıyla kompozitlerin çok gelişmiş mekanik özellikler ile sonuçlanır (Gojny ve ark., 2004; Kosmidou ve ark., 2008; Ma ve ark., 2008; Ma ve ark., 2009).

3.2.3.4. Bilyeli öğütme yöntemi

Öğütme, boyalar, piroteknik ve seramiklerde kullanılmak üzere son derece ince bir toz halinde malzemelerin öğütülmesi için öğütme yönteminin türüdür. Öğütme esnasında yüksek basınçta gömme bir kap içinde küçük, sert toplar arasındaki çarpışma nedeniyle lokal olarak üretilen mekanik bir işlemdir (Li ve ark., 1999; Kim ve ark., 2002). KNT nanoteknoloji uygulamaları ile ilgili olarak bu yöntem, karbon nanoyapıların uzunlukları kısaltmak için kullanılmaktadır (Tang ve ark., 2013a). Katı haldeki mekanik kimyasal toz haline getirme süreci yani öğütme kabı, KNT / polipropilen kompozit toz hazırlamak için kullanıldı (Xia ve ark., 2004). Bu toz, daha

sonra homojen bir bileşik elde etmek için ikiz merdaneli çiğneme ile eriyik halinde karıştırıldı. KNTlerin uzunluğu, birkaç mikrometreden ~500 nm düşürülmüştür.

3.2.3.5. Lateks teknolojisi yöntemi

Polimer matris içinde KNTlerin katılmasının yeni bir yaklaşım, lateks teknoloji kullanımına dayanmaktadır. Genellikle sulu bir ortam içinde lateks, ayrı polimer parçacıklarının bir koloidal (homojen görünümlü heterojen karışım) karışımıdır. Bu teknolojiyi kullanarak, emülsiyon polimerizasyonuyla üretilen veya emülsiyon biçiminde sunulabilen polimerlerin çoğunda ÇCKNT ve TCKNTlerin dağıtılması mümkündür. İn situ polimerizasyon sisteminin aksine bu teknikte KNTlerin eklenmesi polimer sentezlendikten sonra gerçekleşir. İşlemin ilk adımı, sulu yüzey aktif madde çözeltisi içinde KNTlerinin, (demet TCKNTler) pul pul dökülmesi ya da dağıtılması/dengelenmesiyle (dolaşık ÇCKNTler) oluşur. Bu polimer lateksiyle yüzey aktif madde ile muamele edilmiş KNTler kararlı bir dağılımın karıştırılması takip eder. Dondurarak kurutma ve ardından eriyik-işlemeden sonra polimer matris içinde dağılmış KNTlerden oluşan nanokompozit elde edilebilir (Grossiord ve ark., 2006; Moniruzzaman ve Winey, 2006).

Bu tekniğin avantajları açıktır: tüm süreç kolay (çünkü temel olarak iki sulu bileşenlerin basit bir karışımdan oluşur), çok yönlü, tekrarlanabilir ve güvenilirdir ve oldukça viskoz polimer matris içinde teker teker KNTlerin yerleştirilmesini sağlar. KNTlerin dağılımı için kullanılan çözücü sudur bu nedenle süreç, çevre dostu, güvenilir ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Günümüzde polimer lateksi endüstriyel olarak geniş bir ölçek üretilir ve bu sektör olgunlaştırılır. Süreci nispeten kolay olduğundan, bu tekniği kullanarak KNT/polimer nanokompozitlerin üretimini arttırmak için umudu çok parlaktır.

3.2.3.6. Kimyasal fonksiyonelleştirme

KNT/polimer nanokompozitlerin performansı matris içindeki KNTlerin dağılıma ve KNT ile polimer arasındaki ara yüzey etkileşimlerine bağlıdır. Bununla birlikte KNT cidarlarındaki karbon atomları kimyasal açıdan kararlıdır. Sonuç olarak KNTlerle takviye edilen hareketsizdir ve KNT/matris ara yüzeyi boyunca etkili yük transferi sağlayamaz, esas olarak Van der Waals etkileşimleriyle çevredeki matris ile etkileşime

girebilir. Bu nedenle önemli çalışmalar, KNTlerin yüzey özelliklerini değiştirmek için yeni yöntemler geliştirmeye yönlendirilmiştir.

Kimyasal fonksiyonelleştirme, KNTlerin karbon (C) yapı iskelesi üzerine fonksiyonel birimlerin kovalent bağ dayanmaktadır. Kovalent bağ tüplerin uçlarında veya yan çeperlerinde gerçekleştirilebilir. Doğrudan kovalent yan çeperlerini fonksiyonlandırmalar, sp^2 den sp^3 melezleme ve grafen tabakasındaki π-çekim sisteminin eşzamanlı kaybı değişikliğinden kaynaklanmaktadır. Bu işlem flor gibi yüksek bir kimyasal reaksiyonun bazı molekülleriyle reaksiyona sokmak suretiyle yapılabilir.

Kusur fonksiyonlandırmalar, KNTlerin kovalent fonksiyonelleştirilmesi için başka bir yöntemdir. Bu işlem, KNTlerde kusurlu kısımların kimyasal dönüşümünden yararlanılmaktadır. Kusurlu kısımlar, altıgen grafen çerçevesinde beşgen ya da yedigen düzensizliklerde, yan çeperlerin açık uçları ve / veya delikleri olabilir. Oksijenli kısımlarda kusur olarak kabul edilebilirler. Kusurlar HNO_3, H_2SO_4 ya da bunların bir karışımı gibi güçlü asitlerle veya $KMnO_4$, ozon, reaktif plazma gibi güçlü oksidanlarla bir oksidatif işlem ile hem KNTlerin açık uçlarında hem de yan duvarlarda oluşturulabilir. Oksidanlar tarafından oluşturulan KNTlerin kusurlarına bir karboksilik asit (-COOH) ya da hidroksil (-OH) grubunun bağlanması ile dengelenir. Bu işlevsel gruplar kimya bakımından zengin ve KNTler silanlama, polimer aşılama, esterleştirme, sülfürleme, alkilasyon ve arilasyon gibi ve hatta bazı biyomoleküllerde daha başka kimyasal reaksiyonlar için öncüler olarak kullanılabilir (Ma ve ark., 2006; Sham ve Kim, 2006; Stephenson ve ark., 2006; Wang ve ark., 2009). Bu şekilde fonksiyonelleştirilmiş KNTler, KNTlerin hidrofobik yapısı polar grupların eklenmesi sebebiyle hidrofilik bir şekle dönüştürüldüğünden dolayı birçok organik çözücü içerisinde çözünür. Kimyasal olarak fonksiyonelleştirilmiş KNTler birçok polimer ile güçlü arayüzey bağlar üretebilir ve KNT esaslı nanokompozitlerde yüksek mekanik ve fonksiyonel özellikler sağlayabilir.

3.2.3.7. Fiziksel fonksiyonelleştirme

Kovalent yöntemiyle KNTlerin fonksiyonelleştirilmesi KNT yüzeyi üzerinde yararlı işlevsel gruplar sağlayabilir. Bununla birlikte bu yöntemlerin iki büyük dezavantajı vardır: birinci olarak özellikle zarar veren ultrasonikasyon süreciyle birlikte fonksiyonelleştirme reaksiyon sırasında, çok sayıda kusurların kaçınılmaz olarak KNT

yan çeperleri üzerinde oluşturulur ve bazı aşırı durumlarda KNTler daha küçük parçalar halinde parçalanır. Bu zararlı etkiler, nanotüplerde π elektron sisteminin bozulması gibi KNTlerin mekanik özelliklerinde ciddi bozulma ile sonuçlanabilir. π Elektronların bozulması, kusurlu kısımları elektronların ve KNTlerin elektriksel ve termal iletkenlikleri için sorumlu titreciklerin saçılması nedeniyle KNTlerin iletim özellikleri için zararlıdır. İkinci olarak yoğunlaştırılmış asitler ya da kuvvetli oksitleyici maddeler genellikle çevre dostu olmayan KNT fonksiyonelleştirme için kullanılmaktadır. Bu nedenle birçok çabalar, KNT yapısının daha az hasar ve düşük maliyeti, kullanımın elverişli olan gelişen yöntemler ileri sürülmüştür.

Kovalent olmayan fonksiyonelleştirme nanotüplerin arayüzey özelliklerinin ayarlanması için alternatif bir yöntemdir. poli (fenilen vinilen) ya da polistiren gibi polimerlerin mevcudiyetinde KNTlerin süspansiyonu, KNTlerin süpermoleküler kompleksler oluşturmak üzere polimerin çevresinde KNTlerin sarılmasına yol açar. Polimer sarma işlemi, van der Waals etkileşimleri ve aromatik halkalar içeren polimer zincirleri ve KNTler arasındaki π-π yığma ile elde edilir (Hill ve ark., 2002).

Polimerlerin yanı sıra yüzey aktif maddeler de KNTlerin fonksiyonelleştirilmesi kullanılmıştır. Çeşitli çalışmalarda KNTlerin dağılabilirliği ve diğer özelliği yüzey aktif maddenin etkilerini araştırmak için katkıda bulunmuştur (Kim ve ark., 2007; Yu ve ark., 2007; Geng ve ark., 2008). Daha önce çalışılan yüzey aktif maddeleri şunlardır:

i. İyonik olmayan yüzey aktif maddeleri,
ii. İyonik yüzey aktif maddeleri,
iii. Katyonik yüzey aktif maddeleri.

3.3. Elektro-eğirme Yöntemiyle Nanokeçe Üretimi

Elektro-eğirme polimerler, kompozitler ve seramikler gibi çok çeşitli materyallerden çok küçük elyaflar oluşturmak için kullanılan basit ve etkili bir üretim tekniğidir. Bu teknik, elektriksel olarak yüklenmiş sıvı polimerin topraklanmış bir yüzey üzerinde sürekli elyaf formunda konumlanması esasına dayanır (Andrady, 2008). Polimer esaslı nanoelyaf üretimi için en etkin yöntem elektro-eğirme yöntemidir. Bu yöntemle pek çok polimerden çapları 3 nm ’den 1 μm ve üzerine kadar değişen kalınlıklarda sürekli nanoelyaflar elde edilmektedir (Huang ve ark., 2003).

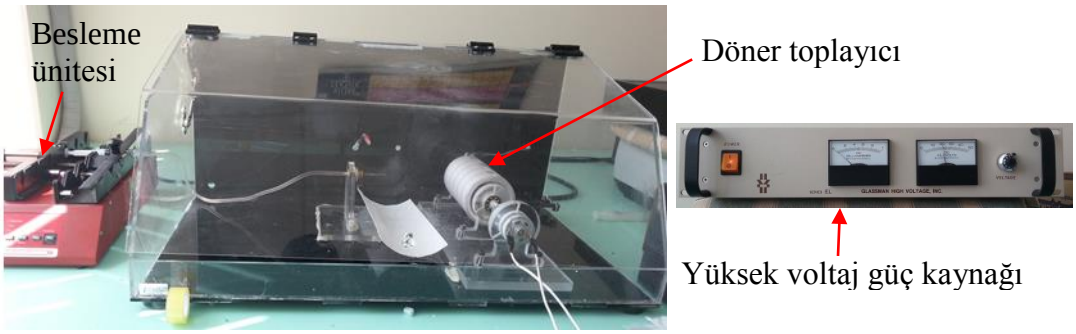
Taylor tarafından geliştirilen teoride bir elektrik alan içindeki viskoz damladan ince elyafların oluşması, elektriksel kuvvetler tarafından yüklenen sıvı yüzeyindeki maksimum kararsızlıktan dolayı gerçekleştiği açıklanmıştır. Yüksek voltajlarda küresel bir damla oluşarak kritik gerilmede viskoz damlanın yarı küresel şekli bozulur ve jet oluşumundan önce koni şeklini alır. Elektriksel kuvvetlerin etkisi altında, viskoz akışkanın yüzey kıvrımlığı değişir. Bu sırada yüzey gerilimi elektriksel kuvvetlere karşı koyan tek kuvvettir. Taylor'un çalışması, elektrik alan içerisindeki damlacığın davranışının anlaşılmasını sağlamış ve daha sonra geliştirilen teknikler için faydalı olmuştur (Kozanoğlu, 2006).

1966 yılında Simons, metal ızgaralar kullanarak polikarbonat, poliüretan gibi termoplastiklerden farklı şekillerde düzensiz elyaf yoğunluklarında nanoelyaflı keçelerin üretimini gerçekleştirmiştir (Üstündağ, 2009).

3.3.1. Elektro-eğirme üretim yöntemi

Eğirme, ipliği burkup ince, mukavim, yönlenmiş uzun iplik elde etmek için kullanılan yöntemdir. Koyun, keçi gibi yün veren hayvanlardan elde edilen doğal fiberlerin hazırlık işlemleri yapıldıktan sonra, elle bükülerek uzun iplikçik yapılır. Bu iplikçikler daha sonra eğirgeç adı verilen bir alete sarılarak tekrar bükülür. Hem mukavemet kazanır, hem de uzun iplikçik elde edilmiş olur. Elektro-eğirme, eğirme işleminin elektrik potansiyel farkı vasıtasıyla yapılmasıdır. Uzun ve sürekli nanoelyaf üretilebilmesi, işlemin tekrarlanabilmesi nedeniyle üzerinde en çok çalışılan ve geliştirilen nanoelyaf üretim tekniğidir (Selbes, 2013).

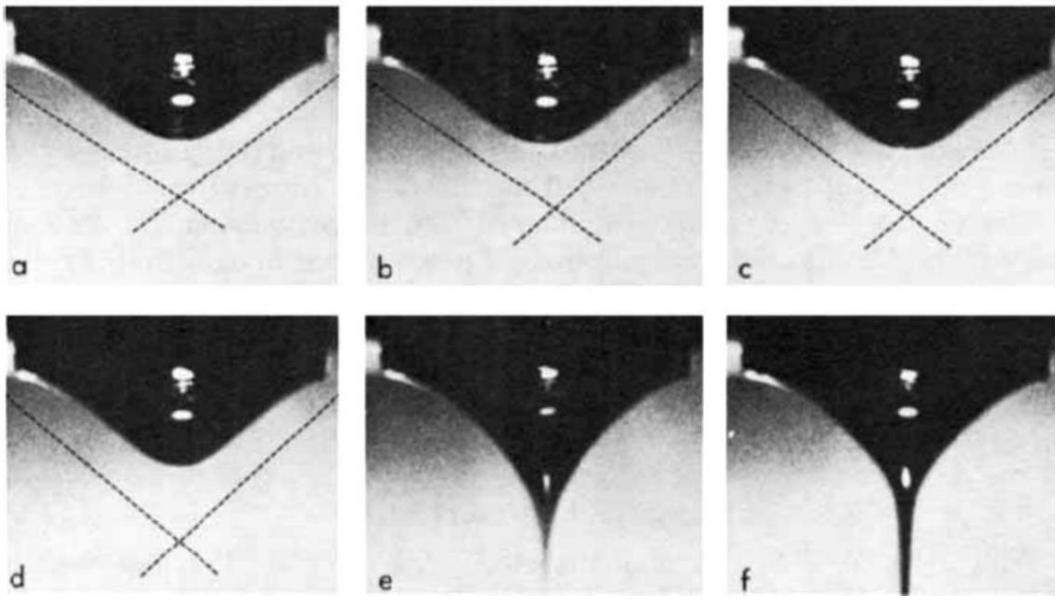
Şekil 3.16'da görüldüğü gibi elektro-eğirme sisteminin temelde 3 bileşeni vardır: (i) yüksek voltaj güç kaynağı, (ii) kapiler tüp ve (iii) metal malzemeden yapılmış bir toplaç.



Şekil 3.16. Elektro-eğirme sistemi

Yüksek voltaj elde etmek için genellikle, 1-100 kV ve 0.1-100 mA arasında AC/DC akım güç kaynağı kullanılır. Yüksek voltaj güç kaynağı, elektro-eğirme için gerekli olan kuvveti sağlamak ve işlemi sürdürebilmek için kullanılmaktadır. Besleme ünitesi, polimer çözeltisini belirli bir debide lüleye göndermek için kullanılır. Polimer çözeltisinin bulunduğu hazne ve ucunda lüleden (ince boru) oluşur. Lüle genellikle güç kaynağının negatif kutbuna bağlanır. Toplayıcı genellikle güç kaynağının pozitif kutbuna bağlanır ve topraklanır.

Bu teknikte, polimer uygun bir çözücüde çözülür ve ucunda küçük bir delik bulunan kapiler tüp (cam bir pipet veya şırınga) içine yerleştirilir. Daha sonra polimer çözeltisi ile kapiler tüpün karşısında bulunan bir toplayıcı levha veya döner toplaç arasına 50 kV"a kadar gerilim uygulanır. Besleyici ünitedeki kapiler tüpün ucunda asılı durumda duran polimer damlası, yüzey geriliminin uyguladığı kuvvetlerden dolayı, kritik bir voltaj değerine kadar, küresel bir biçimde bulunur. Uygulanan potansiyel fark bir eşik değerine ulaştığı anda, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi kuvvetlerine eşitlenir. Bu noktada polimer damlası şekil değiştirerek koni biçimini alır. Bu koniye Taylor konisi denir. Şekil 3.17'de polimer damlasının artan voltaj etkisiyle yarı küresel damladan Taylor konisine geçişi, Taylor konisindeki şekli ve Taylor konisinden bir jet halinde çıkısı verilmiştir.



Şekil 3.17. Artan voltajın etkisi ile polimer damlacığının taylor konisi formuna geçişi ve jet oluşumu, Taylor Konisi açılarına göre (a) 110°, (b) 107°, (c)104°, (d)100°, (e) kritik voltaj seviyesinde iken polimer jetinin fışkırması, (f) kritik voltaj değerinden sonraki polimer jeti (Larrondo ve Manley, 1981)

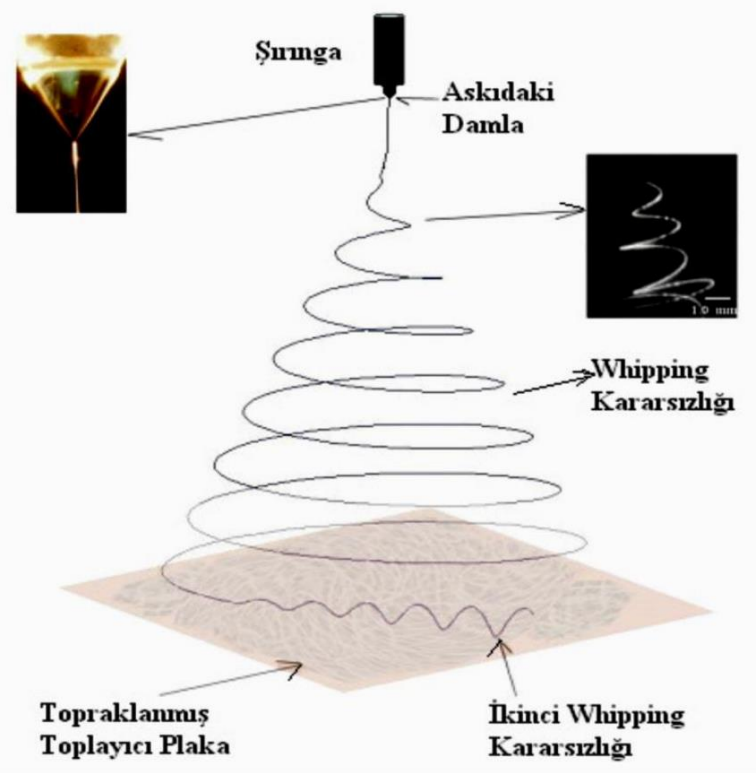
Polimer damlası (e) Taylor konisi halini aldıktan sonra voltajdaki çok küçük bir artışla birlikte koni ucundan bir jet fışkırır. Jet toplayıcı levha ile metal iğne ucu arasında ilerlerken farklı yollar izler. Yüklenen jet Taylor konisinden çıktıktan sonra belli bir mesafede kararlı bir şekilde hareket eder. Daha sonra jette kararsızlık hali belirir. Kullanılan polimerin çözeltisi veya eriyiğinin özelliğine ve sistem değişkenlerine bağlı olarak değişebilen üç kararsızlık hali mevcuttur. Jet bu kararsızlık hallerinden sadece birini gösterebileceği gibi üç kararsızlık halini de gösterebilir. Bu kararsızlık halleri;

i) Klasik Rayleigh kararsızlığı

ii) Eksenel simetrik elektrik alan akımlanması

iii) Whipping kararsızlığı.

Elektro üretim işleminde en çok görünen kararsızlık hali whippingdir. Whipping oluşumunun nedeni, jet yüzeyindeki yüklerin karşılıklı olarak birbirlerini itmesi ile meydana gelen ve yüklerin bir arada olamamalarından dolayı jette merkezden radyal bir şekilde tork oluşmasıdır. Jet toplayıcı plakaya yaklaştığında ise ana jetten ayrılan küçük jetler meydana gelir. Bu küçük jetlerin oluşmasının nedeni ise radyal yüklerin birbirini itmesi sonucu ana jetten ayrılması olarak izah edilmiştir. Jet yeterince inceldiğinde ve viskoelastik kuvvetler yeterince sönümlendiğinde yeni whipping kararsızlıkları oluşur. Bu kararsızlık haline "ikinci whipping kararsızlığı" denir. Bu olay Şekil 3.18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Elektro-eğirme sürecinde Whipping Kararsızlığı ve Taylor Konisi

Elektro üretim işlemini ilgilendiren iki kuvvet dengesi mevcuttur. İlki prosesin sürdürülmesi için gerekli olan kuvvet sistemi, ikincisi ise işlemin önünde engel teşkil eden kuvvet sistemidir. İlk kuvvet sistemi, damlanın kararlılığını bozarak damlanın deformasyona uğrayıp, damladan ince bir jet oluşmasına yardım eder. İkinci kuvvet sistemi ise sıvının uzayıp akmasına engel olarak damlayı sabitleme eğilimine sürükler (Erdal, 2013).

3.3.2. Elektro-eğirme işlemlerinin modellemesi

Elektro-eğirme işlemlerindeki aşamalar şu şekilde ifade edilebilir (Şekil 3.19):

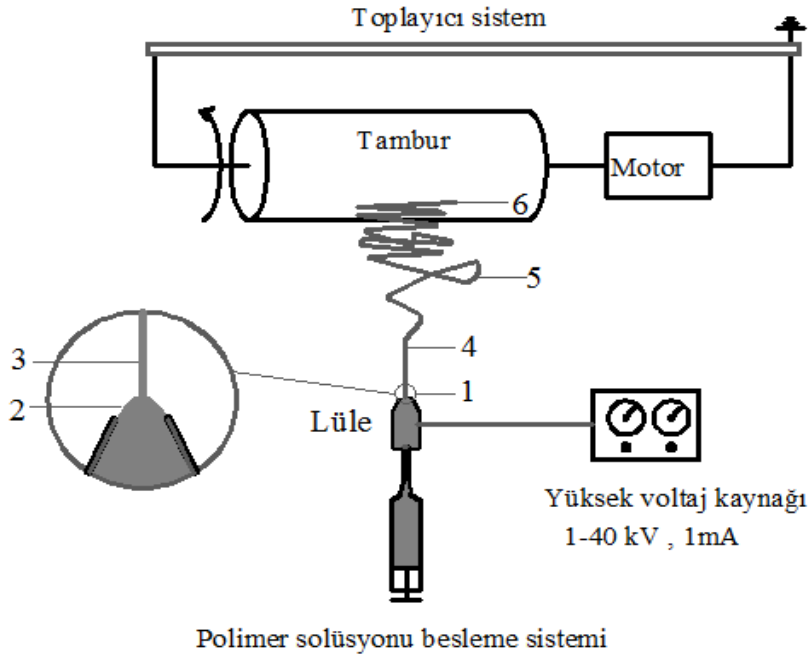
1. Damlacık oluşumu,
2. Taylor konisi oluşumu,
3. Elektro-eğirme jetinin oluşumu,
4. Kararlı bölgede jetin uzaması,
5. Kararsız bölgenin oluşması (whipping instability),
6. Fiber formunda katılaşması.

3.3.2.1. Damlacık oluşumu

Elektro-eğirme metodunun ilk aşamasında eriyik ya da çözelti formundaki sıvı polimer bir lüle ucundan çok düşük hızlarda beslenir. Herhangi bir elektrik alan uygulanmadığı durumda kılcal boru ucunda bir damlacık oluşur ve yer çekiminin etkisi ile damlacık düşer. Bu durumda damlacığa etki eden sadece iki kuvvet vardır. Bunlardan biri sıvının yüzey gerilimi diğeri yer çekimi kuvvetidir (Andrady, 2008). Polimer beslemek için genellikle perküzyon pompası kullanılır. Perküzyon pompasında polimer çözeltisi besleme hızı mL/dak. veya mL/h şeklinde ayarlanır.

3.3.2.2. Taylor konisi oluşumu

Kılcal boru ucunda asılı duran çözelti damlacığı, yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi ile kritik bir voltaj değerine kadar küresel formda bulunur (Şekil 3.17 a,b,c). Uygulanan voltaj kritik bir değere ulaştığı anda, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi ve yerçekimi kuvvetlerine eşitlenir. Bu noktada polimer damlası şekil değiştirerek koni biçimini alır, koni açısı 100°'dir (Şekil 3.17 d). Taylor, elektrik alan içindeki viskoz sıvının bu açıda konik formdayken yüzey gerilimi ile elektrostatik kuvvetlerin denge halinde olduğunu göstermiştir (Huang ve ark., 2003). Farklı çözelti ve eriyikler için bu değer farklı olabilir (Andrady, 2008).



Şekil 3.19. Elektro-eğirme işleminin aşamalarının şematik şekli

3.3.2.3. Elektro-eğirme jetinin oluşumu

Polimer damlası Taylor konisi halini aldıktan sonra gerilimdeki çok küçük bir artışla birlikte koni ucundan bir jet fışkırır (Şekil 3.17. e ve Şekil 3.19).

3.3.2.4. Kararlı bölgede jetin uzaması

Polimer çözeltisine uygulanan voltaj, kritik voltaj değerini geçtiği anda aniden jet başlangıcı gerçekleşir (Şekil 3.17 f). Oluşan polimer jetinin yüzeyindeki yüklerin coloumb itme kuvvetleri, jeti toplayıcıya doğru uzatan eksenel bir bileşene sahiptir. Yapılan akışkan hızı ölçümleri göstermiştir ki, Taylor konisinden uzaklaştıkça jet hızının yanı sıra jet hızının değişimi de artış göstermektedir. Yani Taylor konisinden baş gösteren jet, gittikçe hızlanarak bir müddet lineer bir yolda seyretmektedir. Bunun sonucu olarak jet çapı, jetteki uzama ve çözücünün buharlaşmaya başlamasına bağlı olarak hızla düşmektedir. Jetin incelmesi ile jetin birim alandaki yüzey yükü azalırken birim kütledeki yüzey alanı artmaktadır (Andrady, 2008).

3.3.2.5. Kararsız bölgenin oluşması

Whipping kararsızlığı da denen kararsız bölgenin oluşumu sırasında polimer jeti, izlediği kararlı yolun ardından kararsız bir bölgeye girer. Kararsız bölge, Şekil 3.17'de ve Şekil 3.19'da (5) numarayla gösterilmiştir

3.3.2.6. Fiber formunda katılaşması

Polimer jeti kararsız bölgede ilerlerken jet alanının inanılmaz derecede artmasıyla kütle hızları da çok artmakta ve bu esnada çözelti içerisindeki çözücünün buharlaşması gerçekleşmektedir. Jetin kararsızlık bölgesinden geçtiği süreç aynı zamanda çözücünün buharlaşma hızı ile kontrol edilir. Yüksek buharlaşma hızında bir çözücü kullanıldığında jetin uzama viskozitesi, deformasyonu sağlamak için fazla yüksek kalacak, whipping kararsızlığı kısa sürecek ve buna bağlı olarak daha kalın nanoelyaflar elde edilecektir. Kullanılan çözücünün uçuculuğu, fiber çapını kontrol

etmede anahtar rol oynar. Uygun bir çözücünün seçimi, uygun işlem parametrelerinde çok küçük nanoelyafların elde edilmesini sağlar (Andrady, 2008).

3.3.3. Elektro-eğirme işlemine etki eden faktörler

Elektro-eğirme işleminde üretilen fiberlerin çapı, morfolojisi, konumlaması, dağılımı gibi istenen özellikleri sağlayabilmek için ancak işlem parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Fakat işleme etki eden çok sayıda parametre olduğundan işlem kontrolü güçtür. Elektro-eğirme işlemine etki eden parametreler başlıca üç bölümde incelenebilir(Çizelge 3.7). Bunlar çözelti parametreleri, işlem parametreleri ve ortam parametreleridir.

Çizelge 3.7. Elektro-eğirme işlemine etki eden parametreler

Çözelti Parametreleri	Proses Parametreleri	Ortam Parametreleri
Molekül ağırlığı ve viskozite	Uygulanan voltaj	Rutubet
Yüzey gerilimi	Çözelti besleme hızı	Atmosfer tipi
Elektrik iletkenliği	Çözelti sıcaklığı	
	Toplayıcı tipi	
	Lüle çapı	
	Toplayıcı-lüle mesafesi	

3.3.3.1. Çözelti parametreleri

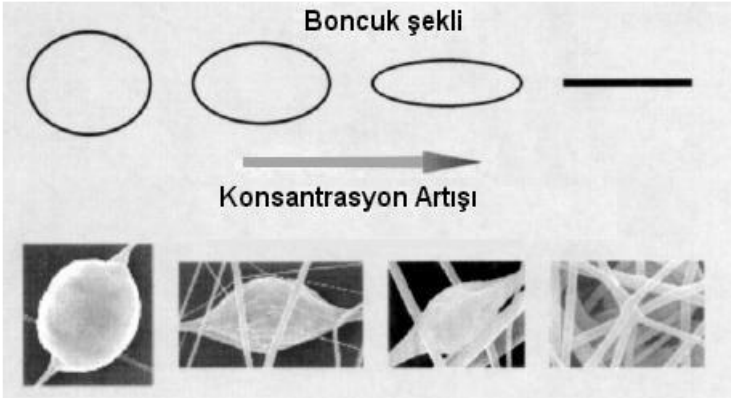
Polimer çözeltisinin özellikleri, elektro-eğirme işleminin ve oluşan elyaf özelliklerini etkileyen en önemli parametredir. Çözelti parametreleri, polimerin molekül ağırlığı, yüzey gerilimi, polimer çözeltisinin elektrik iletkenliği ve dielektrik özelliğidir.

3.3.3.1.1. Molekül ağırlığı ve viskozite

Çözelti viskozitesini etkileyen faktörlerden biri, polimerin molekül ağırlığıdır. Aynı polimerin farklı molekül ağırlığındaki numuneleri çözüldüğünde genel olarak, yüksek molekül ağırlığına sahip polimerden elde edilen çözelti, düşük molekül ağırlığına sahip çözeltisinden daha yüksek viskoziteye sahiptir. Yani polimerin molekül ağırlığı arttıkça, çözeltinin viskozitesi de artar (Ramakrishna ve ark., 2005).

Molekül ağırlığının artırılmasına benzer olarak, konsantrasyonun yükselmesi de polimer zincir karmaşıklığının artmasına ve böylece elektro-eğirme sürecinde jet

sürekliliğinin sağlanmasına sebep olur. Konsantrasyondaki artışla, elde edilen nanoelyaflardaki boncuk oluşumu azalırken boncuk şekilleri de küresel formdan yassı forma doğru değişirler (Şekil 3.20) (Kozanoğlu, 2006). Ancak buna rağmen elektro-eğirme işlemi için minimum polimer zinciri karmaşıklığı ve dolayısıyla minimum viskozite gereklidir. Çok yüksek viskozite, çözeltinin düzeden pompalanmasını zorlaştıracaktır. Ayrıca çok yüksek viskozite, daha elektro-eğirme başlamadan çözeltinin lülenin ucunda kurumasına sebep olabilmektedir (Ramakrishna ve ark., 2005).



Şekil 3.20. Çözelti konsantrasyondaki artışla boncuk şekli arasındaki ilişki (Kozanoğlu, 2006)

Düşük viskozitelerde, düşük zincir karmaşıklığı vardır ve elektro-eğirme esnasında jet üzerinde yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi baskındır. Bu nedenle sürekli bir jetin oluşmaması nedeniyle boncuk oluşumları görülebilir. Viskozitedeki artış polimerin zincir karmaşıklığını artırarak elektro-eğirme işleminde sürekli jet oluşumunu sağlar (Üstündağ ve Karaca, 2009). Artan viskozite ile fiber çapları da artar. Bu durum muhtemelen çözeltinin jetteki yükler nedeniyle gerilmeye karşı direncinin artmasına bağlıdır (Ramakrishna ve ark., 2005).

3.3.3.1.2. Yüzey gerilimi

Elektro-eğirmenin başlayabilmesi için, elektriksel olarak yüklenen çözeltinin, yüzey gerilimini yenmesi gerekir. Yüzey gerilimi, bir sıvının birim kütlesindeki yüzey alanını azaltma etkisine sahiptir. Yüzey gerilimine bağlı olarak serbest çözücü moleküllerinin konsantrasyonu yüksek olduğunda, çözücü moleküllerinin bir araya toplanma ve küresel bir şekil alma eğilimi artacaktır. Bu durumda, polimer jeti toplayıcı

plakaya doğru ilerlerken yüzey gerilimi, jet boyunca boncuklar oluşmasına neden olabilir. Yüksek viskozite, çözücü ve polimer molekülleri arasında daha fazla etkileşim anlamına gelir ve böylece yüklerin etkisi ile çözelti gerildiğinde çözücü molekülleri, karmaşık polimer moleküllerine yayılmaya yönelecek ve bu şekilde yüzey geriliminin etkisi altında çözücü moleküllerinin bir araya toplanma eğilimi azalacaktır.

Düzgün nanoelyafların oluşumunu desteklemek için elektro-eğirme çözeltisine etanol gibi düşük yüzey gerilimine sahip çözücüler ilave edilebilir. Yüzey gerilimini azaltmanın diğer bir yolu da, çözeltiye yüzey aktif madde ilave etmektir. Yüzey aktif madde ilavesi ile daha homojen fiberler elde edilebilir. Çözeltiye, ince toz halinde, çözünmeyen bir yüzey aktif madde ilave edildiğinde dahi, fiber morfolojisi geliştirilir (Ramakrishna ve ark., 2005).

3.3.3.1.3. Elektrik iletkenliği

Elektro-eğirme işleminde çözelti, yüzeyindeki yüklerin itmesi sayesinde gerilir. Eğer çözeltinin iletkenliği artırılırsa, elektro-eğirme jetinde daha fazla yük taşınabilir. Çözeltinin iletkenliği, iyon ilavesi ile artırılabilir. Bunun dışında, pek çok ilaç ve protein, suda çözündüğünde iyon oluşturur. Eğer çözelti tamamen gerilmezse, boncuklanmalar oluşacaktır. Bu nedenle, çözeltiye çok az miktarda tuz ya da polielektrod ilave edildiğinde, çözeltinin taşıdığı yükler artacak ve çözeltinin gerilmesini artıracaktır. Sonuç olarak, düzgün fiberler oluşacaktır. Çözeltinin gerilmesinin artırılması, daha küçük çaplarda fiberler elde etmeyi sağlar. Ancak fiber çapındaki düşüşün bir limiti vardır. Çözelti gerilirken, yüklerin coloumb kuvvetine karşı, büyük bir viskoelastik kuvvet oluşacaktır.

İyon varlığı ile çözelti iletkenliği artırıldığında, elektro-eğirmenin oluşması için gereken kritik voltaj da düşer. Artan yüklerin diğer bir etkisi de, daha yüksek whipping kararsızlığıdır. Bunun sonucu olarak da fiberlerin toplanma alanı artar. Bu durumda jet yolu artacağından daha küçük fiberler elde edilir (Ramakrishna ve ark., 2005).

3.3.3.2. İşlem Parametreleri

Elektro-eğirme işlemini etkileyen işlem parametreleri, çözelti özelliğini etkileyen ikinci önemli parametre grubudur. Proses parametreleri uygulanan voltaj,

çözelti besleme hızı, çözelti sıcaklığı, toplayıcı tipi, lüle çapı ve lüle-toplayıcı arası mesafedir.

3.3.3.2.1. Uygulanan voltaj

Voltaj uygulandığında, elde edilen elektrik alan, jetin gerilmesine ve hızlanmasına etki eder. Daha yüksek voltaj uygulandığında, jet içindeki coloumb kuvvetlerinin de fazla olmasına bağlı olarak, çözelti daha fazla gerilecektir. Bu durum, fiber çapının azalmasını sağladığı gibi aynı zamanda çözücünün daha hızlı buharlaşmasına neden olarak daha kuru fiberlerin elde edilmesini sağlar. Düşük viskozitelerde çözelti kullanıldığında yüksek voltaj uygulanması, elektro-eğirme süresince ikincil jet oluşumunu sağlayabilir. Bu da, fiber çapında azalmaya neden olur. Fiber çapını etkileyebilecek bir diğer faktör de, elektro-eğirme jetinin uçuş süresi yani havada ilerleme süresidir. Uzun bir uçuş süresi, toplayıcıya ulaşmadan önce, fiberlerin gerilmesi ve uzaması için zaman sağlar (Ramakrishna ve ark., 2005).

3.3.3.2.2. Çözelti besleme hızı

Besleme hızı, elektro-eğirme için kullanılabilir çözelti miktarını tanımlar. Taylor konisini kararlı tutmak için belirli bir gerilme ve besleme hızı söz konusudur. Besleme hızı arttığında, düzeden çekilen çözeltinin hacmi arttığından fiber çapında ya da boncuk boyutlarında artış gerçekleşir. Ancak, yüksek besleme hızına bağlı olarak fiber çapındaki artışın da bir limiti vardır (Ramakrishna ve Viraraghavan, 2005; Ramakrishna ve ark., 2005)

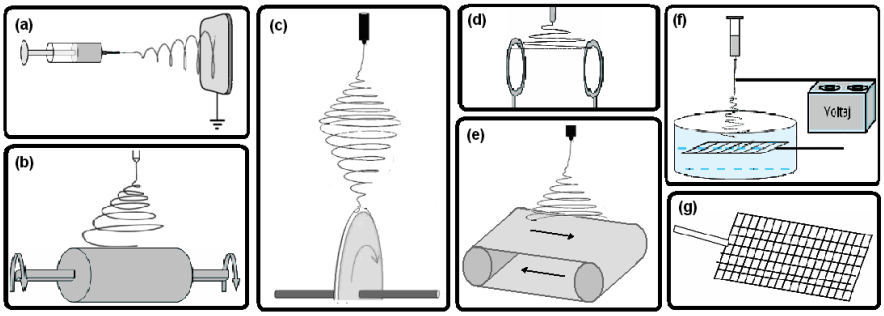
3.3.3.2.3. Çözelti sıcaklığı

Çözelti sıcaklığı, hem buharlaşma hızının artmasında, hem de çözelti viskozitesinin düşmesinde etkilidir. Düşük viskozitelerde coloumb kuvvetleri, çözelti jeti üzerinde daha fazla gerilme kuvveti yaratacağından daha düzgün ve ince fiberler elde etmek mümkün olacaktır. Ayrıca, çözelti sıcaklığının artması ile polimer moleküllerinin hareketliliği arttığından coloumb kuvvetlerinin çözelti jeti üzerindeki çekim etkisi daha fazla olmaktadır. Demir ve ark. (2002), PU nanoelyaflarının elektro-eğirme ile elde edilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, yüksek çözelti sıcaklığında elde

edilen fiberlerin oda sıcaklığında elde edilen fiberlere nazaran daha düzgün ve homojen olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek çözelti sıcaklıklarında elektro-eğirme işleminin daha hızlı gerçekleştiğini ve bu durumun endüstriyel uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Ancak enzim, protein gibi biyolojik materyallerin elektro-eğirme çözeltilerinde yüksek sıcaklık uygulamak, bu malzemelerde fonksiyon kaybına sebep olabilmektedir.

3.3.3.2.4. Toplayıcı tipi

Toplayıcı malzemesi kadar, şekli de elektro-eğirme ve oluşan nanoelyafların yapısı üzerinde etkilidir. Yapılan çalışmalarda hareketli ve sabit pek çok farklı toplayıcı tasarımı uygulanmıştır. En sık kullanılan toplayıcı, alüminyum plakalardır. Bunun yanı sıra, metal ızgaralar, dönen tambur, dönen disk, taşıyıcı bant, üçgen çerçeve, paralel bilezik ve sıvı banyosu, elektro-eğirme ile oluşturulan nanoelyafları toplamak için kullanılan malzemeler arasındadır (Şekil 3.20) (Kozanoğlu, 2006).



Şekil 3.20. Elektro-eğirmede kullanılan bazı toplayıcı tipleri (a) sabit plaka, (b) dönen tambur, (c) dönen disk, (d) paralel bilezikler, (e) taşıyıcı bant, (f) sıvı banyo, (g) metal ızgara (Üstündağ, 2009)

Elektro-eğirmenin başlayabilmesi için besleme ünitesi ile toplayıcı arasında bir elektrik alan olmalıdır. Pek çok elektro-eğirme düzeneğinde bu elektrik alanı sağlayabilmek için toplayıcı olarak alüminyum folyo gibi iletken bir malzeme kullanılır ve bu malzeme elektriksel olarak topraklanır. Böylece besleme ünitesi ile toplayıcı arasında kararlı bir potansiyel fark oluşur (Andrady, 2008).

3.3.3.2.5. Lüle çapı

Çözeltinin çekim bölgesine beslendiği lüle, düze, iğne olarak adlandırılan kılcal boruların iç çapı, elektro-eğirme işlemi üzerinde etkiye sahiptir. Lüle çapının küçük olması daha ince fiberlerin oluşmasını sağlar. Lülenin iç çapı küçüldükçe ucunda oluşan damlacık daha küçük çapta olacağından damlacığın yüzey gerilimi artar.

Bu durumda aynı miktarda voltaj altında jetin başlayabilmesi için daha fazla coloumb itme kuvveti gerekir ve jetin ivmesi düşer. Dolayısıyla jetin toplayıcıya ulaşmadan önce havada ilerlediği ve gerildiği süre uzayacağından daha ince fiberler oluşur. Ancak çok küçük düze çapları çözeltinin püskürtülmesini zorlaştırarak tıkanmalara neden olur ve boncuk oluşumunu artırır (Ramakrishna ve ark., 2005).

3.3.3.2.6. Toplayıcı ile lüle mesafesi

Elektro-eğirme işlemi toplayıcı ile lüle arasındaki bölgede gerçekleşir. Bu bölgede lüleden çıkan jet incelerek, çözücü buharlaşır. . Lüle ile toplayıcı arasındaki mesafe değiştirilerek hem uçuş süresi hem elektrik alan kuvveti değiştirilmiş olur. Ayrıca, toplayıcı ile lüle arasındaki mesafe azaltıldığında elektrik alan kuvveti artacak ve dolayısıyla jet hızı yükselecektir. Böylece, polimer jeti toplayıcıya daha erken ulaşacaktır. Serbest nanoelyaf oluşumu için jetin uçuş süresi, çözücünün buharlaşmasına yetecek kadar uzun olmalıdır. Mesafe oldukça kısaldığında bu süre azalacak, çözücünün tamamı buharlaşmadığı için fiberlerin temas noktalarında yapışmalar görülecektir (Ramakrishna ve ark., 2005).

3.3.3.3. Ortam Parametreleri

Polimer jetinin bulunduğu ortamın nemliliği, atmosfer tipi ve basıncı, fiberlerin yapısı üzerinde etkili faktörlerdir. Ortamın yüksek nemi, özellikle uçucu bir çözücü ile hazırlanan çözeltilerin elektro-eğirmeden elde edilen fiberlerin morfolojisi üzerinde etkilidir. Literatürde ortamın bağıl nemi ile oluşan fiber çapları arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmalarda, nem arttıkça elde edilen fiber çaplarında da artış olduğu gözlemlenmiştir. Yani bağıl nemin artışı, jetin incelmesi için gereken elektrik alan kuvvetini azaltmaktadır (Kozanoğlu, 2006).

3.4. Analitik Yaklaşımlar

Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılar çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Yapıştırıcıyla bağlama genellikle kaynak, perçinleme ve cıvatalama gibi geleneksel yöntemlere göre daha düşük maliyet ve ağırlığa sahip olan yapılar sağlar. Örneğin bir cıvatalama bağlantısı cıvata, somun, rondela ve yapıştırılacak malzeme gibi pek çok bileşen parçaları yer alır. Ancak bir yapıştırıcıyla bağlama daha az bileşen parçaları vardır. Yapıştırıcıyla bağlama, aynı zamanda geleneksel olarak bağlantı malzemeleri ile karşılaştırıldığında, yapıştırıcının küçük birim hacminden dolayı ağırlık oranının dayanımında ve kalitesinde bir iyileşme ile iş verimliliğinde bir artış sunabilir. Bu yöntem özellikle ince malzemelerin birleştirilmesi için uygundur. Yapılarda yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıların güvenliğini sağlamak için, bağlantı üzerindeki gerilme dağılımlarını analiz etmek gereklidir.

3.4.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantıları

Bu çalışmanın amacı, literatürde mevcut tek taraflı bindirmeli bağlantılarında analitik modelleri incelemek ve bunların uygulanmasını kolaylaştırmak amacıyla elde edilen deneysel sonuçları ile her biri için uygulanabilirlik koşullarının doğruluğunu tespit etmek amacıyla karşılaştırmaktır. Tek taraflı bindirmeli bağlantılarında analitik modellemelerin uygulanması genellikle çok zahmetli ve bu yüzden modellerden sadece lineer elastik yapıştırıcılar seçilmiştir.

i. Basit lineer elastik analizler,
ii. Volkersen analizi,
iii. Goland and Reissner analizi,
iv. Adams and Peppiat analizi,
v. Hart-Smith analizi,
vi. Crocombe ve Bigwood analizi.

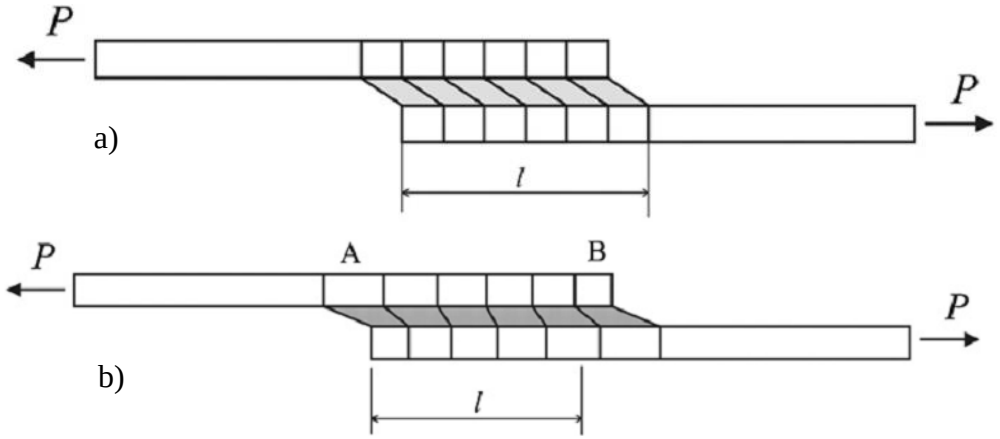
3.4.1.1. Basit lineer elastik analizler

En basit analiz pratikte en yaygın bağlantılardan biri olan tek taraflı bindirmeli bağlantılarında düşünmektedir. Bu analizde yapıştırıcı, sadece kayma yönünde deforme ve yapıştırılan malzemeler ise rijit olarak kabul edilir. Soyulma ve eğilme gerilmeleri

ihmal edilir. Şekil 3.21.a'da gösterildiği gibi, yapıştırıcının kayma gerilmesi (τ), üst üste binme uzunluğu boyunca sabittir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır (Owens ve Lee-Sullivan, 2000).

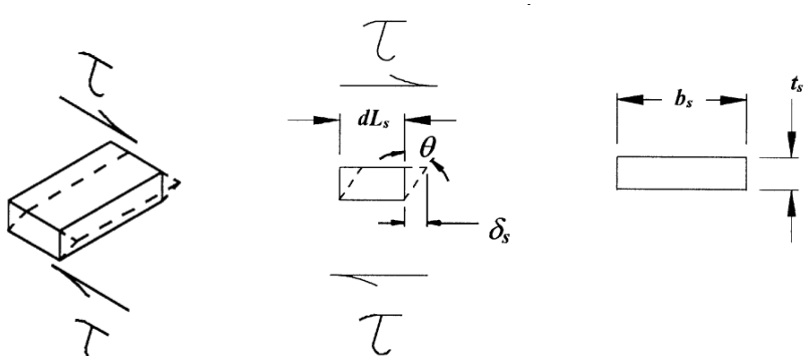
$$\tau = \frac{P}{bl} \tag{3.3}$$

burada P uygulanan kuvvet, b bağlantının genişliği, l ise üst üste bindirme uzunluğudur.



Şekil 3.20. Tek taraflı bindirmeli bağlantılarında yüklü deformasyon a) rijit ve b) elastik yapıştırılan malzemeler

Kayma gerilmesi değeri, yapıştırıcı tabaka üzerinde etkili olan ortalama kayma gerilmesi olarak yorumlanabilir. Bu analiz birçok sadeleştirme sayesinde çok gerçekçi değildir ama hala ASTM ve ISO standartları gibi birçok test durumlarda yapıştırıcı kesme mukavemetini hesaplamada alıntı için temeldir.



Şekil 3.21. Yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi

Şekil 3.21'de görüldüğü üzere yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi $\delta_s$olarak elde edilebilir.

$$\gamma = \tan\theta = \frac{\delta_s}{t_s} \tag{3.4}$$

burada γ, kayma birim şekil değiştirmesi; θ ,kayma düzlemi nedeniyle oluşan kayma açısı; δ_s, kayma düzlemine göre yapıştırıcının eksenel yer değiştirmesi ve t_s ise yapıştırıcının kalınlığıdır. Elastik şekil değişimi, kayma gerilmesi ve kayma modülü için,

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \tag{3.5}$$

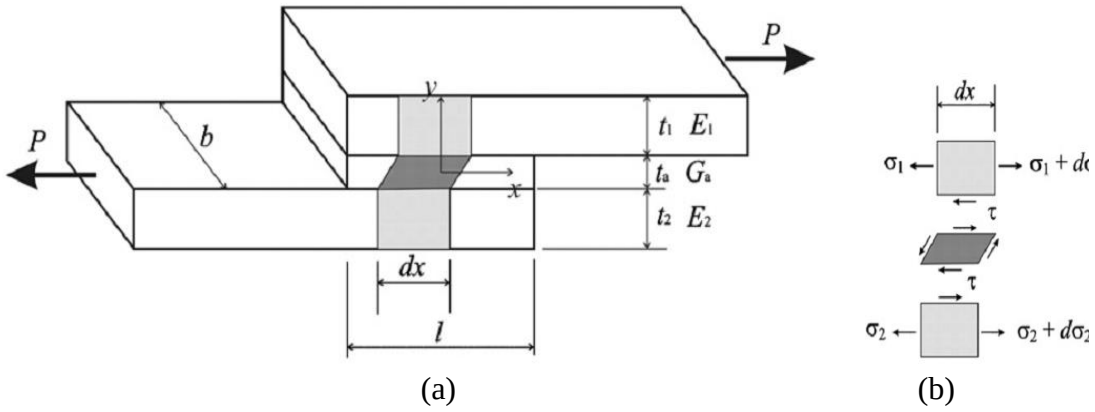
$$\tau = \frac{P}{A_{kayma}} \tag{3.6}$$

$$\delta_{s=\frac{t_s}{G}\tau} \tag{3.7}$$

burada τ, yapıştırıcının kayma gerilmesi; G, yapıştırıcının kayma modülü; A_{kayma} yapıştırıcının kayma alanı ($dL_s x B_s$ Şekil 3.21.) ve yapıştırılan malzemeye uygulanan çekme kuvvetidir.

3.4.1.2. Volkersen analizi

Volkersen (1938) analizi, Şekil 3.20. b'de diferansiyel kayma kavramı tanıtıldı. Yapıştırıcı yalnızca kaymayla deforme olduğu kabul edilmiştir ancak Şekil 3.22.'de görülebileceği gibi yapıştırılan malzemeler çekme gerilmesiyle deforme olabilir. Çünkü yapıştırılan malzemeler elastik ve rijit olmadığı kabul edilir.



Şekil 3.22. Volkersen tarafından tek taraflı bindirmeli bağlantının analizi: (a) Geometri ve (b) element diyagramı

Şekil 3.20. b'de üst yapıştırılan malzemede çekme gerilmesi A noktasında maksimum ve B (serbest yüzey) noktasında ise sıfıra iner, bu nedenle gerilme dereceli olarak A noktasından B noktasına azalmalıdır. Üst üste bindirme uzunluğu boyunca yapıştırılan malzemelerde gerilmenin azalması ve yapıştırılan malzeme/yapıştırıcı arayüzün sürekliliği, yapıştırıcı tabakada düzgün olmayan kayma şekil değişimi ve gerilmesi dağılımına neden olur.

Ancak bu analiz, tek taraflı bindirmeli bağlantılarda eksantrik yük yolunun neden olduğu eğilme etkisi hesaba katılmaz. Çözüm tek taraflı bindirmeli bağlantı yerine çift taraflı bindirmeli bağlantılarında daha iyi temsil eder. Çünkü çift taraflı bindirmeli bağlantılarında yapıştırılan malzemenin eğilmesi, tek taraflı bindirmeli bağlantı olduğu kadar yoğun değildir.

3.4.1.3. Goland and Reissner analizi

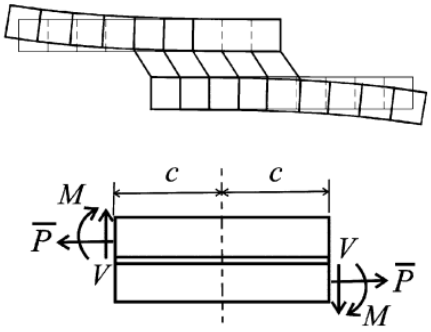
Şekil 3.23.'te gösterildiği gibi tek taraflı bindirmeli bağlantılarında eksantrik yük yolu, birim genişlik başına düşen uygulanan çekme yükü eğilme momentine (M) ve bağlantı uçlarına uygulanan enine kuvvete (V) neden olur. Bu nedenle eğilme momenti tatbik edilen çekme kuvvetlerinin doğrultu yoluna girme eğilimiyle yük hattının yönünü değiştirerek bağlantıyı döndürür. Bağlantı dönmeye başladığı zaman yapıştırılan malzemenin büyük sehim etkileri dikkate alınması gereken doğrusal olmayan geometrik bir problemdir ve eğilme momenti azalır.

Bu etkileri ilk dikkate alan Goland ve Reissner'dır(1944). Onlar üst üste bindirmenin uçlarındaki enine kuvvet (V) ve eğilme momentin (M) oluştuğu birim genişlik başına tatbik edilen çekme yükü(P) ile ilişkili bir eğilme momenti faktörü (k) ile enine kuvvet faktörü (k^{ι}) kullandılar ve aşağıdaki denklemlere göre:

$$M = k\frac{Pt}{2} \tag{3.8}$$

$$V = k^{\iota}\frac{Pt}{c} \tag{3.9}$$

burada t yapıştırılan malzemenin kalınlığı (t_1=t_2), ve c ise üst üste bindirme uzunluğunun yarısıdır. Bağlantı dönmüyorsa örneğin uygulanan yükler çok küçük, faktörler k ve k$^{\prime}$ yaklaşık olarak *1*'e eşit olur. Kuvvetin artmasıyla dönüyorsa k ve k$^{\prime}$ azalır ve sonuç olarak eğilme momenti ve enine kuvvette azalacaktır. Goland ve Reissner yapıştırılan malzemenin büyük sehim etkilerini dikkate alır ama yapıştırılan malzemeler sonsuz ince yapıştırıcı tabaka ile yekpare olduğunu varsaydı.



Şekil 3.23. Goland ve Reissner modeli

Üst üste bindirmenin uçlarınki yükleri belirlendikten sonra Goland ve Reissner düzlem şekil değiştirme problemin çözümünde yapıştırıcı tabakada, kayma ve soyulma gerilmeleri hesaplanmıştır.

3.4.1.4. Adams and Peppiat analizi

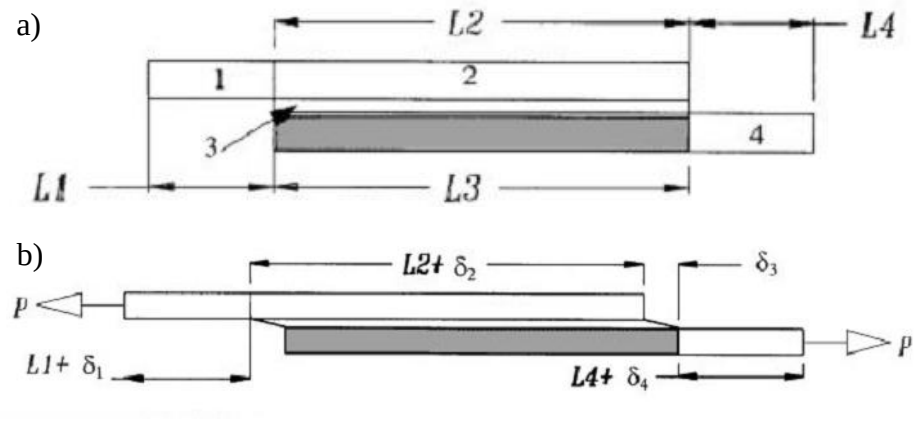
Şekil 3.24'te gösterildiği gibi tek taraflı bindirmeli bağlantılarında gerilme dağılımlarını dört ayrı bileşenler olarak modellemiştirler (Adams ve Peppiatt, 1974). Burada (i) 1 bileşen üst yapıştırılan malzemenin bağlanmamış uç bölgesidir; (ii) 2

bileşen üst yapıştırıcı malzemenin bağlanmış kısmı; (iii) 3 bileşen yapıştırıcı bağı ve (iv) 4 bileşeni alt yapıştırılan malzemenin bağlanmamış uç bölgesidir. 1 ve 4 bileşenler karşılaştırıldığında sabit çekme gerilmesi sahipken 2 bileşen düzgün olmayan bir çekme gerilmesi sahip olacaktır. 3 bileşen olan yapıştırıcı bağ tabakası, homojen olmayan bir çekme ve kayma gerilmelerine sahiptir.

Bağlantının toplam yer değiştirme miktarı, tek tek bileşenlerin yer değiştirme miktarlarının bileşkesi olarak hesaplanabilir,

$$\delta_{toplam} = \sum_{i=1}^{4} \delta_i \tag{3.10}$$

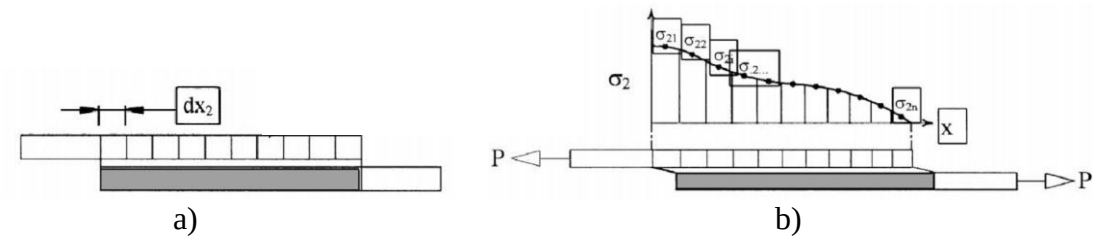
burada δ_{toplam} 4 bağlantı bileşenlerin toplam eksenel yer değiştirme miktarı; L1 orijinal uzunluğuyla 1 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_1; L2 orijinal uzunluğuyla 2 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_2; L3 orijinal uzunluğuyla 3 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_3 ve L4 orijinal uzunluğuyla 4 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_4'dır.



Şekil 3.24. Bağlantı modelinin ayrı ayrı bileşenlerine ayrılması (a) yüklenmemiş bileşenleri (b) gerilme yükünden dolayı yer değiştirme miktarı

1 bileşendeki % 100 olan çekme gerilmesi, Adams ve Peppiat tarafından sunulan tek taraflı bindirmeli bağlantılar için gecikmeli kayma analizleri uygun olarak kademeli olarak yapıştırıcıyla kayma yoluyla 2 bileşen boyunca birlikte aktarılır. Böylece 2 bileşend ' ' ekme gerilmesi, bileşenin sol ucunda en yüksek olduğu ve yavaş yavaş sağ ucunda ..... yaklaşırken bağın uzunluğu boyunca azalmaktadır. Çekme gerilmesi giderek azaldıkça yapıştırılan malzemenin de uzaması (Şekil 3.20.b ve 3.25.b'de gösterildiği gibi) azalacaktır. Böylece yapıştırılan malzemenin eksenel yer değiştirme

miktarı da kademeli olarak azalmayla sonuçlanacaktır. Özet olarak 2. Bileşenin net yer değiştirme miktarını hesaplamak için, parçalama tekniği kullanılmıştır.



a) b)

Şekil 3.25. 2. Bileşen için parçalama yöntemi toplamı

Şekil 3.25.a'da gösterildiği gibi bu teknik, 2. bileşenin küçük eşit büyüklükte (dx_2) çekme yay elemanlarına bölünmesinden oluşmuştur. Daha sonra bu elemanların her birinin merkezindeki gerilme, Adams-Peppiatt gerilme ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{2i} = \frac{P}{bt_1}\left[1 - \psi(1 - \cosh \alpha x_i) - \frac{(1-\psi(1-\cosh \alpha L))\sinh \alpha x_i}{\sinh \alpha L}\right] \quad (3.11)$$

$$\alpha = \sqrt{K_a},\ \psi = \frac{E_2 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \quad (3.12)$$

$$K_a = \frac{2G_1G_2G_3(E_1t_1+E_2t_2)}{E_1t_1E_2t_2(t_1G_2G_3+t_2G_1G_3+t_3G_1G_2)} \quad (3.13)$$

$$\delta_2 = \sum_{i=1}^{n} \delta_{2i} \quad (3.14)$$

$$\delta_{2i} = \frac{\sigma_{2i} dx_2}{E} \quad (3.15)$$

Sonuç olarak L2 bileşenin toplam yer değiştirme miktarı denklem 3.15'e göre L2 bileşeni 6 elemanın yer değiştirme miktarlarının toplamına eşittir.

Benzer ve farklı tek taraflı bindirmeli bağlantıların yer değiştirme miktarını tahmin etmek için basit analitik bir model geliştirilmiştir. Model temel mekanik analizlerine ve tek taraflı bindirmeli bağlantılar için Adams-Peppiatt gerilme denkleminin uygulanmasına dayanmaktadır. Model bindirme bağlantılarında her bir ayrı bileşenin lineer elastik deformasyon hesaplanmasına dayalı olduğundan aynı zamanda yapıştırıcı tabakanın uzunluğundaki değişiklikleri hesap ederek çatlak büyümesi nedeniyle tokluğu belirlemek için kullanılabilir.

3.4.1.5. Hart-Smith analizi

Hart-Smith (1973) yapıştırıcı gerilmeleri elastik kayma ve soyulma için kapalı form cebirsel çözüm sunar. Aynı zamanda aynı model elastik soyma gerilmesi muhafaza edilerek çift lineer elastik-plastik yaklaşım kullanarak yapıştırıcı kayma gerilme plastisitesini düşünebilirsiniz. Bu model üst üste bindirmedeki üst ve alt yapıştırılan malzemelerin ayrı ayrı deformasyon düşünüldüğünde doğrusal olmayan yapıştırılan malzemelerin geometrik problemlerini ve yapıştırıcı tabakayı dikkate alır.

3.4.1.6. Crocombe ve Bigwood analizi

Crocombe ve Bigwood (1989) analizi, yapıştırıcı bağlantıları her iki yapıştırılan malzemelerin üst üstte bindirilmiş kısımlarına uygulanan çekme, kayma ve moment yüklemenin herhangi kombinasyonuyla yapıştırılan malzeme-yapıştırıcı bir sandviç olarak modellendi. Bigwood ve Crocombe modeli en büyük avantajı sınır şartları bilinen bağlantının herhangi bir tür için kullanılabilecek bir sandviç olmasıdır. Bu yazılım genel elastik analiz ve yapıştırıcı plastisitesini içerir.

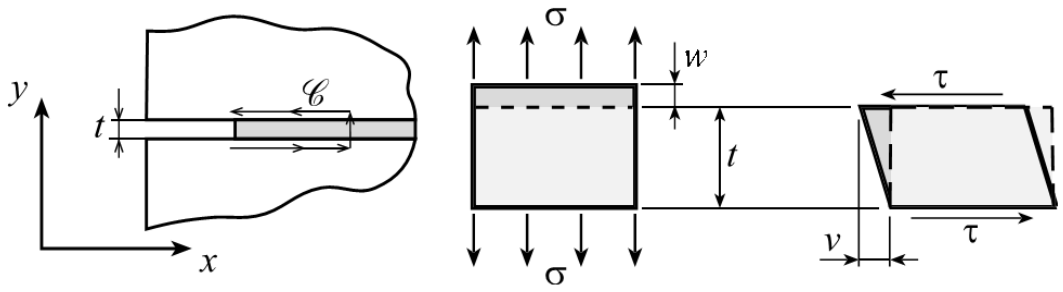
3.5. Çift Konsol Kiriş Test Metodu

Son yıllarda, yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılar uzay teknolojisi, mikroelektronik paketleme, havacılık ve otomobil sanayi gibi çeşitli endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlantılar gittikçe onların ilginç özellikleri nedeniyle kullanılmaktadır. Yapıştırıcı bağlantılar, yorulma yükler altında iyi davranışa sahip olup, farklı malzemelerin birleştirilebilmesi ve alternatif birleştirme tekniklere göre daha az gerilme konsantrasyonlarla sonuçlanır. Tasarımcıların güvenlerini artırmak amacıyla bağlantıların dayanımlarını doğru tahmin etmek gereklidir. Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılar veya çatlamış metalik yapıların onarımları sürekli olarak hasarlı/çatlak yapıların tokluk ve dayanımını onarmak ve yorulma direncini artırmak için havacılık endüstrisi fazla dikkat ediyor. Bu nedenle güvenilir modeller yapıştırıcıyla bağlanmış montajların performansını ve dayanıklılığını tahmin etmeye ihtiyaç vardır.

Yapısal modellemeye bir alternatif kırılma mekaniğin kullanılmasıdır. Bu yöntemin başarısı yapıştırıcıda gerçekleşen gerçek kırılma işlemlerine kritik olarak

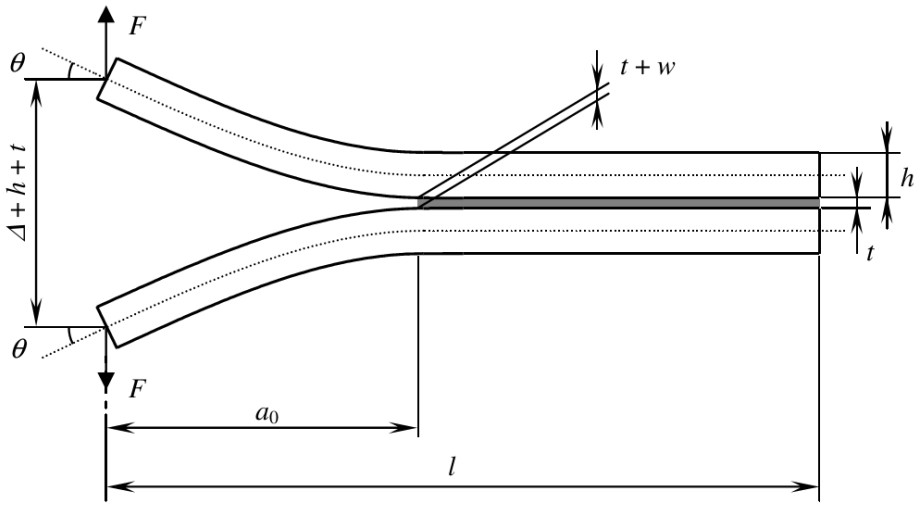
bağlıdır. Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıları yükleme koşulları altında kırılma dayanıklılığı karakterize etmek için Mod I, Mod II ve karma modlu çalışmalar birçok yazar tarafından incelenmiştir. Çift Konsol Kiriş (ÇKK/ Mod I) testi kırılma tokluğunu ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemdir.

Bu yöntem ile yapıştırıcı tabakanın deformasyonu, yapıcı yasa olarak varsayılmaktadır. Asimptotik analizi iki farklı deformasyon modları yapıştırılan malzemelere kıyasla yapıştırıcı yumuşak olması koşuluyla yapıştırıcı tabakanın davranışları hakim olduğunu göstermektedir. Eşlenik gerilmeler sırası ile σ ve τ'dur. Şekil 3.26.'da gösterildiği gibi bu deformasyon modları soyulma sırasındaki uzama w, ve kayma sırasındaki deformasyonu v'dir. Kısaca düzlem dışı deformasyonun devamında soyulma deformasyonu gösterilir. Yapıştırıcı tabaka için yapıcı yasa, $v, w, \sigma\ ve\ \tau$ cinsinden formüle edilmelidir. Andersson ve Stigh (2004) bu değişkenlerin *yapıştırıcı tabaka teorisi* dayanan bir teori göstermektedir. Bu yaklaşım açıkça yapıştırıcı tabakadaki deformasyonu çok daha karmaşık durumunu göz önünde bulundurarak aşırı derece basitleştirilmiş görülebilir.



Şekil 3.26. t kalınlığına sahip bir yapıştırıcı tabakanın yapıştırıcı bağlantısı ve temel deformasyon modları (σ, soyulma gerilmesi ve τ, kayma gerilmesi) (Leffler ve ark., 2007)

ÇKK numunelerin yapıştırıcı tabakası hemen hemen her zaman yapıştırılan malzemelerden daha zayıftır. Bu durumda yapıştırıcı tabakası ciddi bir şekilde yapıştırılan malzeme ile sınırlandırılır. Asimptotik bir analizde, iki deformasyon modları yani soyulma ve kayma deformasyonu hakim olduğunu göstermektedir. Kısıtlama hemen hemen yapıştırıcı tabakası için öngörülen deformasyonu sağlamaktadır. Yükleme sırasında hasar bölgesi çatlak ucundan önce olur. Bu bölgede yapıştırıcı elastik olmayan bir durumdadır. Sert bir mühendislik yapıştırıcı ile bu bölge tabakanın kalınlığının birkaç kat daha büyüktür.



Şekil 3.27. ÇKK numunelerin şematik gösterimi ve numunenin genişliği b ile gösterilir

Şekil 3.16.'da gösterildiği gibi ASTM D3433 standardına göre lineer elastik yapılar için kırılma tokluğunu (G_{Ic}) denklem 3.16 ile hesaplanır;

$$G_{Ic} = \frac{4F_{max}^2}{Eb^2}\left[\frac{3a^2+h^2}{h^3}\right] \tag{3.16}$$

denklem 3.16'da F, maksimum çatlak başlaması için uygulanan yük (N); E, yapıştırılan malzemenin elastikiyet modülü (MPa); b, numunenin genişliği (mm); a, çatlak uzunluğu (mm); h, yapıştırılan malzemenin kalınlığı (mm)'dir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada alüminyum alaşımlı malzemeden yapılan levhaların epoksi reçine ile tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma gerilmesi ve çift konsol kiriş test metoduyla kırılma tokluğu hesaplanmıştır. Bu birleştirmelerin arasına Çizelge 4.1.'de gösterildiği gibi elektro eğirme yöntemiyle polivinil alkol (PVA) nanoelyaflar ve PVA/ ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında güçlendirilmiş çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT) ilave edilerek elde edilen nanoelyaflar üretilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.2.'de gösterildiği gibi saf epoksi reçine, ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT ile takviyelendirilmiş epoksi ve PVA nano elyaf ile PVA/ÇCKNT nano elyaflarla takviyelendirilmiş yapıştırıcılarla Al levhalar yapıştırılmıştır. Daha sonra bu bağlantı levhaları ASTM D1002 ve ASTM D3433 standartlarına tabi tutarak hasar mekanizması incelenmiştir.

Çizelge 4.1. Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen nano elyafları

Numuneler	Nano elyaf
P	PVA nano elyaf
PKNT1	Ağırlıkça %1 ÇCKNT/PVA nano elyaf
PKNT3	Ağırlıkça %3 ÇCKNT/PVA nano elyaf
PKNT5	Ağırlıkça %5 ÇCKNT/PVA nano elyaf

Çizelge 4.2. Hazırlanan yapıştırıcılar

Numuneler	Yapıştırıcılar
E	Saf epoksi reçine
EKNT	Ağırlıkça %1 ÇCKNT/Epoksi reçine
EP	PVA nano elyaf /Epoksi reçine
EPKNT1	Ağırlıkça % 1 ÇCKNT+PVA nano elyaf/Epoksi reçine
EPKNT3	Ağırlıkça % 3 ÇCKNT+PVA nano elyaf/Epoksi reçine
EPKNT5	Ağırlıkça % 5 ÇCKNT+PVA nano elyaf/Epoksi reçine

Bu bölümde yukarıda geçen malzemelerin özellikleri, hazırlanması, ÇCKNT'ler takviyeli nano elyaf üretimi, yapıştırma işlemi ve numunelerin test yöntemleri tanımlanmıştır.

4.1. Bu Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

4.1.1. Yapıştırılan malzeme

Bu çalışmamızda yapıştırılan malzeme olarak Türk Havacılık ve Uzay Sanayiden (TUSAŞ) satın alınan alüminyum alaşım (AISI AA2024-T3) levhalar

kullanılmıştır. Bu malzeme yüksek dayanıma, işlenebilme özelliğine ve yüzey kalitesine sahiptir. Ayrıca bu alaşım yapısal uygulamalarda; uçak sanayii, otomotiv, askeri ve makine sektörlerinde, yaygın olarak kullanılır. AA2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4.'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. AA2024-T3 Malzemesinin 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	1,2-1,8	0,3-0,9	0,5	0,15	0,25

Çizelge 4.4 AA2024-T3 Malzemesinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikleri	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastiklik modülü (GPa)	Posison oranı	Kayma modulü (GPa)
	348	450	18	73,1	0,33	28

4.1.2. Yapıştırıcı

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 4.5.'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Epoksi reçinenin mekanik özellikleri

Yoğunluk (g/cm^3)	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

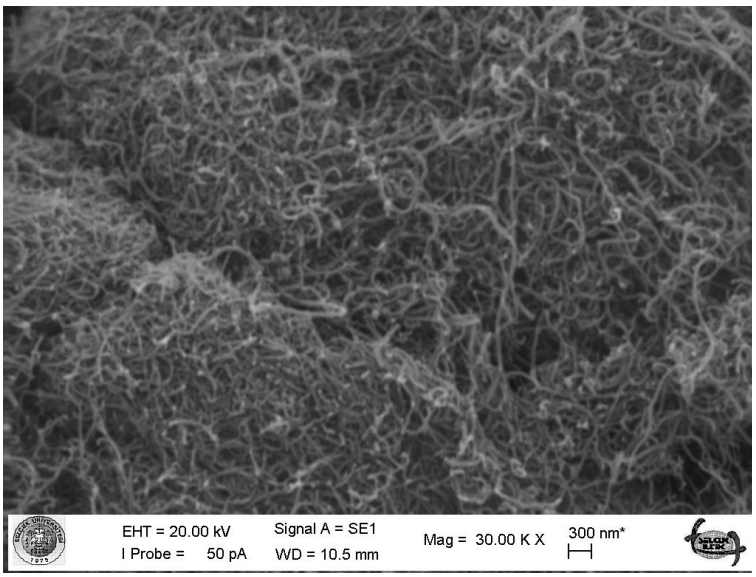
4.1.3. Çok Cidarlı Karbon Nanotüpler

Çok Cidarlı Karbon Nanotüpler (ÇCKNT) tek cidarlı karbon nanotüplere göre düşük maliyetleri ve epoksi reçineler içerisindeki homojen olarak dağıtıla bilirliğinden dolayı bu tez çalışmasında tercih edilmiştir. Ayrıca karbon nanotüplerin çok geniş yüzey alanına sahip olmaları, rijitlik ve mukavemetlerinin yüksek olması epoksi reçine ile iyi bir bağ oluşturması sebebiyle epoksi yapıştırıcıya ve PVA çözeltisine katılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan ÇCKNTler kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle NANOCYL firması tarafından üretilmiştir. Çapı 5-50 nm ve uzunluğu 10 ila 30 μm olan ÇCKNT'lerin Çizelge 4.6.'da mekanik özellikleri ve Şekil 4.1.'de ise taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü verilmiştir.

Çizelge 4.6. ÇCKNT'lerin mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Çekme dayanımı (GPa)	Elastiklik modülü (TPa)	Yoğunluk	% Uzama	Elektrik iletkenliği (S/m)
ÇCKNT	10-60	1	1,3-2	10	10^6–10^7

Karbon nanotüpler epoksi reçine ve PVA çözeltisi içerisine katılmakla epoksinin yapıştırma ve PVA nano elyaf özelliklerini iyileştirilmesi hedef alındığı için kullanılmıştır.



Şekil 4.1. ÇCKNTlerin SEM görüntüleri

4.1.4. Polivinilalkol ve yüzey aktif madde

Yapıştırıcı olarak seçilen epoksinin yapıştırma özelliklerinin daha da artma beklentisi düşünülerek PVA nano elyaflar epoksi reçine ile birlikte kullanıldı. PVA nano elyaflar elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiştir. Elektro-eğirmede kullanılacak polimerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekir. Polimerin çözücü maddesi ve kullanılacak maddelerle reaksiyona girip girmemesi ve zehirsiz olması çok önemlidir. Bu nedenle nano elyaf elde etmek için polimer olarak Polivinilalkol (PVA) seçilmiştir.

PVA polimerin oda sıcaklığında saf su katılarak çözelti haline getirilebilmekte ve iyi eğirme yapılabilmektedir. PVA'nın $[-CH_2CHOH-]_n$ kapalı formülü ve ortalama moleküler ağırlığı 124 000 g/mol'dür. Sigma Aldrich firmasından tedarik edilmiştir.

Genel bir anyonik yüzey aktif madde olan sodyum dodesil sülfat (SDS) $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$ kapalı formüllü, analitik saflıkta olup Merck firmasından satın alınmış olup, molekül ağırlığı 288.38 g/mol' dür.

4.2. Alüminyum Bağlantı Numunelerinin Yüzeylerinin Hazırlanması

Yapıştırıcı bağlantılar kullanıldıkları yerlere göre genelde tek taraflı bindirmeli bağlantılarında kayma ve soyulma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda kırılma tokluğu hesaplamada açılma modu (Mod I) için Çift konsol kiriş (ÇKK) test standardı ASTM D3433 ve tek taraflı bindirmeli bağlantılar (TTBB) için kayma dayanımını hesaplamalarında ASTM D1002 standardı kullanılmıştır.

Alüminyum numuneleri ÇKK test standardına bağlı olarak 25x200 mm'lik ve TTBB için 25x101.6 mm ölçülerinde, Bilgisayarlı Sayısal Kontrollü (CNC) Lazer Kesim Tezgâhında azot gazı ile kesildikten sonra yüzey hazırlama işlemi uygulandı. Havacılık sanayiinde en çok kullanılan yüzey hazırlama işlemi ve aynı zamanda yapısal yapıştırıcı bağlantılarında alüminyum yüzeylerin hazırlanması için ASTM D2651 standardı (dağlama sülfürik asit/ sodyum dikromat solüsyonu) ile ASTM D3933 standardı (fosforik asit anotlama) yöntemleri kullanılmıştır.

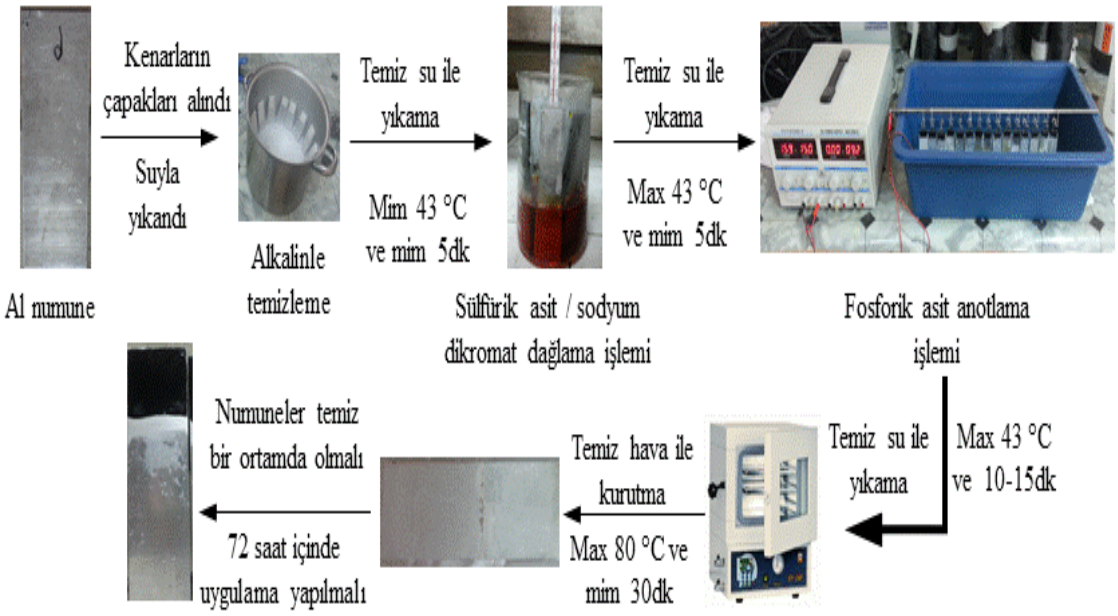
Bu yöntemleri kullanırken yapıştırılacak yüzeylere suyla yıkama ve uygulanacak çözelti işlemleri dışında herhangi bir şeyle anotlama bitene kadar dokunmamalıdır. "Islak" işlem aşamaları süresince, alkalin temizlemeden fosforik asit anotlamadan sonraki kurutma boyunca parçalar fosforik asit anotlamanın ardından durulamadan

sonra fırında kurutmaya kadar herhangi bir zaman aralığında kurutulmamalı, işlemlerin sürekli kesintisiz bir sırayla yerine getirilmesi gerekmektedir (Şekil 4.2.).

Elektrik akımı arıza yapması ya da başka şekilde fosforik asit anotlama boyunca kesilmesi eğer gerilim 2 dakika içinde yeniden tesis edilebilirse anotlamaya ilave 20-25 dakika daha devam edilebilir. Gerilim 2 dakika içinde yeniden tesis edilemezse o zaman durulayarak ve oksit giderici ile tekrar başlanılır.

Alüminyum numunelerine aşağıdaki hazırlık işlemleri uygulanmıştır.

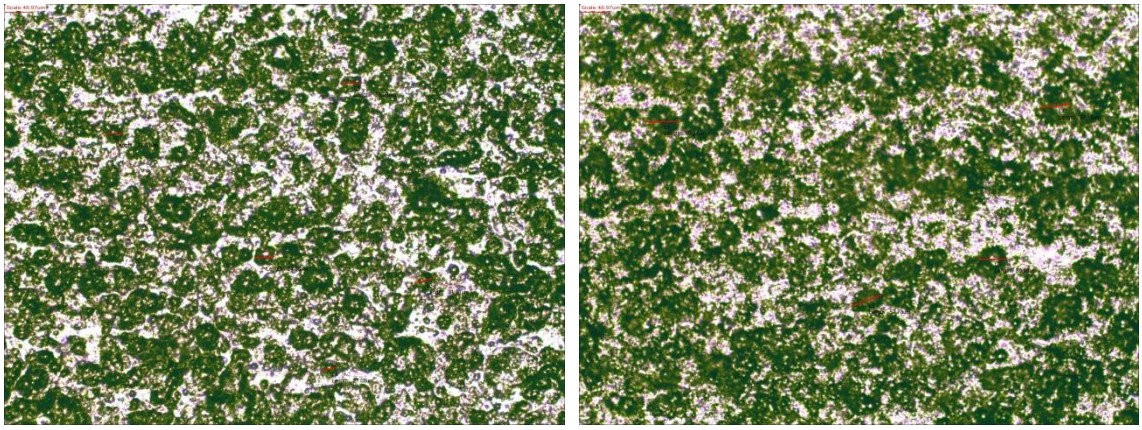
- Numunelerin kenarlarında oluşan çapakları ince eğe (diş2=22 diş) ile eğelendi,
- Saf su içinde ultrasonik banyoda 30 dk karıştırıldı,
- NaOH ile yaklaşık 90 °C'de 10-15 dakika alkalin temizleme,
- Saf suyla yıkama,
- Sülfürik asit, sodyum dikromat ve saf su sırasıyla ağırlıkça % 26.7, 5 ve 68.3 oranlarında karıştırılarak (sülfürik asit/ sodyum dikromat dağlama işlemi) oluşan solüsyona 12 dk. 65-71 ^{0}C'de daldırıldı,
- Saf su ile yıkandı,
- Fosforik asit anodizasyon işlemi (PAA), fosforik asit ve saf su sırasıyla ağırlıkça % 9-12 ve 88-91 oranlarında solüsyona 14-16 voltaj ve 20-25 dakika süre ile oda sıcaklığında daldırılır,
- Saf su ile yıkandı,
- Numuneleri vakum fırınında 70 ˚C 45 dakika kurutuldu,
- Yüzey pürüzlülük Ra ve Rz değerleri Mitutoyo SJ-301 cihazı kullanılarak 7 mm'lik mesafe ölçüldü,
- Numuneler son olarak temiz bir ortamda önceden hazırlanan yapıştırıcı hem TTBB hem de ÇKK bağlantılarında 0.1 MPa'lık bir basınç uygulanarak yapıştırma bağlantıları yapıldı.



Şekil 4.2. Alüminyum bağlantı numunelerin yüzey hazırlama işlemlerinin şematik görünümü

Fosforik asit anotlamanın ardından fırında kuruttuktan sonra 72 saat içinde yapıştırma işlemi uygulanmalıdır. Parçaları anotlama öncesi sınırlı bir kirlilik alanda yapılması gerekir ve ele alınmamalıdır.

Şekil 4.3.'te Al 2024-T3 yapıştırılan malzemenin FPL(Forest Product Lab.) ile dağlanmış ve fosforik asitle anotlanmış yüzeylerin mikroskopta 100X büyütmeli resimleri gösterilmektedir. Resimlerde görüldüğü gibi FPL ile dağlanmış alüminyum yüzeylerinde daha küçük hücreler oluşmakta olup (hücreler yaklaşık 27-35μm), PAA anodizasyonunda ise daha büyük pürüzlülük derecesine (hücreler yaklaşık 50-65μm) sahiptir. PAA anodisazyonu ile alüminyumun yüzeyinde fosfatlı bariyer tabakalı Al_2O_3 oluşmuştur. Bu da PAA oksit morfolojisiyle mekanik kilitleme olayının daha iyi olduğu görülmektedir (Ahearn ve ark., 1980). Ayrıca PAA anotlama yapışma dayanımını ve dayanıklılığını ve atmosfer, tuzlu su vb. durumlara karşı korozyon direncini arttırır.



a) b)

Şekil 4.3. Yapıştırılan malzeme Al 2024-T3 100X büyütmeli makroskobik yüzeyi a) FPL ile dağlanmış yüzey, b) fosforik asitle anotlanmış yüzey

Sülfirik asit dağlama, PAA anotlama, TTBB ve ÇKK bağlantı numunelerin yüzey pürüzlülük Ra ve Rz değerleri yükleme doğrultusunda Mitutoyo SJ-301 cihazı kullanılarak 7 mm'lik mesafe ölçülerek Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Yüzey hazırlama işlemlerinde PAA anotlama ile yüzey pürüzlülüğü aritmetik ortalama (Ra) ve ortalama pürüz yüksekliği (Rz) arttırılarak daha iyi mekanik kilitleme sağlayacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki mikropürüzlülük derecesi yapıştırılan malzemenin yapışma dayanımı ve dayanıklılığını iyileştirmek için FPL ile dağlamadan daha iyi mekanik kilitleme sağlayacağı ve bu artış sadece polimerik primerlerin değil aynı zamanda yapıştırıcının oksit gözeneklerine sızmasıyla da kilitleme oluşur (Venables, 1984; Hardwick ve ark., 1986).

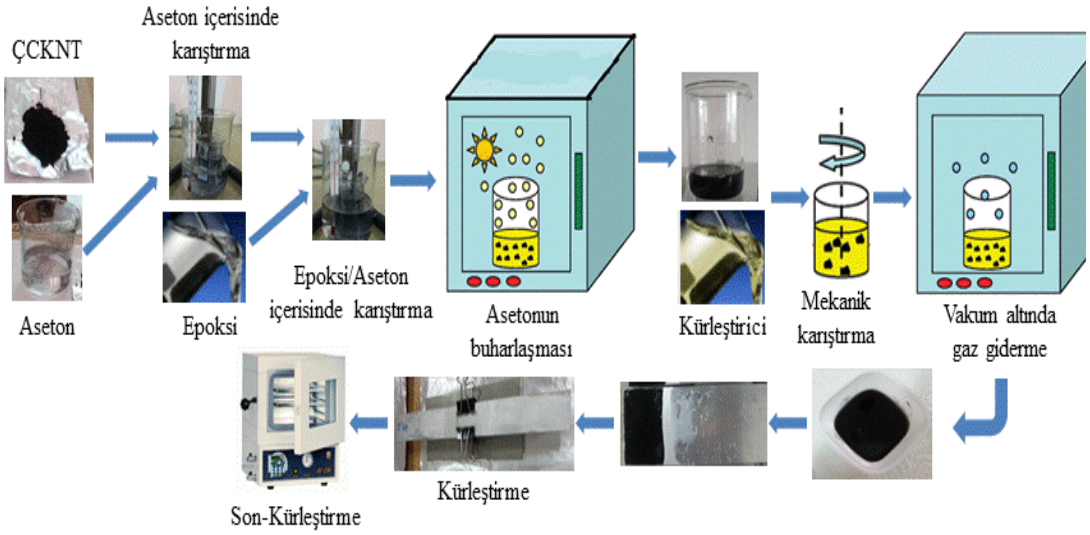
Çizelge 4.7. Yüzey hazırlama işlemlerinin ve bağlantıların kopma sonrasının yüzey pürüzlülük değerleri

	FPL	PAA	TTBB	ÇKK
Ra (µm)	1,99±0.09	2.18±0.04	5.99±1.53	5.14±1.42
Rz (µm)	13,96±0.68	16.81±1.05	49.36±15.35	43.63±17.25

TTBB ve ÇKK saf epoksi numunelerinde yüzey pürüzlülük değerleri daha fazla artmıştır. Bu da Al numunelerine uygulanan PAA yüzey hazırlama işlemleri sonucunda oluşan mikropürüzlülüğe epoksi reçineleri sızarak kopma sonrasında yüzeylerde meydana gelen pürüzlülüğü ifade eder. Çizelge 4.7.'de TTBB ve ÇKK bağlantılarının 5 tane en yüksek ve en alçak noktanın ortalaması epoksi reçine kalıntılarından dolayı artmıştır.

4.3. Nano Yapıştırıcının Hazırlanması

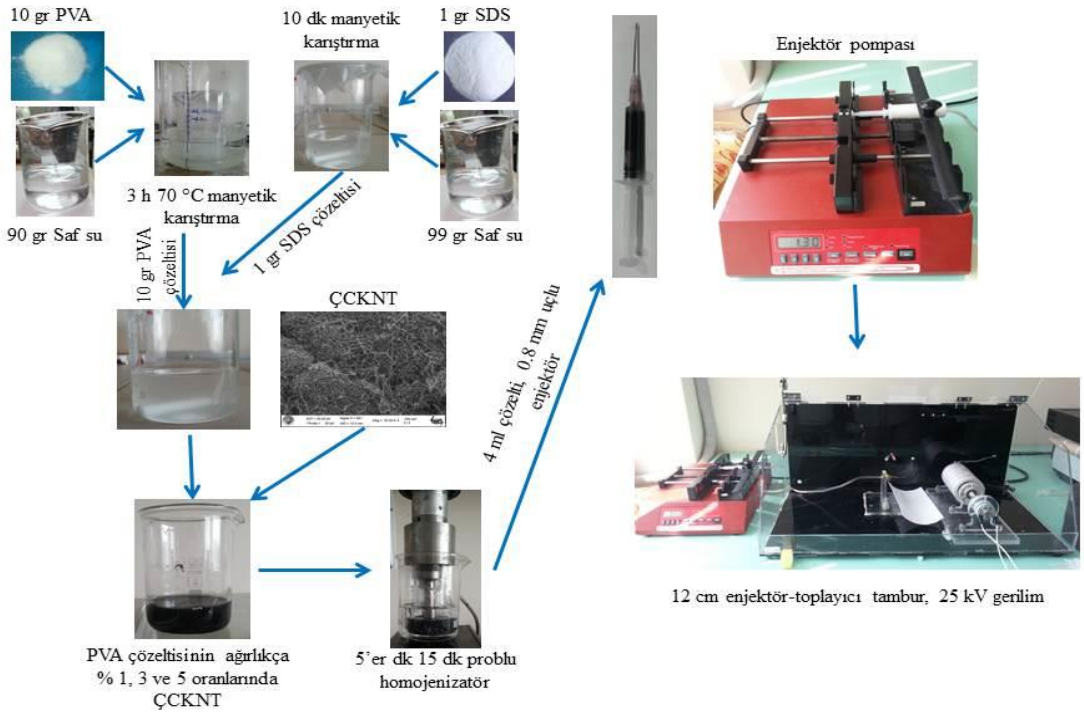
Şekil 4.4.'te bu çalışmada kullanılan nano yapıştırıcıların şematik olarak hazırlanması verildi. Çözelti karıştırma yöntemi, epoksi reçine içinde KNTlerin homojen bir dağılım gerçekleştirmek için kullanıldı. Epoksi reçine ağırlığının % 1 oranında ÇCKNTler tartıldı. ÇCKNTler beher içerisinde 100 g/mL aseton bulunan behere konulduktan sonra problu homojenizatör ile 5'er dakikadan toplam olarak 15 dakika aralıklı olarak karıştırıldı. Bu karışım başta tartılan epoksi reçine içerisine ilave ederek 20 dk kısa aralıklarla problu homojenizatör ile buz banyosu içinde yaklaşık oda sıcaklığı muhafaza edilerek karıştırıldı. Burada buz banyosu ve kısa aralıklarla karıştırmamız sebebi ÇCKNTlerin zarar görmemesi içindir. Sonra hazırlanan bu solüsyon vakum fırını içerisinde 70 $^{\circ}$C'de 24 saat -0,75 bar vakumda bekletilerek asetonun tamamen buharlaşması ve solüsyon içindeki hava kabarcıkların giderilmesi sağlandı. Epoksi/kürleştirici oranı 100/40 oranında ilave edilerek mekanik olarak 10 dk karıştırıldı. Daha sonra mekanik karıştırma sonucu oluşan hava kabarcıklarını gidermek için tekrar oda sıcaklığında 10 dk. vakum fırınında -0,75 bar basınç altında bekletildikten sonra nano yapıştırıcı kullanıma hazırlandı.



Şekil 4.4. ÇCKNT-Epoksi nano yapıştırıcının şematik olarak hazırlanması

4.4. Elektro-Eğirme Yöntemiyle PVA Nano Elyaf Keçe Üretimi

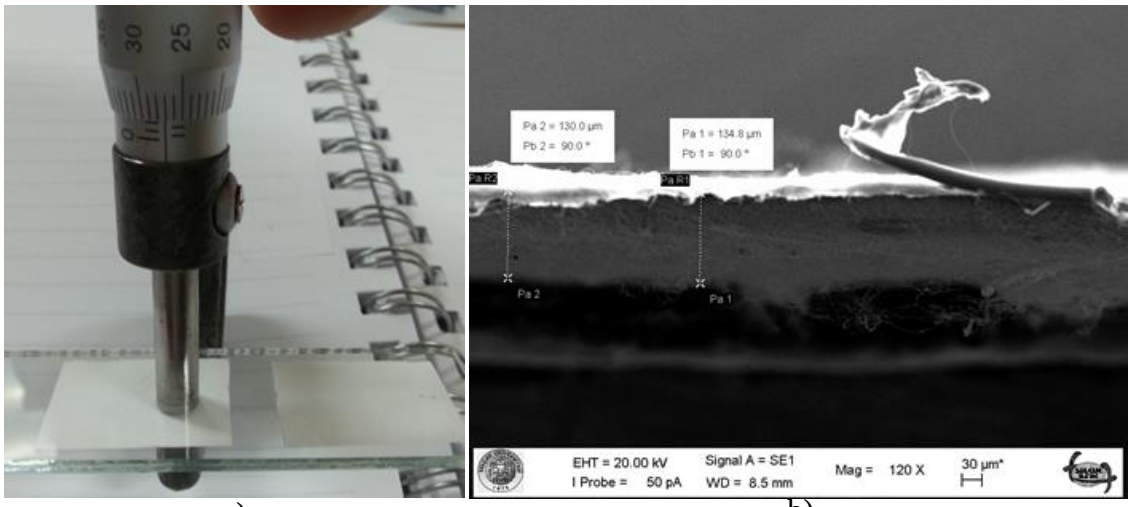
Çözelti hazırlama işlemine ilk olarak PVA eldeliyle başlanmıştır. PVA çözeltisi elde etmek için öncelikle toz halindeki 10 g PVA'yı (%10 w/w) 80 ˚C ısıtılmış 90 g saf su içerisine yavaş yavaş ilave edilerek karışım 3 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılarak PVA'nın tam olarak çözülmesi sağlandı. Toplam 100 g olan çözeltiden azalan saf su miktarı ilave edilerek karışıma devam edildi. Yüzey aktif madde olan sodyum dodesil sülfat (SDS) ağırlıkça 1 g, saf su ise 99 g çözelti hazırlanarak manyetik karıştırıcıda 10 dakika karıştırıldı. Yüzey gerilimi azaltmak için her 10 g PVA çözeltisine karşılık % 1'lik hazırlanan SDS çözeltisinden 1 g ilave edildi.



Şekil 4.5. Elektro-eğirme yöntemiyle PVA nano elyaf keçe üretim işleminin şematik gösterimi

Eğirme işlemine tabi tutulacak numuneler, yatay doğrultuda dönen tamburlu olacak şekilde hazırlanmış olan elektro eğirme düzeneğine konulmuştur (Şekil 4.5.). Şırınga pompası 1.30 mL/h süratle, şırınga– toplaç mesafesi 12 cm olarak seçilmiştir. Yüksek gerilim güç kaynağı 25 kV değerine ayarlanarak deneye başlanmıştır. Deney oda sıcaklığının 26 °C olduğu bir laboratuvar ortamında yapılmıştır. Elde edilen elyaf numuneler 1 saat 60 °C sıcaklığındaki etüvde kurutulmuştur.

Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen nanokeçe elyafların kalınlıkları SEM ve mikrometre ile ölçülerek Şekil 4.6.'da gösterilmiştir. İlk önce yapıştırma alanı kadar nanokeçe elyaflar 15x25 mm boyutlarında kesildi. Mikrometre ile lamelin kalınlığı 1.07 mm olarak ölçülmüştür. Daha sonra nanokeçe elyaflar iki lamelin arasına konularak 0.13 mm olarak ölçüldü (Şekil 4.6.'a). SEM ile ortalama kalınlık 135µm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.6.'b).



a) b)

Şekil 4.6. Nanokeçe elyafların kalınlık ölçümü

4.5. Elektro-Eğirme Yöntemiyle ÇCKNT+PVA Nano Elyaf Keçe Üretimi

4.4.'te verilen elektro-eğirme yönteminin aynı işlem yapılırken PVA-SDS çözeltisine 10 g PVA'ya karşılık ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında ÇCKNT'ler ilave edildi. Daha sonra problu homojenizatör ile 5'er dakika 15 dakika aralıklı olarak buz banyosunda karıştırıldı. Diğer işlemler 4.4.'teki işlemlerin tekrarından ibarettir.

4.6. Bağlantıların Kayma ve Çift Konsol Kiriş Test Deneylerinin Belirlenmesi

Yüzey hazırlığı aksine, bağlantı şekillendirmesi genellikle tasarımın bir ürünüdür. Genellikle literatürde tek taraflı bindirmeli, çift taraflı bindirmeli, birbirine geçmeli ve basamaklı bindirmeli bağlantılar analiz edilmiştir Diğer konfigürasyonlar alın bağlantıları, alın bindirmeli, T şekilli, L şekilli ve boru bindirme gibi bağlantılarda çalışılmıştır.

Kırılma mekaniği yaklaşımında enerji parametresi (tokluk) ve şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı kırılma kriteri olarak kullanılır. Yapıştırıcı bağlantılarında kırılma tokluğunun hesaplanmasında en yaygın olarak kullanılan yöntem çift konsol kiriş yöntemidir. İlke olarak enerji parametresi (tokluk) ve şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı;

- Yapıştırıcıda, arayüz boyunca veya yapıştırılan malzeme boyunca çatlama ucunda normal ve kayma deformasyon hareketin nispi miktarlarının bir fonksiyonu olarak tokluk değerlerinin belirlenmesinde,

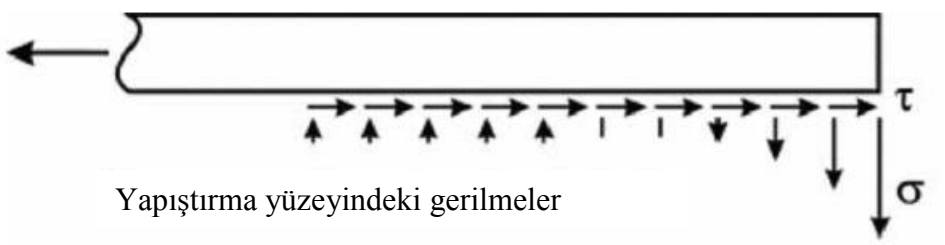
- Farklı yükleme koşulları altında bağlantının dayanımını hesaplanmasında,

uygun çatlak yolunu tahmin etmek için kullanmak mümkündür.

Yapıştırıcı bağlantılarında kırılma tokluğu, tabaka ayrılmasına neden olan çatlağın yayılması için harcanan enerjinin bir ölçüsü olup yapıştırma bağlantısı için temel tasarım parametrelerinin en önemlilerindendir. Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılarında Mod I durumundaki kırılma tokluğu, matriksin ve matriks ile fiber arasındaki bölgenin deformasyonu ve kırılma davranışı hakkında önemli fikir sahibi olunmasını sağlar.

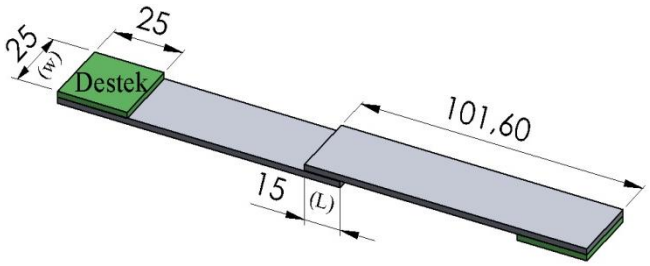
4.6.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma deneyi

Yapıştırma bağlantının belirli bir tipteki dayanımı bağlantı içinde gerilme dağılımına bağlıdır. Gerilme dağılımı da bağlantının geometrisi ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Yapıştırmalı bağlantılarda gerilme dağılımları minimize edilerek tasarlanır. Soyulma ve makaslama gibi bazı gerilmeler minimize edilebilirken kayma ve basma gibi diğerleri ise maksimum olur. Şekil 4.7.'de gösterildiği gibi tek taraflı bindirmeli bağlantıyla ilişkili sorunlardan biri üst üste binme uçlarındaki gerilme dağılımının (kayma ve soyulma) yoğunlaşması olduğu bir gerçektir. Yükleme durumunda yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arayüzeyinde 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 yapıştırmanın diğer uçunda ise basma gerilmesi oluşur. Soyulma (çekme-basma) gerilmesi yapıştırma bağlantısının merkezinde sıfırlanmaktadır.

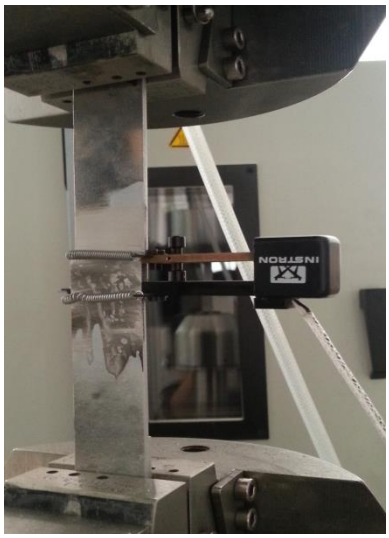


Şekil 4.7. Yapıştırma yüzeyinde oluşan gerilmeler

Tek taraflı bindirmeli bağlantıları basitlik ve verimlilik nedeniyle başlıca kullanılan en yaygın bağlantıdır (Şekil 4.8. a).



a)



b)

Şekil 4.8. Tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantısının a) şematik gösterimi b) test numunesi (ölçüler mm'dir)

Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılarında kayma gerilmesini ve kayma modülünün bulunabilmesi için ASTM D1002-10 standardına uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri Instron Universal Test Makinesi 8801çekme cihazında gerçekleştirilmiş olup numunelerin uzamaları Şekil 4.8.b'de gösterildiği gibi Instron 2630-602 dinamik ekstansometre ile ölçülmüştür.

ASTM D1002-10 standardı ile yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılar için yapıştırıcı özellikleri, araştırma ve geliştirme, kalite tayini, yapısal tasarım ve analizleri için kayma özellikleri bilgilerinin elde edilmesinde kullanılır. Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıların davranışlarını etkileyen faktörler; yapıştırıcı kalınlığı, üretim yöntemi, uygulanan basınç, numune hazırlama safhası, numunenin koşullandırılması, deneyin yapıldığı ortam şartları, numunenin test cihazına uygun bağlanması ve konumu, deney hızı, sıcaklık, yüzey hazırlama safhasıdır.

Bu çalışmada, ASTM D1002-10 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin genişlikleri 25 mm ve boyları ise 101.6 mm dir. Numunelerin kalınlıkları ise 2 mm'dir fakat yüzey hazırlama işlemlerinden sonraki mikrometre ile ölçülen kalınlık yaklaşık olarak 1.92±0.3 mm olmak üzere değişkenlik göstermektedir. Yapıştırma montajının kalınlığı yaklaşık olarak 4.06±0.3 mm'dir. Yapıştırıcı kalınlığı 0.22 mm'dir. Yapıştırıcı bağlantılarında yapıştırma kalınlığını elde etmek için

0.225±0,025µm'lik cam bilyeler kullanılmıştır. Ayrıca klipsler yardımıyla sabit yapıştırma kalınlığını sağlamak için 0.1 MPA'lık basınç uygulanmıştır. Klipslerin uyguladığı kuvvet çekme cihazında 15 N olarak ölçülmüştür. Üst üste bindirme uzunluğu 15±0.2 mm'dir. Çekme deneylerinde kullanılan numune boyutları Şekil 4.7.a'da verilmiştir. Çekme esnasında meydana gelecek eğilme momentini en aza indirmek ve çekme düzlemini cihaz ile aynı doğrultuda bağlamak için numunelere karşılıklı olarak numuneler ile aynı kalınlıkta desteklerle tutturulmuştur (Şekil 4.8.a). Her bir numune türü için en az beş numune çekme deneyine maruz bırakılmıştır. Çekme deneylerinde çekme hızı ilgili standarda uygun olarak 1 mm/dk olacak şekilde çekme deneyleri yapılmıştır.

Her bir numuneye uygulanan kuvvet P ve yer değiştirme δ değerleri anlık olarak kayıt edilmiş ve numunelerin kayma gerilmesi ve kayma modülü 3.3 ve 3.5 denklemler ile hesaplanmıştır.

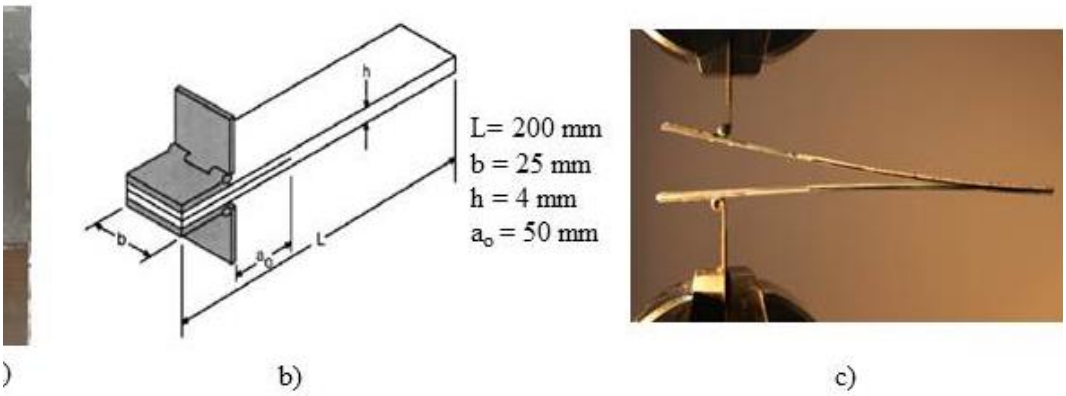
Çekme test deneyleri sırasında dinamik ekstansometre ile ölçülmüş olan birim şekil değiştirme miktarları, Adams ve Peppiatt yönteminin sayısal analizlerin verileri grafiklere dönüştürülerek kıyaslanmıştır.

4.6.2. Mod I açılma için çift konsol kiriş test deneyleri

Bu çalışmada farklı oranlarda ÇCKNT ve PVA nano elyaf keçe katkılı epoksi nano yapıştırıcıların çatlağa karşı direnci, boşalma miktarı ve kırılma tokluğunun belirlenmesi için açılma modu (Mod I) için çift konsol kiriş test standardı ASTM D3433-99 referans alınarak numunelerin kritik kırılma tokluk (G_{IC}) değerleri hesaplanmıştır. G_{IC}, sabit yer değiştirme durumunda iki tabaka arasındaki çatlağın ilerlemesi sırasında sabit genişlikli bir numunedeki kritik enerji olarak tanımlanır.

ÇKK deneyleri oda sıcaklığında Shimadzu AGS-X hidrolik masa üstü test ünitesinde gerçekleştirildi. Yük ölçümleri için 10±0.05 kN hassasiyetli yük hücresi kullanıldı. Deneyler sabit yer değiştirme hızında yapılmış ve yer değiştirme hızı 3 mm/dk olarak seçilmiştir. P, COD ve Δa parametreleri sırasıyla anlık kuvvet, anlık çatlak ağzı açılma miktarı ve tabakalar arası ayrılma uzunluğudur. Bütün numunelerde çatlağın başlangıç ve ilerleme excel verileri Shimadzu Çekme Test cihazından alındı. Ayrıca çatlak ilerleyişi, Canon 7D Tamron 17-50 mm lensli ve 18 Mega Piksel fotoğraf makinesi ile video olarak kaydedildi. Video kayıt esnasında çatlak başlangıç ve ilerlemesi sırasında değişen kuvvetler uyarı olarak belirtildi. Bilgisayar yardımıyla

fotoğraf makinesi ile çekilen çatlak ilerlemeleri ve kuvvetleri excele kaydedildi. Daha sonra kayıt edilen bu veriler kırılma yüzeyleriyle karşılaştırıldı. ÇKK testleri sonucunda P/COD ve G_{IC} /Δa grafikleri çizilmiştir.



Şekil 4.9. ÇKK numunesi a) politetrafloroetilen film tabakası b) şematik numune ölçüleri (ASTM D 5528 standardından alınıp değiştirilerek kullanılmıştır.) ve c) Mod I açılma modu yüklemesine maruz bırakılmış PVA+%1 ÇCKNT'lü nanokeçe çift konsol kiriş numunesi

ÇKK testi hazırlanırken, yapıştırmaya geçmeden önce 75x25 mm uzunluk ve genişlikte kesilen 13 μm kalınlığındaki yapışmaz politetrafloroetilen film tabakası başlangıç çatlağını oluşturmak üzere orta tabakaya serilmiştir (Şekil 4.9.a). Böylece orta tabakaların belirli bir 75 uzunluk boyunca birbirine yapışması engellenmiştir. ÇKK deneylerinde kullanılan numunelerin boyutları 200x25x2 mm'dir. Deneylerde kullanılan çift konsol kiriş numuneleri ve boyutları şematik olarak Şekil 4.9.b'de gösterilmiştir. Her bir numune türü için en az 5 numune aynı şartlarda deneye tabi tutulmuştur.

Numunelere yükün uygulanabilme için numunelerin politetrafloroetilen film yapıştırılmış tarafına 25x25 mm boyutlarında iki adet menteşe yapıştırılmıştır. Menteşeler ile yapıştırılacak alüminyum yüzeyleri, yapıştırılmadan önce ilk olarak 150 grit silikon karbür zımpara kâğıdı ile zımparalanmış daha sonra aseton ile temizlenerek artık parçacıklar mümkün olduğunca giderilmiştir. Yüzey hazırlama işlemlerinin hemen ardından, menteşelerin ve numunelerin yapışma yüzeylerine epoksi sürülerek yapıştırılmıştır. Menteşelere 0.05 MPa'lık basınç uygulanmış olup, yapıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 4.9.c'de görüldüğü gibi Mod I açılma testine tabi tutulmuştur.

Açılma modu kırılma tokluğu hesaplanmasında ASTM 3433-99 standardına göre kırılma tokluğunu (G_{IC}) denklem 3.16 kullanılarak hesaplanmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmalar iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, PVA nano elyaf keçe üretimi, ikincisi mekanik performans testleridir. Birinci aşamada PVA nano elyaf keçe üretiminde, PVA polimer çözeltisi ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNTler ile teflon ayırıcı kumaş kullanılarak çok lüleli, döner toplayıcılı elektro-eğirme cihazında üretilmiştir. Üretilen nano elyafların PVA ve ÇCKNTleri ile bir araya gelmesi ile oluşan sistemde meydana gelen kimyasal değişimleri ve etkileşimleri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizleri ile incelenmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca nanokeçe elyafların aşamalarına ait yüzey morfolojilerindeki değişimler ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

İkinci aşamada, elektro-eğirme yöntemi ile üretilen PVA ve/veya ÇCKNTler nanokeçe elyaflar ile epoksi reçineyle yapıştırılmış alüminyum (Al) malzemelerin tek taraflı bindirmeli bağlantıların eksenel çekme deneylerinden elde edilen kayma mukavemetlerinin sonuçları grafikler halinde verilmiş ve tartışılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sayısal analizler mukayese edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri incelenerek deneylerde elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir. Son olarak üretilen PVA ve/veya ÇCKNTler nanokeçe elyaflar ile epoksi reçineyle yapıştırılmış Al alaşımlı numunelerin çift konsol kiriş test yöntemiyle (Mod I; açılma modu) kırılma tokluğu deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

5.1. PVA Nano Elyaf Keçe Üretimi ve Özellikleri

Nano elyaf keçe özelliklerinin belirlenmesinde PVA ve PVA+ÇCKNT çözeltilerinin fiziksel özellikleri, nano elyafların SEM görüntüleri, FT-IR spektrumu ve DSC analizleri incelenmiştir.

5.1.1. PVA çözeltilerinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Çözeltilerin elektriksel iletkenliği ve çözeltideki toplam parça miktarı (ppt) Hanna-Combo Tester aygıtından Çizelge 5.1.'de belirtilen sıcaklıklarda ölçülmüştür.

Çizelge 5.1. Sıvı çözeltilerin fiziksel özellikleri

Çözelti	Ppt	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)
PVA	0.72	1.45	23.2
PVA/%1 ÇCKNT	0.75	1.50	23.7
PVA/%3 ÇCKNT	0.78	1.56	23.9
PVA/%5 ÇCKNT	0.81	1.62	23.1

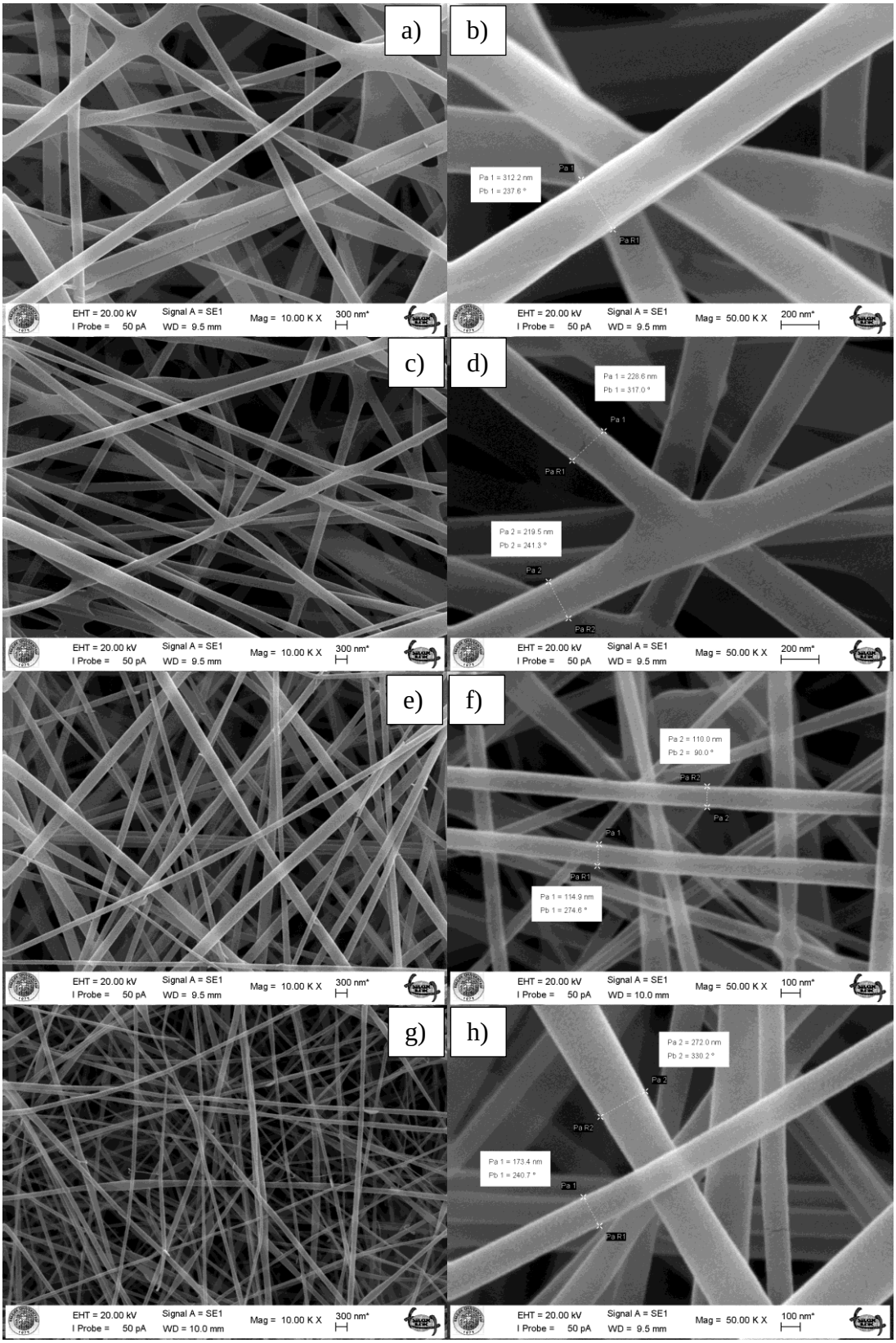
Çizelge 5.1'de görüldüğü gibi çözücü içerisine eklenen ÇCKNTler arttıkça elektriksel iletkenlik artmaktadır. ÇCKNTlerin elektrik iletkenliği 10^6–10^7 S/m olduğundan dolayı ÇCKNTler arttıkça çözücünün de iletkenliği parçacık miktarına bağlı olarak artmaktadır. Aynı zamanda çözelti içerisindeki toplam parçacık miktarı da artmıştır. Toplam parçacık miktarının artışı ÇCKNTlerin miktarının artmasına bağlı olarak artmıştır.

5.1.2. PVA nano elyaf keçenin SEM görüntüleri

PVA nano elyaflara ait SEM görüntüleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bulunan ZEİSS Evo LS 10 cihazı ile 20kV gerilimde elde edilmiştir.

Şekil 5.1.'de nano elyafların 10 000 X ve 50 000 X büyütmeli SEM görüntüleri verilmektedir. Ayrıca SEM görüntüleri Autocad programına yapıştırılarak her bir nano elyafların 10 adet en küçük ve en büyük nano elyafların boyutları ölçülerek ortalaması verilmiştir. PVA nano elyafların çap ölçüleri 222-403 nm aralığında, PVA+% 1 ÇCKNTler nano elyafların çap ölçüsü 154-335 nm aralığında, PVA+% 3 ÇCKNTler nano elyafların çap ölçüsü 117-265 nm aralığında iken PVA+% 5 ÇCKNTler nano elyafların çap ölçüsü ise 95-192 nm olarak ölçülmüştür.

Elektro-eğirme işleminde çözeltinin elektrik iletkenliği artırılırsa, çözeltinin taşıdığı yükleri artıracaktır. Böylece düzgün fiberler ve daha küçük çaplarda fiberler elde etmeyi sağlar. PVA nano elyafların çap ölçüsü, PVA+% 5 ÇCKNTler nano elyafların çap ölçüsüyle karşılaştırıldığında % 64.7 oranında düşüş gerçekleşerek 110 nm olarak ölçülmüştür. Ayrıca EK-1'de nano elyafların 1 000 X büyütmeli SEM görüntüleri de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiği zaman PVA çözeltisinin içerisine ilave edilen KNT miktarı arttıkça nano elyaf çapları azalarak ince ve uzun elyaflar oluşmaktadır. Fakat KNT miktarlarının artmasıyla da topaklanma artarak boncuklanmaya sebep vermektedir. Elyaf uzunluklarında ise kesiklik oluşmamaktadır.



Şekil 5.1. PVA nano elyafların SEM görüntüleri; a) 10 KX ve b) 50 KX PVA nano elyaf, c) 10 KX ve d) 50 KX PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf, e) 10 KX ve f) 50 KX PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf, g) 10 KX ve h) 50 KX PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf

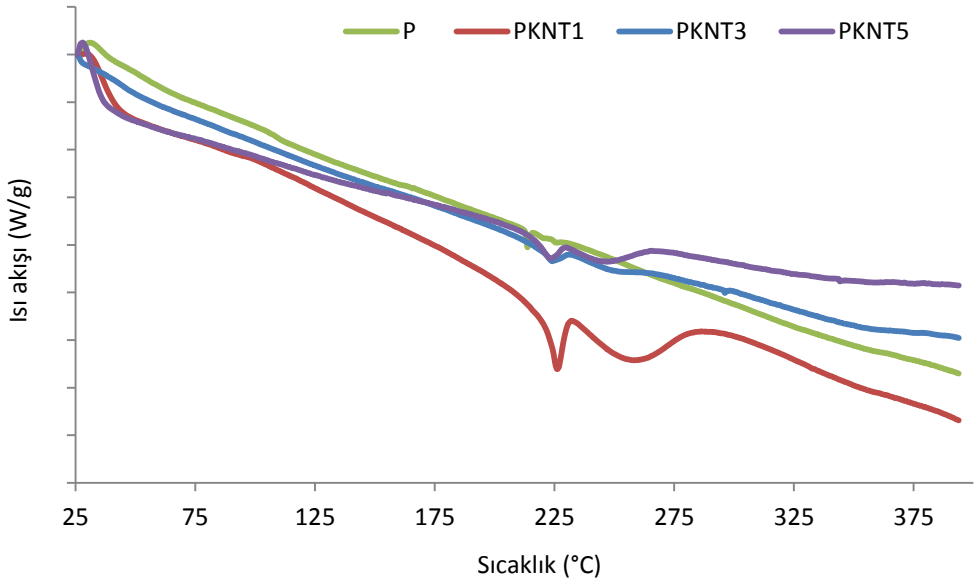
5.1.3. PVA nano elyafların DSC Analizleri

Camsı geçiş sıcaklığı ve özgül ısı kapasitesi 20 ml/dakika azot akışı koşulları altında, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC, Perkin Elmer Instruments) ile incelenmiştir. Test sıcaklığı 25°C'den 400°C'ye kadar 20°C/dakika ısıtma hızıyla test edilmiştir.

Şekil 5.2.'de gösterildiği gibi PVA nano elyaf, PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf, PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf ve PVA+% 5 ÇCKNT nano elyafların DSC eğrileri gösterilmektedir. PVA nano elyafların erime sıcaklığına (T_m) karşılık gelen 215-250 °C dolaylarında endotermik bir pike sahiptirler (Naebe ve ark., 2007). Naebe ve ark., PVA ve ağırlıkça % 4.5 ÇCKNT+PVA nano elyaf keçelerin erime sıcaklıkları sırasıyla 218 ve 221 °C iken bizim çalışmamızda PVA ve ağırlıkça %5 ÇCKNT+PVA nano elyaf keçelerin T_m ise 215 ve 223 °C'dir.

Nano elyaf keçelerin özgül ısı değerleri, termal kararlılık ve T_m sıcaklıkları Çizelge 5.2.'de listelenmiştir. Ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nanokeçenin T_m sıcaklığı 225 °C, PVA nano elyaflarla karşılaştırıldığında daha yüksektir. Fakat %1 oranından sonra bu artışta düşüş gözlenmiş olup, bu durum ise ÇCKNTlerin PVA matriks içerisinde aglomer olduğundan kaynaklanmaktadır (Deng ve ark., 2007). Karbon nanotüplerin varlığından PVA'nın T_m sıcaklığın artışı ÇCKNT ile PVA matriks arasındaki güçlü bir etkileşimi olduğu ve bu etkileşimin bir sonucu olarak PVA'nın çekirdeklenmesinin oluşumunu gösterir (Chen ve ark., 2005; Shirazi ve Mohammadi, 2013). Elektro-eğirme işlemi çok hızlı bir şekilde gerçekleştiğinden PVA molekülleri elektro-eğirme sürecinde karbon nanotüpler etrafında kristalleşmeyi çekirdeklendirmek muhtemelen daha yavaştır. PVA çözeltisi içinde karbon nanotüplerin varlığı da elyaf çapında bir azalmaya (SEM resimlerinde görüldüğü gibi) neden olduğundan karbon nanotüpler elektro-eğirmeden önce PVA çözeltisinde dağıldığında çekirdek kristalizasyonu veya karbon nanotüplerin yüzeyinde PVA'nın kendi kendine bağlanma herhangi bir zamanda gerçekleşmesi mümkündür.

DSC eğrileri incelendiği zaman DSC ısıtma çalışma sırasında kristalleşme gözlenmemiştir. Bu yüzden endotermik erime elektro-eğirme sırasında oluşan kristallerin erimesine atfedilmiştir (Guerrini ve ark., 2009).



Şekil 5.2. PVA ve ÇCKNT takviyeli PVA nano elyafların DSC eğrileri; a) P: PVA nano elyaf, b) PKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf, c) PKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf ve d) EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf

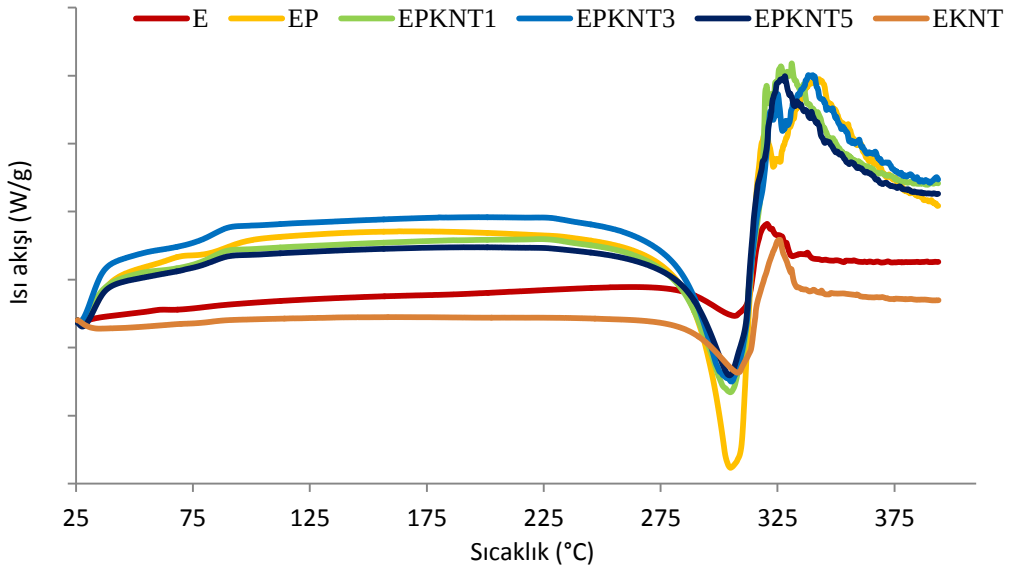
PVA nano elyaf ve ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflar elektro-eğirme yöntemiyle üretildikten sonra içerisinde bulunan suyun 1 saat 60 °C vakum fırınında kurutularak buharlaştırılması sağlanmıştır. DSC eğrilerine bakıldığı zaman erime sıcaklığına kadar herhangi bir reaksiyon olmamıştır. Özgül ısı, Tg, Tm ve bozunma sıcaklıkları % 1 ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflar da büyük bir artış gözlenerek sırasıyla 0.895 J/g ˚C, 85 °C, 225 °C ve 252 °C olmuştur. ΔC_p Bir maddenin, 1 gramının sıcaklığını 1° C artırmak için gerekli olan joule cinsinden enerji olarak tanımlanmaktadır. PVA nano elyaflar için ΔC_p değeri 0.066 J/g ˚C'iken %1 ÇCKNT+PVA nano elyaflarda yaklaşık 14 kat artarak 0.895 J/g ˚C olmuştur. Daha sonra bu değeri ÇCKNT miktarının artmasıyla düşmüştür. Buna bağlı olarak da T_g, T_m ve bozunma sıcaklıkları düşmüştür.

Çizelge 5.2. PVA ve ÇCKNT takviyeli PVA nano elyafların Tg, özgül ısı değerleri, termal kararlılık, T_m ve bozunma sıcaklıkları

Numune	Nano elyaf	T_g (˚C)	ΔC_p (J/g ˚C)	Termal Kararlılık (˚C)	T_m (˚C)	Bozunma Sıcaklığı (˚C)
P	PVA nano elyaf	77	0.066	205	215	224
PKNT1	%1ÇCKNT+PVA nano elyaf	85	0.895	215	225	252
PKNT3	%3ÇCKNT+PVA nano elyaf	80	0.446	212	225	244
PKNT5	%5ÇCKNT+PVA nano elyaf	74	0.296	210	223	240

5.1.4. ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflarla modifiye edilmiş epoksi yapıştırıcıların DSC analizleri

ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflarla modifiye edilmiş epoksi yapıştırıcıların camsı geçiş sıcakları DSC sonuçlarına göre belirlenmiştir. Şekil 5.3.'te saf epoksi yapıştırıcı, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların DSC eğrileri gösterilmektedir. Polimer matrisin Camsı Geçiş Sıcaklıkları (Tg) polimerin serbest hacmine bağlıdır. Kütle halinde moleküllerin hareketi boşluk veya boşlukların varlığı ile ilişkilidir (Jana ve Zhong, 2007; Abdalla ve ark., 2008). Tüm yapıştırıcılar endotermik reaksiyon göstermiştir. Saf epoksi yapıştırıcının 280 °C'den sonra termal kararlılığını kaybetmeye başlamıştır. Bozunması ise 302 °C'de gerçekleşmiştir. Genel olarak epoksi reçineye ÇCKNT ve nanokeçe elyaf takviyesi ile termal kararlılık düşmüş olup, bozunma sıcaklıkları ise sadece % 1 ÇCKNTe artarak nano elyaf takviyeli yapıştırıcılarda sabit kalmıştır.



Şekil 5.3. Saf epoksi ve takviyeli yapıştırıcıların DSC eğrileri; a) E: epoksi reçine, b) EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) EP: PVA nano elyaf/Epoksi, d) EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Çizelge 5.3.'te saf epoksi yapıştırıcı, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + %

5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların T_g, özgül ısı değerleri (ΔC_p), termal kararlılık, erime sıcaklığı (T_m) ve bozunma sıcaklıkları görülmektedir. Çizelgede görüldüğü gibi camsı geçiş sıcaklıkları ÇCKNT ve PVA nano elyaf takviyeli yapıştırıcılarda saf epoksiye göre artış göstermiştir. T_g en yüksek artış PVA nano elyaf yapıştırıcıda 90.26 °C'de görülmüştür. Camsı geçiş sıcaklığının artması daha önce anlatılan nanoparçacık ve PVA nano elyaf takviyeli yapıştırıcının serbest hacminin nano parçacıklar veya nano elyaf kullanılarak azaltılmış olması ve nano parçacıklar ile epoksi reçine arasındaki etkileşiminin güçlendirilmesi ile açıklanmaktadır (Lau ve ark., 2005). %1 ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflar da özgül ısı değerleri 0.895 J/g ˚C'den %1 ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflı epoksi yapıştırıcılarda 1.740 J/g ˚C olmuştur. Epoksi yapıştırıcıya ÇCKNT takviyeli PVA nano elyafların eklenmesiyle özgül ısı değerleri, Tg ve bozunma sıcaklıkları KNTlere bağlı olarak artmıştır. Fakat %5 ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflar da özgül ısı değeri 0.900 J/g ˚C'ye düşmüştür. Buda epoksi yapıştırıcıyla etkileşimin zayıfladığını yani KNTlerin PVA içerisinde topaklanması, iyi yapışmaması ve hava boşlukları (SEM görüntüleri) olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.3. Numunelerin T_g, özgül ısı değerleri, termal kararlılık, T_m ve bozunma sıcaklıkları; a) E: Epoksi reçine, b) EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) EP: PVA nano elyaf/Epoksi, d) EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Numune	T_g (˚C)	ΔC_p (J/g ˚C)	Termal Kararlılık (˚C)	Tm (°C)	Bozunma Sıcaklığı (˚C)
E	75.11	0.298	280	302	315
EKNT	83.58	0.382	270	306	322
EP	90.26	0.213	250	302	320
EPKNT1	83.35	1.740	250	302	325
EPKNT3	83.65	2.054	250	302	323
EPKNT5	83.89	0.900	250	302	324

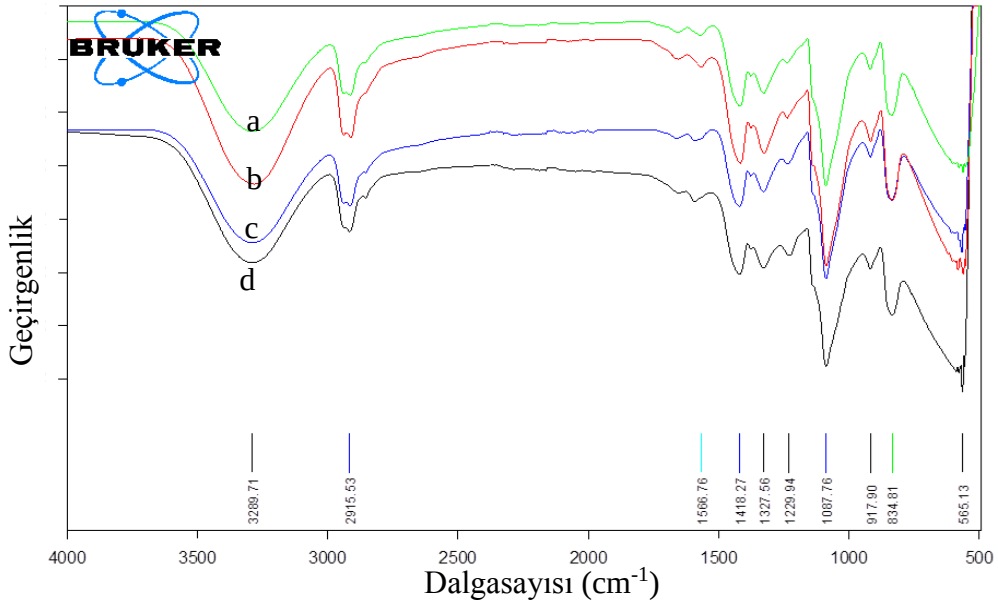
5.1.5. PVA nano elyafların FT-IR Analizleri

Fourier Dönüşümü Infrared (FTIR) spektrum ölçümleri, BRUKER-Vertex 70 spektrofotometre ile gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler 500 ile 4000 cm^{-1} arasında, oda sıcaklığında ve 2 cm^{-1} hassasiyetinde analizler yapılmıştır.

PVA nano elyaf, PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf, PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf ve PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaflarına ait FTIR spektrumların karakteristik eğrileri Şekil 5.4.'te verilmiştir. Grafikte 3289 cm^{-1} bölgesindeki pikler PVA'daki O-H grupların gerilme titreşimine karşılık gelirken 2915 ve 2946 cm^{-1}'de bulunan pikler ise

–CH_2 titreşimi sırasıyla simetrik ve anti simetrik olarak belirlenir (Diouri ve Baitoul, 2014). 1087 cm^{-1}'deki band PVA'daki C-O-C grupların uzama titreşimine dayanır (Guo ve ark., 2007). Ek olarak 1418 ve 834 cm^{-1} karşılık gelen bandlar sırasıyla CH_2 makaslama ve sallama deformasyonu farklı numunelerin kristalliğini karşılaştırmak için referans olarak kullanılabilir.

Bir başka önemli soğurma piki 1229 cm^{-1}'de bulunur ve bulunan C-O gerilmesi PVA'nın kristal fazıyla güçlü olarak ilişkilendirilir (Lee ve ark., 2008; Murugan ve Vimala, 2011). Gerçekten de 1229 cm^{-1}'de bulunan bandın nispi yoğunluğunun oranı PVA'nın kristalilik üzerine ÇCKNTlerin etkisini izlemek için kullanılmış ve ÇCKNTlerin varlığında PVA'daki daha iyi bir kristalliliğinden yanadır. Karbon nanotüplerin karakteristik piklerinden bir diğeri de 1566 cm^{-1} civarında görülür ve atfedilen PVA'da C-C titreşimi ÇCKNTlerin yoğunluğunun kademeli olarak artmıştır (Hu ve ark., 2012).

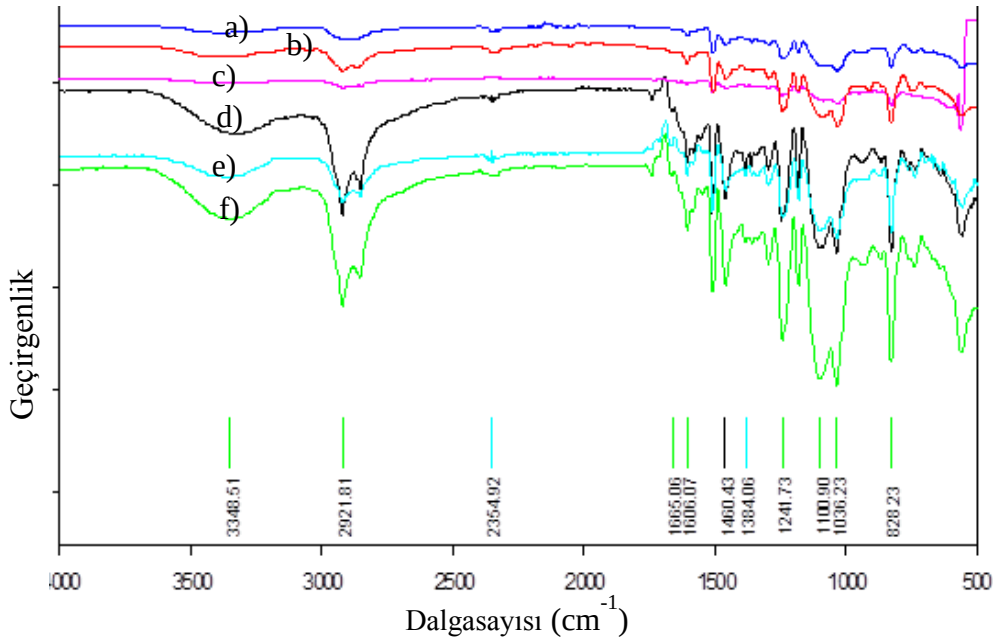


Şekil 5.4. PVA ve ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflara ait FTIR spektrumları; a) PVA nano elyaf, b) PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf, c) PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf ve d) PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf

5.1.6. ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaflarla modifiye edilmiş epoksi yapıştırıcıların FT-IR Analizleri

Şekil 5.5.'te saf epoksi yapıştırıcı, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcılara ait FTIR spektrumların karakteristik pikleri

gösterilmiştir. Kürleşmeden sonra soğurma bantlarının değişiklikleri kolayca görülebilir. 2921, 1241, 1036 ve 828 cm^{-1} bantları epoksi grubu belirtmektedir. 3348 cm^{-1} pikindeki yoğunluk ÇCKNTlerin miktarının artmasıyla şiddetti de artmıştır. Bu da epoksi reçinesiyle ve ÇCKNTlerin arasındaki etkileşimin sonucu ve ÇCKNTler epoksi gruplarının piklerinde değişim meydana gelmesine neden olmuştur. Ayrıca 1734 cm^{-1} etrafındaki piklerde C=O gerilme titreşimleri olarak bilinir ve ÇCKNTler karboksil gruplarına başarıyla modifiye edilmiş olduğu şekilde açıktır (Wang ve ark., 2012). Epoksi reçine 1384 ve 1460 cm^{-1} piklerinde ise metil gruplarının C-H bağlarının asimetrik deformasyonu ile ilişkilidir.

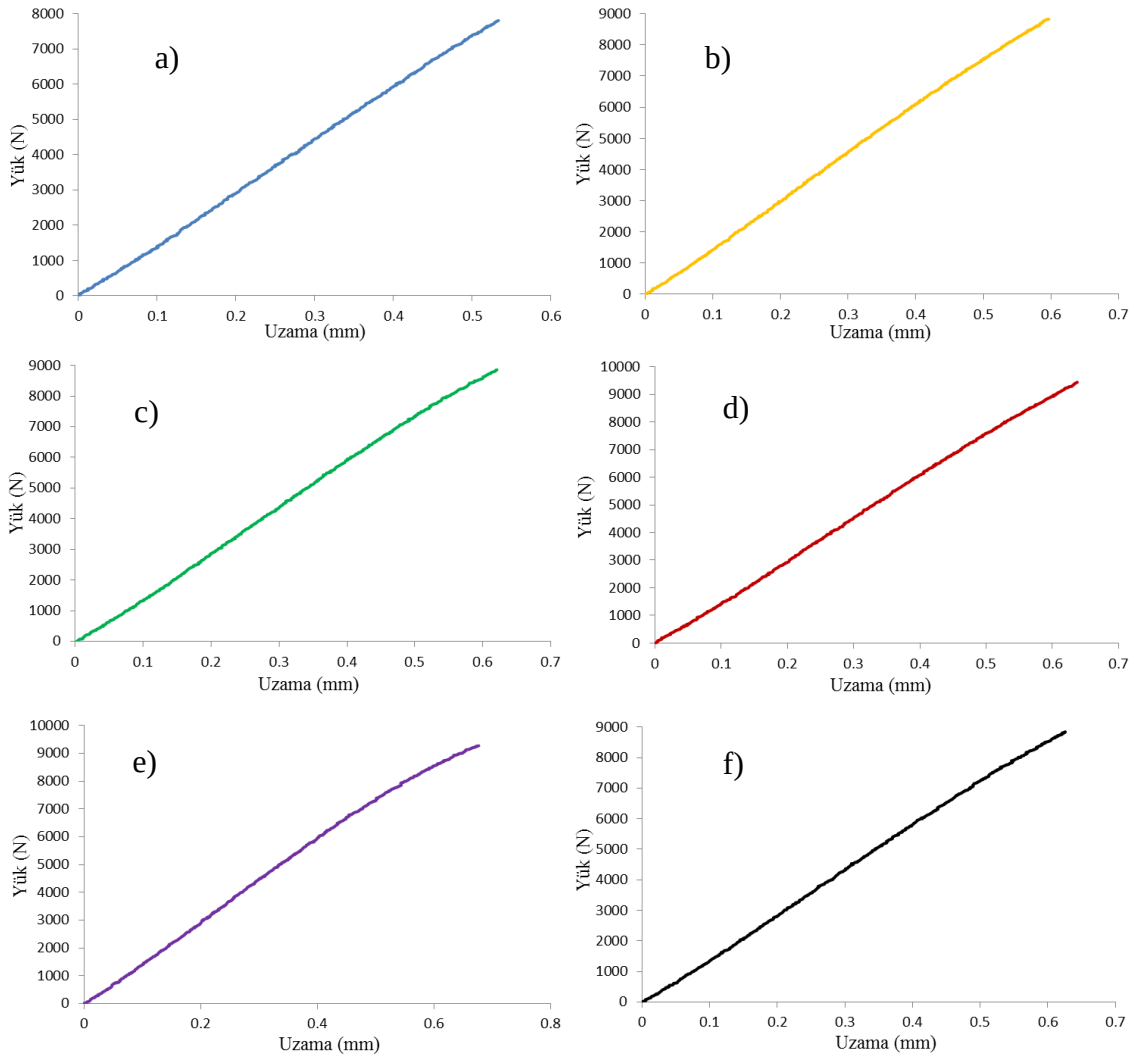


Şekil 5.5. Epoksi reçine ve takviyeli yapıştırıcılara ait FTIR spektrumları; a) % 1 ÇCKNT/Epoksi, b) Epoksi reçine, c) PVA nano elyaf/Epoksi, d) PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

5.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Mekanik Özellikleri

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen tipik yük-uzama grafikleri Şekil 5.6.'da verilmiştir. Yük-uzama grafiğinde görüldüğü gibi saf epoksi yapıştırıcı, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan yapıştırıcı bağlantıların karakteristik yükleme davranışları değişiklik göstermektedir. Epoksi yapıştırıcının yük taşıma kapasitesi 7804 N'dur. Epoksi yapıştırıcıya ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT takviye edilmesiyle yük taşıma

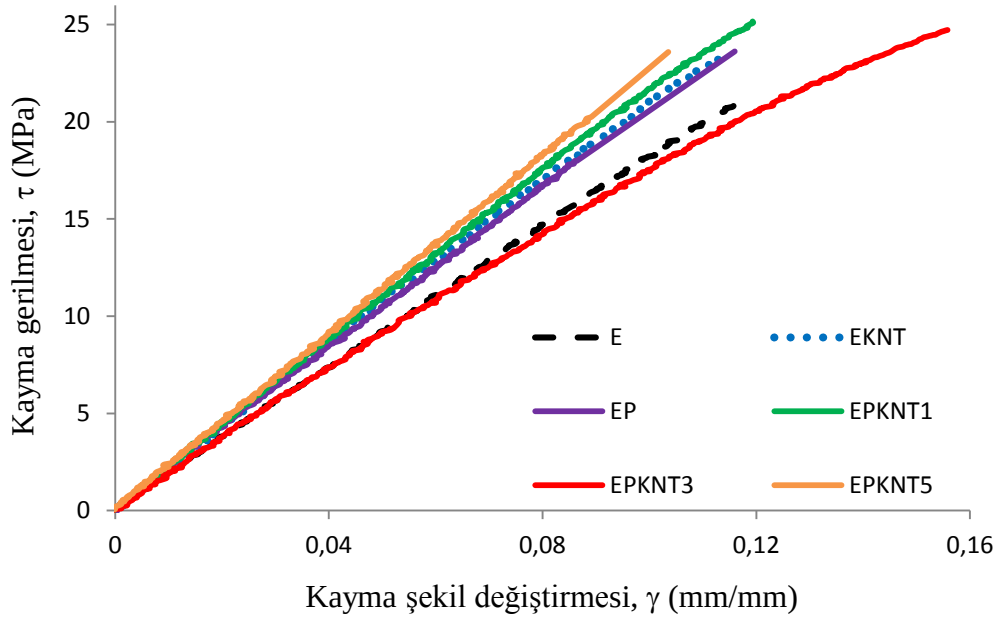
kapasitesi 8824 N'a çıkarak % 13 artış göstermektedir. Fakat epoksi yapıştırıcıyla birlikte PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf ve PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf takviyesiyle yük taşıma kapasitesi sırasıyla 9437 N ve 9271 N'a yükselerek % 21 ve 19 artış göstermektedir.



Şekil 5.6. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların yük-uzama eğrileri; a) Epoksi reçine, b) % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) PVA nano elyaf/Epoksi, d) PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Epoksi reçine, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirme (γ) grafikleri Şekil 5.7.'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 20.81 MPa' dır. %1 ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcının kayma gerilmesi 23.53 MPa'la % 13'lük bir artış göstermektedir. Modifiye edilmiş yapıştırıcılardan

kayma gerilmesinde en büyük olan 25.17 MPa ve % 21 artışla PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda meydana gelmiştir. Nano keçe elyafların yapıştırıcı bağlantılarına % 1 KNT takviye edilmesiyle kayma dayanımında 25.17 MPa'la maksimum değere ulaşmıştır. Fakat PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda kayma dayanımı 24.72 MPa'la düşerken sünekliği artmıştır. Bu değerden sonra ise düşmeye başladığı görülmektedir. Kayma dayanımında değişmesine neden olan mekanizmalar daha sonra kayma modülü ve kayma şekil değiştirme miktarlarındaki değişikleri de içine alacak şekilde kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop analizleriyle birlikte açıklanacaktır.

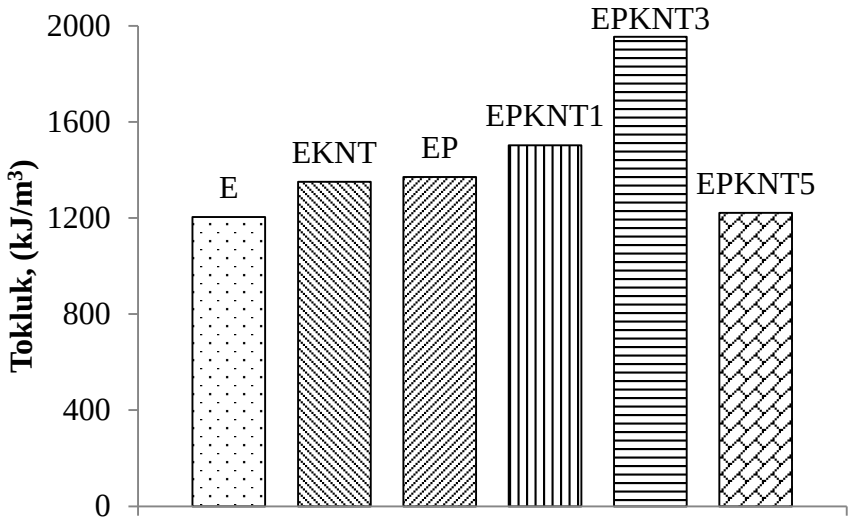


Şekil 5.7. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E: Epoksi reçine, b) EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) EP: PVA nano elyaf/Epoksi, d) EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantılarında kayma dayanımları ve şekil değiştirme miktarındaki değişimler, malzemenin kopana kadar yuttuğu toplam enerjiyi yani yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıların tokluğunu nasıl etkilediği sorusunu akla getirmektedir. Kırılma tokluğu kayma gerilmesi/kayma şekil değiştirmenin altında kalan alan olarak hesaplanır.

Epoksi reçine, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcılar birlikte kullanılarak yapılan yapıştırıcı bağlantılarının tokluk

değerleri üzerine etkisi Şekil 5.8.'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kontrol numunesi olan E yapıştırıcısıyla bağlanmış bağlantının tokluğu yaklaşık olarak 1204 kJ/m^3'tür. PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi takviyeli yapıştırma bağlantılarının toklukları sırasıyla 1503 ve 1954 kJ/m^3 olup, % 25 ve 45 oranında artmıştır. EPKNT3 yapıştırıcı bağlantısındaki önemli artış, yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının sünekliliğindeki iyileşmenin sonucudur. PVA+KNT nano elyaflar epoksi yapıştırıcı ile etkileşiminin arttığı ve nano elyafların köprüleme etkisiyle gevrek epoksiye süneklik kazandırmıştır. Fakat PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda ani düşüş göstererek 1221 kJ/m^3'dür. Bu değerdeki düşüşün sebebi KNTlerin topaklanmasından, nano elyafların KNTlerden dolayı çaplarının azalması ve hava kabarcıklarının oluşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.8. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların birim hacim için harcanan enerjileri; a) E: Epoksi reçine, b) EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) EP: PVA nano elyaf/Epoksi, d) EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Yukarıdaki deneysel sonuçlar açıkça ortaya koymaktadır ki, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi matriksle yapıştırılması sonucu tek taraflı bindirmeli bağlantının karakteristik kayma davranışını değiştirmiştir. % 1 ÇCKNT'ler ile PVA ve/veya ÇCKNT nanokeçe elyaflar epoksi matriks içerisine ilave edildiği zaman hem kayma dayanımının hem de şekil değiştirme miktarının artmasını sağlayarak yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının rijitliğini arttırırken sünekliliğini de iyileştirmiştir. Böylece tek taraflı bindirmeli bağlantının tokluğu önemli miktarlarda artarken nano

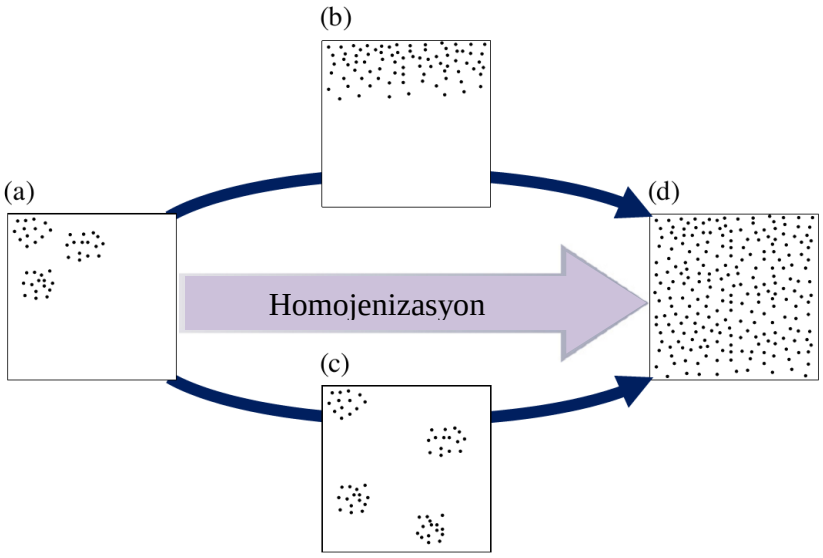
keçe elyaf takviyeli bağlantının kopuncaya kadar ki yuttuğu enerji miktarı arttırılmıştır. Bunun nedeni PVA çözeltisinin içerisine ağırlıkça % 1 ve 3 oranlarında KNT takviye edilerek PVA'nın elektrik iletkenliğini arttırarak nano elyaf çaplarının 150-300 nm arasında ve uzun elyaf olmasındandır. Bu değerlerde KNTler PVA içerisinde (EK-1) iyi dağılım gerçekleştirerek boncuklaşma oluşmamaktadır. Boncuklaşma oluşmayarak epoksi içerisinde çatlak başlangıcını ve hava kabarcıklarını önlenmesi ve ıslanmanın daha iyi oluşmasına yardımcı olmaktadır.

Literatür özetinde belirtildiği gibi nanokompozit malzemelerin mekanik özellikleri polimer ve/veya çözelti içerideki nanoparçacıkların dağılım durumu ile doğrudan alakalıdır (Prolongo ve ark., 2008; Sul ve ark., 2011; Khan ve ark., 2013; Korayem ve ark., 2014). KNTler ile takviye edilmiş polimerlerde mekanik özellikler (dayanım, süneklilik, kırılma tokluğu, ara yüzey dayanımı) genellikle artan KNTler miktarı ile artar ve KNTler miktarı ağırlıkça % 1'e ulaştığında maksimuma ulaşır. Bu oranların aşılması ile birlikte mekanik özelliklerde keskin düşüşler gözlemlenebilir. Bu düşüşler nanoparçacıkların homojen dağılmayarak Şekil 5.9.'da gösterildiği gibi epoksi reçine içerisinde KNTlerin topaklanmasından ve yüksek takviye maddesinin içeriğinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.9.a'da görüldüğü gibi KNTler epoksi içerisinde kötü dağıtılmış ve kötü dağılmıştır. Bu dağılım ve dağıtım epoksi reçine içerisinde bir bölgede toplanarak çatlak oluşumunun hızlı olarak ilerlemesine yol açmaktadır. Böylece daha az yük taşıma kapasitesine sahiptir. Şekil 5.9.b'de görüldüğü gibi KNTler epoksi matriks içerisinde iyi dağıtılmış ve kötü dağılmıştır. Epoksi yapıştırıcı gevrek olduğu için KNT olmayan bölgede çatlak ilerlemesi hızlı olup, KNTlü bölgede ise yavaşlamaktadır. Şekil 5.9.c'de görüldüğü gibi KNTler kötü dağıtılmış ve iyi dağılmıştır. Epoksi yapıştırıcı içerisinde kötü dağıtmadan dolayı farklı bölgelerde KNTler iyi dağıldığından böyle bir yapıştırmada çatlak ilerlemesi yavaş ve yük taşıma kapasitesi sahiptir. İyi bir ıslanma olduğu zaman KNTler köprüleme etkisiyle epoksi yapıştırıcının dayanımını arttırır. Eğer zayıf bir ıslanma mevcut olursa çatlak ilerlemesi yavaş gerçekleşir.

Şekil 5.9.d'de görüldüğü gibi KNTler epoksi yapıştırıcı içerisinde iyi dağıtılmış ve iyi dağılmıştır. Epoksi yapıştırıcı içerisinde KNTler iyi ıslandığı zaman çatlak ilerlemesi çok yavaş olacaktır. Böylece epoksi yapıştırıcının gevrek özelliği KNTler köprüleme etkisiyle süneklik kazandırılarak maksimum dayanım ve tokluk elde edilecektir. Eğer KNTler epoksi yapıştırıcı içerisinde iyi ıslanmadığı zaman çatlak ilerlemesi bir KNT'ten diğer KNT'e geçerek çatlak yön değiştirerek yavaş

ilerleyecektir. Bu yüzden çatlak ilerlemesi esnasında yön değiştirmeden dolayı fazla enerji harcanacaktır. Yine de böyle bir durumda yük taşıma kapasitesi yüksek olacaktır.



Şekil 5.9. Matris içinde parçacıkların dağılımı ve dağıtımı durumları: (a) kötü dağıtılmış ve kötü dağılmış, (b) iyi dağıtılmış ve kötü dağılmış, (c) kötü dağıtılmış ve iyi dağılmış ve (d) iyi dağıtılmış ve iyi dağılmıştır (Sul ve ark., 2011)

Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma gerilmesi, kayma modülü, bağlantının tokluğu, % kayma şekil değiştirme uzama miktarları ve yapıştırıcı tipleri Çizelge 5.4.'de verilmiştir. Ayrıca üretilen PVA ve/veya ÇCKNTlü nanokeçe elyaflı yapıştırıcıların yük/uzama grafikleri, kayma dayanımı ve bağlantının tokluk değişimlerini göz önüne almak üzere detaylı incelenmiştir. Çizelge 5.4.'de belirtildiği gibi PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcı bağlantının % kayma uzaması saf epoksi reçine ile karşılaştırıldığı zaman % 14'lük bir artış ile 15.81 olmuştur. Bu bağlantıya kadar % kayma şekil değiştirme uzamasında artış görülmekte olup, bu değerden sonra PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcı bağlantıların da kayma uzamalarında ani olarak 10.36 düştüğü görülmektedir. Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen nano elyaflar ilave edildiğinde şekil değiştirme miktarlarını iyileştirmektedir.

Ayrıca epoksi yapıştırıcı, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma modülü Çizelge 5.4.'te verilmiştir. Epoksi yapıştırıcının kayma modülü 0.156 GPa'dır. Epoksi yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında ÇCKNT ilave edilmesiyle kayma modülü 0.219 GPa'a % 40'lık bir artış göstermektedir. PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcı bağlantılarında da

kayma modülü % 40'lık bir artış göstermektedir. Fakat PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcı bağlantısında kayma modülü 0.174 GPa' düşerek süneklik kazandırarak % kayma uzaması 15.81 olmuştur. PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcı bağlantısında ise kayma modülü % 46 oranında artmış olup, % kayma uzaması 10.36 düşerek yapıştırıcının gevrek özelliğini arttırmıştır.

Çizelge 5.4. Yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıların kayma gerilmesi, kayma modülü, tokluk, % uzama miktarları ve yapıştırıcı tipleri

Yapıştırma	Kayma dayanımı (MPa)	Kayma modülü (GPa)	Tokluk (kJ/m^3)	% Uzama
Saf epoksi	20.81	0.156	1204	11.57
Epoksi+%1 ÇCKNT	23.53	0.219	1351	11.48
Epoksi+ PVA nano elyaf	23.62	0.201	1370	11.59
Epoksi+ PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf	25.17	0.219	1503	11.94
Epoksi+ PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf	24.72	0.174	1954	15.81
Epoksi+ PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf	23.59	0.227	1221	10.36

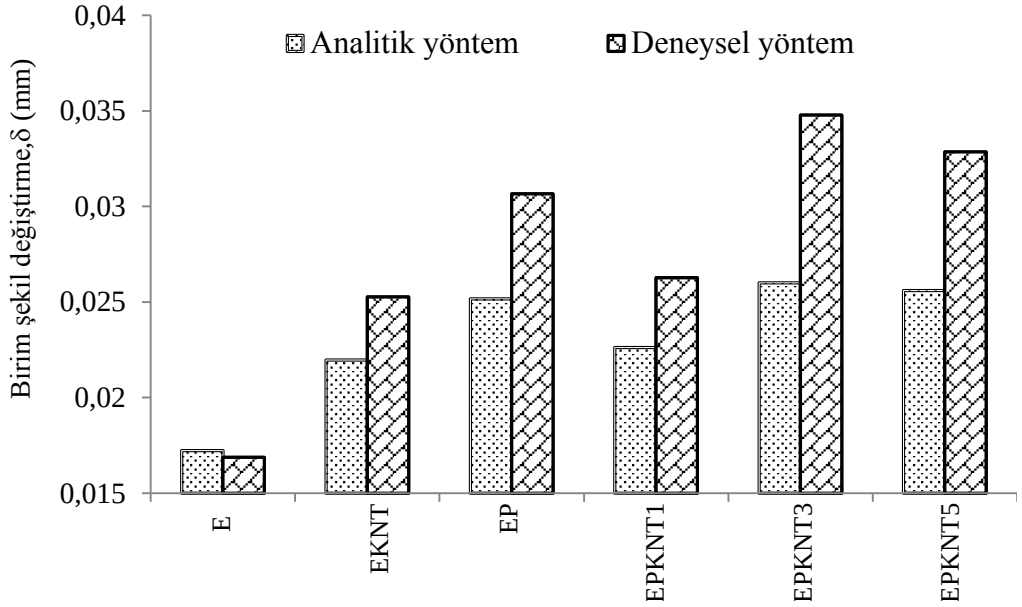
5.3. Bağlantıların Birim Şekil Değiştirmelerinin Analitik ve Deneysel Yöntemler ile Karşılaştırılması

Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantılarında deneysel ve Adams ve Peppiatt gerilme ifadesine göre birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.10.'da verilmiştir. Birim şekil değiştirme miktarındaki değişimler Şekil 4.8.b'de gösterildiği gibi Instron 2630-602 dinamik ekstansometre ile ölçülmüştür. Daha sonra Adams ve Peppiatt birim şekil değiştirme ifadesi denklem 3.15'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca denklem 3.7.'den epoksi yapıştırıcının birim şekil değiştirmesi hesaplanmıştır. Daha sonra yapıştırılan malzemenin üst üstte bindirme uzunluğunun birim şekil değiştirmesi ile yapıştırıcının birim şekil değiştirmesi toplanmıştır.

Şekil 5.10.'a göre epoksi yapıştırıcının tek taraflı bindirmeli bağlantıların birim şekil değiştirme sonuçları, deneysel ile analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında % 2 oranında fark oluşmaktadır. Fakat % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların deneysel ile analitik yöntemin şekil değiştirme miktarlarını incelediğimizde farkın açıldığını görmekteyiz. Epoksi yapıştırıcılarda Adams ve Peppiatt'ın analitik yöntemin birim şekil değiştirmesi 0.0172 mm iken deneysel olarak 0.0169 mm'dir. % 1 ÇCKNT/epoksi yapıştırıcının birim şekil

değiştirmesi analitik yöntemde 0.0220 mm'den deneysel çalışmada 0.0253 mm ile aralarında % 15 fark oluşmaktadır.

Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların şekil değiştirme miktarları analitik yöntemde sırasıyla 0.0252, 0.0226, 0.0260 ve 0.0256 mm'den deneysel çalışma 0.0306, 0.0263, 0.0348 ve0.0328 mm'dir. Adams ve Peppiatt'ın analitik yöntem ile deneysel çalışmalarımızdaki birim şekil değiştirmeler aralarındaki fark artmakta olup, PVA nano elyafların takviyesiyle bu analitik yöntem uygun olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.10. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların analitik yöntem ile deneysel yöntemlerin karşılaştırılması; a) E: Epoksi reçine, b) EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) EP: PVA nano elyaf/Epoksi, d) EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

5.4. Çift Konsol Kiriş Yöntemiyle Kırılma Tokluğu Analizleri

Şekil 5.11.'de gösterildiği gibi epoksi yapıştırıcı, % 1 ÇCKNT/epoksi, PVA nano elyaf, PVA + % 1 ÇCKNT nano elyaf/epoksi, PVA + % 3 ÇCKNT nano elyaf/epoksi ve PVA + % 5 ÇCKNT nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların ÇKK testlerine ait yük-çatlak ağzı açılma miktarı (P-COD) eğrileri verilmiştir. Numunelerin başlangıç çatlak uzunlukları, yapıştırılan Al2024-T3 malzemelerin özellikleri ve yüzey hazırlama metotları aynıdır. ÇKK test yönteminde deneyler sabit yer değiştirme hızında yapılmış

ve yer değiştirme hızı 3 mm/dk olarak seçilmiştir. P-COD eğrilerinin üzerinde gösterilen değerler çatlak uzunluklarını mm olarak göstermektedir.

Şekil 5.11.a'da görüldüğü gibi epoksi yapıştırıcının kararlı çatlak ilerlemesi 7.20 mm'ye kadar devam etmiş ve maksimum yükleme 66.52 N'da son bulmuştur. Bu yüklemeden sonra çatlak başlangıç noktası 7.20 mm'den sonra aniden kararsız çatlak ilerlemesi oluşarak 31.50 mm'de ve 21 N yüklemede durmuştur. Yükleme (66.52N), çatlak ağzı açılma miktarı 6.00 mm'ye ulaşmasıyla daha hızlı düşerek (21N) başlangıç çatlak ilerlemesi gevrek kırılma daha belirgin hale gelmiştir. Daha sonra çatlak durma noktası 31.50 mm'den 36.40 mm'ye kadar kararlı çatlak ilerlemesi oluşmuş olup, çatlak ağzı açılma miktarı 10.00 mm ve 30.88 N yüklemede son bulmuştur. Kararsız çatlak ilerlemesi çatlak başlangıç noktası 36.40 mm'de başlayarak 66.80 mm çatlak durma noktasında son bulmuştur. Sonuç olarak 21.15 mm çatlak ağzı açılma miktarında ve maksimum kararlı çatlak ilerlemesi 70.20 mm'de aniden kararsız çatlak ilerlemesine girerek 25.40 N'da kopmuştur.

Ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT/epoksi yapıştırıcıda kararlı çatlak ilerlemesi 10.50 mm'ye kadar devam ederek maksimum 65.05 N yüklemeden sonra aniden kararsız çatlak ilerlemesi meydana gelmiştir (Şekil 5.11.b). Çatlak başlangıç noktası 10.50 mm'den kararsız çatlak ilerlemesinin durma noktası 35.60 mm'de ve 22 N yüklemede olmuştur. Çatlak ağzı açılma miktarı ise 7.50 mm'de gerçekleşmiştir. Daha sonra çatlak durma noktası 35.60 mm'den 38.50 mm'ye kadar kararlı çatlak ilerlemesi oluşmuş olup, çatlak ağzı açılma miktarı 16.50 mm ve 42.52 N yüklemede son bulmuştur. Sonuç olarak 24.00 mm çatlak ağzı açılma miktarında ve maksimum kararlı çatlak ilerlemesi 112.50 mm'de aniden kararsız çatlak ilerlemesine girerek 27.57 N'da kopmuştur.

Epoksi yapıştırıcı ile ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT/epoksi yapıştırıcı arasındaki fark, toplam kararlı çatlak ilerlemeleri sırasıyla 15.5 mm (7.20+4.90+3.40) ve 27.80 mm (10.20+2.90+14.70)'dir. Bu toplam kararlı çatlak ilerlemeleri % 1 ÇCKNT/Epoksi yapıştırıcının kırılma tokluğunun daha fazla olduğunu göstermektedir. Ayrıca ikinci ve üçüncü çatlak başlangıç noktalarındaki yüklemeler epoksi reçine ile karşılaştırıldığında 30.88 ve 25.40 N'dan 42.52 ve 27.57 N'dur. Bu artışların sebebi KNTlerin epoksi yapıştırıcı içerisinde köprüleme etkisiyle ÇKK testinin kırılma tokluğunu iyileştirmiştir.

Şekil 5.11.c'de görüldüğü gibi PVA nano elyaf/Epoksi yapıştırıcının maksimum yükleme 64.69 N'da ve kararlı çatlak ilerlemesi 4.50 mm'de gerçekleşmiştir. Bu

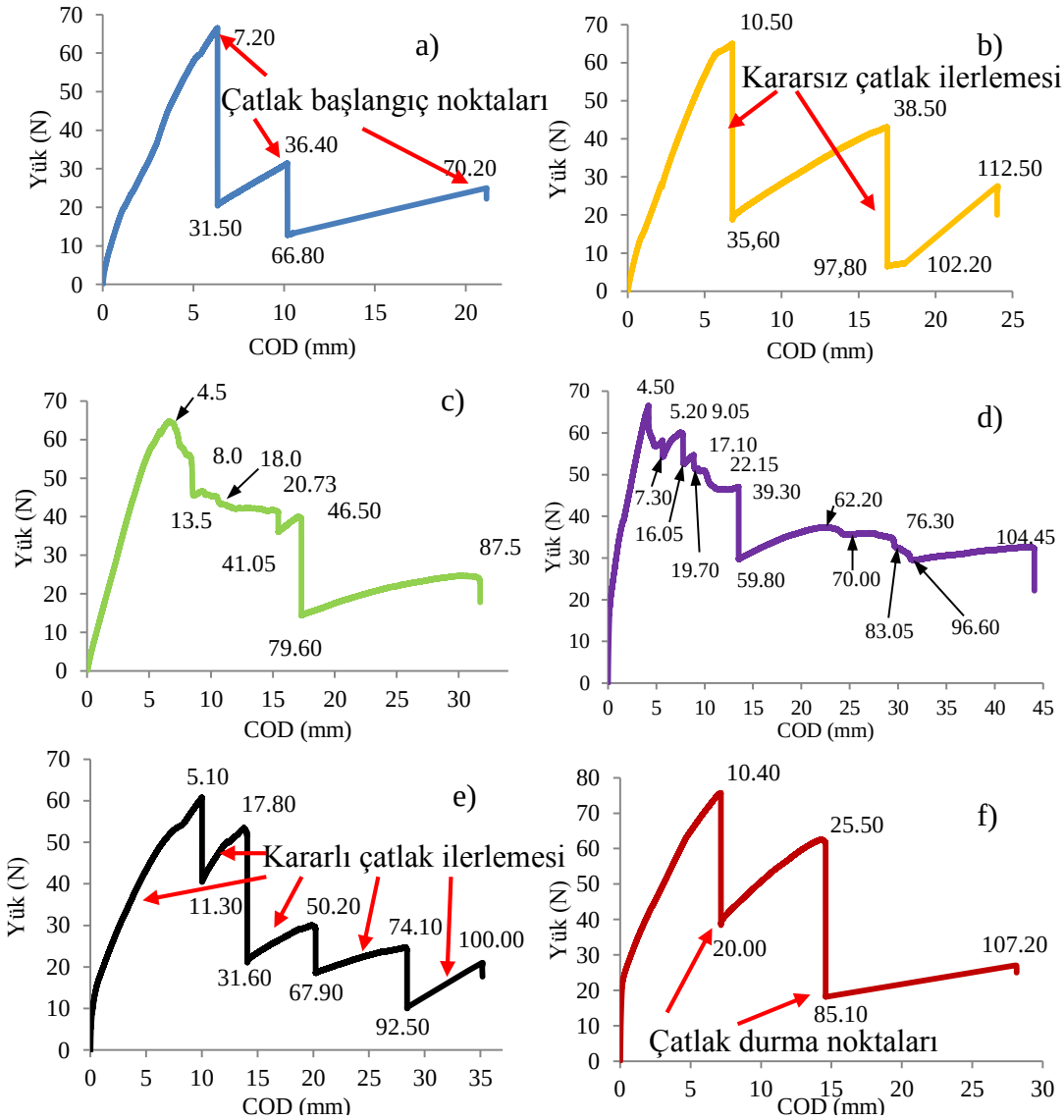
yüklemeden sonra kararlı çatlak ilerlemesi 8.00 mm'ye kadar devam etmiştir. Çatlak ağzı açılma miktarı 8.20 mm'de aniden kararsız çatlak ilerlemesi başlayarak çatlak durma noktası 13.50 mm'de ve 45.85 N yüklemede durmuştur. Çatlak durma noktası 13.50 mm'den 20.73 mm'ye kadar kararlı çatlak ilerlemesi oluşmuş olup, çatlak ağzı açılma miktarı 16.50 mm ve 41.73 N yüklemede son bulmuştur. Çatlak başlama noktası 20.73 mm'den 41.05 mm'ye kadar kararsız çatlak ilerleme gerçekleşmiştir. Yüklemenin devam etmesiyle kararlı çatlak ilerlemesi 46.50 mm ve 39.93 N'a kadar devam etmiştir. Daha sonra 39.93 N yüklemeden ani olarak 17.50 N'a düşerek kararsız çatlak ilerlemesi meydana gelmiştir. Son olarak 31.50 mm çatlak ağzı açılma miktarında ve maksimum kararlı çatlak ilerlemesi 87.50 mm'de aniden kararsız çatlak ilerlemesine girerek 24.26 N'da kopmuştur.

PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi yapıştırıcının kararlı çatlak ilerlemesi 4.50 mm'de 66.52 N'da maksimum yükleme gerçekleşmiştir (Şekil 5.11.d). Bu yüklemeden sonra yükleme azalarak kararlı çatlak ilerlemesi 39.30 mm'ye ve 46.92 N yüklemeye kadar devam etmiştir. Çatlak ağzı açılma miktarı 13.33 mm'de aniden kararsız çatlak ilerlemesi başlayarak çatlak durma noktası 59.80 mm'de ve 30.73 N yüklemede durmuştur. Daha sonra çatlak durma noktası 59.80 mm'den 104.45 mm'ye kadar kararlı çatlak ilerlemesi devam etmiş olup, çatlak ağzı açılma miktarı 44.05 mm ve 32.42 N yüklemede aniden kopmuştur.

PVA nano elyaf/Epoksi ile PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi yapıştırıcı arasındaki fark, toplam kararlı çatlak ilerlemeleri sırasıyla 34.05 mm ve 84 mm'dir. PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi yapıştırıcının toplam kararlı çatlak ilerlemeleri PVA nano elyaf/Epoksi yapıştırıcıdan % 147 daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum KNT takviyeli PVA nano elyaflar epoksi yapıştırıcıya süneklik kazandırmıştır.

PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaflar epoksi yapıştırıcıya takviye edilerek kararlı çatlak ilerlemeleri 15.5 mm'den 84 mm'ye kadar artmıştır. Bu da epoksi yapıştırıcıya süneklik kazandırmıştır. Nano elyaflar epoksi yapıştırıcı içerisinde köprüleme yaparak çatlak ilerlemesini yavaşlatmıştır.

Şekil 5.11.e ve f'de görüldüğü gibi PVA çözeltisinin içerisine katılan KNTler arttıkça kararlı çatlak ilerleme miktarları azalmaktadır. Aynı zamanda epoksi yapıştırıcı gibi gevrek kırılma özelliği oluşmaktadır. Nano elyaf üretiminde KNTler arttıkça topaklanma oluşmakta, nano elyaf çaplarını düşmekte ve viskozitesi artmaktadır.



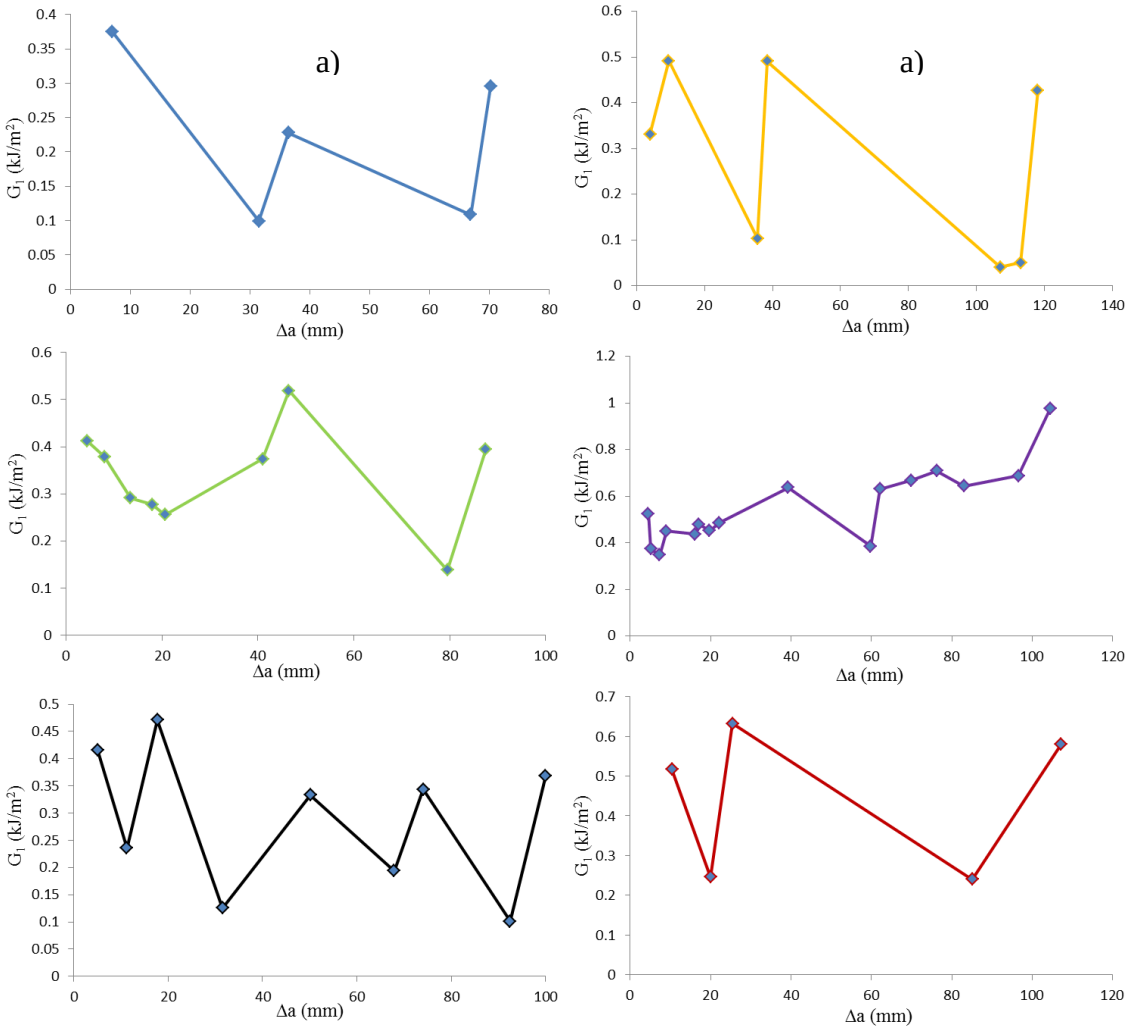
Şekil 5.11. ÇKK numunelerine ait yük-çatlak ağzı açılma miktarı eğrileri (Eğrilerin üzerinde gösterilen değerler çatlak uzunluklarını mm olarak göstermektedir); a) Epoksi reçine, b) % 1 ÇCKNT/Epoksi, c) PVA nano elyaf/Epoksi, d) PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, e) PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi ve f) PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen PVA ve/veya ÇCKNT takviyeli PVA nano elyafların tabakalar arası kırılma direncini arttıran mekanizmalardan çatlak ucunun gerisinde oluşan elyaf köprülenmesi mekanizmaları numunenin kırılma yüzeylerinde görülür. Bu çatlak köprülenmesi mekanizması kararsız, büyük yük düşüşlerine neden olarak yük- çatlak ağzı açılma miktarı eğrilerinin testere ağzına benzemesine sebep olur. Başlangıç çatlağının oluştuğu anda numunelerde yük değerinde düşmeler olmuştur. Bu durum, çatlağın ayırıcı filmden itibaren matriks içerisinde yayılmaya başladığının göstergesidir. Şekil 5.11.'de görüldüğü gibi nano elyaf takviyeli ÇKK test

numunelerinde ani düşüş olmamış olup, süneklik kazandırarak çatlak ilerlemesi için daha fazla enerji gerekmektedir.

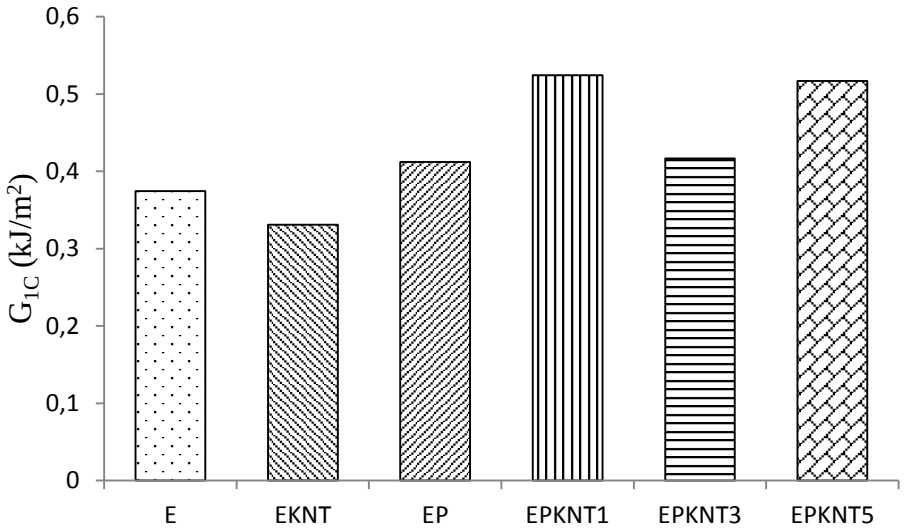
ÇKK deneylerinde PVA ve/veya ÇCKNTlü nanokeçe elyaf takviyeli epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılarda tabakalar arası çatlak ilerleme davranışının kararsız oluşu nedeniyle, şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı (G_I) değerleri ani yük düşüşünden hemen önceki en büyük yük kullanılarak hesaplanır. ÇKK numuneleri kullanılarak Mod I durumu için G_I-Δa grafikleri Şekil 5.12'de verilmiştir. E numunesinin enerji kaybı- çatlak uzunluğu incelendiği zaman maksimum yükten sonra çatlak ilerlemeleri hızlı olup, maksimum çatlak uzunluğu 62.22 mm'de kopmuştur. Bu da yapının gevrek bir davranış sergilediğini göstermektedir. EP, EPKNT1 ve EPKNT3 numuneleri maksimum yükten sonra çatlak ilerlemesi plato bölgesi oluşturmuş olup çatlak uzunlukları sırasıyla 79.5, 104.45 ve 110 mm'de kopmuştur. Bu durum yük-COD eğrilerindeki farklılıktan açıkça görüle bilinir. Bu davranış nanokeçe elyafların çatlak köprülenmesinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Fakat ÇKK deneylerindeki EPKNT5 numunesinde nanokeçe elyaf takviye epoksi reçineyi daha çok gevrekleştirerek çatlak ilerlemesini hızlandırmıştır.

EP, EPKNT1 ve EPKNT3 ait yük-yer değiştirme eğrilerindeki kuvvet düşüşleri E, EKNT ve EPKNT5 ait yük-yer değiştirme eğrilerine göre daha azdır. Sonuç olarak, EPKNT1 numunelerinde çatlak ilerleyişi daha kararlı bir davranış sergileyerek G_I değerlerinin artmasına neden olmuştur. Numunelere ait kırılma tokluğu-çatlak uzunluğu eğrilerinin en belirgin karakteristik özelliği eğrilerin düz olmayıp testere şeklinde oluşudur. Bu davranış nanokeçe elyaf takviyeli yapıştırıcı bağlantılarında, nanokeçe elyafların yüzeyinin düzgün olmayışı nedeniyle çatlağın ilerlerken sürekli matriks içerisinde yön değiştirmesi sonucu enerji kaybetmesi ve farklı yönlerdeki nanokeçe elyaf yığınlarının neden olduğu çatlak ucu köprüleme etkisinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.12. ÇKK numunelerine ait şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı -çatlak uzunluğu eğrileri

Şekil 5.13.'te ÇKK testi sonuçlarının çatlak başlangıcı Mod I'e göre kritik şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarları gösterilmiştir. E numuneleri için çatlak başlangıcı için kritik kırılma tokluğu miktarı (G_{IC}) değeri 0.33 kJ/m^2'iken EPKNT1 numuneleri için kritik kırılma tokluğu miktarı 0.52 kJ/m^2 ve çatlağı başlatmak için şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarında % 58'lik bir artış olmuştur. E numunesi için bulunan G_{IC} değerleri literatür ile örtüşmektedir (Steinbrecher ve ark., 2006). EPKNT5 numunelerinde çatlak başlangıcı için gerekli olan kritik kırılma tokluğu miktarı 0.51 kJ/m^2'dir.

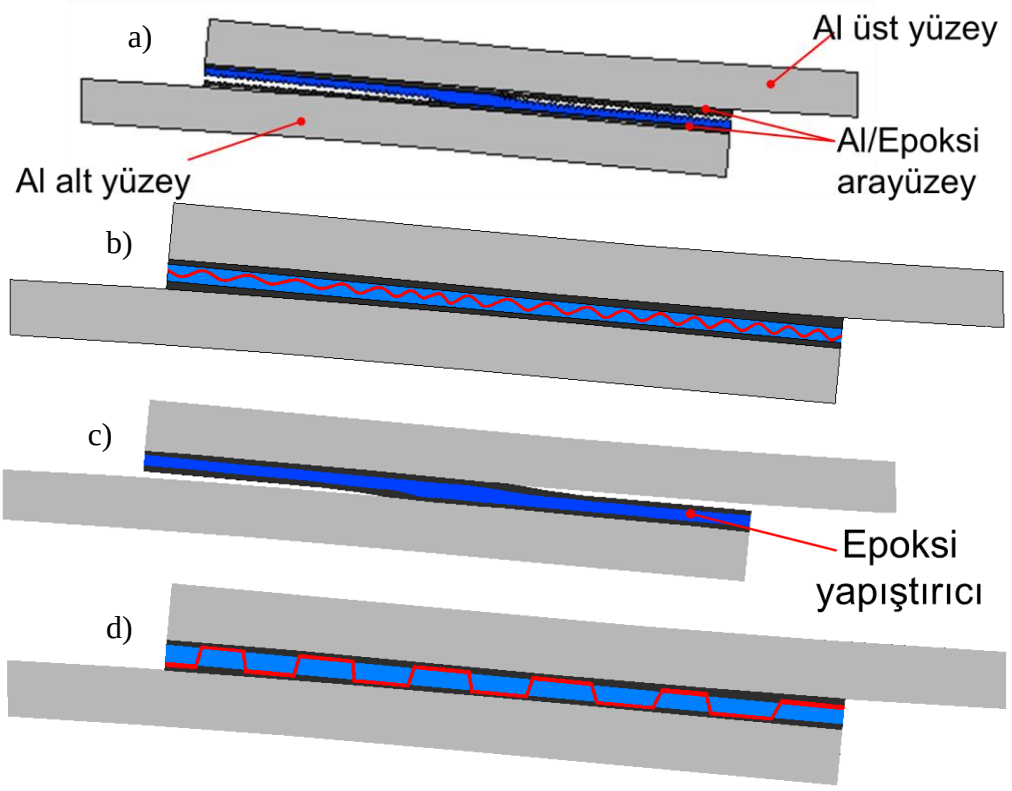


Şekil 5.13. ÇKK testi sonuçlarının çatlak başlangıcı Mod I'e göre kritik kırılma enerjileri; E: Epoksi reçine, EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, EP: PVA nano elyaf/Epoksi, EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

5.5. Kırılma Yüzeylerinin Analizleri

Kırılma yüzeyleri hem optik olarak hem de SEM kullanılarak incelendi. Optik mikroskobu kırılma yüzeylerinin görünümünü incelemek ve hatanın odağını araştırmak için kullanılmıştır. SEM analizi için numuneler 10x10 mm boyutlarında testere ile kesildi. Aseton ile yıkanarak temiz hava ile kurutuldu. Daha sonra bu parçalar metal stubların üzerine yapıştırılarak SEM görüntüleri alındı.

Şekil 5.14.'te görüldüğü gibi yüksek mukavemetli yapıştırıcılar da çatlak büyümesi için dört tip kırılma mekanizması vardır. En iyi temsil edilen yapıştırıcının kohezyon özelliklerinden yapıştırılan malzemeyle güçlü bir arayüze neden olan düzgün bir yüzey hazırlamayla karakterize edilen kohezyon kırılmadır (Şekil 5.14. a). Ayrıca kohezyon kırılma yapıştırıcı içerisinde zig-zag giderek daha fazla yol alacağından kırılma enerjisi fazla olacaktır (Şekil 5.14. b). Kayma gerilmesi veya kırılma tokluğu maksimum olacaktır. Arayüzey kırılmalar (Şekil 5.14.'c) ise yapışma yüzeylerin zayıf hazırlanması sonucu olarak veya düşük yüzey enerjili yapıştırılan malzeme yapıştırıldığında sıklıkla görülür. Çatlak ilerlemesine alternatif arayüzler arasında, çatlak ucunun öncesinde alternatif olarak zıt arayüzlerde mikro-çatlakların açılmasıyla görülebilir (Şekil 5.14.'d).

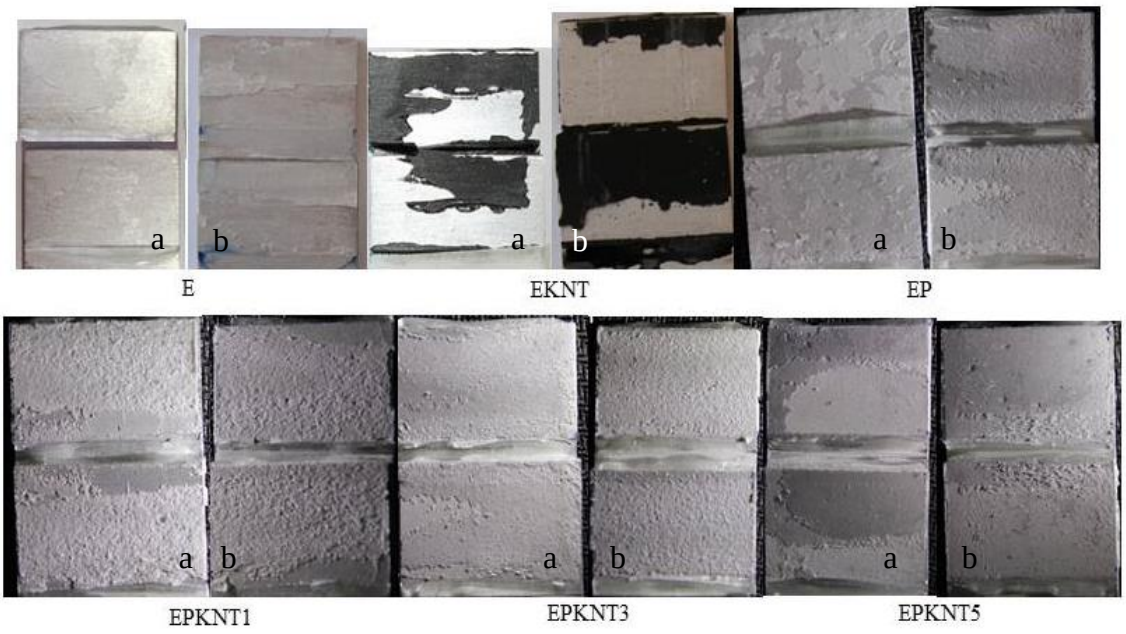


Şekil 5.14. Yapısal yapıştırıcıların tipik kırılma modları

Şekil 5.15.'te yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeylerin makroskobik fotoğrafları gösterilmektedir. Bu fotoğraflar incelendiği zaman kırılma yüzeyleri hakkında bilgilere sahip olabiliriz. Epoksi reçine gibi yüksek mukavemetli yapıştırıcılarda dört tip çatlak ilerleme mekanizması vardır. En iyi temsil eden biri yapıştırıcının kohezyon özelliklerinden yapıştırılan malzemeyle güçlü bir arayüze yol açan uygun yüzey hazırlığıyla karakterize edilen kohezyon bozulmadır. Şekil 5.15.'te EPKNT1 ve EPKNT3 numunelerinde gösterildiği gibi çatlak, PVA ve % 1 ve 3 ağırlık oranlarında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf takviyeli epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantı durumlarında yapıştırıcı boyunca ilerlemiştir. Böylece kayma gerilmeleri ve toklukları diğer yapıştırıcı bağlantılarından daha yüksek olmuştur.

Arayüzey bozulmalar düşük yüzey enerjisi ya da yapışma yüzeylerin zayıf yüzey hazırlama sonucunda yapıştırılan malzemelerin bağlanmasıyla sık sık olur. Şekil 5.15.'te EPKNT5'a ve EKNT'b numunelerinde gösterildiği gibi çatlak, yapıştırılan malzeme ile takviye edilmiş yapıştırıcının arayüzeyi boyunca ilerlemiştir (Şekil 5.14. c). Arayüzler arasındaki dönüşümlü çatlak yayılma da alternatif olarak çatlak ucunun öncesinde zıt arayüzlerinde mikro-çatlakların açılması nedeniyle görünebilir. Şekil 5.15.'te EP'a ve E'a numunelerinde gösterildiği gibi çatlak, yapıştırıcı ve yapıştırılan

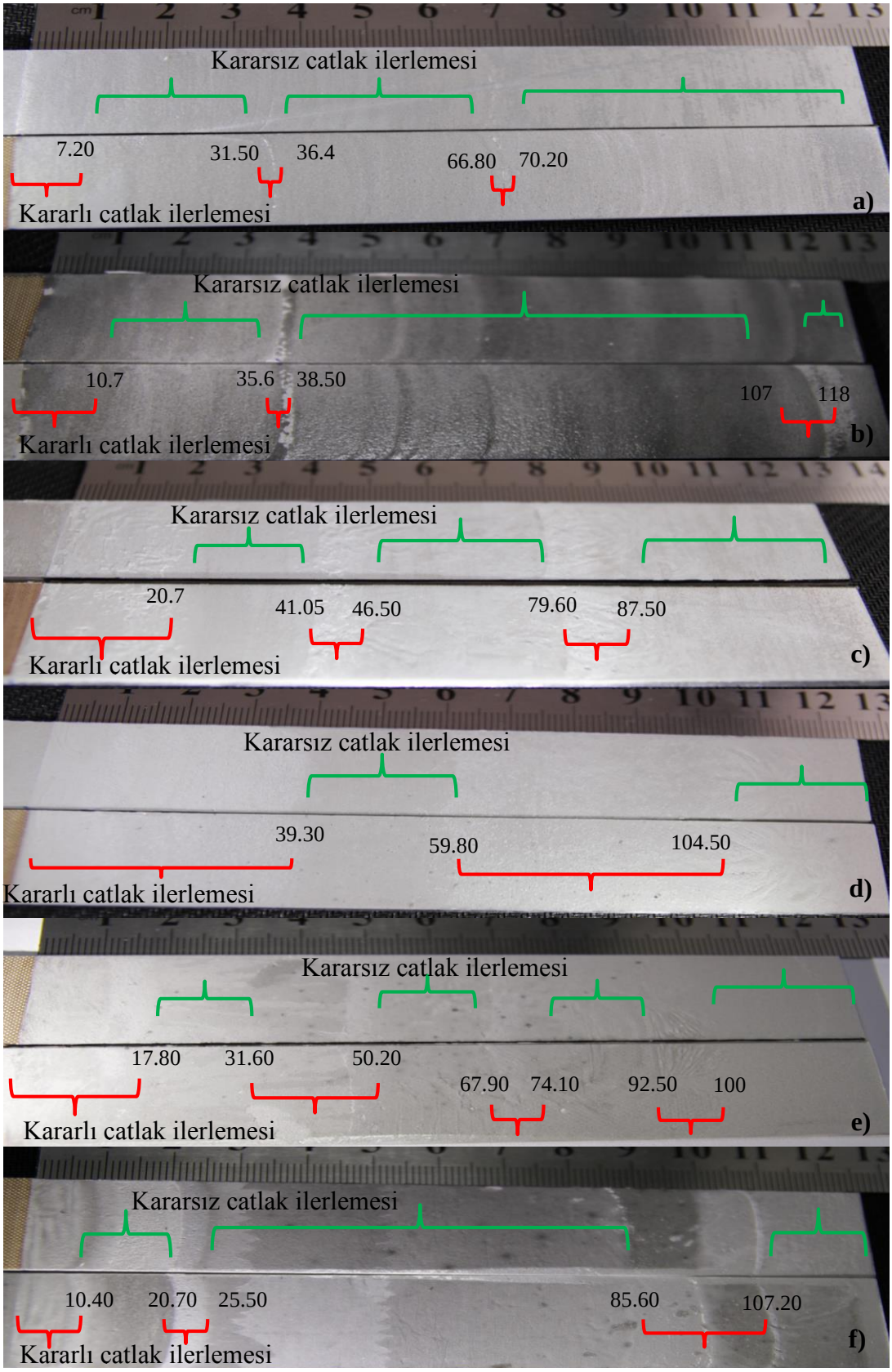
malzeme arasındaki arayüz boyunca ilerler, aniden bir zig-zag şekilde (Şekil 5.14. d) ilk yönünü değiştirir ve kırılma yüzeyinin tüm uzunluğu boyunca çatlak yayılma yukarı ve aşağı desen şekline neden olur.



Şekil 5.15. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeylerin makroskobik fotoğrafları; E: Epoksi reçine, EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, EP: PVA nano elyaf/Epoksi, EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Şekil 5.16.'da yapıştırıcıyla bağlanmış ÇKK test bağlantıların ayrıldıktan sonra kırılma yüzeylerin yüzey hataların makroskobik fotoğrafları gösterilmektedir. Statik yük altında şekilde görüldüğü gibi çatlak izi EP, EPKNT1 ve EPKNT3 numunelerinde çatlak yüzeylerinde çoğunlukla kohezyon hasarları sırasıyla % 32, 72 ve 45 oranlarında oluşmaktadır. PVA ve % 1 ve 3 ağırlık oranlarında ÇCKNTlü nanokeçe elyaf takviyeli epoksi yapıştırıcı bağlantılarından beklendiği gibi, nanokeçe elyafların çatlak başlandıktan sonra kohezyon hasarı kararlı bir şekilde (kırmızı çizgiler) ilerlemiş olup, yapıştırıcıda hasar bölgesi tamamen geliştiği zaman kısmi olarak kararsız bölge (yeşil çizgiler) oluşmaktadır. Bu numunelerde çatlak başlangıcının ilk kararlı bölgesi saf epoksi ile karşılaştırıldığı zaman sırasıyla % 188, 446 ve 147 oranlarında artış göstermiştir. Bu da ÇKK bağlantılarında nanokeçe elyafların ilavesi yapıştırıcıda köprülemeyle kohezyon hasarını iyileştirdiği, bağlantının sünekliğini ve kırılma tokluğunu arttırmıştır.

Statik yükleme devam ederek kopmadan önce son karasız bölgede ani olarak kopmuştur. E numunesinin çatlak yüzeyleri incelendiği zaman epoksi reçine gevrek oluğu için kararlı bölgede çatlak ilerlemesi çok az olup bir anda kararsız bölge oluşarak yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin arayüzünde adezyon hasarıyla kopmuştur. Epoksi reçine içerisine ÇCKNTler ile PVA ve % 5 ağırlık oranlarında ÇCKNTlü nanokeçe elyaf takviye edildiği zaman Şekil 5.15'b ve f'de görüldüğü gibi kohezyon hasarı gerçekleşerek kopmuştur. Sonuç olarak bütün numunelerde kararlı bölgede çatlak yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasından ilerlemiştir.

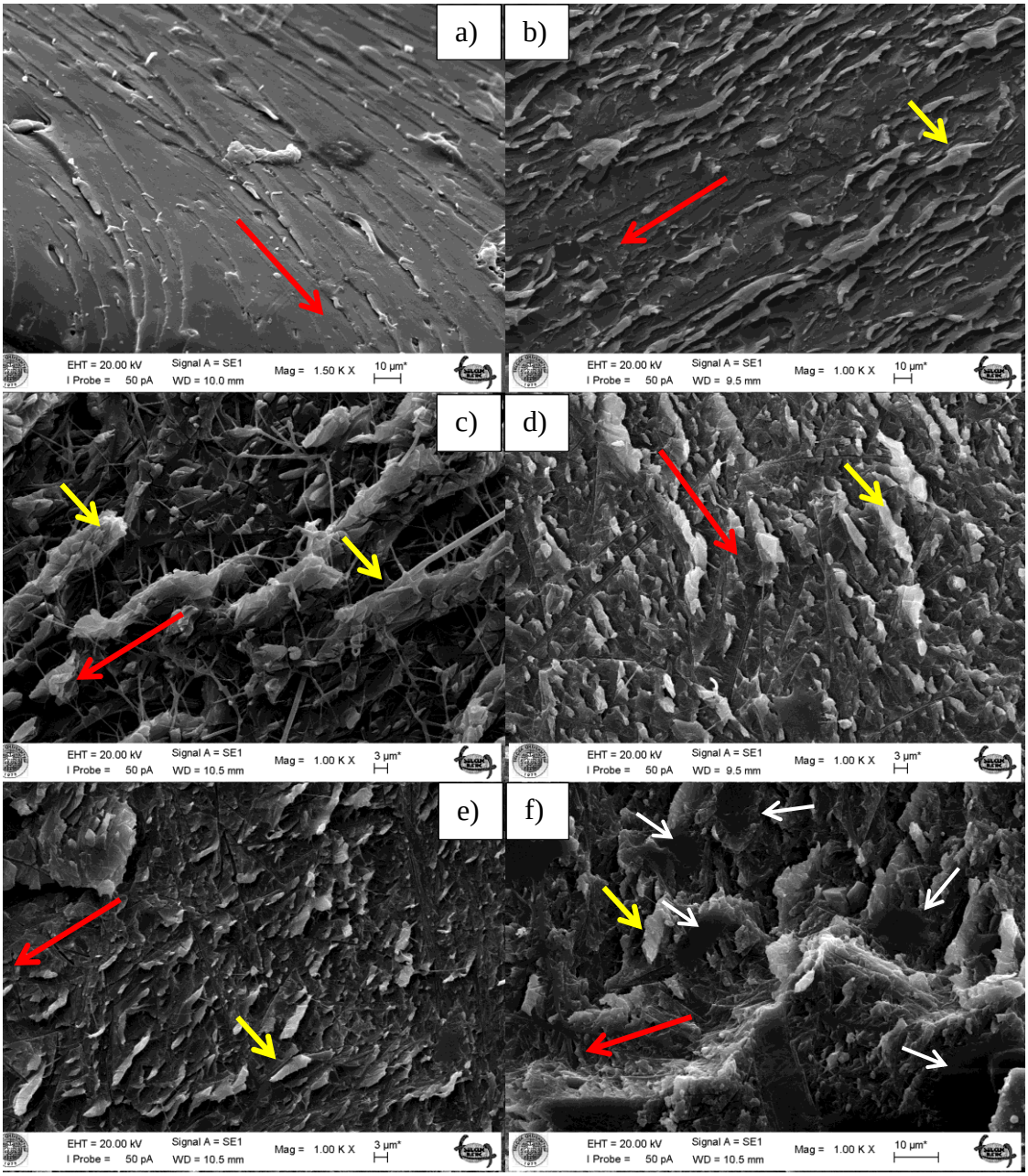


Şekil 5.16. ÇKK test bağlantıların kırılma yüzeylerin makroskobik fotoğrafları; E: Epoksi reçine, EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, EP: PVA nano elyaf/Epoksi, EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

% 1 ÇCKNT'ler ile PVA ve/veya ÇCKNT nanokeçe elyaf takviyeli epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi bulunan ZEİSS Evo LS 10 cihazı ile 20kV gerilimde elde edilmiştir.

Şekil 5.17.'de nanokeçe elyaf takviyeli epoksi reçine numunelerine ait çekme deneyi ardından sonraki kırılma yüzeylerinin 1 000X büyütmelerde SEM fotoğrafları verilmiş olup, kırılma yüzeyleri SEM kullanılarak incelenmiştir. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeyleri, kırılma davranışlarında nanoparçacık ve nano elyaf modifikasyonun etkileri ve kırılma mekanizmaları hakkında ilk bilgiyi verir. Epoksi reçinenin kırılma yüzeyleri incelendiğinde tipik gevrek kırılma sürecinde olduğu gibi özelliksiz ve çatlağın başlaması ve ilerlemesi için zayıf direncini doğasını ortaya çıkaran yüzey daha düz ve pürüzsüzdür (Şekil 5.17. a). Fakat Şekil 5.17. b,c,d,e ve f'de gösterildiği gibi % 1 ÇCKNT/Epoksi yapıştırıcı ile PVA ve/veya ÇCKNT takviyeli nano elyaf epoksi yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıların kırılma yüzeyleri ise nehir akıntıları (uzun kırmızı oklar çatlak büyüme yönünü gösterir) gibi yapılar nispeten pürüzlü ve parçacıklıdır.

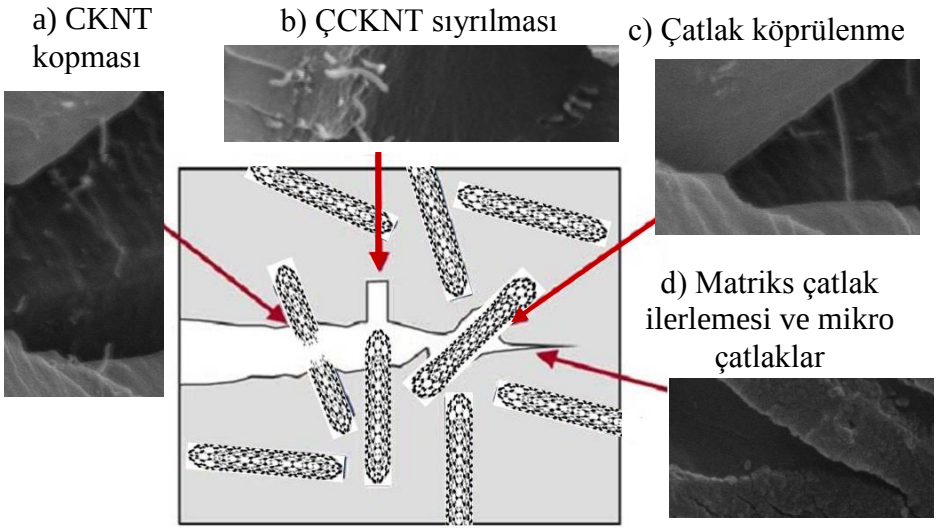
PVA ve/veya ÇCKNT takviyeli nano elyaf takviyeli yapıştırıcı, saf epoksi ile karşılaştırıldığında daha kaba kırılma yüzeyleri sergiler. Aynı zamanda keten tarağıyla taranmış çok sayıda kıvrımlı ve ince nehir akıntıları (sarı oklar) gibi sarp yamaçlı yapılar görülmektedir. Normal olarak gelişmiş yüzey pürüzlülüğü matriksin plastik deformasyon oluşturulmasına eşlik etmektedir ve böylece daha çok kırılma enerjisi harcanır. Bu nedenle matris içinde % 1 ÇCKNT'ler ile PVA ve/veya ÇCKNT takviyeli nano elyaf yapıştırma bağlantılarında Şekil 5.9. gösterildiği gibi daha iyi dağılım ve dağıtım hali, kırılma süreci esnasında enerji dağılımının artmasıyla daha yüksek kayma dayanım ve tokluk değerine neden olur. Şekil 5.17. c, d, e ve f'de PVA ve/veya ÇCKNT takviyeli nano elyaf takviyeli yapıştırıcılarda elyaf sıyrılması ile matriksçe zengin bölgenin görüntüsü verilmektedir. SEM görüntüsü açıkça ortaya koymaktadır ki kırılma yüzeyleri en pürüzlü olan numuneler nanokeçe elyaf takviyeli numunelerdir. Şekil 5.17.f'de EPKNT5 numunesinde beyaz oklar ile gösterilen bölgeler hava kabarcığının olduğu ve nanokeçe elyafların iyi ıslanmadığı yani nanokeçe elyaflar ile matriks iyi yapışmadığı (debonding) anlaşılmaktadır. Bu durum yapıştırma bağlantısında çatlağın başlaması ve ilerlemesi hızlandırmakta olup, kayma dayanımını ve tokluğunu zayıflatmaktadır.



Şekil 5.17. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların SEM görüntüleri; E: Epoksi reçine, EKNT: % 1 ÇCKNT/Epoksi, EP: PVA nano elyaf/Epoksi, EPKNT1: PVA+% 1 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT3: PVA+% 3 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi, EPKNT5: PVA+% 5 ÇCKNT nano elyaf/Epoksi

Nanoyapıştırıcıların içerisindeki nanoparçacıkların çapı, nanoelyafları, nanokeçelerin ve nanotüplerin uzunluk ve çapları gibi takviyelerin boyutsal ölçüleri mikro parçacıklardan daha küçüktürler. Geleneksel yapıştırıcıların ve nano kompozitlerin performans ve özelliklerinde önemli ölçüde benzerlik ve farklılıklar vardır. Geleneksel kompozitlerdeki aynı özelliklerin aksine nano kompozitlerin bazı temel özelliklerini açıklayabilmek çok arzu edilir.

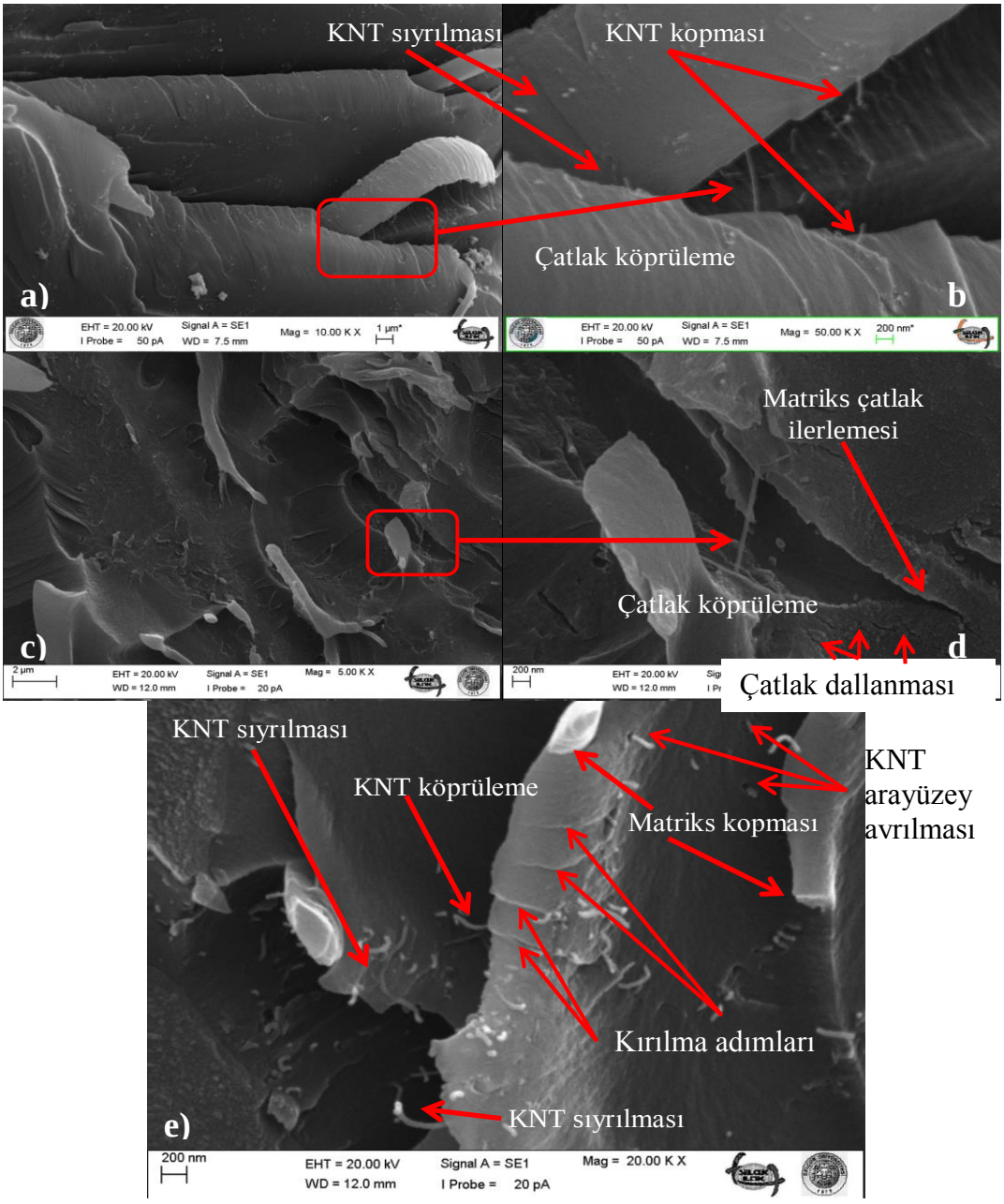
Enerji yayılımın bazı önemli mekanizmaları ÇCKNTler ile takviyelendirilmiş epoksi yapıştırıcılarda tanımlanmıştır. Bunlar ÇCKNTlerin kopması, sıyrılması, nano elyaf/matriks yapışmaması, çatlak köprülenme ve matriks kırılmasıdır (Thostenson ve ark., 2005). Tek tek hata modlarının içyapı resimlerin gösterimlerinde olduğu gibi bir çatlak tipinde faaliyet gösteren bu mekanizmalar şematik olarak Şekil 5.18.'de gösterilmiştir. Bu mekanizmaların hepsi enerji yutan mekanizmalar olup, kırılma tokluğunun artmasına yardımcı olur. Şekil 5.18. a'da güçlü ara yüzey yapışması ile yüksek ve hızlı şekil değişikliği nedeniyle ÇCKNT'lerin kopması gösterilmektedir. ÇCKNTlerin epoksi yapıştırıcıyla yapışmamasından dolayı ÇCKNTlerin sıyrılması Şekil 5.18. b'de gösterilmektedir. ÇCKNT'ler epoksi matriks içerisine homojen bir şekilde dağıtıldığında çatlak ucunda ikincil çatlaklar oluşturarak veya çatlak köprülenmesi ile çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunun azalmasını sağlayarak tabakalar arası kırılma tokluğunun artmasına neden olurlar (Şekil 5.18. c ve d). Ayrıca ÇCKNTlerin çatlak köprülenmesinde ÇCKNT çeperlerinin bir kısmının matriksten ayrılması ancak kalan yüzeylerin mükemmel ara yüzey yapışması ile yük transferinin etkin bir şekilde gerçekleştirir.



Şekil 5.18. ÇCKNTlerin muhtemel kırılma mekanizmaların tanımlanması

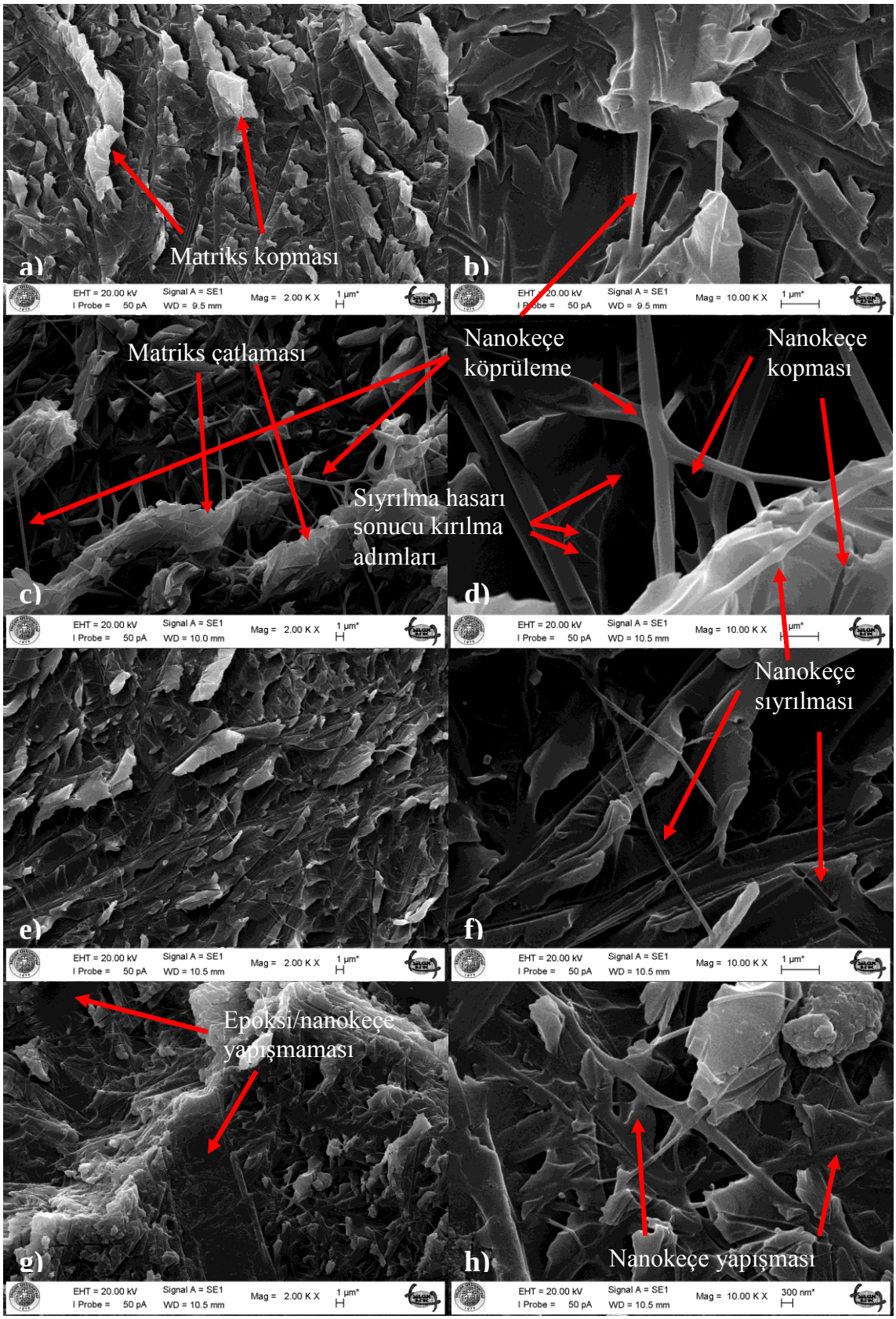
Bu mekanizmaların tipik bir örneğini ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT ile takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı ile PVA nano elyaf ve farklı ağırlık oranlarında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcılarda görmekteyiz. Şekil 5.19.'da bu yapıştırıcının tek taraflı bindirmeli ve ÇKK test bağlantıları sonucunda

alınmış kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri verilmiştir. ÇCKNTlerin nanotüp kopması, sıyrılması ve köprülenme gibi çatlak ucunun yön değiştirmesi veya çatallanması ÇCKNTlerle takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılarda gözlenen önemli tokluk mekanizmalarıdır. Bu mekanizmalar, ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT takviye edilmiş epoksi yapıştırıcının kırılması saf epoksi reçinenin kırılması için gerekli olan enerjiden daha fazla enerjiye ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Şekil 5.19.b ve d'de ÇCKNT ile modifiye edilmiş yapıştırıcı matrikste kırılma yüzeyleri arasında ilerleyen çatlağı köprülenme etkisiyle durdurduğu veya çatlağın dallandığını söyleyebiliriz.



Şekil 5.19. ÇCCNTler ile takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılarda tokluk mekanizmalarının SEM görüntüsü

PVA elyaf ve ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında KNT ile takviye edilmiş PVA nano elyafla modifiyeli epoksi yapıştırıcılarda tokluk mekanizmalarının SEM görüntüleri Şekil 5.20.'de gösterilmiştir. ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcıda olduğu gibi PVA ve PVA/ÇCKNT takviyeli nano elyaflarda da tokluk mekanizmalarının aynı olduğu gözlenmiştir. Epoksi reçine içerisindeki nano elyafların kopması, sıyrılması ve köprülenme mekanizmaları modifiye edilmiş yapıştırıcının kayma dayanımını, tokluğu, sünekliği ve kırılma tokluğu iyileştirmiştir.



Şekil 5.20. Modifiyeli epoksi yapıştırıcılarda tokluk mekanizmalarının SEM görüntüleri; a ve b) PVA nanoelyaf (EP), c ve d) ağırlıkça %1 ÇCKNT ile takviyeli PVA nanokeçe elyaf (EPKNT1), e ve f) ağırlıkça %3 ÇCKNT ile takviyeli PVA nanokeçe elyaf (EPKNT3), g ve h) ise ağırlıkça %5 ÇCKNT ile takviyeli PVA nanokeçe elyaf (EPKNT5)

Bütün PVA nano elyaf ve nanokeçe takviyeli yapıştırıcıların kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri 2000X ve 10000X büyütmelidir. Numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde EPKNT5 haricinde nano elyafların ve nanokeçelerin iyi ıslanmış olup, mekanik özellikleri artmıştır. Fakat EPKNT5'te ise yer yer hava boşluğu ve ıslana bilirliği zayıf olduğu gözlenmiştir. EP, EPKNT1 ve EPKNT3 numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde gevrek olan epoksi reçineye takviye ederek modifiyeli yapıştırıcının sünekliğini arttırarak kayma dayanımlarını ve tokluklarını artırmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Son zamanlarda nanoparçacık takviyeli yapıştırıcılar araştırmacılar tarafından detaylı bir şekilde incelenmektedir. Bu tez çalışmasında, hem epoksi reçine içerisine ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT hem de ıspatula yardımıyla epoksi reçine sürülen yapıştırılacak Al 2024-T3 levhanın yüzeylerine PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyaflarıyla yapıştırıcı bağlantıları hazırlanmıştır. Tek taraflı bindirmeli ve ÇKK bağlantıların kayma dayanımları ve kırılma toklukları karşılaştırılmış ve ara yüzeylerin kırılma özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kayma dayanımları ve kayma birim şekil değiştirme deneysel ve analitik yöntemle karşılaştırılmıştır. Bu tezde özellikle nanokeçe elyafların kırılma davranışı üzerine etkileri malzeme bilimi ve mekanik yaklaşımlar ile anlaşılmaya çalışılmıştır.

PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyafların işlem basamakları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Nanokeçe elyaflar FT-IR, DSC ve SEM analizleri ile ayrı ayrı karakterize edilmiştir. Ayrıca aseton içerisine çözelti hazırlama yöntemiyle epoksi miktarının ağırlıkça %1 ÇCKNT ilave edilerek dağıtıla bilirliği iyileştirmiştir.

Hazırlanan nanokeçe elyaf ve ÇCKNT takviyeli yapıştırıcı bağlantılarından kayma dayanımları, kayma modülleri, toklukları, birim şekil değiştirme miktarları ve kırılma toklukları belirlenmiş ve bulunan sonuçlar nanokeçe elyaf ve ÇCKNTlerin epoksi reçine içerisindeki varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Farklı nanokeçe ve ÇCKNT takviyeli numunelerde hangi mekanik mekanizmaların ara yüzey kırılma tokluğu üzerine etki ettiği araştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyafların çapların, termal özellikleri ve bağ yapıları sırasıyla SEM, DSC ve FT-IR analizleriyle ortaya çıkarılmıştır.
- Epoksi reçineye modifiye edilmiş %1 ÇCKNT, PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyafların termal özellikleri ve bağ yapıları DSC ve FT-IR analizleriyle ortaya çıkarılmıştır.

- Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantılarına uygulanan çekme deneyleri sonucunda, %1 ÇCKNT, PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyafların kayma dayanımlarını arttırdığı gösterilmiştir. Ağırlıkça % 1 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nanokeçe elyaflı bağlantılarda kayma dayanımı % 21 oranında artmıştır.
- Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantılarında nanoparçacık ve nanokeçe elyaf takviyesiyle yapıştırıcı bağlantıların şekil değiştirme kabiliyetleri, mekanik kilitlenme mekanizması iyileştirilmesi suretiyle arttırılmıştır. Modifiye edilmiş yapıştırıcıların kayma birim şekil değiştirmesinin artmasıyla da toklukları önemli miktarlarda arttırılarak numunelerin kırılıncaya kadar daha fazla enerji yutması sağlanmıştır.
- Çekme deney numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde, %1 ÇCKNT, PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyafların varlığı epoksi reçinenin kırılma yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı belirlenmiştir. Buna göre, ÇCKNT takviyeli PVA nanokeçe elyaflar epoksi reçine içerisine katıldığında epoksi reçinenin gevrek kırılma eğilimini azaltarak yapıştırıcının tokluğunu arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, ÇCKNT takviyeli PVA nanokeçe elyaflar bölgesel olarak yapıştırıcı bağlantılarında epoksi matriks ile yapıştırılan malzemenin arayüzeyinin kohezyon olarak hasar görmesine sebebiyet vermiştir.
- Ağırlıkça %1 oranında ÇCKNTler, PVA elyaf ve ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT ile takviye edilmiş PVA nanokeçe elyafla modifiyeli epoksi yapıştırıcılarda nano elyafların köprüleme etkisiyle çatlak ucunun yön değiştirmesi veya çatallanmasıyla çatlak ilerlemesine karşı direnç sağlar.
- Yapıştırılan malzemelerin yüzey hazırlama işlemlerinden sonra epoksi ile nano parçacıklar ve nano elyafların yüzeyde oluşan pürüzlülüklere girerek epoksi ile yapıştırılan malzeme arasında çatlağın ilerlemesine karşı direnç sağlar.

6.2 Öneriler

- %1 ÇCKNT, PVA nanoelyaf ve/veya ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında ÇCKNT takviyeli nanokeçe elyafların yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantılarının mekanik özellikleri önemli ölçüde değiştirdiği açıktır. Yapıştırma bağlantılarına uygulanan statik yükleme koşullarına ilaveten dinamik yükleme koşullarındaki davranışları incelenebilir.
- Yapıştırılan malzeme olarak alüminyum-alüminyum haricinde kompozit-kompozit, kompozit-alüminyum kullanılarak yapıştırma bağlantıları yapılabilir.
- Tek taraflı bindirme bağlantılarına ilaveten alın-alın, çift taraflı bindirmeli ve silindirik bindirmeli bağlantıları yapılabilir.

KAYNAKLAR

Abdalla M., Dean D., Robinson P. ve Nyairo E., 2008, Cure behavior of epoxy/MWCNT nanocomposites: The effect of nanotube surface modification, *Polymer*, 49 (15), 3310-3317.

Adams R. D. ve Peppiatt N. A., 1974, Stress analysis of adhesive-bonded lap joints, *Journal of Strain Analysis*, 9, 185-196.

Adams R. D., Wake W. C. ve Comyn J., 1997, Structural adhesive joints in engineering, Springer, p.

Adin H., 2007, Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzeme Bağlantılarının Mekanik Analizi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi*, Elazığ.

Ahearn J. S., Sun T. S., Froede C., Venables J. D. ve Hopping R., 1980, Development of Oxide-Films on Al with the Phosphoric-Acid Anodization Process, *Sampe Quarterly-Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, 12 (1), 39-45.

Allen K. W., 2003, "At forty cometh understanding" - A review of some basics of adhesion over the past four decades, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23 (2), 87-93.

Andersson T. ve Stigh U., 2004, The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces, *International Journal of Solids and Structures*, 41 (2), 413-434.

Andrady A. L., 2008, Science and Technology of Polymer Nanofibers, *New Jersey*, Wiley Press., p. 403.

Andrews R. ve Weisenberger M. C., 2004, Carbon nanotube polymer composites, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 8 (1), 31-37.

Apalak M. K. ve Gunes R., 2002, On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single lap joint, *Computers & Structures*, 80 (1), 85-98.

Aran A., 2008, Malzeme Bilgisi. İstanbul, İTÜ Makina Fak.**:** 62-67.

Ashby M. F. ve Jones D. R. H., 1980, Engineering Materials 1, *Oxford*, Elsevier Butterworth-Heinemann, p. 324-363.

ASTM I., 2008, Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding. Designation: D2651−01.

ASTM I., 2010, Standard Guide for Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing). Designation: D3933−98.

ASTM I., 2012, Standard Methods of Analysis of Sulfochromate Etch Solution Used in Surface Preparation of Aluminum. Designation: D2674−72.

Aydin M. D., Ozel A. ve Temiz S., 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, *Ankara*, M. E. Sungur Kaymak Mini Kitap Sarayı, p.

Baji A., Mai Y. W., Wong S. C., Abtahi M. ve Chen P., 2010, Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties, *Composites Science and Technology*, 70 (5), 703-718.

Benson N. K., 1969, Influence of Stress Ditrubution on Joint Stregth, In: Adhension

Fundamentas and Practise, Eds, *London*: UK Ministry Teknology, p. 191.

Bigwood D. A. ve Crocombe A. D., 1989, Elastic Analysis and Engineering Design Formulas for Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9 (4), 229-242.

Bikerman J. J., 1967, Causes of poor adhesion: weak boundary layers, *Industrial & Engineering Chemistry*, 59 (9), 40-44.

Bowditch M. R., Clarke J. D. ve Stannard K. J., 1987, The Strength and Durability of Adhesive Joints Made Underwater, In: Adhesion 11, Eds: Allen KW, *London and New York*: Springer Netherlands, p. 1-16.

Campilho R. D. S. G., de Moura M. F. S. F., Ramantani D. A., Morais J. J. L. ve Domingues J. J. M. S., 2009, Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29 (6), 678-686.

Carpenter M. W., 1999, Characterizing The Chemistry of Yellow-Poplar Surfaces Exposed to Different Surface Energy Environments Using DCA, DSC and XPS, Master Thesis, *West Virginia University*, West Virginia.

Chen W., Tao X. M., Xue P. ve Cheng X. Y., 2005, Enhanced mechanical properties and morphological characterizations of poly(vinyl alcohol)-carbon nanotube composite films, *Applied Surface Science*, 252 (5), 1404-1409.

Chousal J. A. G. ve de Moura M. F. S. F., 2013, Mixed-mode I+II continuum damage model applied to fracture characterization of bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 41, 92-97.

Coleman J. N., Khan U. ve Gun'ko Y. K., 2006, Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes, *Advanced Materials*, 18 (6), 689-706.

Davis J. R., 2002, Aluminum and aluminum alloys, *Ohio*, ASM international, p. 438-450.

de Moura M. F. S. F., Campilho R. D. S. G. ve Goncalves J. P. M., 2009, Mixed-Mode Cohesive Damage Model Applied to the Simulation of the Mechanical Behaviour of Laminated Composite Adhesive Joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23 (10-11), 1477-1491.

DeLollis N. J., 1970, Adhesives for metals: theory and technology, Industrial Press New York, p.

Demir M. M., Yilgor I., Yilgor E. ve Erman B., 2002, Electrospinning of polyurethane fibers, *Polymer*, 43 (11), 3303-3309.

Deng J. ve Lee M. M. K., 2007, Fatigue performance of metallic beam strengthened with a bonded CFRP plate, *Composite Structures*, 78 (2), 222-231.

Deng J. N., Zhang X. Q., Wang K., Zou H., Zhang Q. ve Fu Q., 2007, Synthesis and properties of poly(ether urethane) membranes filled with isophorone diisocyanate-grafted carbon nanotubes, *Journal of Membrane Science*, 288 (1-2), 261-267.

Diouri N. ve Baitoul M., 2014, Effect of carbon nanotubes dispersion on morphology, internal structure and thermal stability of electrospun poly(vinyl alcohol)/carbon nanotubes nanofibers, *Optical and Quantum Electronics*, 46 (1), 259-269.

Dorn L. ve Salem N., 1993, Plastics Adhesive Joints - a Proposal for Specifying Dimensions, *Kunststoffe-German Plastics*, 83 (9), 695-698.

Du J. H., Bai J. ve Cheng H. M., 2007, The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites, *Express Polymer Letters*, 1 (5), 253-273.

Ebnesajjad S., 2010, Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing, William Andrew, p.

Emanuel N. N. M. ve Buchachenko A. L., 1987, Chemical physics of polymer degradation and stabilization, VSP, p.

Erdal M. O., 2013, Elektrospin Yöntemiyle Termoelektrik Nano Yapılar Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.

Fan Z., 2007, Flow and rheology of multi-walled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, University of Delaware, p.

Fauner G. ve Endlich W., 1979, Angewandte Klebtechnik, *München: Hanser*.

Fisher L. W., 2005, Selection of engineering materials and adhesives, CRC Press, p.

Geng Y., Liu M. Y., Li J., Shi X. M. ve Kim J. K., 2008, Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 39 (12), 1876-1883.

Gibbs J. W., 1961, Thermodynamics, Dover Publications, p.

Gkikas G., Saganas C., Grammatikos S. A., Maistros G. M., Barkoula N. M. ve Paipetis A. S., 2012, Dispersion monitoring of carbon nanotube modified epoxy systems, *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012, Pts 1 and 2*, 8345.

Gojny F. H., Wichmann M. H. G., Kopke U., Fiedler B. ve Schulte K., 2004, Carbon nanotube-reinforced epoxy-compo sites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content, *Composites Science and Technology*, 64 (15), 2363-2371.

Gojny F. H., Wichmann M. H. G., 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.

Goland M. ve Reissner E., 1944, The stresses in cemented joints, *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme*, 66, A17-27.

Green D. W., Winandy J. E. ve Kretschmann D. E., 1999, Wood handbook-wood as an engineering material, *General technical report FPL-GTR-113, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI*.

Grossiord N., Loos J., Regev O. ve Koning C. E., 2006, Toolbox for dispersing carbon nanotubes into polymers to get conductive nanocomposites, *Chemistry of Materials*, 18 (5), 1089-1099.

Guerrini L. M., de Oliveira M. P., Branciforti M. C., Custodio T. A. ve Bretas R. E. S., 2009, Thermal and Structural Characterization of Nanofibers of Poly(Vinyl Alcohol) Produced by Electrospinning, *Journal of Applied Polymer Science*, 112 (3), 1680-1687.

Guo R. L., Ma X. C., Hu C. L. ve Jiang Z. Y., 2007, Novel PVA-silica nanocomposite membrane for pervaporative dehydration of ethylene glycol aqueous solution, *Polymer*, 48 (10), 2939-2945.

Gutowski J., 1991, Optical-Properties of Ii-Vi-Epitaxial Layers, *Semiconductor Science and Technology*, 6 (9A), A51-A59.

Hardwick D. A., Ahearn J. S., Desai A. ve Venables J. D., 1986, Environmental Durability of Phosphoric-Acid Anodized Aluminum Adhesive Joints Protected with Hydration Inhibitors, *Journal of Materials Science*, 21 (1), 179-187.

Hart-Smith L. J., 1973, Adhesive-bonded single-lap joints, Langley Research Center Hampton, VA, p.

Hastie R. L. ve Morris D. H., 1992, The Effect of Physical Aging on the Creep Response of an Off-Axis Thermoplastic Composite, *Proceedings of the Vii International Congress on Experimental Mechanics, Vols 1 and 2*, 183-191.

Hill D. E., Lin Y., Rao A. M., Allard L. F. ve Sun Y. P., 2002, Functionalization of carbon nanotubes with polystyrene, *Macromolecules*, 35 (25), 9466-9471.

Hu S. Y., Zhang Y. F., Lawless D. ve Feng X. S., 2012, Composite membranes comprising of polyvinylamine-poly(vinyl alcohol) incorporated with carbon nanotubes for dehydration of ethylene glycol by pervaporation, *Journal of Membrane Science*, 417, 34-44.

Huang Z. M., Zhang Y. Z., Kotaki M. ve Ramakrishna S., 2003, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63 (15), 2223-2253.

Jana S. ve Zhong W. H., 2007, FTIR study of ageing epoxy resin reinforced by reactive graphitic nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 106 (5), 3555-3563.

Jennings C. W., 1972, *Journal of Adhesion*, 4, 25.

Kaya F., 2004, Ana Hatlarıyla Yapıştırıcılar, *İstanbul*, Birsen Yayınevi, p. 240.

Kayacan R., 1988, Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ*, İstanbul.

Khan S. U., Pothnis J. R. ve Kim J. K., 2013, Effects of carbon nanotube alignment on electrical and mechanical properties of epoxy nanocomposites, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 49, 26-34.

Khare R. ve Bose S., 2005, Carbon nanotube based composites-a review, *Journal of minerals and Materials Characterization and Engineering*, 4, 31.

Khoee S. ve Hassani N., 2010, Adhesion strength improvement of epoxy resin reinforced with nanoelastomeric copolymer, *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 527 (24-25), 6562-6567.

Khoshravan M. ve Mehrabadi F. A., 2012, Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 39, 8-14.

Kim J. Y. ve Kim S. H., 2006, Influence of multiwall carbon nanotube on physical properties of poly(ethylene 2,6-naphthalate) nanocomposites, *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, 44 (7), 1062-1071.

Kim T. H., Doe C., Kline S. R. ve Choi S. M., 2007, Water-redispersible isolated single-walled carbon nanotubes fabricated by in situ polymerization of micelles, *Advanced Materials*, 19 (7), 929-+.

Kim Y. A., Hayashi T., Fukai Y., Endo M., Yanagisawa T. ve Dresselhaus M. S., 2002, Effect of ball milling on morphology of cup-stacked carbon nanotubes, *Chemical Physics Letters*, 355 (3-4), 279-284.

Kinloch A. J., 1987a, Relationships between Chemistry, Microstructure and Properties of Toughened Thermosetting Polymers, *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 194, 66-Pmse.

Kinloch A. J., 1987b, Adhesion and adhesives: science and technology, Springer, p.

Korayem A. H., Barati M. R., Simon G. P., Zhao X. L. ve Duan W. H., 2014, Reinforcing brittle and ductile epoxy matrices using carbon nanotubes masterbatch, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 61, 126-133.

Kosmidou T. V., Vatalis A. S., Delides C. G., Logakis E., Pissis P. ve Papanicolaou G. C., 2008, Structural, mechanical and electrical characterization of epoxy-amine/carbon black nanocomposites, *Express Polymer Letters*, 2 (5), 364-372.

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.

Kozanoğlu G. S., 2006, Elektrospinning Yöntemiyle Nanofiber Üretim Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul.

Kucukyildirim B. O. ve Eker A. A., 2012, Surface Roughness Changes and Corrosion on Nickel Titanium Orthodontic Wires Compared to Stainless Steel Wires in Various Artificial Salivas, *Materials Testing*, 54 (4), 261-265.

Kumar A., 2010, Nanofibers, *India*, Intech, p. 77-81.

Lamut M., Turk R. ve Torkar M., 2008, Determination of the Adhesive Fracture Energy G_C of Structural Adhesives Using DCB and Peel Tests, *Materials and Geoenvironment*, 55 (4), 476-489.

Larrondo L. ve Manley R. S. J., 1981, Electrostatic Fiber Spinning from Polymer Melts .1. Experimental-Observations on Fiber Formation and Properties, *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, 19 (6), 909-920.

Lau K. T., Lu M., Lam C. K., Cheung H. Y., Sheng F. L. ve Li H. L., 2005, Thermal and mechanical properties of single-walled carbon nanotube bundle-reinforced epoxy nanocomposites: the role of solvent for nanotube dispersion, *Composites Science and Technology*, 65 (5), 719-725.

Lee J., Lee K. J. ve Jang J., 2008, Effect of silica nanofillers on isothermal crystallization of poly(vinyl alcohol): In-situ ATR-FTIR study, *Polymer Testing*, 27 (3), 360-367.

Leffler K., Alfredsson K. S. ve Stigh U., 2007, Shear behaviour of adhesive layers, *International Journal of Solids and Structures*, 44 (2), 530-545.

Li J. ve Lumpp J. K., 2007, Carbon nanotube filled conductive adhesives for aerospace applications, *2007 Ieee Aerospace Conference, Vols 1-9*, 2535-2540.

Li Y. B., Wei B. Q., Liang J., Yu Q. ve Wu D. H., 1999, Transformation of carbon nanotubes to nanoparticles by ball milling process, *Carbon*, 37 (3), 493-497.

Lian M. K., 1998, Study of durability of epoxybonded joints in aqueous environments, MS These, *Virginia Polytechnic Institue and State University*, Virginia.

Lordi V., Ma S. X. C. ve Yao N., 1999, Towards probing pentagons on carbon nanotube tips, *Surface Science*, 421 (1-2), L150-L155.

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.

Ma P. C., Kim J. K. ve Tang B. Z., 2006, Functionalization of carbon nanotubes using a silane coupling agent, *Carbon*, 44 (15), 3232-3238.

Ma P. C., Tang B. Z. ve Kim J. K., 2008, Effect of CNT decoration with silver nanoparticles on electrical conductivity of CNT-polymer composites, *Carbon*, 46 (11), 1497-1505.

Ma P. C., Liu M. Y., Zhang H., Wang S. Q., Wang R., Wang K., Wong Y. K., Tang B. Z., Hong S. H., Paik K. W. ve Kim J. K., 2009, Enhanced Electrical Conductivity of Nanocomposites Containing Hybrid Fillers of Carbon Nanotubes and Carbon Black, *Acs Applied Materials & Interfaces*, 1 (5), 1090-1096.

Ma P. C., Siddiqui N. A., Marom G. ve Kim J. K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 41 (10), 1345-1367.

Mactabi R., Rosca I. D. ve Hoa S. V., 2013, Monitoring the integrity of adhesive joints during fatigue loading using carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 78, 1-9.

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).

May M., Wang H. M. 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. W. ve Hopkins D. G., 1925, *Journal of Physical Chemistry*, 29, 188.

Mercer A. D., 1990, Corrosion in Seawater Systems, *New York*, Ellis Horwood Ltd p.

Mittal K., 1979, Surface contamination: an overview, In: Surface contamination, Eds: Springer, p. 3-45.

Moniruzzaman M. ve Winey K. I., 2006, Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, *Macromolecules*, 39 (16), 5194-5205.

Murugan E. ve Vimala G., 2011, Effective functionalization of multiwalled carbon nanotube with amphiphilic poly(propyleneimine) dendrimer carrying silver nanoparticles for better dispersability and antimicrobial activity, *Journal of Colloid and Interface Science*, 357 (2), 354-365.

Naebe M., Lin T., Tian W., Dai L. M. ve Wang X. G., 2007, Effects of MWNT nanofillers on structures and properties of PVA electrospun nanofibres, *Nanotechnology*, 18 (22).

Nan C. W., Shi Z. ve Lin Y., 2003, A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites, *Chemical Physics Letters*, 375 (5-6), 666-669.

Njuguna J., Pielichowski K. ve Alcock J. R., 2007, Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites, *Advanced Engineering Materials*, 9 (10), 835-847.

Oh H. J., Han S. H., Kim H. Y. ve Kim S. S., 2014, The influence of the core-shell structured meta-aramid/epoxy nanofiber mats on interfacial bonding strength and the mechanical properties of epoxy adhesives at cryogenic environment, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28 (10), 950-962.

Ojalvo I. O. ve Eidinof H. L., 1978, Bond Thickness Effect Upon Stresses in Single Lap Adhesive Joints, *Aiaa Journal*, 16 (8), 204-211.

Owens J. F. P. ve Lee-Sullivan P., 2000, Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints - I. Theoretical model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20 (1), 39-45.

Ozel A., Yazici B., Akpinar S., Aydin M. D. ve Temiz S., 2014, A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends, *Composites Part B-Engineering*, 62, 167-174.

Parker D., Bussink J., Grampel H. T., Wheatley G. W., Dorf E. U., Ostlinning E., Reinking K., Schubert F., Jünger O. ve Wagener R., 2002, Polymers, High-Temperature, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.

Parvatareddy H., 1997, Durability of Polymide Adhesives and Their Bonded Joints for High Temperature Applications, Ph.D.These, *Virginia Polytechnic Institue and State University*, Virginia.

Petrie E. M., 1975, Plastics and adhesives as adhesives, In: Handbook of plastics and elastomers, Eds: Happer C, *New York*: McGraw-Hill, New York, p.

Petrie E. M., 2000, Handbook of adhesives and sealants.

Phong N. T., Gabr M. H., Okubo K., Chuong B. ve Fujii T., 2013, Improvement in the mechanical performances of carbon fiber/epoxy composite with addition of nano-(Polyvinyl alcohol) fibers, *Composite Structures*, 99, 380-387.

Pizzi A. ve Mittal K. L., 2003, Handbook of adhesive technology, revised and expanded, CRC Press, p.

Plueddemann E. P., 1983, Mechanism of Adhesion through Silane Coupling Agents, *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 185 (Mar), 72-Poly.

Possart W., 1988, Experimental and Theoretical Description of the Electrostatic Component of Adhesion at Polymer Metal Contacts, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 8 (2), 77-83.

Prolongo S. G., Buron M., Gude M. R., Chaos-Moran R., Campo M. ve Urena 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.

Ramakrishna D. M. ve Viraraghavan T., 2005, Environmental impact of chemical deicers - A review, *Water Air and Soil Pollution*, 166 (1-4), 49-63.

Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W. E., Lim T. C. ve Ma Z., 2005, An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, *Singapore*, World Scientific Publishing Co., p. 1-381.

Reis P., Grundmueller S., Cowdrey S. ve Barbeau W. H., 1998, Loctite worldwide design handbook, Loctite European Group, p.

Reis P. N. B., Ferreira J. A. M. 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.

Renton W. J. ve Vinton J. R., 1977, Analysis of Adhesively Bonded Joints between Panels of Composite Materials, *Journal of Applied Mechanics*, 44, 101-106.

Rogers N. L., 1966, Surface Preparation of Metals for Adhesive Bonding, *Structural Adhesives Bonding-Applied Polymer Symposia*, 327-340.

Rosca I. D. ve Hoa S. V., 2011, Method for reducing contact resistivity of carbon nanotube-containing epoxy adhesives for aerospace applications, *Composites Science and Technology*, 71 (2), 95-100.

Sawa T., Liu J., Nakano K. ve Tanaka J., 2000, A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to tensile loads, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14 (1), 43-66.

Sayman O., 2012, Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint, *Composites Part B-Engineering*, 43 (2), 204-209.

Selbes M., 2013, Elektro-Eğirme Yöntemiyle Nanofiber Tabakalı Hava Filtresi Üretimi ve Performans Testleri, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya.

Sham M. L. ve Kim J. K., 2006, Surface functionalities of multi-wall carbon nanotubes after UV/Ozone and TETA treatments, *Carbon*, 44 (4), 768-777.

Sharpe L. H. ve Schonhorn H., 1964, Surface energetics, adhesion, and adhesive joints, *Contact angle, wettability, and adhesion*, 189-201.

Sharpe L. H., 1966, The Materials, Processes and Design Methods for Assembly with Adhesives, *Machine Design*, 38 (19), 179-200.

Shields J., 1974, Adhesive Bonding, *Oxford*, Design Council, p. 24.

Shirazi Y. ve Mohammadi T., 2013, Effects of CNTs Content on Physicochemical and Pervaporation Separation Properties of PVA Membranes, *Separation Science and Technology*, 48 (5), 716-727.

Sırımoğlu N., Talay A., Öziş A. ve İşler R., Plastik Ambalaj Malzemeleri için Uygulanan Kalite Kontrol Testleri. İzmir, Petkim Petrokimya Holding A.Ş. **:** 1-10.

Snogren R. C., 1974, Handbook of surface preparation, Palmerton Publishing Company, p.

Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K. ve Galiotis C., 2010, Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties, *Progress in Polymer Science*, 35 (3), 357-401.

Stachewicz U., Modaresifar F., Bailey R. J., Peijs T. ve Barber A. H., 2012, Manufacture of Void-Free Electrospun Polymer Nanofiber Composites with Optimized Mechanical Properties, *Acs Applied Materials & Interfaces*, 4 (5), 2577-2582.

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.

Stephenson J. J., Sadana A. K., Higginbotham A. L. ve Tour J. M., 2006, Highly functionalized and soluble multiwalled carbon nanotubes by reductive alkylation and arylation: The billups reaction, *Chemistry of Materials*, 18 (19), 4658-4661.

Struik L. C. E., 1978, Physical aging in amorphous polymers and other materials, Elsevier Amsterdam, p.

Sul I. H., Youn J. R. ve Song Y. S., 2011, Quantitative dispersion evaluation of carbon nanotubes using a new analysis protocol, *Carbon*, 49 (4), 1473-1478.

Sun T. S., Mcnamara D. K., Ahearn J. S., Chen J. M., Ditchek B. ve Venables J. D., 1980, Interpretation of Aes Depth Profiles of Porous Al-Anodic Oxides, *Applied Surface Science*, 5 (4), 406-425.

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.

Şekercioğlu Ş., 2001, Yapıştırma Bağlantılarının Dinamik Yükler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi*, Denizli.

Şekercioğlu T. ve Özenç M., 2012, Metallerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53 (627), 43-50.

Tang L. C., Wan Y. J., Peng K., Pei Y. B., Wu L. B., Chen L. M., Shu L. J., Jiang J. X. ve Lai G. Q., 2013a, Fracture toughness and electrical conductivity of epoxy composites filled with carbon nanotubes and spherical particles, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 45, 95-101.

Tang L. C., Wan Y. J., Yan D., Pei Y. B., Zhao L., Li Y. B., Wu L. B., Jiang J. X. ve Lai G. Q., 2013b, The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites, *Carbon*, 60, 16-27.

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.

Teo W. E. ve Ramakrishna S., 2009, Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized nanocomposite, *Composites Science and Technology*, 69 (11-12), 1804-1817.

Thostenson E. T., Ren Z. F. ve Chou T. W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites Science and Technology*, 61 (13), 1899-1912.

Thostenson E. T., Li C. Y. ve Chou T. W., 2005, Nanocomposites in context, *Composites Science and Technology*, 65 (3-4), 491-516.

Tsai M. Y. ve Morton J., 1994, An Evaluation of Analytical and Numerical-Solutions to the Single-Lap Joint, *International Journal of Solids and Structures*, 31 (18), 2537-2563.

Ulus H., Ustun T., Eskizeybek V., Sahin O. S., Avci A. ve Ekrem M., 2014, Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, *Applied Surface Science*, 318, 37-42.

Üstündağ G. C., 2009, Electrospinning Yöntemiyle Biyomedikal Kullanıma Yönelik Yüzey Üretimi ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi*, Bursa.

Üstündağ G. C. ve Karaca E., 2009, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Poli(Vinil Alkol)/Sodyum Alginat Karışımlarından Elektro Çekim Yöntemi ile Elde Edilen Nanolif Yüzeylerin İncelenmesi.

Vaidya U. K., Gautam A. R. S., Hosur M. ve Dutta P., 2006, Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in

composite structures, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26 (3), 184-198.

Venables J. D., 1984, Adhesion and Durability of Metal Polymer Bonds, *Journal of Materials Science*, 19 (8), 2431-2453.

Voiutskii S. S., 1963, Autohesion and adhesion of high polymers.

Volkersen O., 1938, Die Niektraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschritten, *Luftfahrtforschung*, 15, 41-47.

Wang S. C., Chang K. S. ve Yuan C. J., 2009, Enhancement of electrochemical properties of screen-printed carbon electrodes by oxygen plasma treatment, *Electrochimica Acta*, 54 (21), 4937-4943.

Wang Y. T., Wang C. S., Yin H. Y., Wang L. L., Xie H. F. ve Cheng R. S., 2012, Carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile-toughened epoxy/carboxyl-modified carbon nanotube nanocomposites: Thermal and mechanical properties, *Express Polymer Letters*, 6 (9), 719-728.

Weisenberger M. C., Grulke E. A., Jacques D., Rantell T. ve Andrews R., 2003, Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 3 (6), 535-539.

Wernik J. M. ve Meguid S. A., 2014, On the mechanical characterization of carbon nanotube reinforced epoxy adhesives, *Materials & Design*, 59, 19-32.

Wetzel M., Holtmannspotter J., Gudladt H. J. ve Czarnecki J. V., 2013, Sensitivity of double cantilever beam test to surface contamination and surface pretreatment, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 46, 114-121.

Xia H. S., Wang Q., Li K. S. ve Hu G. H., 2004, Preparation of polypropylene/carbon nanotube composite powder with a solid-state mechanochemical pulverization process, *Journal of Applied Polymer Science*, 93 (1), 378-386.

Yoon S. H., Kim B. C., Lee K. H. ve Lee D. G., 2010, Improvement of the Adhesive Fracture Toughness of Bonded Aluminum Joints Using E-Glass Fibers at Cryogenic Temperature, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24 (2), 429-444.

Young T., 1805, An essay on the cohesion of fluids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 65-87.

Yu J. R., Grossiord N., Koning C. E. ve Loos J., 2007, Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution, *Carbon*, 45 (3), 618-623.

Zhai L. L., Ling G. ve Wang Y. W., 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 J., Lin T. ve Wang X. G., 2010, Electrospun nanofibre toughened carbon/epoxy composites: Effects of polyetherketone cardo (PEK-C) nanofibre diameter and interlayer thickness, *Composites Science and Technology*, 70 (11), 1660-1666.

Zhang Q. H. ve Chen D. J., 2004, Percolation threshold and morphology of composites of conducting carbon black/polypropylene/EVA, *Journal of Materials Science*, 39 (5), 1751-1757.

Zucchelli A., Focarete M. L., Gualandi C. ve Ramakrishna S., 2011, Electrospun nanofibers for enhancing structural performance of composite materials, *Polymers for Advanced Technologies*, 22 (3), 339-349.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mürsel EKREM
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Kadıköy, 30.01.1979
Telefon : 0555 484 5443
Faks :
e-mail : mekrem@konya.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Kartal Teknik Lisesi, Kartal, İstanbul	1997
Üniversite	: Gazi Üniversitesi, Teknik Eğt. Fak., Beşevler, Ankara	2001
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Selçuklu, Konya	2007
Doktora	: Selçuk Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Selçuklu, Konya	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2001-2005	S.Ü. Taşkent MYO. Mak. Resim ve Konst. Prog.	Öğretim Görevlisi
2005-2006	Alkimsan San. Ltd. Şti.	Genel Müd. Yrd.
2006-2007	S.Ü. Karaman MYO. Makine Prog.	Öğretim Görevlisi
2007-2013	Karamanoğlu Mehmetbey Ü. Teknik Bil. MYO.	Öğretim Görevlisi
2013-	Necmettin Erbakan Ü. Müh. Fak. Mak. Müh.	Uzman

UZMANLIK ALANI: Ark deşarj ile nanoparçacık üretimi, elektro eğirme yöntemiyle nano elyaf üretimi, kırılma mekaniği, kompozit malzemeler, yapıştırıcı bağlantıları, vakum yardımıyla reçine transfer kalıplama yöntemi (VARTM)

YABANCI DİL: İngilizce

YAYINLAR:

1. Erkendirici, Ö.,F., Avcı, A.ve **Ekrem, M.**, "Investigation of the Fracture Behavior of Woven Fiber Glass-reinforced Low-density Polyethylene Composite ", Journal of composite materials,Vol 44,23 pp 2697-2709(2010) (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)
2. Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek V., Şahin Ö. S., Avcı, A., **Ekrem M.,**"Boron Nitride-MWCNT/Epoxy Hybrid Nanocomposites: Preparation and Mechanical Properties", Applied Surface Science, Vol 318, pp 37-42, (2014)