

**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**NANOYAPI KATKILI YAPIŞTIRICILARIN  
ORTAM SICAKLIĞI VE TERMAL ÇEVİRİM ALTINDA  
KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Belin KANAR**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih AKPINAR**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz, 2018**

**ERZURUM**

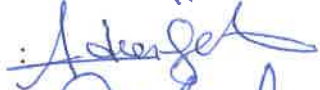


Her Hakkı Saklıdır

T.C.  
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
TEZ ONAY FORMU

---

**NANOYAPI KATKILI YAPIŞTIRICILARIN ORTAM SICAKLIĞI VE TERMAL  
ÇEVİRİM ALTINDA KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Salih AKPINAR danışmanlığında, Belin KANAR tarafından hazırlanan bu çalışma 12/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oy birliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Adnan ÖZEL	İmza	: 
Üye	: Doç. Dr. Fatih YILDIZ	İmza	: 
Üye	: Doç. Dr. Salih AKPINAR	İmza	: 

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

  
Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ *Y.*

**Enstitü Müdürü**

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.  
Proje No:114M408

## ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

02/07/2018

  
Belin KANAR

# ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

## NANOYAPI KATKILI YAPIŞTIRICILARIN ORTAM SICAKLIĞI VE TERMAL ÇEVİRİM ALTINDA KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Belin KANAR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların büyük avantajlarından dolayı otomotiv, deniz, uzay ve havacılık endüstrileri gibi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda önemli ölçüde ilerleme kat eden nanoteknoloji ve nanobilimden gelen bulgular, diğer disiplinleri etkilemesinin yanı sıra özellikle yapıştırıcı bilimini de önemli derecede etkilemiştir. Bu çalışmada; yapıştırıcı içerisine nanoyapı ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların kırılma davranışı ortam sıcaklığında ve termal çevrim şartı altında Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam –DCB) testi kullanılarak incelenmiştir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş DCB bağlantılar üretiminde, yapıştırıcı olarak DP460 tok yapıştırıcı ve DP125 esnek yapıştırıcı yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve nanoyapı olarak ise ağırlıkça %1 oranda Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren-C60 kullanılmıştır. Sonuç olarak deneysel kırılma enerjileri incelendiğinde, nanoyapı eklenerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcılar bağlantının kırılma enerjisini artırdığı bulunmuştur. Ayrıca DCB testi sırasında video ekstansometre ile elde edilen üst ve alt malzeme arasındaki çatlak açıklığını veren yer değiştirmeler ile doğrudan doğruya test cihazının strokundan elde edilen yer değiştirmeler arasında önemli bir fark olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yapıştırıcının kırılma enerjisinin doğru hesaplanmasını önemli ölçüde etkiler.

**2018, 50 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Nanokompozitler, Yapıştırıcı Bağlantılar, Kırılma Mekaniği, Nümerik Model, Çift Konsol Kiriş Testi

# ABSTRACT

MASTER THESIS

## INVESTIGATION OF FRACTURE BEHAVIOR OF NANOSTRUCTURE ADDED UNDER AMBIENT TEMPERATURE AND THERMAL CYCLING

Belin KANAR

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Salih AKPINAR

Due to their great advantages, adhesively bonded joints are frequently used in many areas like automotive, marine, space and aerospace industries. Especially findings from nanoscience and nanotechnology, which have progressed significantly in recent years, influence adhesives sciences significantly as well as other disciplines. In this study, the fracture behavior of nanocomposite adhesives produced by adding nanostructure in to the adhesives were investigated using Double Cantilever Beam (DCB) test under ambient temperature and thermal cycle conditions. Adhesively bonded DCB joints were produced using DP460 toughened adhesive type and DP125 flexible adhesive type as the adhesives; AA2024-T3 aluminum alloy was used as the adherend, and 1 wt.% Graphene-COOH, Carbon Nanotube-COOH and Fullerene C60 were used as the added nanostructures. As a result, when the experimental fracture energy was examined, the nanocomposite adhesives obtained by adding nanostructure were found to have increased the fracture energy of the joint. Also, it was observed that there is a significant difference between the displacements that were obtained directly from the test machines stroke and measured via video extensometer giving the crack opening between the top and bottom adherends during the DCB test. This situation significantly effects the correct calculation of the fracture energy of adhesive.

**2018, 50 sayfa**

**Keywords:** Nanocomposites, Adhesive Joints, Fracture Mechanics, Numerical Modelling, Double Cantilever Beam Test.

## TEŞEKKÜR

“Nanoyapı Katkılı Yapıştırıcıların Ortam Sıcaklığı Ve Termal Çevrim Altında Kırılma Davranışının İncelenmesi ” başlıklı bu çalışma; Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimime başladığım andan itibaren çalışmalarına her türlü destek veren, görüş ve bilgi birikiminden yararlandığım değerli hocam ve danışmanım, Sayın Doç. Dr. Salih AKPINAR' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında maddi manevi her konuda yanımda olan ve benden destek ve ilgilerini esirgemeyen çok değerli annem Aytaç KANAR'a, babam İbrahim Halil KANAR 'a şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

**Belin KANAR**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>ix</b>
1.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı .....	1
1.2. Kuramsal Temeller.....	2
1.3. Yapısal Yapıştırıcıların Sınıflandırılması .....	4
1.4. Karbon Nanoyapılar .....	5
1.5. Termal Çevrimin Yapıştırma Bağlantıları Üzerindeki Etkisi .....	8
1.6. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması .....	9
1.6.1. Yapıştırılacak Yüzeylerin Yağdan Arındırılması .....	10
1.6.2. Mekanik Aşındırma.....	11
1.6.3. Kimyasal Ön-İşlem .....	12
1.7. Yapıştırıcı İçerisine Nanoyapı İlave Edilmesi.....	13
1.8. Yapıştırıcıların Kırılma Enerjilerinin Belirlenmesi.....	14
1.8.1. Çatlak Açılma Deformasyon Tipi ( Mod-I ) .....	15
1.8.2. Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mod-II ) .....	15
1.8.3. Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi ( Mod-III ).....	15
1.9. Cohesive Zone Model ile Sayısal Analiz .....	16
1.10. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri .....	18
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>21</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>205</b>
3.1. Deneysel Malzemeler.....	25

3.2. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bindirme Bağlantısının Hazırlanması .....	26
3.3. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantı Numunelerine Termal Çevrim Uygulaması.....	28
3.4. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantısının Hasar Yüklerinin Belirlenmesi .....	29
3.5. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantılarda Nümerik Analiz.....	31
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>34</b>
4.1. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantıların Ortam Ve Termal Çevrim Performansları .....	34
4.2. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantı Numunelerin Nümerik Analizi.....	40
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>44</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>47</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>51</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Karbon Nanoyapılarda a) Grafen b) Karbon Nanotüp c) C60 Fulleren .....	7
Şekil 1.2. Irwin Tarafından Kırılma Mekanizmasının Çatlak Açma Modları .....	16
Şekil 1.3. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Yükleme Esnasında Oluşan .....	17
Şekil 1.4. ASTM tarafından önerilen standart D 3433 Cohezive Zone Hasar Modeli .....	18
Şekil 3.1. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantısında Kullanılan a) Kalıp, b) Sıcak Pres.....	27
Şekil 3.2. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantısının Geometrik Parametreleri.....	27
Şekil 3.3. Çift Konsol Kiriş Bindirme Bağlantısının Hazırlanması a) DCB Bağlantı Numunesi, b) Yüzeyi Sprey Boya İle Kapatılması, c) Yüzeyine Mezura Yapıştırılması.....	28
Şekil 3.4. Çift Konsol Kiriş Bağlantı Numunelerine Termal Çevrim Uygulaması .....	29
Şekil 3.5. Mod-I Deney Sınır Şartları .....	30
Şekil 3.6. Video Ekstensometre, Yüksek Hızlı Kamera ve Deneylerde Uygulanan Yükleme .....	30
Şekil 3.7. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantı Numunelerinin Sonlu Elemanlar Analiz Modeli .....	32
Şekil 3.8. Mod-I İçin Bilinear CZM Yasası (ANSYS, 2014).....	32
Şekil 4.1. DP460 Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş DCB Bağlantılarının CBT' ye Göre Kırılma Enerjisi -Çatlak Uzunluğu Eğrileri a) Ortam Sıcaklığı, b) Termal Çevrim.....	35
Şekil 4.2. DP125 Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş DCB Bağlantılarının CBT'ye Göre Kırılma Enerjisi - Çatlak Uzunluğu Eğrileri a) Ortam Sıcaklığı, b) Termal Çevrim.....	38
Şekil 4.3. Bu Çalışmada İncelenen Numunelerin Yüzey Hasarları a) DP460, b) DP125... 40	
Şekil 4.4. DCB Bağlantılarının Sayısal Analizi.....	41
Şekil 4.5. Nümerik Analiz Sonuçları ve Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması a) Tip-I, b) Tip-IG, c) Tip-IC, d) Tip-IF .....	42
Şekil 4.6. Nümerik Analiz Sonuçları ve Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması a) Tip-III, b) Tip-IIIG, c) Tip-IIIC, d) Tip-IIIF .....	43

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1. Temel Hasar Tipleri (ISO 10365).....	19
Çizelge 3.1. AA2024-T3 Alüminyum Alaşım Malzemenin Mekanik Özellikleri.....	25
Çizelge 3.1. Yapısal Yapıştırıcıların Kürleşme Şartları ve Bileşim Oranı .....	25
Çizelge 3.2. Yapıştırıcıların Mekanik Özellikleri.....	26
Çizelge 4.1. DCB Bağlantılar İçin Deneysel Parametreler.....	34
Çizelge 4.2. DP460 ile Üretilen DCB Bağlantıların Mekanik Özellikler.....	37
Çizelge 4.3. DP125 ile Üretilen DCB Bağlantıların Mekanik Özellikler.....	39

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
B	Malzemenin genişliği, mm
C	Numunenin uyumluluğu, $\delta/P$
$D_n$	Mode-I ile ilişkili hasar parametresi
E	Young modülü
H	Malzemenin kalınlığı, mm
$K_n$	Normal cohesive sertlik $\frac{\tau_n^{max}}{\delta_n^*}$
P	Uygulanan yük, N
$P_{max}$	Çatlağın başlamasındaki yük, N
$T_n^{max}$	Maksimum normal cohesive çekme $\sigma_{max}$
U	Elastik gerilme enerjisi
$\nu$	Poisson oranı
$\sigma_t$	Çeki gerilme değeri
$\epsilon_t$	Çeki şekil değiştirme değeri
$a$	İlk çatlak uzunluğu, mm
$\Delta$	Çatlağın ucundaki y yönündeki yerdeğiştirme, mm
$\delta_n^*$	Maksimum normal cohesive çekmedeki yer değiştirme
$\delta_n^c$	Tamamen ayrılmadaki normal yer değiştirme
$\delta_n^{max}$	Deformasyon boyunca elde edilen maksimum normal yer değiştirme

## **Kısaltmalar**

CNT	Karbon Nanotüp
DCB	Çift Konsal Kiriş
CZM	Cohesive Zone Model



### 1. GİRİŞ

#### 1.1. Araştırmanın Amacı ve Kapsamı

Daha önceki dönemlerde olduğu gibi günümüzde de malzemeleri birleştirmek, birbirlerine eklemek ve onları kullanıldıkları süre içinde bir arada ve bir bütün olarak kalmalarını sağlamak amacıyla kullanılan birçok malzeme ile teknik bulunmaktadır. Özellikle bağlantıların güvenilirliklerinin uzun zaman periyotlar içinde büyük önem taşıdığı havacılık, uzay, otomotiv, altyapı sistemi, tıp, elektronik paketleme, deniz ve spor endüstri alanlarında kullanılan yapıştırıcılar, gün geçtikçe geleneksel yöntemlerin (kaynak, lehim, perçin ve cıvata) yerini almaya başlamıştır (Temiz 2003).

Birleştirme yöntemlerinden biri olarak yapıştırıcıların kullanılması, farklı malzeme, plastik ve kompozitlerin birleştirilmesinde sıkça tercih edilmektedir. Yapıştırma; perçin, kaynak ve lehim gibi uygulamalarla birlikte endüstriyel birleştirme yöntemlerinden biri olarak kullanılmaya başlanmasından bu yana, yapıştırma işleminde başarılı yöntemi bulmak, bunun için en önemli parametreleri belirlemek amacıyla birçok mühendislik, araştırma ve geliştirme çalışması yapılmıştır (Vinson 1989).

Günümüzde sistemler tarafından tüketilen enerji miktarını azaltmanın birçok nedeni bulunmaktadır. Yakıt tasarrufu sağlamanın temel yöntemlerinden biri de sistemlerin ağırlıklarının azaltılmasını sağlamaktır. Sistemi oluşturan unsurları birleştirmek amacıyla kullanılmakta olan kaynak, perçin ve cıvata yerine nispeten hafif bir bağlantı biçimi olan yapıştırıcıların kullanılması sistemleri iyice hafifletmiştir (Temiz 2003).

Yapıştırıcılar, yüzeylere sürüldükten sonra katılaştırdığı zaman parçaları birbirine bağlama niteliği bulunan malzemelerdir. Yapıştırıcıları farklı şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Fiziksel durumlarına göre sınıflandırma: Tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar, iki bileşenli sıvı yapıştırıcılar ve film yapıştırıcılar şeklinde yapılırken; esas malzemeye göre sınıflandırma ise metal-metal yapıştırıcılar, kâğıt yapıştırıcılar ve ahşap yapıştırıcılar şeklinde yapılmaktadır. Kimyasal formları dikkate alınarak yapılan sınıflandırmada da epoksi yapıştırıcılar, siyanoakrilat yapıştırıcılar ve polikloropren yapıştırıcılar örnek olarak verilebilir. Yapıştırma koşulları dikkate alınarak yapılan sınıflandırmaya göre ise çözücü ile katılan yapıştırıcılar, soğuk katılan yapıştırıcılar

ve erimiş durumda uygulanan ve soğuyup sertleştiğinde yapışma sağlayan (hot-melt) yapıştırıcıları örnek olarak göstermek mümkündür (Kinloch 1987).

Yapıştırma bağlantıları yapılan işlemlerde önemli büyük avantajlar sağlamasına ve çok geniş bir kullanım alanı olmasına rağmen, yapısal yapıştırıcıların mekanik niteliklerinin (kayma ve çekme modülleri, poisson oranı, akma ve çekme dayanıklılığı...) tespit edilmesi, güvenilirlik durumu ve yinelenabilirliğinde önemli zorluklarla karşı karşıya kalınmaktadır. Bunun yanında yapısal yapıştırıcıların mekanikle ilgili niteliklerinin doğru olarak saptanmasından başka, belli bir yükleme durumuyla ilgili yapıştırma bağlantısının planlanmasında gerilme dağılımlarını tespit edebilmek ve bağlantı dayanımının tahmin edilmesini diğer etkenlerin anlaşılmasını da zorunlu hale getirir. Temelde söz konusu etkenleri; materyal belirlenmesi, yapısal geometri, yük ve yükün büyüklük durumu, seçilmiş materyaller için uygun olan hasar ölçütlerinin tespit edilmesi ve yapıştırılmış olan malzemenin mekanik özellikleri olarak sıralanabilir.

Günümüzde yapıştırma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcıların karbon nanoyapılar ile modifiye edilmesi, bu tip yapıştırma bağlantılarının yapısal özelliklerinin tespiti, bağlantı arayüzeylerinin morfolojisi ve termal çevrim performansının incelenmesi özgün bir değere sahiptir. Diğer taraftan yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların nümerik analizinde daha doğru bir metodun kullanılması ve nümerik analiz ile deneysel verilerin birbirleriyle uyumunun karşılaştırılması oldukça önemlidir. Yapılan bu araştırmada; yapıştırıcı içerisine ilave edilen nanoyapı, yapıştırıcının kırılma enerjisine ve termal çevrim performansına etkisi amaçlanmaktadır. Ayrıca cohesiv zone model ile nümerik analiz yapılması ve deneysel veriler ile karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

### 1.2. Kuramsal Temeller

Yapıştırıcının tanımı malzemeleri bir arada tutmaya yarayan madde olarak yapılırken; yapışma kavramının tanımı, iki yüzeyin; molekül, iyon ve atomlar arası etkileşimden dolayı meydana gelen çekim kuvvetleri sayesinde bir arada tutturulması şeklinde yapılmaktadır (Kinloch 1987).

Yapıştırıcı tekniği, son yıllarda çok hızlı bir gelişme gösterdi; bu gelişmenin en önemli nedenleri, bu ürünlerin hazırlanmasında sentetik malzemelerden yararlanılması ve

## 1. GİRİŞ

---

ayrıca bunların inşaat, uçak yapımı, gemi inşası, otomobil sanayisi, mobilyacılık, deri sanayisi, aşındırıcılar, özyapışkanlar vb. gibi çok geniş bir alanda kullanılmasıdır. Yapıştırıcılar değişik açılardan sınıflandırılabilir:

Kullanım sırasındaki fiziksel ya da kimyasal durumlarına göre sulu yapıştırıcılar, karışım halindeki yapıştırıcılar (genellikle sulu), organik çözücülü yapıştırıcılar, çözücüsüz yapıştırıcılar, hamur halindeki yapıştırıcılar (macunlar, mastikler), toz durumundaki yapıştırıcılar (karıştırılarak çözelti haline getirildikten ya da etkinleştirildikten sonra kullanılır), taşıyıcılı ya da taşıyıcısız kuru film halindeki yapıştırıcılar, katı durumda (eriyebilir) bulunan yapıştırıcılar.

Dönüşüm süreçlerine göre yapıştırıcılar (bu tür yapıştırıcılar başlangıçtaki akışkan durumlarını terk ederek soğuma, çözücünün buharlaşması ya da polimerleşme yoluyla belli bir süre sonunda kusursuz bir yapışkanlık ve yapışma gücü kazandıkları son sertleşmiş durumlarına geçerler), elde edildikleri hammadde ve kimyasal bileşimlerine göre yapıştırıcılardır. Son sertleşmiş durumdaki çözünürlük ve eriyebilirlik (ısıyla yumuşar yapıştırıcılar) ya da tam tersine çözünmezlik ve erimezliklerine (polimerleşmiş yapıştırıcılar) göre yapıştırıcılardır.

Organik ve yarı organik yapıştırıcılar, ana maddesi nişasta, glüten, dekstrin, doğal reçine, selüloz türevleri vb. gibi maddelerden oluşan bitkisel yapıştırıcılardır; hayvansal yapıştırıcıların ana maddesini jelatin oluşturur (kemik, deri, kazain tutkalı vb.).

Sentetik yapıştırıcılar katılma polimerleri (vinil polimerleri vb.) ile yoğunlaşma polimerlerinden (epoksit reçineleri, poliüretanlar, tiyoplastlar, aminoplastlar vb.) elde edilir. Polimerleşebilen yapıştırıcılar, nicelikleri önceden ayarlanmış iki ayrı madde (ana madde ve sertleştirici) halinde hazırlanır; ayrı ayrı tüplere konan bu yapıştırıcılar, kullanımları sırasında karıştırılır. Ancak günümüzde bu tür yapıştırıcılar da tek bir madde halinde üretilebilmektedir. Bunlar ya nem etkisiyle (siyanoakrilatlar epoksit reçineleri, fenoplastlar) ya da oksijensiz bir ortamda (anerobik) polimerleşirler. Bütün bu teknik ölçütlerin yanı sıra yapıştırılacak malzemelerin (yüzeylerin) türü ve uygulanmalarının ekonomik yönü, kullanılacak yapıştırıcının seçiminde önemli bir rol oynar.

### 1.3. Yapısal Yapıştırıcıların Sınıflandırılması

Yük taşıyabilen özellikte olan yapısal yapıştırıcılar, uzay sanayi, gemicilik ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yapısal yapıştırıcılardan önemli olanları,

- Akrilik,
- Anaerobik,
- Silikonlar,
- Epoksi,
- Poliüretan'dır.

Akrilikler, metal ve plastik malzemeler için iyi soyulma mukavemeti bulunan yapısal yapıştırıcılardır. Sözü edilen malzemeleri, -110°C ile 120°C arasında sıcaklıkta elastik özelliklerinde bir değişikliğe yol açmadan korumaktadırlar. Rutubetli ortamlara karşı belli bir dirence sahip olan bu yapıştırıcıların, nemden kaynaklı sebeplerle mukavemetlerinde önemli sayılabilecek bozulmaya uğramaları söz konusu değildir. Bunun yanında sözü edilen bu yapıştırıcılar, yanıcı özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklık taşıyan ortamlarda kullanıldıklarında zamanla bozulurlar (Akpınar 2008).

Anerobik yapıştırıcılar, uygulama sonrasında oksijenin ortamdan uzaklaştırılmasıyla kürleşmektedirler. Bunu sağlamak için yapıştırma işlemi yapıldıktan hemen sonra yapıştırma uygulanan bölge, havanın girişine engel olacak biçimde kaplanmaktadır. Anerobik yapıştırıcılar, rutubet ve çözeltiyle ilgili yüksek bir dirence sahip oldukları için 150°C'ye kadar yüksek sıcaklıktaki metal ve termosetlerin yapıştırılmaları için kullanılmaktadır.

Silikon yapıştırıcılar, kısıtlı kohezif dayanıma sahip yapıştırıcılardır. Fakat -60°C'den 370°C'ye kadar olağanüstü bir sıcaklık aralığı içinde çalışma koşullarına sahiptir. Çok esnek bir zincir yapısına sahip olan bu yapıştırıcılar, iyi soyulma mukavemeti göstermektedirler. Metal, cam, plastik ve lastiklerin yapıştırılmasında ve mikroelektronik endüstrisi alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Söz konusu yapıştırıcılar, bu özellikleri yanında pahalı sayılabilecek ürünlerdir.



Epoksi reçineler, neredeyse uygulamaların tamamında kullanılması mümkün olan, epeyce yüksek mukavemete sahip yapıştırıcıdır. Reçine ile katılaştırıcıdan oluşan iki bileşen şeklinde satılmaktadır ve bağlantıda uygulanmadan önce karıştırılmalıdır. Kürleşme süresi, oda sıcaklığında birkaç saatle ifade edilebilecek periyottan birkaç güne kadar uzayacak periyoda kadar yayılan oldukça geniş bir skalaya sahiptir. Mukavemeti daha yüksek olan ticari epoksilerin kürleşme sıcaklıkları, 200°C'lere kadar yükselmektedir. Gevrek bir yapısı olan kürleşen yapıştırıcı, nemli ortamlarda hassasiyet göstermekte ve uzun süren çevresel etkiler altında bulunduğu mukavemetinde kayıplar olmaktadır. Kürleşme sırasında yapıştırıcıda bir miktar daralma meydana gelir ve bu durum da istenmeyen artık gerilmelerin olmasına yol açar. Epoksi bağlantılar, 140°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda bozulmaktadır. Epoksinin plastik ve metal yüzeylere yapışması zayıf olduğu için bağlantıda meydana gelen hasar, kohezif olmaktan ziyade adheziftir, yani yapıştırıcı ile esas malzeme arayüzeyinde ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında, epoksi uygulanmak suretiyle yapıştırılmış olan ahşap yapılarda hasar, bağlantı yerinden ziyade çok ahşap malzemenin kendi içerisinde oluşmaktadır (Temiz 2003).

Poliüretanlar tek bileşen şeklinde de satılıyor olmasına rağmen, genel olarak reçine ile katalizörden oluşan iki bileşen biçiminde satışı yapılmaktadır. Epoksi reçinelerle kıyaslandığında çalışma ömrünün çok daha kısa olduğu ve nemli ortamlarda daha da hassas olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığında ya da ısıtıldığında kürleştirilebilir. Kürleşme sırasında boyut değişiminden dolayı ortaya çıkan artık gerilmeler çok meydana gelmez. Poliüretan yapıştırıcılar, genellikle düşük sıcaklıklarda, epoksi reçinelere göre daha iyi mukavemete ve tokluğa sahip yapıştırıcılardır. İyi katılık ve elastik özellikler gösterir. Bunun yanında toksik özellikleri olduğundan dolayı söz konusu bileşimlerine elle dokunulduğunda tehlikeli olabilirler.

### 1.4. Karbon Nanoyapılar

Nano sözcüğü, sözlük anlamına bakıldığında olarak bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamını taşıırken; nanoteknoloji, moleküllerin ve atomların bir bir işlenmek ve yeniden düzenlenmek yöntemiyle kullanıma elverişli materyal, araç ve sistem üretim sanatı ve bilimi olarak belirtilmiştir (Çıracı vd 2005; Evcin vd 2012).

Nanoteknoloji terimi, ilk defa 1974'te Tokyo Üniversitesi'nde çalışmalar yapan

bilim insanlarından biri olan Norio Taniguchi tarafından nanometre boyutunda olan malzemeleri işlemeye ilgili olarak ortaya atılmıştır (Ramsden 2005). Bunun yanında, nanoyapıların olağanüstü özellikleri daha önceden de tahmin edilmiştir. Nitekim Richard P. Feynman, sunduğu ünlü konuşma metninde (There's Plenty of Room at the Bottom, APS, Caltech, 1959) nanoyapıların dikkat çekici niteliklerini vurgu yaparak bilim insanlarının ilgilerinin nanometre boyutlarına yönelmesini sağlamak amacıyla çaba göstermiş, daha sonra Amerikalı bilim insanları Drexler ve Smalley, çalışmaları sürdürerek bu alanı daha ileri seviyelere götürmüşlerdir (Acar 2013).

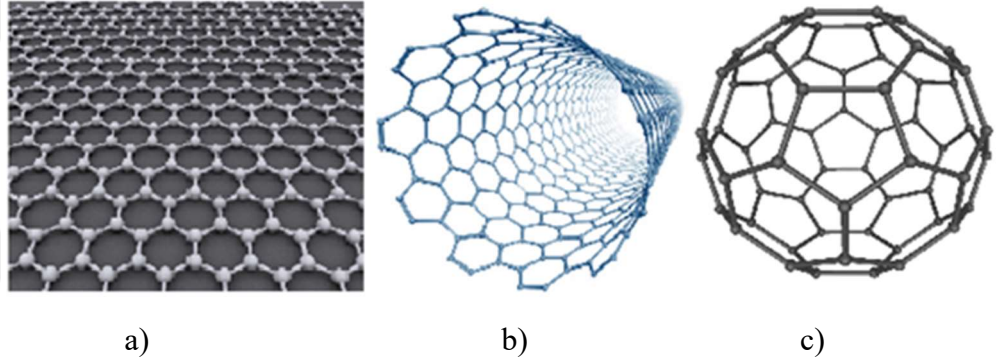
Boyut olarak 100 nanometreye (nm) kadar kabul gören nanopartikül yapılar, mikro boyuttaki hacimsel yapıları malzemelere göre çok daha üstün ve farklı oldukları kabul edilen kimi nitelikler sergilemektedirler. Nanoyapılı partiküller, göstermiş oldukları üstün özelliklerinden dolayı elektrik elektronik, otomotiv, kimya ve biyomedikalle ilgili sektörler başta, endüstriyel alanların birçoğunda kullanım potansiyeline sahiptirler (Gürmen ve Ebin 2008).

Nanopartikül niteliklerinin çekiciliğinin yaşadığımız dönemde bilinmekte olan sebepleri arasında öne çıkanlar ise; kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzeri olmayan karakterleri ve seviyesi yüksek olana yüzey/hacim oranıdır (Liverni 2006). Birçok farklı allotropu bulunan karbonun, bu denli farklı yapı oluşturabilme yeteneği, karbon atomunun çok farklı çeşitlerde değerlik bağı oluşturabilmesinden ileri gelmektedir. Mühendislik araştırmalarında kullanılan popüler karbon bazlı nanopartiküller olarak grafen, karbon nanotüp ve fulleren nanoyapıları gösterilebilir. Son on yılda önemi gün geçtikçe artan grafen nanoyapılar; bal peteği örgü şeklinde dizilmiş, karbon karbon bağı uzunluğu 0,142 nm olan karbon allotroplarıdır.

Tek bir grafen tabakasının tek atom boyu yüksekliğinde olduğu gözönüne alınması durumunda üçüncü boyutu ihmal edilerek iki boyutlu bir malzeme olarak adlandırılan grafen nanoyapılar, oda sıcaklığındaki yüksek termal iletkenliği (5000 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) ve mekanik özellikleriyle (1 TPa Young Modülü) dikkat çeker. 2004 yılında Andre Geim ve Konstantin Novoselov, o ana dek denenmeyen ve gayet sade bir yöntemle tek tabaka grafen sentezlemeyi başarmış ve bu keşifleri iki bilim insanına 2010 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırmıştır.

## 1. GİRİŞ

Karbon Nanotüpler (CNT), geometrik yapı kapsamında, grafen tabakalarının silindirik halde oluşturdukları silindirik yapılardan oluşmaktadır. Bir karbon nanotüp çapı nanometre ölçeğindedir ve uzunluğu ise 1 mikro metreden fazla olabilir. Nanotüp çap büyüklüğü, günümüze dek üretilmiş gelişimi en ileri yarı iletken aletten daha küçüktür. Karbon nanotüplerin elverişli yapıları; çok küçük boyutlu olması ve karbon atomunun eşsiz elektronik özellikleri gibi birçok neden dolayı yarı iletken fiziği üzerinde önemli bir etkisi vardır (Yetim 2011). Proje önerisi çerçevesinde polimer modifikasyonu işleminde kullanılması planlan bir diğer karbon nano yapısı ise fulleren (C60-Buckminsterfullerene)'dir. Kroto vd (1985), 60 karbon atomu ile küresel fulleren yapısında oluşturdukları karbon allotropuna C60 molekülü adı verilmektedir. Şekil 1.1'de proje önerisinde kullanılması planlanan karbon nano yapıların şematik görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 1.1** Karbon Nano yapılarında a) Grafen b) Karbon Nanotüp c) C60 Fulleren

Son yıllarda, karbon nano yapılar, farklı mekanik araştırmayla ilgili birçok konu içinde bir yere sahip olmuşlardır. Bu çalışmalar, genel kapsam olarak polimerik kompozitler üst başlığı altında incelenmiş, bünyelerindeki nanopartikül varlıkları nedeniyle “nano kompozitler” adı vermeye başlanmışlardır. Proje önerisinin de amaçlarından biri olan; nanopartikül katkısı ile polimerin mekanik özelliklerini iyileştirme işlemi; bir nano yapının başka bir yüzeye (polimer, elyaf vb.) ile kimyasal veya mekanik tutunması, bu iki yüzey arasında bulunan etkileşim düzeyinin yüksek olmasıyla gerçekleştirilir. Bu doğrultuda, karbon nano yapılar yüzey fonksiyonelize işlemine tabi tutularak, yüzeylerinde amin, hidroksil, karboksil ya da epoksil fonksiyonel grupları gibi polimerik malzemede tutunacakları, bağlanacakları köprüler oluşturulur. Nano yapı ve polimer arasındaki bu kimyasal ve mekanik bağ, polimerin ve bağlantının mekanik özelliklerindeki iyileşmenin temel nedenidir.

Yapılan çalışmalar yüzey gruplarına sahip olmayan karbon nanoyapıların da polimerin mekanik özelliklerinde iyileşme meydana getirdiğini ortaya koymuştur (Rafiee vd 2009). Yüzey gruplarının verimliliği ve tutunma performansı incelemeleri, proje önerisinin yöntem başlığı altındaki “arayüzey çalışmaları” aşamasında detaylı olarak yürütülecektir. Grafen – polimer etkileşimi üzerinde yapılan bir değerlendirme, karbon nanoyapılar çerçevesinde genişletildiğinde, arayüzey etkileşimin iyileştirilmesi amacıyla sıralanan konulara dikkat çeker; karbon nanoyapıları fonksiyonize edilmesi, polimer içinde minimum topaklanma ile homojen bir nanoyapı dağılımının sağlanması, nanoyapı – polimer arayüzeyinin iyi anlaşılması ve nanoyapının geometrik şekli üzerinde manipülasyon (katlama, eğme vb.) yapılabilmesidir (Singh vd 2011).

### 1.5. Termal Çevrimin Yapıştırma Bağlantıları Üzerindeki Etkisi

Havacılık ve otomotiv endüstrisi başta olmak üzere birçok farklı disiplinde kullanılan yapıştırma bağlantıları, çalışma şartlarındaki mekanik zorlanmalarının yanında dinamik termal şartlara (termal çevrim) ya da nem faktörüne maruz kalabilirler Jumbo vd (2007). Bağlantının servis ömrü boyunca maruz kalabileceği bu durum, yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeyler arasındaki arayüzey bölgesinde iç termal gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Termal gerilmelerden dolayı yapıştırıcı malzemesi yapısında oluşan çatlak mekanizması ve ardından gelişen kırılma mekaniği ile bağlantı arayüzeyinde oluşan boşluk yapı sonucunda tamamen olumsuz bir durum olarak devam eden bu süreç, termal yorulma olarak adlandırılır (Humfeld vd 1998).

Optimum bir bağlantı tasarımı için, bağlantının maruz kalacağı mekanik zorlanmaların yanı sıra çevresel etkilerin de göz önüne alınması gerekmektedir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeyler arası termal genleşme katsayılarının (CTE – Coefficient of Thermal Expansion) farklılığı, malzemelerde birbirlerinden farklı termal uzamalar (Thermal strain) meydana getirir. Bu durumda, farklı uzamalar nedeniyle yapışma bölgesinde oluşan boşluk unsurları (Debonded region) yapıştırma bağlantısının mekanik davranışını tümüyle etkiler (Humfeld vd 1998).

Polimer yapıya eklenen karbon nanoyapıların, polimerin termal iletkenlik katsayısını artırdığı, bununla birlikte, termal genleşme katsayısında düşüş meydana getirdiği bilinmektedir (Wong vd 1999; Miller vd 2006).

Karbon nanoyapı takviyesi sonucunda yapıştırıcı polimer malzemesinin termal genişleme katsayısında meydana gelen azalma genel bir yaklaşım olan “karışım kanunu – mixture law” ile açıklanabilir;

$$a_c = a_p v_p + a_n v_n \quad (1.1)$$

Bağıntıda ,  $a_c$ ,  $a_p$  ve  $a_n$  sırasıyla, nanoyapıştırıcı kompozitin (nanoyapı + polimer), yapıştırıcı polimerin ve karbon nanoyapının termal genişleme katsayılarını ifade ederken  $V_p$  ve  $V_n$  ise yapıştırıcı polimerin ve karbon nanoyapının hacim oranlarını ifade etmektedir. Epoksi bazlı yapıştırıcıların termal genişleme katsayısının oda sıcaklığında  $[50 - 60] \times (10^{-6} \text{ m/m K})$  aralığında olduğu bilinmektedir. Diğer yandan, oda sıcaklığı dikkate alındığında grafen nanoyapının termal genişleme katsayısı  $[-8.0] \times (10^{-6} \text{ m/m K})$  Yoon vd (2011), karbon nanotüp ve C60 fulleren nanoyapılarının termal genişleme katsayıları, sırasıyla,  $\sim[-0,75-(-0.5)] \times (10^{-6} \text{ m/m K})$  ve  $\sim[-1-1,5] \times (10^{-6} \text{ m/m K})$  olarak bilinmektedir (Jiang vd 2004; Kwon vd 2004).

(1.1) bağıntısından da anlaşılacağı üzere, yapıştırıcı polimere takviye edilen karbon nanoyapılar sonucunda yapıştırıcı polimerin termal genişleme katsayısında bir miktar düşüş meydana gelmektedir. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey malzemelerinin termal genişleme katsayılarının farklılığı, termal çevrim sonucunda bağlantıda oluşan bozunmanın temel nedenidir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin termal genişleme katsayıları arasındaki bu fark, yapıştırıcıya takviye edilen karbon nanoyapılar neticesinde, yeni yapıştırıcı malzemesinin (nanoyapı + polimer) termal genişleme katsayısındaki düşüş ile bir miktar azaltılabilir. Bu sayede, termal çevrim sonucunda yapıştırıcı malzemenin takviyesiz yapıştırıcıya oranla daha az termal uzama gerçekleştirmesi ve devamında bağlantı arayüzeyinde oluşan iç gerilmelerin azalması beklenmektedir.

### 1.6. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırma yapılacak malzemelerin yüzeylerinin hazırlanma aşaması, yapıştırma prosesi içinde yer alan en önemli basamaklardan biridir. Bağlantının sürekliliği ve dayanımı, yapıştırıcıyla temas içinde olan yüzeyin biçimine büyük ölçüde bağlıdır. Yüzeyin hazırlanması; basit bir çözelti içine daldırmanın yanı sıra, kimyasal temizleme,

mekanik aşındırma ve asit kullanarak dağlama yöntemine kadar birkaç farklı uygulamanın birlikte yapılmasıyla da gerçekleştirilebilir. Orta ve düşük düzeyde bağlantı dayanımının yeterli olduğu yerlerde yüzey hazırlığı süreci, yoğun bir biçimde yapılmaya da olur. Ne var ki yüksek bağlantı dayanımı, süreklilik ve verimlilik istenilen yerlerde, yüzey hazırlama prosesinin dikkatli ve kontrollü yapılması gerekmektedir. Yüzey hazırlama yöntemleri seçilirken aşağıda verilen hususlara dikkat edilmelidir:

- Bağlantı dayanımı,
- Süreklilik ve hizmet edilen çevre,
- Yapıştırılacak malzeme üzerinde bulunan kirletici ögelerin türü ve miktarı,
- Yapıştırılacak malzeme

Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerinde yer alan yağ, oksit ve boya tabakaları gibi kirletici ögelerin yüzeyden temizlenmesi, bağlantı dayanımını önemli bir biçimde artırmaktadır. Yapıştırma işleminden iyi bir sonuç almak için elastomer ve plastikler yüzey hazırlama işlemi, metallerde göre daha fazla bağımlıdır. Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanmasında, aşağıda verilmiş olana ön hazırlama prosedürlerinden biri ya da birkaçı uygulanır.

### 1.6.1. Yapıştırılacak Yüzeylerin Yağdan Arındırılması

Yapışmada olabilecek en iyi sonuca ulaşma amacıyla yapıştırma uygulanacak yüzeylerden toz, yağ, gres ve buna benzer öteki kalıntıların tamamıyla temizlenmesi gerekmektedir. Bu sonucun alınmasında kalıntı bırakmadan buharlaşma özelliğine sahip çözeltiler kullanılması önemlidir. Aseton, trikloretilen ve metiletilketon yağ çözücü özellikleri en iyi olan ürünlerdir. Bu çözeltiler kullanılarak ıslatılmış olan yüzeyler kurulanır ve daha sonra buharlaşmanın tamamlanması için birkaç dakika bekletilir.

Miktarlı yüksek olan imalatlar için özel yağ alma banyoları kullanılıyorsa temizlik yapmak için kullanılan banyonun kirlenmesini önlemek amacıyla kirlilik düzeyi yüksek olan yüzeylere ön temizlik uygulanması önerilmektedir. Yağ almak için kullanılan buharlı sistemler, bu amaç için sıklıkla kullanılmaktadır. Sözü edilen uygulamada çözeltiler, kaynama noktasına kadar ısıtıldıktan sonra buharlaşması sağlanır. Soğuk parçalar, buharlaşmış temizleyiciyle temas geçtiğinde, temizleyici yüzeyler üzerinde yoğunlaşır. Meydana gelen sıvı yüzeylerde kalan kirlerin ve gres parçacıklarının temizlenmesini

sağlar.

Yağ alma işlemi, genellikle tamamıyla kapalı makineler kullanılarak yağ alma çözeltileriyle yapılmaktadır. Uygulamaların birçoğunda yüzeylere etkisi hızlı olan bir temizleyiciyle ön işlem yapılması yeterli olmaktadır. Bu işlem sayesinde yüzeyler kir, gres, yağ ve öteki kalıntılardan temizlenerek yapıştırma için hazır hale gelir. Çözeltiler kullanılmak suretiyle temizlik yapılırken söz konusu işlemde daha iyi bir sonuç almak amacıyla kırı yüzeylerden ayırmaya yarayan kimyasal işlem, yüzeyi bir temizlik beziyle ovma veya fırçalamak gibi kimi mekanik işlemlerle de desteklenebilir.

Yapıştırılacak yüzeyde bulunan kir, gres ve yağ gibi kirletici unsurların deterjan kullanılmak suretiyle temizlenmesi de mümkündür. Parçalar 66°C ve 99°C'de bulunan suya daldırılır. Daha sonra da saf su içinde iyice çalkalanır ve ardından kurutulur. Genel olarak kullanılmakta olan deterjanın alkalın esaslı bir deterjan olması önerilmektedir. Alkalın ya da asit bazlı sulu temizleyici malzemeler, daima korozyon önleyici maddeler içermektedirler. Bu kalıntıların sözü edilen temizleme sürecinden sonra da yüzeyde kalmaya devam etmesi, yapışmanın kuvvetinin azalmasına ya da yapıştırıcının küreşmesine engel olabilir. Eğer bahsedilen türden temizlik sistemlerinin kullanılması planlanıyorsa kesinlikle uygulama öncesinde bununla ilgili testler uygulanmalıdır. Yapıştırılacak malzemelerin tüm yüzeylerin, deri durumu içinde iyice durulanması ya da silinmesi gerekmektedir. Alkalın esaslı deterjanlar kullanarak temizleme işlemi, bir başına pas ve benzeri kalıntıları temizlemeye yetmez ve bu işlem öteki yüzey hazırlama yöntemleriyle beraber kullanılmaktadır.

### 1.6.2. Mekanik Aşındırma

Genel olarak bir oksit tabakasıyla kaplı olan kirli metal yüzeylerin, yağ alma yöntemiyle temizlenmesi mümkün olmaz. Bunun gibi durumlarda; zımparalama, kumlama, taşlama ya da tel fırçayla fırçalamak gibi bazı mekanik ön-işlem yapılmalıdır. Yüzey pürüzlülüğü, yapıştırma bağlantılarının dayanımıyla ilgili dikkate değer düzeyde bir etkiye sahiptir. Bu etki, malzemedeki yüzey alanını genişletmek, bundan dolayı da malzeme ile yapıştırıcı arasında bulunan kimyasal bağları artırmak suretiyle sağlanır.

Geniş yüzeyleri temizlemek amacıyla kullanılabilecek en iyi yöntemlerden biri

zımparalamadır. Zımparalama yöntemiyle, çok kalın zımpara kullanmamak şartıyla, sağlanan yüzey pürüzlüğü yapıştırmanın çok iyi olmasını sağlamaktadır. Taşlama yöntemi kullanılarak da benzer biçimde iyi bir yüzey pürüzlüğü elde edilmesi mümkündür. Bu yöntem uygulanırken yüzey pürüzlüğünü iyi seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bağlantı dayanımı, genel olarak yüzey pürüzlülüğünün düzeyiyle bağımlılık göstermektedir. Aşırı pürüz taşıyan yüzeyler, bağlantıda bazı boşluklar oluşturacağı için dayanımı negatif olarak etkiler.

Farklı metaller için tavsiye edilen aşındırıcı boyutları,

Çelik	Kuru zımparalama	80-100 mesh
Paslanmaz çelik	Islak zımparalama	140-325 mesh
Alüminyum	Islak zımparalama	140-325 mesh
Prinç	Islak zımparalama	140-325 mesh

Fırçalama, zımparalama ya da taşlamadan sonra kalıntıların tamamının temizlenmesi için parçalar üzerinde yağ alma işlemi uygulanması gerekmektedir. Kullanılan zımparaya ya da taşa yüzeyde bulunana kirlerin bulaşmaması için çok kirli olan parçaların mekanik işlemde önce de yağdan arındırılması gerekmektedir. Mekanik ön-işlem metotlarının uygulanması pratik olarak da çok kolay olduğu için bu uygulama, genel olarak yeter düzeyde yapışma kuvveti sağlamaktadırlar.

### 1.6.3. Kimyasal Ön-İşlem

Yüzey hazırlamanın en etkili yöntemlerinden birisi, yapıştırılacak yüzeylere kimyasal işlem uygulanmasıdır. Bu yöntem kullanılarak yüzeyin fiziksel ve kimyasal niteliklerinde değişimler meydana getirilir. Birleştirilecek bölge genel olarak kromik asit benzeri asit çözeltisinin içerisine daldırılır. Daha sonraki aşamada hemen saf suya daldırılan parçalar, iyice çalkalandıktan sonra kurutulur. Kimyasal aşınmanın etkisiyle, malzemenin yüzeyine reaktif gruplar eklenmesi ve yapıştırıcının mekanik olarak kenetlenmesine imkan verecek gözenekler açılmasından dolayı yüzeyde birtakım değişimler oluşur. Söz konusu işlemde elde edilecek sonuç kullanılan malzemeye göre değişiklik gösterebilir. Bu yöntemin sanayi alanında kullanımı, aşındırıcı çözeltilerin uygulanması ve atık bakımından her geçen gün daha pahalı hale gelmesinden dolayı



sınırlıdır. Ne var ki en yüksek dayanımın düzeyinin sağlanabilmesi için elektrolitik ya da kimyasal bir ön işleme ihtiyaç vardır.

### 1.7. Yapıştırıcı İçerisine Nanoyapı İlave Edilmesi

Nanoyapı katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında en önemli nokta, karbon nanoyapılar yapıştırıcı içinde homojen olarak dağılmalı, birbirleri arasında kesinlikle topaklanma yapmamalıdır. Bu nedenle, nanoyapı katkılı bulk numunelerin hazırlanması ile ilgili literatür araştırıldığında üç farklı yöntem raslanmıştır. Bu yöntemler; Elle Karıştırma, Ultrasonik Karıştırıcı ile Karıştırma ve Yüksek Kayma Karıştırıcı (High Shear Mixer) ile Karıştırma yöntemleridir. (Hsiao vd 2003; Zhai vd 2006; May vd 2010; Gkikas vd 2012; Neto vd 2013).

**Elle Karıştırma Yöntemi:** Bu yöntemde, temizliği yapılmış boş bir beherebhasas terazi yardımıyla yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (epoksi+hızlandırıcı) miktarının ağırlıkça istenilen oranda nanoyapı ve belli bir miktar aseton ilave edilerek 30KHz frekans değerinde 10 dakika karıştırılmalıdır. Buradaki amaç nanoyapıları bir arada tutan bağları kırarak daha küçük boyuta indirgenmesidir. Daha sonra aseton+nanoyapı karışımı 80°C de etüv içinde bekletilerek asetonun tamamen uçması sağlanmalıdır. Nanoyapı bulunan bu behere planlanan miktarda epoksi eklenerek bir kaşık ile elle mekanik olarak 45 dakika karıştırılmalıdır. Daha sonra yapıştırıcının epoksi-hızlandırıcı bileşim oranına göre hızlandırıcı eklenerek 10 dakika yine elle karıştırılmalıdır.

**Ultrasonik Karıştırıcı ile Karıştırma Yöntemi:** Bu yöntemde, elle karıştırma yönteminde olduğu gibi nanoyapının daha küçük boyutlara indirgenmesinden sonra nanoyapı bulunan behere planlanan miktarda epoksi eklenerek ultrasonik karıştırıcı ile 30 KHz frekansında 30 dakika karıştırılmalıdır. Ancak ultrasonik karıştırmada aşırı ısınma sorunu ile karşılaşılabilir. Bu sorun beherin altına buzlu su konularak giderilebilir. Daha sonra yapıştırıcının epoksi-hızlandırıcı bileşim oranına göre hızlandırıcı eklenerek 10 dakika elle karıştırılmalıdır.

**Yüksek Kayma Karıştırıcı ile Karıştırma Yöntemi:** Bu yöntemde, diğer iki yöntemdeki gibi nanoyapının daha küçük boyutlara indirgenmesinden sonra nanoyapı bulunan behere planlanan miktarda epoksi eklenerek yüksek kayma karıştırıcı ile 2250

rpm de 120 dakika karıştırılmalıdır. Daha sonra yapıştırıcının epoksi-hızlandırıcı bileşim oranına göre hızlandırıcı eklenerek 10 dakika elle karıştırılmalıdır.

### 1.8. Yapıştırıcıların Kırılma Enerjilerinin Belirlenmesi

Kırılma, bir malzemenin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılmasıdır. Bir katı maddenin kırılması genellikle katı içindeki belirli yer değiştirme süreksizlik yüzeylerinin gelişmesinden dolayı meydana gelir. Bir yer değiştirme; yer değiştirme yüzeyine dik olarak gelişirse normal bir çekme çatlama veya sadece bir çatlak olarak adlandırılırken, yer değiştirme yüzeyine teğetsel olarak gelişirse, kayma çatlağı, kayma bandı veya çıkık olarak adlandırılır.

Kırılma mekaniği, neredeyse tamamen kırılmayla tespit edilen hasarları incelemektedir. Bu alanda gerçekleştirilen başarılı ilk çalışma, Griffith tarafından 1921'de gerçekleştirilmiştir. Griffith tarafından yapılan çalışmada camlarda bulunan gevrek çatlakların ilerleyişini gözlemlemiştir. Sözü edilen çalışmada Griffith, daha önce meydana gelmiş bir çatlağın ne şekilde ilerlemeye başlayacağını oldukça basit bir enerji dengesi ortaya koymak suretiyle formülize etmeyi başarmıştır. Bir sistem içinde elastik şekil değiştirme enerjisi çatlak ilerleme gösterdikçe azalma eğilimi gösterir ve sözü edilene enerji, kırılma yüzeylerinin oluşması gereken bir enerjidir.

Griffith vd (1921) metalik malzemelerin gevrek kırılmasına da uygulanmıştır. Griffith'in anlayışında kalıcı şekil değişiminin her malzemeye has sabitleşmiş bir değer olarak bağıntıya katılması mümkün olmadığı için bağıntının metallerde doğrudan kullanılması mümkün olmaz. Irwin vd (1950) Griffith ölçütlerinden hareket ederek metalik malzemeler için kırılma esaslarını geliştirmeyi başarmıştır. Böylece Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) gelişmesinde öncü olmuştur. Bununla birlikte gerilme şiddet faktörü yaklaşımı ile yapılmış olan çalışmaların sonucunda malzemelerde ortaya çıkan yorulma çatlak ilerlemesi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi kritik-altı çatlama olan hassasiyetleri de bir seviyeye kadar tahmin edilmesi mümkün duruma gelmesi sağlanmıştır.

Elastik gerilme enerjisi (U), yer değiştirmeye neden olan bir yük (P) tarafından yapılan işdir ( $\Delta$ ) :

$$U = \frac{P\Delta}{2} = \frac{CP^2}{2} \quad (1.2)$$

Birim alan A'nın çatlak genişlemesi ile elastik potansiyel enerjinin kaybı gerilme enerjisi salınım oranı olarak tanımlanır (G).

$$G = \frac{dU}{dA} = \left( \frac{P^2}{2} \right) \frac{dC}{dA} \quad (1.3)$$

Bu ilişki, yapısal malzemelerin kırılma direncini karakterize eder. Burada dC/dA oranı çatlak oluşumu esnasında malzemede oluşan eğimi ifade eder.

Malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak malzemedeki mevcut kırılma enerjisi üç şekilde belirlenir. Bunlar;

Mod-I – Açma veya Çekme Modu (Açılma modu)

Mod-II – Kesme veya Kayma Modu (Düzlem içi kayma modu)

Mod-III – Yırtma veya Düzlem Dışı Mod (Düzlem dışı kayma modu)

### 1.8.1. Çatlak Açılma Deformasyon Tipi ( Mod-I )

Mod-I gerilmenin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik gelecek şekilde y eksenine istikametinde etkilemektedir. Bu noktada boyutsuz şekil düzeltme faktörü bulunup çatlak geometrisine göre değişiklik göstermektedir. Merkez çatlak için aynı zamanda  $\beta$  parametresiyle belirtilmektedir.

### 1.8.2. Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mod-II )

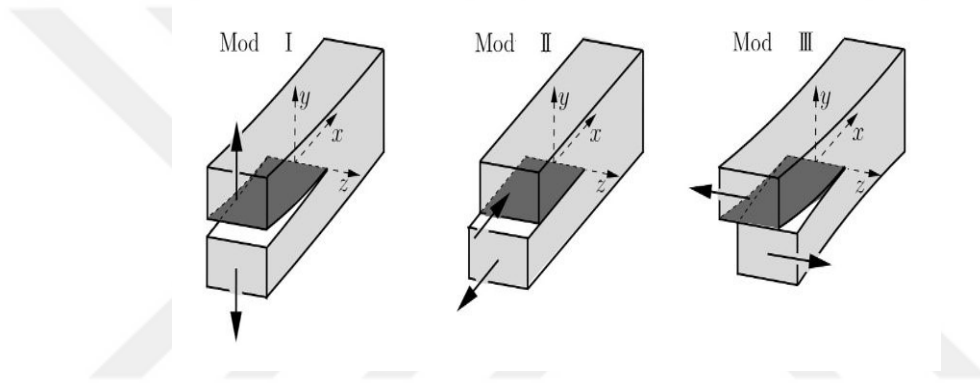
Mod-II gerilmenin kayma bileşeni, x eksenine doğrultusunda çatlakla etki etmektedir. Kuvvetler çatlakla paralelken, kuvvetlerden biri çatlaklağın üst yarısını geriye iter ve diğeri çatlaklağın alt yarısını aynı hat boyunca ileri doğru çekiyor. Bu durum bir kesme çatlaklağı oluşur ve çatlak kendiliğinden kayar.

### 1.8.3. Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi ( Mod-III )

Mod-III'de, gerilmenin kayma bileşeni, çatlaklağın uç kenarına ya da çatlak önüne paralel olarak z eksenine doğrultusunda etki etmektedir. (Çatlak ön-arka doğrultudadır,

kuvvetler soldan ve sağdan çekilir). Bu, malzemenin kendi başına ayrılması ve kendisi boyunca kayması, orijinal düzleminin dışına çıkmasına neden olur, dolayısıyla düzlemsel olmayan makaslama denir. Güçler aynı zamanda sola ve sağa bastırıyor olabilir ve aynı etki meydana gelecektir. Ancak çatlak büyümek için kuvvetlerin zıt yönde hareket etmesi gerekiyor.

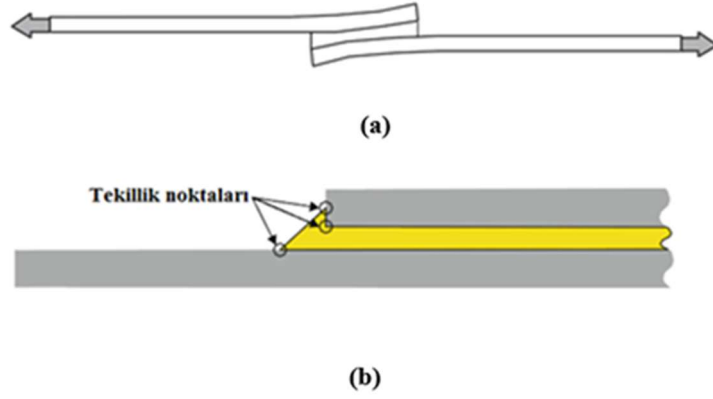
Bu modların birden fazlası bir anda olabilir, bu da "karışık mod" çatlamaına neden olur. Cohesive Zone Model için Mod-I yüklemesi altında yapıştırıcının kırılma davranışı kullanılmalıdır. Bu kırılmalarda mod-I'de gerilme şiddeti faktörü KI, mod-II'de KII ve mod-III 'de ise KIII ile gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Irwin Tarafından Kırılma Mekanikinin Çatlak Açma Modları

### 1.9. Cohesive Zone Model ile Sayısal Analiz

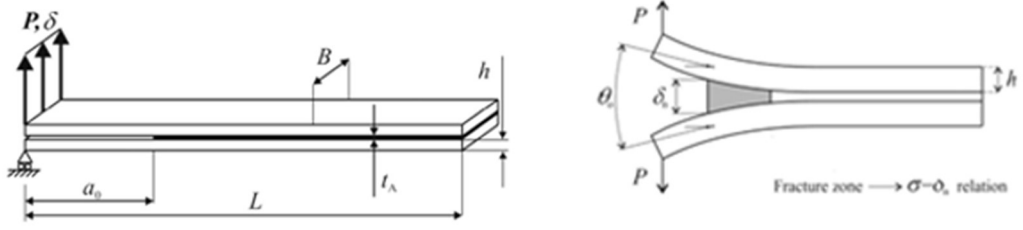
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda yükleme esnasında, soyulma gerilmelerinin etkisi ile malzemenin uç kısımlarının dönmesi, yani malzemenin plastik davranış göstermesi nedeniyle gerilmelerin doğru hesaplanabilmesi için geometrik olarak lineer olmayan analizini gerektirir (Şekil 1.3a). Yapıştırma bağlantılarının lineer olmayan sonlu elemanlar analizinde son birkaç yıla kadar yaygın biçimde kullanılmakta olan bir yaklaşım; bulk numunelerin çekme deneyinden sağlanmış olan gerilme-şekil değiştirme davranışları göz önünde bulundurularak, malzemelerin elastik - plastik gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Ancak bağlantının serbest uçlarında gerilme tekilliğinin olması ve gerilmelerin kullanılan mesh sayısına bağlı olması bu yaklaşımı sorunlu hale getirmektedir (Şekil 1.3b).



**Şekil 1.3.** Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Yükleme Esnasında Oluşan Soyulma Gerilmesinin Etkisi

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların nümerik analizlerinde karşılaşılan bu sorunlardan dolayı, son yıllarda başarılı bir şekilde kullanılan hem gerilme analizine hem de kırılma mekaniğine dayalı olan Cohezive Zone Model ilgi çekmektedir. Bu model; çatlakın başlangıcını, ilerlemesini ve hasarın oluşması simüle ederek, sadece hasar tahmini için değil aynı zamanda hasar ilerlemesini de tahmin etmek için kullanılır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarında cohesive zone model ile sonlu elemanlar analizi yapmak için bazı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir.

Elastisite ve kayma modülü parametreleri bulk numunelerin testleri ile kırılma enerjisi parametreleri ise Mod-I'deki çift konsol kiriş (Double Cantilever Beam) veya konikleştirilmiş çift konsol kiriş (Tapered Cantilever Beam) numunelerin testleri ile hesaplanır. Mod-I'de ki kırılma enerjisini belirlemek için ASTM tarafından önerilen standart D 3433 (Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints) standardı kullanılır (Şekil 1.4).

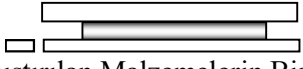

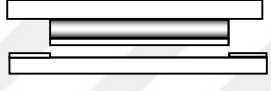

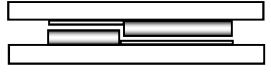
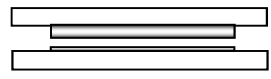
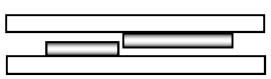


**Şekil 1.4.** ASTM tarafından önerilen standart D 3433 Cohezive Zone Hasar Modeli

### 1.10. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri

Farklı yükleme koşullarında yapıştırıcının mekanik özelliklerinin ya da yapıştırma bağlantılarının tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekmektedir. Bir grup malzeme ya da parçanın yapıştırıcıyla bir araya getirilmiş olduğu yapıştırma bağlantılarında genellikle kohezyon ve adhezyon denilen iki tip hasar modeliyle karşılaşılmaktadır (ISO 1036).

Çizelge 1.1. Temel Hasar Tipleri (ISO 10365)

Yapıştırılan Malzeme	Hasar Tipleri	Tanımlanma Şekli
	 <p>Yapıştırılan Malzemelerin Biri Veya İkisinde De Hasarın Oluşması</p>	YH
	 <p>Kohosiv Yapıştırılan Malzeme Hasarı</p>	KYH
	 <p>Kalkma (Deleminasyon) Yoluyla Hasar</p>	DH
Yapıştırıcı	 <p>Kohezyon Hasarı</p>  <p>Özel Kohezyon Hasarı</p>  <p>Adhezyon Hasarı</p>	KH ÖKH
	 <p>Adhezyon Hasarı</p>	AH

## 1. GİRİŞ

---

Adhezyon Hasarı: Yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme arayüzeyinde gözle görülen ayrılmanın oluştuğu kopma olayıdır (Çizelge 1.1).

Kohezyon Hasarı: Bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın oluştuğu kopma şeklidir (Çizelge 1.1).

Temel hasar modellerinin tayin edilmesi, bir yapıştırma bağlantısına uygulanmış olan herhangi bir mekanik testten elde edilen sonuçların daha iyi anlaşılmasını ve oluşan hasar çeşitliliklerinin sınıflandırmaya tabi tutulmasını sağlamaktadır. Hasar tipleriyle ilgili temel sınıflandırma Çizelge 1.1’de verilmiştir. Birden çok hasar modeli meydana gelmişse hasar modellerinin her birinin ortalama yüzde oranlarının tanımlamaların tümünün sonunda verilmesi gerekmektedir (Akpınar 2008).



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan literatür araştırmalarında, SiO<sub>2</sub> nanopartikül katkılı yapıştırıcı polimer çalışmalarının yapıldığı anlaşılmıştır. Bu bağlamda, Robaidi vd (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, Nano - SiO<sub>2</sub> partikülleri ile modifiye edilmiş yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri incelenmiş, ayrıca bağlantıdaki arayüzey mekanizmasının iyileştirilmesi için farklı yüzey işlemlerinin yapıldığı belirtilmiştir. Aynı kapsamda, Kinloch vd (2003) tarafından yapılan başka bir çalışmada Nano – SiO<sub>2</sub> modifiyeli epoksi yapıştırıcıların mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Nano – SiO<sub>2</sub> üzerine yapılan çalışmalar, bağlantının mekanik dayanımında artış meydana getirdiğini, ayrıca, yapıştırıcının yapısal özelliklerinde de iyileşmeler kaydettiğini belirtmektedir.

Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli modifiye epoksi yapıştırma bağlantıları üzerine, Zhai vd (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, ağırlıkça %2 katkılama ile bağlantının mekanik dayanımının iyileştiği, bağlantı arayüzeyinde karboksil gruplarının oluştuğu gözlenmiştir. Bu sonuç, arayüzey çalışmalarının önemini bir kez daha kanıtlamakta, arayüzey bölgesindeki fonksiyonel grupların yapışma derecesini artırdığını belirtmektedir.

Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üzerine yapılan diğer araştırmalarda, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyesinin yapıştırıcı ve bağlantıların mekanik özelliklerinde iyileşmeler kaydettiğini ve yapıştırıcının termal genişleme katsayısında düşüşe neden oldukları anlaşılmıştır (Lee vd 1999; Gilbert vd 2004).

Karbon nanoyapı katkılamalarında göze çarpan ürünler Karbon Nanotüp (CNT) ve karbon siyahı örnekleri olmuştur. Bu doğrultuda, Park vd (2009) tarafından yayınlanan bir çalışma, cam/epoksi kompozit bağlantılarında kullanılan epoksi yapıştırıcının karbon siyahı ile modifiye edilmesi durumunu incelemiştir. Sonuçlar, karbon siyahı takviyesinin yapıştırıcının termal genişleme katsayısını düşürdüğünü ve bağlantının yük taşıma kapasitesini yeterli ölçüde artırdığını belirtmektedir. (Hsiao 2003) epoksi yapıştırıcıyı karbon nanotüp ile modifiye etmiş ve grafit/epoksi bağlantılarındaki performansını incelemişlerdir. Sonuç olarak, karbon nanotüp katkı oranı ile bağlantı dayanımı arasında doğru orantının var olduğunu aktarmışlardır. Bu çalışma, katkılama oranının da önemli bir parametre olduğu vurgulamıştır.

Sihn vd (2008), yapıştırma bağlantılarının termal iletkenliğini karbon nanotüp katkıli yapıştırıcılar ile artırırken, Burkholder vd (2009) ise karbon nanotüp takviyesi ile kırılma tokluğu performanslarında gelişme kaydetmişlerdir.

Uçak yapı elemanlarındaki tamir uygulamalarında kullanılan yapıştırıcıların karbon nanotüp ile modifiye edilmesi konusu üzerine çalışan Gkikas vd (2012), tamir uygulaması sonrasında yapı üzerindeki korozyon dayanımı incelemişlerdir. Buna göre, karbon nanotüp katkıli film yapıştırıcıların yapının korozyon dayanımını artırdığı anlaşılmıştır. Bu sonuç, karbon nanoyapı katkıli yapıştırıcıların havacılık uygulamalarındaki çevresel etkilere karşı sergileyeceği üstün dayanımı öngörmektedir. Karbon nanotübün tekil olarak takviye kullanımının yanı sıra hibrit katkılamalara da rastlanılmıştır.

Wolf vd (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, karbon nanotüp ve SP1 proteini hibrit katkılaması ile modifiye edilmiş yapıştırıcı polimer incelenmiştir. Çalışmada, CNT/SP1 hibrit katkısı ile karbon nanotüp dispersiyonunun artırıldığı ve topaklanmanın önüne geçildiği belirtilmiş, yapıştırıcının mekanik özelliklerinde iyileşmeler meydana getirdiği belirtilmiştir.

Hibrit katkı elemanı olarak CNT/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyesini çalışan May vd (2010), sol-jel metodu ile hazırladıkları hibrit katkı elemanlarını epoksi ile modifiye etmiş ve bağlantının bazı yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Kuo vd (2008) tarafından yapılan bir çalışmada, CNT silindirleri içine takviye edilmiş C60 fullerene hibrit katkıli polimer yapıştırıcının metal yüzeylerle olan yapışma özellikleri incelenmiş ve CNT içindeki C60 dolgusu yoğunluğunun yapıştırıcının dayanımına etki ettiği anlaşılmıştır. Ek olarak, CNT üzerine kaplanmış nikel hibrit yapısı ile takviye edilmiş nanokompozit yapıştırıcılar üzerine yapılan bir çalışmada Guo-Fei vd (2011) CNT/nikel yapısının yapıştırıcının manyetik ve mekanik özelliklerinde gelişmeler meydana getirdiği belirtilmiştir.

Yapıştırıcıya karbon nanotüp katkılamaları, diğer karbon dışı katkılamalara oranla daha iyileştirilmiş sonuçlar ortaya koymaktadır. Neto vd (2013) karbon elyaf/epoksi kompoziti bağlantılarında kullandıkları yapıştırıcıyı grafen ile takviye etmiş ve bağlantı mukavemetinde %57'lik bir artışın olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışma, grafenin yapıştırma bağlantılarındaki geleceğinin bir belirtisi olarak değerlendirilebilir. Bir diğer

grafen katkılama çalışması Kim vd (2012) elektronik devrelerde kullanılan yapıştırıcılar üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada, grafen oksit yüzeyleri  $Al(OH)_3$  ile kaplanarak polimer yapıştırıcı içinde takviye edilmiş, yeni yapıştırıcının termal ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği iyileşmeler açıklanmıştır.

Diğer taraftan yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların deneysel analizlerinin yapılmasının yanı sıra nümerik analizlerinin yapılması ve deneysel veriler ile nümerik verilerin uyumlu olması son derece önemlidir.

Literatürde yayınlanmış, yapışkanla birleştirilmiş bağlantıların sayısal analizinde kullanılan birkaç yöntem vardır. Bununla birlikte, en uygun olarak kabul edilen Cohesive Zone Model (CZM), yapışkanla birleştirilmiş bağlantıların sayısal analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatürde, CZM kullanarak sayısal analizler yapan birçok çalışma bulunmaktadır (Campilho vd 2013; Ribeiro vd 2016).

Bir yapıştırma bağlantısının CZM ile nümerik analizinin yapılabilmesi için, o yapıştırıcı için CZM parametrelerinin elde edilmesi gerekir. CZM parametrelerinin elde edilmesi için bir kaç test metodu olup, bu metotlardan biride Double Cantilever Beam (DCB) testidir. Literatürde yapıştırıcı ile birleştirilmiş DCB bağlantı testinin yapılıp, o yapıştırıcıya ait kırılma enerjisi, maksimum gerilmeye karşı gelen yer değiştirme ve tamamen ayrılmaya karşı gelen yer değiştirme değerlerinin elde edildiği bir kaç çalışma bulunmaktadır (Banea vd 2015; Lee vd 2016).

Kim vd (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırıcıyı fiber ile güçlendirmiş ve bu yapıştırıcının DCB testini yapmıştır. Yapılan bu çalışmada fiber takviyeli yapıştırıcının kırılma enerjisinde önemli derecede bir artış ve bu artışın yapıştırıcı içerisinde fiber oranına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

DCB testi ile yapıştırıcının kırılma enerjisini hesaplamada birkaç teori kullanılmaktadır. Khoshrovan ve Mehrabadi (2012), yapıştırıcının kırılma enerjisini hesaplamada Modified Beam Theory (MBT), Compliance Calibration Method (CCM) kullanmış ve 2 boyutlu - 3 boyutlu nümerik analiz ile karşılaştırmıştır. Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarına göre 3 boyutlu analizin daha uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

Lopes vd (2016) yapılan bir çalışmada ise, üç farklı yapıştırıcı için DCB testi yapılmış ve her bir yapıştırıcının kırılma enerjisi üç farklı enerji metod (Compliance Calibration Method, Corrected Beam Theory and Compliance-Based Beam Method) kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucuna göre, yumuşak ve normal sert yapıştırıcılar için DCB testi uygunken, çok sert yapıştırıcılar için Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB) testi daha uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca Blackman vd (2009) tarafından yapılan yapısal yapıştırıcı mukavemetlerinin çatlak davranışını DCB test numuneleri kullanılarak 15 m / s'ye kadar 1 m / s'lik test hızlarında yapılan bir çalışmada incelenmiş olup, DCB test oranı, yapıştırıcı kırılma enerjisini değiştirmektedir.

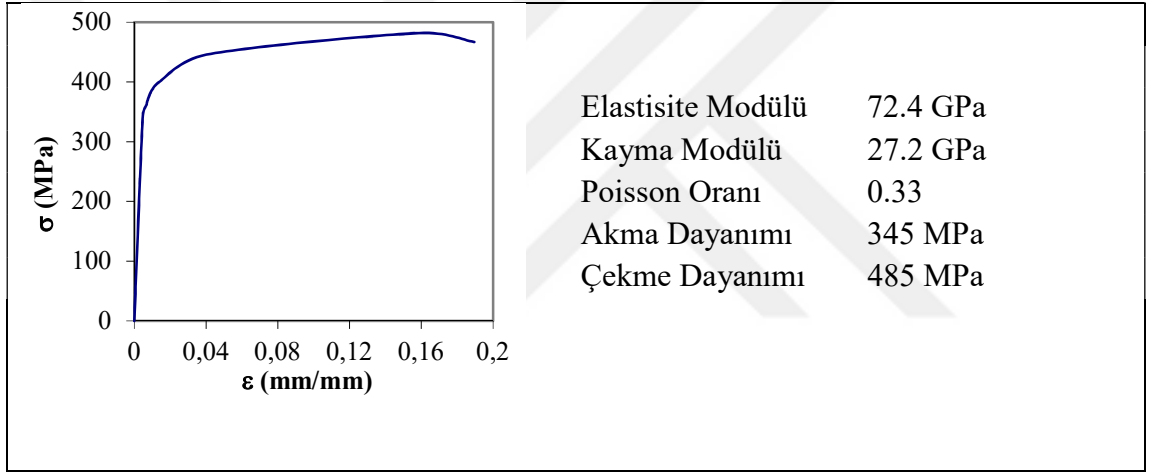


## 3. MATERYAL VE YÖNTEM

### 3.1. Deneysel Malzemeler

Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı havacılık, uzay, denizcilik ve genel mühendislik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 3.1’de verilmiştir (Akpınar 2012).

**Çizelge 3.1. AA2024-T3 Alüminyum Alaşım Malzemenin Mekanik Özellikleri**



Yapıştırıcı olarak ise, çift bileşenli tok yapıştırıcı olan DP460 ve esnek yapıştırıcı olan DP125 kullanılmıştır. Bu yapıştırıcılara ait kürleşme şartları ve bileşim oranı Çizelge 3.2’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.3’de verilmiştir (Akpınar vd 2016).

**Çizelge 3.2. Yapısal Yapıştırıcıların Kürleşme Şartları ve Bileşim Oranı**

Yapıştırıcı	Bileşik Oran(Epoksi:A / Sertleştirici:B)	Kürleşme Sıcaklığı/Zaman
3M™ DP-460	A:B=2:1	60°C /120 dakika
3M™ DP-125	A:B=2:1	70°C/120 dakika

**Çizelge 3.3. Yapıştırıcıların Mekanik Özellikleri**

	<b>DP 460</b>	<b>DP 125</b>
<b>E (MPa)</b>	1984 <sup>±43</sup>	25.1 <sup>±2</sup>
<b>v</b>	0.37	0.35
<b><math>\sigma_t</math> (MPa)</b>	38.4 <sup>±1.1</sup>	12.7 <sup>±0.4</sup>
<b><math>\epsilon_t</math> (%)</b>	4.7	78.5

E: Young modülü, v: Poisson oranı,  $\sigma_t$  : Çeki gerilme değeri,  $\epsilon_t$  : Çeki şekil değıştirme değeri

Yapıştırıcıya ilave edilecek karbon nanoyapı olarak ise, Grafen-COOH (kalınlık 5nm, çap 1-2 mikron, saflık %99,8 ve yüzey alanı 700 m<sup>2</sup>/g), Grafen Oksit (boyut 260nm, yoğunluk 1,91 g/cm<sup>3</sup>, yüzey alanı 499,8 m<sup>2</sup>/g, karbon oranı %80 ve oksijen oranı %20), Karbon Nanotüp-COOH ( çap 10-20 nm, uzunluk 10-30 mm, saflık %95, yüzey alanı 200 m<sup>2</sup>/g ve COOH içeriği ağırlıkça %1) ve Fulleren C60 ( saflık %99 ) kullanılmıştır.

### **3.2. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bindirme Bağlantısının Hazırlanması**

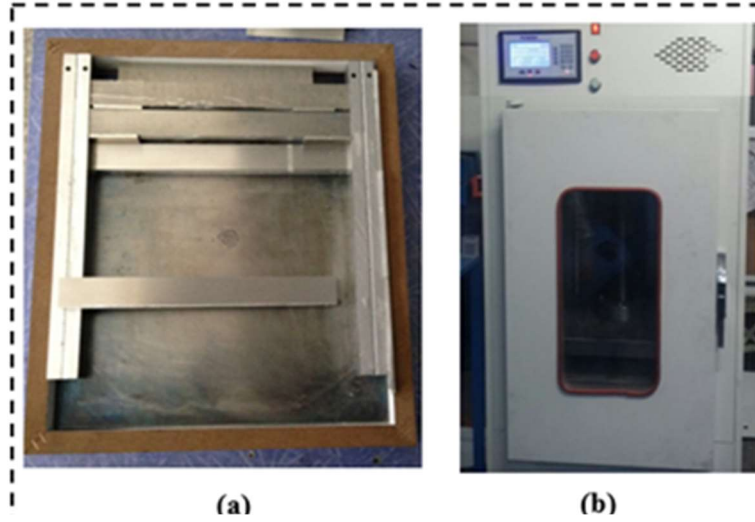
Yapıştırma bağlantılarının yüksek dayanım sergileyebilmesi, kullanılacak yüzey hazırlama yöntemlerine bağımlıdır. Bu yüzden istenilen ebatlara getirilmiş AA2024-T3 numune parçalarına yapıştırma işlemi öncesi aşağıda anlatılan yüzey hazırlama yöntemi uygulanmıştır.

- İstenilen boyutlara getirilmiş numune parçaların kesme işleminde oluşan çapakların ve numune üzerindeki yağ, gres, kir gibi atıkların temizlenmesi numuneler 600 grade SiC zımpara ile zımparalanmıştır.
- 600 grade SiC zımpara işleminde sonra numuneler üzerinde oluşan ince zımpara çiziklerin giderilmesi için 1000 grade SiC zımpara ile numuneler üzerinde pürüzsüz yüzey elde edilmiştir.
- Zımpara işleminde sonra numuneler toz temizleyici ile musluk suyunda yıkanmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

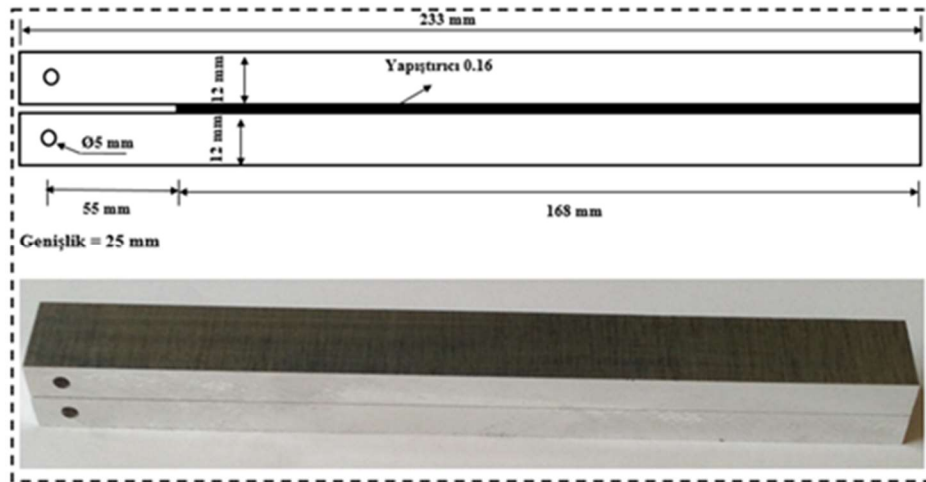
- Yıkama işlemini takiben numuneler 20 dakika asetonda bekletilip ve numune parçaları 60°C sıcaklıktaki bir fırın içerisinde 30 dakika kurutularak yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır.

Çift konsol kiriş bağlantısının üretiminde de özel bir kalıp kullanılmıştır (Şekil 3.1a). Dahası, Çizelge 3.2'de gösterilen yapısal yapıştırıcıların kürleşme şartlarını sağlamak için (Şekil 3.1b)'de gösterilen sıcak bir pres kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantısında Kullanılan a) Kalıp, b) Sıcak Pres

Çalışmada kullanılan çift konsol kiriş (DCB) bağlantısının geometrik parametreleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantısının Geometrik Parametreleri

Bağlantı numunelerin kürleşme esnasında dışarı çıkan fazla yapıştırıcı numunelerin üzerinden temizlendi (Şekil 3.3a). Daha sonra çatlak ilerlemesini daha iyi tespit etmek için numunenin yüzeyinde spreyci boya ile ince bir film tabaka oluşturuldu (Şekil 3.3b). Çatlağın uzunluğunu tesbit etmek için ise, numunenin yüzeyine mezura yapıştırıldı (Şekil 3.3c).



**Şekil 3.3.** Çift Konsol Kiriş Bindirme Bağlantısının Hazırlanması a) DCB Bağlantı Numunesi, b) Yüzeyi Spreyci Boya İle Kapatılması, c) Yüzeyine Mezura Yapıştırılması

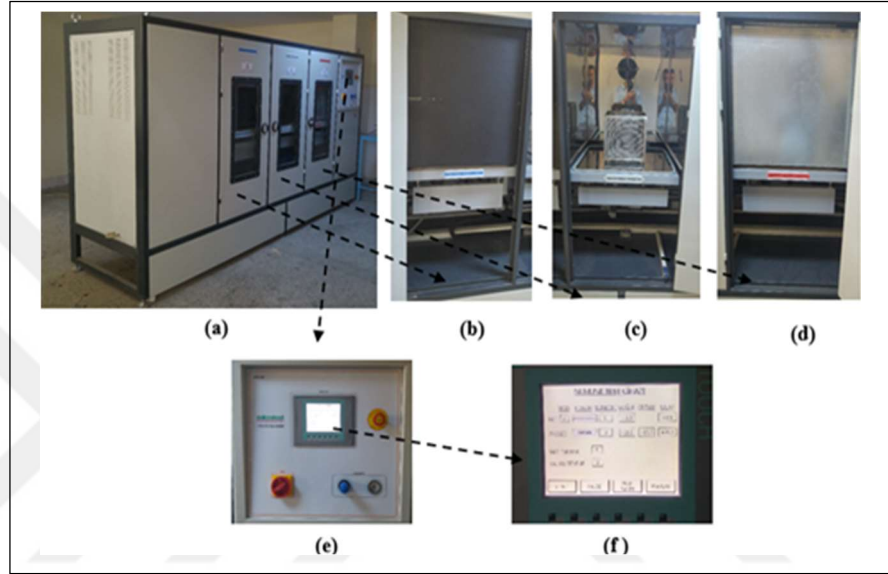
### 3.3. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantı Numunelerine Termal Çevrim Uygulaması

Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle termal çevrim uygulaması bir etüv ve bir soğutucu ile mekanik olarak yapıldığı görülmektedir. Ancak termal çevrimin mekanik olarak yapılması sonuçların güvenilirliğini azaltacağı göz önüne alındığında, bu çalışmada termal çevrim uygulaması için tam otomatik ve yüksek hassasiyete sahip termal çevrim cihazı tasarlanıp yaptırılmıştır. Şekil 3.4a’ da görülen termal çevrim cihazın bazı teknik özellikleri;

- Cihaz birbirinden bağımsız üç hazneye sahip (Şekil 3.4b, Şekil 3.4c ve Şekil 3.4d),
- Cihaz dokunmatik PLC kontrollü ve ekran üzerinden programlanabilir özelliğe sahip (Şekil 3.4e ve Şekil 3.4f),
- Cihaza 99 çevrim sayısı girilebilmekte ve programlanabilmekte (Şekil 3.4f),
- Isıtıcı ve soğutma üniteleri, çevrim ve zamanlamalar kontrol ünitesi ile kontrol edilebilmekte,



- Cihazın 1. Hazne  $-60 \pm 1^\circ\text{C}$  (Şekil 3.4b), 2. Hazne ortam sıcaklığı (Şekil 3.4c) 3. Hazne ise  $250 \pm 1^\circ\text{C}$  (Şekil 3.4d) sıcaklığa çıkabilmekte,
- Cihaza numuneyi yerleştirdikten sonra, cihaz otomatik olarak hangi bölüme yönlendirildi ise o bölüme gidiyor, sıcaklık ve bekleme süresini tamamladıktan sonra diğer bölümlere geçişini otomatik olarak yapabilmektedir. Geçişlerde kapakların açılmasından dolayı oluşan sıcaklık farkı en fazla 1 dakikada içerisinde önceki değere ulaşabilmektedir.

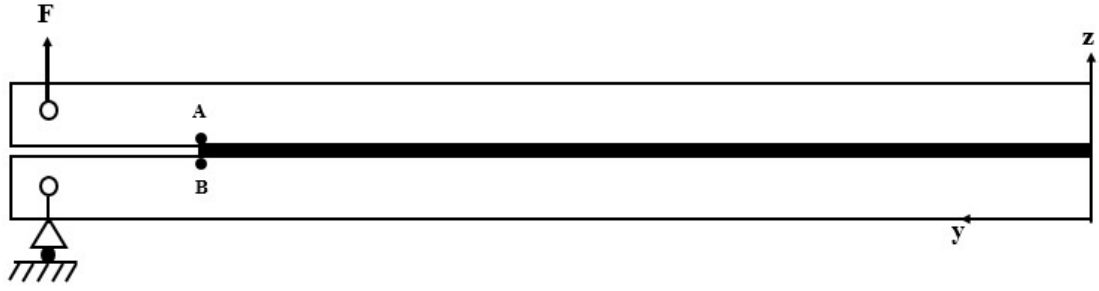


**Şekil 3.4.** Çift Konsol Kiriş Bağlantı Numunelerine Termal Çevrim Uygulaması

Çift konsol kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) bağlantıların termal çevrim performanslarını belirlemek için bağlantılara  $21^\circ\text{C}$  de 10 dakika /  $40^\circ\text{C}$  de 30 dakika /  $21^\circ\text{C}$  de 10 dakika /  $-50^\circ\text{C}$  de 30 dakikalık çevrim süresi dikkate alınarak termal çevrim uygulandı. Belirtilen bu çevrim beş kez tekrarlanarak uygulandı.

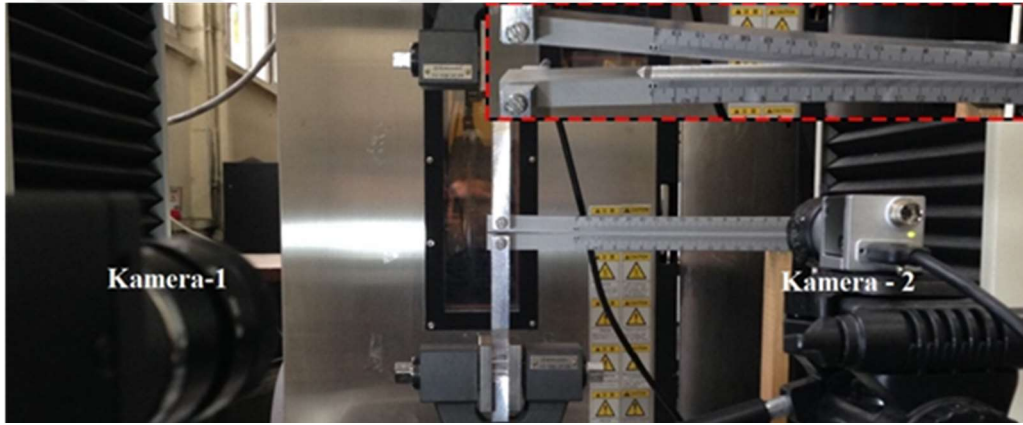
#### 3.4. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantısının Hasar Yüklerinin Belirlenmesi

Çalışmada üretilen DCB bağlantılara çatlak modu olarak Mod-I uygulanmış olup, sınır şartları Şekil 3.5 'de görülmektedir. Tüm deneyler bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I üniversal test cihazında 5 KN'luk bir yük hücresi ile  $18^\circ\text{C}$  ve %30 nem oranında 5 mm/dak.'lık çekme hızında yapılmıştır. DCB bağlantı numuneleri için sınır şartları Şekil 3.5 de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5. Mod-I Deney Sınır Şartları

DCB bağlantı numunelerinin testinde çift kamera kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kamera-1 (ekstensometre) Şekil 3.5’de gösterilen A ve B noktaları arasındaki yer değiştirmeyi ölçerken, kamera-2 ise çatlak ilerlemesini ölçmektedir. Ayrıca kuvvetin uygulandığı yerdeki yer değiştirme cihazın strokundan elde edildi.



Şekil 3.6. Video Ekstensometre, Yüksek Hızlı Kamera ve Deneylerde Uygulanan Yükleme

DCB bağlantılarının  $G_{IC}$  (kritik çeki enerjisi) değerleri iki farklı standartta göre elde edildi.

Birincisi BS 7991 standartında Corrected Beam Theory (CBT) (BS 7991, 2001);

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a+\Delta)} \quad (3.1)$$

Burada;

$\alpha$  = ilk çatlak uzunluğu, mm

$\Delta$  = Çatlak ucu dönüşü ve sapması için çatlak uzunluğu düzeltmesi ( $\Delta$ ; C ve a'nın

bir fonksiyonudur ve deneysel olarak bulunabilir)

$C$  = numunenin uyumluluğu,  $\delta/P$

$P$  = uygulanan yük, N

$\delta$  = çatlak ucundaki  $y$  yönündeki yerdeğiştirme, mm

$B$  = malzemenin genişliği, mm

İkincisi ise ASTM 3433-99 - Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints (STM) – (ASTM 3433-99, 2012).

$$G_{IC} = \frac{(4P^2 \max)(3a^2 + h^2)}{(EB^2h^3)} \quad (3.2)$$

Burada;

$P_{\max}$  = çatlak başlamasındaki yük, N

$E$  = malzemenin elastisite modülü, MPa

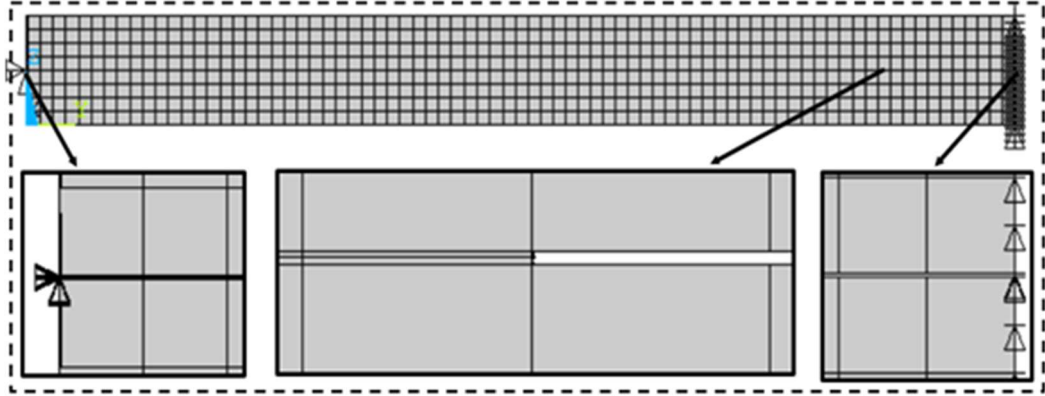
$B$  = malzemenin genişliği, mm

$a$  = ilk çatlak uzunluğu, mm

$h$  = malzemenin kalınlığı, mm

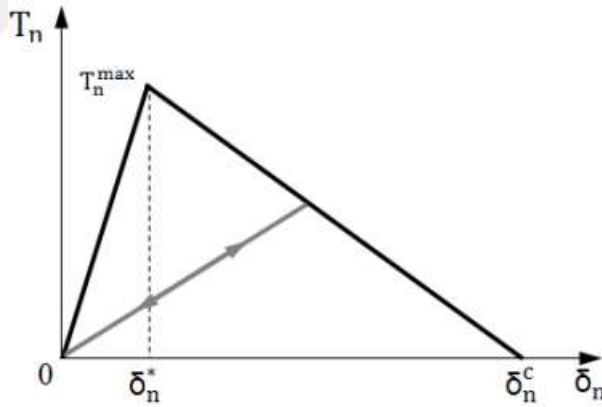
#### 3.5. Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantılarda Nümerik Analiz

Çift konsol kiriş (DCB) bağlantı numunesi üç boyutlu (3D) ANSYS 16 paket programı ile modellendi (ANSYS, 2014). Bağlantı numunelerinde gerilme analizleri hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzeme için lineer malzeme davranışı göz önüne alınarak lineer sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapıldı. Çift konsol kiriş (DCB) bağlantılarında yapıştırıcı bölgesi için Cohesive Zone Model (CZM) kullanıldı. Çift konsol kiriş bağlantılarında yapıştırıcı sadece soyulma yüküne maruz kaldığından dolayı, ANSYS 16 paket programından -Mode I Dominated Bilinear CZM Model- seçildi. Bu bağlantılar, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arası mükemmel birleşmiş ve yapıştırıcı tabakasının arası cohesive elemanlar olarak modellendi (Şekil 3.7).



**Şekil 3.7.** Çift Konsol Kiriş (DCB) Bağlantı Numunelerinin Sonlu Elemanlar Analiz Modeli

Şekil 3.8' de gösterildiği gibi Bilinear CZM modeli üzerinde hâkim olan Mod-I, malzeme arayüzlerinin ayrılmasının arayüzeyde oluşan yer değiştirmenin atlaması ile ilişkili olduğunu varsayar.



**Şekil 3.8.** Mod-I İçin Bilinear CZM Yasası (ANSYS, 2014).

$T_n$  ile teğetsel yer değiştirme arasındaki ilişki denklem 3.3 ile elde edilir.

$$T_n = K_n \delta_n (1 - D_n) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3' deki  $D_n$  denklem 3.4 den elde edilir.

$$Dn = \begin{cases} \left(\frac{\delta_n^{max} - \delta_n^*}{\delta_n^{max}}\right)^0 & \delta_n^{max} \leq \delta_n^* \\ \left(\frac{\delta_n^c}{\delta_n^c - \delta_n^*}\right)_1 & \delta_n^* < \delta_n^{max} \leq \delta_n^c \\ & \delta_n^{max} > \delta_n^c \end{cases} \quad (3.4)$$

Burada;

$K_n$  = normal cohesive sertlik  $\frac{T_n^{max}}{\delta_n^*}$

$\frac{T_n^{max}}{\delta_n^*}$  = maksimum normal cohesive çekme  $\sigma_{max}$

$\delta_n^*$  = maksimum normal cohesive çekmedeki yer değiştirme

$\delta_n^c$  = tamamen ayrılmadaki normal yer değiştirme

$\delta_n^{max}$  = deformasyon boyunca elde edilen maksimum normal yer değiştirme

$D_n$  = Mode-I ile ilişkili hasar parametresi

DCB bağlantıların nümerik analizlerinde, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki tabaka her biri için mükemmel bir şekilde birleştirildi ve yapıştırıcı tabakası cohesive bir eleman olarak modellendi. Bağlantının kırılma enerjisi ( $G_{IC}$ ), deneylerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve çatlak uzunluğu verileri denklem 3.1 ve 3.2 de kullanılarak elde edildi.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

## 4.1. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantıların Ortam Ve Termal Çevrim Performansları

Çift konsol kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) bağlantıların ortam ve termal çevrim performanslarını belirlemek için dört ana grup (DP460-ortam sıcaklığı, DP460-termal, DP125-ortam sıcaklığı ve DP125-termal) oluşturuldu (Çizelge 4.1). Bu bağlantılarda termal çevrim +40/ortam/-50, +30/ortam/-50 [°C]'lik sıcaklık aralıklarında 30/10/30 dakikalık çevrim süresi dikkate alınarak uygulandı.

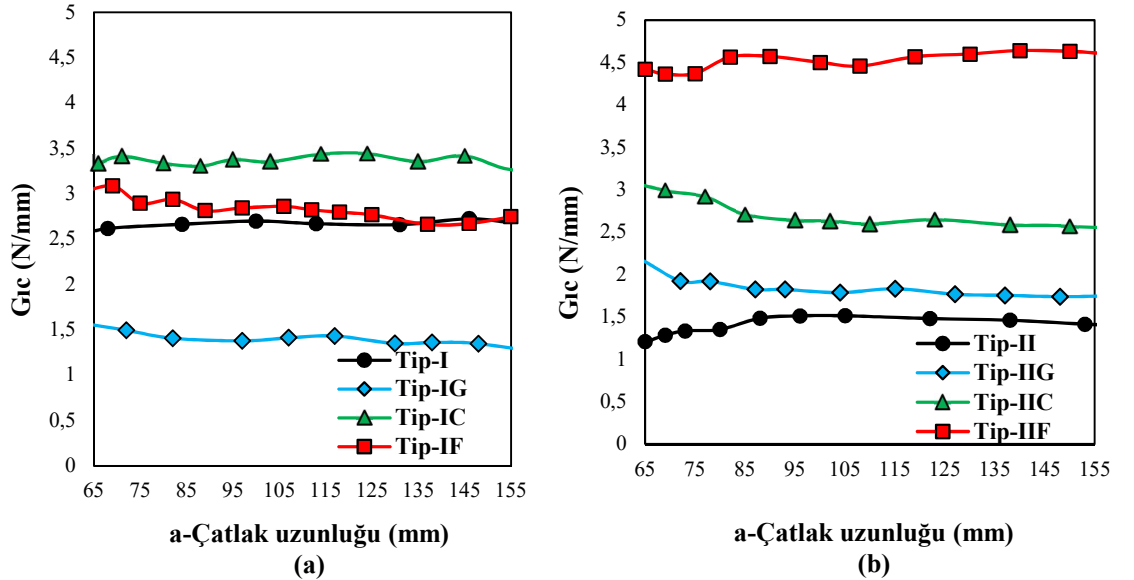
Çizelge 4.1. DCB Bağlantılar İçin Deneysel Parametreler

Tip	Yapıştırıcı/ Nanoyapı/Şartlar
Tip-I	DP460 / Katkısız / Ortam Sıcaklığı
Tip-IG	DP460 / Grafen-COOH / Ortam Sıcaklığı
Tip-IC	DP460 / Karbon Nanotüp-COOH / Ortam Sıcaklığı
Tip-IF	DP460 / Fulleren / Ortam Sıcaklığı
Tip-II	DP460 / Katkısız / Termal
Tip-IIG	DP460 / Grafen-COOH / Termal
Tip-IIC	DP460 / Karbon Nanotüp-COOH / Termal
Tip-IIF	DP460 / Fulleren / Termal
Tip-III	DP125 / Katkısız / Ortam Sıcaklığı
Tip-IIIG	DP125 / Grafen-COOH / Ortam Sıcaklığı
Tip-IIIC	DP125 / Karbon Nanotüp-COOH / Ortam Sıcaklığı
Tip-IIIF	DP125 / Fulleren / Ortam Sıcaklığı
Tip-IV	DP125 / Katkısız / Termal
Tip-IVG	DP125 / Grafen-COOH / Termal
Tip-IVC	DP125 / Karbon Nanotüp-COOH / Termal
Tip-IVF	DP125 / Fulleren / Termal

Tip-I G, C ve F, Tip-II G, C ve F, Tip-III G, C ve F Tip-IV G, C ve F bağlantı tiplerinden üçer numune üretildi ve hasar oluşuncaya kadar Mod-I yüklemesine maruz bırakıldı. Daha sonra DCB bağlantı numuneleri için yükler (P)–yer değiştirmeler ( $\delta$ ) ve çatlak ilerlemesi verileri ölçüldü. Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak yapıştırıcının kırılma enerjisi ( $G_{IC}$ ) elde edildi.

Tüm bağlantı tipleri için elde edilen hem kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrileri hem de mekanik özellikleri üçer numune test sonucunun ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bu üç numune arasındaki standart sapmanın yaklaşık % 1 ila % 1.5 olduğu ve bu durum nanoyapıların yapıştırıcı içerisinde homojen dağıldığını göstermektedir. Ayrıca termal çevrime maruz kalan numunelerde de standart sapmanın minimum olması, termal çevrim uygulamasının tam otomatik termal çevrim cihazda yapılmasının daha doğru olduğunu göstermektedir.

Nanoyapı katkılı ve katkısız DP460 tok yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantıların (Tip-I ve Tip-II) kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrileri Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu eğriler denklem 3.1’de verilen Corrected Beam Teorisine (CBT) göre elde edildi.



**Şekil 4.1.** DP460 Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş DCB Bağlantıların CBT' ye Göre Kırılma Enerjisi -Çatlak Uzunluğu Eğrileri a) Ortam Sıcaklığı, b) Termal Çevrim

DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantılarında ilk çatlak oluşuktan sonraki çatlak uzunluğu dikkate alındı. Şöyle ki yapıştırıcı uzunluğunun ilk 10 mm den sonraki çatlağın yaklaşık 90 mm ilerlemesi incelendi ve bu verilere göre kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrileri elde edildi. Corrected beam teorisine (CBT) göre elde edilen bu eğriler incelendiğinde, çatlağın yaklaşık 90 mm ilerlemesinde enerjinin hemen hemen sabit kalması, denklem 3.1’de kullanılan  $\Delta$  değerinin doğru bulunmasıyla ilişkilidir. Bu durum deneysel verilerin doğruluğunun bir ispatıdır.

Ortam sıcaklığında DP460 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini azaltırken, Karbon Nanotüp-COOH ilave edilesi bağlantın kırılma enerjisini artırmaktadır. Yapıştırıcıya Fulleren ilave edilmesinde ise bağlantının kırılma enerjisini hemen hemen değiştirmemektedir (Şekil 4.1a). Ancak bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında bu durum oldukça değişmektedir. Nanoyapı katkısız bağlantı (Tip-I) termal çevrime maruz kaldığında (Tip-II) bağlantının kırılma enerjisi önemli derecede azaltırken, yapıştırıcıya Grafen-COOH ve Fulleren ilave edilmesi (Tip-IIG ve Tip-IIF) bağlantının kırılma enerjisi önemli derecede artırmaktadır (Şekil 4.1b).

Nanoyapı katkılı ve katkısız DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş DCB bağlantılardan elde edilen  $P_{max}$  (N),  $\delta_t^c$  (mm),  $G_{IC}$ -N/mm (CBT) ve  $G_{IC}$ -N/mm (Standard Test Method-STM) veriler Çizelge 4.2’ de verilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, oda sıcaklığında DP460 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın maksimum yükünü yaklaşık % 9, Karbon Nanotüp-COOH ilave edilmesinde yaklaşık %16 ve Fulleren ilave edilmesinde ise yaklaşık % 38 artırmaktadır.

Nanoyapı katkısız DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında, bağlantın maksimum yükünü yaklaşık % 34 azaltmaktadır. Ancak yapıştırıcıya Fulleren ilave edildiğinde bağlantın maksimum yükünü azaltmayıp, yaklaşık % 7 artırmaktadır (Çizelge 4.2). Ayrıca corrected beam teorisine göre elde edilen kırılma enerji ile standart test metoduna göre elde edilen kırılma enerji verileri karşılaştırıldığında, standart test metoduna göre elde edilen kırılma enerji yaklaşık % 8-26 fazladır. Bunun sebebi standart test metodu deney esnasında yapıştırılan malzemenin kalınlığından dolayı malzemedeki minimum elastik dönme dikkate alınmamasıdır. Ancak deney esnasında yapıştırılan malzemedeki elastik dönme olduğu ve bu dönme miktarı iki malzeme arasındaki yer değiştirme ( $\delta$ ) değerini etkilemektedir. Bu yüzden corrected



beam teorisine göre elde edilen kırılma enerji verilerinin daha doğru sonucuna varılabilir.

**Çizelge 4.2. DP460 ile Üretilen DCB Bağlantıların Mekanik Özellikler**

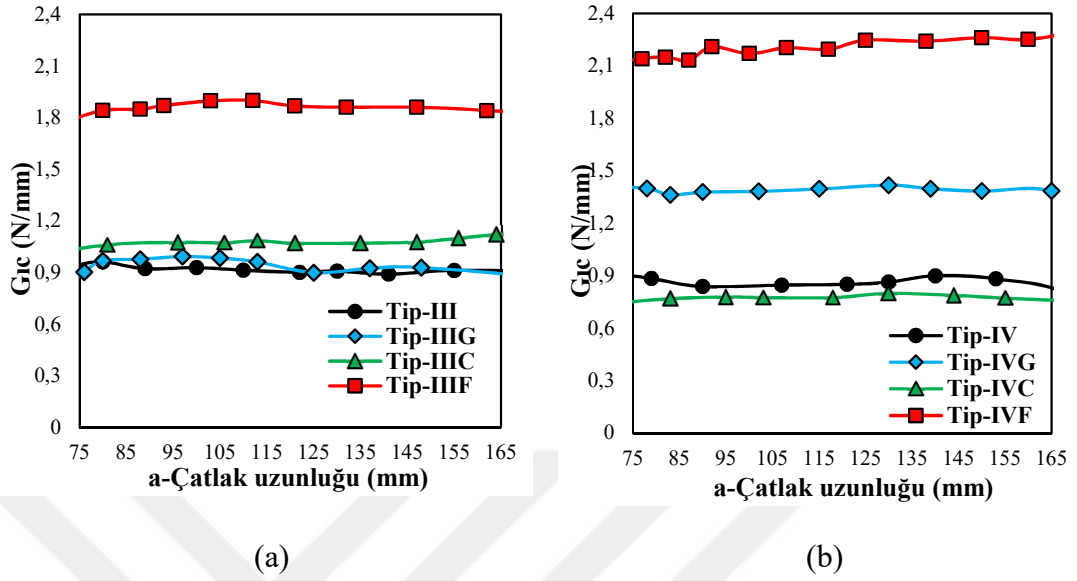
Numune Tip	P max (N)	$\delta_t^c$ (mm)	$G_{IC}$ -N/mm (CBT)	$G_{IC}$ -N/mm (STM)
Tip- I	2006	0.176	2.56	2.78
Tip-I G	2192	0.128	1.65	2.53
Tip- I C	2334	0.181	3.30	3.47
Tip- I F	2767	0.195	3.07	3.89
Tip- II	1494	0.133	1.21	1.34
Tip-II G	1997	0.141	2.18	2.32
Tip-II C	2380	0.167	2.65	2.98
Tip- II F	2965	0.229	4.44	4.79

Corrected beam teorisine göre ortam sıcaklığında elde edilen kırılma enerji verileri incelendiğinde, DP460 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 35 azaltırken, Karbon Nanotüp-COOH ilave edilmesinde yaklaşık %29 ve Fulleren ilave edilmesinde ise yaklaşık % 20 artırmaktadır. Nanoyapı katkısız DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında, bağlantın kırılma enerjisi yaklaşık % 52 azalırken, yapıştırıcıya Fulleren ilave edildiğinde bağlantın kırılma enerjisi yaklaşık % 44 artırmaktadır (Şekil 4.2).

Nanoyapı katkılı ve katkısız DP125 esnek yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantıların (Tip-III ve Tip-IV) kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrileri Şekil 4.2 verilmiştir. Bu eğriler denklem 3.1’de verilen corrected beam teorisine (CBT) göre elde edildi. Ayrıca Çizelge 4.3’ de ise bu yapıştırıcıya ait elde edilen mekanik özellikler verilmiştir.

Ortam sıcaklığında DP125 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 5 artırırken, Fulleren ilave edilesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 91 artırmaktadır (Şekil 4.2a ve Çizelge 4.3). Termal çevrime maruz kalan bağlantılarda ise (Şekil 4.2b), DP125 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 55 artırırken, Fulleren ilave edilesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 135 artırmaktadır (Çizelge 4.3). Ancak yapıştırıcıya Karbon

Nanotüp-COOH ilave edilmesi bağlantının kırılma enerjisini yaklaşık % 21 azaltmaktadır.



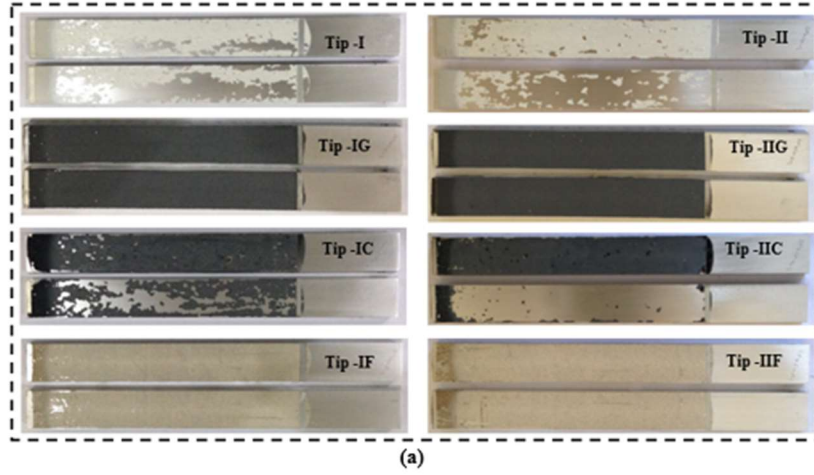
**Şekil 4.2.** DP125 Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş DCB Bağlantıların CBT'ye Göre Kırılma Enerjisi - Çatlak Uzunluğu Eğrileri a) Ortam Sıcaklığı, b) Termal Çevrim

Elde edilen deneysel verilere göre, nanoyapı katkısız yapıştırıcılarla elde edilen bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında bağlantının kırılma enerjisi azalırken, yapıştırıcıya %1 Grafen-COOH ve Fulleren ilave edilmesi bağlantının kırılma enerjisi artması önemli bir sonuçtur. (Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3).

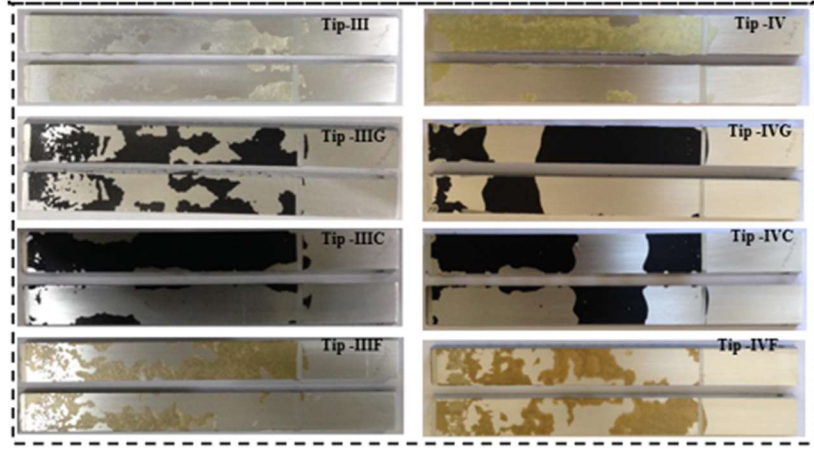
**Çizelge 4.3. DP125 ile Üretilen DCB Bağlantıların Mekanik Özellikler**

Numune Tip	$P_{max}$ (N).	$\delta_t^c$ (mm)	$G_{IC}$ -N/mm (CBT)	$G_{IC}$ -N/mm (STM)
Tip-III	1014	0.242	0.92	0.79
Tip-III G	1240	0.301	0.97	1.58
Tip-III C	1043	0.189	0.85	0.70
Tip-III F	1510	0.364	1.76	1.90
Tip-IV	1213	0.185	0.89	1.26
Tip-IV G	1396	0.341	1.38	1.54
Tip-IV C	921	0.140	0.70	0.63
Tip-IV F	1950	0.383	2.09	3.18

ISO 10365' de tanımlanan hasar tipleri göz önünde bulundurularak Tip-I, Tip-IC, Tip-II ve Tip-IIC bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, adhesiv hasar ve özel kohesiv hasar ( yapıştırılan malzelerin her birini yüzeyinde eşit miktarda yapıştırıcı kalmaması ) olduğu görülmektedir. Ancak Tip-IG, Tip-IF, Tip-IIG ve Tip-IIF bağlantı tiplerinde ise kohesiv ( yapıştırılan malzelerin her birini yüzeyinde eşit miktarda yapıştırıcı kalması) hasar tipinin meydana geldiği söylenebilir (Şekil 4.3a). Ayrıca DP125 yapıştırıcısı ile elde edilen tüm bağlantılarda, özel kohesiv hasar meydana gelmiştir (Şekil 4.3b).



(a)

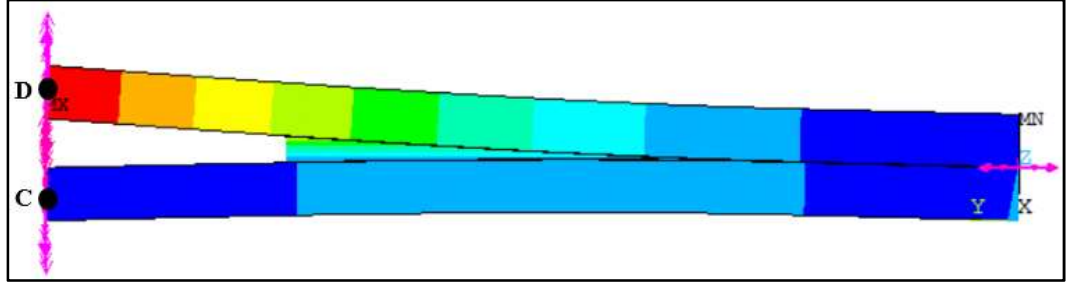


(b)

Şekil 4.3. Bu Çalışmada İncelenen Numunelerin Yüzey Hasarları a) DP460, b) DP125

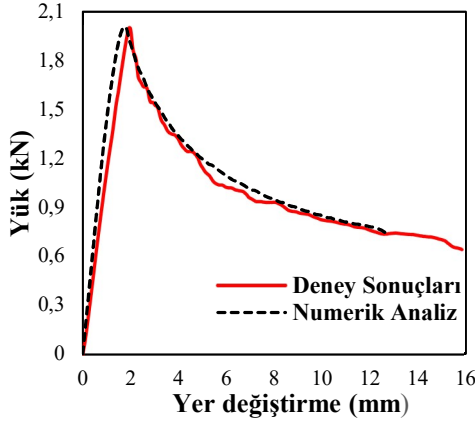
#### 4.2. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam-DCB) Bağlantı Numunelerinin Nümerik Analizi

Nümerik analiz ile deneysel sonuçların karşılaştırılması tüm bağlantı tipleri için yapıldı. Fakat çalışmada bu karşılaştırma Tip-I ve Tip-III bağlantı tipleri için verildi. Yapılan nümerik analizlerde; C noktası sabitlenip, D noktasından +z yönünde yerdeğiştirme verildi (Şekil 4.4).

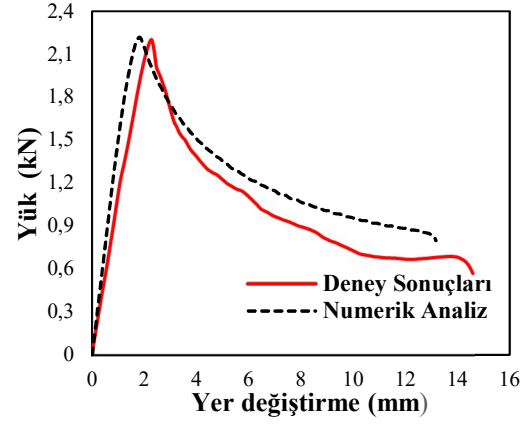


Şekil 4.4. DCB Bağlantılarının Sayısal Analizi

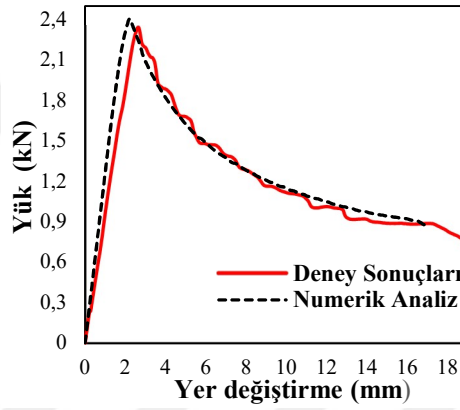
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilen deneysel ve nümerik analizlerin karşılaştırılmasında, DCB bağlantıların deneylerinde Şekil 3.5'de verilen A ve B noktalarından ekstensometre ile elde edilen yerdeğişirmeler kullanılarak kuvvetin uygulandığı yerdeki yerdeğişirmeler elde edildi ve bu değerler kullanıldı. Bunun sebebi cihazın malzemeyi tutan çene ile malzeme arasındaki kayma ve cihazın bağlantı yerlerindeki boşluk cihazın hareketinden elde edilen yerdeğişirmeleri değiştirmektedir. Böylece cihazın hareketinden elde edilen yerdeğişirme ile nümerik analizdeki yerdeğişirme arasında yaklaşık %20 lik bir fark (bağlantının yük taşıma kapasitesine göre bu oran değişebilir) oluşturmaktadır.



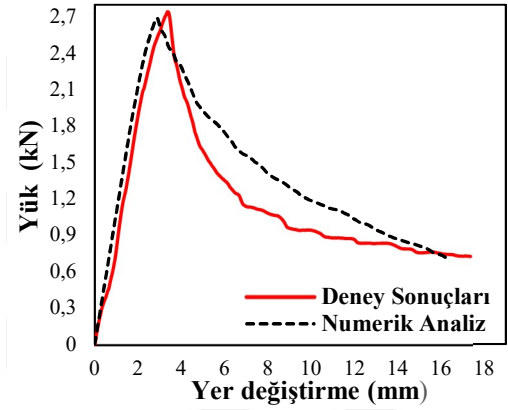
(a)



(b)



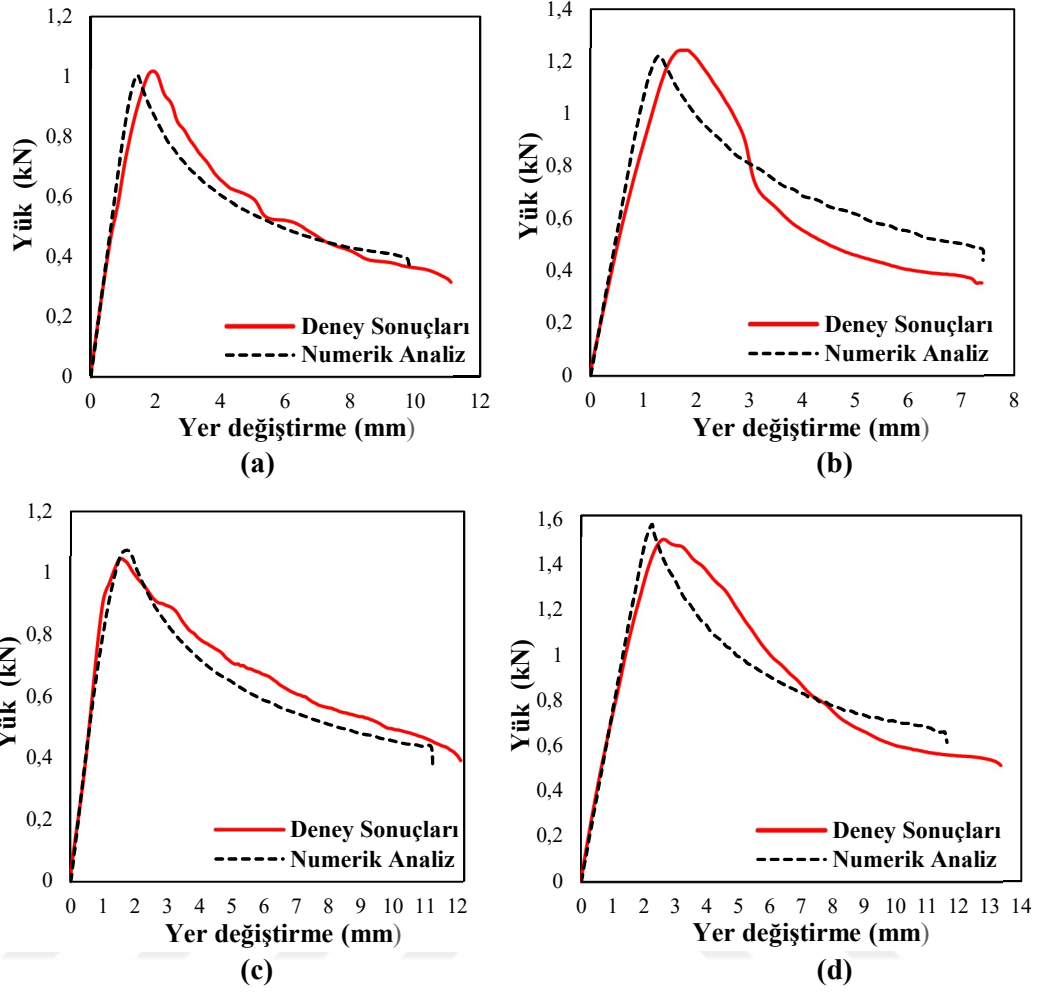
(c)



(d)

**Şekil 4.5.** Nümerik Analiz Sonuçları ve Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması a) Tip-I, b) Tip-IG, c) Tip-IC, d) Tip-IF

Nanoyapı katkısız bağlantıların deneylerinden elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri ile nümerik analizden elde edilen eğrilerin birbiriyle oldukça uyumu olduğu (yaklaşık % 98-99) Şekil 4.5a ve Şekil 4.6a'dan açıkça görülmektedir. Nanoyapı katkılı bağlantılarda ise bu uyum yaklaşık % 95 ile % 98 arasında olmaktadır (Şekil 4.5b, Şekil 4.5c, Şekil 4.5d, Şekil 4.6b, Şekil 4.6c, Şekil 4.6d). Sonuç olarak nümerik analizden elde edilen veriler, deneylerin doğruluğunu önemli derece ispatlamaktadır ve nümerik analizde Mode I Dominated Bilinear Cohesive Zone Model in kullanılması doğru bir yöntemdir.



Şekil 4.6. Nümerik Analiz Sonuçları ve Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması a) Tip-III, b) Tip-IIIG, c) Tip-IIIC, d) Tip-IIIF

### 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapıştırıcıya nanoyapı ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların çift konsol kiriş (double cantilever beam-DCB) testi ile kırılma davranışını belirlemeye yönelik deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada nanokompozit yapıştırıcıların kırılma davranışı hem ortam sıcaklığı hem de termal çevrim koşulları altında belirlenmiş olup, deneylerden ve nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Nanoyapı katkılı ve katkısız yapıştırıcılar ile birleştirilmiş double cantilever beam (DCB) bağlantılarında, yapıştırıcının kırılma enerjisi corrected beam teorisine (CBT) göre elde edildi. Elde edilen yapıştırıcının kırılma enerjisine karşılık çatlak uzunluğu eğrileri incelendiğinde; çatlağın yaklaşık 90 mm ilerlemesinde enerjinin hemen hemen sabit kalması, corrected beam teorisine kullanılan  $\Delta$  (çatlak ucu dönüşü ve sapması için çatlak uzunluğu düzeltmesi) değerinin doğru bulunmasıyla ilişkilidir. Bu durum deneysel verilerin doğruluğunun bir ispatıdır.
- Ayrıca corrected beam teorisine göre elde edilen kırılma enerji verileri ile standart test metoduna göre elde edilen kırılma enerji verileri birleriyle uyumlu olmayıp, standart test metoduna göre elde edilen kırılma enerjisi yaklaşık % 8-26 fazladır. Bunun sebebi standart test metodu deney esnasında yapıştırılan malzemenin kalınlığından dolayı malzemedeki minimum elastik dönme dikkate alınmadığıdır. Ancak deney esnasında yapıştırılan malzeme elastik dönme olduğu ve bu dönme miktarı iki malzeme arasındaki yer değiştirme ( $\delta$ ) değerini etkilemektedir. Bu yüzden corrected beam teorisine göre elde edilen kırılma enerji verilerinin daha doğru sonucuna varılabilir.
- Nanoyapı katkılı ve katkısız DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş DCB bağlantılardan elde edilen hasar yükü ( $P_{max}(N)$ ) verilerine göre, oda sıcaklığında DP460 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantının maksimum yükünü yaklaşık % 9, Karbon Nanotüp-COOH ilave edilmesinde yaklaşık %16 ve Fulleren ilave edilmesinde ise yaklaşık % 38 artırmaktadır.
- Nanoyapı katkısız DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında, bağlantının maksimum yükünü yaklaşık % 34 azaltmaktadır. Ancak yapıştırıcıya Fulleren ilave edildiğinde bağlantının



maksimum yükünü azaltmayıp, yaklaşık % 7 artırmaktadır.

- Corrected beam teorisine ile ortam sıcaklığında elde edilen kırılma enerji verilerine göre, DP460 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 35 azaltırken, Karbon Nanotüp-COOH ilave edilmesinde yaklaşık %29 ve Fulleren ilave edilmesinde ise yaklaşık % 20 artırmaktadır. Nanoyapı katkısız DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş DCB bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında, bağlantın kırılma enerjisi yaklaşık % 52 azalırken, yapıştırıcıya Fulleren ilave edildiğinde bağlantın kırılma enerjisi yaklaşık % 44 artırmaktadır.
- Esnek bir yapıştırıcı olan DP125 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantının ortam sıcaklığında kırılma enerjisini yaklaşık % 5 artırırken, Fulleren ilave edilesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 91 artırmaktadır.
- Termal çevrime maruz kalan bağlantılarda ise, DP125 yapıştırıcısına Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 55 artırırken, Fulleren ilave edilesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 135 artırmaktadır. Ancak yapıştırıcıya Karbon Nanotüp-COOH ilave edilmesi bağlantın kırılma enerjisini yaklaşık % 21 azaltmaktadır.
- Elde edilen deneysel verilere göre, DP460 tok bir yapıştırıcı ile elde edilen bağlantılar termal çevrime maruz kaldığında bağlantının kırılma enerjisi azalırken, DP125 flexible yapıştırıcı ile elde edilen bağlantının kırılma enerjisi artması önemli bir sonuçtur.
- Tip-I, Tip-IC, Tip-II ve Tip-IIC bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, özel kohesiv hasar tipinin meydana geldiği söylenebilir. Ancak Tip-IG, Tip-IF, Tip-IIG ve Tip-IIF bağlantı tiplerinde ise kohesiv hasar tipinin meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca DP125 (Tip-III ve IV) yapıştırıcısı ile elde edilen tüm bağlantılarda, özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.
- Deneysel ve nümerik analizlerin karşılaştırılmasında, DCB bağlantıların deneylerinde video ekstensometre ile elde edilen yerdeğiştirmeler kullanıldı. Çünkü cihazın malzemeyi tutan çene ile malzeme arasındaki kayma ve cihazın bağlantı yerlerindeki boşluk cihazın hareketinden elde edilen yerdeğiştirmeleri değiştirmektedir. Böylece cihazın hareketinden elde edilen yerdeğiştirme ile nümerik analizdeki yerdeğiştirme arasında yaklaşık %20 lik bir fark (bağlantının

yük taşıma kapasitesine göre bu oran değişebilir) oluşturmaktadır.

- Nanoyapı katkısız bağlantıların deneylerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri ile nümerik analizden elde edilen eğrilerin birbiriyle oldukça uyumu olduğu (yaklaşık % 98-99) görülmektedir. Nanoyapı katkılı bağlantılarda ise bu uyum yaklaşık % 95 ile % 98 arasında olmaktadır. Sonuç olarak nümerik analizden elde edilen veriler, deneylerin doğruluğunu önemli derece ispatlamaktadır ve nümerik analizde Mode I Dominated Bilinear Cohesive Zone Model in kullanılması doğru bir yöntemdir.



## KAYNAKLAR

- ASTM 3433-99, 2012. “Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints”, West Conshohocken, PA: ASTM International
- Silva Neto, A., Cruz, D. T. L. D., & Ávila, A. F., 2013. Nano-modified adhesive by graphene: the single lap-joint case. *Materials Research*, 16(3), pp.592-596.
- Acar, V., 2013. “Karbon iplik dolgulu termoset film kompozitlerde arayüzey çalışmaları”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Akpınar, S., 2008. “Kaymaya maruz yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akpınar, S., 2012. “Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-bağlantılarda üç boyutlu gerilme analizi”, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Akpınar, I. A., Gültekin, K., Akpınar, S., Akbulut, H., & Ozel, A. (2017). Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures. *Composites Part B: Engineering*, 110, 420-428.
- ANSYS, 2014. “The General Purpose Finite Element Software (Version 14.0)”, Swanson Analysis Systems, Texas, Inc., Houston.
- Banea, M. D., Da Silva, L. F. M., & Campilho, R. D. S. G., 2015. The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive. *The Journal of Adhesion*, 91(5), pp. 331-346.
- Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Sanchez, F. R., Teo, W. S., & Williams, J. G., 2009. The fracture behaviour of structural adhesives under high rates of testing. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(18), pp. 2868-2889.
- BS7991, B. S., 2001. Determination of the mode I adhesive fracture energy GIC of structure adhesives using the double cantilever beam (DCB) and tapered double cantilever beam (TDCB) specimens. British Standard Institution, London, Great Britain.
- Burkholder, G. L., 2009. The effects of carbon nanotube reinforcement on adhesive joints for naval applications (Doctoral dissertation, Monterey, California. Naval Postgraduate School).
- Campilho, R. D., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P., & da Silva, L. F., 2013. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44, pp. 48-56.
- Çıracı, S., 2005. Metrenin Milyarda Birinde Bilim ve Teknoloji. Türkiye’de Nanotek.
- Evcin, A., 2012. “Nanomalzemeler Ders Notları”, Afyon Kocatepe Üniversitesi, <http://www2.aku.edu.tr/~evcin/nano.htm/>. Erişim Tarihi: 03.03.2018.
- Gilbert, E. N., Hayes, B. S., & Seferis, J. C., 2003. Nano-alumina modified epoxy based film adhesives. *Polymer Engineering & Science*, 43(5), pp. 1096-1104.
- Gkikas, G., Sioulas, D., Lekatou, A., Barkoula, N. M., & Paipetis, A. S., 2012. Enhanced bonded aircraft repair using nano-modified adhesives. *Materials & Design*, 41, pp. 394-402.

- Griffith, A. A., & Eng, M., 1921. VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 221(582-593), pp. 163-198.
- Guo-Fei, C., liao, Y., Zhang, X. H., & Chen, J. H., 2011. Preparation and characterization of peasecod-based activated carbons as electrode materials for electrochemical double-layer capacitors. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 27(7), pp.1679-1684.
- Gürmen, S., Ebin, B., & İTÜ, M., 2008. Nanopartiküller ve üretim yöntemleri-1. *Metalurji Dergisi*, 150, 31-38.
- Hsiao, K. T., Alms, J., & Advani, S. G., 2003. Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites. *Nanotechnology*, 14(7), 791.
- Humfeld Jr, G., & Dillard, D. A., 1998. Residual stress development in adhesive joints subjected to thermal cycling. *The Journal of adhesion*, 65(1-4), pp.277-306.
- Irwin, G. R., Tada, H., Paris, P. C., 2016. “The Stress Analysis of Cracks Handbook”, The American Society of Mechanical Engineers Three park Avenue, New York.
- Jiang, H., Liu, B., Huang, Y., & Hwang, K. C., 2004. Thermal expansion of single wall carbon nanotubes. *Journal of engineering materials and technology*, 126(3), pp. 265-270.
- Jumbo, F., Ruiz, P. D., Yu, Y., Swallowe, G. M., Ashcroft, I. A., & Huntley, J. M., 2007. Experimental and numerical investigation of mechanical and thermal residual strains in adhesively bonded joints. *Strain*, 43(4), pp. 319-331.
- Khoshravan, M., & 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, pp. 8-14.
- Kim, J., Yim, B. S., Kim, J. M., & Kim, J., 2012. The effects of functionalized graphene nanosheets on the thermal and mechanical properties of epoxy composites for anisotropic conductive adhesives (ACAs). *Microelectronics Reliability*, 52(3), pp. 595-602.
- Kinloch, A. J., Lee, J. H., Taylor, A. C., Sprenger, S., Eger, C., & Egan, D., 2003. Toughening structural adhesives via nano-and micro-phase inclusions. *The Journal of Adhesion*, 79(8-9), pp. 867-873.
- Kinloch, A.J., 1987. “Adhesion and Adhesive Science and Technology”, Chapman and Hall, First Edition.
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'brien, S. C., Curl, R. F., & Smalley, R. E. C., 1985. This Week's Citation Classic®. *Nature*, 318, pp. 162-3.
- Kuo, C. Y., Wu, C. H., & Wu, J. Y., 2008. Adsorption of direct dyes from aqueous solutions by carbon nanotubes: determination of equilibrium, kinetics and thermodynamics parameters. *Journal of Colloid and Interface Science*, 327(2), pp. 308-315.
- Kwon, Y.K., Berber, S., Tomanek, D., 2004. “Thermal Contraction Of Carbon Fullerenes and Nanotubes”, *Physical Rewiev Letters*, vol.92, no.2.
- Lee, D.,G., Kim, K.,J., Che, D., H., 1999. “Effects Of Adhesive Fillers On The Strength Of Tubular Single Lap Adhesive Joints”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol.13, no.11, pp. 1343-1360.

- Lee, J., H., Choi H., K., Kim S., S., Cho J., G., Zhao G., Cho C., Hui D., 2016. "A Study On Fatigue Fracture At Double And Tapered Cantilever Beam Specimens Bonded With Aluminum Forms", *Compos Part B* vol. 98, pp. 103-145.
- Liverni, T., 2006. "Controlled Synthesis of Nanoparticles in Microheterogeneous Systems", pp.168.
- Lopes, R. M., Campilho, R. D. S. G., da Silva, F. J. G., & Faneco, T. M. S., 2016. Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, pp.103-111.
- May, M., Wang, H. M., & 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), pp.505-512.
- Miller, S. G., Heimann, P., Scheiman, D., Adamson, D. H., Aksay, I. A., & Prud'homme, R. K., 2006. Interfacial Strength and Physical Properties of Functionalized Graphene-Epoxy Nanocomposites. In *Global Advances in Materials and Process Engineering: Sampe Fall Technical Conference*, XP-002657665.
- Park, S. W., Kim, B. C., & Lee, D. G., 2009. Tensile strength of joints bonded with a nanoparticle-reinforced adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(1), pp.95-113.
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z., & Koratkar, N., 2009. Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS nano*, 3(12), 3884-3890.
- Ramsden, J.J., 2005. "What is nanotechnology?", *Nanotechnology Perceptions*, 1, 3-17. <http://www.colbas.org/ntp/opnAxs/N03RA05.pdf>/ Erşim Tarihi: 05.03.2018
- Ribeiro, T. E. A., Campilho, R. D. S. G., Da Silva, L. F. M., & Goglio, L., 2016. Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints. *Composite Structures*, 136, pp.25-33.
- Robaidi, A. A., Anagreh, N., Massadeh, S., & Essa, A. M. A., 2011. The effect of different surface pretreatment methods on nano-adhesive application in high strength steel and aluminum bonding. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(14), pp.1725-1746.
- Sihn, S., Ganguli, S., Roy, A. K., Qu, L., & Dai, L., 2008. Enhancement of through-thickness thermal conductivity in adhesively bonded joints using aligned carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 68(3-4), pp.658-665.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S. I., & Seal, S., 2011. Graphene based materials: past, present and future. *Progress in materials science*, 56(8), pp.1178-1271.
- Temiz, Ş., 2003. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Vinson, J. R., 1989. Adhesive bonding of polymer composites. *Polymer Engineering & Science*, 29(19), pp.1325-1331.
- Wolf, A., Buchman, A., Eitan, A., Fine, T., Nevo, Y., Heyman, A., & Shoseyov, O., 2012.

- Improved adhesives containing CNT/SP1 nano fillers. *The Journal of Adhesion*, 88(4-6), pp.435-451.
- Wong, C. P., & Bollampally, R. S., 1999. Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 74(14), pp.3396-3403.
- Yetim, A., 2011. "Karbon Nano Tüpler", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yoon, D., Son, Y. W., & Cheong, H., 2011. Negative thermal expansion coefficient of graphene measured by Raman spectroscopy. *Nano letters*, 11(8), pp.3227-3231.
- Zhai, L. L., Ling, G. P., & Wang, Y. W., 2008. Effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on adhesion strength of epoxy adhesive and steel. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(1-2), pp.23-28.
- Zhai, L., Ling, G., Li, J., & Wang, Y., 2006. The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive. *Materials letters*, 60(25-26), pp.3031-3033.

# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Belin KANAR  
Uyruğu : T.C  
Doğum Tarihi ve Yeri : 04.10.1994  
Medeni Hali : Bekar  
Telefon : +90 505 108 5574  
e-mail : belin\_kanar@hotmail.com

## Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	.....
Lisans	Bayburt Üniversitesi	2016
Lise	Göle Anadolu Lisesi	2012

## Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

## Yayınlar (SCI, SCI-Expanded) (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)\*

## Hakemli Dergiler (Yayın yılları dikkate alınmalıdır)

## Ulusal Kongre Sunum (Sunum tarihleri dikkate alınmalıdır)

## Uluslararası Kongre Sunum

Akpınar I. A., Akpınar S., **Kanar B.**, Akbulut H. and Özel A., The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cycle conditions., ICCS20-2017, 4-7 Semptember, Paris, France.



**EKLER**





**Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France**

**4-7 September 2017**

## **PROCEEDINGS**

### **CONFERENCE CHAIRS**

Antonio J.M. Ferreira, University of Porto, Portugal

Walid Larbi, CNAM, Paris, France

Jean-François Deu, CNAM, Paris, France

Francesco Tornabene, University of Bologna, Italy

Nicholas Fantuzzi, University of Bologna, Italy

### **LOCAL ORGANIZING COMMITTEE**

Michele Baccocchi, University of Bologna, Italy



## STRUCTURAL AND COMPUTATIONAL MECHANICS BOOK SERIES

ISSN 2421-2822

ISBN 978-889-385-041-4

DOI 10.15651/978-88-938-5041-4

*Editor in chief:*

FRANCESCO TORNABENE – University of Bologna, Italy

*Scientific Committee:*

ERASMO VIOLA, University of Bologna, Italy

FRANCESCO UBERTINI, University of Bologna, Italy

JUNUTHULA N. REDDY, Texas A&M University, USA

ROMESH C. BATRA, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

ANTONIO J.M. FERREIRA, University of Porto, Portugal

LORENZO DOZIO, Polytechnic of Milan, Italy

GIORGIO ZAVARISE, University of Salento, Italy

STEFANO LENCI, Polytechnic University of Marche, Italy

ROBERTO NASCIMBENE, Eucentre, Italy

SALVATORE BRISCHETTO, Polytechnic of Turin, Italy

ROSSANA DIMITRI, University of Salento, Italy

*Chief assistant:*

NICHOLAS FANTUZZI, University of Bologna, Italy

MICHELE BACCIOCCHI, University of Bologna, Italy

*First edition:* August 2017

*Publishing Manager:* Alessandro Parenti

*Editorial Staff:* Giancarla Panigali, Laura Tondelli

The reader can photocopy this publication for his personal purpose within the limit of 15% of the total pages and after the payment to SIAE of the amount foreseen in the art. 68, commas 4 and 5, L. 22 April 1941, n. 663. For purposes other than personal, this publication may be reproduced in return for payment within the limit of 15% of the total pages with the prior and compulsory permission of the publisher.

CLEARedi - Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali  
Corso di Porta Romana, n. 108 - 20122 Milano  
e-mail: [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org) - sito: <http://www.clearedi.org>.



40131 Bologna - Via U. Terracini 30 - Tel. 051-63.40.113 - Fax 051-63.41.136  
[www.editrice-esculapio.it](http://www.editrice-esculapio.it)

416   Methods for determining the plastic work in bending and impact of selected factors on its value	94
171   The coefficient of bendability of composite material based on winter rapeseed as a function of selected factors.....	95
172   The elasticity of composite material based on winter rapeseed as a function of selected factors..	95
173   The plasticity of composite material based on winter rapeseed as a function of selected factors .	95
364   A static approach for handling resonance-type fatigue testing of a wind turbine blade .....	96
125   Properties of poly (hydroxybutyrate-co-valerate) composites reinforced with alfa fiber and its cellulose .....	96
299   One shot sandwich composite structure by liquid resin infusion, influence of manufacturing process parameters on low velocity impact .....	96
430   Numerical study on the effect of bolts used for retrofitting RC beam through external plating at soffit.....	97
431   Experimental strip tests to show anisotropy in eye cornea – Biomechanical behaviour.....	97
353   Effects of ballistic impact damage on mechanical performance of composite honeycomb sandwich panels .....	98
596   Ply thickness effect on a laminate composite behavior .....	98
318   Transverse mechanical stress and optical birefringence induced into single-mode optical fibre embedded in polymer.....	99
320   Analysis of mechanical vibrations applied on a LPGFS smart composite material .....	100
181   Numerical modelling of UHMWPE under high-velocity impacts.....	100
166   Analytical estimates of the effective elastic characteristics of random composites with incompressible components.....	101
250   The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cycle conditions .....	101
162   Extension and reduction of Donnell-Vlasov shell theory to hybrid anisotropic materials.....	101
60   Gradient elasticity theory enrichment of plate bending theories.....	102
103   Designing the hybrid pantograph and mechanical* performance evaluation using FE analysis ...	102
98   Formability evaluation for a composite structure with ribs made of long chopped carbon fiber reinforced sheet.....	102
59   Bond characteristics of corroded steel members strengthened with carbon fiber reinforced polymer .....	103
31   Flexural performance of heavily cracked concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymers .....	103
57   Optimization of automobile composite hood structure based on finite element analysis with an equivalent static load method for enhanced performance considering pedestrian safety .....	103
58   Finite element analysis of glass fiber reinforced polypropylene composite automobile components considering strain rate effect from quasi-static to 1000-s .....	104
53   A study on the formability and mechanical properties in self-reinforced woven polypropylene composites by its shear deformation.....	104
70   Compared effective properties of various composite structures comprising off-axially oriented long or flat spheroidal inhomogeneities in a transversally isotropic matrix .....	105
27   Tolerance modelling of vibrations of medium thickness functionally graded plates.....	105
26   Modelling of strain-rate sensitivity of composite materials by a fractional derivative approach ..	106
63   Numerical simulation and wind tunnel test for ground radome under wind load.....	107
<b>COMPOSITE STRUCTURES IN CIVIL ENGINEERING .....</b>	<b>107</b>
897   Feasibility study of using Shape Memory Alloy plates in steel frame connections for lateral load carrying capacity.....	107
916   Performance enhancement of concentrically braced frames using shape memory alloy .....	108
866   Comparison of steel-concrete composite column and steel column .....	108
475   A new biaxial tensile shear test method for coated fabrics for architectural use .....	108
417   The effect of perforated and straight steel plates usage for flexural strengthening of RC beams	109
418   Flexural strengthening of deficient reinforced concrete beams by using Ultra High Performance Concrete (UHPC).....	109
888   Durability performances of carbon fiber reinforced polymer composites in harsh environments	109

**166 | Analytical estimates of the effective elastic characteristics of random composites with incompressible components**

*Marcin Kamiński (Marcin.Kaminski@p.lodz.pl, Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Poland)*

The main issue studied in this work is determination of the effective elasticity tensor components for the particle-reinforced or particle-filled composites when one of the constituents is rubber-like (incompressible) material. Analytical upper and lower bounds by Hashin and Shtrikman together with the direct estimates invented by Christensen are used for this purpose. Composites under consideration exhibit additionally some Gaussian randomness in terms of material characteristics and some geometrical parameters. Their influence on probabilistic moments and characteristics of the homogenized tensor is evaluated with the use of triple stochastic approach – by using statistical (Monte-Carlo) simulation, by the stochastic iterative perturbation technique and, finally, with the use of semi-analytical integral calculus. They are all implemented in the computer algebra system MAPLE® so that some analytical probabilistic formulas for these tensors are available; numerical probabilistic integration is conducted using the so-called three-sigma rule. Stochastic analysis is performed to verify whether the output effective tensors are Gaussian as it was partially demonstrated with the Stochastic Finite Element Method studies. A verification of this hypothesis enables for further computations and discussion of Tsallis entropies of effective characteristics as a measure of statistical disorder induced by homogenization process of random composites. Further application of this methodology may be considered in reliability and durability analysis of composites under stochastic ageing processes and may be particularly addressed to elastomeric materials.

**250 | The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cycle conditions**

*Iclal Avinc Akpınar (Independent Researcher, Turkey)*

*Salih Akpınar (salih.akpinar@erzurum.edu.tr, Erzurum Technical University, Turkey)*

*Belin Kanar (Erzurum Technical University, Turkey)*

*Hamit Akbulut (Ataturk University, Turkey)*

*Adnan Ozel (Erzincan University, Turkey)*

Due to their great advantages, adhesively bonded joints are frequently used in many areas like automotive, marine, space and aerospace industries. Especially findings from nanoscience and nanotechnology, which have progressed significantly in recent years, influence adhesives sciences significantly as well as other disciplines. In order to perform analysis of joints bonded with nanostructure added adhesives using Cohesive Zone Model (CZM), the CZM parameters of the adhesive must be determined experimentally. In this study, the fracture behavior of nanocomposite adhesives produced by adding nanostructure in to the adhesives were investigated using Double Cantilever Beam (DCB) test under ambient temperature and thermal cycle conditions. Adhesively bonded DCB joints were produced using DP460 toughened adhesive type and DP125 flexible adhesive type as the adhesives; AA2024-T3 aluminum alloy was used as the adherend, and 1 wt.% Graphene-COOH, Carbon Nanotube-COOH and Fullerene C60 were used as the added nanostructures. In the experiments while the crack growth is measured by using a high-speed video (HSV) camera, the displacements were measured by extensometer. As a result, when the experimental fracture energy was examined, the nanocomposite adhesives obtained by adding nanostructure were found to have increased the fracture energy of the joint. However, increase rate in the fracture energy changes depending on the structural features of the adhesive and the type of nanostructure. Also, it was observed that there is a significant difference between the displacements that were obtained directly from the test machines stroke and measured via video extensometer giving the crack opening between the top and bottom adherends during the DCB test. This situation significantly effects the correct calculation of the fracture energy of adhesive.

Keywords: Nanocomposites, Adhesive joints, Fracture mechanics, Numerical modelling, Double cantilever beam test

Acknowledgements: This study was financially supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey-TUBITAK through the Project no. 114M408.

**162 | Extension and reduction of Donnell-Vlasov shell theory to hybrid anisotropic materials**

*Chung, S.W. (samuelchung00@gmail.com, University of Utah, USA)*

*Hong, S.G. (Seoul National University, South Korea)*

The laminated circular cylindrical shells are complicated to analyze and more complicated when anisotropic materials are used with different thickness and different material properties. Also, computing the critical stresses under various boundary and loading conditions is exceptionally sensitive and therefore reasonable simplification of the governing equation is in demand for practical design purpose. This article first formulated a shell theory for