

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKANİK ALIN BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARIN ÜÇ  
NOKTA EĞİLME TESTLERİ İLE MEKANİK DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Furkan BAŞBUĞ**

**Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği**

**Programı : Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gürkan ALTAN**

**ARALIK 2012**

## YÜKSEK LİSANS ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 101111001 nolu öğrencisi Furkan Başbuğ tarafından hazırlanan "MEKANİK ALIN BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARIN ÜÇ NOKTA EĞİLME TESTLERİ İLE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans / Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gürkan ALTAN (PAÜ MÜH.)  
(Jüri Başkanı)

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU (PAÜ MÜH.)

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Gökmen ATLIHAN (PAÜ TEK.)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09.01.2013 tarih ve ...01.07... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü  
Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza

:

Öğrenci Adı Soyadı : Furkan Başbuğ

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde ve tamamlanmasında bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Gürkan ALTAN' a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her zaman yanımda olduğunu bildiğim ve hissettiğim sayın hocam Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU' ya teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başlamamda en büyük katkısı olan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında bana sürekli destek olan ve yardım eden değerli kardeşim Mak. Yük. Müh. Halil Murat ENGİNSOY' a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında her türlü katkısı için arkadaşım Araş. Gör. İnan AĞIR' a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarında her türlü katkısı için arkadaşım Araş. Gör. Erkin Akdoğan' a çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının maddi olarak desteklenmesini 110M250 nolu proje kapsamında sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na çok teşekkür ederim.

Beni şu andaki konumuma getiren, maddi ve manevi destek olan değerli annem, babam ve abime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2012

Furkan BAŞBUĞ  
(Makine Mühendisi)

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>	<b>3</b>
2.1 Mekanik Birleştirme ile İlgili Çalışmalar .....	3
2.2 Yapıştırarak Birleştirme ile İlgili Çalışmalar.....	4
2.3 Üç Nokta Eğilme ve Dört Nokta Eğilme ile İlgili Çalışmalar .....	7
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER.....</b>	<b>22</b>
3.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları .....	22
3.2 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları.....	23
3.3 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	23
3.4 Kompozit Malzemenin Üretimi .....	27
<b>4. KOMPOZİT MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....</b>	<b>29</b>
4.1 Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	31
4.2 Deney Cihazının Tanıtımı.....	34
4.2.1 8801 Servo hidrolik test cihazı.....	34
4.2.2 Üç nokta eğilme test aparatı.....	35
4.2.3 Video ekstensometre.....	36
<b>5. ÜÇ NOKTA EĞİLME TEORİSİ.....</b>	<b>38</b>
5.1 İzotropik Malzemelerde Üç Nokta Eğilme Durumu .....	38
5.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Üç Nokta Eğilme Durumu .....	39
<b>6. ÜÇ NOKTA EĞİLME YÜKÜ ALTINDA BİRLEŞTİRME ELEMANININ OPTİMİZASYONU .....</b>	<b>43</b>
6.1 Birleştirme Elemanının Deneysel Optimizasyonu .....	44
6.2 Birleştirme Elemanının Nümerik Optimizasyonu.....	50
6.2.1 Nümerik çözüm adımları .....	50
6.2.1.1 Parça oluşturma .....	50
6.2.1.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması .....	52
6.2.1.3 Kesit özelliklerini tanımlama ve parça atama .....	53
6.2.1.4 Modele ait bileşenlerin montajlanması .....	54
6.2.1.5 Çözüm adımının tanımlanması .....	55
6.2.1.6 Sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması .....	55
6.2.1.7 Parçaların birbirleriyle etkileşiminin sağlanması .....	56
6.2.1.8 Modelin çözüm ağının oluşturulması .....	56
6.2.1.9 Analiz adımlarının birleştirilerek bir iş yaratılması ve çözüme verilmesi .....	57
6.2.1.10 Elde edilen sonuçların görüntülenmesi .....	57
6.2.2 Birleştirme elemanının sonlu elemanlar metodu ile gerilme dağılımlarının bulunması.....	58
6.3 Hasar Analizi.....	69
6.3.1 Hashin hasar teorisi .....	72
6.3.2 Hashin hasar kriteri ile hasar tahmini .....	73
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>76</b>

7.1 Sonuçlar .....	76
7.2 neriler .....	77
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>78</b>

## **KISALTMALAR**

<b>ASTM</b>	: Amerikan test ve malzeme topluluğu
<b>FRP</b>	: Fiber takviyeli plastic
<b>FEM</b>	: Sonlu elemanlar metodu
<b>FE</b>	: Sonlu eleman
<b>GFRP</b>	: Cam fiber takviyeli polimer
<b>CFRP</b>	: Karbon fiber takviyeli polimer
<b>FGSF</b>	: Fonksiyonel derecelendirilmiş sentetik köpükler
<b>CCD</b>	: Birleştirilmiş şarj aleti

## TABLO LİSTESİ

### Tablolar

4.1 : Cam-elyaf-epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	34
4.2 : Video ekstensometrenin teknik özellikleri.....	37
6.1 : Örnek model uygulaması için ölçüm boyutlarının alındığı tablo.....	44
6.2 : Bağlantı kilidi ve numune için malzeme özellikleri .....	52
6.3 : Destekler için malzeme özellikleri .....	52
6.4 : Hashin Hasarı için gerekli mekanik değerler .....	52
6.5 : Tabakada oluşan ilk hasar yükleri.....	74
6.6 : Kilit bağlantı elemanında oluşan maksimum hasar ve dış yüzeyindeki hasar değerleri.....	74



## ŞEKİL LİSTESİ

### Şekiller

3.1 : Elle yatırma yöntemi.....	24
3.2 : Elyaf sarma yöntemi .....	25
3.3 : reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi .....	25
3.4 : Püskürtme yöntemi .....	26
3.5 : Otoklav yöntemi (Chawla, 1987) .....	26
3.6 : Hazır kalıplama yöntem .....	27
3.7 : Üretim presi .....	28
3.8 : Üretilen kompozit plakalar .....	28
3.9 : Su jeti ile numune kesimi .....	28
4.1 : Mekanik özelliklerin tespiti için gerekli olan numuneler .....	30
4.2 : Video ekstansometre ile deneyin yapılışı.....	31
4.3 : $[0]_6$ çekme numunesi.....	31
4.4 : $[90]_6$ çekme numunesi.....	32
4.5 : $[0]_{16}$ basma numunesi .....	32
4.6 : $[90]_{16}$ basma numunesi.....	32
4.7 : $[45]_6$ kayma numunesi .....	32
4.8 : İosipescu yükleme aparatı ve numune boyutları .....	33
4.9 : 8801 Instron statik/dinamik test cihazı .....	34
4.10 : Yapım aşamasındaki üç nokta eğilme test aparatı.....	36
4.11 : Üç nokta eğilme test aparatının Instron hidrolik test cihazına bağlanmış durumu.....	36
4.12 : Video ekstansometre .....	37
5.1 : Üç Noktadan Eğme Moment Diyagramı .....	38
5.2 : Ortasından tekil yüke maruz basit giriş.....	39
6.1 : Sonlu Elemanlar Metodu ile analizi yapılacak I profilli alın birleştirilmiş numuneye ait modelin şematik görünümü .....	43
6.2 : Eğilme düzeni .....	44
6.3 : Bağlantı yüksekliğinin farklı $h/2w$ oranı için bağlantı yüklerinin $z/b$ oranlarındaki değişimi.....	46
6.4 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik $h/2w$ oranlarındaki yük değişimleri ve hasar şekilleri .....	47
6.5 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w=0,5$ oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi.....	48
6.6 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w=0,5$ oranı için bağlantı elemanlarının hasar durumları .....	49
6.7 : Tasarımı yapılan bağlantı kilidinin üç boyutlu model görünümü .....	51
6.8 : Tasarımı yapılan birleştirme numunesi üç boyutlu model görünümü .....	51
6.9 : Tasarımı yapılan desteğin üç boyutlu model görünümü .....	51
6.10 : Oryantasyon yönleri ve malzeme özelliklerinin atandığı composite layup ekranı .....	53

<b>6.11</b> : Bağlantı Kilidi Üzerine Kesitin Atanması .....	53
<b>6.12</b> : Birleştirme Numunesi Üzerine Kesitin Atanması .....	54
<b>6.13</b> : Destek Üzerine Kesitin Atanması.....	54
<b>6.14</b> : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde birleştirilmesi.....	55
<b>6.15</b> : Modelin sabitlenmesi ve eğilme yükünün uygulanması.....	55
<b>6.16</b> : Model bileşenlerinin arasında temas tanımlaması gerçekleştirilmesi.....	56
<b>6.17</b> : Modelin uygun çözüm ağı oluşturulması.....	57
<b>6.18</b> : Modelin çözüme verilmesi.....	57
<b>6.19</b> : Modelin gerilme dağılımı görseli ve gerilme dağılımı sonuçları .....	58
<b>6.20</b> : Modelin Hashin hasar teorisine göre matris bası hasar gerilme dağılım görseli ve gerilme dağılımı sonuçları .....	58
<b>6.21</b> : Gerilme dağılımlarının incelendiği Yol 1 ve Yol 2. ....	59
<b>6.22</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,3$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları.....	60
<b>6.23</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,3$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.....	62
<b>6.24</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,4$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları.....	63
<b>6.25</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,4$ mm geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.....	64
<b>6.26</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,5$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları.....	65
<b>6.27</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,5$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.....	66
<b>6.28</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,6$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları.....	67
<b>6.29</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,6$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.....	68
<b>6.30</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranının gerilme dağılımı.....	68
<b>6.31</b> : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometri parametrelerine göre değişik z/b oranının gerilme dağılımı gösterimi.....	69
<b>6.32</b> : $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$ oranına göre oluşturulan birleştirmeye ait hasar kuvvetlerinin Hashin Hasar Teorisi kullanılarak Abaqus yazılımı analizleri.....	73
<b>6.33</b> : $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$ oranındaki birleştirmeye ait $50 \text{ N/mm}^3$ kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak Abaqus yazılımı analizleri.....	75

## SEMBOL LİSTESİ

$b$	Kilit uç genişliği (mm)
$h$	Kilit uzunluğu (mm)
$z$	Kilit et kalınlığı (mm)
$W$	Numune genişliği (mm)
$y$	Sehim (mm)
$M$	Moment (Nmm)
$F$	Kuvvet (N)
$E_1$	Elastisite modülü (GPa)
$I$	Kesitin atalet momenti (mm <sup>4</sup> )
$L$	Kilit uzunluğu (mm)
$C$	Nötral eksen den kesitin en uç noktasının mesafesi (mm)
$S$	Kayma mukavemeti (MPa)
$\sigma_1$	1 doğrultusunda (fiber doğrultusu) uygulanan gerilme
$\sigma_2$	2 doğrultusunda (fibere dik doğrultu) uygulanan gerilme
$X_\zeta$	Fiber doğrultusundaki çeki mukavemeti
$X_b$	Fiber doğrultusundaki bası mukavemeti
$Y_\zeta$	Fibere dik doğrultudaki çeki mukavemeti
$Y_b$	Fibere dik doğrultudaki bası mukavemeti
$\varepsilon_{x,\zeta}$	Fiber doğrultusunda maksimum çeki şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{x,b}$	Fiber doğrultusunda maksimum bası şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{y,\zeta}$	Fibere dik doğrultuda maksimum çeki şekil değiştirmesi
$\varepsilon_{y,b}$	Fibere dik doğrultuda maksimum bası şekil değiştirmesi
$\gamma_s$	Maksimum kayma şekil değiştirme
$V_f$	Fiber hacim oranı
$V_m$	Matris hacim oranı
$m_T$	Toplam kompozit plaka ağırlığı
$m_f$	Fiber ağırlığı
$\nu_{12}$	Poisson oranı
$G_{12}$	Kayma modülü (MPa)

## ÖZET

### MEKANİK ALIN BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARIN ÜÇ NOKTA EĞİLME TESTLERİ İLE MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Bu çalışmada, farklı geometrilerdeki I profilli birleştirme elemanının sıkı geçme yöntemiyle mekanik alın birleştirilmiş kompozitlerin yük taşıma kapasitesileri deneysel olarak elde edilmiştir. Hasar oluşumlarına göre de en uygun parametredeki I profilli yapılan birleştirme elemanının tespiti gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu deneyler sonucunda hasarın kilit bağlantı elemanında mı yoksa yarı numune üzerinde mi olduğu belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçları desteklemek amacıyla Abaqus 6.11 sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Abaqus sonlu elemanlar programında üç nokta eğilme deneyi modellenerek kompozit numunelerin ve özellikle birleştirme elemanının üzerindeki gerilme dağılımlarına ve Hashin hasar kriteri ile ilk hasara uğradığı yük değerine ulaşılmıştır. Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile deney sonunda elde edilen veriler birbirlerini desteklediği belirlenmiştir.

Sonuç olarak; birleştirilmiş kompozit numunelerin dolayısıyla kompozit yapıların tamamen hasara uğramadan ilk hasarın I profilli birleştirme elemanında meydana geleceğinden dolayı birleştirme elemanının tamiratı ile birleştirilmiş kompozit yapılarının daha uzun süre çalışabilirliğinin sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Üç nokta eğilme, geometrik birleştirme, hasar analizi

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOURS OF MECHANICAL BUTT JOINTED COMPOSITE PLATES WITH THREE POINT BENDING TEST

In this study, the load carrying capacity of the lock component with an I profile which is in different geometries and had its mechanical butt jointed by the interference-fit method, was experimentally obtained. Also, according to the damage formations, the determination of the lock component with an I profile which is at the optimum parameter was carried. Additionally, with the outcomes of these experiments, it was determined, if the damage is on the lock component or on the half specimen. In the purpose of assisting the outcomes of these experiments, Abacus 6.11 finite-elements software was used. On the finite element software of Abaqus, the maximum stress value and the stress distribution of the composite system was attained by using the three-points bending test, and its load value of initial damage was attained by Hashin-damage-criteria.

As a result, it was ensured that the initial damage would happen on the lock component without getting the combined composite samples completely damaged, - which means also the forms of the composites - and also the long-term operability of the system with the reparation of the lock component was determined.

**Key Words:** Three point bending, geometric joint, failure analysis

## 1. GİRİŞ

İki veya daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin, en iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla, bu malzemelerin makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan malzemelere “Kompozit Malzeme” denir. Takviye elemanı olarak kullanılan bileşen; lif, partikül veya ince levha şeklinde olabilir iken diğer bileşen matristir (Genç, 2005). Bu malzemelerin bir araya getirilmesi ile bileşenlerinden daha iyi olan mukavemet, rijitlik ve hafiflik gibi özellikler elde edilir. Kompozit yapılarda en yüksek verimi elde etmek için liflerin farklı tabakalardaki farklı açılar şeklinde tasarlanmasıyla elde edilir. Kompozit malzemeler havacılık, deniz, otomobil sanayisinde ve elektronik-ısı endüstrisinde tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerden oluşan yapılar, genelde statik ve dinamik yüklemelere maruz kalmaktadır

Farklı tasarım veya üretimlerden dolayı bu sistemler, bir veya daha fazla birleştirmelerden oluşabilirler. Bunun yapılmasındaki maksat ana yapıdan kuvvet transferini gerçekleştirmektir. Kompozit yapılarda, en büyük problem ise bu sistemdeki malzemeleri birleşim bölgelerindeki hasar oluşumlarıdır (Altan, 2009). Bu birleşim bölgelerindeki hasarlar mukavemet düşümlerine sebep olmaktadır. Birleştirme bölgelerindeki bu zayıflık durumlarından dolayı literatürde pek çok birleştirme yöntemleri mevcuttur. Yapılan literatür araştırmalarına göre araştırmalar daha çok birleştirme çeşitliliğine yönelik yapıldığı tespit edilmiştir. Birleştirme tiplerinden alın bağlantı sistemlerinde daha çok yapıştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu tez kapsamında alın birleştirmelerde özellikle yapıştırma yöntemi yerine I geometrik şekilli mekanik bağlantı elemanları kullanılmıştır. I geometri bağlantı elemanı ile yapılan mekanik alın birleştirmelerin çökmesi ve maksimum yük taşıma kabiliyeti gibi mekanik özelliklerini belirlemekle birlikte bu konuyla ilgili uzmanlara yapılacak olan katkı tezin önemini daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı; farklı geometrilerdeki I profilli kilit bağlantı elemanı ile mekanik alın birleştirilmiş numunelerin laboratuvar ortamında 3 nokta eğilme testi ile mekanik davranışlarının incelenmesidir. Ayrıca deneyi yapılacak numune

modellerinin sonlu elemanlar metodu ile analizi 3 boyutlu olarak ABAQUS paket programı ile gerçekleştirilecektir. Sonlu elemanlar programı ABAQUS ile deneysel yöntemle elde edilecek sonuçların birbirleriyle desteklenmesi sağlanarak optimum geometrideki I profilli kilit bağlantı elemanını belirlenmesi amaçlanmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında yüksek çekme mukavemetinin veya yüksek elastik modülünün yoğunluğa olan oranın büyük değerlerde elde edilmesinden dolayı son yıllarda bunların üretim yöntemleri üzerinde daha çok çalışmalar yapılmıştır (Altan, 2009).

Literatürde incelenen veya araştırılan bir çok birleştirme türleri vardır. Bu çalışmaların bir kısmı birleştirmelerin nasıl yapıldığı konu alırken bir kısmında birleştirilmiş sistemlerin statik ve dinamik performansları konu olarak alınmıştır. Ayrıca bu çalışmayla ilgili kompozit yapılarda gerçekleştirilen üç nokta ve dört nokta eğilme testleri ile ilgili statik, dinamik ve yorulma performanslarının literatür araştırılması yapılmıştır.

### 2.1 Mekanik Birleştirme ile İlgili Çalışmalar

Chen vd (1995) çalışmalarında; cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda cıvata deliği ile cıvata arasındaki teması modellemek için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında fiber matris malzeme çifti olarak grafit/epoksi ve cam elyaf/polyester  $[45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$  fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip malzemeler kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının, delik-cıvata arasındaki toleransın ve ön gerilmenin mukavemete olan etkileri üzerine çalışmışlardır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Hung ve Chang (1996) çalışmalarında; cıvata bağlantılı kompozit levhaların hasar analizlerini modelleyebilen bir sonlu elemanlar programı geliştirmişlerdir. Çalışmada çift kesme durumu incelenmiş, üç farklı karbon fiber takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit malzeme için analizler yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modelinde pim yerine radyal sınır koşulları uygulanmıştır. İlerlemeli hasar analizi sonucunda kesme, yırtılma ve ezilme hasar şekilleri, farklı W/D ve E/D değerleri için incelenmiştir.



Zhang vd (2002) çalışmalarında; çift tesirli pim bağlantılı kompozit levhalarda, pim/delik yüzeyindeki sürtünmenin, üç boyutlu temas gerilmesine etkisini incelemişlerdir. Sayısal çalışmalar sonucunda sürtünme katsayısının, delik civarında üç boyutlu gerilme durumunu önemli bir şekilde etkilediği belirtilmiştir. Düzlemsel gerilme şeklinde yapılan iki boyutlu modellemeler ile üç boyutlu gerilme durumu arasında önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiş, bu durumun özellikle kayma gerilmesinde daha belirgin olduğunu vurgulamışlardır.

Karakuzu vd (2006) çalışmalarında; araştırma dokuma kevlar epoksi kompozit plakalarda hasar modu ve mekanik sabitlenmiş birleştirmelerin hasar yükünün belirlenmesi için yapılmıştır. 2 boyutlu sonlu eleman kodu hasar başlangıcı, ilerlemesi ve birleştirmelerin dayanımı tahmini için geliştirilmiştir. Hassin, Hoffman ve Maksimum Gerilme kriteri bu hasar analizinde kullanılmıştır. Deneysel hasar yükünü bulmak ve hasar modunu tahmini için yapılmıştır. Parametrik çalışmalar bu analizde birleştirme geometrisinin etkisini değerlendirmek için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirine ve nümerik ve deneysel metot arasındaki gösterilen iyi uyumun karşılaştırılmıştır.

İçten vd (2003) çalışmalarında; pim yardımıyla yüklenmiş dokunmuş cam fiber epoksi kompozitlerin mekanik davranışlarını ve hasar gelişmelerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Ayrıca hasar mukavemetlerinde birleşme geometrisinin ve kat oryantasyonunun etkilerini değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlar ile nümerik tahminler arasında iyi bir uyum olduğunu tespit etmişlerdir.  $[(\pm 45)_3]_s$  tabakalı kompozite göre daha zayıf olduğunu tespit etmişlerdir.

## **2.2 Yapıştırarak Birleştirme ile İlgili Çalışmalar**

Banea ve Silva (2009) çalışmalarında; fiber takviyeli plastik (FRP) kompozit yapıların yapıştırıcı bağlantısı ile birleştirilmesiyle yapılmış araştırmanın gözden geçirilmesini sunmuşlardır. Yüzey hazırlığının etkileri, birleştirme konfigürasyonu, yapıştırıcı özellikleri ve birleştirme davranışındaki çevresel faktörler yapıştırıcıyla bağlı FRP kompozit yapılar için kısaca açıklamışlardır. Nümerik yaklaşımlar lineer ve nonlineer modellerin ikisini de kapsadığını göstermişlerdir. Bağlantı birleştirmelerde tahmini hatalar için kullanılan birkaç metot tanımlamışlardır. Hata gücü ve modları çeşitli bağlama metotları ve parametrelerine göre farklı olduğu için hata tahmini için kullanılması gereken yöntem hakkında genel bir anlaşma yoktur,

ama birleştirme davranışlarının önemli yönleri bu yaklaşım kullanılarak modellenildiği için ilerleyici hasar modelleri oldukça umut verici olduğunu belirtmişlerdir.

Broughton, Crocker ve Urquhart (2001) çalışmalarında; yapıştırıcıyla bağlı yapıların statik gücünün tahmini için mühendisler/dizaynırlar tarafından kullanılan farklı hata kriterlerinin güvenilirliğini değerlendirmek için yapılmışlardır. Sonlu eleman analizi kullanılarak simüle deneylerin dizisi bu amaç için tek bindirmeli ve açılı alın birleştirme yapılandırmaları yapmışlardır. Bağlantı gücü için geometrik parametrelere ilişkin cebirsel formülasyonları statik analizler kullanılarak elde etmişlerdir(deneysel tasarım). Deneysel sonuçları analiz işlemlerini doğrulamak için kullanmışlardır. Parametrik çalışma sonuçları yapıştırıcı ve yapışanların plastik şartıyla, uygun hata kriterleri ile birlikte 2 boyutlu sonlu eleman modeli yaklaşımı kullanılarak, doğruluğun uygun derecesine, 2 geometri için birleştirme gücü tespit edildiğini göstermeyi dikkate almışlardır.

Karpov (2006) çalışmasında; yüksek yüklü kompozit yapı elemanlarının birleştirilmesini incelemiştir. Parça1: Dizayn, mühendislik çözümleri ve performansını değerlendirmiştir. Mekanik bağlama ve yapıştırıcıyla bağlama tekniklerini kullanmıştır. Kompozit parçaların birleştirilmesi için araştırma tasarım ilkelerini doğrulamak için sonuçları tartışmıştır. Çalışmaya göre; birleşim tasarım önerilerinde kuvvet transfer koşulları ve birleşim sonuçları, yazar teorik ana hatlar ve deneysel araştırmalar mühendislik ve gerilme analizi faaliyetlerini desteklemek için tanımlanır. Deneysel statik güç değerlendirilmesi önerilen çözümlerin etkinliğini göstermektedir.

Seo ve Lim (2005) çalışmalarında; yapıştırıcı alın birleştirilmiş numuların gerilme, eğilme ve kesme güç dağılımını incelemiştir. Deneyleri güç değerlendirme metotları ile istatistiksel veri sağlamak amacıyla yürütmüşlerdir (termoset epoksi reçine bazlı yapıştırıcı alın birleştirme için gerilme, kesme ve 4 nokta eğilme testleri). Yapıştırıcı gücü gevrek çatlama eğilimini gösterme olasılığının belgelenmesini incelemiştir. Yapıştırıcı gücü yapıştırıcı kesit alanının etkisini değerlendirmişlerdir.

Qian ve Akisyan (1998) çalışmalarında; aliminyum substrate ve epoksi reçine arasındaki açılı alın birleşimin gerilme dayanımındaki sıcaklık kürü etkilerini

incelemişlerdir. Açılı alın birleştirmeleri deplasman kontrolünde standart tahrik vida test cihazını kullanılarak test etmişlerdir. Nispeten kırılğan yapıştırıcılar ile sandiviç birleşimlerinin gerilme davranışını incelemişlerdir. Mekanik ve sıcaklık yüklemenin birleşimlerine hasar mekanizmaların ve birleşim geometrisi ve sıcaklık kürünün etkilerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamışlardır.

Gunnion ve Herszberg (2006) çalışmalarında; kompozit yapılarda açılı alın birleştirmelerin parametrik çalışmasını incelemişlerdir. Yüksek mukavemeti iyileştirmeye ihtiyaç duyulduğunda veya bu tatmin edici aerodinaik veya gizli gereksinimlere floş yüzey için gerektiğinde açılı alın birleştirme ve basamaklı onarımlar kompozit yapılarda kullanılır. Açılı alın onarımları özellikle kalın yüzeyleri için tasarımı karmaşıktır ve önemli bağlı yapıların çıkarılması gerekir. Bu araştırmaların sonuçları yük altındaki kompozit yapıların açılı alın onarımının geliştirilmesini, gerilimleri kavramada yardımcı olmayı sağlamıştır. Bu anlayış kompozit yapılarda açılı alın birleştirme gelişmiş tasarım ve analiz tekniklerine yol açabileceğini göstermişlerdir.

Kwon ve Marrón (2009) çalışmalarında; kompozit malzemelerin açılı alın birleştirilmesi: Test ve analizini incelemişlerdir. Bu çalışmalarının amacı; eksenel, eğilme momenti ve kayma yüklemesi gibi çeşitli yükleme koşulları altında cam/cam, cam/karbon, karbon/cam ve karbon/karbon gibi farklı malzeme kombinasyonlarına sahip karbon-fiber ve cam-fiber örgü dokumadan yapılmış açılı alın birleştirme konfigürasyonlarının bağlantı dayanımlarını incelemek için güvenilir uygulamalı modelleri geliştirmektir. Deneysel ve hesaplama çalışmalarının ikisi de yürütülmüştür. Deneysel çalışmaları ve hesaplamalı modelleri yapmışlardır. Sayısal modeller deneysel verilere karşı doğrulanmıştır. Doğrulanmış modeller; eksenel, kesme ve eğilme momet yükleri farklı yükleme koşulları altında birleştirme gücünün tahminini kullanmışlardır.

Kedward and Kim, Editors (2004) çalışmalarında; açılı alın onarılmış kalın kesitli kompozit plakaların statik ve dinamik sertliklerini incelemişlerdir. 4 nokta eğilme testi prosüdürlerini kullanmışlardır. Bu testte; işlenmemiş ve onarılmış kırıışlerin statik davranış karakterlerini seçmişlerdir. Onların odakları statik ve dinamik yüklemeye maruz kalın kesitli kompozit destek plakanın alın onarımıdır. Plain weave S2-glass fabric ve SC15 epoksi reçine kompozit taşıyıcılarını VARTM süreci ile üretmişlerdir. Kontrol statik tepki ve tamir plakalarını 4 nokta eğilme testi ile

karşılaştırmışlardır. Bu onarım teknikleri kullanılarak, sertliğin yenilenmesi, yüksek süneklik, düşük sertlik yapıştırması dışındakileri başarmışlardır. Onarım kirişlerin moment kapasitesinin yenilenmesi %60 olduğunu göstermişlerdir. Alın yaması onarılmış kompozit numunelerin dinamik sertliği, bölünmüş Hopkinson çubuğu kullanarak eksenel basınç direnç testi ile incelenmişlerdir. Dinamik yük altında eksenel kuvveti; alın açılarına ve yükleme oranına bağlı olarak bulmuşlardır.

Osnes ve Andersen (2003) çalışmalarında; yapıştırıcıyla bağlı tek katmanlı kompozit birleştirmelerde nonlinear geometrinin hesaplamalı analizini incelemişlerdir. Geometrik nonlinear etkiler; bu gerilmeleri üreten dış yükler, en yüksek dayanım sınırlarının çok altında olduğu için ve ortalama boyuna gerilmeleri %5' den az olduğu için gelişmeye başlar. Aynı zamanda birleştirme içindeki malzemelerin dağılımı nonlinear davranışı üzerinde bazı etkilerinin olduğunu tespit etmişlerdir. Tek tür kompozit birleşimleri incelediklerinde, geometrik nonlinear yöntemler her zaman uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir.

Imanaka ve Iwata (1996) çalışmalarında; yapıştırıcıyla bağlı alın, açılı alın ve kelebek tipi alın birleştirmelerin yorulma dayanımının üzerinde yapışkan tabaka kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Test metodu olarak sonlu elemanlar metodu (FEM) analizi kullanmışlardır. Önceki çalışmalarında; yapıştırıcı alın birleştirme, açılı alın birleştirme ve kelebek tipi alın birleştirmeler kullanılarak çok eksenli gerilme koşulu altında yorulma dayanımını genişletmek için metot önermişlerdir. Yapıştırma tabakasındaki gerilmeyi çok eksenliliği geniş bir yelpazede incelemişlerdir. Bazı çalışmalarda, alın birleştirmenin statik ve yorulma dayanımı etkisini yayınlamışlardır. Ancak; açılı alın ve kelebek tipi birleştirmeleriyle ilgili az sayıda çalışmaları vardır. Sonuç olarak, max asal gerilme, uygun gerilme parametreleri ve ince yapışkan tabaka için elde edilen bu regrasyon hatları ( $t= 0.05$  mm veya  $t= 0.1$  mm) yapıştırıcı birleştirmelerin diğer tiplerinin dayanımını değerlendirmek için kullanılabilir olduğu kabul edilebilirliğini göstermişlerdir.

### **2.3 Üç Nokta Eğilme ve Dört Nokta Eğilme ile İlgili Çalışmalar**

Bogomolov, Borisenko ve Mishkin (1998) çalışmalarında; eğilme için büyük deplasmanlar ile test çubuklarının parametrelerinin hesaplanmasını incelemişlerdir. 3 nokta eğilme ve 4 nokta eğilme mekanik test tiplerini kullanmışlardır. Eğilme için büyük deplasmanlar ile çubukların testi sırasında fizikomekanik parametreler ölçümü

için hesaplama formülleri sağlamak için eğilme teorisinin tam denklemini kullanmışlardır.

Shah, Consultek ve Brea (2002) çalışmalarında; plastik testini incelemişlerdir. 3 nokta eğilme testi ve 4 nokta eğilme testlerini kullanmışlardır. Eğilme polimerlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı hem tasarımcıyı hem de polimer üreticilerini ilgilendirir. Eğilme dayanımı kuvvetlerin uzunlama eksenine dik uygulandığında eğilmeye dayanımı için malzemenin yeteneğidir. Eğilme yükü nedeniyle oluşan gerilmeler basma ve çekme gerilmelerinin birleştirilmesidir. Bir çok polimer, eğilme direncinin kararlılığını mantıksız yapan büyük sapmadan sonra eğilme altında kırılmaz. Bu gibi durumlarda; numunenin dışındaki fiberde max zorlanma %5' e ulaştığında, ortak eğilme akma dayanımını rapor etmişlerdir. Polimer malzemeler için, numune fiberin dış yüzeyinde kopma meydana gelene kadar eğilir ve bu eğilme yükü altında kolayca kırıldığı görülmektedir.

Mujika (2005) çalışmasında; üç ve dört nokta eğilme deneyleri ile elde edilen eğilme modülü arasındaki farkı incelemiştir. Bu deneysel eğilme modülü, aynı örnek için farklı 3 nokta ve 4 nokta eğilme deneyleri ile elde ettiği görülmektedir. Analize dayalı düzeltmeleri bu çalışmada geliştirmiştir. Eğilme modülü için deneysel fark% 5'ten fazla, farklı karbon / epoksi kompozit malzemenin iki numunesi kullanılarak, üç nokta eğilme ve dört nokta eğilme testinde aynı numune için elde etmiştir. Aynı numune için 3 nokta ve 4 nokta arasındaki yakın farklılıkları her iki numune için %1' in altında olduğunu göstermiştir.

Zheng ve Engblom (2004) çalışmalarında; sürekli fiber takviyeli plastik ekstrüzyonlarının hesaplamalı ve deneysel karakterizasyonu: Bölüm I-Kısa süreli eğilme yüklemesini incelemişlerdir. ASTM D 638 ' plastiklerin gerilme özellikleri için standart test metodu' ve ASTM D 6109 'takviyesiz ve takviyeli plastik kerestenin eğilme özellikleri için test metodu' nu kullanmışlardır. Dikdörtgen hollowcored sürekli fiber takviyeli kısa süreli eğilme yükleri altında geri dönüştürülmüş plastik ekstrüzyon formları karıştırmak için zamandan bağımsız özelliklerin deneysel karakterizasyonu bu çalışmada sunmuşlardır. Gelişmiş sonlu elemanlara dayalı modeller kısa süreli test sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Ve fiber mikro burulma ve kısa süreli yükleme altında gelecek kompozit çıkarma formlarının incelenmesi ile ilişkili fiber matris arayüz kayma hatası tahmini dizayn parçasını sağlayabilmişlerdir.

Baere, Supervisor(s): Paepegem ve Degrieck (....) çalışmalarında; fiber-takviyeli termoplastiklerin yorulma testi için 3 ve 4 nokta eğilme düzeneğinin dizaynını incelemişlerdir. Dönen dış destekler, kompozit numunelerde çift taraflı yorulma eğilme testleri için dizaynı ile yeni 3 nokta eğilme düzeneğini sunmuşlardır. Bazı ön statik testleri tartışmışlardır ve sonuçları ABAQUS sonlu eleman yazılımı simülasyonları ile karşılaştırmışlardır. Sonuca yol açan bu 3 nokta eğilme düzeneği fazla dezavantajlar, deneyselle birlikte nümerikde sahiptir. Dikkate alınır;4 nokta eğilme kurulumu dikkate alınmış ve yeni dizayn önermektedirler. Karbon fiber takviyeli polifenilen sülfür malzeme kullanmışlardır.

Morais ve Pereira (2009) çalışmalarında; karbon/epoksinin mod III interlamine çatlakta 4 nokta eğilme plaka testinin kullanımını incelemişlerdir. Yeni 4 nokta eğilme plaka (4PBP) testi karbon/epoksi laminantların karakterize modIII interlamine kırıklar için kullanmışlardır. Abaqusu kullanarak sanal çatlak kapama tekniği analizi ve çatlak ilerlemesi simülasyonlarını yapmışlardır. Yapışkan bölge model ile çatlak büyüme simülasyonları tarafından sonradan doğrulamışlardır.

Mirambell ve Real (2000) çalışmalarında; yapısal paslanmaz çelik kirişlerde çökmenin hesaplanması: Deneysel ve nümerikini incelemişlerdir. Bu yazının odak noktaları paslanmaz çelik kirişlerin eğilme davranışlarında ve sapmaların belirlenmesidir. Paslanmaz çelik kirişlerin üzerinde yapılan deneysel test serilerini sunmuşlardır. Bazı sonuçlar, doğrusal olmayan malzeme, verimli kesit ve kirişin uzunluğu boyunca elastisite modüllerinin çeşitliliğinin etkileri göz önüne alınarak paslanmaz çelik kirişlerde çökmenin hesaplanmasını yapmışlardır.

Fan, Ben Jar ve Cheng (2006) çalışmalarında; tek kapalı eksen ilave tabakasına sahip olan ve 3 nokta eğilmeye maruz, fiber takviyeli polimer numunelerde delaminasyon gelişme tahminin olabirliğini incelemek için yapmışlardır. 3 nokta eğilme test aparatını kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar, delaminasyon gelişmesi çok hızlı bir oranda olduğu, hemen hemen sabit sehim meydana geldiğini göstermektedir. Yüksek hızlı fotoğrafçılık kullanılarak, numune titreşimi için harcanan enerji hızı delaminasyonu büyümesine neden olduğunu göstermişlerdir.

Vas, Racz ve Nagy (2004) çalışmalarında; modelleme, eğilme dayanımının analizi ve CCD kamera sistemi ile sağlanan test cihazı tarafından elde edilen bazı deneysel sonuçlara dayalı tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerin hasar özellikleri için bu

metodun basitleştirilmiş uygulamasını göstermişlerdir. Tek yönlü karbon fiber-epoksi kompozit numuneleri üretmişlerdir ve 3 nokta eğilme testlerini 10 ve 80 mm aralığında uygulamışlardır. Testlerin görüntüleri sırasında CCD kamera sistemi kullanılarak almışlardır ve hasarın tipini çalışmışlardır. Kırılma ölçümleri ile elde edilen süreçler sapma alanı veya güven aralığı ile modellenen beklenen değer süreçlerinin tamamlandığında karşılaştırmışlardır. Teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Kam, Chen ve Yang (2009) çalışmalarında; 3 nokta eğilme teknolojisi tabakalı kompozit malzemelerin elastik sabitlerinin tanımlanması için sunmuşlardır. Deney düzeneği olarak 3 nokta eğilme test cihazını kullanmışlardır. Deneme elastik sabitleri ile birlikte dar kiriş teorisini kirişin teorik gerilmelerin tahmininde kullanmışlardır. Kirişin teorik ve deneysel gerilmeleri sonra kirişin elastik sabitlerinin tanımlanmasında stokastik optimizasyon metodunu kullanmışlardır. 3 nokta eğilme testine maruz simetrik açılı tabaka kirişin 3 gerilme kullanarak tabakalı kompozit malzemelerin elastik sabitlerinin belirlenmesi için basit ama etkili bir yöntem olduğunu göstermişlerdir. Kirişten ölçülen gerilmeler kompozit malzemenin elastik sabitlerini tanımak için optimizasyon metodunu kullanmışlardır.

Esendemir vd (2006) çalışmalarında; lineer yüklü ortotropik basit destekli kirişin eğilme ve kayma nedeniyle 2 sehim fonksiyonlarını anizotropik elastik teorisi yoluyla elde etmişlerdir. Test için basit destek kiriş modelini kullanmışlardır. Bazı sonuçlar; uzun kiriş, büyük eğilme ve kayma sehimleri ancak kayma etkisi 2 farklı kompozit için azaldığını, büyük oryantasyon açısı  $\Theta$ , daha küçük polimer matris kompozit kayma etkisini, yüksek kiriş, büyük kayma etkisi, kayma ve eğilme sehimi 2 farklı kompozit malzeme için azaldığını göstermişlerdir.

O'Brien ve Krueger (2001) çalışmalarında; sonlu eleman (FE) analizi kiriş teori tahminlerindeki sapmaları tespit etmek için  $90^0$  oryente edilmiş cam-epoksi ve grafit-epoksi kirişlerin 3 nokta ve 4 nokta testleri konfigürasyonlarının üzerinde yapmışlardır. 3 nokta ve 4 nokta eğilme testler cihazlarını kullanmışlardır. Lineer ve geometrik nonlinear analizlerin ikisinde ABAQUS sonlu eleman kodu kullanılarak yapmışlardır. Bütün konfigürasyonların gerilmeleri malzemelerin ölçülen enine gerilmelerin dayanımı için yük seviyesiyle ilgili analizleri yapmışlardır.

Mujika ve Mondragon (2003) çalışmalarında; 3 nokta eğilmede tek yönlü kapalı eksenli numunenin deplasman alanı 2. Castigliano teoremi ve unitarial yük metodu uygulanarak yeni yollar sağlamışlardır. Deplasman alanını 2 konu için hesaplanmışlardır. Birincisi; numune ve fikstür deplasman arasında yükselme eğilme-burulma bağlantısı tarafından neden olmuştur. Ve numune 2 diagonal zıt noktalarda test fikstür destek ile temas gereklidir. İkinci durumda; yükselme oluşmaz ve numune 4 noktadan fikstür destek ile temas gereklidir. Nokta sınır koşulları ile kompozit plakalar için deplasman alan çözümleri, kompozit plakalar konusunda 2. Castigliano teoremine dayalı çözümler literatür araştırmasında rastlamışlardır.

Mujika, Benito ve Mondragon (2003) çalışmalarında; bölüm 1' de hesaplanan deplasman alanı IM7-8552 epoksi matris tabanlı karbon fiber takviyeli tek yönlü kompozit malzemenin numuneleri için numerik analizini yapmışlardır. 3 nokta ve 4 nokta eğilme test metodlarını kullanmışlardır. Bölüm 1' de elde edilmiş teorik deplasman alanları varsayılan sınır koşullarına ilişkin ve yük uygulamasının uygunluk analizini yapmak amacıyla destekte ve yük silindir çizgisinde seviye eğrilerini göstermek için kullanmışlardır. Deplasman alan denklemleri ve klasik tabakalı kiriş teorisinden elde edilen orta nokta yük deplasmanları eğri eğimleri deneysel olarak elde edilen sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Diğer taraftan, düzlem içi kayma modülleri malzeme ve deneysel yük deplasmanın eğri eğiminin diğer elastik sabitlerini bilerek farklı yollardan hesaplamışlardır. Numerik ve deneysel sonuçlar arasındaki anlaşma tüm durumlarda iyi olduğunu göstermişlerdir.

Marsavina, Sadowski, Kneć ve Negru (2010) çalışmalarında; statik ve darbe 3 nokta eğilme altındaki köpüklerin non-liner davranışını incelemişlerdir. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Oda sıcaklığında poliüretan köpüklerin mekanik özelliklerinde emilimin etkisi statik ve darbe yükleme koşulların ikisini de deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Emdirme tabakasında eğilme modülü artmış ve darbeye köpük davranışı değişmiştir. Emdirilmeyen köpük için; çatlağa absorbe edilen enerji darbe enerjisine eşittir. Emdirilmiş numuneler içinse; çatlağın absorbe edilen enerji yaklaşık olarak darbe enerjisinin diğer parçasının iç zarar için tüketildiğini gösteren darbe enerjisinin % 80' dir. Enerjinin aynı miktarına statik ve darbe testleri için ulaşmışlardır. Poliüretan köpüğün statik mekanik özelliklerini 3 nokta eğilme testleri yardımı ile belirlemişlerdir. 2 farklı reçine ile emdirmenin etkisini incelemişlerdir. 3 nokta eğilme testi için emdirme köpüğün sertliğinde ve eğilme dayanımı etkisinde



önemli etkiye sahiptir. Polyester reçine için %26.4 ve epoksi reçine için %61.5 ile elastisite modülündeki artış hücrelerin birinci sırasının emdirilmiş çözüm doldurularak tanımlanabilir.

Airoldi, Sala ve Bettini (2007) çalışmalarında; sonlu eleman açık analizleri kullanarak kompozit laminantlarda hem başlangıç hem interlaminer hasarların yayılımını değerlendirmek için nümerik yaklaşımın uygulamasını sunmuşlardır. 3 nokta eğilme ve 4 nokta eğilme test metotlarını kullanmışlardır. Ara yüz oluşturan model kompozit laminantların sonlu eleman düzenlerinde interlaminer tabakalar içerecek şekilde geliştirilmiş bir modelleme tekniği içinde uygulamışlardır. Laminant kalınlığı boyunca ince meshin farklı seviyeleri ile model laminant için olasılığını değerlendirmişlerdir. Kompozit laminantlarda interlaminer hataların çekirdeklenme ve yayılma arayüzü oluşturan kanuna dayalı nümerik yaklaşım yoluyla modellenmişlerdir. Sonuçların mesh hassaslığının diğer iyileştirme ve geliştirme, interlaminer hata çekirdeklenmenin ve yayılımının riskini göze alarak kompozit yapıların dizayn ve analizleri için güvenilir bir metot geliştirileceğini kabul etmişlerdir.

Cui ve Wisnom (1992) çalışmalarında; tek yönlü cam-fiber/epoksi kompozitin 3 nokta ve 4 nokta kısa kiriş eğilme numunelerinin detaylı sonlu eleman gerilme analizlerini yapmışlardır. 3 nokta eğilme ve 4 nokta eğilme test metotlarını kullanmışlardır. Kontakt elemanlar silindirde gerçek kontakt gerilmeleri ve kontakt uzunluğunu hesaplamak için kullanmışlardır. Eğer malzeme lineer olduğu kabul edilirse, kayma gerilme dağılımı için parabolik bir varsayım yükleme ve destekleyen silindirlerin arasındaki kirişin büyük parçası için iyi olduğunu göstermişlerdir. Ancak yüksek kayma gerilmeleri silindirlerin etrafında bölgesel olarak ortaya çıkar. Malzemenin gerçek nonlineer kayma cevabını göz önüne alarak numunelerde kayma gerilmelerini önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir. ABAQUS' te kontakt elemanlar kullanılarak sağlanan kontakt yüzeylerin gerçek uzunluğu ve kontakt gerilmelerin dağılımını bulmuşlardır. Numunedeki gerilmeler bu parametreler için çok hassastır ve bu yüzden bu metot önceki yaklaşımlardan daha gerçekçi gerilme dağılımı üretir.

Hammant (1971) çalışmasında; 4 nokta nokta yükleme metodunun kullanımı eğilmede çevresel ve sünme etkileri için özellikle kompozit malzemelerin testi için desteklemiştir. Kolayca ölçülen değişkenlerin özellikleriyle ilgili denklemleri

aktarmıştır ve 3 nokta yükleme testlerin ilişkisini tartışmıştır. ASTM D790-66' da belirtilen özelliklere genel olarak uymuştur. 4 nokta yükleme testleri konveksiyonel test ölçümlerinde eğilme sonuçlarını kolayca sağlamak için kullanılabilir olduğu sonucunu çıkarmıştır ve potansiyel eğilme koşullarında daha anlamlı veri sağlama yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Carbajal ve Mujika (2009) çalışmalarında; yeni test metodu çapraz tabaka (cross-ply) laminantların 3 nokta eğilme tarafından kompozit laminantların boyuna basınç dayanımı ölçümü için önerilmiştir. Termal ve mekanik gerilmelerini Klasik Kiriş Teorisinin hipotezine dayalı olarak hesaplamışlardır. Farklı kalınlıklar ve mesafeler ile çapraz tabaka karbon/epoksi şeritleri 3 nokta eğilme tarafından test edilmiştir. Çapraz tabaka laminantların 3 nokta eğilme testlerinde tek yönlü kompozit laminantların basma dayanımının belirlenmesi için kolay bir yol olduğunu göstermişlerdir. Hata bölgelerini basınç tarafında bulmuşlardır ve elde ettikleri dayanım değerleri referans değerleri için benzer olduğunu göstermişlerdir.

Carbajal ve Mujika (2009) çalışmalarında; 3 nokta eğilme testleri tarafından tek yönlü kompozitlerin basınç dayanımının elde edilmesi için basit bir yol önermişlerdir. Hexcel kompozitlerden tek yönlü karbon/epoksi kompozit T6T/F593 farklı kalınlıklar ve mesafeler ile 3 nokta eğilme tarafından test edilmiştir. 3 nokta eğilme testini tek yönlü kompozitlerin basınç dayanım ölçümü için önermişlerdir. Numunenin en uygun kalınlık ve mesafesi interlaminer, çekme ve çentik etkileri görünmemesinden sonra tespit etmişlerdir. O ihmal edildiğinde, çentik hatasını anlamak için analizde içerir. Basınç dayanımı CBT ile ilgili her zaman ki denklem tarafından doğruluğunu elde etmişlerdir. En iyi kabul 7 mm nominal kalınlık ve 120 mm aralığının durumunda sağlamışlardır.

Dawood, Taylor ve Rizkalla (2010) çalışmalarında; 3-D fiber takviyeli polimer (GFRP) sandviç panellerin 2 yönlü eğilme davranışının deneysel ve analitik çalışmalarını sunmuşlardır. Tek yönlü eğilme altındaki bu panellerin davranışı 2 yönlü eğilme altındaki davranışı nispeten iyi anlaşılmişken henüz araştırmamışlardır. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Deneysel programı fiber ek örneğinin etkisi ve konsantre yükün etkisi altında 2 yönlü eğilme davranışındaki panel kalınlığını değerlendirmek için yapmışlardır. Sonlu eleman analizini deneysel programda test edilmemiş farklı parametrelerin etkisinin araştırılması için uzatmışlardır. Parametrik çalışma panelin ilgili eğilme veya kayma sertliğinin

artması membran hareketleri tarafından taşınan yük oranının azaltılması ile plaka eğilme mekanizması davranışına doğru değiştiğini göstermişlerdir.

Srinivasa ve arkadaşları (2011) çalışmalarında; rastgele dağılmış fiberler ile areka fiberler tarafından yapılmış kompozitin fiziksel, eğilme ve darbe özelliklerini değerlendirmek için yapılmışlardır. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Areka kabuğundan çıkarılan areka lifler fiber ve matris arasında daha iyi arayüz yapmak için potasyum hidroksit ile işlenmemiş alkali. Daha sonra kompozit laminantlar fiber durumu (işlenmemiş ve işlenmiş alkali) ve fiber yükleme yüzdeleri (ağırlıkça %50 ve %60) gibi değişik işlem parametreleri ile sıkıştırma döküm tekniği vasıtasıyla üre formaldehit, malamine üre formaldehit ve epoksi reçine kullanılarak üretmişlerdir.

Gupta, Gupta ve Mueller (2008) çalışmalarında; işlevsel olarak derecelendirilmiş partikül kompozitlerin geleneksel mikro yapıları herbir partikül hacim oranının eğimi veya malzemenin bir boyutta büyüklüğü boyunca oluşturulmasına dayalıdır. Eğilme özellikleri için yapının bu çeşidine dayalı işlevsel olarak derecelendirilmiş sentetik köpüklerin (FGSFs) karakterizesine odaklanmışlardır. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. İçi boş partikül dolgulu kompozit olarak adlandırılan sentetik köpükler kendi duvar kalınlığına göre partiküllerin eğiminin oluşturulmasına dayanan yeni bir yaklaşıma dayalı işlevsel olarak eğimli kompozitlerin üretilmesi için fırsat sunmaktadır. Bu çalışmalarında eğilme testinin deneysel sonuçları FGSFs' nin her iki tipi için teorik ve sonlu eleman analizi ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar duvar kalınlığı yaklaşımına dayalı FGSFs' nin eğilme özellikleri daha etkin kontrol edilebilirliğini göstermişlerdir. Deneysel sehimler teorik değerlerle karşılaştırıldığında yaklaşık % 10-30 daha düşük fark olduğunu göstermişlerdir.

Nader, Dagher ve Lopez-Anido (2011) çalışmalarında; deniz dereceli polimer matris lamine kompozitlerin eğilme dayanımında uzunluk ve genişlik ile birleştirilmiş büyüklük etkilerini incelemişlerdir. 4 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Farklı uzunluklar ve genişlikler ve benzer kalınlıklar ile dokuma [0/45/-45/0]<sub>5sf</sub> E-cam/vinil ester malzeme numuneleri eğilme dayanımında numune büyüklüğünün etkisinin tahmini için değerlendirmişlerdir. 32 malzeme numunesi hazırlamışlardır ve ASTM D6272' ye göre 2 mesafe-kalınlık oranı (32 : 1 ve 16 : 1) ve 2 genişlik-kalınlık oranı (3 : 1 ve 1.5 : 1) kombinasyonları kullanılarak test etmişlerdir. Eğilme

yüklemesi altında bu çalışmada malzemelerin testi için, geleneksel Weibull teorisi doğru olarak dayanım büyüklük etkilerini tahmin edemediğini bulmuşlardır.

Mujika ve arkadaşları (2006) çalışmalarında; eğilme ile ilgili denklemlere dayalı çekme ve basma modülleri, eğilme testleri tarafından 3 modülün belirlenmesi için deneysel prosüdür önermişlerdir. 3 nokta eğilme, 4 nokta eğilme ve çekme test metotlarını kullanmışlardır. 3 nokta eğilme, 4 nokta eğilme ve çekme testleri farklı yollarla elde edilmiş modülleri karşılaştırmak amacıyla aynı numeneler de yapmışlardır.  $E_t$  ve  $E_c$  elde edilmesi için 2 hesaplama prosüdürü  $\lambda'$  nın belirlenmesine dayalı önerilmiştir. Bu prosüdürler ile elde edilen değerler ve 2 tek yönlü kompozit numune için çekme testleri ile doğrudan elde edilen veriler arasındaki yakın fark tüm durumlarda %5' in altındadır.

Arriga ve arkadaşları (2006) çalışmalarında; her iki alanda termoplastik malzemelerde (başlıca iki malzeme tipi değerlendirildi: BOREALIS' dan polypropan PP BE677AI ve BAYER' den polikarbonat/akrolinitril-butan-sitirin PC/ABS T 45) deneysel mekanik test sonuçları ve sonlu eleman kodu ANSYS' de benzer testlerin simülasyonu arasında iyi korelasyon düzeyi bulmak için çalışmışlardır. Eğilme ve delme deney testleri, ANSYS' de benzer koşullar altında testlerin simülasyonunu yapmışlardır. Elde edilen test sonuçlarında, hem malzeme hem test metotlarında (yani eğilme ve delme) korelasyon düzeyinin bulunması görülebilir, yüksek gerilme seviyelerinde bile yanıt eğrileri ve nicel değerlerin şekli ikisinde de iyidir. Çalışma elde edilebilir bir sonuca doğru bir sürtünme katsayısının kullanımı deneysel ve simülasyon sonuçları arasında iyi bir ilişki için temel olmalıdır.

Rokach (1998) çalışmasında; yazının birinci bölümünde, şekilsel süper pozisyon metodu kullanılarak dinamik SIF hesaplamaları için formüller darbe eğilme numunesinin keyfi bir lineer model için türetmiştir. Yazının ikinci bölümünde, şekilsel parametreler ve DSIF belirlenmesi için gerekli olan diğer veriler numune modelinin 3 tipi için hesaplamıştır: Euler-Bernoulli giriş modeli, 2D ve 3D katı modellerdir. Bir nokta eğilme ve 3 nokta eğilme test metotlarını kullanmıştır. Hesaplamalar sonlu eleman programı ADINA kullanılarak yapılmıştır. . Literatürde raporlanmış 1 ve 3 nokta eğilme test verisinin imalinin sonuçlarını sunmuştur. Nümerik DSIF değerleri deneysel olanlar ile karşılaştırmıştır. 2D modeli için sonuçlar deneysel verinin bütün türleri ile iyi bir uyumu var olduğunu göstermiştir. 3D modeli kullanılarak niteliksel sonuçlar geliştirilmemiştir. 2D ve 3D sonuçları

arasındaki niteliksel fark  $\vartheta < 0.35$  için % 10' dan azdır ve 2D model her zaman DSIF tahminini daha ölçülü verdiğini belirtmiştir.

Jong (1993) çalışmasında; deneysel prosedürler, sonuçlar ve nümerik analizleri göstermiştir. Deneysel prosedürlerden 3 nokta eğilmeyini de anlatmıştır. 3 nokta eğilme testlerini bütün kompozitlerde yapmıştır. Test düzeneğin boyutları ASTM D 790 standartlarına göredir. Örneklerin dış tabakalarında  $0.001 \text{ s}^{-1}$  gerinim oranını tüm testler için kullanmıştır. E- cam/epoksi için, 30 ve 46 arasındaki mesafe kalınlık oranlarını kullanmıştır. Bu oran karbon/epoksi numuneleri için yaklaşık 32' dir. Bazı başlangıç etkileri dışında, tüm kuvvet-deplasman eğrileri başarısızlık kadar lineer davranış göstermiştir. Test sonuçları ileriki bölümde gösterilmiştir ve tartışılmıştır. Enine kompozit örneklerin mekanik test sonuçlarını tartışmıştır.

Buchholzi, Rikards ve Wang (1997) çalışmalarında; tabakalı kompozitlerin interlaminar kırılma davranışını incelemişlerdir. Temas ve sürtünme çatlak yüzeyleri boyunca delaminasyon çatlak büyümesinin sonlu eleman modelinde dikkate almışlardır. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Temas ve sürtünme ile çatlaklar için, sanal çatlak kapatma integral yöntemi çatlak yüzeyler boyunca ayırık enerji bırakma oranlarını hesaplamak için kullanmışlardır. 3 nokta eğilmede çapraz tabaka laminaların hesaplamalı modelini ve analizini yapmışlardır. Çift ankastre kiriş testleri ve son çentikli eğilme testleri tarafından tek yönlü destekli cam fiber kompozitler için elde edilen deneysel verilerin nümerik analizini yapmışlardır. Çift ankastre kiriş testini geometrik lineer ve nonlineer sonlu eleman analizi için yapmışlardır ve kritik enerji bırakma oranlarını hesaplamışlardır.

Romera, Adarraga, Cantera ve Mujika (2011) çalışmalarında; tek yönlü off-axis kompozitlerin 3 nokta eğilme testi ile ilgilenmişlerdir. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Tek yönlü eksen çıkarılan(off-axis) kompozitler için 3 nokta eğilme testi sonlu eleman metotları tarafından analiz edilmiştir. Malzemenin bu türünün 3 nokta eğilme test modellemesinin ana zorluğu fikstür desteklerinde numunenin havalanması nedeniyle eğilme-dönme, bağlamadan kaynaklanmaktadır. Yük ve destek silindirleri ve numune arasındaki temas lineer boşluk elemanları ile modellemişlerdir. Numunenin orta noktasının deplasman ile ilgili analitik, nümerik ve deneysel sonuçlar en düşük mesafe durumu haricinde kabul etmişlerdir. Kabuk elemanları için sonuçlara karşılık gelen katı elemanlar kullanılarak sağlanan sonuçlar için aynıdır. Ancak serbestlik derecesi sayısına rağmen 2 durum içinde aynıdır,

kabuk elemanı kullanıldığında işlem süresi boyunca ölçülen hesaplama maliyeti azdır. Silindirlerin ayrıklaştırılmasını içeren tamamlanmış model numune ve silindirler arasındaki temasın uzunluk ve konumu ile ilgili daha fazla bilgi eklemek analitik modelin sonuçlarını tamamlar. Gerilme alanını dikkate alarak, analitik gerilmeler nümerik olanların değerlerinin ortalaması alınır. Quadratik katı elemanlar tarafından sağlanan sonuçlar lineer elemanlardan elde edilenlerden farklı değildir.

Baere, Paepegem ve Degrieck (2009) çalışmalarında; eğilme düzeneğinin özel dizaynı düşük eğilme sertliği ile ince fiber takviyeli kompozitlerin mekanik testi ve tek eksenli yükleme koşullarında geliştirilen yorulmuş malzeme modelinin doğrulanması için uygun olduğunu göstermişlerdir. İlk olarak, ince tabakalar için 3 nokta eğilme düzeneğinin dezavantajlarını yorumlamışlardır. Sonra, 4 nokta eğilme düzeneğini tartışmışlardır. Kenetli 3 nokta eğilme düzeneği deneysel çalışma için oldukça umut verici olduğunu söylemişlerdir. Bu çalışma için kullanılan malzeme karbon fiber takviyeli polifenilen sülfattır. Farklı eğilme düzenekleri ince lamine kompozitlerin testi için tartışmışlardır. 4 nokta eğilme düzeneği kolayca modellenmenin avantajları vardır. Ama deneyler düşük test frekansları sağlanmış büyük orta mesafe deplasmanları için düşük eğilme güçleri vermektedir.

Vejelis ve Vaitkus (2006) çalışmalarında; eğilme direnci ve 3-4 nokta eğilme metotları kullanılarak genişletilmiş polistren levhaların elastisite modüllerini belirlemek için yapmışlardır. Eğilme modüllerini yük ve sehim sabitlenerek kuvvet-sehim eğrisine göre belirlemişlerdir. Elastisite genişletilmiş polistren plaka eğilme modüllerini 3 ve 4 nokta eğilme metotları yardımıyla deneysel olarak tespit etmişlerdir. 3 ve 4 nokta eğilme uygulanarak hesaplanan elastisite modülünün karşılaştırılmasını vermişlerdir. Farklı yoğunluklu numunelerin elastisite eğilme modüllerini belirlemek için kullanmışlardır. 4 nokta eğilme metodu uygulandığında veri analizi eğilme modüllerinin değerleri daha büyük olduğunu göstermektedir. Makale plaka yoğunluğu veya türüne göre plakaların elastisite modüllerinin (3 ve 4 nokta eğilme metotları tarafından tespit edilen) belirlenmesinin olanaklarını göstermişlerdir. Verinin statik analizi malzeme yoğunluğu ve türünden genişletilmiş polistren plakanın eğilme modüllerinin bağımlılığı lineer olduğunu göstermişlerdir. Farklı test metotları uygulandığında, sonuçların farklılığını deneysel olarak belirlemişlerdir. 3 nokta eğilme uygulandığında modüller giriş ve sonuçların tekrar

hesaplanması için gereklidir. Denklem  $E_4 = 1,098.E_3$ ' ü sonuçların tekrar hesaplanması için önermişlerdir.

Şerban, Marşavina ve Silberschmidt (2011) çalışmalarında; 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Sonlu eleman analizine dayalı nümerik simülasyonların kullanımı yeni ürünler, temel malzeme özelliklerin köprülenmesi (malzeme numuneleri üzerinde yapılan çeşitli testlerde elde edilen) ve ürün davranışının dizaynında gerekli hale geldiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada ticari yazılım ABAQUS/CAE kullanarak tek eksenli tekrar yüklemenin yanı sıra farklı gerinim-enerji yoğunluk fonksiyonları dikkate alarak monoton tek eksenli çekme yüklemeleri için hiper elastik malzemenin (yarı enerji yoğunluklu termo plastik polimer) yanıtının simülesi için olasılığını analiz etmişlerdir. Yapılan simülasyonlar monoton yükleme için iyi sonuçlar üretmiştir. Ama tekrarlı yükleme simülasyonları özellikle sadece malzeme davranışının tekrar üretmiştir. Sünek metal gibi elasto-plastik bir yaklaşım çekme testleri (akma noktasının altında) ve 3 nokta eğilme testleri için iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Başka bir genel sonuç, eğilme momenti, tork veya kompleks yüklemeler dahil durumların simülasyonları için sadece quadratik elemanlar akılcı sonuçlar sağlanabildiğini göstermişlerdir.

Ullah ve arkadaşları (2011) çalışmalarında; quasi-statik eğilme nedeniyle kompozit laminantlarda deformasyon davranışı ve hasarı ile ilgilenmişlerdir. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Deneysel testler büyük sehim eğilmesi altında dokunmuş CFRP malzemenin davranışının karakterizesi için yürütmüşlerdir. İki boyutlu sonlu eleman (FE) modelleri ticari kod Abaqus/Explicit' de uygulamışlardır. Simülasyonların serisi yüksek sehim eğilmesinin durumları için CFRP' de deformasyon davranışı ve hasar çalışması için yapmışlardır. Nümerik simülasyonlar hasar başlangıcı ve büyümesi yapışkan bölge elemanlarının mesh boyutu için uygun olduğunu göstermiştir. Laminantın üst ve alt tabakaları mod-I hatası denendiyse de merkez tabakalar mod-II hata davranışı göstermektedir. Elde edilen simülasyon sonuçları deneysel veri ile uyum içinde olduğunu göstermiştir. Nümerik sonuçlar deneysel olanlarla oldukça yakındır ve nümerik modeller kompozit tabakalarda hata mekanizmalarının çoğaltılması yeteneğinin var olduğunu göstermiştir. FE modelleri deneysel testlerden daha fazla bilgi vermiştir ve hata başlangıcının daha iyi anlaşılması için yardımcı olmuştur. Nümerik simülasyonlar hasar başlaması ve

büyümesi yapışkan bölge elemanlarının mesh büyüklüğü için hassas olduğunu göstermektedir.

Yusof ve Saleh (2010) çalışmalarında; cam fiber takviyeli polimer (GFRP) çubuklar ile kuvvetlendirilmiş ahşap kirişlerin eğilme davranışının araştırılması yapılmıştır. 4 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Sarı Merati türlerin 7 ahşap kirişi test etmişlerdir. Kuvvetlendirilmiş ve kuvvetlendirilmemiş kirişlerini test etmişlerdir. Sonuçlar kuvvetlendirilmiş kirişlerin kontrol kirişinden daha iyi performans göstermiş olduğunu belirtmiştir. Sertlik kuvvetlendirilmiş kirişler için 24-60 % arasında arttığını göstermiştir. GFRP çubuk birleştirme sistemi yeni yapılarda ve ahşap yapıların rehabilitasyon sürecinde kullanılmak üzere iyi bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Irhirane vd. (2009) çalışmalarında; nümerik simülasyonlar 3 nokta eğilme testlerine tabi grafit epoksinin  $[-45/-45/90/0]_3$  davranışının çalışılması incelemiştir. İki yaklaşım izlemiştir. Bunlardan birincisi, enine kayma ile lamine teorisine dayalıdır. Ard arda gelen hatalar, hata modları, hatanın ilerlemesi ve numunelerin geometrik karakteristiklerinin etkisi yükleme anında analizini yapmışlardır. İkinci yaklaşım 3 boyutlu hata kriterleri uygulanmış laminenin sonlu eleman analizine dayalı olduğunu göstermişlerdir. Son olarak, bu iki yaklaşım ile elde edilen sonuçlar bilimsel literatürlerin teorik ve deneysel tahminleri ile karşılaştırmışlardır. 3 boyutlu hata kriteri ile nümerik metot bu laminenin hatası tahminlerin üzerinde olduğunu belirtmişlerdir. Ama ilk hata yükü ve sıralı hataların tahmini deneysel sonuçlar için çok yakın olduğunu göstermişlerdir.

Wisnom ve Atkinson (1997) çalışmalarında; çekme hatasında boyut etkilerini çekme ve 4 nokta eğilme testleri vasıtasıyla incelemiştir. Test metodu olarak 4 nokta eğilme testi ve çekme testini uygulamışlardır. İçten bırakılan tabakalar ile konik çekme numuneleri ölçü uzunluğu arttırılması ile hata gerinimde azalmasını göstermişlerdir. Ölçülü eğilme testleri numune boyutunun arttırılması ile gerinimde azalmayı göstermişlerdir. Bu etkiler gerilme ve eğilme sonuçları arasındaki ilişki Weibull dayanım modeli ile tatmin edici olabilir.

Chung ve Ryou (2009) çalışmalarında; viskoelastik/duyarlılık oranı plastik temel yasasını nonlineer tanımlamak için, fiber takviyeli (levha) kompozitlerin anizotropik/asimetrik ve zaman/bağımlılık oranı mekanik davranış plaka gerilme



koşulları altında geliştirildiğini göstermişlerdir. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Geliştirilen temel yasanın teorik yönüne ek olarak, malzeme parametrelerini elde etmek için deneyler tek eksenli çekme basma testi gibi gerilme gevşeme testlerine dayalı dokuma kumaş kompozitler için yapmışlardır. Nümerik formülasyon ve deneyler ile doğrulamalarını Bölüm II' de tartışmışlardır.

Chung ve Ryou (2009) çalışmalarında; viskoelastik/duyarlılık oranı plastik temel yasasını nonlinear tanımlamak için, fiber takviyeli (levha) kompozitlerin dokunmuş kumaş kompozit için malzeme parametreleri sağlamak için deneysel prosedürlerle beraber Bölüm I' de tartışarak geliştirmişlerdir. Burada, nümerik formülleri geliştirmişlerdir. 3 nokta eğilme test metodunu kullanmışlardır. Doğrulama amacı için, önerilen temel yasaya dayalı sonlu eleman simülasyon sonuçları duyarlılık oranı 3 nokta eğilme testlerinde zamana bağlı yaylanma için deneyler ile karşılaştırmışlardır. Hesaplanmış sonuçlar deneyler ile de kabul etmişlerdir. Daha da genişletilmiş doğrulamalar bütünlüğü için gerekli olsa bile, yeni geliştirilmiş temel yasa fiber takviyeli kompozitlerin hız/zamana bağlı performansının analizi için kullanışlı olabilir olduğunu göstermişlerdir.

Altan ve Topçu (2010) çalışmalarında; sıcaklık dağılımının lineer artırılmasına bağlı alüminyum matris ile kompozit diskin elastik gerilme analizini çalışmışlardır. Teğetsel ve radyal gerilme değerleri dış yüzeye karşı diskin iç yüzeyinde sıcaklığın etkisi altında oluşturulmuş, nümerik ve analitik olarak 2 farklı metod tarafından sağlanmıştır. Analitik analizde, bilgisayar programını termal gerilme değerlerini almak için geliştirmişlerdir. Ama nümerik çalışmayı sonlu elemanlar metodu ile yapmışlardır. Abaqus 6.8 paket programını kullanmışlardır. Bu analizlerin sonucu; gerilme değerleri metodların ikisinde birbirlerini desteklediğini gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, benzer kompozit disklerin gerilme analizi bu sıcaklık dağılımına göre tabi tutulmuştur. Ama azalan kütle ile nümeriği ayrıca incelemişlerdir.

Cui, Wisnom ve Jones (1992) çalışmalarında; tek yönlü cam/epoksinin 3 ve 4 nokta kısa kiriş eğilme testlerinde hata mekanizmalarını incelemişlerdir. 3 ve 4 nokta eğilme testlerini hem analitik hem de deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Bütün 3 nokta eğilme testlerinde, hasar interlaminer kayma hatasına ek olarak yükleme silindirlere altında gözlemişlerdir. 4 nokta eğilme testlerinde, sadece interlaminer kayma hatasını gözlemişlerdir. Bu nedenle, bu 4 nokta eğilme testi interlaminer kayma dayanımını ölçmek için geçerli olduğunu göstermişlerdir. Sonlu eleman

analizlerinden, bu silindir çapı kısa kiriş testlerinde gerilme konsantrasyonlarının belirlenmesinde kritik parametre olduğunu bulmuşlardır. Silindir altındaki hasarı önlemek ve böylece interlaminer kayma dayanımının ölçümü için kısa kiriş testi geçerli bir araç yapmak amacıyla, uygun silindir çaplarını seçmişlerdir. 3 ve 4 nokta eğilme testlerinde hata mekanizmalarını da tartışmışlardır. 3 nokta eğilme testinde yüksek basınç eğilme ve enine gerilmeler silindirin altında hasara neden olabileceğini belirtmişlerdir. 4 nokta eğilme testinde, eğilme ve enine gerilme numune hasarı için yeterince büyük olmadığını göstermişlerdir. Bu yüzden, 4 nokta kısa kiriş eğilme testi interlaminer kayma dayanımının ölçülmesi için geçerli olduğunu söylemişlerdir.

Tamimoto vd (2003) çalışmalarında; cam-fiber takviyeli kompozitler için yeni nümerik model önermişlerdir. Önerilen nümerik model ortotropik shell, izotropik shell ve sırasıyla cam elyaf kumaşı, silis dolgusu ve kalan matris reçineyi temsil eden kiriş elemanları ile yapmışlardır. Önerilen model 3 nokta eğilme koşulları altında hata analizleri için uygulamışlardır. Numunelerin 4 çeşidini kullanmışlardır: Kompozit reçine, nötr ile kompozit reçine, üst ve alt cam fiber kumaş takviye ilaveleridir. Bütün türler için, analitik ve deneysel sonuçların arasında yakın uyuşmasını doğrulamışlardır. Bu önerilen nümerik model cam fiber takviyeli kompozitlerin mekanik davranışlarını değerlendirmek için etkin olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak; çalışmalarındaki şekillerde analitik ve deneysel gerinim-sehim eğrisini göstermişlerdir. Bu şekilde gösterdikleri gibi, bütün tiplerde yakın uyuşma olduğunu göstermişlerdir.

Song vd (2010) çalışmalarında; karbon takviyeli alüminyum tabakalarının darbe performansı (CARAL) deneyler ve nümerik simülasyonlar tarafından incelemişlerdir. Darbe test metodunu kullanmışlardır. Dinamik non lineer geçici analizler sonlu eleman analiz yazılımı ABAQUS kullanılarak da gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarını ve nümerik sonuçlarını darbe yük- zaman geçmişi CARAL' ın darbe performansını araştırmak için uygulamışlardır. Nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile benzer eğilim göstermekte olduğunu belirtmişlerdir.

### **3. KOMPOZİT MALZEMELER**

Kompozit malzemeler; iki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede toplayarak veya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi sonucu oluşan malzemelerdir. Kompozit malzemenin kullanılabilceği parçalar tasarlanırken, parçanın hangi alanda kullanılacağı ve kullanıma yönelik spesifik gereksinimlerin neler olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Kompozit malzemeler; yüksek mukavemet dayanımları ve hafif olma gibi özellikleriyle uzay sanayi, otomotiv sanayisi, tıp sektörü ve spor aletlerinde geniş yelpazede kullanılmaktadır. Hafif olması enerji ve yakıt tasarrufu açısından büyük avantaj sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme ve bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak daha yoğun bir matris malzeme bulunmaktadır. Burada fiberler kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemesini önlemede önemli rol üstlenmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin diğer bir amacı da, fiberleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü fiberler arasında homojen dağıtmaktır.

Teknolojinin hızla ilerlemesi sonucu, daha mukavemetli, daha hafif ve daha sert malzemelere ihtiyaç, gün geçtikçe artmıştır. Bu sebepten 20. Yüzyılın ikinci yarısında bu tip malzemelerin elde edilmesi için yapılan çalışmalar hızlanmış ve değişik özelliklerdeki malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır (Topçu ve Karamolla, 1987).

#### **3.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları**

Kompozit malzemelerin günümüzde mühendisler, tasarımcılar ve üreticiler tarafından yaygın olarak kullanılmasındaki en önemli nedeni çok çeşitli performans avantajlarıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkanı tanır. Kompozit malzemelerin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz.

- Yüksek mukavemet
- Yüksek rijitlik
- Kolay şekillendirme
- Korozyona karşı dayanıklılık
- Aşında direnci
- Hafiflik
- Isıya ve ateşe karşı direnci
- Elektriksel özellikler
- Yorulma ömrü
- İmalat kolaylığı

Kompozit malzemelerin avantajları yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar;

- Ham maddenin pahalı olması
- Üretim güçlüğü
- Sınırlı servis (tamir-bakım-geri kazanım)
- Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz olmaları

### **3.2 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları**

Kompozit malzemeler git gide artan oranlarda ve yeni iş sahalarında görmek mümkündür. Kompozit malzemelerin farklı özellikleri ve avantajlarından dolayı çok farklı sektörlerde görülmektedir. Bu sektörler; havacılık-uzay-savunma sanayinde, denizcilik sanayinde, spor-eğlence sektöründe, askeri uygulamalarda, elektrik-elektronik sektöründe, otomotiv sanayinde ve tarım-gıda sektöründe olmak üzere geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptirler.

### **3.3 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri**

Kompozit malzemelerin, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre

- Polimer matrisli kompozitler
- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler

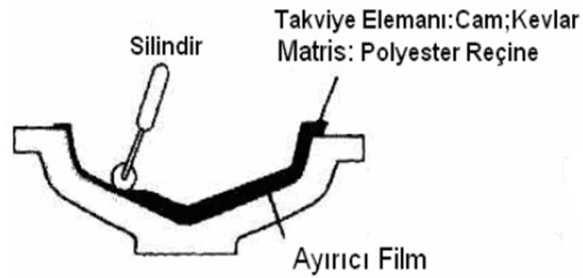
olarak sınıflandırabiliriz. Yapı şekillerine göre;

- Fiberli kompozitler
- Levhasal kompozitler
- Partikül kompozitler
- Tabakalı kompozitler

olarak sınıflandırabiliriz.

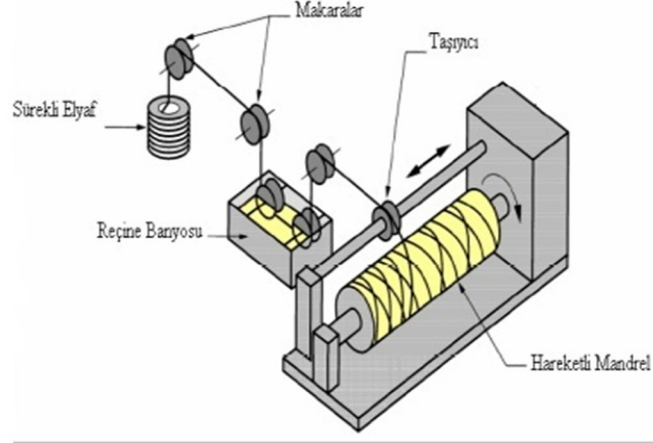
Bu tez çalışmasında kullanılacak olan kompozit malzeme polimer matrisli olduğundan dolayı bu kısımda polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ele alınacaktır. İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için bir çok yöntem bulunmaktadır.. Bu yöntemlerden başlıcaları;

- **Elle yatırma yöntemi:** Genellikle keçe, örgü, kumaş formundaki elyaflar takviye malzemesi olarak seçilir. Bunlar açık bir kalıba yatırılıp yüzeyine reçine emdirilerek uygulanır. Şekil 3.1’ de elle yatırma işlemi gösterilmiştir (Eker, 2008).



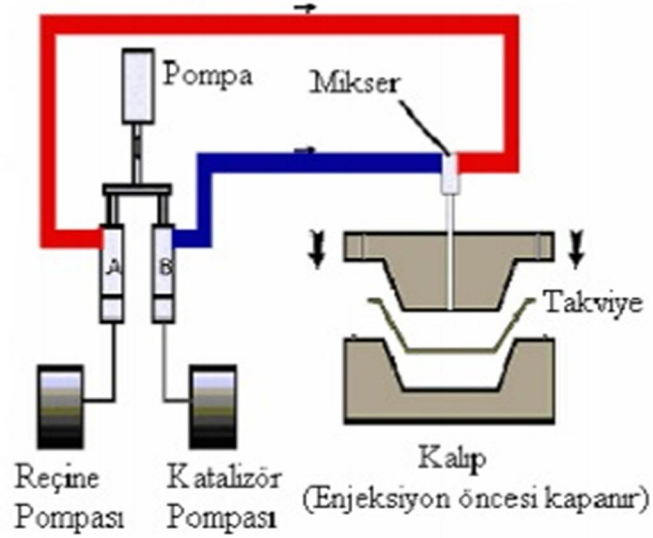
Şekil 3.1 : Elle yatırma yöntemi

- **Elyaf sarma yöntemi:** Sürekli elyafların bir bağlayıcı ortamından geçirildikten sonra dönel mandrelle önceden belirlenmiş sarım geometrisine uygun sarılması yöntemiyle yapılan işleme denir. Bu işlem Şekil 3.2’ de gösterilmiştir (Eker, 2008).



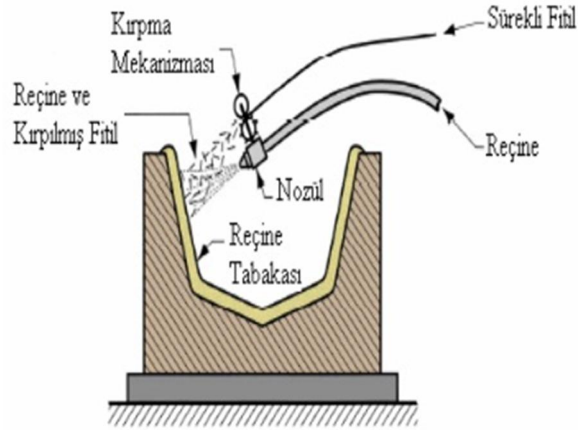
Şekil 3.2 : Elyaf sarma yöntemi

- **Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi:** Kalıp ünitesine tüm takviye malzemelerinin yerleştirildikten sonra uygun sıcaklık ve basınçla reçinenin enjekte edilmesi işlemidir. Şekil 3.3’ de reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi gösterilmiştir (Eker, 2008).



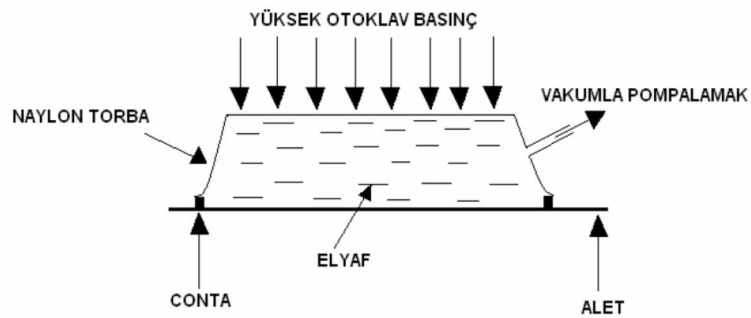
Şekil 3.3 : Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi

- **Püskürtme yöntemi:** Elyaf püskürtme yönteminde sürekli beslenen fitil kesici bıçaklardan geçerek kırıldıktan sonra katalize edilmiş reçine ile beraber jelkot uygulanmış kalıp yüzeyine püskürtülür ve oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılır. Yapılan bu işlemler Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Püskürtme yöntemi

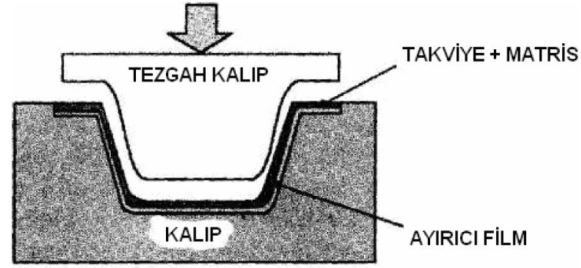
- **Otoklav yöntemi:** Önce üretimi yapılacak numune için laminasyon şemasına uygun olarak tabakalama ve vakum torbalaması yapılır. Daha sonra hazırlanan malzeme bir otoklav fırınının içine yerleştirilerek sıcaklık altında pişme ve katılaşma gerçekleşir. Yapılan işlem Şekil 3.5’ te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Otoklav yöntemi (Chawla, 1987)

- **Hazır kalıplama yöntemi:** Hazır kalıplama bünyesinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi komplike şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları kalıplama

bileşimlerinin buzdolaplarının saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır. Hazır kalıplama yöntemi Şekil 3.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Hazır kalıplama yöntem

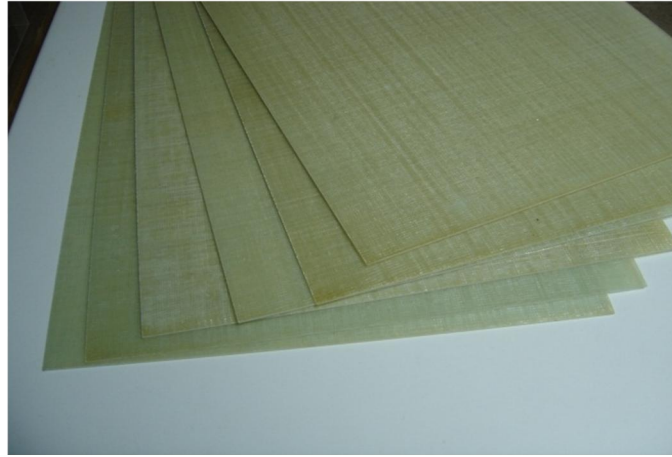
### 3.4 Kompozit Malzemenin Üretimi

Bu tez çalışmasında kullanılan cam elyaf/epoksi kompozit malzemenin imalatı bölümümüz laboratuvarında bulunan Şekil 3.7’ de görüldüğü gibi kompozit malzeme üretim presi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakalar Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen verilere ve literatür araştırmalarına göre Cam elyaf düzeni [0/90] tabakalı olarak üretilmesine karar verilmiş olup plakalar bu düzende üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalar Şekil 3.8’ de gösterilmiştir. Matris malzemesi için epoksi 100/80 Ciba Geigy, Bisphenol A, CY-225 epoksi ve Ciba Geigy, Anhydride, HY-225 sertleştiricinin karışımını içermektedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde kullanılan tüm numuneler, ön görülen geometrik parametrelere bağlı olarak üretilen kompozit plakalardan su jeti ile Kardeş Cam firmasında kesilmiştir. Kesim yöntemi olarak su jetinin kullanılması ile numunelerde oluşabilecek kesim hataları yok edilmiştir. Su jeti kesimi ile yapılan işlem Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.

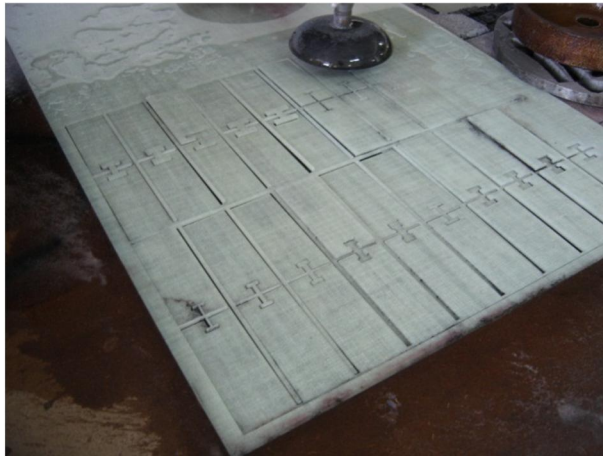




Şekil 3.7 : Üretim presi



Şekil 3.8 : Üretilen kompozit plakalar



Şekil 3.9 : Su jeti ile numune kesimi

#### 4. KOMPOZİT MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Mühendisler, kendi uzmanlık alanlarında tasarım yapmaktadırlar ve bu tasarımlarını gerçek hayatta uygulayabilmek için çeşitli malzemelerden faydalanmaktadırlar. Yapmış oldukları tasarımların işlevsel olabilmesi amacıyla kullanacakları malzemeler ile ilgili tüm mekanik özellikleri bilmek zorundadırlar. Her ne kadar kullandıkları malzemeler ile ilgili bilgilere ulaşabilseler de, üretici firmanın verdiği aynı tip ürün için farklı mekanik özellikler karşılaştırılabilmektedir. Bunun en temel sebebinin ise malzemenin üretimi esnasında oluşan farklı içyapı hatalarının olduğunu belirtmektedirler.

Yapmış oldukları tasarım sonucunun, istenen malzeme özelliklerini ne ölçüde sağlandığını, her üretim aşamasından önce tespit etmeleri gerekmektedir. Bu amaçla malzemelerin mekanik özellik tespiti için tahribatlı testler ve tahribatsız testler olmak üzere 2 temel kategoride deneylerin yapılması gerekebilmektedir. Tahribatlı testler, uygulaması kolay ve sonuçlara hızlı ulaşmayı sağlayan ancak deney sonunda malzemenin bir daha üretimde kullanılamayacak şekilde yıpratılan deneylerdir.

En güncel kullanılan tahribatlı test yöntemleri çekme deneyi, basma deneyi, eğilme deneyi, darbe deneyi, sertlik deneyi ve yorulma deneyleridir. Bu deneylerin amacı; Farklı yükleme durumlarında malzemenin özelliğini tespit etmektir, bunun yanında her deney tipinin kendine göre ayrı standartları mevcuttur.

Üretilen cam elyaf-epoksi kompozit plakanın ilk önce hacim oranları tespit edilip yoğunluğu bulunmuştur. Bunun için ilk olarak kompozit plakanın imalatından önce fiber malzemesi olarak kullanılan cam elyaflar tartılmıştır. Matris malzemesinin ağırlığı, imalatı yapılan kompozit plakanın toplam ağırlığından fiber malzemesinin ağırlığı çıkartılarak hesaplanmıştır. Toplam kompozit plakanın ağırlığı  $m_T = 2900$  g ve cam elyafların ağırlığı  $m_f = 1460$  g olarak ölçülmüştür. Yoğunlukları ve ağırlıkları bilinen matris ve fiberlerin hacimleri (4.1) eşitliğinden ve hacim oranları ise (4.2) ve (4.3) eşitliklerinden hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.1)$$

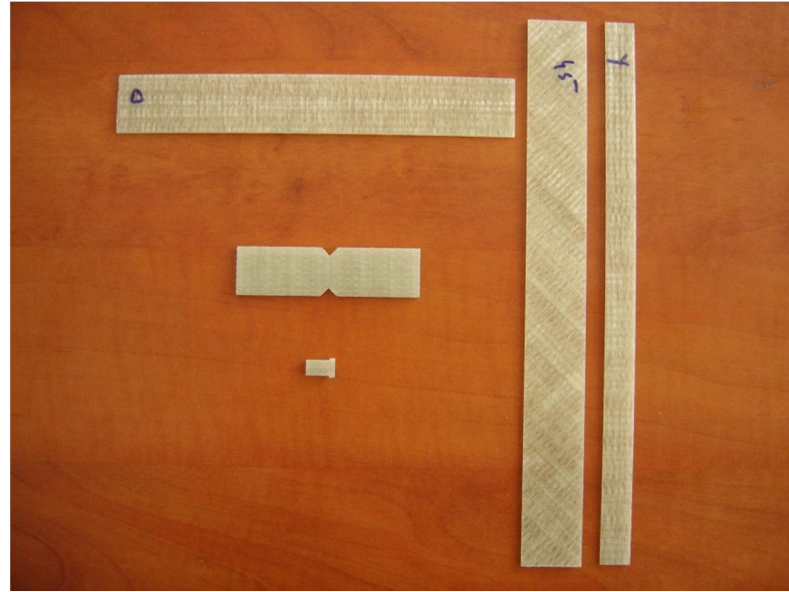
$$\%V_f = \frac{V_f}{V_T} \cdot 100 \quad (4.2)$$

$$\%V_m = \frac{V_m}{V_T} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Kompozit plakada cam elyafların hacim oranı,  $V_f = 0,59$  ve matrisin hacim oranı,  $V_m = 0,41$ 'dir. Bu durumda kompozit plaka malzemesinin yoğunluğu ise (4.4) eşitliğinden  $\rho_K = 2,026 \text{ g/cm}^3$  olarak bulunmuştur.

$$\rho_K = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m \quad (4.4)$$

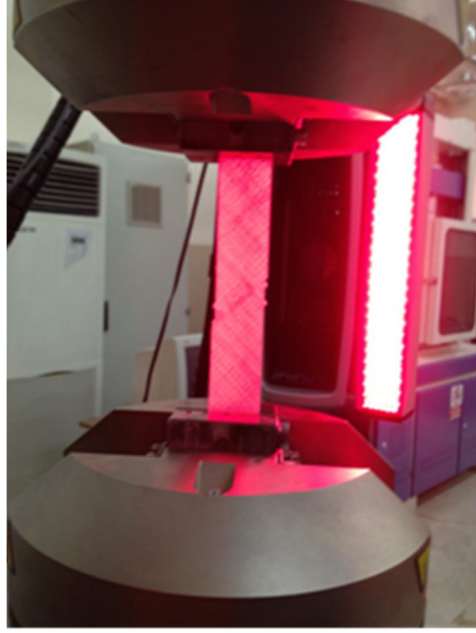
Cam elyaf-epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri çekme, basma ve kayma yükleri altında ASTM standartlarına göre belirlenmiştir. Kompozit plaka, tek yönlü dokunmuş cam fiber kumaşlarından yapıldığı için mekanik özellikler iki farklı yönde değişmektedir. Fiber doğrultusundaki yön (1) yönü, fibere dik olan yön (2) yönü olarak kabul edilmiştir. Kompozit plakanın 1-2 düzlemindeki mekanik özellikleri her mekanik özellik için üçer adet numuneler kullanılarak elde edilmiş ve ortalama özellikler tespit edilmiştir. Şekil 4.1'de mekanik özelliklerin tespiti için gerekli olan numunelerden örnekler gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Mekanik özelliklerin tespiti için gerekli olan numuneler

Mekanik özellik tespiti için yapılan deneyler, ASTM standartlarına göre  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  oda sıcaklığında ve  $\%50 \pm 10$  bağıl nem koşullarında yapılmıştır. Deneyler, 50 kN yük kapasiteli Instron 8801 cihazında yapılmıştır. Şekil değiştirmeler, Şekil 4.2'de

gösterildiği gibi çift yönlü video ekstansometre ile tespit edilmiştir. Video ekstansometre, numunelerin yüzeyine strain gauge yapıştırılmasına gerek kalmadan karşıdan ve temas etmeden şekil değişimlerini tespit etmektedir. Numune üzerinde özel markalama kalemiiyle 1 ve 2 yönünde noktalar oluşturulur ve bu oluşturulan noktalar arasındaki mesafelerin deney esnasında ne kadar uzadığı veya kısaldığı video ekstansometre vasıtasıyla tespit edilir. Tespit edilen kısalma veya uzama miktarlarından malzemenin o yönlerine ait şekil değiştirme miktarlarına ulaşılabilir.

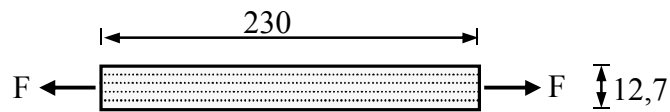


Şekil 4.2 : Video ekstansometre ile deneyin yapılışı

#### 4.1 Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

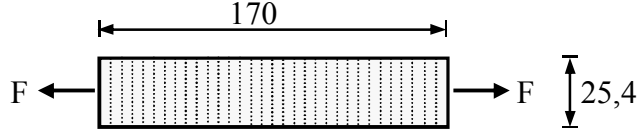
Aşağıda verilen ilgili ASTM standartlarına göre deney numuneleri boyutlandırılmış ve statik çekme, basma ve kayma yükleri altında ilgili özellikler tespit edilmiştir.

ASTM 3039–76 standardına göre, Boyuna elastisite modülü ( $E_l$ ), Poisson oranı ( $\nu_{l2}$ ) ve boyuna çekme mukavemeti ( $X_t$ ), Şekil 4.3’de gösterilen boyutlandırılmış numune üzerinden tespit edilmiştir. Çekme hızı 0,5 mm/d ve kalınlık standart aralığı (0,762–3,275) olduğu için  $[0]_6$  yönlü alınmıştır.



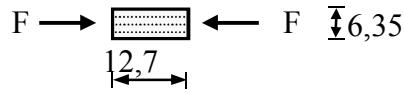
Şekil 4.3 :  $[0]_6$  çekme numunesi

Enine elastisite modülü ( $E_2$ ) ve enine çekme mukavemeti ( $Y_t$ ) ASTM 3039-76 standardına göre, Şekil 4.4’de gösterilen boyutlandırılmış numune üzerinden tespit edilmiştir. Çekme hızı 0,5 mm/d ve kalınlık standart aralığı (0,762–3,275) olduğu için  $[90]_6$  yönlü alınmıştır.



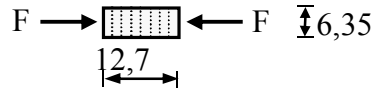
Şekil 4.4 :  $[90]_6$  çekme numunesi

ASTM 3410–75 standart test metoduna göre, statik basma yoluyla tek yönlü Şekil 4.5’deki numuneden boyuna basma mukavemeti ( $X_c$ ) özelliği ölçülmüştür. Basma hızı 0,5 mm/d ve kalınlık standart aralığı (3,2–4,0) olduğu için  $[0]_{16}$  yönlü alınmıştır.



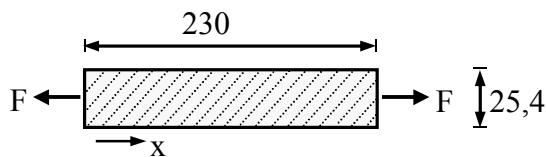
Şekil 4.5 :  $[0]_{16}$  basma numunesi

Enine basma mukavemeti ( $Y_c$ ) özelliği Şekil 4.6’da gösterilen boyutlandırılmış numune üzerinden tespit edilmiştir. Basma hızı 0,5 mm/d ve kalınlık standart aralığı (3,2–4,0) olduğu için  $[90]_{16}$  yönlü alınmıştır.



Şekil 4.6 :  $[90]_{16}$  basma numunesi

ASTM 3518–76 standart test metoduna göre, asal eksenini  $45^\circ$  olan Şekil 4.7’deki gibi numuneler kullanılarak Kayma modülü ( $G_{12}$ ) özelliği tespit edilmiştir. Kayma modülü çekme yönündeki şekil değiştirmelerin ölçümüyle hesaplanmıştır (Jones 1999). Çekme hızı 0,5 mm/d ve kalınlık standart aralığı (0,762–3,275) olduğu için  $[45]_6$  yönlü alınmıştır.



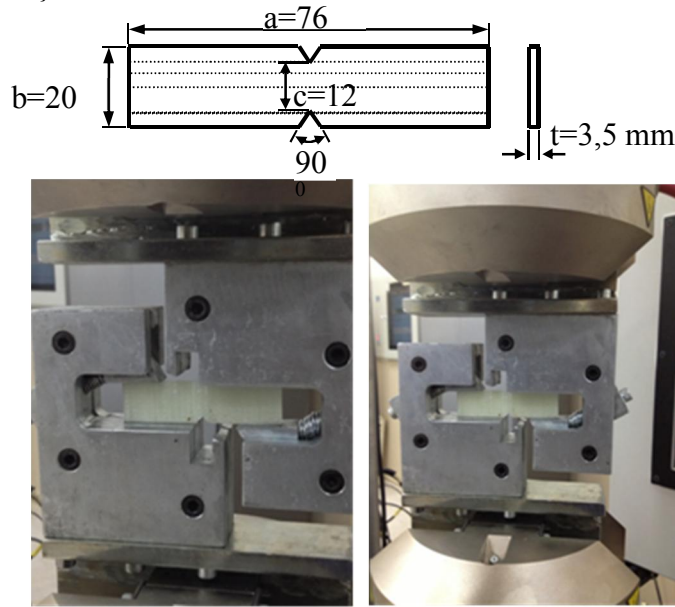
Şekil 4.7 :  $[45]_6$  kayma numunesi

Kayma numunesinin x yönündeki veya çekme yüklemesi yönündeki şekil değiştirmesi dolayısıyla elastisite modülü tespit edilerek Jones'a göre (4.5) denklemiyle;

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \text{ (MPa)} \quad (4.5)$$

hesaplanmıştır (Jones1999).

ASTM D 5379 standart test metoduna göre Iosipescu kayma test metodu kayma mukavemetini (S) belirlemek için kullanılmıştır. Bu mekanik özellik Şekil 4.8'de gösterilen boyutları verilmiş numune üzerinden ve Iosipescu kayma test aparatından elde edilmiştir. Basma hızı 2 mm/d ve kalınlık standart aralığı (3,0–4,0) olduğu için  $[0]_{16}$  yönlü alınmıştır.



Şekil 4.8 : Iosipescu yükleme aparatı ve numune boyutları

Iosipescu yükleme aparatı vasıtasıyla numunenin çentikleri arasında eğilmenin bulunmadığı saf bir kayma yükü oluşturulmuştur. Yükleme aparatında meydana gelen maksimum kayma yükünü kullanarak kayma akma mukavemeti denklem (4.6)' dan hesaplanmıştır (Gibson 1994).

$$S = \frac{F_{max}}{t_i c} \text{ (MPa)} \quad (4.6)$$

Kompozit malzemenin oda şartlarındaki deneylerinden elde edilen mekanik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Cam-elyaf-epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri

$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_{12}$ (MPa)	$\nu_{12}$	$X_t$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$X_c$ (MPa)	$Y_c$ (MPa)	$S$ (MPa)
41600	11000	2900	0.20	772	80	290	75	85

## 4.2 Deney Cihazının Tanıtımı

### 4.2.1 8801 Servo hidrolik test cihazı

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler, Şekil 4.9’da gösterildiği gibi Instron 8801 Servo Hidrolik kontrollü 50 kN yük kapasiteli test cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.9 : 8801 Instron statik/dinamik test cihazı

Cihazın bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

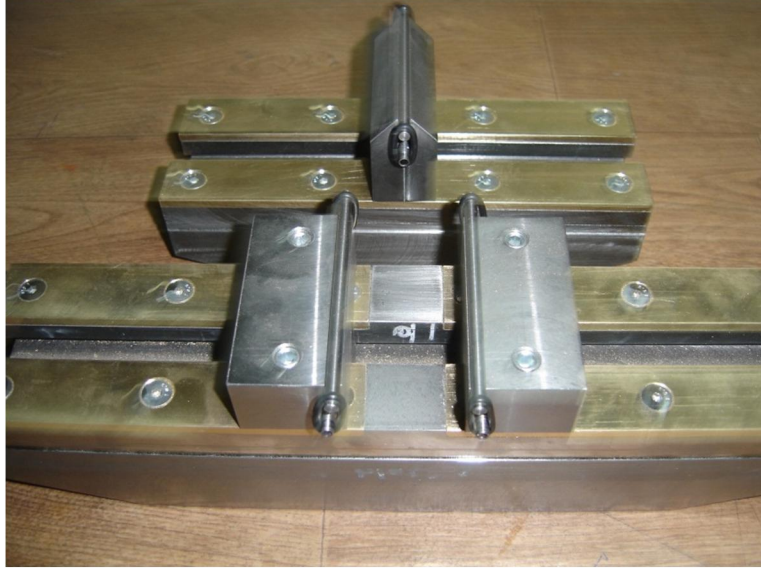
- Eksenel Servohidrolik Dinamik Test cihazı, 207 Bar (3000 psi) hidrolik basınca sahip, çift sütunlu, sabit alt tablalı ve ayarlanabilir çapraz kafaya sahiptir. Servo valf 20 lt/d kapasitesindedir.

- Cihaz 27 lt/d debi kapasiteli hidrolik güç ünitesine sahiptir. Hidrolik güç ünitesi 207 bar basınçta ve en yüksek çıkış basıncı 230 bar'dır.
- $\pm 50$  kN kapasiteli aktivatöre sahip ve aktivatör stroku minimum  $\pm 75$  mm'dir. Elektronik hareketlendirici kontrol birimine sahip ve aktivatör çubuğunda bir deplasman transdüsörü (LVDT) bulunmaktadır.
- Çapraz kafa ayarlaması hidrolik kaldıraçla yapılmakta ve hidrolik kilitlere sahiptir. Loadcell üst çapraz kafaya monte edilmiştir.
- Cihaz  $\pm 100$  kN yorulma hidrolik kama çenelere (wedge grip) ve hidrolik çene kontrol ünitesine sahiptir. 0-15 mm kalınlığındaki düz numuneleri tutmak için 50 mm genişliğinde düz testere dişli çene yüzeylerine ve 6-11 mm çapındaki yuvarlak numuneleri tutmak için çene yüzeylerine sahiptir.
- Cihaz çevresel kabine sahiptir. Sıcaklık aralığı  $-70^{\circ}\text{C}$  ve  $+350^{\circ}\text{C}$  değerlerini sağlamaktadır.

#### **4.2.2 Üç nokta eğilme test aparatı**

Deneylerde kullanılacak üç nokta eğilme test aparatı ASTM D 790-D 6272 standartlarına göre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yapım aşamasında olan üç nokta eğilme test aparatı Şekil 4.10' da gösterilmiştir. Yapılan deneyler, kendi tarafımızdan tasarlanmış olan deney aparatları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11' de görüldüğü gibi Instron hidrolik test cihazının alt kısmına destek aparatı bağlanmıştır ve hareketli üst konsola ise eğilme ucu yerleştirilmiştir. Deneylerde eğilme aparatı 1 mm/d' lik sabit bir çene hızında yüklenmiştir.





Şekil 4.10 : Yapım aşamasındaki üç nokta eğilme test aparatı



Şekil 4.11 : Üç nokta eğilme test aparatının Instron hidrolik test cihazına bağlanmış durumu

#### 4.2.3 Video ekstensometre

Deneyle sırasında aksenal ve yanal yüzeylerde oluşan birim uzamanın/daralmanın doğru olarak ölçülmesi gerekmektedir. Şekil 4.12'de görülen temassız video ekstensometre ile deney sırasında birim uzamanın sağlıklı bir şekilde bulunması sağlanmıştır.



Şekil 4.12 : Video ekstansometre

Video ekstansometrenin teknik özellikleri aşağıda ve Tablo 4.2’de verilmektedir.

- Farklı FOV (Field Of View) ile çeşitli uygulamalarda (Plastik, metal, kompozit, tekstil, biomalzemelerde) kullanılabilir.
- Bluehill Malzeme Test Yazılımına sahiptir.
- Eksenel ve transverse (yanal) gerinim ölçme özelliği ile poisson oranı ve young modülünü tespit eder.
- Kolay kurulum ve operasyon olanağı sağlar.
- Yüksek doğruluk içerir.
- İstenen ölçüde gage uzunluğu seçimine izin verir.
- Temassız ölçüm özelliği sayesinde test malzemesinde straingage ve tırnaklı ekstansometrelerin ortaya çıkardığı hasar oluşumu önlenmektedir.
- Yüksek uzamalarda ölçüm yapabilme özelliği vardır.
- Straingagelerde yüksek uzama durumlarında straingagelerin bozulması sorunu burada oluşmamaktadır.
- Temas halindeki ekstansometrelerde sıkıştırma kuvveti ile tırnakların kayması sonucu yanlış ölçüm, video ekstansometrelerde oluşmamaktadır.

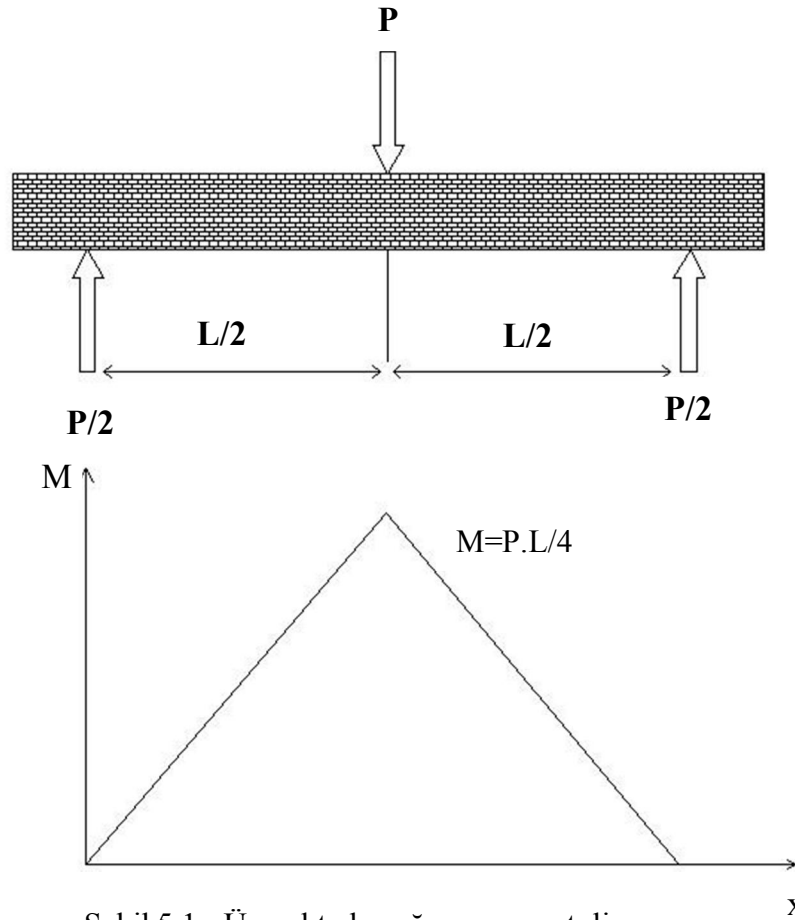
Tablo 4.2 :Video ekstansometrenin teknik özellikleri

	<b>Eksenel Ölçüm</b>	<b>Yanal Ölçüm</b>
Rezolasyon	0,5 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}$
Doğruluk	$\pm 2,5 \mu\text{m}$	$\pm 2,5 \mu\text{m}$
Data transfer hızı	50 Hz	50 Hz
Maksimum takip hızı	150 mm/dk	

## 5. ÜÇ NOKTA EĞİLME TEORİSİ

### 5.1 İzotropik Malzemelerde Üç Nokta Eğilme Durumu

Üç nokta eğilme deneyi, eğilme testleri içerisinde en yaygın kullanılan deney yöntemidir. Deneyin temel prensibi, kullanılan malzemeyi “kiriş” modeli olarak kabul etmesidir. Kiriş denklemi ideal moment durumuna göre çıkarılmasından dolayı, kirişte oluşan kayma gerilmesinin normal gerilmelere göre ihmal edilebilir düzeyde kalması istenmektedir. Bu sebeple malzemenin sabit kesit alanlı olması ve uzunluk değerinin en geniş değerine oranla en az 16 katı büyük olması gerekmektedir [ASTM D-790]. Test numunesi uzunlamasına yatay bir pozisyonda destekler üzerine konurken, üzerine tam ortasından kuvvet uygulanır. Üç noktalı eğme deneyine ait moment ve uzunluk diyagramı şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Üç noktadan eğme moment diyagramı

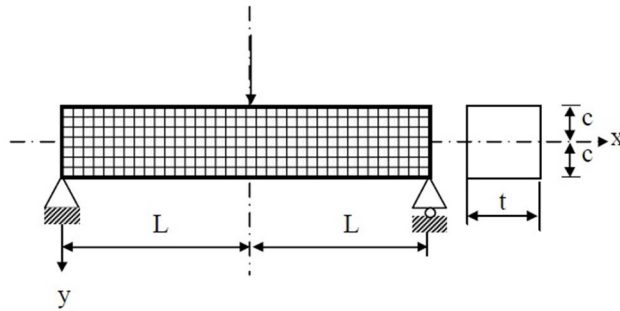
Deney boyunca, P kuvveti arttırılırken, malzemenin tam ortasında oluşan sehım değeri ölçülür. Ölçülen değerler sonucu kuvvete karşılık gelen sehım grafiği elde edilir. Bu ölçümler, tüm malzeme için en yüksek sehım ve momentin oluştuğu orta noktasında yapılır. Mukavemet bilgileri kullanarak, üç noktalı eğilme deneyi için gerekli hesaplamalar denklem (5.1)' deki gibi elde edilir.

$$M = \frac{P.L}{4} \quad \sigma_{\max} = \frac{M_{\max} c}{I} \quad (5.1)$$

## 5.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Üç Nokta Eğilme Durumu

Tabakalı kompozit yapılar, en eski dönemlere dayanan yaygın kullanım alanına sahiptirler. Farklı fiber doğrultularına sahip tabakaların bileşimi ile metallere göre çok farklı mukavemet değerleri elde edilir.

### Genel Formülasyon;



Şekil 5.2 : Ortasından tekil yüke maruz basit kiriş

Düzlem gerilme durumu için Lekhnitskii (Lekhnitskii, 1981) tarafından verilen denge denkleminden elde edilen denklem denklem (5.2)' de verilmektedir.

$$a_{22} \frac{\partial^4 F}{\partial x^4} - 2a_{26} \frac{\partial^4 F}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 F}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16} \frac{\partial^4 F}{\partial x \partial y^3} + a_{11} \frac{\partial^4 F}{\partial y^4} = 0 \quad (5.2)$$

Burada F gerilme fonksiyonudur. Denklem (5.3)' de denge sabitleri Jones (Jones, 1975) tarafından verilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$

Anizotropik elastisite teorisinde düzlem gerilme durumunda gerilme-şekil değiştirme ifadesi denklem (5.4)' de verilmiştir ,

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= a_{11} \cdot \sigma_x + a_{12} \cdot \sigma_y + a_{16} \cdot \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= a_{12} \cdot \sigma_x + a_{22} \cdot \sigma_y + a_{26} \cdot \tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= a_{16} \cdot \sigma_x + a_{26} \cdot \sigma_y + a_{66} \cdot \tau_{xy}\end{aligned}\quad (5.4)$$

Burada  $a_{ij}$  uygunluk matrisinin bileşenidir. Bu matrisin elemanları denklem (5.5)' de gösterilmiştir:

$$\begin{aligned}a_{11} &= S_{11} \cdot \cos^4\theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + S_{22} \cdot \sin^4\theta \\ a_{12} &= S_{12} \cdot (\sin^4\theta + \cos^4\theta) + (S_{11} + S_{12} - S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta \\ a_{22} &= S_{11} \cdot \sin^4\theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + S_{22} \cdot \cos^4\theta \\ a_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin\theta \cdot \cos^3\theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \cos\theta \cdot \sin^3\theta \\ a_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \cos\theta \cdot \sin^3\theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin\theta \cdot \cos^3\theta \\ a_{66} &= 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta - S_{66} (\sin^4\theta + \cos^4\theta)\end{aligned}\quad (5.5)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}, \quad S_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

Şekil değiştirme bileşenleri denklem (5.6)' daki gibidir;

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}\quad (5.6)$$

Problemin çözümü esnasında, araştırmanın basitleştirilmesi için modelin yarısı tanımlanmıştır. Çünkü gerilme bileşenleri orta eksene göre simetriktir. Bu giriş için sınır koşulları denklem (5.7)-(5.8)' de verilmiştir;

$$\begin{aligned}y = \bar{+}c \text{ için } \sigma_y &= 0 \\ y = \bar{-}c \text{ de } \tau_{xy} &= 0\end{aligned}\quad (5.7)$$

$$\begin{aligned}
x=0' \text{ da } \int_{-c}^c \tau_{xy} t \, dy &= \frac{P}{2} \\
x=0' \text{ da } \int_{-c}^c \sigma_x t \, dy &= 0 \\
x=0' \text{ da } \int_{-c}^c \sigma_x t y \, dy &= 0
\end{aligned} \tag{5.8}$$

$t \rightarrow$  kiriş kalınlığı.

Gerilme fonksiyonu (F) yöneten farklı denklem ve sınır şartları karşılamak amacıyla polinom şeklinde denklem (5.9)' da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
F &= \frac{d_4}{6} xy^3 + \frac{e_4}{12} y^4 + \frac{a_2}{2} y^2 + b_2 xy \\
e_4 &= \frac{\bar{a}_{16}}{\bar{a}_{11}} d_4 = m d_4
\end{aligned} \tag{5.9}$$

Gerilme bileşenleri bu fonksiyondan bulunur.

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = xy d_4 + m y^2 d_4 + a_2 \\
\sigma_y &= \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0 \\
\tau_{xy} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\frac{d_4}{2} y^2 - b_2
\end{aligned} \tag{5.10}$$

Sınır koşullarından;

$$d_4 = \frac{P}{2I}, \quad e_4 = \frac{Pm}{2I}, \quad b_2 = -\frac{Pc^2}{4I}, \quad a_2 = -\frac{Pmc^2}{6I} \tag{5.11}$$

$I \rightarrow$  Kiriş kesitinin atalet momenti.  $I = (2/3)t c^3$

Böylece elastik gerilme bileşenleri denklem (5.12) gibi olur;

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{P}{2I} (xy + my^2 - \frac{r c^2}{3}) \\
\sigma_y &= 0 \\
\tau_{xy} &= \frac{P}{4I} (c^2 - y^2)
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Atalet momentini yerine koyarsak elde edilen gerilme değerleri denklem (5.13)' de verilmiştir;

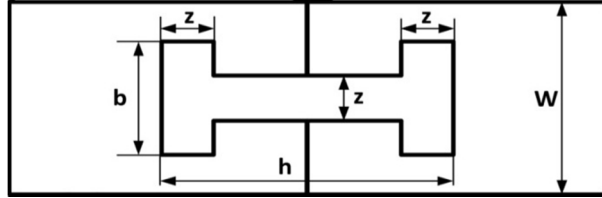
$$\sigma_x = \frac{3P}{4t(h/2)^3} (xy + my^2 - \frac{r c^2}{3})$$

$$\sigma_y = 0 \tag{5.13}$$

$$\tau_{xy} = \frac{3P}{8t(h/2)^3} (c^2 - y^2)$$

## 6. ÜÇ NOKTA EĞİLME YÜKÜ ALTINDA BİRLEŞTİRME ELEMANININ OPTİMİZASYONU

Geometrik boyut optimizasyonu yapılacak birleştirme elemanı ile yapılan alın birleştirme modeli Şekil 6.1’ de gösterilmiştir. yapılacak deneysel çalışmada numunelerin tam boyu 200 mm ve genişliği  $W=40$  mm olarak alınmıştır. Birleştirme elemanı iki yarım numune arasında kilitleme şeklinde bağlantı yapıldığından dolayı kilit bağlantı elemanı olarak adlandırılmıştır. Dolayısıyla birleştirme elemanının yük taşıma kapasitesi bağlantı veya hasar yükü olarak ele alınmıştır. Değişik ölçü değerlerinin etkilerini incelemek amacıyla  $b/W$ ,  $z/b$  ve  $h/2W$  oranlarının değerleri 0,3 ile 0,7 arasında değiştirilmiştir. Burada kilit genişliğinin yarı numune genişliğine oranı ( $b/W$ ), kilit orta genişliğinin kilit genişliğine oranı ( $z/b$ ) ve kilit boyunun yarı numune genişliğine oranıdır ( $h/2W$ ). Kilit bağlantı elemanının uç ve orta genişliği  $z$  ile, boyu veya yüksekliği  $h$  ile ve genişliği  $b$  ile gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Sonlu Elemanlar Metodu ile analizi yapılacak I profilli alın birleştirilmiş numuneye ait modelin şematik görünümü

Tablo 6.1’ de I profilli kilit bağlantı eleman geometrisinin belirlendiği ölçüler verilmiştir. Tabloda verilen değerlerle farklı boyutlarda I profilli kilit bağlantı elemanları yapılmıştır. Ancak birleştirme elemanının genişleyen  $z$  boyutlarında yarı numune ile kilitlenme için gereken geometrik form oluşmadığı için bazı oranlarında üretim yapılmamıştır. Dolayısıyla optimizasyon, üretimi mümkün olan tüm oranlarda gerçekleştirilmiştir.



Tablo 6.1 : Örnek model uygulaması için ölçüm boyutlarının alındığı tablo

Boyut Oranları		b/W					Boyut (mm)
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	
		12	16	20	24	28	<b>b</b>
z/b	0,3	3,6	4,8	6	7,2	8,4	<b>z</b>
	0,4	4,8	6,4	8	9,6	11,2	
	0,5	6	8	10	12	14	
	0,6	7,2	9,6	12	14,4	16,8	
	0,7	8,4	11,2	14	16,8	19,6	
h/2W	0,3	24					<b>h</b>
	0,5	40					
	0,7	56					

### 6.1 Birleştirme Elemanının Deneysel Optimizasyonu

Üç nokta eğilme deneyleri, Şekil 6.2’de gösterilen 50 kN yük kapasiteli Instron 8801 cihazında yapılmıştır. Tüm numuneler 1 mm/d’lık sabit bir çene hızında yüklenmiştir. Her model için bağlantı (hasar) yükü-kilit deplasman grafikleri çizdirilmiştir. Uygulanan yükte bir miktar düşüş meydana geldiği gözlemlendiği anda deney sonlandırılmıştır. Numuneye ait hasar yükü uygulanan yükteki ilk düşümde meydana gelmiştir.

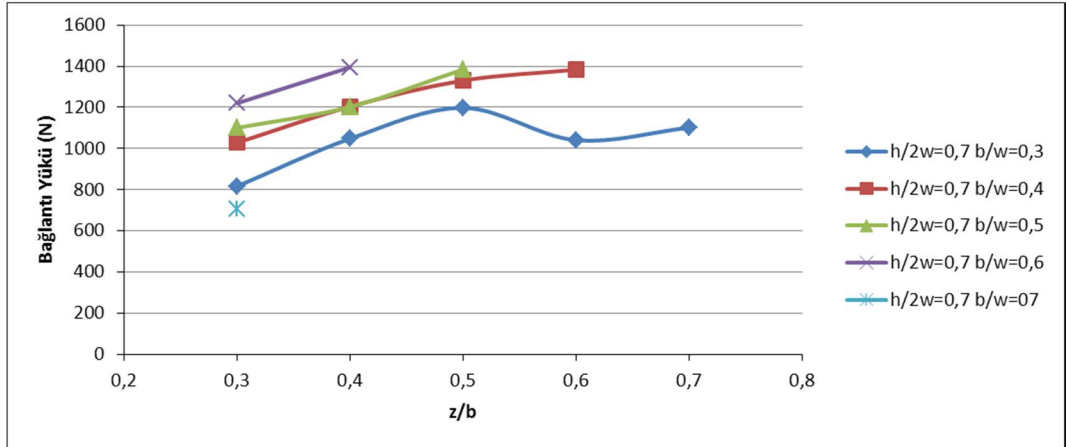
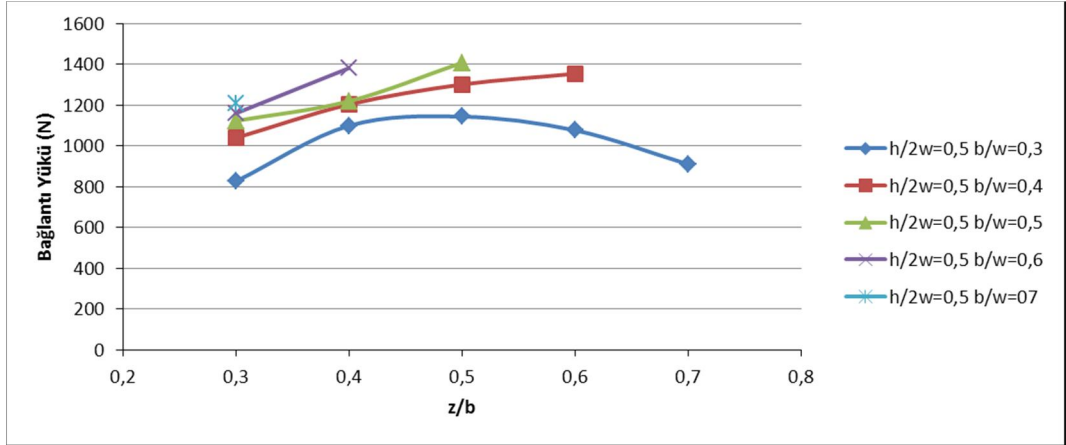
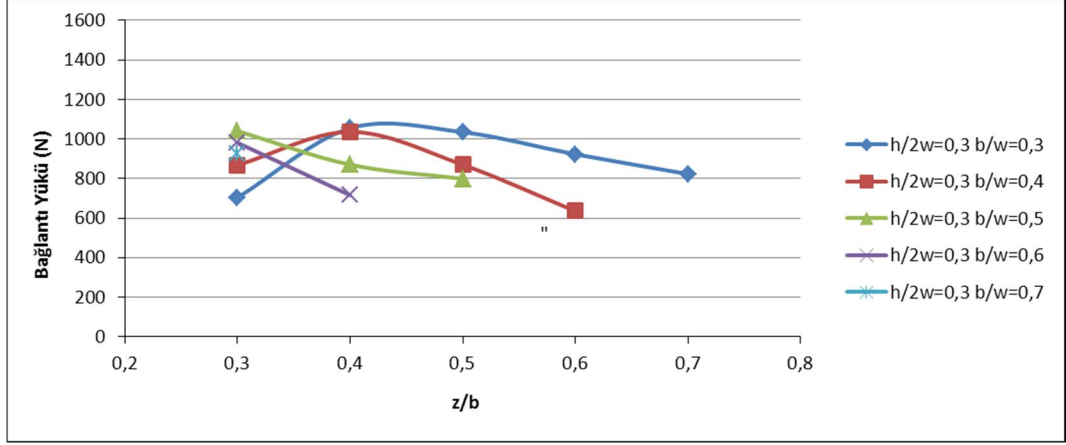


Şekil 6.2 : Eğilme düzeni

Uygulanan yük; numune hasar yüküne ulaştığı zaman, hasar kırılmaları ya kompozit kilitte ya da kilit etrafındaki kompozit yapıda oluşmaya başlamıştır. Hasar şekillerini anlayabilmek için bazı numunelerin deneyleri son hasarlarına kadar devam ettirilmiştir. Böylelikle kilit geometrisinin etkileri incelenmiştir.

Değişik ( $h/2W$ ) oranlarındaki kilit bağlantı elemanlarıyla yapılmış numunelerin, ( $z/b$ ) oranlarına göre yük taşıma kapasiteleri Şekil 6.3’ de gösterilmiştir. Şekillerden de

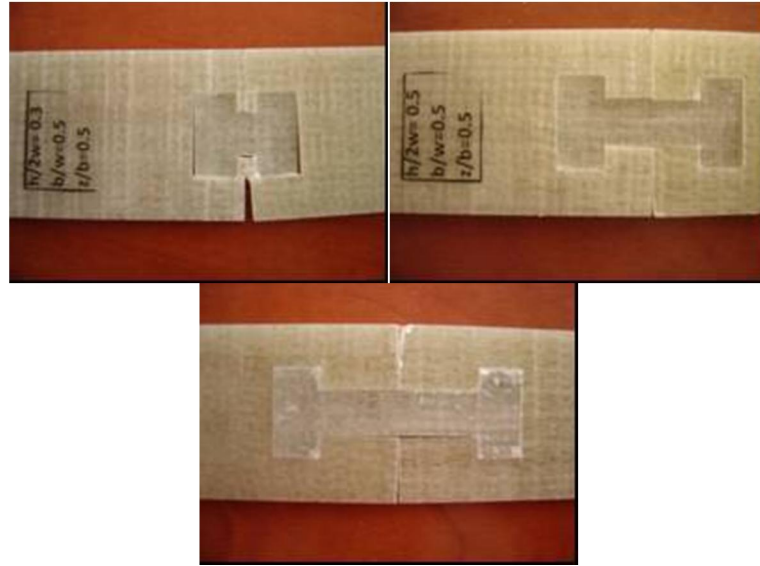
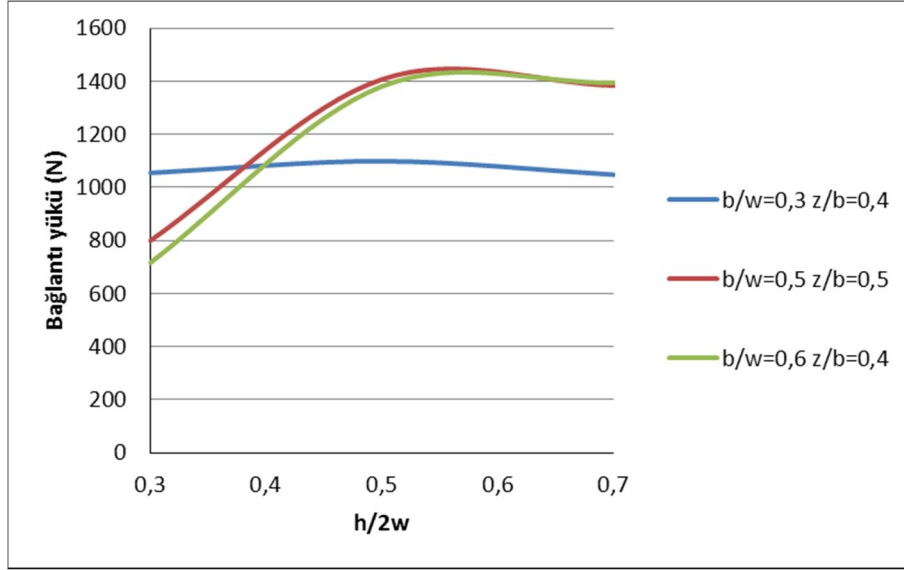
görüldüğü gibi yük taşıma kapasitesi daha çok  $(z/b)$  ve  $(b/W)$  oranlarına bağlıdır.  $(h/2W)$  oranının 0,5 ve 0,7 olması durumunda kilitli numunelerin yük taşıma kapasiteleri diğer boylarına göre daha yüksek ve yaklaşık olarak aynı elde edilmiştir.  $(h/2W)$  oranının 0,5 ve 0,7 değerlerinde ve özellikle  $(z/b)$  oranının 0,5 değerlerinde elde edilen bağlantı yük değerleri oldukça yüksektir. Bağlantı yükü,  $(h/2W)$  oranı 0,3 değerinde ise geometriye bağlı olarak kesit azalmaları mevcut olduğu için değişik  $(z/b)$  değerlerinde daha düşük olarak tespit edilmiştir.  $(b/W)$  oranı açısından bağlantı yüklerini incelediğimizde genel olarak 0,5 ve 0,6 değerlerinde maksimum olarak elde edilmiştir. Bu durum  $(h/2W)$  oranının 0,3 değerinde olması durumunda kesit değişiminden dolayı değişmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre  $(h/2W)$  oranının 0,3 değeri için  $(b/W)$  oranının 0,3 ve  $(z/b)$  oranının 0,4 değerlerinde maksimum bağlantı yükü elde edilmiştir.  $(h/2W)$  oranının 0,5 değeri için  $(b/W)$  oranının 0,5 ve  $(z/b)$  oranının 0,5 değerlerinde maksimum bağlantı yükü elde edilmiştir.  $(h/2W)$  oranının 0,7 değeri için ise  $(b/W)$  oranının 0,6 ve  $(z/b)$  oranının 0,4 değerlerinde maksimum bağlantı yükü elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak kilit uç ve orta genişliğinin seçiminin yük taşıma kapasitesi açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür. Bunun yanında maksimum hasar yüklerinin  $(b/w)$  oranının artmasıyla değişmesi, kilit genişliğinin önemini de göstermektedir.



Şekil 6.3 : Bağlantı yüksekliğinin farklı h/2w oranı için bağlantı yüklerinin z/b oranlarındaki değişimi

Şekil 6.3' de belirlenen maksimum bağlantı yüklerin elde edildiği parametrelerin kilit boyutlarındaki etkileri incelenmiştir. Buna göre değişik kilit boyları için kilitli birleştirmelerin maksimum hasar yüklerindeki değişimleri ve hasar şekilleri Şekil 6.4' de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kilit boyu h/2W=0,5 için hasar yükünün maksimum olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı bu tezde üç nokta

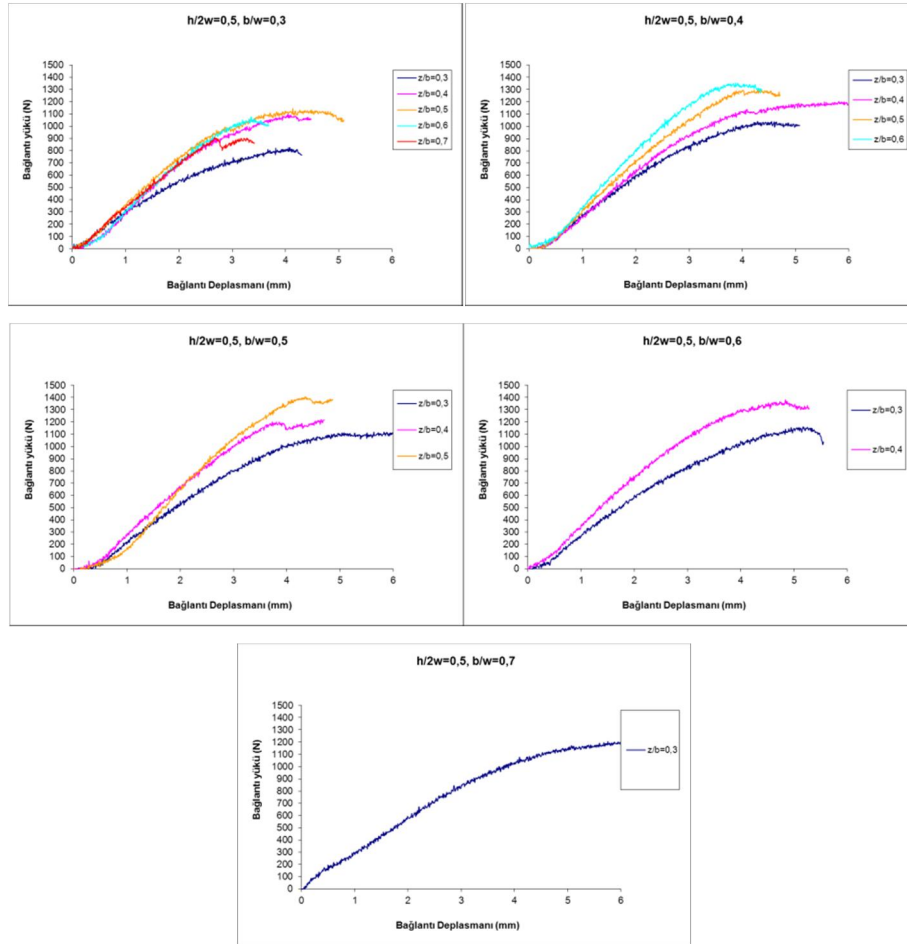
eğilme için kilit boyunun  $h/2W=0,5$  olanı ayrıca ele alınmış ve incelenmiştir. Ayrıca diğer kilit boyları için de aynı incelemeler yapılmıştır.



Şekil 6.4 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik  $h/2w$  oranlarındaki yük değişimleri ve hasar şekilleri

Kompozit plakadan yapılan kilit bağlantı elemanları ile oluşturulan birleştirmelerin yük taşıma kapasitelerindeki değişimleri, kilit boyu ( $h/2W$ ) oranının 0,5 değeri için Şekil 6.5' de gösterilmiştir. Kilit genişliğinin numune genişliğine oranı ( $b/W$ ) arttıkça maksimum yük miktarı esnasında kilit deplasmanının giderek arttığı şekilden görülmekle birlikte 0,5 oran değerinden sonra artışların küçük ve yaklaşık aynı olduğu yapılan deneylerden tespit edilmiştir. Kilit genişliğinin numune genişliğine oranı ( $b/W$ ) 0,5 iken, ( $z/b$ ) oranlarının tüm değerlerinde numunenin diğer numunelere göre maksimum eğilme yükü taşıdığı tespit edilmiştir. ( $z/b$ ) oranı 0,3

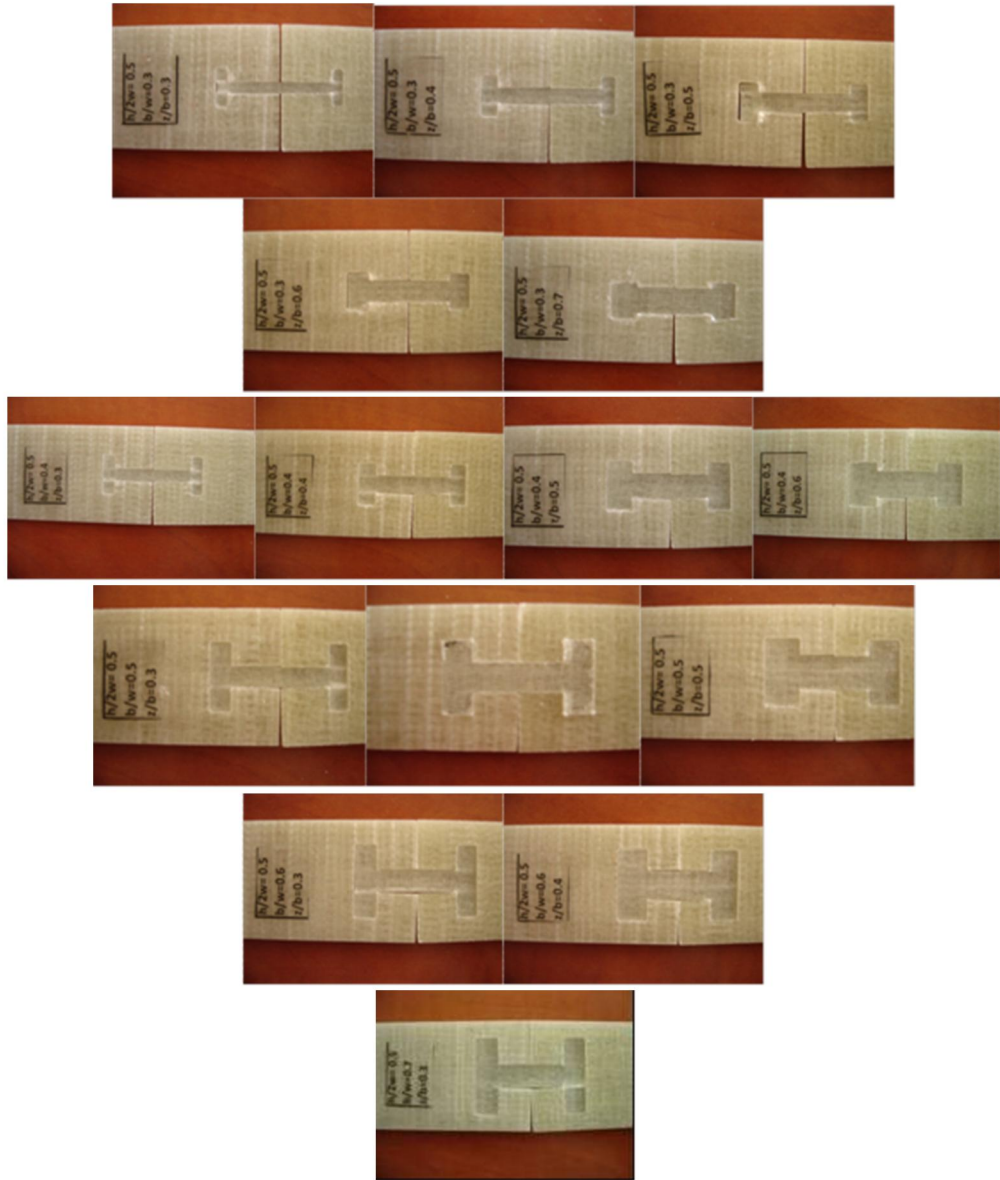
olan numunelerin yük taşıma kapasitesi diğerleriyle karşılaştırıldığında, (b/W) oranının 0,5 oluncaya kadar arttığı ve bu orandan sonra yaklaşık aynı değerde kaldığı gözlemlenmiştir. Buna benzer olarak da (z/b) oranının 0,5 olan numunelerin yük taşıma kapasitesi diğerleriyle karşılaştırıldığında, (b/W) oranının 0,5 oluncaya kadar arttığı da tespit edilmiştir. Yapılan incelemelere göre maksimum bağlantı yükü, (b/W) oranının 0,5 ve (z/b) oranının 0,5 olması durumlarında görülmüştür. Üç nokta eğilme yüklemelerinde elde edilen bağlantı deplasmanları numunelerin bu yükleme altında çökme miktarlarını göstermektedir. (b/W) oranının 0,6'ya kadar artan değerlerinde ve değişik (z/b) değerlerinde maksimum çökme miktarları ortalama 4 mm olarak tespit edilmiştir. Ancak (b/W) oranının 0,6 ve 0,7 değerlerinde kilitlerin de büyük geometri olması nedeniyle buradaki maksimum çökme miktarları ortalama 5 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.5 : Bağlantı yüksekliğinin h/2w=0,5 oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi

Kompozit kilitli birleştirmelerde oluşabilecek hasar şekillerinin son durumlarını anlayabilmek için eğilme deneyleri maksimum hasar yüklerine ulaştıktan sonra yük

taşıma kabiliyetleri düşünceye kadar devam ettirilmiştir. ( $h/2W$ ) oranının 0,5 sabit, ve ( $b/W$ )-( $z/b$ ) geometrik oranlarının değişik değerlerinde yapılan kompozit kilitli birleştirmelerin deneylerde oluşan hasar şekilleri Şekil 6.6' da gösterilmiştir. Üç nokta eğilme yükü durumundan dolayı kilitin üst kısmı bası alt kısmı ise çeki yüklemelerine maruz kalmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi ( $z/b$ ) oranının küçük değerlerinde özellikle kilitin alt uç kısmında kayma hasarlarının oluştuğu tespit edilmiştir. ( $z/b$ ) oranının büyük değerlerinde ise hasarların ilk önce numune ile beraber matris ezilmesi olarak oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6 : Bağlantı yüksekliğinin  $h/2w=0,5$  oranı için bağlantı elemanlarının hasar durumları

## 6.2 Birleştirme Elemanının Nümerik Optimizasyonu

Nümerik optimizasyon, sonlu elemanlar metodu ile yapılan çözümlene sonuçlarını kullanarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan nümerik çözümlenmede Abaqus 6.11 programı kullanılmıştır.

### 6.2.1 Nümerik çözüm adımları

Şekil 6.1’ de gösterilmiş olan Mekanik alın birleştirilmiş kompozit numunelerin eğilme gerilmesi altındaki nümerik çözümlenmesi gerçekleştirilecektir. Tez kapsamında kullanılan sonlu elemanlar programınının genel olarak analiz adımları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Parça Oluşturma
- Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması
- Kesit Özelliklerini Tanımlama ve Parçaya Atama
- Modele Ait Bileşenlerin Montajlanması
- Çözüm Adımının Tanımlanması
- Sınır Koşullarının ve Yüklemelerinin Tanımlanması
- Parçaların Birbirleriyle Etkileşiminin Sağlanması
- Modelin Çözüm Ağının Oluşturulması
- Analiz Adımlarının Birleştirilerek Bir İş Yaratılması ve Çözüme Verilmesi
- Elde Edilen Sonuçların Görüntülenmesi

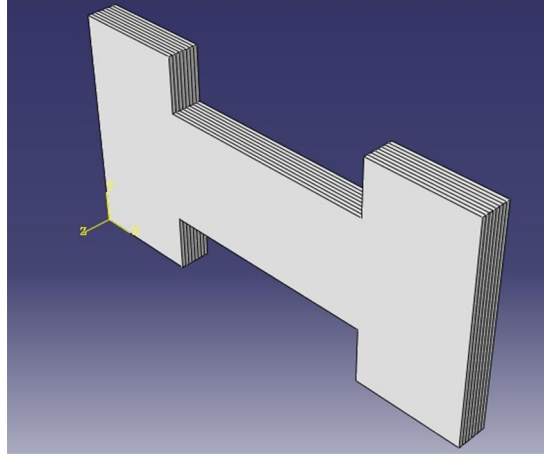
#### 6.2.1.1 Parça oluşturma

Bu ilk adımda; numune kesiti iki boyutta çizilip üçüncü boyuta girilen bir derinlik değeri kadar ötelenerek oluşturulması sağlanmıştır. Destekler iki boyutta çizilip üçüncü boyuta girilen bir derinlik değeri kadar ötelenerek modellenmiştir. Modelde bulunan toplam parça adedi beş olup, tasarlanacak olan parça adedi üçtür. Bunun sebebi bağlantı kilidinin birleştirilmiş olduğu numune plakaların simetrik ve desteklerin aynı olmasıdır. Bir adet numune, bağlantı kilidi ve destek oluşturulup, montaj yapımı aşamasında diğer numune simetrik olarak konumlandırılmış ve destek tekrar çağırılarak model tamamlanmıştır.

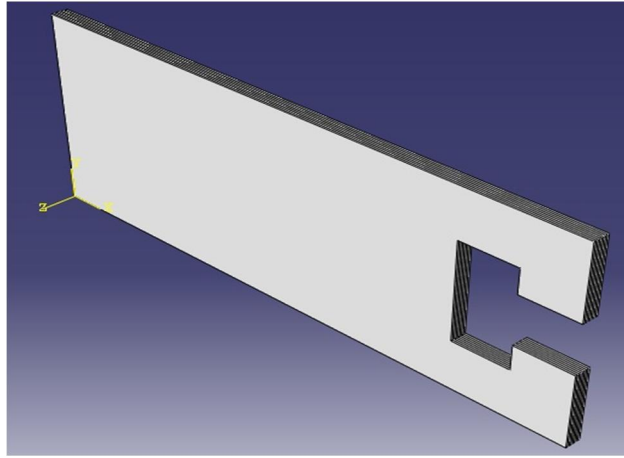
*Create Part* komutu kullanılarak Bağlantı Kilidi oluşturulmasına başlanmıştır. Parça oluşturma iletişim penceresinde oluşturacağımız parçanın modelleme ortamı 3D,

modelleme tipi deforme olacak şekilde ve temel özelliği katı ve ötelenebilir olmasına yönelik gerekli seçimler gerçekleştirilmiştir. Destek çapları ASTM D-790 standardı referans alınarak oluşturulmuştur.

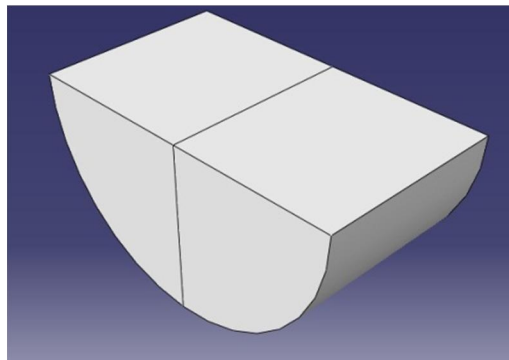
Tablo 6.1' den faydalanarak seçilen geometrik yapıların ekran görüntüleri Şekil 6.7-Şekil 6.8-Şekil 6.9' da gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Tasarımı yapılan bağlantı kilidinin üç boyutlu model görünümü



Şekil 6.8 : Tasarımı yapılan birleştirme numunesi üç boyutlu model görünümü



Şekil 6.9 : Tasarımı yapılan desteğin üç boyutlu model görünümü



### 6.2.1.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Modelin alt parçalarına yönelik yapılan tasarımlarının analiz içerisinde mekanik özelliklerinin anlamlı olabilmesi için model bileşenlerinin teknik malzeme özelliklerinin oluşturulması gerekmektedir. Model içerisinde numune ve kilit tabakalı kompozit malzeme ve destek ise çelik malzeme olarak ayrı ayrı özellikleri ABAQUS/CAE Sonlu elemanlar yazılımı Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’ deki gibi tanımlanmıştır.

Malzeme tanımlaması için, Modül menüsünden *Property* ekranı kullanılmıştır. Numune, kilit ve destek için malzeme özellikleri Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’ de verildiği gibi ekrandan tanımlanmıştır. Ayrıca numune ve kilitin hasar oluşumlarını incelemek için Hashin Hasar Kriteri kullanılmıştır. Bundan dolayı bu hasar kriteri için de gerekli malzeme özellikleri Tabla 6.4’ de verildiği gibi atanmıştır.

Tablo 6.2 : Bağlantı kilidi ve numune için malzeme özellikleri

$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)
41600	11000	11000	0.2	0.2	0.2	2900	2900	2900

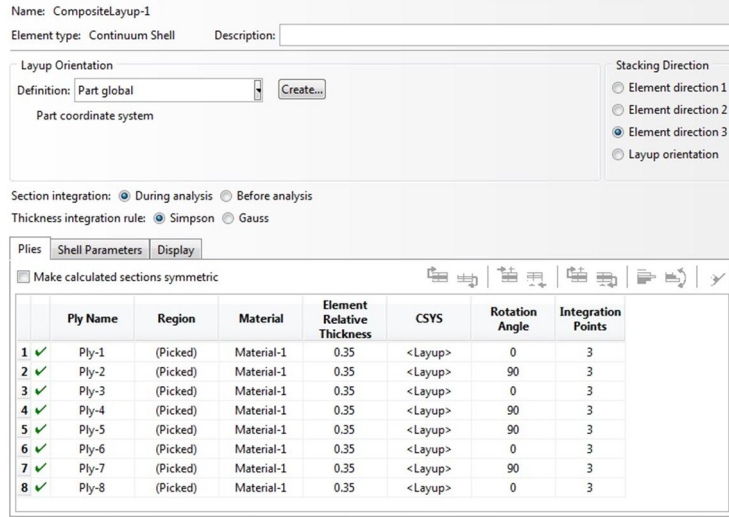
Tablo 6.3 : Destekler için malzeme özellikleri

E (MPa)	$\nu$
210000	0.3

Tablo 6.4 : Hashin Hasarı için gerekli mekanik değerler

$X_t$ (MPa)	$X_c$ (MPa)	$Y_t$ (MPa)	$Y_c$ (MPa)	S (MPa)
772	290	80	75	85

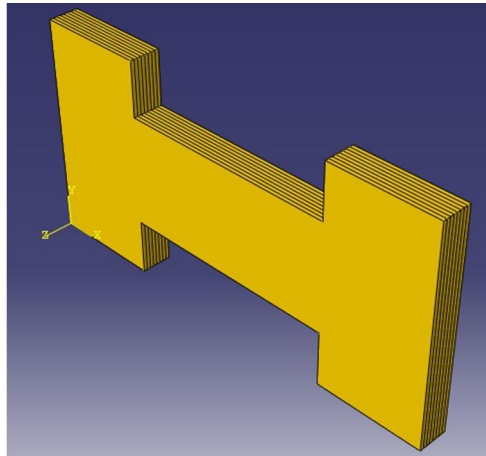
Kullanılan kompozit malzeme tabakalı bir yapıya sahip olduğu için Şekil 6.10’ da gösterildiği gibi composite layup ekranından 8 tabaka tanımlanmış ve oryantasyon yönleri belirtilmiştir.



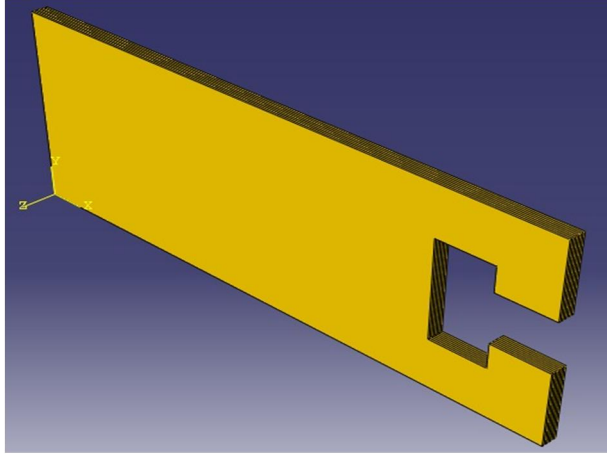
Şekil 6.10 : Oryantasyon yönleri ve malzeme özelliklerinin atandığı composite layup ekranı

### 6.2.1.3 Kesit özelliklerini tanımlama ve parça atama

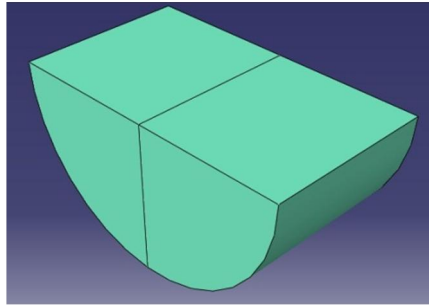
Bundan sonraki analiz adımında yukarıda tanımlanmış olan malzeme özelliklerinin kesit olarak parçaya ve desteğe atanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar programında tabakalı olarak modellenen bağlantı kilidi ve yarı numunenin rengi, çelik olarak modellenen destekten farklı olduğu şekillerde görülmektedir. Ataması yapılan özelliklerin model bileşenleri üzerindeki görünümü Şekil 6.11-Şekil 6.12-Şekil 6.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 : Bağlantı Kilidi Üzerine Kesitin Atanması



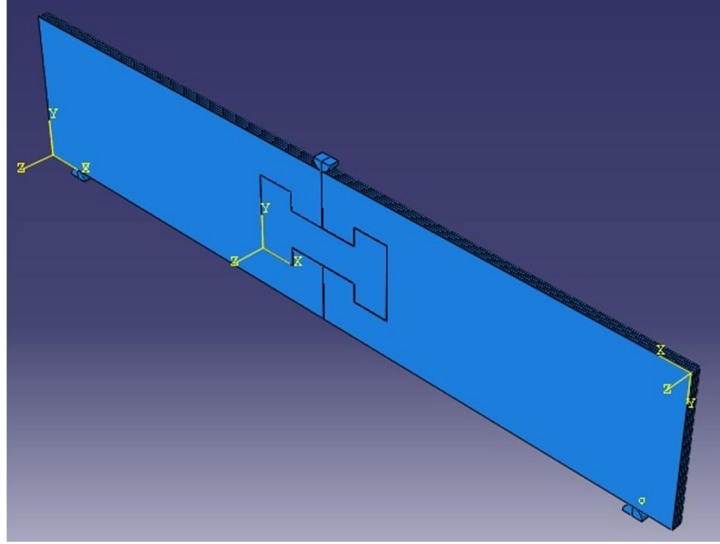
Şekil 6.12 : Birleştirme Numunesi Üzerine Kesitin Atanması



Şekil 6.13 : Destek Üzerine Kesitin Atanması

#### 6.2.1.4 Modele ait bileşenlerin montajlanması

Bu model iki adet yarım numune, bir adet bağlantı kilidi, iki adet destek uçları ve bir adet eğilme ucundan oluşmaktadır. Bu bileşenlerin montaj yapılabilmesi için Modül *Assembly* olarak ayarlanmıştır. Ardından *Create Instance* komutu kullanılarak parçalar üç boyutlu çalışma ortamı içerisine dahil edilerek gerekli konumlandırmaların sağlanması ile montaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Modelin montajlanmış hali Şekil 6.14 ' de gösterilmiştir.



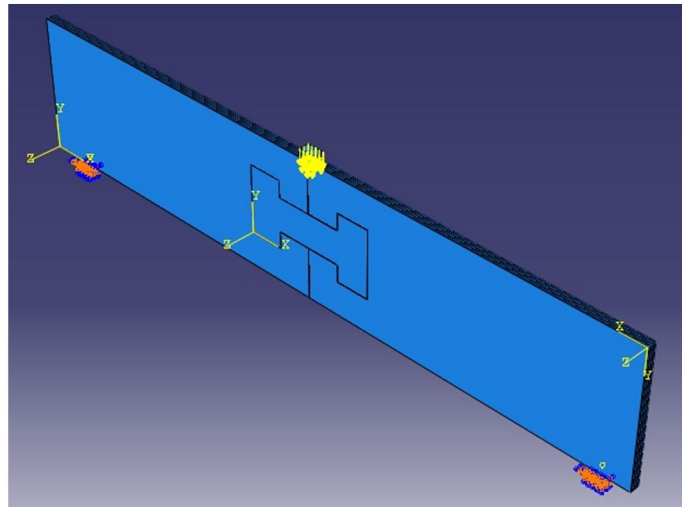
Şekil 6.14 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde birleştirilmesi

#### 6.2.1.5 Çözüm adımının tanımlanması

Bu model uygulamasında katı olarak modellenmiş, alt desteklerden modelin bağlantısı gerçekleştirilmiş olup modelin üst kısmından eğilmeyi oluşturacak uygun yüklemeye karşı statik cevabı inceleneceğinden dolayı modelin analiz ihtiyacına yönelik tek bir çözüm adımı gerçekleştirilmiştir. ABAQUS/CAE yazılımında çözüm adımı Step ekranından genel statik çözüm adımı seçilmiştir.

#### 6.2.1.6 Sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması

Sınır koşulu olarak montajlanmış ve birleştirilmiş numunenin alt kısmına oturtulmuş destekler ankastre olarak sabitlenmiştir. Birleştirme numunesinin üst kısmından eğilme yüklemesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler Şekil 6.15’ de gösterilmiştir.

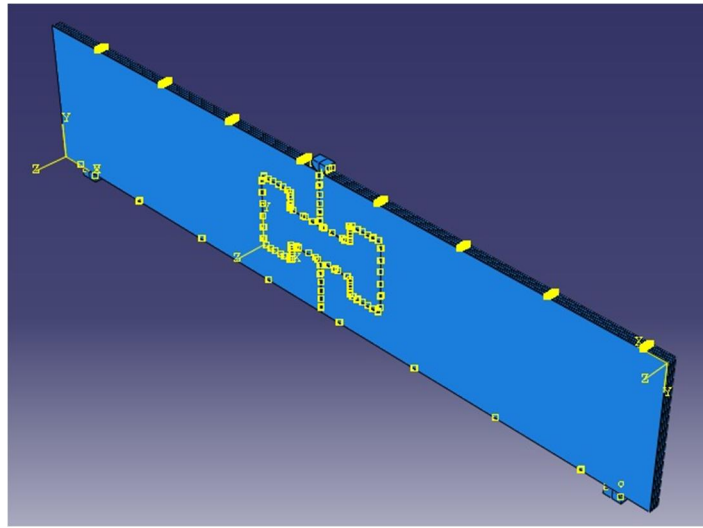


Şekil 6.15 : Modelin sabitlenmesi ve eğilme yükünün uygulanması

### 6.2.1.7 Parçaların birbirleriyle etkileşiminin sağlanması

Proje kapsamında analizi yapılacak olan bu modelin birden çok alt parça bileşeninin olması, ABAQUS/CAE 6.11 Sonlu elemanlar yazılımı içerisinde analize girecek olan bu alt parçaların birbirlerine tanıtılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple parçalar arasında temas özelliği ve temas tanımlama işlemleri yapılmıştır. Temas özelliği olarak parçalar arasındaki sürtünme katsayısı 0.1 alınarak tanımlanmıştır.

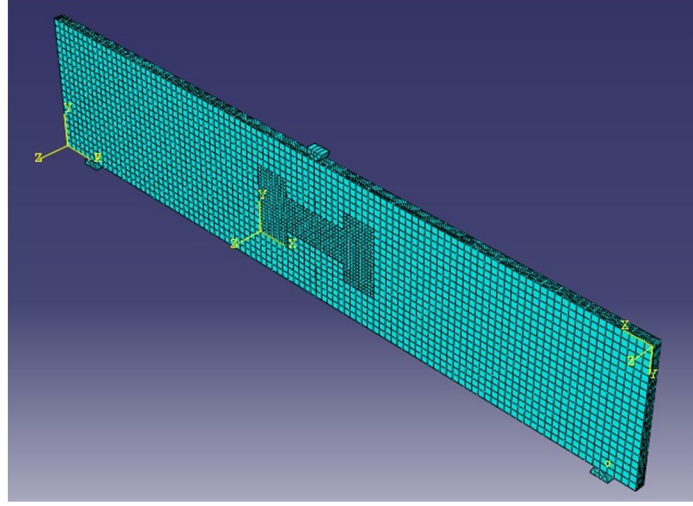
Temas tanımlamasının yapılabilmesi için Modül *Interaction* olarak ayarlanmıştır. Modelin içerisinde bulunan ve birbirleriyle temas edeceği bilinen yüzeylerin seçim işlemi gerçekleştirilerek tanımlanmasının yapıldığı Şekil 6.16 ' da gösterilmiştir.



Şekil 6.16 : Model bileşenlerinin arasında temas tanımlaması gerçekleştirilmesi

### 6.2.1.8 Modelin çözüm ağının oluşturulması

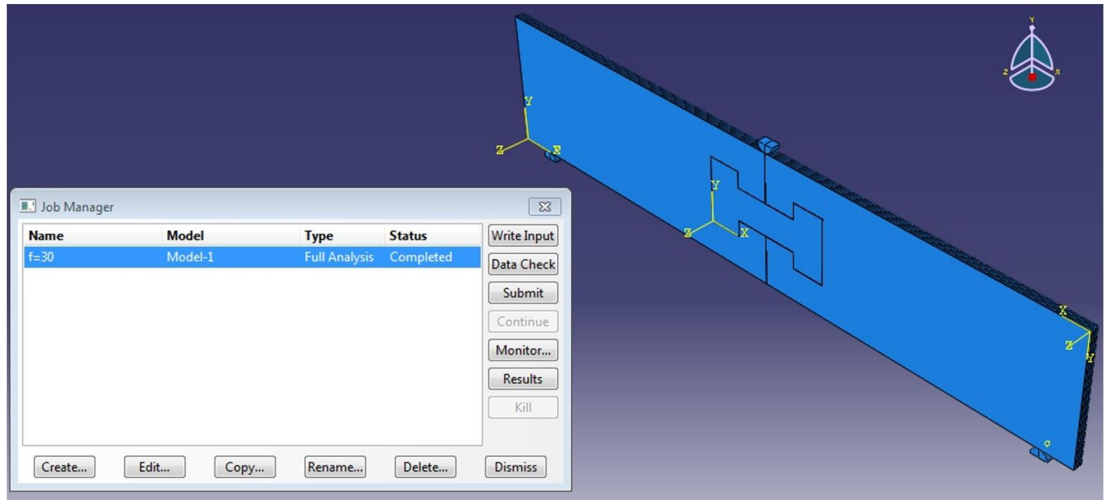
Modelin analizi için bu bölümde çözüm ağı oluşturulacaktır. Kilit bağlantı elemanlarının geometrileri değiştirildiğinden dolayı kilit üzerindeki gerilmelerin bilinmesi ve oluşabilecek hasar yerlerinin belirlenebilmesi, yapının güvenilirliği için önem arz etmektedir. Bundan dolayı kilit bağlantı elemanlarına, yarım numunelerden daha sıkı bir çözüm ağı yapılmıştır. Belirlenen en uygun çözüm ağı; eleman boyutları kaba olarak seçilen değerlerden küçülterek ve belli boyuttan sonra hep aynı değerler vermesinden dolayı yarı numuneler için 2 mm, kilit bağlantı elemanı için 1 mm, destekler ve eğilme ucu için 2 mm olarak belirlenmiştir. Uygulama sonucunda oluşan çözüm ağı Şekil 6.17' de gösterilmiştir.



Şekil 6.17 : Modelin uygun çözüm ağı oluşturulması

#### 6.2.1.9 Analiz adımlarının birleştirilerek bir iş yaratılması ve çözüme verilmesi

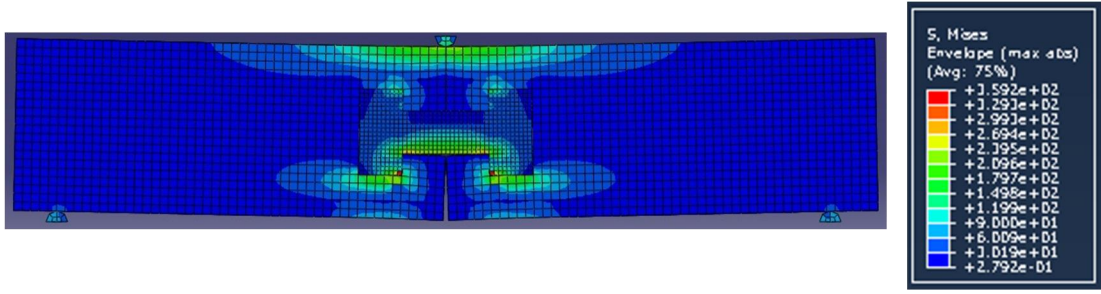
Analizi yapılacak modele ait oluşturulan adımlar ile sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Bu bölümde ise model çözüme hazırlanmış ve verilmiştir. Modül Job komutuna ayarlanmıştır. Çözüm *Submit* komutuyla başlatılmıştır. Şekil 6.18' de sorunsuz bir çözümün yapıldığı gösterilmiştir.



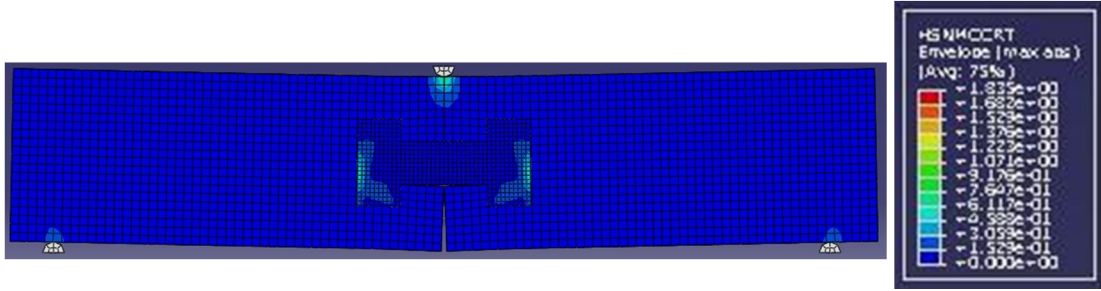
Şekil 6.18 : Modelin çözüme verilmesi

#### 6.2.1.10 Elde edilen sonuçların görüntülenmesi

Analizin başarıyla tamamlanmasından sonra Result komutu kullanılarak istenen sonuçlar alınmıştır. Model üzerine uygulanan eğilme yükünden meydana gelen gerilme dağılımı ve Hashin Hasar Kriterine göre hasar dağılımları Şekil 6.19 ve Şekil 6.20' de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



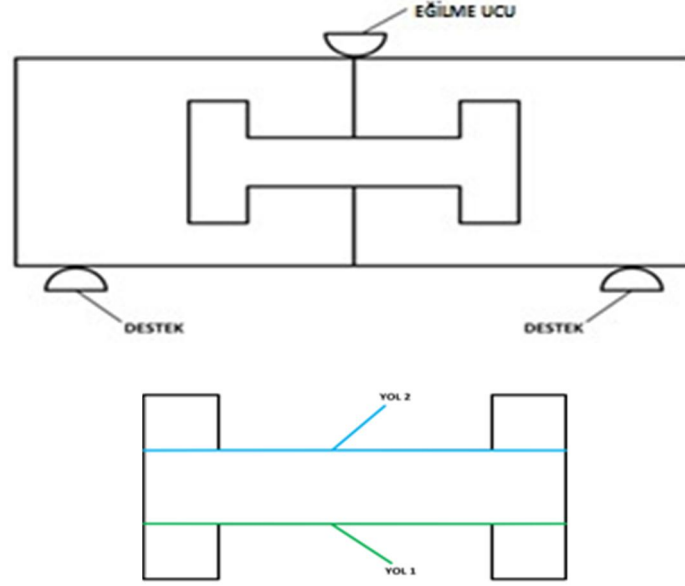
Şekil 6.19 : Modelin gerilme dağılımı görseli ve gerilme dağılımı sonuçları



Şekil 6.20 : Modelin Hashin hasar teorisine göre matris bası hasar gerilme dağılımı görseli ve gerilme dağılımı sonuçları

## 6.2.2 Birleştirme elemanının sonlu elemanlar metodu ile gerilme dağılımlarının bulunması

Deneysel olarak  $h/2W=0,5$  oranında en optimum değerler elde edildiği için nümerik çalışmada da  $h/2W=0,5$  oranı baz alarak ele alınmıştır. Çeşitli geometrilerdeki birleştirmelerde oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için Şekil 6.21’ de de gösterildiği gibi kilit üzerinden (Yol 1 ve Yol 2) gerilmeler ele alınmıştır. Gerçekleştirilmiş olan analizlerde, eğilme yük değeri olarak  $30 \text{ N/mm}^3$  body force olarak seçilmiştir. Aynı yük altında yapılan gerilme analizlerinden elde edilen gerilme değerleri değişik  $z/b$  oranlarından dolayı farklı olarak elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında maksimum gerilmelerin kilit bağlantı elemanı üzerinde olduğu görülmüştür.



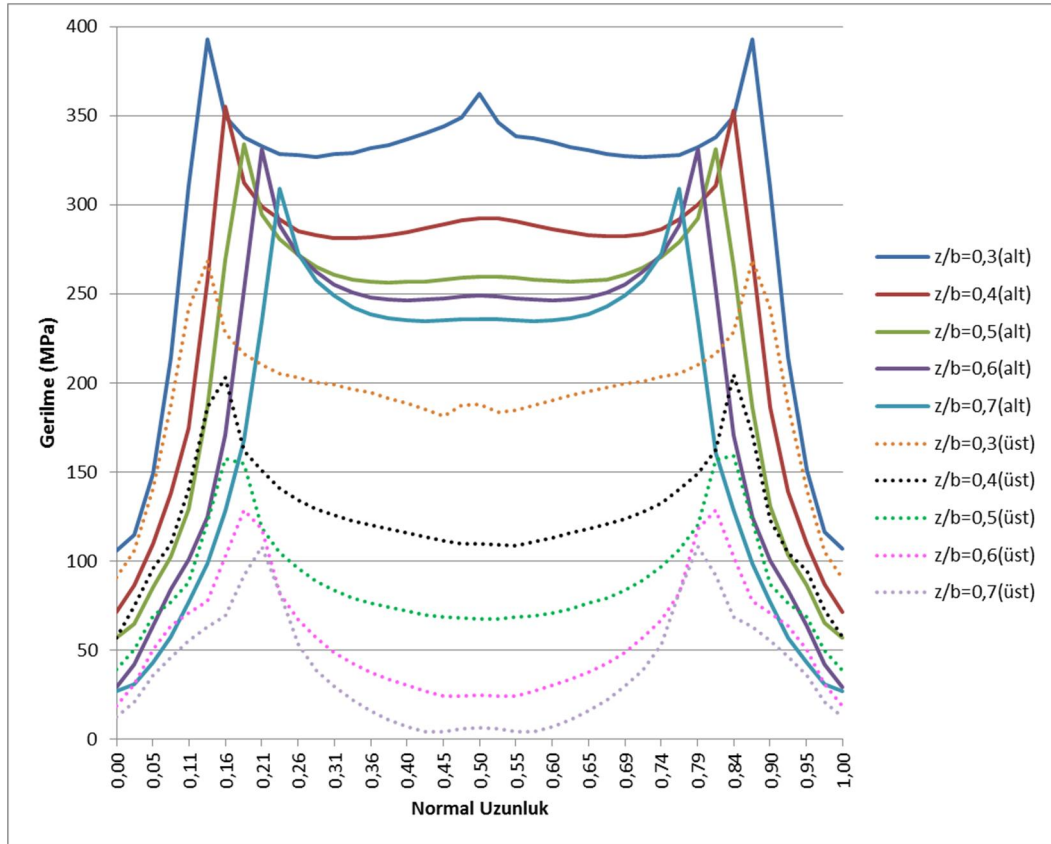
Şekil 6.21 : Gerilme dağılımlarının incelendiği Yol 1 ve Yol 2.

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen çözülemeye ait gerilme sonuçları tüm kompozit yapı üzerinde sayısal değer ve renksel dağılım olarak elde edilmiş olup, gerilme-normalleştirilmiş gerilme yolu grafikleri oluşturularak alın alına birleştirilmiş kompozit numunelerinin gerilme değişimlerinin incelenmesi sağlanmıştır. İncelemenin bundan sonraki aşamalarında, elde edilen gerilme dağılımları ve oluşturulan grafikler analiz edilerek en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip en uygun numunenin hangisi olduğunun belirlenmesi hedeflenmiştir.

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.22' de gösterilmiştir. Genel olarak elde edilen gerilme dağılımları incelendiğinde maksimum gerilmelerin beklenildiği gibi bağlantı kilitinin orta gövdesi ile uç kollarının köşelerinde meydana gelmektedir. Şekil 6.22' de gösterilen her gerilme dağılım grafiklerinde elde edilen iki maksimum gerilme değerleri arasındaki gerilme dağılımları bağlantı kilitinin orta gövdesindeki gerilme dağılımını göstermektedir. Bağlantı kilitinin özellikle orta gövdesindeki gerilme dağılımının yaklaşık sabit ve belli bir değerde olması birleştirme elemanının yük taşıma performansını olumlu yönde etkileyerek hasar oluşumunun da diğerlerine göre daha geç olması beklenmektedir. Gerilme değerleri açısından karşılaştırdığımızda  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2' de oluşan gerilme değerlerinin diğer oranlardaki birleştirmelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2' nin gerilme dağılımı  $z/b=0,3$  oranına benzerlik göstermekte fakat gerilme değerleri daha düşük elde

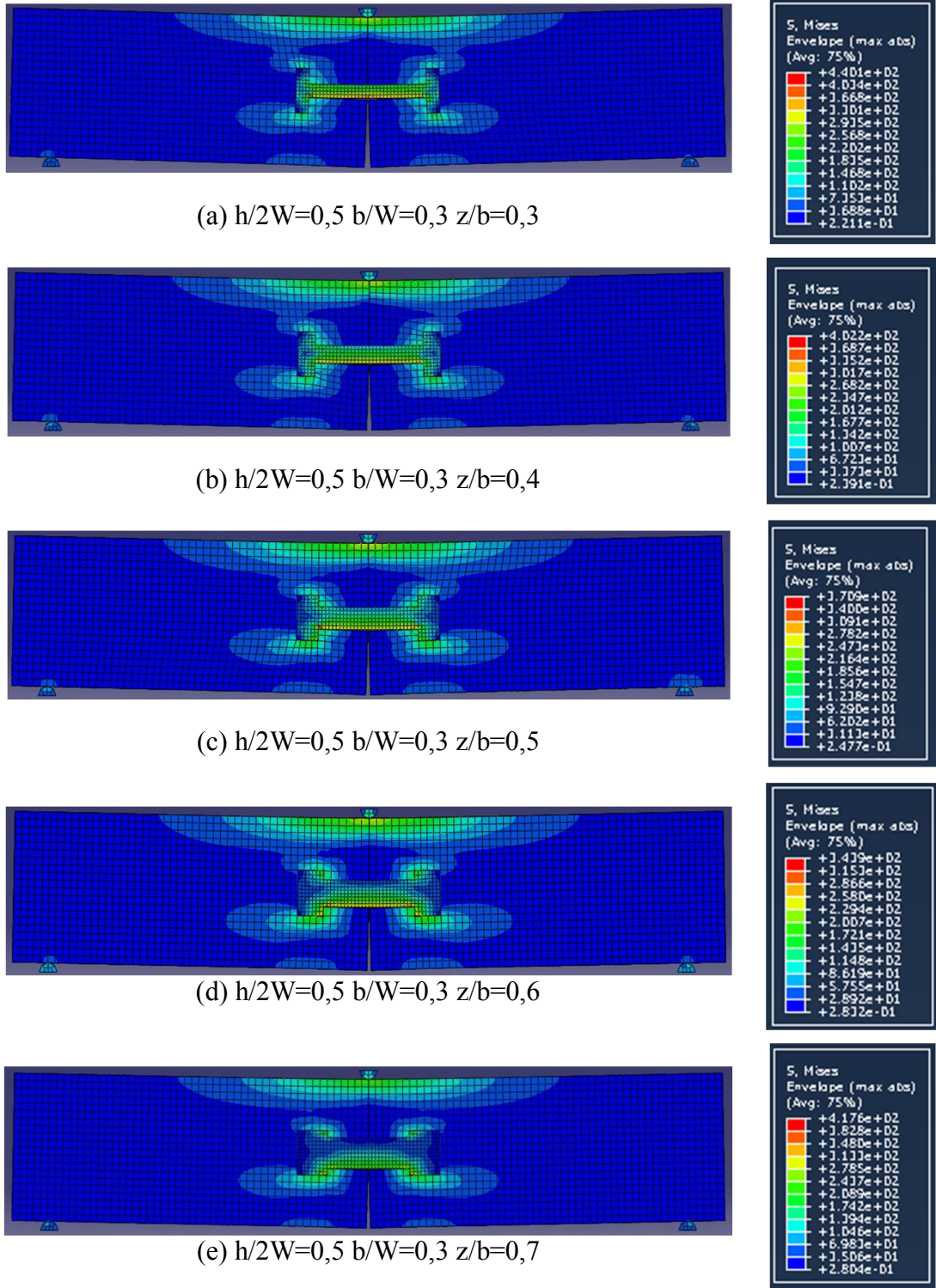


edilmiştir.  $z/b$  oranının 0,3 ve 0,4 değerlerine ait gerilme dağılımlarına genel olarak baktığımızda diğer  $z/b$  oranlarına göre daha yüksek gerilme değerlerine sahip olduğu için hasara uğramaları diğerlerine göre daha erken olması bekleneneğinden dolayı yük taşıma kapasitelerinin daha küçük olması beklenmektedir. Bu oranlara ait kilit gövdesindeki gerilme dağılımlarına bakıldığında ise gerilme dağılımlarının yaklaşık aynı değerlerde olması ve büyük olmasında hasara daha erken uğrayabileceği anlaşılmaktadır.  $z/b$  oranının diğer 0,5-0,6-0,7 değerlerine ait gerilme grafiklerini incelediğimizde bağlantı kilitinin köşe kısımlarında oluşan gerilme değerlerinin arasında fazla farkın olmadığı görülmektedir. Ancak bu oranlara ait bağlantı kilitlerin orta gövdelerinde oluşan gerilme dağılımlarına baktığımızda 0,5 oranında elde edilen gerilmelerin 0,6 ve 0,7' den daha yüksek ve düzgün yani sabit değerlerde olduğu anlaşılmıştır. Bu durum ise bağlantı kilitinin asli görevi olan yük taşıma kapasitesini göstermektedir. Aynı yükleme altında en düşük ve en homojen yani düzgün gerilme değerleri  $z/b$  değerinin 0,5 oranında tespit edilmiştir. Sonuç olarak  $z/b=0,5$  oranında yapılmış birleştirme numunelerinin maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.22 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları.

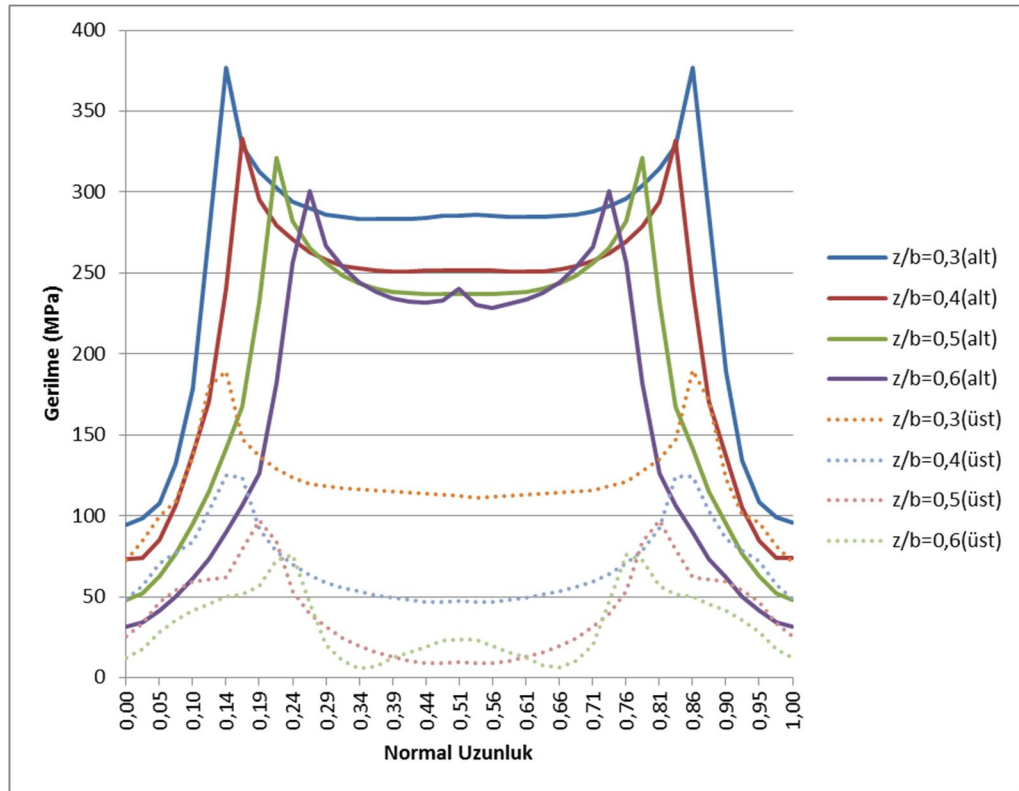
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımını Şekil 6.23' de gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanın tamamı ve sistem bütünüyle incelendiğinde maksimum gerilmenin  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede olduğu görülmektedir.  $z/b=0,6-0,7$  oranlarındaki birleştirmelerde maksimum gerilmenin kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında gerçekleşmiştir.  $z/b=0,7$  oranındaki birleştirmede maksimum gerilmenin bu bölgede gerçekleştiği Şekil 6.23 (e)' de görülmekte ve bu bölgelerden hasara uğraması beklenmektedir.  $z/b=0,6$  oranındaki birleştirmede gerilmelerin yüksek çıktığı bölgeler hem kilit bağlantı elemanının uç kısmıyla gövde kısmının birleşim kısmında hem de kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında oluştuğu Şekil 6.23 (d)' de gösterilmiştir. Hasara bu bölgelerden uğrayacağı düşünölmektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin maksimum gerilmesi diğer birleştirme oranlarına göre daha düşük olduğu belirlenmiş ve Şekil 6.23 (c)' de gerilmenin homojen dağıldığı gösterilmiştir. Dolayısıyla bu orandaki birleştirme hasara daha geç uğraması beklenmektedir. Bu orandaki birleştirme maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.23 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.24’ de gösterilmiştir. Gerilme değerleri açısından karşılaştırdığımızda  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2’ de oluşan gerilme değerlerinin diğer oranlardaki birleştirmelerden daha

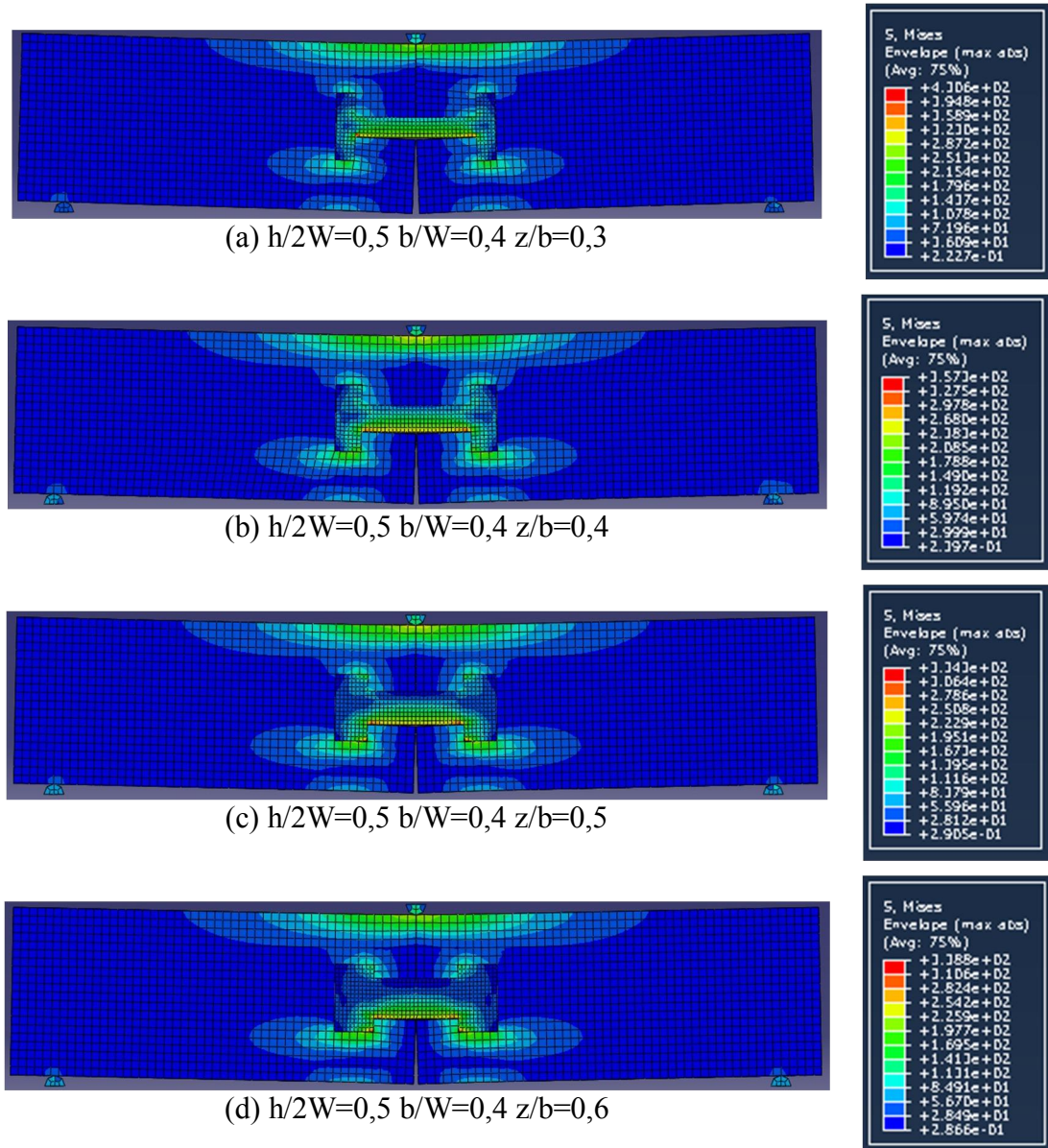
yüksek olduğu görülmüştür. Bu orandaki birleştirme diğer oranlardakinden daha erken hasara uğraması beklenmektedir.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2' nin gerilme dağılımı  $z/b=0,3$  oranına benzerlik göstermektedir ama gerilme değerleri daha düşük olduğu belirlenmiştir.  $z/b=0,6$  oranındaki birleştirmede Yol 1 gerilme değerlerinin düşük olduğu ve dağılımın düzgün dağıldığı görülmektedir. Gerilme değerleri açısından karşılaştırıldığında  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2 arasındaki gerilme farkının fazla olmasından dolayı kilit bağlantı elemanın yükü homojen yüklenmesinin mümkün olmadığı düşünülmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,6$  oranındaki birleştirme yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olacağı ve hasara daha geç uğrayacağı belirlenmiştir.



Şekil 6.24 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları.

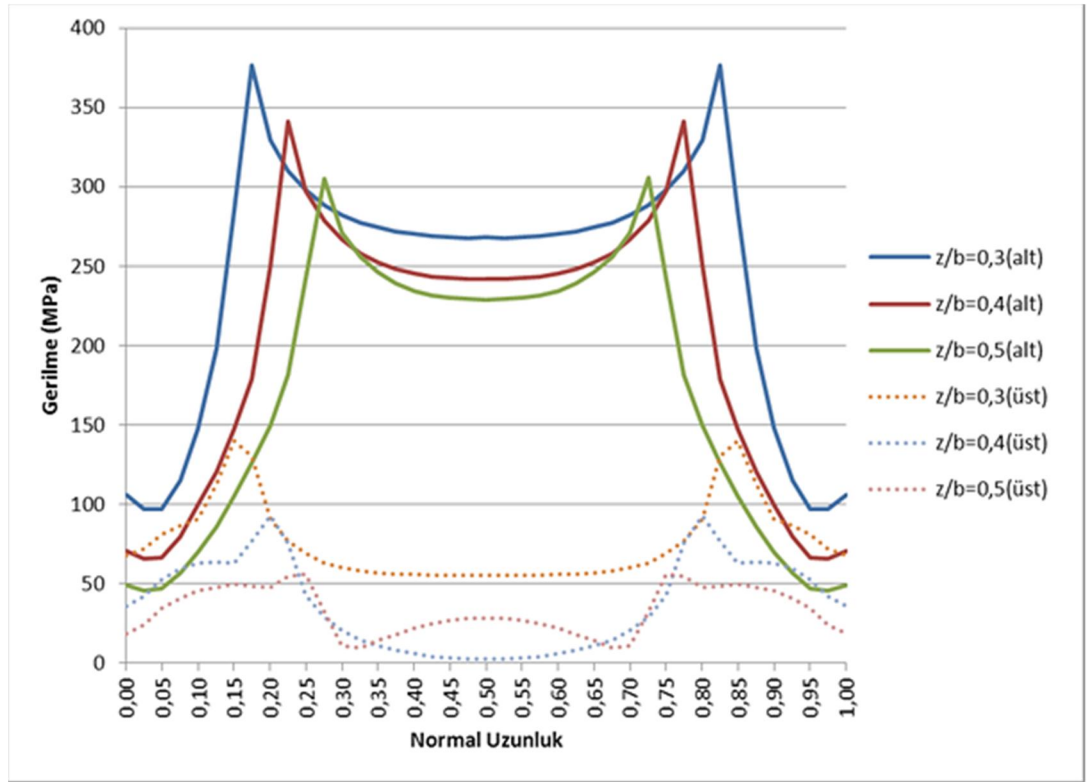
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.25' de gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanın tamamı ve sistem bütünüyle incelendiğinde maksimum gerilmenin  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede olduğu görülmektedir. Bu orandaki birleştirmede maksimum gerilmenin kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında gerçekleştiği Şekil 6.25 (a)' da görülmektedir ve bu bölgeden hasara uğrayacağı düşünülmektedir. Maksimum gerilmelere göre karşılaştırıldığında  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmeden sonra  $z/b=0,4$  oranındaki

birleştirmenin gerilme değeri en yüksektir ve diğer birleştirmelere göre daha önce hasara uğrayacağı belirtilebilir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin maksimum gerilme değeri  $z/b=0,3$  ve  $0,4$  göre düşük olduğu belirlenmişse de gerilmenin daha çok kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında olduğu Şekil 6.25 (c)' de gösterilmektedir.  $z/b=0,6$  oranındaki birleştirme  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeye göre bağlantı kilitinin gövde kısmında daha düzgün dağılmasına karşın iç köşelerde oluşan gerilme değerleri  $0,5$  oranındakine göre düşük olduğu için  $z/b=0,6$  oranındaki birleştirmenin daha fazla yük taşıdığı düşünülmektedir.



Şekil 6.25 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  mm geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.

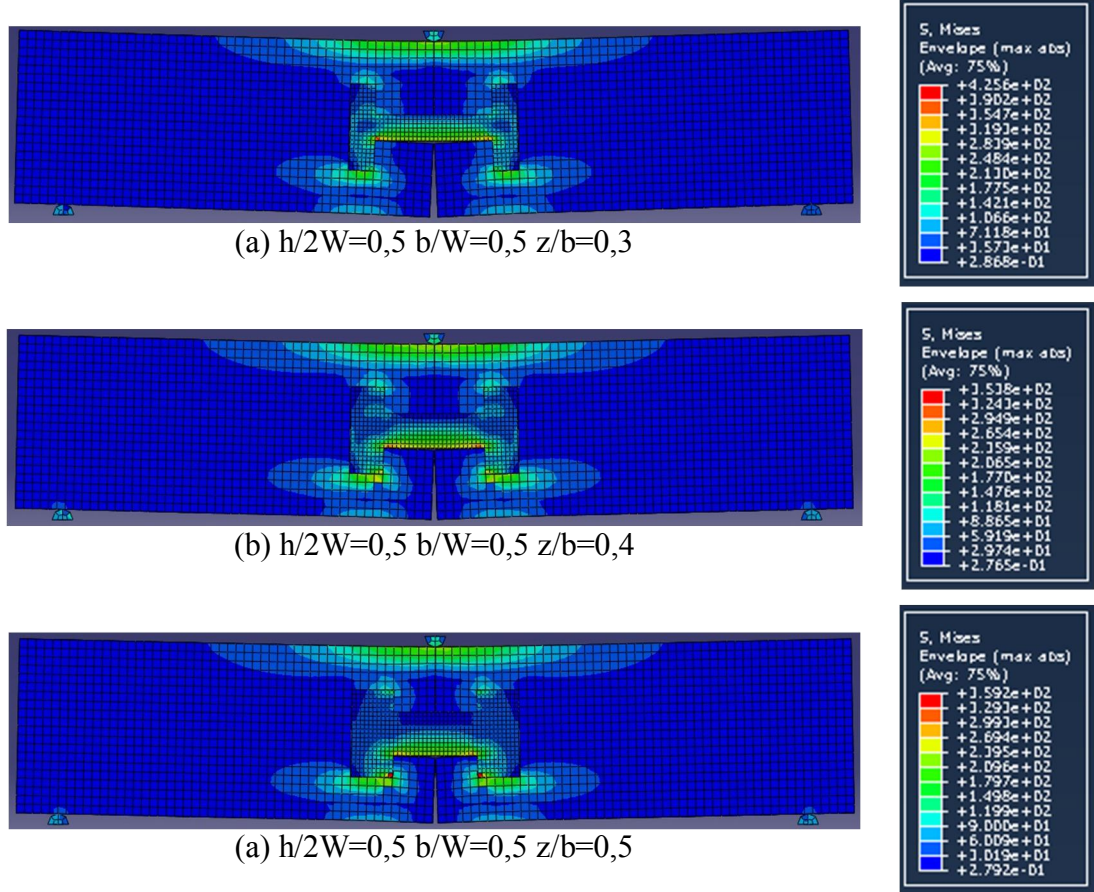
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.26' da gsterilmiştir.  $z/b=0,3$  ve  $z/b=0,4$  oranlarındaki birleştirmelerin Yol 1 ve Yol 2 gerilme değerleri çok ysek olduğu Şekil 6.26' dan görülmektedir.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2' nin gerilme dağılımı  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmeyle benzerlik gstermektedir ama gerilme değerleri daha düşük elde edilmiştir.  $z/b=0,5$  oranında yapılan birleştirmelerde oluşan gerilme değerleri diğer  $z/b$  oran değerlerinde elde edilenlere göre en düşük olarak elde edilmiştir. Düşük gerilme değerleri elde edilen geometrilerden daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde edileceği beklenmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirme diğer modellere göre daha büyük hasar yüküne sahip olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 6.26 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları.

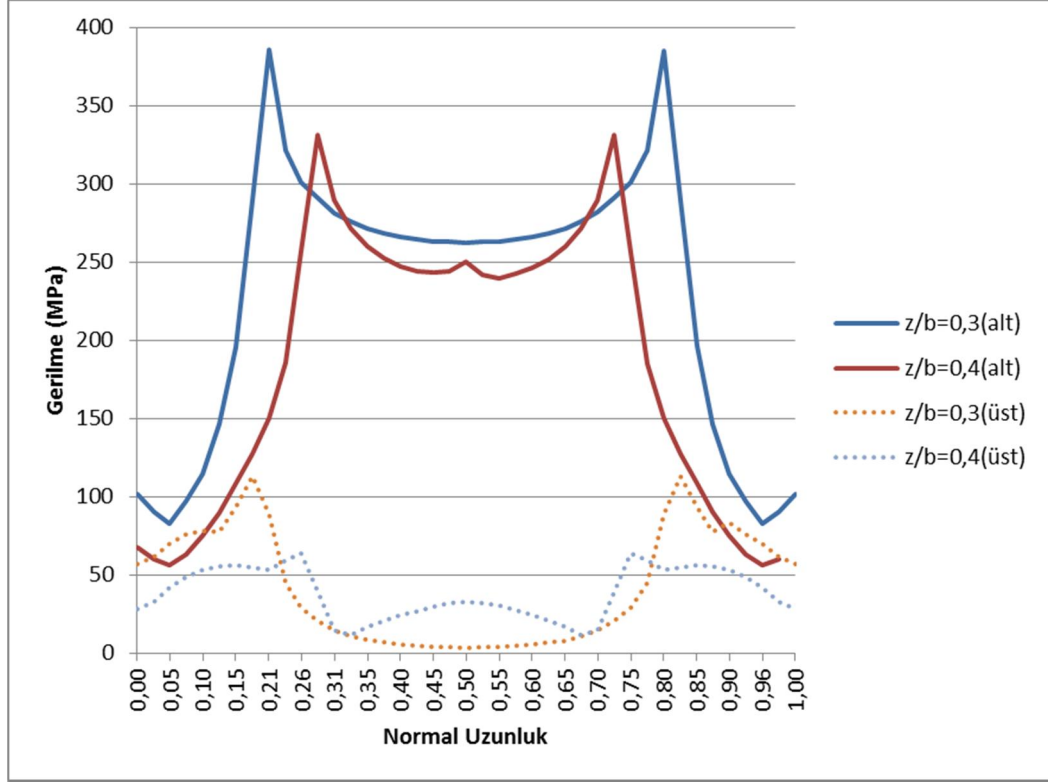
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.27' de gsterilmiştir. Kilit bağlantı elemanın tamamı ve sistem bütünüyle incelendiğinde maksimum gerilmenin  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede olduğu görülmektedir. Bu orandaki birleştirmede maksimum gerilmenin kilit bağlantı elemanının i köşe kısmında gerçekleştiği Şekil 6.27 (a)' da görülmektedir ve bu bölgeden hasara uğrayacağı dşnlmektedir. Şekil 6.27 (b)' de gsterildiği gibi

$z/b=0,4$  oranında Yol 1 ve Yol 2 değerlerine bakılacak olursa gerilmelerin  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeninkinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin daha geç hasara uğrayacağından ve dolayısıyla yük taşıma kabiliyeti daha fazla olacağından bu orandaki birleştirme belirlenmiştir.



Şekil 6.27 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.

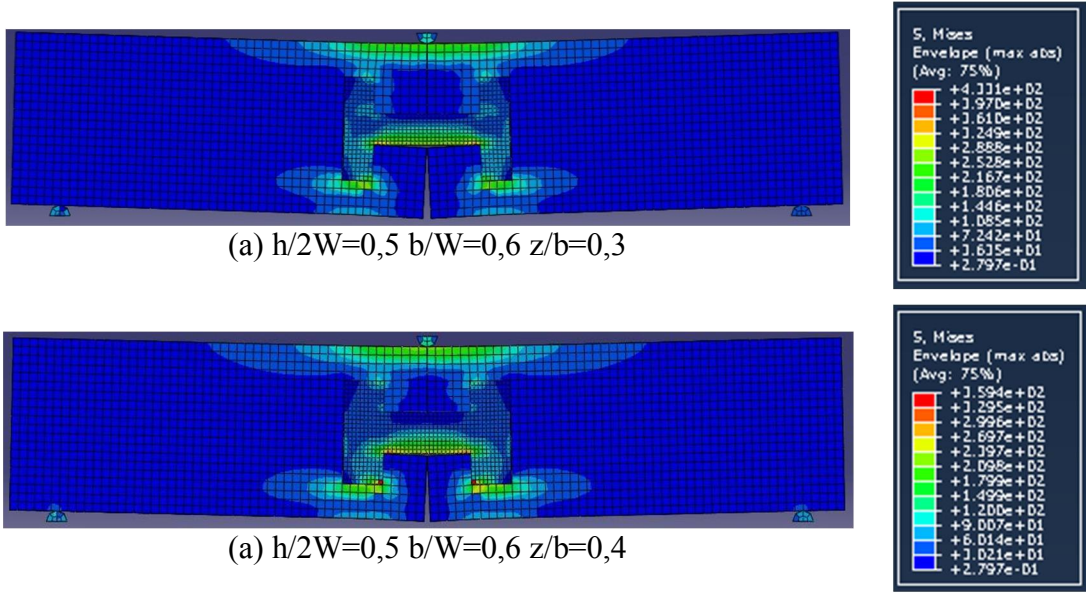
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.28’ de gösterilmiştir.  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirme ile  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmenin Yol 1 ve Yol 2 boyunca gerilme değerleri birbirlerine oldukça benzer olduğu Şekil 6.28’ de görülmektedir.  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmenin Yol 2’ si  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmeye göre daha yüksektir.  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede maksimum gerilmelerin bulunduğu bağlantı uç kollarından hasara uğraması beklenmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirme diğer modellere göre daha büyük hasar yüküne sahip olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 6.28 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları.

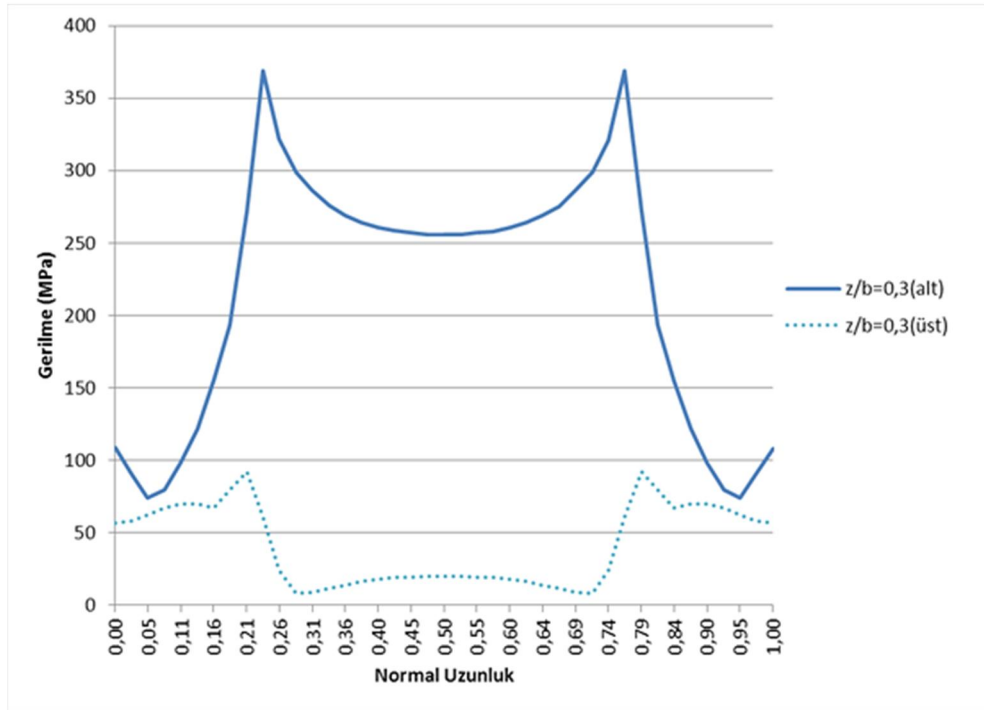
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.29' da gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında maksimum gerilmelerin kilit bağlantı elemanı üzerinde olduğu görülmüştür. Bu iki orandaki birleştirmelerde maksimum gerilmelerin birbirlerine yakın çıktığı görülmektedir. Fakat  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmenin maksimum gerilmesi biraz daha düşüktür.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede maksimum gerilme kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında meydana geldiği görülmektedir. Bu bölgeden hasara uğrayacağı düşünülmektedir.





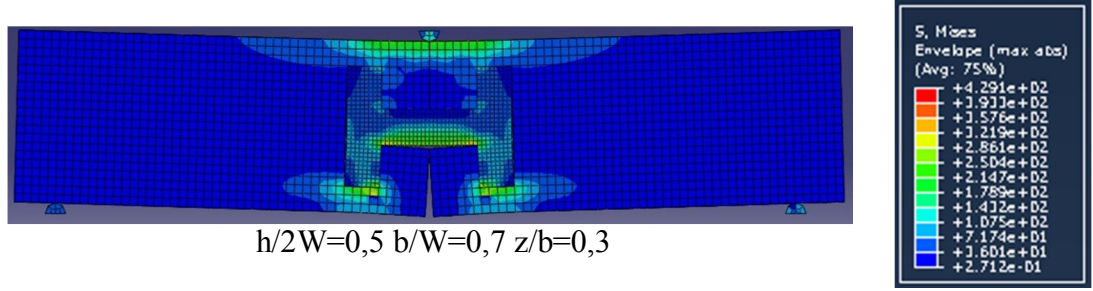
Şekil 6.29 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı gösterimleri.

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.30' da gösterilmiştir. Şekil 6.30' da görüldüğü gibi Yol 2 boyunca oluşan gerilme dağılımı hem uç bölgelerde hem de orta bölgelerde sabit bir gerilme civarındadır.



Şekil 6.30 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranının gerilme dağılımı.

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımını Şekil 6.31’ de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum gerilme değerleri kilit bağlantı elemanının baş kısmıyla gövde kısmının birleşim yerinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.31 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranının gerilme dağılımını gösterimi.

Abaqus sonlu elemanlar programı ile her bir  $b/W$  ‘deki  $z/b$  oranları için en uygun kilit bağlantı elemanı geometrileri belirlenmiştir.  $b/W=0,5$  ve  $z/b=0,5$  oranlarında elde edilen gerilme değerlerinin düşüklüğü, Yol 1 ve Yol 2 üzerindeki maksimum değerlerin arasındaki farkın azlığı ve gerilmenin homojen dağıldığı görülmektedir. Bundan dolayı bu oranlardaki birleştirme, yükü daha iyi iletteği tespit edilmiştir. Böylelikle bu bağlantı kilitinin diğerlerine göre daha geç hasara uğrayacağı düşünölmektedir. Bu sebeplerden dolayı bu oranlardaki birleştirmenin optimum olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu gerilme analizi ile deneysel çalışmalar desteklenmiştir.

### 6.3 Hasar Analizi

Tabakalı kompozit yapılar uygulanan bir gerilme sistemi altında matris çatlaklarına, fiber-matris ayrışmasına, fiber kırılmasına ve tabakalar arası bozulmalara maruz kalabilir. Tabaka içerisinde kalıcı yapı bütönlüğünün bozulmasına sebep olan bu etkiler hasar olarak adlandırılır. Fiber kırılması, uygulanan yükün fiberin en büyük uzunlamasına mukavemetini aşması ve aynı şekilde matris çatlağı da yükün matris malzemesinin mukavemeti aşması durumunda meydana gelir. Tabakalar arası bozulma (delaminasyon) oldukça karmaşık bir olaydır ve bir tabakaya normal bir yüklemenin uygulanması sonucu oluşan soyulma veya açılmadan, tek bir tabakanın kaymasından veya yırtılmasından meydana gelir. Bu hasarlar malzemenin

mukavemet ve rijitliğinde azalmalara sebep olur. Başka bir ifadeyle, yapının yük taşıma kapasitesi ve servis ömrü azalır. Bir yapı veya bileşen fonksiyonlarını yerine getirmese başarısız olmuş demektir. Kompozit yapının tabakalama konfigürasyonuna bağlı olarak tabakanın başarısızlığı az önce bahsettiğimiz hasarların hep birlikte veya ayrı ayrı oluşmaları sonucu ortaya çıkar (Genç, 2005)

Sayısal olarak hasar yükünün tespiti ve hasarın oluşum şeklini modelleyebilmek için çeşitli hasar teorileri öne sürülmüştür. Bu teorilerin esas amacı malzemenin hasara uğrayacağı gerilmelerin önceden tespit edilmesini sağlayarak yükleme sınırlarını tespit edebilmektir. Yaygın olarak kullanılan teoriler;

- Maksimum gerilme hasar teorisi: Kompozit tabakada, malzeme asal eksenlerindeki gerilme değerlerinden biri, aynı doğrultudaki malzeme mukavemet değerlerinden büyük ise kompozit hasara uğramaktadır.

Çeki gerilmeleri için;

$$\frac{\sigma_1}{X_c} < 1$$

$$\frac{\sigma_2}{Y_c} < 1$$
(6.1)

Bası gerilmeleri için;

$$\left| \frac{\sigma_1}{X_b} \right| < 1$$

$$\left| \frac{\sigma_2}{Y_b} \right| < 1$$
(6.2)

Kayma gerilmesi için;

$$\frac{\tau_{12}}{S} < S$$
(6.3)

- Maksimum şekil değiştirme hasar teorisi: Maksimum şekil değiştirme teorisi, maksimum gerilme teorisine oldukça benzemektedir. Bu teoride kompozit malzemenin uğradığı şekil değiştirmelerinden herhangi birinin buna karşılık gelen sınırı aşması halinde hasarın oluşacağı varsayılmaktadır.

Çeki şekil değiştirmesi;

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{x,c}} > 1$$
(6.4)

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{y,c}} > 1$$

Bası şekil değiştirmesi;

$$\left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{x,b}} \right| > 1$$

$$\left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{y,b}} \right| > 1 \quad (6.5)$$

Kayma şekil değiştirmesi;

$$\left| \frac{\gamma_{12}}{\gamma_c} \right| > 1 \quad (6.6)$$

- Tsai-Hill hasar teorisi: Bu teori, izotropik metal malzemelere uygulanan Von Mises akma kriterine dayanmaktadır. Tabakadaki asal eksenlerde oluşan gerilmelerin tümünü dikkate alarak kompozit plaka hasar kriterini belirlemektedir. Tsai-Hill teorisinin belirttiği hasar indeksi 1' den büyük ise hasar oluşmaktadır. Tabakada hasar oluşmaması için aşağıdaki eşitsizlik sağlanmalıdır.

$$\left( \frac{\sigma_1}{X} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{Y} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S} \right)^2 - \left( \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X} \right)^2 < 1 \quad (6.7)$$

Burada  $X = X_c$  veya  $X = X_b$  ve  $Y = Y_c$  veya  $Y = Y_b$ ' dir. Eğer uygulanan gerilme çeki ise çekme mukavemeti ( $X_c, Y_c$ ), bası mukavemeti ( $X_b, Y_b$ ) seçilmektedir.

- Tsai-Wu hasar teorisi: Kompozit malzemeler için en genel kırılma kriteri Tsai tarafından önerilen tensör polinom kriteridir. Tsai-Wu hasar teorisi altı boyutlu gerilme alanında hasar yüzeyinin olduğunu varsaymıştır. Bu teoriye göre hasar indeksi 1' den büyük ise hasar meydana gelmektedir.

$$F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{33} \cdot \tau_{12}^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 < 1 \quad (6.8)$$

- Hashin hasar teorisi: Bu teoride problemi oluşturan temel yaklaşım biçimi fiber takviye doğrultusunda ve fibere dik yöndeki doğrultuların dayanımlarının sırası ile fiber mukavemeti ve matris mukavemeti olarak adlandırılmasıdır. Sonlu eleman modellerindeki kullanımları idealdir. Hashin hasar teorisi genel olarak matris, çekme, matris basma, elyaf çekme ve elyaf basma hasar moduna dayandırılmıştır.

Bu tez çalışmasında Hashin hasar teorisi ile ilk hasarın nerede meydana geldiği ve hasara uğratan bu kuvvetin bulunması amaçlanmıştır.

### 6.3.1 Hashin hasar teorisi

Hashin kriteri; hasarı modlara ayırır, her birini kendi içinde bası-çeki ve gerilme-şekil değiştirme durumlarına göre ayrı ayrı inceler. Bu nedenle Hashin kriteri kompozit malzemede hasarın; matristen mi, fiberden mi yoksa katmanların birbirinden ayrılmasından mı olduğunu kolaylık anlamamızı sağlamaktadır. Hashin hasar teorisi; hasarları modlara ayırır, her birini kendi içinde basma-çekme durumlarına göre incelemektedir. Hashin hasar teorisi, kompozitlerde hasarın matriste mi veya fiberde mi olduğunu görmemize imkan sağlamaktadır.

- Fiber çeki hasarı: Hasarın oluşabilmesi için fiber doğrultusundaki çekme gerilmelerinin  $\sigma_1 > 0$  olması gerekmektedir. Hasara uğraması için denklem (6.9)' u sağlaması gerekmektedir.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (6.9)$$

- Fiber bası hasarı: Hasarın oluşabilmesi için fiber doğrultusundaki çekme gerilmelerinin  $\sigma_1 < 0$  olması gerekmektedir. Hasara uğraması için denklem (6.10)' u sağlaması gerekmektedir.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right) \geq 1 \quad (6.10)$$

- Matris çekme hasarı: Hasarın oluşabilmesi için fibere dik doğrultudaki y yönündeki çekme gerilmelerinin  $\sigma_2 > 0$  olması gerekmektedir. Hasara uğraması için denklem (6.11)' i sağlaması gerekmektedir.

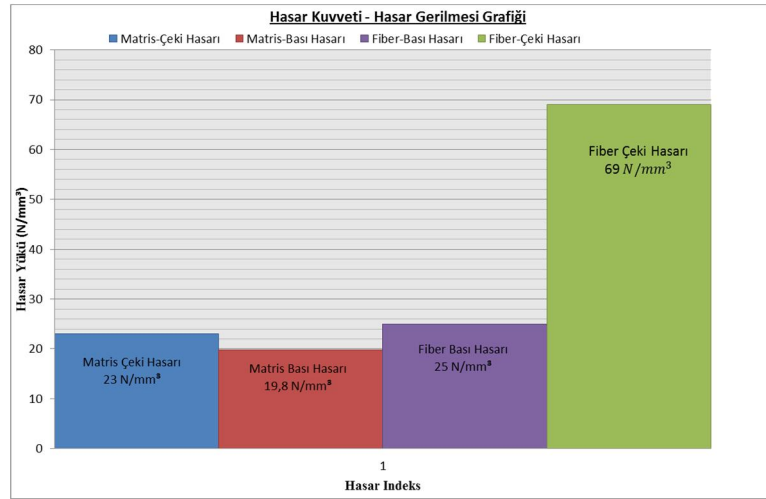
$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (6.11)$$

- Matris bası hasarı: Hasarın oluşabilmesi için fibere dik doğrultudaki y yönündeki çekme gerilmelerinin  $\sigma_2 < 0$  olması gerekmektedir. Hasara uğraması için denklem (6.12)' yi sağlaması gerekmektedir.

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (6.12)$$

### 6.3.2 Hashin hasar kriteri ile hasar tahmini

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen gerilme analizlerinden elde edilen en iyi yük taşıma kapasitesine sahip olan numunenin hasar analizi, Hashin Hasar Kriteri  $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$  oranlarına sahip olan numune için gerçekleştirilmiştir. Böylece gerilme analizinden elde edilen sonuçlar hasar analizi ile daha net bir şekilde ortaya konulmuş olup, kompozit yapı üzerindeki gerilme değerlerinin yüksek olduğu yerlerde hasar oluşumunun gerçekleştiği yerler olarak tespit edilmiştir. Ayrıca hasarı oluşturan hasar kuvveti değerinin tespiti hem matris hem de fiber bileşenlerinin çeki ve bası durumları için elde edilmiş olup Şekil 6.32’ de gösterilmiştir. Hasar yükleri sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen hasar indeksi değerinin 1 değerine yaklaştırılması ile bulunmuştur.



Şekil 6.32 :  $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$  oranına göre oluşturulan birleştirmeye ait hasar kuvvetlerinin Hashin Hasar Teorisi kullanılarak Abaqus yazılımı analizleri.

Abaqus sonlu elemanlar programında tabakalı olarak modellenmiş ve birleştirilmiş yarı numunelerine ait hasar oluşumlarının ilk önce bağlantı kilitinde meydana gelmesinden dolayı bağlantı kilitini oluşturan kompozit tabakalarına ait hem fiber ve hem de matris için ilk hasar yükleri Tablo 6.5’ de verilmiştir. Eğilme yükünün uygulandığı eğme pim ucunun hacmi  $27,5 \text{ mm}^3$  olduğuna göre ilk hasar  $544,5 \text{ N}$  civarlarında matris bası hasarı olarak elde edilmiştir. Bu elde edilen hasar indeksleri, kompozit numunedeki ilk hasara uğrayan tabakaya ait hasar indeksleridir. Kompozit tabaka yığınının sekiz adet olduğu düşünülürse bu tek tabakada meydana gelen hasarın kompozit yapıyı tümüyle etkilemediği yapılan deneylerden de tespit edilmiştir. Dolayısıyla kesit incelemesi yapıldığında ilk matris bası hasarının merkezdeki tabakada oluştuğu ve yükleme miktarını arttırdıkça da hasarın

merkezden numunenin dış yüzeyine doğru ilerlediği belirlenmiştir. Diğer hasar yükleri olarak ilk matris çeki hasarı 632,5 N, ilk fiber bası hasarı 687,5 N ve ilk fiber çeki hasarı 1897,5 N olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.5 : Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri

İlk Hasar Oluşum Yükleri (N/mm <sup>3</sup> )	Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
19,8	1	0,792	0,629	0,088
23	1,316	1	0,864	0,118
25	1,459	1,266	1	0,139
69	8,679	9,828	1,4	1

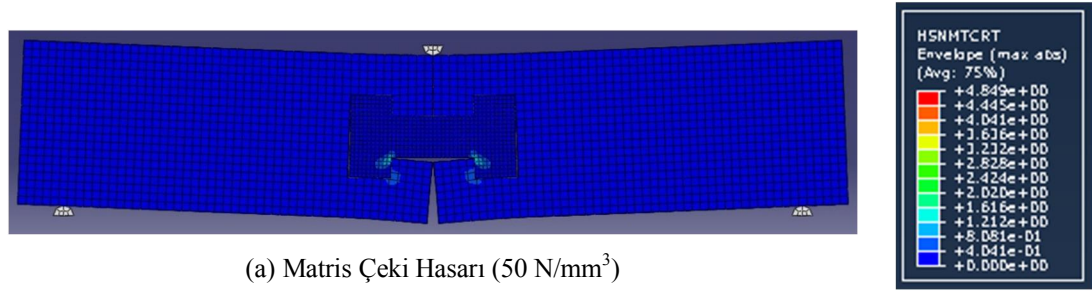
Bağlantı kilitinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri Tablo 6.6’ da gösterilmiştir.

Tablo 6.6 : Bağlantı kilitinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri

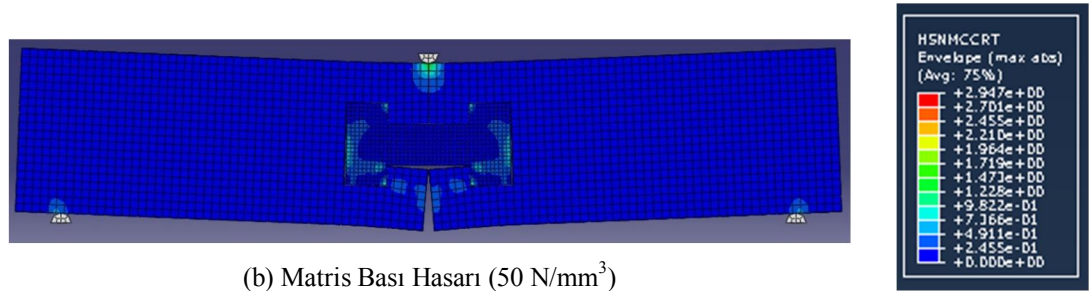
Deney yükü (N/mm <sup>3</sup> )		Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
50	Maksimum hasar indeksi değeri	2,947	4,849	3,347	0,542
	İlk hasarın meydana geldiği dış yüzeydeki hasar indeksi değeri	1	0	0,3	0

$h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$  oranındaki bağlantı kilitine ait Hashin hasar analizi hem matris hem de fiber bileşenlerinin çeki ve bası durumları için gerilme dağılımları ve değerleri Şekil 6.33’ de verilmiştir. 1375 N yüklemde matris çeki hasarı bağlantı kilitinin üzerinde iç köşe kısımlarında meydana geldiği Şekil 6.33 (a)’ da görülmektedir. Matris bası hasarı ise bağlantı kilitinin iç köşelerinde, kollarında ve

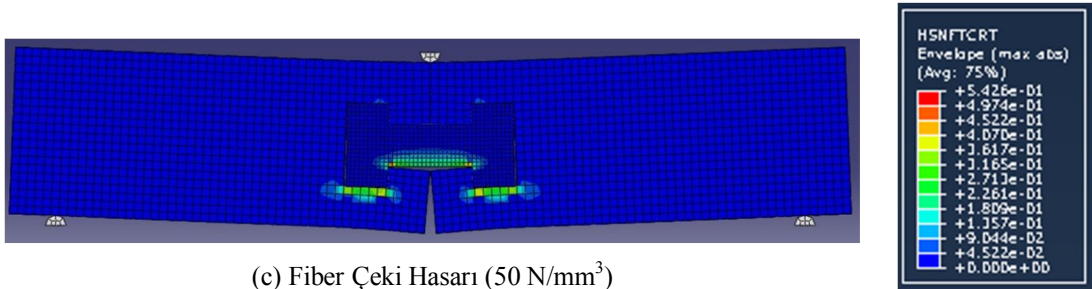
eğme pim ucunun kuvveti uyguladığı yarı numunelerde olduğu Şekil 6.33 (b)' de gösterilmiştir. Şekil 6.33 (c)' de fiber çeki hasarı çeki gerilmesine maruz kaldığından dolayı bağlantı kilitinin orta gövdesinde ve yarı numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Fiber bası hasarı bağlantı kilitinin iç köşe kısımlarında meydana gelmiştir. Tablo 6.6 ve Şekil 6.33' den de anlaşılacağı gibi matris bası hasarı oluşuktan sonra fiber bası hasarı olduğu görülmektedir.



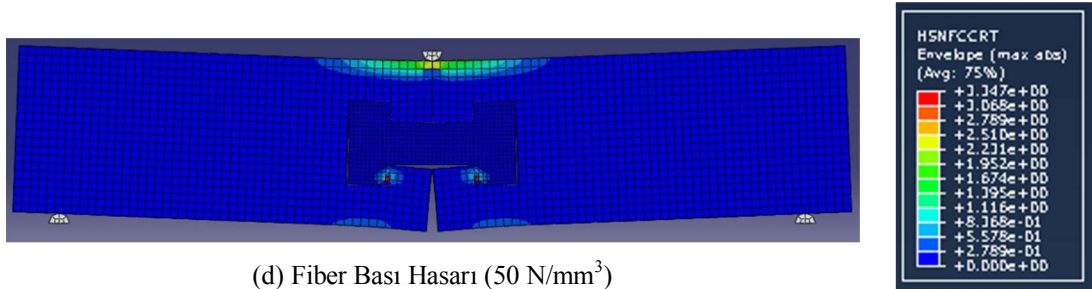
(a) Matris Çeki Hasarı (50 N/mm<sup>3</sup>)



(b) Matris Bası Hasarı (50 N/mm<sup>3</sup>)



(c) Fiber Çeki Hasarı (50 N/mm<sup>3</sup>)



(d) Fiber Bası Hasarı (50 N/mm<sup>3</sup>)

Şekil 6.33 :  $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeye ait 50 N/mm<sup>3</sup> kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak Abaqus yazılımı analizleri.



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1 Sonuçlar

Bu çalışmada I profilli bağlantı elemanının farklı geometrik parametrelerde ( $z/b$ ,  $b/W$ ,  $h/2W$ ) üç nokta eğilme deneyi kullanılarak ve sonlu elemanlar metodu ile analizi ABAQUS paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

Çeşitli geometrilerdeki I profilli bağlantı elemanında oluşan gerilme maksimum gerilme değerlerini ve gerilme dağılımını karşılaştırabilmek için Yol 1 ve Yol 2 hatları üzerindeki gerilmeler ele alınmıştır.

Maksimum gerilmeler kilit bağlantı elemanının orta ve iç köşe bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir.

- Kilit bağlantı elemanının farklı  $h/2W$  oranında gerilme sonuçları bulunmuştur. Herbir oran için gerilme değerleri incelenmiştir ve en uygun parametre  $h/2W=0,5$  oranı olarak tespit edilmiştir.
- $z/b$  oranı arttıkça kilit bağlantı elemanının yük taşıma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir.
- Yük taşıma kapasitesi, hasara en geç uğrayacak ve maksimum gerilmelerin homojen dağılımının en uygun olduğu I bağlantı elemanı  $h/2w=0,5$ - $b/w=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki geometri olarak tespit edilmiştir.
- Yapılan deneylerden kilit uç ve orta genişliğinin seçimi yük taşıma kapasitesi açısından oldukça önemli olduğu görülmüştür.
- Deneylerde ( $z/b$ ) oranının küçük değerlerinde özellikle kilitin alt uç kısmında kayma hasarlarının olduğu tespit edilmiştir. ( $z/b$ ) oranının büyük değerlerinde ise hasarların ilk önce numune ile beraber matris ezilmesi olarak olduğu gözlemlenmiştir.
- Deneylerden ve Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen görüntüler incelendiğinde kilit bağlantı elemanı ve yarı numuneler üzerindeki hasarların

oluştuğu konumlar birbirine çok yakındır. Deneysel çalışmalar ile nümeriklerin birbirlerini desteklediği görülmektedir.

- Deneylelerden elde edilen ilk hasar yükü değeri ile Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen ilk hasar yük değeri birbirlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir ve sonuçların birbirleriyle örtüştüğü belirlenmiştir.
- Matris bası hasarının dışındaki fiber bası ve matris çeki hasarlarının maksimum gerilmeleri kilit bağlantı elemanında ve yarı numunelerde meydana geldiği belirlenmiştir

## 7.2 Öneriler

Sistemin tamamında maksimum gerilmelerin düşümüne, yük taşıma kapasitesinin iyileştirilmesine, gerilmelerin homojen dağılımları için farklı geometriler kullanılabilir. Kompoziti [0/90] oryantasyonunda üretmek yerine farklı fiber oryantasyonlarına sahip kompozit üreterek birleştirme bölgelerindeki mukavemet değerleri yani birleştirmenin yük taşıma kapasiteleri arttırılabilir. Ayrıca mekanik alın birleştirilmiş kompoziti yapıştırıcı ile destekleyerek daha mukavemetli bir yapı elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Adams, R.D.**, 1989: Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherents, A Review. *Journal of Adhesion.*, 30: 219-242.
- Airoidi, A., Sala, G. and Bettini, P.**, 2007: Evaluation of Numerical Approaches for The Development of Interlaminar Damage in Composite Laminates. 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS.
- Akdoğan, A.**, 2008: Plastik Matrisli Kompozitler
- Altan, G.**, 2009: Değişik Sıcaklık ve Nem Etkisinde Çalışan Birleştirilmiş Kompozit Malzemelerin Yorulma Mukavemetlerinin İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2009), s. 20.
- Altan, G., Topçu M.**, 2010: Thermo-Elastic Stress of Metal-Matrix Composite Disc Under Linearly-Increasing Temperature Loading by Analytical and FEM Analysis. *Advances in Engineering Software* 41 (2010) 604-610.
- Arriga, A., Lazkano, J. M., Pagaldai, R., Zaldua, A. M., Hernandez, R., Atxurra, R. and Chrysostomou, A.**, 2006: Finite Element Analysis of Quasi-Static Characterisation Tests in Thermoplastic Materials: Experimental and Numerical Analysis Results Correlation with ANSYS. *Polymer Testing*.
- ASTM D 790-03**, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Amerikan Society for Testing and Metarials.
- Baere, I. D. and Supervisor(s):** Wim Van Paepegem ve Joris Degrieck. Design of a Three- and Four-Point Bending Setup for Fatigue Testing of Fibre-Reinforced Thermoplastics.
- Banea, M. D. and Da Silva.**, 2009: Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview. *Journal of Materials Design and Applications* 223: 1-18.
- Bogomolov, A. V. Borisenko, V. A. and Mishkin, A.**, 1998: N. Computational of Parameters in Testing Rods with Large Deflections for Bending. *Strength of Materials*, Vol. 30, No. 6, (1998) 658-664.
- Broughton, W. R., Crocker, L. E. and Urquhart, J. M.**, 2001: Strength of Adhesive Joints: A Parametric Study. Project PAJex1 - Report 3.
- Buchholz, F. G., Rikards, R. and Wang, H.**, 1997: Computational Analysis of Interlaminar Fracture of Laminated Composites. *International Journal of Fracture* 86: 37-57.

- Carbajal, N. and Mujika, F.**, 2009: Determination of Longitudinal Compressive Strength of Long Fiber Composites by Three-Point Bending of  $[0_m/90_n/0_p]$  Cross-Ply Laminated Strips. *Polymer Testing* 28 618–626.
- Carbajal, N. and Mujika, F.**, 2009: Determination of Compressive Strength of Unidirectional Composites by Three-Point Bending Tests. *Polymer Testing* 28 (2009) 150–156.
- Chawla, K. K.**, 1987: *Composite Materials Science and Engineering*. 140-283 Springer Verlag New York Inc.
- Chen W-H, Lee S-S, Yeh J-T.**, 1995: Three dimensional contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint, *Composite Structures*, 30, 287-97.
- Chengye Fan, P. Y. Ben Jar and Roger Cheng, J.J.**, 2006: Energy-Based Analyses of Delamination Development in Fibre-Reinforced Polymers Under 3-Point Bending. *Composites Science and Technology* 66, 2143–2155.
- Chung, K. and Ryou, H.**, 2009: Development of Viscoelastic/Rate-Sensitive-Plastic Constitutive Law for Fiber-Reinforced Composites and Its Applications. Part I: Theory and Material Characterization. *Composites Science and Technology* 69, 284–291.
- Chung, K. and Ryou, H.**, 2009: Development of Viscoelastic/Rate-Sensitive-Plastic Constitutive Law for Fiber-Reinforced Composites and Its Applications. Part II: Numerical Formulation and Verification. *Composites Science and Technology* 69, 292–299.
- Cui, W. C. and Wisnom, M. R.**, 1992: Contact Finite Element Analysis of Three and Four Point Short Beam Bending of Unidirectional Composites. *Composites Science and Technology* 45, 323-334.
- Cui, W. C., Wisnom, M. R. and Jones, M.**, 1992: Failure Mechanisms in Three and Four Point Short Beam Bending Tests of Unidirectional Glass/Epoxy. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 27: 235-243.
- Dawood, M. , Taylor, E. and Rizkalla, S.**, 2010: Two-way bending Behavior of 3-D GFRP Sandwich Panels with Through-Thickness Fiber Insertions. *Composite Structures* 92, 950–963.
- De Baere, Paepegem, W. V. and Degrieck, J.**, 2009: Comparison of Different Setups for Fatigue Testing of Thin Composite Laminates in Bending. *International Journal of Fatigue* 31, 1095–1101.
- De Jong, A.E.**, 1993: An Experimental and Micromechanical Study on the Transverse Tensile Properties of Fibre Reinforced Composites.
- Esendemir, Ü., Usal, M. R. and Usal, M.**, 2006: The Effects of Shear on the Deflection of Simply Supported Composite Beam Loaded Linearly. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25: 835.

- Esendemir, Ü., Usal, M. R., Öndürücü, A. and Usal, M.,** 2010: Orta Noktasından Tekil Yüke Maruz Kompozit Basit Kiriş için Maksimum Sehim Değerlerinin Deneysel, Nümerik ve Analitik Olarak Bulunarak İredelenmesi. C B Ü Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, cilt:2, sayı:14.
- Esendemir, Ü., Usal, M. R. and Usal, M.,** 2006: The Effects of Shear on the Deflection of Simply Supported Composite Beam Loaded Linearly. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 25: 835.
- Genç, M. S.,** 2005: Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Tek Yönlü Tabakalı Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarında Hasar Oluşumu ve Gelişimi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kayseri.
- Gunnion, A. J. and Herszberg, I.,** 2006: Parametric Study of Scarf Joints in Composite Structures. Composite Structures 75, 364–376.
- Gupta, N., Gupta, S. K., and Mueller, B. J.,** 2008: Analysis of a Functionally Graded Particulate Composite Under Flexural Loading Conditions. Materials Science and Engineering A 485, 439–447.
- Hammant, B.,** 1971: The Use of 4-Point Loading Tests to Determine Mechanical Properties. COMPOSİTES, 246-249.
- Hung, C.L. and Chang, F.K.,** 1996: Strength envelope of bolted composite joints under bypass loads, Journal of Composite Materials, 30, 1402-1435.
- Imanaka, M. and Iwata, T.,** 1996: Effect of Adhesive Layer Thickness on Fatigue Strength of Adhesively Bonded Butt, Scarf and Butterfly Type Butt Joints. International Journal of Fracture 80: R69-R76.
- Irhirane, E. H., Echaabi, J., Aboussaleh, M., Hattabi, M. and Trochu, F.,** 2009: Matrix and Fibre Stiffness Degradation of a Quasi-isotrope Graphite Epoxy Laminate Under Flexural Bending Test. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 28: 201.
- İçten, B.M., Karakuzu, R., and Toygar M.E.,** 2006: Failure Analysis of Woven Kevlar Fiber Reinforced Epoxy Composites Pinned Joints. Composite Structures, 73:443-450.
- İçten, B.M., Okutan, B. , and Karakuzu, R.,** 2006: Failure Strengh of Woven Glass Fiber-Epoxy Composites Pinned Joints. Composite Structures, 37:1337-1350.
- Jones, R. M.,** 1975: Mechanics of Composite Metaterials, Mc. Graw-Hill, Tokyo.
- Kam, T.Y. , Chen, C.M. and Yang, S.H.,** 2009: Material Characterization of Laminated Composite Materials Using A Three Point Bending Technique. Composite Structures 88, 624–628.

- Karpov, Ya. S.**, 2006: Jointing of High-Loaded Composite Structural Components. Part 1. Design and Engineering Solutions and Performance Assessment. *Strength of Materials*, Vol. 38, No. 3, 234-240.
- Kedward, K. T. and Kim, H.**, 2004: Static and Dynamic Strength of Scarf-Repaired Thick-Section Composite Plates. *Joining and Repair of Composite Structures*.
- Kwon, Y. W. and Marrón, A.**, 2009: Scarf Joints of Composite Materials: Testing and Analysis. *Appl Compos Mater*, 16:365–378.
- Lekhnitski, S. G.**, 1981: *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Moscow.
- Loctite**, 1988: *Worldwide Design Handbook*.
- Marsavina, L., Sadowski, T., Kneć, M. and Negru, R.**, 2010: Non-linear Behaviour of Foams Under Static and Impact Three Point Bending. *International Journal of Non-Linear Mechanics* 45, 969–975.
- Mirambell, E. and Real, E.**, 2000: On The Calculation of Deflections in Structural Stainless Steel Beams: An Experimental and Numerical Investigation. *Journal of Constructional Steel Research* 54, 109–133.
- Morais, A.B. and Pereira, A.B.**, 2009: Mode III Interlaminar Fracture of Carbon/Epoxy Laminates Using a Four-Point Bending Plate Test. *Composites: Part A* 40, 1741–1746.
- Mujika, F.**, 2006: On the Difference Between Flexural Moduli Obtained by Three-Point and Four-Point Bending Tests. *Polymer Testing* 25, 214–220.
- Mujika, F. and Mondragon, I.**, 2003: On the Displacement Field for Unidirectional Off-axis Composites in 3-Point Flexure – Part 1: Analytical Approach. *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 12, 1041-1066.
- Mujika, F., De Benito, A. and Mondragon, I.**, 2003: On the Displacement Field for Unidirectional Off-axis Composites in 3-point Flexure – Part II: Numerical and Experimental Results. *Journal of Composite Materials*, 37: 1191-1217.
- Mujika, F., Carbajal, N., Arrese, A. and Mondragon, I.**, 2006: Determination of Tensile and Compressive Moduli by Flexural Tests. *Polymer Testing* 25, 766–771.
- Nader, J. W., Dagher, H. J. and Lopez-Anido, R.**, 2011: Size Effects on The Bending Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30: 309-317.
- O'Brien, T. K. and Krueger, R.**, 2001: Analysis of Ninety Degree Flexure Tests for Characterization of Composite Transverse Tensile Strength. NASA/TM-211227 ARL-TR-2568.

- Osnes, H. and Andersen, A.,** 2003: Computational Analysis of Geometric Nonlinear Effects in Adhesively Bonded Single Lap Composite Joints. *Composites: Part B* 34 (2003) 417–427
- Shah, V., Consultek and Brea,** 2002: *Materials Selection of Handbook.*
- Solmaz, M. Y. and Turgut, A.,** 2009: Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Basit Bindirme Bağlantılarında Serbest Uç Açısı ile Bindirme Mesafesinin Bağlantı Mukavemeti Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 21 (2), 173-182.
- Qian, Z. and Akisyan, A. R.,** 1998: An Experimental Investigation of Failure Initiation in Bonded Joints. *Acta Metallurgica Inc.* Published by Elsevier Science Ltd.
- Rokach, I. V.,** 1998: Modal Approach for Processing One and Three Point Bend Test Data for DSIF Time Diagram Determination. Part II—Calculations and Results. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*; 21: 1015–1026.
- Romera, J.M., Adarraga, I., Cantera, M.A. and Mujika, F.,** 2011: Numerical Analysis of Displacement and Stress fields of Off-Axis Composites in Three-Point Flexure. *Journal of Composite Materials*, 45: 671-682.
- Seo, D. W. and Lim, J. K.,** 2005: Tensile, Bending and Shear Strength Distributions of Adhesive-Bonded Butt Joint Specimens. *Composites Science and Technology* 65, 1421–1427.
- Song, S. H., Byun, Y. S., Ku, T. W., Song, W. J., Kim J. and Kang, B. S.,** 2010: Experimental and Numerical Investigation on Impact Performance of Carbon Reinforced Aluminum Laminates. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26(4), 327-332.
- Srinivasa, C.V. and Friends.,** 2011: Static Bending and Impact Behaviour of Areca Fibers Composites. *Materials and Design* 32, 2469–2475.
- Sun, H.T., Chang, F.K., Qing, X.,** 2002: The response of composite joints with boltclamping loads, part I: model development”, *Journal of Composite Materials*, 36, 47-67.
- Şerban D. A., Marşavina, L. and Silberschmidt, V.,** 2011: Behaviour of Semi-Crystalline Thermoplastic Polymers: Experimental Studies and Simulations. *Computational Materials Science.*
- Tanimoto, Nishiwaki and Nemoto.,** 2003: Numerical Failure Analysis of Glass-Fiber-Reinforced Composites. *Wiley*, 107-113.
- Topçu, M., ve Karamolla, M.,** 1987: Kompozit Malzemeler ve İmalatı Yöntemleri. 2. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli, s. 153-165.

- Ullah, H., Harland, A .R., Lucas, T., Price, D. and Silberschmidt, V. V.,** 2011: Finite-Element Modelling of Bending of CFRP Laminates: Multiple Delaminations. Computational Materials Science.
- Vas, L. M., Racz, Z. and Nagy, P.,** 2004: Modeling and Testing the Fracture Process of Impregnated Carbon-fiber Roving Specimens During Bending: Part II – Experimental Studies. Journal of Composite Materials, 38: 1787.
- Vėjelis, V. and Vaitkus, S.,** 2006: Investigation of Bending Modulus of Elasticity of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs. ISSN 1392–1320 Materials Science. Vol. 12, No. 1. 22-24.
- Wisnom and Atkinson.,** 1997: Reduction in Tensile and Flexural Strength of Unidirectional Glass Fibre-Epoxy with Increasing Specimen Size. Composite Structures Vol. 38, No. 1-4, pp. 40-411.
- Yusof and Saleh, A. L.,** 2010: Flexural Strengthening of Timber Beams Using Glass Fibre Reinforced Polymer. Electronic Journal of Structural Engineering (10), 45-56.
- Zheng, Z. and Engblom, J. J.,** 2004: Computational and Experimental Characterization of Continuously Fiber Reinforced Plastic Extrusions: Part I – Short-term Flexural Loading. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 23: 777.



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Furkan Başbuğ  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** Altındağ / 16.02.1987  
**Adres:** Asmalevler mah. 6630 sokak No: 53 Kınıklı/DENİZLİ  
**Lisans Üniversitesi:** Selçuk Üniversitesi