



# **Mekanik Alın Birleştirilmiş Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Statik ve Dinamik Olarak İncelenmesi**

**Proje No: 110M250**

Doç.Dr. Gürkan ALTAN

Mayıs 2013  
DENİZLİ

## ÖNSÖZ

Farklı uygulama alanlarında kompozit malzemeler kullanılarak tasarımı gerçekleştirilen yapıların, hafif, kompakt, dayanıklı ve kullanım süresinin uzun olması ihtiyacı hem üretici hem de kullanıcı tarafından istenen ortak yönleridir. Bu yapılarda en önemli nokta ise, yapının birden fazla bileşenden oluşmasından dolayı bileşenlerin birleştirilmeleri gerekliliği ile yapının dayanımının sağlanması ve uzun kullanım süresine sahip olması gerekliliği mevcuttur. Buradaki temel hedef, en az iki veya daha çok kompozit bileşenin birleştirilmesiyle statik veya dinamik yük altındaki ana yapıdan kuvvet iletimini, tasarlanan birleşme bölgelerindeki mukavemet düşümlerini en aza indirgeyerek iletilmesini sağlamak gerekliliğidir. Endüstride, bu birleştirmeler için çeşitli mekanik ve yapıştırma teknikleri kullanılmaktadır.

Bu proje çalışmasında, yapılardaki birleştirme türlerinden, kompozit plakların alın altına birleştirilmesinde kullanılan yapıştırarak birleştirme yerine, I profilli bağlantı kilidi ile mekanik birleştirme yapılması önerilmiş olup; yapının çözülebilir olmasını ve kuvvet iletiminin yönlendirilebilmesini sağlaması açısından endüstrideki kullanım alanının yaygınlaşması potansiyeli de projenin önemini ayrıca ortaya koymaktadır.

Bu proje çalışmasını 110M250 nolu proje kapsamında destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na proje ekibi olarak çok teşekkür ederiz.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. LİTERATÜR ÖZETİ</b> .....	<b>3</b>
2.1 Mekanik Birleştirme ile ilgili Çalışmalar .....	3
2.2 Yapıştırma Birleştirme ile ilgili Çalışmalar .....	12
2.3 Üç ve Dört Nokta Eğilme Yükleme ile ilgili Çalışmalar .....	27
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELER ve BİRLEŞTİRME TİPLERİ</b> .....	<b>41</b>
3.1 Kompozit Malzemeler .....	41
3.2 Kompozit Malzemelerin Olumlu ve Olumsuz Yönleri .....	42
3.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları .....	42
3.4 Kompozit Yapılar ve Birleştirme Türleri .....	44
3.4.1 Mekanik birleştirme türleri .....	44
3.4.2 Yapıştırma birleştirme türleri .....	45
3.4.3 Birleştirme tiplerinin olumlu ve olumsuz yönleri .....	45
<b>4. KOMPOZİT MALZEMENİN ÜRETİMİ ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>48</b>
4.1 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	48
4.2 Kompozit Malzemenin Üretimi.....	52
4.3 Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri.....	54
4.4 Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	57
4.5 Deney Cihazının Tanıtımı .....	60
4.5.1 8801 Servo hidrolik test cihazı.....	60
4.5.2 Video ekstensometre .....	61
<b>5. ÜÇ ve DÖRT NOKTA EĞİLME DENEYLERİ VE DENEY APARATLARI</b> .....	<b>63</b>
5.1 Üç Nokta Eğilme Deneyi.....	63
5.1.1 Tabakalı kompozit malzemelerde üç nokta eğilme durumu .....	65
5.1.2 Üç nokta eğilme deney düzeneği.....	68
5.2 Dört Nokta Eğilme Deneyi .....	71
5.2.1 Dört nokta eğilme deney düzeneği.....	72
<b>6. DEĞİŞİK YÜKLEMELER ALTINDA BİRLEŞTİRME ELEMANININ OPTİMİZASYONU</b> .....	<b>77</b>
6.1 Üç Nokta Eğilme Yüğü Altında Birleştirme Elemanının Optimizasyonu .....	79
6.1.1 Üç nokta eğilme yüğü altında birleştirme elemanının deneysel optimizasyonu .....	79
6.1.2 Üç nokta eğilme yüğü altında birleştirme elemanının nümerik optimizasyonu.....	86
6.1.2.1 Eğilme yüğü altında nümerik çözüm adımları .....	86
6.1.2.1.1 Parça oluşturma .....	87
6.1.2.1.2 Malzeme özelliklerinin tanımlanması .....	88
6.1.2.1.3 Kesit özelliklerini tanımlama ve parça atama .....	90
6.1.2.1.4 Modele ait bileşenlerin montajlanması .....	91

6.1.2.1.5 Çözüm adımının tanımlanması	92
6.1.2.1.6 Sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması	92
6.1.2.1.7 Parçaların birbirleriyle etkileşiminin sağlanması	92
6.1.2.1.8 Modelin çözüm ağının oluşturulması	93
6.1.2.1.9 Analiz adımlarının birleştirilerek bir iş oluşturulması ve çözüme verilmesi	94
6.1.2.1.10 Elde edilen sonuçların görüntülenmesi	95
6.1.2.2 Üç nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının gerilme dağılımları	95
6.1.3 Hasar analizi	107
6.1.3.1 Maksimum gerilme hasar teorisi	108
6.1.3.2 Maksimum şekil değiştirme hasar teorisi	109
6.1.3.3 Tsai-Hill hasar teorisi	109
6.1.3.4 Tsai-Wu hasar teorisi	110
6.1.3.5 Hashin hasar teorisi	110
6.1.3.6 Hashin hasar kriteri ile hasar tahmini	112
6.2 Dört Nokta Eğilme Yükü Altında Birleştirme Elemanının Optimizasyonu	115
6.2.1 Dört nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının deneysel optimizasyonu	115
6.2.2 Dört nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının nümerik optimizasyonu	122
6.2.2.1 Dört nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının gerilme dağılımları	122
6.2.3 Dört nokta eğilme yükü altında hasar analizi	134
6.3 Çekme Yükü Altında Birleştirme Elemanının Optimizasyonu	137
6.3.1 Çekme yükü altında birleştirme elemanının deneysel optimizasyonu	137
6.3.2 Çekme yükü altında birleştirme Elemanının Nümerik Optimizasyonu	142
6.3.2.1 Fiziksel Problemin Modellenmesi	143
6.3.2.1.1 Parça oluşturma ve malzeme özelliklerini tanımlama	144
6.3.2.1.2 Kesit özelliklerini tanımlama ve parçaya atama	145
6.3.2.1.3 Model montajı	146
6.3.2.1.4 Çözüm adımının tanımlanması	147
6.3.2.1.5 Sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması	147
6.3.2.1.6 Parçalar arası etkileşiminin sağlanması	148
6.3.2.1.7 Modelin çözüm ağının oluşturulması	149
6.3.2.1.8 Bir iş oluşturularak çözüme verilmesi ve sonuçların elde edilmesi	151
6.3.2.2 Çekme yükü altında birleştirme elemanının gerilme dağılımları	153
6.3.3 Çekme yükü altında hasar analizi	162
6.4 Bağlantı Elemanının Yorulma Performansı	165
6.4.1 Tekrarlı Yükleme Durumu	165
6.4.2 Farklı Yük Seviyelerinde Yorulma Performansları	166
6.5 Değişik Yükleme Durumlarına Göre Geometrik Geliştirme	168
6.5.1 Çekme Yükleme	169
6.5.2 Üç Nokta Eğilme Yükleme	171
6.5.3 Dört Nokta Eğilme Yükleme	173
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	<b>176</b>
7.1 Sonuçlar	176
7.2 Öneriler	178
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>179</b>

## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Tablo 4.1: Cam-elyaf-epoksi kompozit malzemenin mekanik özellikleri .....	60
Tablo 4.2: Video ekstensometrenin teknik özellikleri .....	62
Tablo 6.1: Boyut tasarımlarının gerçekleştirildiği geçme şekil elemanlarının geometrik parametreleri.....	79
Tablo 6.2: Bağlantı kilidi ve numune için malzeme özellikleri .....	89
Tablo 6.3: Destekler için malzeme özellikleri .....	89
Tablo 6.4: Hashin Hasarı için gerekli mekanik değerler.....	89
Tablo 6.5: Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri .....	113
Tablo 6.6 Bağlantı kilitinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri.....	114
Tablo 6.7 Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri .....	135
Tablo 6.8 Bağlantı kilitinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri.....	135
Tablo 6.9 Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri .....	163
Tablo 6.10 Bağlantı kilitinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri.....	163
Tablo 6.11 R=0,1 yük oranında sıkı geçme kelebek birleştirmelerinin yorulma verileri.....	167

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 3.1: Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Camelyaf) .....	43
Şekil 3.2: Mekanik birleştirme türleri (Jones, 2009).....	44
Şekil 3.3: Yapıştırarak birleştirme türleri (Jones, 2009) .....	45
Şekil 4.1 : Elle yatırma yöntemi .....	49
Şekil 4.2 : Elyaf sarma yöntemi .....	49
Şekil 4.3 : Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi .....	50
Şekil 4.4 : Püskürtme yöntemi .....	50
Şekil 4.5 : Otoklav yöntemi (Chawla, 1987).....	51
Şekil 4.6 : Hazır kalıplama yöntem .....	51
Şekil 4.7 : Üretim presleri .....	52
Şekil 4.8 : Kompozit Plaka Üretimi .....	52
Şekil 4.9 : Üretilen kompozit plakalar .....	53
Şekil 4.10 : Su jeti ile numune kesimi.....	53
Şekil 4.11 : Montajlanmış deney numunesi .....	54
Şekil 4.12 : Mekanik özelliklerin tespiti için gerekli olan numuneler .....	56
Şekil 4.13 : Video ekstansometre ile deneyin yapılışı.....	57
Şekil 4.14 : [0] <sub>6</sub> çekme numunesi .....	57
Şekil 4.15 : [90] <sub>6</sub> çekme numunesi .....	58
Şekil 4.16 : [0] <sub>16</sub> basma numunesi .....	58
Şekil 4.17 : [90] <sub>16</sub> basma numunesi .....	58
Şekil 4.18 : [45] <sub>6</sub> kayma numunesi .....	58
Şekil 4.19 : İosipescu yükleme aparatı ve numune boyutları .....	59
Şekil 4.20 : 8801 Instron statik/dinamik test cihazı .....	60
Şekil 4.21 : Video ekstansometre .....	62
Şekil 5.1 : Üç Noktadan Eğme Deney Düzenegi .....	63
Şekil 5.2 : Üç Noktadan Eğme Moment Diyagramı.....	64
Şekil 5.3 : Ortasından tekil yüke maruz basit kiriş.....	65
Şekil 5.4 : Üç Nokta Eğilme Düzenegi için Alt Tutucu .....	69
Şekil 5.5 : Üç Nokta Eğilme Düzenegi için Üst Tutucu .....	69
Şekil 5.6 : Üç Nokta Eğilme Düzenegi için Alt Çene .....	70
Şekil 5.7 : Üç Nokta Eğilme Düzenegi için Üst Çene .....	70
Şekil 5.8 : Üç Nokta Eğilme Düzenegi için Komple Montaj.....	71
Şekil 5.9 : Dört Noktadan Eğme Deney Düzenegi.....	71
Şekil 5.10 : Dört Noktadan Eğmeye Ait Moment Diyagramı .....	72
Şekil 5.11 : Dört Nokta Eğilme Düzenegi için Alt Tutucu .....	73

Şekil 5.12 : Dört Nokta Eğilme Düzenegi için Üst Tutucu.....	73
Şekil 5.13 : Dört Nokta Eğilme Düzenegi için Alt Çene .....	74
Şekil 5.14 : Dört Nokta Eğilme Düzenegi için Üst Çene.....	74
Şekil 5.15 : Dört Nokta Eğilme Düzenegi için Komple Montaj .....	75
Şekil 5.16 : Yapım Aşamasındaki Üç Nokta Eğilme Test Aparatı .....	75
Şekil 5.17 : Üç ve Dört Nokta Eğilme Aparatı.....	76
Şekil 6.1 : Deneyi yapılacak I profilli alın birleştirilmiş numuneye ait modelin şematik görünümü .....	77
Şekil 6.2 : Eğilme düzeni .....	80
Şekil 6.3 : Bağlantı yüksekliğinin farklı h/2w oranı için bağlantı yüklerinin z/b oranlarındaki değişimi .....	81
Şekil 6.4 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik h/2w oranlarındaki yük değişimleri ve hasar şekilleri .....	82
Şekil 6.5 : Bağlantı yüksekliğinin h/2w=0,5 oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi .....	84
Şekil 6.6 : Bağlantı yüksekliğinin h/2w=0,5 oranı için bağlantı elemanlarının hasar durumları .....	85
Şekil 6.7 : Sonlu Elemanlar Metodu ile analizi yapılacak modelin şematik görünümü .....	86
Şekil 6.8 : Tasarımı yapılan bağlantı kilidinin üç boyutlu model görünümü .....	87
Şekil 6.9 : Tasarımı yapılan birleştirme numunesi üç boyutlu model görünümü .....	88
Şekil 6.10 : Tasarımı yapılan desteğin üç boyutlu model görünümü .....	88
Şekil 6.11 : Oryantasyon yönleri ve malzeme özelliklerinin atandığı composite layup ekranı .....	89
Şekil 6.12 : Bağlantı Kilidi Üzerine Kesitin Atanması .....	90
Şekil 6.13 : Birleştirme Numunesi Üzerine Kesitin Atanması.....	90
Şekil 6.14 : Destek Üzerine Kesitin Atanması .....	91
Şekil 6.15 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde birleştirilmesi.....	91
Şekil 6.16 : Modelin sabitlenmesi ve eğilme yükünün uygulanması .....	92
Şekil 6.17 : Model bileşenlerinin arasında temas tanımlaması gerçekleştirilmesi.....	93
Şekil 6.18 : Modelin uygun çözüm ağı oluşturulması.....	94
Şekil 6.19 : Modelin çözüme verilmesi.....	94
Şekil 6.20 : Modelin gerilme dağılımı .....	95
Şekil 6.21 : Modelin Hashin hasar teorisine göre matris bası hasar gerilme dağılımı .....	95
Şekil 6.22 : Gerilme dağılımlarının incelendiği Yol 1 ve Yol 2 .....	96
Şekil 6.23 : h/2W=0,5 ve b/W=0,3 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme değişimleri.....	98
Şekil 6.24 : h/2W=0,5 ve b/W=0,3 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımı .....	99
Şekil 6.25 : h/2W=0,5 ve b/W=0,4 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme değişimleri.....	100
Şekil 6.26 : h/2W=0,5 ve b/W=0,4 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları .....	102
Şekil 6.27 : h/2W=0,5 ve b/W=0,5 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme değişimleri.....	103
Şekil 6.28 : h/2W=0,5 ve b/W=0,5 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları .....	104
Şekil 6.29 : h/2W=0,5 ve b/W=0,6 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme değişimleri.....	105
Şekil 6.30 : h/2W=0,5 ve b/W=0,6 geometri parametrelerine göre değişik z/b oranlarının gerilme dağılımları .....	106

Şekil 6.31 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme değişimleri.....	106
Şekil 6.32 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranının gerilme dağılımları .....	107
Şekil 6.33 : $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$ oranına göre oluşturulan birleştirmeye ait ilk hasar kuvvetleri.....	112
Şekil 6.34 : $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$ oranındaki birleştirmeye ait $50 \text{ N/mm}^3$ kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak hasar analizleri.....	114
Şekil 6.35 : Eğilme düzeni .....	115
Şekil 6.36 : Bağlantı yüksekliğinin değişik $h/2w$ oranı için bağlantı yüklerinin $z/b$ oranlarındaki değişimi.....	117
Şekil 6.37 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik $h/2w$ oranlarındaki yük değişimleri .....	118
Şekil 6.38 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w=0,5$ oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi .....	120
Şekil 6.39 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w=0,5$ oranı için bağlantı elemanlarının hasar şekilleri .....	121
Şekil 6.40 : Gerilme dağılımlarının incelendiği Yol 1 ve Yol 2 .....	122
Şekil 6.41 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,3$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme değişimleri.....	123
Şekil 6.42 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,3$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme dağılımları .....	125
Şekil 6.43 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,4$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme değişimleri.....	126
Şekil 6.44 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,4$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme dağılımları .....	128
Şekil 6.45 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,5$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme değişimleri.....	129
Şekil 6.46 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,5$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme dağılımları .....	130
Şekil 6.47 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,6$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme değişimleri.....	131
Şekil 6.48 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,6$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme dağılımları .....	132
Şekil 6.49 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme değişimleri.....	133
Şekil 6.50 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometri parametrelerine göre değişik $z/b$ oranlarının gerilme dağılımları .....	133
Şekil 6.51 : $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$ oranındaki birleştirmeye ait $41,5 \text{ N/mm}^3$ kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak hasar analizleri.....	136
Şekil 6.52 : Çekme düzeni.....	137
Şekil 6.53 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w$ oranı için bağlantı yüklerinin $z/b$ oranlarındaki değişimi .....	139
Şekil 6.54 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik $h/2w$ oranlarındaki yük değişimleri .....	140
Şekil 6.55 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w=0,5$ oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi .....	141
Şekil 6.56 : Bağlantı yüksekliğinin $h/2w=0,5$ oranı için bağlantı elemanlarının hasar şekilleri .....	142
Şekil 6.57 : Analizi yapılacak modelin şematik görünümü.....	143



Şekil 6.58 : Tasarımı yapılan bağlantı kilidinin üç boyutlu model görünümü.....	144
Şekil 6.59 : Tasarımı yapılan birleşme numunesini üç boyutlu model görünümü.....	145
Şekil 6.60 : Bağlantı Kilidi Üzerine Kesit Atanması .....	146
Şekil 6.61 : Birleşme Numunesi Üzerine Kesit Atanması .....	146
Şekil 6.62 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde birleştirilmesi.....	147
Şekil 6.63 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması .....	148
Şekil 6.64 : Model bileşenlerinin arasında temas tanımlamasının gerçekleştirilmesi.....	149
Şekil 6.65 : Eleman sayısına karşılık en yüksek yapısal gerilme değerleri .....	150
Şekil 6.66 : Modelin çözüm ağının gerçekleştirilmesi .....	150
Şekil 6.67 : Modelin çözüme verilmesi.....	151
Şekil 6.68 : Elde edilen analiz sonuçlarının görüntülenmesi .....	152
Şekil 6.69 : Kilit üzerinde oluşan gerilme dağılımlarının incelendiği Yol .....	153
Şekil 6.70 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,3$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri .....	154
Şekil 6.71 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,3$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri .....	155
Şekil 6.72 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,4$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri .....	156
Şekil 6.73 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,4$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri .....	157
Şekil 6.74 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,5$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri .....	158
Şekil 6.75 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,5$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri .....	159
Şekil 6.76 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,6$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri .....	160
Şekil 6.77 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,6$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri .....	161
Şekil 6.78 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri .....	161
Şekil 6.79 : $h/2W=0,5$ ve $b/W=0,7$ geometrik parametrelerinin değişik $z/b$ oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri .....	162
Şekil 6.80 : $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$ oranındaki birleştirmeye ait 32 N/mm <sup>2</sup> kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak hasar analizleri.....	164
Şekil 6.81 : Genel değişken yükleme durumu.....	165
Şekil 6.82 : Birleştirmelerin yorulma performansları.....	168
Şekil 6.83 : Geometrik geliştirme .....	169
Şekil 6.84 : Geometrik geliştirmelerin çekme yükü deneyleri .....	170
Şekil 6.85 : Çekme yükü altında geometrik geliştirme .....	171
Şekil 6.86 : Geometrik geliştirmelerin üç nokta eğilme yükü deneyleri .....	172
Şekil 6.87 : Üç nokta eğilme yükü altında geometrik geliştirme .....	173
Şekil 6.88 : Geometrik geliştirmelerin dört nokta eğilme yükü deneyleri .....	174
Şekil 6.89 : Dört nokta eğilme yükü altında geometrik geliştirme .....	175

## 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)

## 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

## ÖZET

### MEKANİK ALIN BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ STATİK VE DİNAMİK OLARAK İNCELENMESİ

Çağımızın ileri teknolojisinin üst düzey nitelikli malzemeye olan ihtiyacı artan bir ivme ile devam etmektedir. Gelenekselleşmiş mühendislik malzemeleri artık bu sürecin isteklerine karşı yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle temel olarak iki veya daha çok malzemenin beraber kullanımı ile oluşturulan ve oluşum sonucundaki malzemenin içerdiği bileşenlerinden farklı özelliklere sahip yeni türdeki malzemelerin yani kompozit malzemelerin kullanım alanları giderek artmaktadır. Kompozit malzeme kullanımının gerçekleştirildiği alanlarda da çeşitli zorunluluklar ortaya çıkmaktadır. Hem üretim aşamalarında hem de mühendislik tasarımlarında gerçekleştirilecek sistemler birden fazla parçadan oluşmaktadır. Bu nedenle tasarımı yapılan sistemin, amacı doğrultusunda iş yapar bir duruma getirilebilmesi için parçaların birleştirilmesi ve birbirleriyle çeşitli açılardan fonksiyonel olarak uyumlu hale getirilmesi gerekmektedir. Bu uyum mekanik ve yapıştırma teknikleri ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, kompozit plakaların alın altına birleştirilmesinde kullanılan yapıştırma tekniği yerine kullanılacak, I profiline sahip bir bağlantı kilidi ile yapılan mekanik birleştirmeler önerilmiştir. I profilli bağlantı kilidini karakterize eden temel geometrik parametrelerinin değişimi ile oluşturulmuş farklı boyutlardaki kilitlerin yük taşıma yeteneği, kompozit yapı bileşenlerinin dayanımı ve ilk hasar oluşumunun üzerine etkileri nümerik ve deneysel olarak incelenmiş olup içlerinden en uygun dayanıma sahip olan birleştirmenin tespiti de gerçekleştirilmiştir.

Kompozit yapının bütünüyle hasara maruz kalarak kullanılamaması durumu yerine I profilli bağlantı kilidi üzerinde meydana gelecek ilk hasarın belirlenmesi ve buna bağlı olarak kompozit yapının kullanım ömrünün arttırılması sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit malzeme, geometrik birleştirme, hasar analizi

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIORS AS STATIC AND DYNAMIC OF MECHANICAL BUTT JOINTED COMPOSITE PLATES

The need of advanced technology age to high level quality materials is increasing steadily. Traditional engineering materials are not sufficient for the needs of this process. Therefore, materials composed basically of two or more materials and having different properties from its components, in other words, the use of composite materials is rising. In the areas where composite materials are used, there are various difficulties. The systems composed of more than one parts both in production stages and engineering designs. Thus, in order to design the system and make it operate according to its objective defined, the parts must be jointed and they become functionally in harmony. This harmony is provided with mechanical and bonding techniques. In this study, it is suggested to use mechanical joint made by a lock fitting having I profile which can be used instead of bonding technique used for butt to butt joint of composite plates. Load carrying capacity of the locks in different sizes composed of basic geometric parameters characterizing I profile lock fitting, strength of composite structure components and effect on the first damage occurrence are analysed numerically and experimentally and the most suitable type of joint is determined.

Instead of the case in which the composite structure cannot be used without total exposure to the damage, it has been possible to determine the first damage that may occur on I profile joint lock and thus increase the lifespan of the composite structure.

**Key Words:** Composite material, 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 proje kapsamında alın birleştirmelerde özellikle yapıştırma yöntemi yerine I geometrik şekilli mekanik bağlantı elemanları kullanılmıştır. I geometrili 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 projenin önemini daha açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Kompozit plakaların birleştirilmesinde kullanılan yapıştırılmış alın birleştirmeler yerine kullanılacak, I profilli bağlantı kilidi ile yapılan mekanik alın birleştirmeler kullanılarak, zayıflamış olan ara geçiş bölgesinin çeki gerilmesi altındaki optimum düzeyde dayanıklılığın

hangi geometrik parametrelerden oluşan bağlantı kilidi tarafından sağlandığının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda; farklı geometrilerdeki I profilli kilit bağlantı elemanı ile mekanik alın birleştirilmiş numunelerin laboratuvar ortamında eğilme ve çekme testi ile mekanik davranışlarının incelenmesi gerçekleştirilecektir. 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).

Kompozit malzemelerin birleştirilmeleri ile ilgili olarak literatürde çok çeşitli birleştirme türleri vardır. Bu çalışmaların bir kısmı birleştirmelerin nasıl yapıldığı konu alırken bir kısmında birleştirilmiş sistemlerin statik ve dinamik performansları konu olarak alınmıştır. Yapılan çalışmalar temelde mekanik ve yapıştırarak birleştirmeler olmak üzere iki ana sınıf şeklinde ele alınarak incelenebilmektedir. Ayrıca bu çalışmayla ilgili olarak kompozit yapılarda gerçekleştirilen üç nokta ve dört nokta eğilme testleri ile ilgili statik, dinamik ve yorulma performanslarının da literatür araştırılması yapılmıştır.

### 2.1 Mekanik Birleştirme ile ilgili Çalışmalar

Naik vd (2002) üç boyutlu dokunmuş kompozit modellerin dayanımının, üç boyutlu açılı kenetleyerek dokunmuş kompozitlerdeki tek eksenli çekme gerilmesi ve kayma gerilmesi altındaki hata davranışlarının tahmini üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Model, yinelenen birim hücrenin iki düzeydeki ayrıklaştırılmasına dayandığını belirtmişlerdir. Yinelenen birim hücre, bölümlere, elemanlara, altbölümlere ve alt elemanlara bölünmüşlerdir. Alt eleman seviyesinde gerçekleştirilerek ikincil hatalardaki gerilme seviyelerinin, modelde öngörüsünü yapmışlardır. İkincil hatanın etkileri; ileriki analizler, son çekme gerilmesi dayanımı, kayma gerilmesi dayanımı ve eş değer şekil değişimleri için dikkate alarak belirlemişlerdir. Farklı üç boyutlu açılı birleştirilerek dokunmuş kompozit grupları için parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Nie vd (2006) yazdıkları bu makalede, açılı örülmüş kumaş yapısının tanımlanması için bilinen kademeli formül tanımlaması yaparak basit bir metot sunmuşlardır. Çok tabakalı açılı



geçme kumaş, çözgü ve atkı dokumaları arasında birbirine göre iç içe girerek, açılı geçme kumaş yapısı olarak ve formül ile bir birim hücrede bir çözgü iplik dokuma üstünlüğünü göstermek için sunmuşlardır. Ayrıca bu makalelerinde, çok tabakalı açılı geçme kumaş tasarımı için uygulamalı kademeli formülün genişletilmiş bir metot olarak da vermişlerdir. Kademeli formül tanımlama metodunu tartışmalarından sonra, bu açıklama yönteminin çok etkili olduğu kanıtlamışlardır ve sunum için geçerli olduğunu belirtmişlerdir. Açılı geçme kumaş yapısı ve dokuma kumaş tasarımı özellikle çok tabakalı açılı geçme kumaş için bilgisayar destekli tasarımın çok etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Baucom vd (2010) fiber takviyeli kompozit tabakalardaki, bir orta ölçekli düzlem yerleştirme tekniğini geliştirmek için çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Böyle bir teknik, tabakaların tasarım alanını genişletmekle birlikte bölgesel olarak tabaka özelliklerinin adapte edilmesi yeteneği de kazandırılabilceğini ifade etmişlerdir. Örneğin; böyle tabakaların serbest kenarlarındaki gibi yerlerde ortaya çıkan gerilme yoğunluklarını azaltabilmekte olduğunu belirtmişlerdir. Döşenmiş tabakaların ön imalatı, neredeyse eşit bir elastik modül ile sürekli takviye edilmiş bir malzeme ile üretmişlerdir. Ancak bu ilk deney numunelerinin dayanımının önemli bir ölçüde azaldığını belirtmişlerdir. Sonlu eleman analizleri, kendine özgü olarak döşenmiş kompozit tabakaların karakteristik etkilerini ve ardından performansını belirlemek için yapılmışlardır. Birebir olarak döşenmiş, zengin reçine ara yüzlerinde olduğu gibi, döşenen tabaka kalınlığı boyunca düzenlenen bağlantının etkilerini de araştırmışlardır. Minimum dayanımını en aza indirmek için, ayrıca yeni bir bileşik ortak bağlantı geometrisi gibi önerilerin oluşmasına da neden olduğunu belirtmişlerdir. Yeni tasarım kuralları kullanılarak üretilen tabakaların mukavemet değerleri ile geleneksel deney analogları karşılaştırıldığında %92 fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Son olarak, serbest kenarlardaki dairesel süreksizlik bölgesinin önlenmesi için kompozit döşemelerin potansiyel uygulamalarını irdelemişlerdir.

Santiuste vd (2010) yaptıkları bu çalışmada, havacılıkta kullanılan cıvatalı bağlantıların sıcaklık ve tork etkisi altındaki davranışlarının analizi üzerinde durmuşlardır. Bir titanyum cıvatayı ve kompozit levhaları ASTM D5961'e göre tekli bindirme olarak kabul etmişlerdir. Her iki cıvata ve kompozit plakalarda oluşan gerilmeleri değerlendirmek için FEM'e dayalı sayısal bir model geliştirmişlerdir. Yük-yer değiştirme eğrileri, gerilme alanları ve hasar etkilerindeki, özellikle bağlantı üzerindeki tork seviyesi ile sıcaklığın birlikte etkisi olduğunu göstermişlerdir. Plaka, hem maksimum ve minimum tork seviyeleri dikkate alınarak

üretmiş, hem de kritik hasar eşiği üzerinde olduğunu bulmuşlardır. Bağlantının üretim süreci boyunca, bu gerçek hesaplamalara dâhil olması gerektiğini belirtmişlerdir.

İçten vd (2006) dokunmuş kevlar epoksi kompozit plakaların mekanik olarak oluşturulmuş birleştirmelerin hasar yükünü ve hasar modunu belirleyebilmek için bir araştırma yapmışlardır. Hasar başlaması, ilerlemesi ve birleştirmelerin dayanımını tahmin edebilmek için 2 boyutlu sonlu elemanlar kodu geliştirmişlerdir. Hasar analizinde Hashin, Hoffman ve Maksimum Gerilme kriterlerini kullanmışlardır. Analizde bağlantı geometrisinin etkilerini parametrik olarak değerlendirmişlerdir. Yapmış oldukları deneyleri, hasar modunu tahmin edebilmek ve hasar yükünü bulabilmek için gerçekleştirmişlerdir. Elde etmiş oldukları sonuçları karşılaştırmış olup, nümerik ve deneysel çalışmalar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Aktas ve Dirikolu (2004),  $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_S$  ve  $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_S$  tabaka konfigürasyonlu karbon epoksi kompozit plakalarını pim ile oluşturularak yapılan birleştirmelerin mukavemetini araştırmak için deneysel ve nümerik bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları deneyleri ASTM D953 standardına göre, nümerik analizleri ise sonlu elemanlar metoduna göre gerçekleştirmişlerdir. Kenar uzunluğunun pim çapına oranı (E/D) ve deney numunesinin genişliğinin pim çapına oranı (W/D) analizler sırasında sistematikleştirmişlerdir. Her iki analiz sonucu olarak hazırlamış oldukları deney konfigürasyonları yatak hasar modunu göstermiştir.  $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_S$  konfigürasyonunun yataklama mukavemetinin  $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_S$  konfigürasyonu ile karşılaştırıldığında daha güçlü olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak her iki konfigürasyonla E/D ve W/D oranlarının 4'den büyük veya eşit olduğunda yataklama mukavemetlerinin en üst sınırlara ulaştığını ifade etmişlerdir.

Fu ve Mallick (2001) yaptıkları bu çalışmada, enjeksiyon ile kalıplanmış kompozit yapıların yapıştırma ve civatalı olarak yapılmış bağlantılarının statik ve yorulma performansları üzerinde çalışmışlardır. Hibrit bağlantıların, yapıştırma bağlantılarından daha yüksek statik hasar yüküne ve daha uzun yorulma ömrüne sahip olduklarını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, hibrit bağlantının performansının rondela tasarımına bağlı olduğunu deneysel yöntemlerle ve sonlu elemanlar analizleri ile ifade etmiş olup, başarılı bir hibrit bağlantısı için daha uygun bir rondela türü geliştirmişlerdir.

Strakiv ve Schön (2002) yapmış oldukları bu çalışmada, öncelikle civatalı kompozit bağlantıların yorulma davranışını anlayabilmek için bölgesel olarak kompozit çevresince tutturulmuş bağlantıların iyi bir şekilde anlaşılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Boscolo vd (2010) çift taraflı takviyeli olarak güçlendirilmiş bütünleşik yapılarda yorulma sonucu çatlak ömrünün tahmini için 2 boyutlu sonlu eleman modelleme tekniği üzerine çalışmışlardır. Esas olarak, bütünleşik yapılarda hasar toleransı eksikliğinin çözümü için çeşitli tasarım çözümleri sunmuşlardır. Birleştirilmiş yapılardaki birçok ve karmaşık hasar mekanizmalarından dolayı, önemli tasarım parametrelerinin değerlendirilmesi için geniş kapsamlı bir modelleme tekniğine ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmanın iki kısımdan oluştuğunu belirtmişlerdir. İlk olarak birleştirilmiş yapıların hareket ve mekanizmalarını içeren kısım üzerine çalışmışlardır. Ardından, her bir mekanizma için modelin sunumuna benzer şekilde simülasyonlar yapmışlardır. Dairesel süreksizlik bölgesi veya çözülmüş olan desteklerde, ön gerilme enerjisini bırakma oranı ve bir kırılma mekaniği kriteri ölçüt alınarak bilgisayarda modellenmesini yapmışlardır. Termal gerilme artıkları, yapıştırılarak birleştirme sürecinde ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Onların tabandaki çatlak dağılımı gelişmesinin hesaplanması ile çatlak ömrü analizini göz önünde tutmuşlardır. İkincil eğilme etkisi, tek taraflı asimetric geometriye sahip takviye olarak modellenmesini yapmışlardır. Klasik doğrusal elastik kırılma mekaniği, bir boyutsuz gerilme şiddeti faktörü sadece numune geometrisine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Yani gerilme faktörü  $b$ 'ye bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Çözülme büyüklüğü ile ilişkili olduğunu ve çözülme boyutuna uygulanan gerilmenin, yapının geometrisini değiştirdiğinden itibaren bu  $b$  faktörü çeşitli bağlı yapılar için bulunamamakta olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, ikincil eğilme etkisinin geometrik olarak nonlineer olduğunu ortaya koymuşlardır. Böylece, gerilme şiddet faktörü, uygulanan gerilme ile normalize edilemez olduğunu göstermişlerdir. Bu nedenlerden dolayı, her bir çatlak uzunluğu için hem maksimum ve minimum uygulanan gerilmeleri, hem de gerilme şiddet faktörünün hesap ihtiyacını da içerecek şekilde alternatif bir teknik geliştirmişlerdir. Bu analiz tekniği, bir bilgisayar ara yüzünde NASTRAN ticari programı yardımıyla yorulma sonucu çatlak gelişim sürecinin yapılardaki destek iyileştirmesinde uygulanmakta olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kinloch vd (1992) yaptıkları bu çalışmada, bir epoksi macun yapıştırıcı kullanarak Termoplastik fiber kompozitlerin birleştirmesini göz önüne almışlardır. Çalışmalarındaki

bağlantı tasarımında ikili bindirme geometrisini kullanmışlardır. İlk olarak, Termoplastik fiber kompozit tabanlarının, önceki taç şeklindeki yapısal yüzey bağlantısının iyileştirilmesiyle iyi bir bağlantı dayanımına sahip olduğunu göstermişlerdir. İkinci olarak, konik kompozit yüzeylerde, açılı bir şekilde doldurulmuş yapıştırıcıların kullanımı ile bağlantı dayanımının arttırılabilir olduğunu belirlemişlerdir. Aslında, bağlantı verimleri bu gibi ikili bindirme bağlantıları için 100% benzerlik gösterebilmekte olduğunu belirtmişlerdir. Üçüncü olarak, sonlu elemanlar analizlerinde ve teorik çalışmalarında çeşitli bağlantı tasarımlarını kullanmışlardır. Yapmış oldukları bu analizlerin sonuçları ile deneysel ölçümlerinin iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Soni vd (2009) yapmış oldukları çalışmada kulplu bağlantıların yorulma hasarı deneyimlerinin havacılık endüstrisindeki önemli birkaç noktadan biri olduğunu belirtmişlerdir. Al2024 T351 plakasından 0.25 inç kalınlıkta hazırlamış oldukları kulplu bağlantı örneklerinde birkaç farklı yorulma testleri yapmış olup, farklı bir hata modeli olarak belirtmişlerdir. Tüm örneklerdeki yüklemelerin başarısız olarak sonuçlandığını belirtmişlerdir. Bu nedenle şimdi yapmış oldukları bu çalışma; deneysel ve sayısal modellemesi aktif olarak farklı çentik ölçülerindeki yüklemelerle sunmuş olup, sağlıklı bir biçimde piezoelektrik güç çeviricilerini uygulamışlardır. Gerçek zamanlı deneysel simülasyonlarda sonlu eleman analizlerini kullanmışlardır. Kulplu bağlantı örneklerindeki çatlak geometrisi ve piezoelektrik güç çeviricileri hem deneysel hem de simülasyon için aynı uyumu koruduğunu göstermişlerdir. Sonuçlar, kulplu bağlantılarda güdümlü dalgaların oluşturduğu hasarın fizibilitesini sorgulayarak örneklerle ortaya koymuşlardır. Deneysel ve simülasyon sonucu, sensörlerden elde ettikleri sinyaller aralarında karşılaştırılmış olup, frekans alanı içinde uygun bağıntılar gösterdiklerini belirtmişlerdir. Sensör sinyal verisinin frekans dönüşümü, hasar karakterizasyonu için faydalı bilgi sağlamakta olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmalarda kullanılan sensör hassasiyeti, farklı hasar durumları için uzaklık temelli bir tekniğe dayanmış olup, sensörden gelen veriler sınıflandırılarak yönlendirilmişlerdir. Bu bilgi, gereğinden fazla indirgenmiş sensörler tarafından ve en uygun sensör konumlandırılması yoluyla hasarın yerini içeren birçok uygulamalarda kullanılabilen olduğunu belirtmişlerdir.

Campilho vd (2008) yaptıkları bu çalışmada, tek takviyeli onarımların gerilme davranışları ile ilgili deneysel ve numerik analizlerinin her ikisini de konu olarak ele almışlardır. İki temel geometrik parametre olan; üst üste gelme uzunluğu ve yama kalınlığı üzerinde çalışmışlardır.

Nümerik model için ABAQUS yazılımını kullanmışlardır. Yapıştırılarak birleştirilmiş hasar modeli modu için uygun eğilebilir yapıştırıcılar geliştirmiş olup, arayüz içinde sonlu elemanlar uygulaması yapmışlardır. Gerilme analizleri ve dayanımlarına ait tahminler yürütmüşlerdir. Deneysel ve nümerik çalışmalar; hasar modları, hasar yükleri ve onarım için eş değer katılığı açısından karşılaştırmalar yapmışlardır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasında iyi bir ilişki saptamışlardır. Bu ilişki, model için uygulanan bağıntıların veya onarımların başarılı olduğunu ortaya koyduğu için önermişlerdir.

Belgin vd (2010) yaptıkları bu çalışmada, uzun-dar CFRP parçası ve beton yüzey arasındaki farklı sayıda demirle destek uygulamalarının, dizilişlerinin ve demir türlerinin gerilme dağılımı üzerindeki etkisi üzerine çalışmışlardır. Sıkıştırılmış betonun dayanımı ve uzun-dar CFRP parçasının bağlantı uzunluğu sabit tutularak, iki farklı demirle destekleme dizilişleri ile iki tip demir destek türü ve üç farklı demir destek numarasıyla 12 deney numunesi üzerinde test etmişlerdir. Buna ek olarak, toplamda 14 numunenin içinden 2 numunede herhangi bir demirle destekleme olmadan test etmişlerdir. Demir desteklerin darbe etkisindeki deney numunelerinde rijitlik, dayanım artışı ve uzun-dar CFRP parçalarındaki gerilme dağılımı üzerinde incelemeler yapmışlardır. Deney numuneleri, uzun-dar CFRP parçaları tarafından soyulmasında başarısız olmadığını, bunun yerine demirli desteklerin yerinin belirlenmesi noktasında koptuğunu belirlemişlerdir.

Mines vd (2002) yaptıkları bu çalışmada, sandviç yapılı polimer kompozit kirişlerin, deniz araçlarının tipik konstrüksiyonlarında yüksek performans gösterdiği tecrübeye dayanan bir sonuç olduğunu belirtmişlerdir. Dış yüzeyi, çapraz şekilde biriktirilmiş tek yönlü glass epoxy'den oluşturmuşlardır. İç kısmını da, ya Divynycell H100 ya da H200 köpükten yapmışlardır. Bu kirişlerin iki boyuttaki aşamalı çöküşlerinin sayısal simülasyonları, sonlu elemanlar prensibi kullanılarak Abaqus/Standart'ta meydana getirilmiştir. Bu çalışma, sayısal model üzerindeki girilmesi gereken malzeme özelliklerine odaklanmıştır. Ayrıca bu çalışmada, üst yüzey içerisindeki tabaka hasarın olduğunu belirtmişlerdir.

Lubineau vd (2008) yapmış oldukları bu çalışma ile en son ilerlemelerde, indirgenmiş tabakalı kompozitler için tüm ölçeklerde modellenmesinin gelişmiş bir yol olduğunu ortaya koymuşlardır. Özellikle, bugün, mikromekanik için; genel bir çerçevede elde edilen tek bir malzeme bilgisinden bütünleşmiş referans sanal malzeme tanımlamamıza olanak sağlamakta

olduğunu belirtmişlerdir. Böylece, orta ölçekli ve yapısal analiz için hasar mekaniği kullanarak yapılmış bir model üzerinde kullanılabilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Daha önce geliştirilmiş bir köprü ile bu referans modelinin bir homojenize versiyonu olarak meydana getirmişlerdir. Çalışmanın sonucu olarak türetilerek işlenmiş bir modelin, mikromekanikte önemli olduğunu ancak ticari kodlarda değiştirilebileceğini ifade etmişlerdir.

Aymerich vd (2006) yaptıkları çalışmalarında, seçmiş oldukları dikişin etkisini ve yorulma yükü altında aynı eksenli kürleştirilmiş tekli bindirme birleştirmelerinin delaminasyonlu bölgelerindeki kırılma davranışlarını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi içeren nümerik çözümlerle incelemişlerdir.

Camanho vd (2006) yaptıkları bu çalışmada, kompozit tabakalardaki mekanik olarak tutturulmuş bağlantıların hata türü için, hasar başlangıcı ve son hata şeklini tahmin etmek amacıyla yeni bir yöntem ortaya koymuşlardır. Her bir tek tabakadaki gerilme dağılımını yarı analitik veya sayısal metodlarını kullanarak elde etmişlerdir. Bağlantının elastiklik sınırı, tabaka dayanımları ve hasar kriterine göre gerilme dağılımları kullanarak öngörmüşlerdir. Son hata ve hata türü noktası veya ortalama gerilme modelleri kullanılarak tahmin etmişlerdir. Noktasal veya ortalama gerilme modellerinde kullanılan karakteristik mesafeleri ölçmek için standart prosedürler önerilmişlerdir. Önermiş oldukları bu yöntem; yarı izotropik tabakalar kullanarak çift kayma bağlantılarında uygulamışlardır. Tahminler, yüklü pim ve civatalı bağlantılardan elde edilen deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, önermiş oldukları metodolojinin tam olarak doğru olduğunu göstermiştir ve etkili bir bileşik civatalı bağlantılarda son hata yüklerinin yanı sıra hasar türlerinin etkili bir şekilde doğru olduğunu göstermiştir.

Dano vd (2000) yaptıkları bu çalışmada literatürde yayınlanan plastiklerdeki tekil mekanik tutturulmuş bağlantıları yeniden incelemişlerdir. Sonlu elemanlar modeli, kompozit plakalardaki pim-yüklemeye olan cevabını tahmin etmek için geliştirmişlerdir. Bu model, büyük deformasyon teorisi, ilerleyen hasar, pim ve delik arayüzü arasındaki ilişkiyi ve non-lineer kayma gerilmesi ve gerilme ilişkisini göz önüne aldığını belirtmişlerdir. İlerleyen tabaka hasarı, Hashin ve maksimum gerilme hasar kriterini birleştirerek tahmin ettiğini ifade etmişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmanın amaçları; hasar kriterinin etkisi, dayanım tahminindeki nonlineer kayma davranışı ve pim-yük yer değiştirme eğrisinin belirlenmesi

olduğunu belirtmişlerdir. Önerilen bu model, farklı istifleme dizileri ile kompozit plakaları taşıyan cevabı tahmin etmek için kullanmışlardır. Deneysel sonuçlar ve sayısal tahminler arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir.

Camanho ve Lambert (2006) tabakalı kompozitlerde mekanik olarak bağlanmış birleştirmelerin son hasar, hasar modu ve hasarın başlangıcını tahmin edebilmek için yeni bir yöntem ortaya koymuşlardır. Her bir kattaki gerilme dağılımını yarı analitik veya nümerik metotlar kullanarak tespit etmişlerdir. Hasar kriterinde gerilme dağılımını ve kat kuvvetlerini kullanarak birleştirmenin elastik limitini tahmin etmişlerdir. Son hasarı ve hasar modunu nokta veya ortalama gerilme modellerini kullanarak tahmin etmişlerdir. Yapmış oldukları tahminleri, pim ve civata ile yapılan birleştirmelerden elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırarak önermiş oldukları yöntemin doğruluğunu göstermişlerdir.

Gama vd (2004) Kompozit yapısal zırhın, genellikle asgari ağırlığı, yapısal ve balistik performansını optimum bir dengede sağlamak için polimer Kompozit, lastik ve seramik tabakaların bir araya gelerek oluşturduğu kalın kesitli bir sandviç yapısı üzerinde çalışmışlardır. Kompozit zırhta, tasarım kuraları ve onarım teknikleri için gerekli olan özgün sınıftaki çok fonksiyonlu bir yapıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmadaki odak noktası, statik ve dinamik yüklemeye maruz kalın kesitli, alın altına birbirine geçme ile tutturulmuş bileşik destek plakasının onarımı olduğunu ifade etmişlerdir. Kompozit destek plakaları, düz örgü S2 glass kumaş ve SC15 epoksi reçine kullanarak üretilmesini gerçekleştirmişlerdir. Destek plakaları için uygulanmış kasti hasarın onarımı, indüksiyon ısıtma kullanılarak yüksek sıcaklıklarda ve oda sıcaklığında yapılmışlardır. Statik tepki kontrolü ve onarılmış plakalar dört noktalı eğilme testi ile karşılaştırılmışlardır. Üç farklı geçme açısının ve dört onarıcı yapışkanın (ikisi oda sıcaklığı ve ikisi yüksek sıcaklık iyileştirme sistemleri) etkisi ölçülmüşlerdir. Bu onarım teknikleri kullanılarak, yüksek biçimlendirilebilirlik durumu hariç, düşük sertlikte yapışkan ve uzama miktarı çok sünük bir duruma ulaşıldığını ifade etmişlerdir. Onarılmış kirişlerde yenilenen moment kapasitesi yüksek derecede, birbirine yapıştırılarak geçme açısının çeşitliliğine bağlı olduğunu ve maksimum yenilenme miktarı %60 olduğunu belirtmişlerdir. Dinamik yüklemeye ve alından geçme ile yamanmış Kompozit örnekler, bölünmüş Hopkinson çubuğunu kullanarak eksenel basınç direnci testi yoluyla araştırmışlardır. Dinamik yüklemeye altındaki eksenel kuvvetin, geçme açısına ve yüklemeye hızına bağımlı olduğunu bulmuşlardır. Çeşitli malzemeler, geçme açıları ve yüklemeye koşulları için eksik yerler olduğu bildirilmişlerdir.



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. Deneyler 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 metod 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 Yapıştırma Birleştirme ile ilgili Çalışmalar

Wanga vd (2009) yaptıkları çalışmada yapıştırılarak bağlanmış geçme bağlantılarının tamirlerinde, kompozit yapılar için öncelikli metot olarak, başlıca sınırlı malzeme taşıma miktarı için birleştirmişlerdir. Yüksek dayanımlı iyileştirmeye ek olarak, geçme tamirlerinde hem dış yüzeyi orijinal olarak geri kazanabilmek, hem de aerodinamik ve/veya dış kalıp hattını göz önüne almışlardır. Ancak, geçme onarımları hemen hemen kaçınılmaz olarak, geçme eklemek için hasar vermeden malzeme kaldırılmasına yol açmasıyla sonuçlanabildiğini tespit etmişlerdir. Bu durum özellikle, kalın yapılar için önemli bir sorun olabildiğini belirtmişlerdir. Çünkü geçme uzunluğu, 20 ila 100 kat arasında değişebilen bir esas yapı olduğunu ifade etmişlerdir. Yaptıkları bu araştırma, bir optimizasyon yöntemi belli iki eksenli yükleme durumu için en uygun onarım şekillerini belirlemek için geliştirilmişlerdir. Optimum geçme geometrisi, geçme açısı tarafından yönlendirilen non-lineer diferansiyel denklemin nümerik çözümü ile belirlemişlerdir. Optimum ve optimuma yakın şekillerde, sonlu eleman metodu kullanılarak, hesaba dayalı modellenerek göstermişler ve ortaya koymuşlardır.

Brink vd (1999) metal tabakalar arasında sınırlandırılmış iki fiber takviyeli MMC alt unsurlarının mekanik tepkilerini belirleyebilmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Fiberler, polikristal ve içine kesintili gömülerek Al-4.5Mg yerleştirilmiş bağlantılar sürekli olarak bağlantı boyunca devam ederek ve tabakalar arası malzemeler Kompozit matrix'de her ikisinden olacak şekilde teşkil ettirilmişlerdir. Numuneler, basınçlı eritme infiltrasyonu ve tabakalar arası  $0^\circ$  'den  $75^\circ$ 'ye kadar normal düzlemi ile ilişkili fiber eksenlerini içerecek şekilde üretimini gerçekleştirmişlerdir. Analitik ve sonlu elemanlar modelleri geliştirilmiş olup, deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, sırayla tabakalar arası deformasyon davranışını açıklamak için anahtar faktörlerin kontrolüyle bağlantı performansını belirlemişlerdir. İki baskın sistemde bu şekilde taraflarınca tespit etmişlerdir. Bağlantıların içinde ara açı aralığında ( $45 \pm 15^\circ$ ) limit yük uygulamak, yüksek gerilmeden önce eksiklik gelişimine neden olduğunu sunmuşlardır. Hâlbuki bağlantılar ( $\leq 15^\circ$ ) ve ( $75^\circ$ )'den yüksek açılarda sadece uygun bir plastisite gösterdiğini ifade etmişlerdir. Modeller, ancak ikinci gruptaki, geliştirilen yüksek zorlama ve limit yüklemeler prensibi için olup, fakat bu davranış düşük açı bağlantılarında,

arasındaki olan kendi eksikliği ile ilişkisini kesmeye engel olduğu belirtilerek ve yüksek açların birinde kompozit çatlak oluşmakta olduğunu tespit etmişlerdir. Analizin ilerlemesiyle, tabakalar arasında esas sertleşme ilişkisinin monolitik matris yöntemindeki aynı davranışı esas alarak metaldeki temel davranışını ortaya koyduğunu belirterek bu davranışın nedenlerini tartışmışlardır. Araştırma kapsamında çalışılan bu modeller, gelecekteki tabakalar arası bağlantı konumlarının kırılma kriterinin açıklanması çalışmaları için temel oluşturduğunu belirlemişlerdir.

Sangree vd (2009) yaptıkları çalışmada geleneksel olarak yapılmış, ağır ahşap takviye iskeletlerinde (kafeslerinde) oluşan gerilme kuvvetleri, kiriş elemanları arasından alın alına sıkı geçme bağlantılarına aktarıldığını belirlemişlerdir. Ahşap desteklerin sıkı geçme bağlantılarında darbe altındaki genel rijitlikleri önemli olduğunu ve yapısal davranışları hakkında henüz az bilgi bulunduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışma, son zamanlarda tamamlanan ve yaygın olarak kullanılan durgun-yayvan geçme bağlantısında bir çözüm tanımladığını göstermişlerdir. Pennsylvania'daki ahşapla kaplı köprü'nün sıkı geçme bağlantıları aynen kopya edilerek deneysel testler uygulanmıştır. Abaqus kullanılarak oluşturulmuş üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile elde edilen tüm nümerik sonuçlar kıyaslanmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada, geçme bağlantısının davranışında en etkili çözüm olarak, ahşap çizgilere dikey olarak yöneltilen basınç yüklemesinin neden olduğunu tanımlamışlardır. Döner anahtar ile sınır durum incelemesi olmadan, sıkıştırılmış civatalarda önemli olduğu ayrıca deneysel testlerce de ortaya çıkarmışlardır. İki adet yerinde sıkıştırılmış civata ile çizgilere paralel oluşmuş, sınır durumdaki kayma gerilmesi hasarı, daha durgun hasara ve yüksek son dayanımı karşıladığını ortaya koymuşlardır. Yapılan bu çalışmada, geçme bağlantısının teorik gerilme elemanı olarak analiz etmemişler, daha doğrusu elemanda birleşik gerilme ve eğilme kuvvetlerini konu alarak ve düşünerek mühendislere yol gösterici olduğunu belirtmektedirler.

Sangree vd (2009) ahşap çerçeveli binalar ve köprülerde, geleneksel olarak ağır ahşap kafeslerde ve aralarındaki alt kiriş geçme bağlantılarında çeşitli geleneksel bağlantıların kullanımını üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında yarı ve ahşap geçme bağlantılarını, deneysel testler ve sonlu elemanlar analizlerini kullanılarak izole bir yapısal bileşen olarak ele almışlardır. Taneli geçme bağlantılarına özgü iki farklı limit durum için deneysel testleri ile kayma hatalarında paralelden taneye ve dik tanelerdeki gerilme kusurlarını tanımlamışlardır.

Taneler dik olan gerilmedeki olasılık beklenen eksiklik sonuçları, tane açılarından ve taneye paralel kayma hatasının limit durumlarına kadar, tipik olarak analiz ve tasarımda bağlayıcı olmadığını belirtmişlerdir. Tasarım ve iyileştirme amacıyla, konu olarak geçme bağlantılarındaki elemanın maruz kaldığı birleşik eğilme ve eksenel gerilme kuvvetlerini önermektedirler. Abaqus'te sürekli katı elemanlar kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları, deneysel test sonuçları ile uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak, sonlu eleman modellerinin yanı sıra, çalışmayı yapanlar alt kirişteki geçme bağlantısı ile ilişkili olan iki boyutlu bir model geliştirirlerken, tamir edilebilirliği azaltan bir model ile analitik olarak ortaya çıkan kullanımı düşük modellerin kontrol edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Tzetzis vd (2008) yaptıkları çalışmada modern üretim teknikleri ile üretilen yüksek kaliteli birleştirilmiş olan bileşenlerinin yapısal bütünlüğü açısından karşılaştırılabilir bir gelişme gerektiren, yapıştırma bileşenlerinin onarım prosedürlerinin üretimini belirlemişlerdir. Vakum destekli reçine infüzyon işleme yöntemi, aslında modern bir Kompozit üretim süreci olup, şu anda birçok sanayi üretim hattında uyarlanmış olduğunu göstermişlerdir. Teknik olarak alın altına geçme ile oyuk bir kalıp boşluğu olarak kullanılan bir onarım şekli mevcut olarak tamamen kâğıt gibi düz olarak kabul edildiğini belirtmişlerdir. Geliştirilen bu onarım tekniği, belli alın altına geçme ile birleştirmedeki tasarım kuralları uyarınca inşa edilmiş olan iki çeşit yapılandırmaları incelenerek değerlendirmişlerdir. Çalışmada gerçekleştirilen imalat ve kalite kontrol prosedürleri, vakum destekli reçine ile yamanarak tamir edilmiş ve tanımlamak amacıyla açıklanan deneysel testlerin performansını ölçmek için yürütülmüştür. Onarım yapılandırmaları performansı için sonlu elemanlar analizi ile düzenlenmiş, seçilip tamir edilmiş geometrilerini karşılaştırmak için yapılmıştır. Potansiyel kırık yerleri ve stres dağılımları; Tsai-Wu ve ortalama stres başarısızlık ölçütü kullanılarak, onarım gücünü tahmin etmek için kritik gerilme alanlarının analizlerinde tanımlanarak vurgulanmıştır. analiz sonuçları, deneysel bulguları ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Onarımı mevcut, yüksek mukavemete yaklaşan test numuneleri ile yapıştırma hattı içinde sürekli bir başarısızlık sürdürmekte olan yapılandırmaları için konik oranların bu şekilde vakum destekli reçine infüzyon onarım metodolojisini doğruladığını ortaya koymuşlardır.

Yang vd (2010) gerçekleştirdikleri bu çalışmada, yapıştırılarak gömülmüş elemanlar için Abaqus'te bir algoritma önermektedirler ve yarı gevrek malzemelerin 3 boyutlu karmaşık çatlak yayılması modelinin nispeten kolay ve verimli bir şekilde yapılması için bilgisayar kodunu

geliştirmişlerdir. Yapıştırılmış elemanlarda, çekme-ayırma ile zayıflatma ilişkileri, hasar başlangıç ve yayılma kurallarının; gömülmüş katı elemanlar arasındaki ağ örgüsü içinde potansiyel çatlak başlangıcının modellenmesi işlemlerini yapmışlardır. Başlangıç örgüsü tetrahedral (dört yüzlü geometrisi), kama, tuğla veya bu elemanların karışımından meydana getirmişlerdir. Bunun için ne yeniden ağ örgüsü ne de amaçlanan çatlak yayılımı kriteri ihtiyaç olmadığını belirtmişlerdir. Dört tane somut numune ile modelleme ve analiz yapmışlardır. Bunlar; kama yarığı testi, sabitlenmiş kirişin burulmaya maruz bırakılması, çıkarılmış olan test numunesinin sabitlenmiş silindir ile darbeye maruz bırakılması testlerini içermektedir. Simülasyonu yapılmış çatlak yayılımı süreci ve yükleme-yer değiştirme eğrileri; test sonuçları veya diğer sayısal simülasyonlardaki tüm örneklerde kullanılan uygun yoğunluktaki başlangıç ağ örgüleri ile iyi derecede uyduğunu belirlemişlerdir. Abaqus'un zengin önce/sonra süreç fonksiyonları ve güçlü standart/belirgin çözümleri kullanılırsa, geliştirmiş oldukları bu metod ile, mühendislik analizlerinden karmaşık 3 boyutlu modeldeki kırılma mekaniği problemlerinde pratik bir araç olarak kullanımını önermişlerdir.

Gunnion vd (2006) yapıştırılmış açılı alın veya kademeli alın birleştirmelerinin onarımları, yüksek dayanımlı iyileştirme gerekli olduğu için veya düz bir aerodinamik yüzey ya da sonradan oluşabilecek ihtiyaçlarının karşılanması gerekli olduğu kompozit yapılarda kullanılması üzerine çalışmışlardır. Yapıştırılmış açılı alın birleştirmesi onarımlarının tasarımı ve özellikle kalın yüzeyler için çıkarılması gerekli olan önemli esas yapının karmaşık olduğunu belirtmişlerdir. Parametrik bir sonlu elemanlar modeli, yapıştırılmış açılı alın birleştirmesi performansı üzerinde çeşitli parametrelerin etkileriyle ilgili geniş bir çalışma olanağı sağlamak için geliştirmişlerdir. Yapıştırma hattı boyunca gerilme dağılımı ve uç derecede duyarlı değişiklikleri ile ilgili olarak belirlenen gerilmeler, yapıştırılan açılı alındaki birleştirme açısına, yapıştırma kalınlığına, tabaka kalınlığına, lamine üstündeki kalınlığa ve toplanmış bölümlerin değişimi ile olan ilgilerini incelemişlerdir. Ayrıca yapıştırılmış olan uyumlu ve uyumsuz laminelere gerilme sonuçlarını da incelemişlerdir. Onarımda 3 boyutlu dairesel bir yamanın kullanımından faydalanarak geçişli yüklemeler demişlerdir. Sonuç olarak yük altındaki kompozit yapıların, yapıştırılmış açılı alın birleştirmesi onarımlarının geliştirilmesi sayesinde, yapı içinde oluşan gerilmelerin daha iyi anlaşılmasının sağlandığını ifade etmişlerdir. Ulaştıkları bu sonuçlardan elde etmiş oldukları bu anlayış, kompozit yapılardaki yapıştırılmış açılı alın birleştirmeleri için geliştirilebilir tasarım ve analiz tekniklerine yol açabileceğini bildirmişlerdir.

Breitzman vd (2009) yaptıkları bu çalışmada gerilme yüklemesi altındaki kompozit onarım mekaniği ile birlikte ve geleneksel olmayan yama tabakası oryantasyonları için kaplama tabakaları olmaksızın incelemişlerdir. Üç boyutlu nonlinear analizler, onarım hasar tahmini ve açık delikli açılı alın panelleri ve onarılmış paneller için, standart tabaka ile tabaka yer değişimi yama kompozisyonu tarafından gerçekleştirilerek uygulamışlardır. Gerçekleştirdikleri çok boyutlu optimizasyon, onarım yama tabaka oryantasyonlarındaki yapışkanın minimum Von Mises gerilmeleri hesaplanmasında uygulamışlardır. Bu optimum düzenlemelerin sıralamaları, düz ve tekil tabaka kalınlığında tabaka üstünün onarımı için, gerilme seviyesinin önemli ölçüde düşürülmesinde ve dayanımın yeniden yapılandırılmasının tahmini 85% ve 90%'ı sonuçlandırılarak uygulamışlardır. Elde etmiş oldukları bu sonuçlar, ek tasarım değişkenlerinin kullanılabilir olduğunu göstermeye ve verimli kompozit onarım tasarımına yani yama onarım bileşimine yönelik olduğunu belirtmişlerdir.

Altan vd (2010) yaptıkları bu çalışmada, deneysel ve sayısal olarak bir kelebek bağlantı bileşeni tarafından alın-alına birleştirilmiş kompozit yapıların yük taşıma kapasiteleri analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmaların sonuçlarını, sayısal analiz ile desteklemişlerdir. Buna ek olarak, kelebek bağlantı bileşenini sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda geometrik olarak geliştirmişlerdir. Geliştirilmiş kelebek bağlantı elemanlarının yük taşıma kapasitesi içinde değişiklik ile yeni bir sonuç elde etmek için sayısal ve deneysel olarak analiz yapmışlardır. Yarım numuneleri ve kelebek şeklindeki kilit bileşenlerini bir su jeti makinası ile kestirmişlerdir. Numune genişliğinin kelebek uç genişliğine oranı ( $w / b$ ), kelebek orta genişliğinin kelebek uç genişliğine oranı ( $x / w$ ) ve kelebek yarı yüksekliğinin kelebek uç genişliğine oranı ( $y / b$ ) için birleştirmedeki geometri parametrelerinin etkilerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmanın bir sonucu olarak, sabit geometrik oranlar olan ( $w / b$ ) ve ( $x / w$ ) 0,4 ve 0,2, temel ve değiştirilmiş modellerde ise deneysel ve sayısal çalışmalara göre, ( $y / b$ ) oranının 0,4 olduğunu tespit etmişlerdir.

Monteiro vd (2010) Sunmuş oldukları bu çalışmada, eksenel yüklenmiş alüminyum-epoxy alın birleştirmelerindeki yapışkan tabaka kalınlığının mekanik dayanıma olan etkisi üzerine çalışmışlardır. Ana hedef, kopma kuvveti kullanılarak yapılan model eşitliklerinin yeterli bileşimdeki matematiksel sadelikle mühendislik problemlerinde kullanımına izin vermekle birlikte, kompleks nonlinear mekanik davranışı tanımlayabilme yeteneğinin tahmin edilmesidir.(Üç boyutlu gerilme durumu: Yapışkan içerisinde hasar ihtimaline, yapışkan

tabakalardaki hasar veya karma hasara, yüzeyler arasındaki etkileşime ve bağlantı geometrisindeki yapışkan dayanımına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.) Yapışkan tabakadaki farklı kopma kuvveti değerleri için yapılmış olan tahmin ile deneysel veriler iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir.

Fawzia vd (2010) yaptıkları bu makalede, CFRP ile bağlı çelik plakalardaki çift takviyeli birleştirmelere ait bir dizi gerilme testlerine ait sonuçları ortaya koymuşlardır. Bu araştırmanın ana amacı, gerilme altındaki çift takviyeli birleştirmelerin deneysel ve nümerik analiz kullanılarak bağlantı karakteristiklerini daha detaylı anlamayı sağlamışlardır. Yapışkanın maksimum zorlaması ve yapışkan tabaka kalınlığı, değişken CFRP bağlantı uzunlukları, sayısal modelleme ile birlikte parametrik bir çalışma olarak uygulamışlardır. Sonuç olarak, yapıştırma-çözülme modelleri, üç farklı tip için parametrik çalışmayı sırasıyla önermişlerdir.

Fawzia vd (2006) dıştan bağlanmış karbon fiber, güçlendirilmiş çelik yapılarda kullanılarak takviye edilmiş CFRP polimerleri hızlı üretim tekniğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu yazı, aksel yüklenmiş düz çelik plakaların karbon fiberlerle takviye edilmiş polimer katmanlar kullanarak güçlendirilmiş özelliklerini tanımlamışlardır. İki çelik plaka yapıştırılarak birlikte bağlanmış olup ve ardından farklı bağlantı uzunlukları ile karbon fiber plaka çift takviyeli olarak uygulanmasını takip etmişlerdir. Numunelerin davranışı, nonlinear sonlu eleman analizi kullanılarak hasar modları ve yükleme kapasitesinin tahmini daha fazla araştırılmıştır. Bu çalışma, bağlantı hasarındaki bulunan baskın hasar modu için, CFRP bağlantısındaki normal modul değeri, sonlu elemanlar sonuçları ile tamamen eşleştiğini belirtmişlerdir. Son yüklemelerdeki tahmin edilen sonlu eleman analizleri ile deneysel değerlerin uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Chalkley vd (2001) yaptıkları bu çalışmada çatlak yapısının, birleştirilmiş kompozit onarımlarının tasarımında sadece doğru gerilme analizi gerektirdiğini ama aynı zamanda kullanılmış olan tasarım formülüne olan güvene gerçekten bağlı kalınmış olduğunu bildirmişlerdir. Bu yazılarında, ortogonal çatlaklı kompozit tabakalar için, çift takviyeli bağlantıdaki gerilme analizini, değiştirilmiş Hashin Çeşitlendirme metodunu temel alarak ve minimum tamamlayıcı enerji prensibini kullanmış olarak tanımlamışlardır. Bu değişikliklerle, aslında yapışkan ve isotropik tabakayı tanıtmışlardır ve hem de ortotropik malzemenin onarım birleştirmesine tipik olarak dayanmakta olduğunu belirtmişlerdir. Basit analitik ifade, bağlantı

için eşdeğer esnek sabiti kurulmuştur ki, parametreler yamanmış çatlak için gerilme yoğunluk faktörünün hesaplanmasında kullanışlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu ifade, eşdeğer esneklik sabiti için, düşük sınırlı durum içerisine bağlı değerlendirmede gerçekten sağladığını göstermişlerdir.

Dvorak vd (2001) yeni bir yaklaşımla, E-glass/vinly-ester Kompozit tabakaları veya çelik, birlikte dokunarak, savaş gemilerinin yapılarında uygulanmasının keşfi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapıştırma uygulamaları süresince, kalın olan şeklin arayüzü boyunca yiv ve oluk geometrisini kullanmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanla modellenmesiyle her ikisinin de sonuçları ortaya verilerle konulmuştur. Bu veriler göstermiştir ki, yapıştırılarak bağlanmış yivli ve uzantılı bağlantılar arasına çelik ve Kompozit plaka konularak, geleneksel kayışlı bağlantılarda bile nispeten ince plakalar tek düze çoğalan boyuna gerilmelerden daha güçlü olduğunu göstermişlerdir. Özellikle, 0.5 inç kalınlığında, 0.25 inç genişliğinde, 8 ya da 12 inç uzunluğunda, Dexter-Hysol 9339 ile bağlanmış çelik uzantı, 20000 lbs çekme kuvvetini destekleyebildiğini ortaya koymuşlardır. Bu kuvvetin, levha kalınlığıyla orantılı olarak artış göstereceğini ifade etmişlerdir. Basit tasarım kuralları göstermektedir ki, birleşimin yapıştırma bağlantıları ile aktarılarak, yivli ve uzantılı yapıştırımların daha güçlü yapılabilir olduğunu göstermişlerdir.

Chuan Her (1999) yaptığı bu çalışmada, yapıştırılmış bindirme bağlantıları araştırması tekli bindirme ve ikili bindirme bağlantısını içerecek şekilde dikkate almıştır. Klasik elastisite teorisi temel alınarak basitleştirilmiş bir boyutlu model ortaya koymuştur. Yapıştırıcı içerisindeki kayma deformasyonu, yapıştırma kalınlığı boyunca sabit kaldığını farz etmiştir. Yapışkandaki kayma gerilmeleri ve boylamasına gerilmeler için analitik çözümleri elde etmiş olup, iki boyutlu sonlu eleman metodu ile nümerik çözümleri karşılaştırmıştır.

Kradinov vd (2005) yapmış oldukları bu çalışmada tekli ve ikili bindirme bağlantılarındaki cıvata yük dağılımının analiz metodu tanımını ortaya koymuşlardır. Bağlantılar, tüm tabakalar içerisinde bulunan tabakalarda değişik kalınlıkta toplanmış halde bulunan ve metalik eklerle desteklenen cıvata deliklerinden yapıldığını belirtmişlerdir. Kullanmış oldukları çözüm metodu, tam olarak birleşik kompleks potansiyel ve çeşitli formüllerin kararlı cevaplarına dayanmaktadır. Sınır koşulları ve sınırlamalar toplam potansiyel tarafından azaltılarak cevaplandırılmıştır. Yaygın yükleme koşulları altında bu metot, çoklu cıvata



konumlandırılmaları olmaksızın simetrik sınırlar gerektiriyorken, açıkca civatalar arasındaki etkileşim ve bağlantı durumları için açıklanmasında uygulanmış olduğunu ifade etmişlerdir.

Xiao vd (2004) yapmış oldukları bu çalışmada, geliştirme araçlarıyla birlikte yapıştırılarak birleştirilmiş yapılar, yapışma bağlantılarında sonlu eleman analizi performansına ihtiyaç duyabilmekte olduğunu ifade etmişlerdir. Geçerli yapısal analiz uygulamasında, yapıştırma bağlantıları rijit bağlantı, yarı rijit yay veya diğer eşdeğer temsilleri ile modellemiştir. Yaptıkları çalışmaya ait olan bu yazıda modelleme metotlarını belirlemeyi hedeflemiştir. Birleştirilmiş bağlantılar için mantıklı olarak tam tahminler yapmışlardır. Ancak modelleme seviyeleri, bileşen veya araç olarak kullanılması yeterince pratik olmadığını belirtmişlerdir. İkili bindirme bağlantılarındaki kayma başlamasıyla ilgili, çeşitli sonlu eleman modellemeleri metotlarını araştırmışlardır. Simulasyon sonuçları, bölüm 1 içinde bulunan yazıdaki ikili bindirme kayma bağlantısı için yapılan rijitlik tahminine ait analitik çözümler ile birlikte test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Uygun modelleme metotları Abaqus ve LS-DYNA için önermişlerdir.

Kim vd (2004) yaptıkları çalışmada üst üste kademeli bağlantı için, kompozit yapı üreterek ve statik olarak yorulma gerilmesi yüklemesi altında test etmişlerdir. Test sonuçlarında, yapıştırılmış kompozitin dairesel süreksizlik bölgesi boyunca çatlak başlamış ve çoğalarak tüm bölgeye yayıldığını tespit etmişlerdir. Max. Kayma gerilmeleri bağlantı sonunda azalırken, bağlantıdaki ortalama gerilme yüklemesi artırıldığında, kademe sayısı ve bağlantı kenar açısının arttığını göstermişlerdir. Ancak ortalama gerilme yükü arttırılmadığında ve bağlantıdaki tekrar değer oranındaki kademe sayısı 6'dan az olduğunda birleşmenin oluşturulabileceğini belirtmişlerdir. Numunelerin kademeli bağlantılarında yorulma dayanım sınırı statik gerilme yüklemelerinde 30% olarak bulunmuştur. Ama yorulma ömrü, her bir yüklemeye seviyesi önemli bir şekilde arttırıldığında kademe sayısı 6'yı aştığını ortaya koymuşlardır. Yorulma ömrü önemli bir şekilde düşerken, bağlantı uzunluğundaki tekrarlanan kademe sayısının oran değeri, 6'dan daha az bir oranda olmuştur. Statik gerilme yüklemesinin etkin biçimde arttırılmasıyla birlikte her bir bağlantı uzunluğunda kademe sayısının arttırılması için 6 oranı kritik bir değer olduğunu belirtmişlerdir. Kritik çatlak ilerleme mesafesi, örtüşmenin sonunda 5-7 mm olduğu gözlemlenmiştir.



Fredrickson vd (2008) yaptıkları bu araştırmanın amacı, ticari olamayan şerit tabanlı (B-spline analiz yöntemi) bilgisayar program modeli ile iki kompozitin alın alına ve üst üste basamaklı bağlantılarındaki statik gerilme yüklemeleri ile oluşan gerilme alanlarını belirleyebilmek olmuştur. Alın alına ve üst üste kademeli olarak üretilen test numunelerininin 16 kat yarı izotropik panel kullanılarak pregreg yatırma yöntemi ile yapılmışlardır. Hareli interferometri kullanılarak, bir yüzey üzerinde yer değiştirmeleri ölçmek için kullanılan yüksek çözünürlüklü tam alan optik tekniği ile, deneysel gerilme verilerini belirlemek için kullanmışlardır. Tüm alan gerilmeleri boyunca, deneysel gerilme verilerine göre serbest kenarın tahmini ve karşılaştırmasını yapmışlardır. Onarım genişliği boyunca birkaç noktada çıkarılan çizgi grafiklerinden karşılaştırma sağlamak için deneysel verileri tahmin etmişlerdir. Genel olarak, her ikisinde de, tüm alandaki gerilme görüntüleri ve çizgi grafiklerinde, analiz ve deneysel verileri arasında iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Dvorak ve Bahei-El-Din (2001) çok tabakalı kalın kompozit plakaların yapıştırılması için yeni birleşme tasarımları önermişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada, bindirme birleştirmelerinde sıkça gözlenen en üst tabakaların kayma veya çekme hasarlarının oluşturduğu hasar tiplerini azaltmayı veya yok etmeyi amaçlamışlardır. Bazı tasarımlar, yapışkan tabakalardaki normal gerilmelerden kayma oranlarının seçiminin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Gerilme yoğunluğu esasında çoğunlukla, yapışkan yüzey tabakalarının içinde ve yapışkan hattın önemli kenarlarına indirgenmiş olduğunu göstermişlerdir.

Boyd vd (2006) yaptıkları çalışmalarında, ön şekillendirilmiş kompozit bileşenler; gemi yapılarının üretimi için geleneksel konstrüksiyon tekniklerinin ekonomik alternatifine potansiyel olarak sahip olduğunu belirterek pultre edilmiş GRP parçalarda parmak birleştirmelerini değerlendirmişlerdir. Yük-yer değiştirme davranışlarını tespit etmişler ve termoelastik gerilme analizi (TSA) birleştirmelerinde yer alan gerilme dağılımlarını elde etmek için kullanmışlardır. Parmak birleştirme tipinde, parmak uç açısının artmasıyla gerilme konsantrasyon faktöründe bir artışın olduğunu, kayma gerilmesinde ise bir azalma olduğunu ve yük taşıma kapasitesinde de bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Feiha vd (2005) yapmış oldukları bu makalede, soyulan tekil L bağlantısının eğilme deformasyonu altında incelenmesini yapmışlardır. Kompozit dairesel süreksizlik bölgesindeki hasara ilişkin açılı L parçası kritik bir bileşen olduğunu belirtmişlerdir. Hasar yükü ve

konumu, sayısal olarak kararlı hasar modeli tarafından tahmin edilmiştir ve deneysel sonuçlar tarafından onaylanmıştır. Hasar dayanımının, moment kolu ve uygulanma uzaklığına dayanması incelenmiş olup, bunlara bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Sayısal optimizasyon, L parçasındaki yığılmaya ve geometriye ilişkin olarak uygulamışlardır. Ayrıca hasar eğilme ve yer değiştirme gerilmesi bileşimi altında sayısal olarak incelemişlerdir. Bu metot, deney sonuçlarının tahmininde çok yönlü ve başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Zhao vd (2010) yapısal birleştirmeler için tüm kompozit P bağlantıları uygulamalarının, entegre uçak yapılarında potansiyel olarak hem ağırlık ve montaj maliyeti avantajları açısından fayda sağlayabilirken hem de iyi yük taşıma kapasitesini koruması üzerine çalışmışlardır. Yapmış oldukları bu makale, bir statik çekme yükü altındaki tüm kompozit p bağlantılarının ortak davranışı ile ilgilenmişlerdir. Kompozit P bağlantısındaki hasar başlangıcı, yayılması ve en son oluşan çökme; ilerleyen hasar metodu ile simule etmişlerdir. İlerleyen hasar modeli; üç adet görüş içerdiğini belirtmişlerdir. Bunlar; kompozit P bağlantısının gerilme analizi için üç boyutlu sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasını; oluşan hata ve hasar değerlendirilmesi için değiştirilmiş bir maksimum gerilme hata kriterini ve yapısal sertlik düşümüne göre bir malzemenin bozulma modeli simulasyonunun kompozit P bağlantılarındaki dayanım tahmini olarak sunmuşlardır. Gerilme dağılımları karakterize edilmiş olup ve yük aktarma yolu, bağlantı içerisinde belirtmişlerdir. Hata mekanizmaları tanımlanmış olup hata ilerleyişi ilk ve son hatalar arasında kompozit P bağlantıları için ana hatlarıyla belirlenmişlerdir. Deney sonuçları, nümerik modellerdeki elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermekte olduğunu belirtmişlerdir.

Ouyang vd (2009) yaptıkları bu çalışmada yapıştırılarak birleştirilmiş boru bağlantılarının, yaygın olarak boru hatlarında kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir. Sunmuş oldukları bu çalışmanın içinde, yapışkan bölge modeli temel alınmış olup, burulma altındaki bağlanmış boru birleştirmeleri için analitik çözümler türetmişlerdir. Arayüze bağlı minimum dönme  $\Phi_m$  kavramını tanıtmışlardır ve temel değişken olarak kullanılan diğer tüm parametreleri, örneğin dış burulma yükü, ara yüzey kayma gerilmesi, elastik bölge ve yumuşama bölgesi uzunluğu dağılımı vs. ifade etmişlerdir. Boru birleştirmesinin bağlantı uzunluğu belli bir değerden daha uzun olduğu zaman, birleştirme uzunluğunun daha da arttırılmasının burulma yükü kapasitesinde önemli bir artış getiremeyeceğini bulmuşlardır. Verilen boru birleştirmesinin bağlantı uzunluğu yeterince uzun ve burulma yükü kapasitesi aslında birleştirme uzunluğu ve

yapıştırma şeklinden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, burulma yüklem kapasitesi için basitleştirilmiş ifadeler, ara yüz kırılma enerjisi, borunun burulma rijitliği ve boru bağlantılarının geometrik özelliklerini bir fonksiyon olarak türetmişlerdir. Bağlama kolu ve borudaki burulma rijitlik oranına bağlı olarak; yüzeyden ayrılmalar gözle görülebilir bir şekilde sağ uçta, sol uçta veya her iki uçta aynı anda başlayabilir olduğunu göstermişlerdir. Boru burulma rijitliği ve bağlama kolu aynı olduğunda, maksimum burulma yüklem kapasitesinin elde edilmesine dikkat çekmişlerdir. Sonlu eleman analizi sonucu ile iyi bir uyum göstermesi, geçerli modelin doğruluğunu kanıtlar olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada, doğrudan yapıştırılarak bağlanmış boru birleştirmelerinin tasarımında kullanılabilir olduğunu ve kırılma enerjisine dayanan formüllerden burulma yük kapasitesinin türetilmiş olduğunu ifade etmişleridir.

Chen vd (2009) yaptıkları çalışmaya ait olan bu makalelerinde, yapışkan model kullanarak bağlanmış kompozit T parça numunesinde dairesel süreksizlik bölgesi tahmini yaklaşımını ortaya koymuşlardır. T parça numuneleri içinde bulunan dairesel süreksizlik bölgesinin simülasyon incelemesinin belli bir kısmı, yapışkan modelin şekillendirilmesindeki ilerleyen dairesel süreksizlik bölgesi çalışmalarının yapışkan elemanlarının Abaqus tarafından kullanılmasını gerçekleştirmişlerdir. Tekil dairesel süreksizlik bölgesi, yapılan tahminler tarafında verilmiş olmakla birlikte deneysel sonuçlarla birlikte ortaya koymuşlardır. Elde etmiş oldukları sonuçlarla, ilerleyen dairesel süreksizlik bölgesinin tahmininde yapışkan modellerin uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir. Son olarak bu yazı, gelecek çalışmalar için bağlanmış kompozit T-parça numunelerindeki dairesel süreksizlik bölgesinin tam tahmini olarak önermişlerdir.

Cheng vd (2007) yapmış oldukları bu çalışmada, şekil hafızalı alaşımların, akıllı malzemeler alanında giderek artarak bir araştırma konusu haline geldiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalarında, hafıza etkili takviyeli bağlantının, yapışkan tabaka içindeki gerilme yoğunluğunun düşürülmesinde aktif kompozit tabakanın tasarım ve analizini ortaya koymuşlardır. Hafıza etkili malzemelerin temel termomekanik özelliklerini, mikro mekanik yoluyla elde etmişlerdir. Bağlantı kenarlarındaki kuvvetler ve momentler, bağlantı içindeki aktif kompozit tabakanın termomekanik etkilerinin birleştirilmesiyle elde etmişlerdir. Ayrıca, analitik modeli, ilk kayma deformasyonu teorisindeki bağlantı sistemi için gerilme analizlerinin yönlendirilmesini kullanarak temel almışlardır. Uzay durumu metodu, son

analitik çözümler için, yapışkan tabakalar içindeki soyulma ve kayma gerilmelerini kapsayacak şekilde kullanmışlardır. Detaylı sayısal analizlerini yapmışlardır. Elde etmiş oldukları sonuçlar, aktif kompozit tabakaların bağlantı kenarlarındaki gerilmeleri önemli ölçüde düşürmesini doğrulamışlardır.

Chishti vd (2010) yaptıkları bu çalışmada, havşa açılmış ve tork ile sıkılmış civatalı tekli bindirme kompozit bağlantısındaki hata ilerlemesi etkilerinin deneysel ve sayısal hesaplamalı araştırmasını konu almışlardır. Sırasıyla yapışkan elemanlar; yaklaşımsal ve bütünsel süreçteki hasarın mekanik metodu kullanılarak, dairesel süreksizlik bölgesindeki hasar ve tabaka çatlağı Abaqus yazılımı kullanılarak modellenmesini yapmışlardır. Yeniden doldurulmuş deliğin gerilme testine göre kompozit hasar modelini öncelikle onaylamışlardır. Bağlantı dayanımı ve hasar ilerleyişi süreci tam olarak sayısal hesaplamalı modelin tahmin edilen sonuçları ile deneysel sonuçlardaki göstergelerini karşılaştırmışlardır.

Aktaş vd (2010) ortaya koymuş oldukları bu çalışmada, cam-fiber takviye edilmiş kompozitler için birleştirilmiş cam-fiber arası kullanarak, pim benzeri kompozit birleştirme geçmesinde yeni bir takviye metodunu incelemişlerdir. İki tip bağlantı arası şekli kullanmışlardır. Fiberlerden birisini pim olarak kullanmışlardır ve diğer fiber pim ise yapıştırılarak birleştirilmiş yüzey üzerinde bükülerek saplanmış kenarlarda kullanmışlardır. Statik gerilme testi, yapıştırılarak birleştirilmiş fiberler arası haricindeki her iki bağlantı için uygulamışlardır. Deneyleri, farklı üst üste gelme uzunlukları için ASTM standartlarına uygun olarak yapmışlardır. Sonuçlar, tekli bindirme bağlantılarının son statik dayanımı için, fiberler arasının yapıştırılarak birleştirilme sayısının arttırılmasının önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Bir de, tip A durumu, hata için kötü bir durum olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, tip B ve C durumları için bağlantı kötü sonuçlanmadığını göstermişlerdir.

Yang vd (2004) yapmış oldukları bu çalışmalarında, yapıştırılmış tekli bindirme kompozit birleştirmelerinde, yapışkan gerilme dağılımlarını belirlemek için analitik bir model türetmişlerdir. Modeli oluştururken, yapışkanı Von Mises akma kriterine göre elastik-tam plastik kabul ederlerken, kompozit numuneleri ise lineer elastik kabul etmişlerdir. Tabakalanmış anizotropik plaka teorisini yapıştırılmış kompozit plakaların genel denklemlerinin türetilmesinde uygulamışlardır. Tüm sistemi kontrol eden denklemler uygun sınır koşulları ile analitik olarak çözülmüştür. Geliştirdikleri gerilme modeli vasıtasıyla

yapışkanın gerilme dağılımlarını Abaqus sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırıp doğru olduğunu göstermişlerdir.

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 modellenemediği 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 yapışkanların 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. Parçalar: 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 incelemişlerdir. 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 incelemişlerdir. Yapıştırıcı gücü yapıştırıcı kesit alanının etkisini değerlendirmişlerdir.

Qian ve Akisyan (1998) çalışmalarında; alüminyum substrate ve epoksi reçine arasındaki açılı alın birleşimin gerilme dayanımındaki sıcaklık kuru etkilerini incelemişlerdir. Açılı alın birleştirmeleri deplasman kontrolünde standart tahrik vida test cihazını kullanılarak test etmişlerdir. Nispeten kırılğan yapıştırıcılar ile sandviç birleşimlerinin gerilme davranışını incelemişlerdir. Mekanik ve sıcaklık yüklemenin birleşimlerine hasar mekanizmaların ve birleşim geometrisi ve sıcaklık kuru 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 aerodinamik 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 hesaplama modelleri yapmışlardır. Sayısal modeller deneysel verilere karşı doğrulanmıştır. Doğrulanmış modeller; eksenel, kesme ve eğilme moment 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 prosedürlerini kullanmışlardır. Bu testte; işlenmemiş ve onarılmış kırıların 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 kırıların moment kapasitesinin yenilenmesi %60 olduğunu göstermişlerdir. Alın yaması onarılmış kompozit numunelerin dinamik sertliği, bölünmüş Hopkinson çubuğu kullanarak aksenal basınç direnç testi ile incelenmişlerdir. Dinamik yük altında aksenal kuvveti; alın açılına 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 aksenal gerilme koşulu altında yorulma dayanımını genişletmek için metod önermişlerdir. Yapıştırma tabakasındaki gerilmeyi çok aksenliliği 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 ve Dört Nokta Eğilme Yükleme ile ilgili 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. 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, Paepegem ve Degrieck (2008) 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 nümeriğede 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 nümeriğini 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 olabilirliğini 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  $90^0$  oryante 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, Kneec ve Negru (2010) çalışmalarında; statik ve darbe 3 nokta eğilme altındaki köpüklerin non-linner 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.

Airoidi, 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 nonlinear 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 azaltması 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 alkalidir. 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 metodlarını kullanmışlardır. 3 nokta eğilme, 4 nokta eğilme ve çekme testleri farklı yollarla elde edilmiş modülleri karşılaştırmak amacıyla aynı numuneler 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/akrolonitril-butan-sitrin 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 kiriş 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  $\theta < 0.35$  için % 10' dan azdır ve 2D model her zaman DSIF tahminini daha ölçülü verdiğini belirtmiştir.

Jong (1993) çalışmasında; deneysel prosüdürlere, sonuçlar ve nümerik analizleri göstermiştir. Deneysel prosüdürlere 3 nokta eğilmeyi de anlatmıştır. 3 nokta eğilme testlerini bütün kompozitlerde yapmıştır. Test düzeneğinin boyutları ASTM D 790 standartlarına göredir. Örneklerin dış tabakalarında  $0.001 \text{ s}^{-1}$  gerilme 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 ayrık enerji bırakma oranlarını hesaplamak için kullanmışlardır. 3 nokta eğilmede çapraz tabaka laminaların hesaplamalı modelini ve analizini yapmışlardır. Çift ankastre giriş testleri ve son çentikli eğilme testleri tarafından tek yönlü destekli cam fiber kompozitler için elde edilen deneysel verilerin nümerik analizini yapmışlardır. Çift ankastre giriş testini geometrik lineer ve nonlinear 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 tartışılmışlardır. 4 nokta eğilme düzeneği kolayca modellemenin 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 kiriş 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 incelemişlerdir. İki yaklaşım izlemişlerdir. Bunlardan birincisi, enine kayma ile lamine teorisine dayalıdır. Ard arda gelen hatalar, hata modları, hatanın ilerlemesi ve numunelerin geometrik karakteristiklerinin etkisi yüklemeye 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 incelemişlerdir. 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 yasanın 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 yasanın nonlineer 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 arttırılmasına 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. Bunun yanında 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 silindirlerinin 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 aliminyum tabakalarının darbe performansı (CARAL) deneyler ve nümerik simülasyonlar tarafından incelemiştir. 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 ve BİRLEŞTİRME TİPLERİ

#### 3.1 Kompozit Malzemeler

İnsanlar yaşamlarında fayda sağlamaya yönelik olarak araç ve gereç yapmaya başlamalarından itibaren farklı malzemelemelere olan ihtiyaçları her geçen gün daha çok artmıştır. Farklı türlerde malzemelere ihtiyaç duymalarının en önemli nedeni ise gerçekleştirdikleri farklı türdeki faaliyetlerde, ihtiyaç duydukları yüksek dayanıklılık ve kullanım ömrünün daha uzun olması gerekliliğinin farkında olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemeler, bu alanda bilinen ilk malzeme türü olarak varlık göstermektedir. İnsanlar, kompozit malzemeleri doğadan model alarak, kendi uygulamalarında ilk olarak çamur ve samanı karıştırmak suretiyle evlerinin yapımında kullanmışlardır. Bu şekilde dayanımı yüksek ve kullanımının daha uzun ömürlü olduğu yapılar elde etmişlerdir.

Çağımızda ise kompozit malzemeler denildiğinde akla ilk, üst düzey mühendislik anlayışıyla üretilmiş ileri teknoloji ürünleri olarak gelmektedir. Kompozit malzemeler; esas olarak iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde, kullanım alanında istenilen üstün özellikleri tek bir malzeme olarak bünyesinde toplamasıyla ortaya çıkarılan yeni tür bir malzemelerdir. Kompozit malzemeler, matris ve fiber bileşenlerinden meydana gelmişlerdir. Kompozit malzeme içerisinde yer alan matris, takviye elemanı olarak kullanılan fiberleri bir arada ve birbirinden ayrı tutarak malzemenin bütününe destek sağlar. Ayrıca matris bileşeni malzeme üzerine gelen kuvveti fiberlere iletir ve malzemenin dayanımını arttırmakla beraber fiberleri çevresel etkilerden de korumaktadırlar. Kompozit malzeme içerisinde yer alan diğer bir temel bileşen olan fiberler ise malzeme üzerine gelen kuvveti taşıyarak malzemenin işlevselliğini korumasını sağlamakla beraber kalıcı şekil değişimi meydana gelmesiyle beraber oluşabilecek çatlaklara ve ilerlemelerine karşı da dayanım gösterirler. Geniş bir kullanıma sahip olan matris malzemeleri polyesterler, vinilesterler ve epoksiler; fiber malzemeleri ise aramid, cam ve karbondur.

### **3.2 Kompozit Malzemelerin Olumlu ve Olumsuz Yönleri**

Kompozit malzemeler kullanılacağı yerlere ve kullanım amaçlarına göre bünyesinde bulundurduğu matris ve fiber bileşenlerinin istenilen olumlu özelliklerini ortaya çıkaracak şekilde farklı miktarlarda birleştirilebilmektedir. Ancak tüm bu oluşum sürecine karşın bazı olumsuzluklarla da karşılaşılabilir.

Kompozit malzemelerin olumlu yönleri olarak; yüksek mukavemet, kolay şekillendirilebilirlik, estetik görünüm, tasarım esnekliği, yanma ve yüksek ısıya karşı dayanım, yüksek dielektrik dayanımı, radar dalgalarına karşı manyetik görünmezlik davranışları, korozyon ve kimyasal etkilere karşı dayanımı gösterilebilir.

Kompozit malzemelerin olumsuz yönleri olarak ise; kompozit bileşenlerinin pahalı olması, üretim sürecinde yaşanan teknik zorluklar ile kalitenin hassaslığının üretim sürecinde etki eden faktörlerden çabuk etkilenmesi, doğaya duyarlı bir şekilde geri dönüşüm zorluğu, diğer tür malzemelerle karşılaştırıldığındaki işleme sorunlarının olması şeklinde belirtilebilir.

### **3.3 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları**

Kompozit malzemelerin diğer malzemelere göre daha üst düzey niteliklerinin var olması, kullanım alanlarının çok geniş olmasını sağlamıştır.

Kompozit malzemeler, havacılık-savunma sanayinde uçak ve helikopter gövdelerinde, motor muhafazasında, pervane ve kanat gibi daha birçok fonksiyonel birimlerde kullanılmaktadırlar.

Askeri teçhizat ve donanım alanında; balistik amaçlı panel ve zırhlarda, deniz üstü ve altı donanma birimlerinde, kara unsurlarında kullanılan miğfer, kurşun geçirmez kıyafetlerde ve çeşitli silahların bileşimlerinde kullanılmaktadırlar.

Denizcilik sektöründe; motorlu-motorsuz teknelerde, filika, kano, can simidi, su kayağı, sal ve sörf tahtası yapımında kullanılırlar.

Otomotiv sektöründe; tampon, kaporta, kabin, araç kapıları, fren ve debriyaj balataları, tır ve kamyon kasaları gibi yerlerde kullanılırlar.



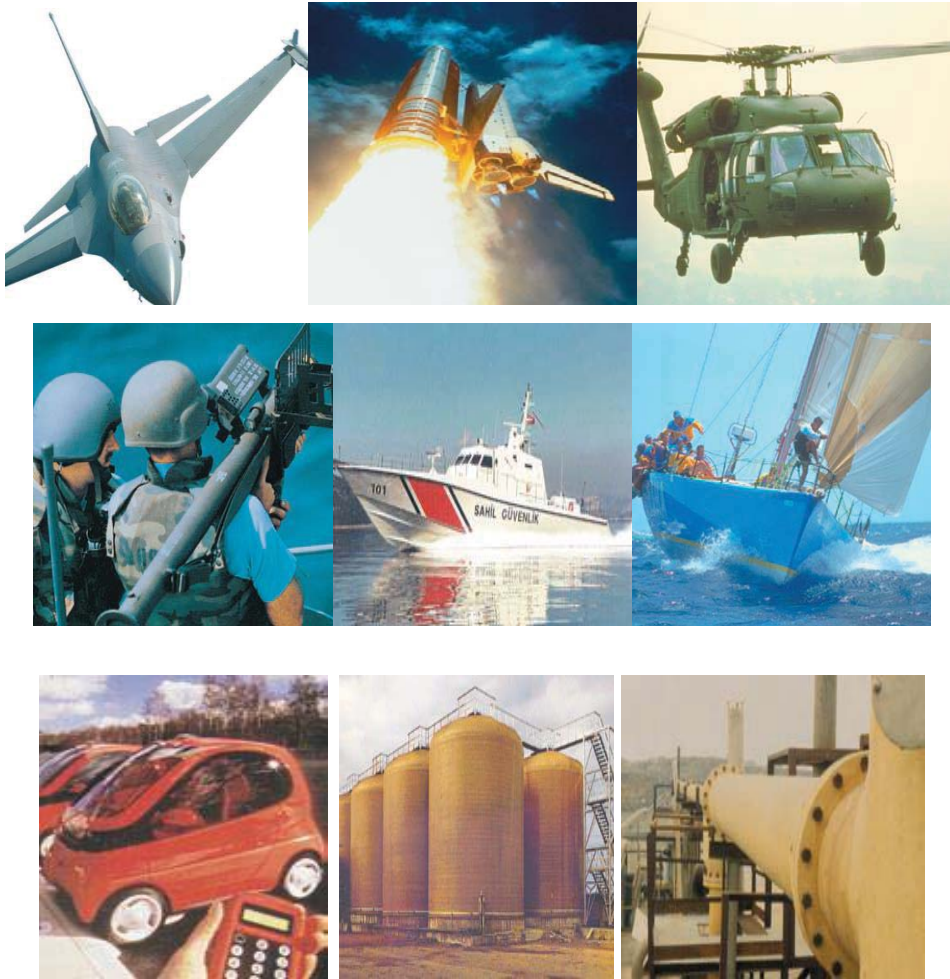
Tarım ve gıda sektöründe; depolama tankları, silolar, modern tarımda kullanılan çeşitli araç ve gereçler, sulama borularında kullanılırlar.

İş ekipmanları ve ev aletleri yapımında; cihazların gövdeleri, küçük ev aletleri, buzdolabı, soğutucu gibi ürünlerde kullanılırlar.

Yapı sektöründe; beton kalıpları, taşıyıcı profiller, borular, yalıtım malzemeleri, prefabrik binalarda kullanılırlar.

Elektrik-elektronik sektöründe, antenler, devre kesiciler, kablo taşıyıcılar, aydınlatma sistemlerinin taşıyıcıları, panolarda kullanılırlar.

Korozyona dayanımlı ürünler olarak; pompa gövdeleri, kimyasal-biyolojik tepkime tankları, boru ve bileşenleri başta olmak üzere çeşitli kullanım alanları mevcuttur. Kompozit malzemelerin uygulama alanları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Camelyaf)



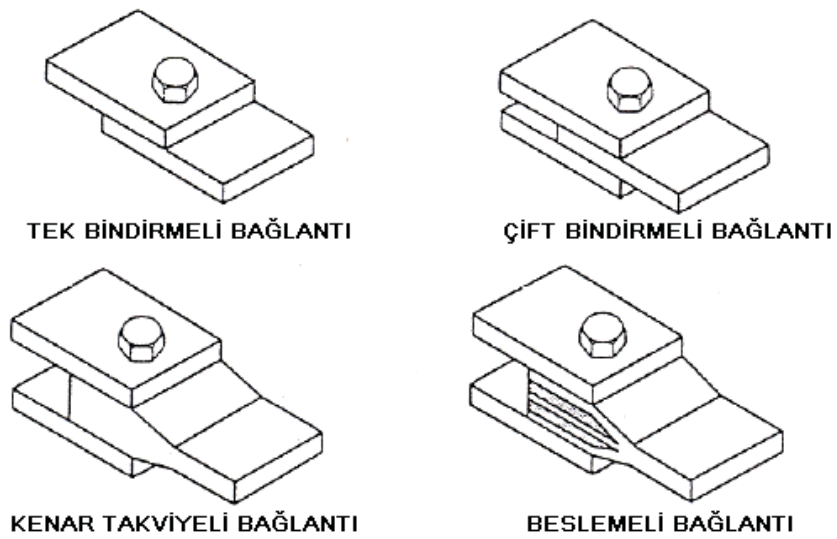
### 3.4 Kompozit Yapılar ve Birleştirme Türleri

Yapılardaki mevcut bağlantılar, tüm mühendislik tasarımlarındaki en önemli ve hayati yapısal bileşeni oluştururlar. Yapıyı oluşturan bileşenler arasındaki birleştirmeler, yapılar için üretim sorunlarına, yapı için fazladan bir yük oluşturmasına ve yapının dayanımı üzerinde bir hasar oluşum potansiyeline neden olabilmektedirler. Tasarımı gerçekleştirilen bir birleştirmenin ana hedefi, yapıyı oluşturan bileşenler arasında etkileşimi sağlayarak yük iletimini gerçekleştirmektir. Yük iletimi esnasında, birleşme bölgelerinde oluşan gerilme yığılmalarından dolayı çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Bu nedenle dayanım gücü yüksek ve sağlam yapılar oluşturabilmenin yolu, birleştirme tasarımının gerilme yığılmalarını en alt seviyede tutacak şekilde gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır. (Koruvatan, 2008)

Kompozit malzemeler kullanılarak oluşturulan yapılarda genel olarak mekanik şeklinde yani çözülebilen ve yapıştırma şeklinde yani çözilemeyen birleştirme türleri olmak üzere iki ana birleştirme yöntemi bulunmaktadır. Tasarımcı tarafından tercih edildiği takdirde her iki birleştirme türü de uygulanabilmektedir.

#### 3.4.1 Mekanik birleştirme türleri

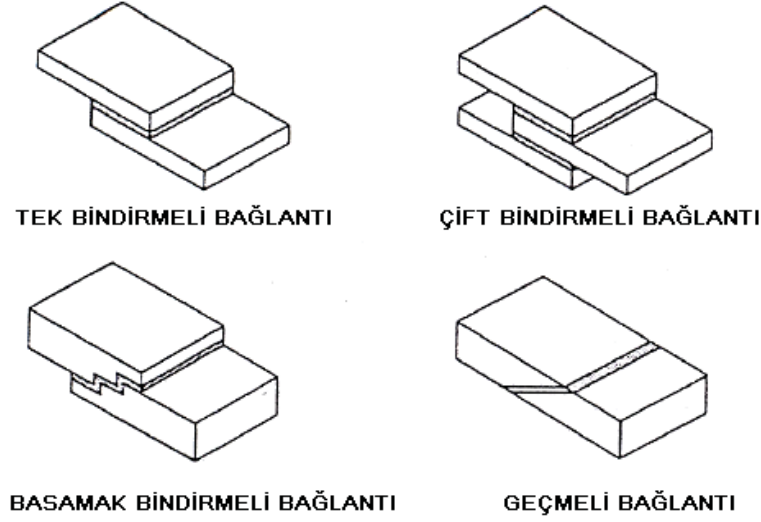
Kompozit yapılardaki yapı bileşenlerinin birleştirilmesinde genel olarak kullanılan birleştirme türleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Mekanik birleştirme türleri (Jones, 2009)

### 3.4.2 Yapıştırma birleştirme türleri

Kompozit yapılardaki yapı bileşenlerinin birleştirilmesinde genel olarak kullanılan birleştirme türleri Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3: Yapıştırarak birleştirme türleri (Jones, 2009)

Tüm birleştirme türlerinin amaçları aynı olmasına karşın yük iletim sistemleri birbirlerinden farklı olmakla beraber hepsinde gerilme dağılımları karmaşıktır. Mekanik birleştirmelerde yük iletimi, sürtünme nedeniyle yapı bileşenlerinin dış yüzeyleri üzerinde oluşan küçük kayma bileşeni ile bağlantı deliklerinin iç yüzeyleri yardımıyla diğer yapı bileşenine iletilir. Yapıştırarak birleştirmelerde yük iletimi, bileşenlerin yüzeyleri yardımıyla kayma şeklinde gerçekleşir. (Jones, 2009)

### 3.4.3 Birleştirme tiplerinin olumlu ve olumsuz yönleri

Mekanik birleştirme ile yapıştırma birleştirme tipleri, üretimi gerçekleştirilen yapının tasarım şartları belirlenerek seçimi yapılmaktadır. Yapı dayanımının yüksek olması ile yapıyı oluşturan ana bileşenlerin hasarı yerine birleşme elemanlarının hasar görmesinin istenmesi ile hem uzun ömürlü hem de ekonomiklik olması gerekliliği birleştirme türlerinin olumlu ve olumsuz yönlerinin tespitini gerekli kılmaktadır. Bu karşılaştırmalar aşağıda detaylı olarak verilmiştir.(Kedward, 2002)

### **Mekanik birleştirmelerin olumlu yönleri:**

- Birleştirilen parçalarda hasar oluşturmadan birleştirme ve çözme işlemleri yapılabilir.
- Önemli olabilecek artık gerilme sorunu bulunmamaktadır.
- Yapının sağlamlaştırılması kalınlık artımıyla sağlanmaktadır.
- Birleştirilen yapı bileşenlerinde kalınlık sınırlandırılması yoktur.
- Basit birleştirme çeşitlendirilmeleri mevcuttur.

### **Mekanik birleştirmelerin olumsuz yönleri:**

- Yapıda deliğin bulunması ana yapıya hasar verebilmektedir.
- Önemli gerilme yığılmaları oluşturabilmektedir.
- Birleşme elemanı olarak kullanılan metalik parçalarda yorulma çatlaklarına dayanımı düşük olmaktadır.

### **Yapıştırma birleştirmelerin olumlu yönleri:**

- Hafif bir birleştirme türü olup, sert birleşme karakterine sahiptirler.
- Çok düşük miktarda gerilme yığılmaları oluştururlar.
- Korozyona ve yorulmaya karşı çok iyi bir dayanıma sahiptirler.
- Düzgün geometrik yüzeylere sahip bileşenler arası kullanılabilir.
- Gerilme dağılımı düzgün olup, yüksek titreşim ve darbe sönümlene yeteneğine sahiptirler.
- Çözülebilir birleştirme türü olan mekanik birleştirmelere göre daha ekonomiktirler.

### **Yapıştırma birleştirmelerin olumsuz yönleri:**

- Ayrılmaları esnasında ana yapı hasar görebilmektedir.
- Uygulama araç ve gereçleri ile maliyet yüksekliği bulunmaktadır.
- Yapının çalıştığı ortamdaki çevresel etkilere karşı hassas davranış göstermektedir.

- Uygulanacak parçaların kalınlıkları sınırlı olmaktadır.

- Düşük darbe dayanımına sahiptir.

## 4. KOMPOZİT MALZEMENİN ÜRETİMİ ve MEKANİK ÖZELLİKLERİ

### 4.1 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

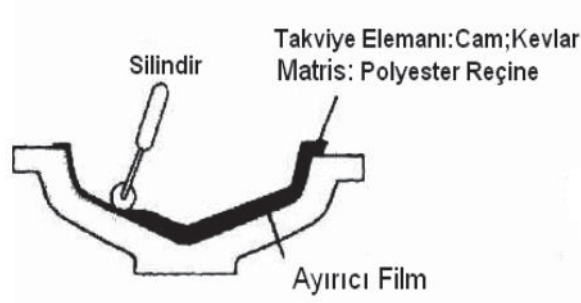
olarak sınıflandırabiliriz. Yapı şekillerine göre;

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

olarak sınıflandırabiliriz.

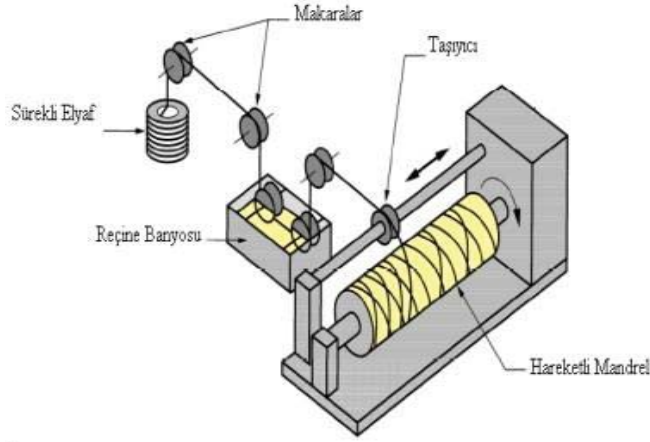
Bu proje çalışmasında kullanılacak olan kompozit malzeme polimer matrisli olduğundan dolayı bu kısımda polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ele alınacaktır. İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için bir çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları;

- **Elle yatırma yöntemi:** Genellikle keçe, örgü, kumaş formundaki elyaflar takviye malzemesi olarak seçilir. Bunlar açık bir kalıba yatırılıp yüzeyine reçine emdirilerek uygulanır. Şekil 4.1’ de elle yatırma işlemi gösterilmiştir (Eker, 2008).



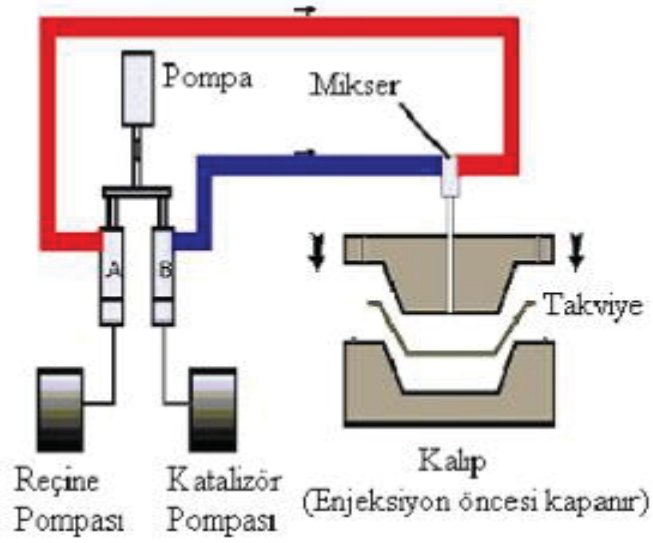
Şekil 4.1 : Elle yatırma yöntemi

- **Elyaf sarma yöntemi:** Sürekli elyafın bir bağlayıcı ortamından geçirildikten sonra dönel mandrelle önceden belirlenmiş sarım geometrisine uygun sarılması yöntemiyle yapılan işleme denir. Bu işlem Şekil 4.2’ de gösterilmiştir (Eker, 2008).



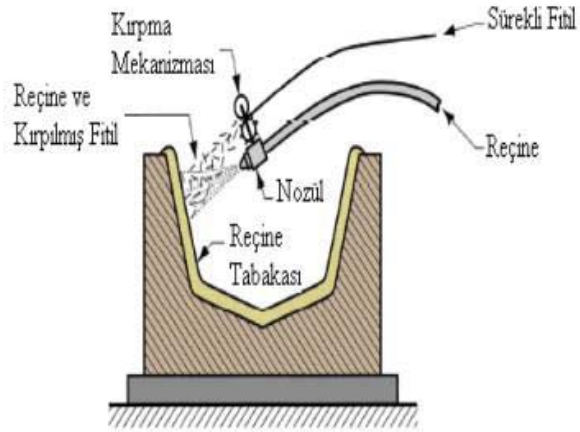
Şekil 4.2 : Elyaf sarma yöntemi

- **Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi:** Kalıp ünitesine tüm takviye malzemelerinin yerleştirildikten sonra uygun sıcaklık ve basınçla reçinenin enjekte edilmesi işlemidir. Şekil 4.3’ de reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi gösterilmiştir (Eker, 2008).



Şekil 4.3 : Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi

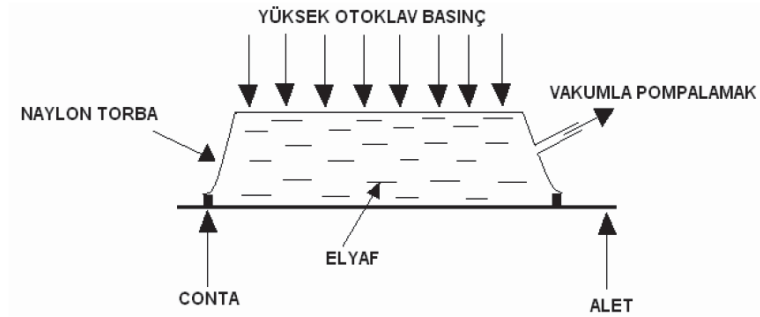
- **Püskürtme yöntemi:** Elyaf püskürtme yönteminde sürekli beslenen fitil kesici bıçaklardan geçerek kırıldıktan sonra katalize edilmiş reçine ile beraber jelkot uygulanmış kalıp yüzeyine püskürtülür ve oda sıcaklığında sertleşmeye bırakılır. Yapılan bu işlemler Şekil 4.4' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Püskürtme yöntemi

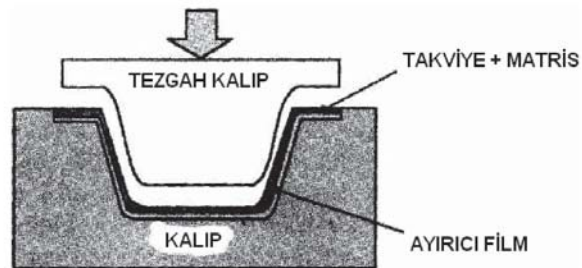
- **Otoklav yöntemi:** Önce üretimi yapılacak numune için laminasyon şemasına uygun olarak tabakalama ve vakum torbalaması yapılır. Daha sonra hazırlanan

malzeme bir otoklav fırınının içine yerleştirilerek sıcaklık altında pişme ve katılaşma gerçekleşir. Yapılan işlem Şekil 4.5' te verilmiştir.



Şekil 4.5 : 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 içene 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 saklanması 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 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Hazır kalıplama yöntem



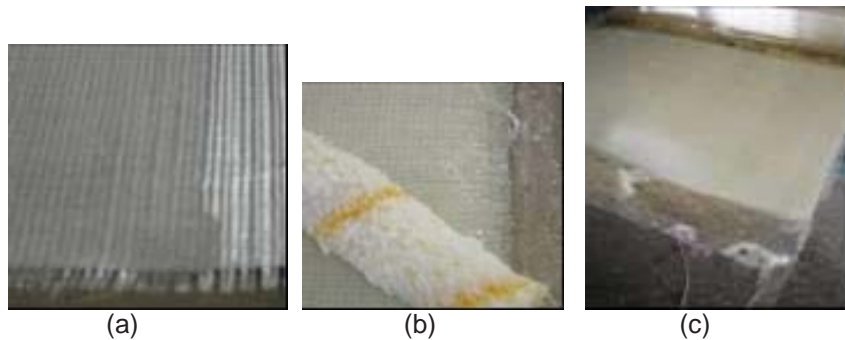
## 4.2 Kompozit Malzemenin Üretimi

Bu proje çalışmasında kullanılan cam elyaf/epoksi kompozit malzemenin imalatı bölümümüz laboratuvarında bulunan Şekil 4.7’de görüldüğü gibi kompozit malzeme üretim presi ile üretimi gerçekleştirilmiştir.



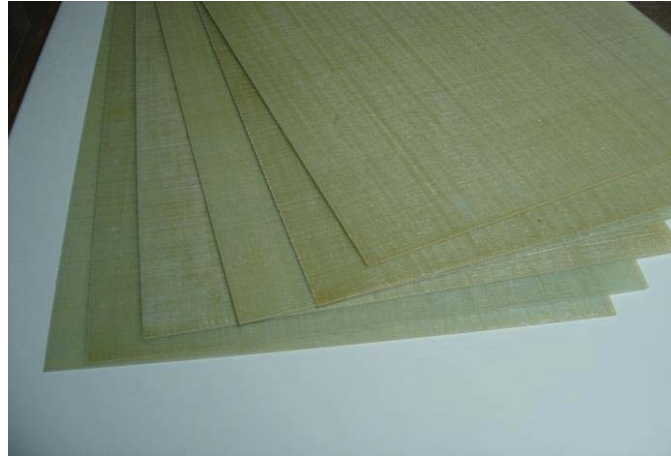
Şekil 4.7 : Üretim presi

Kumaş şeklindeki cam elyafların kesim işlemleri bittikten sonra matris malzemesi olan epoksi reçine karışımı hazırlanmıştır. Kalıp üzerine konulan 1000x500 mm ebatlarda kesilmiş her cam elyaf kumaşına akışkan şeklindeki epoksi reçinesi ile sertleştirici karışımı Şekil 4.8’de gösterildiği gibi rulo yardımı ile uygulanmıştır. Yapılan rulolama işlemi ile epoksi reçinesinin cam elyaf kumaşına daha iyi emdirilmesi ve oluşabilecek ara yüzey boşlukları için hava kabarcıklarının yok edilmesi sağlanmıştır. Böylelikle her cam elyaf tabakasına epoksi reçinesi uygulayarak ıslak bir kompozit malzeme kalıp içinde elde edilmiştir. Elde edilen ıslak kompozit malzemenin üstüne üst kalıp plakada yerleştirilerek ıslak malzeme iki rijit kalıp plakası arasında alınmıştır. Islak malzemenin kürleşmesi ve minimum bir kalınlığa gelmesi için 14 MPa basınç altında ve 120°C sıcaklıkta iki saat boyunca kürleştirilmiş ve Şekil 4.8 (c)’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.8 : Kompozit Plaka Üretimi

Kompozit plakalar Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen verilere ve literatür araştırmalarına göre Cam elyaf düzeni [0/90] tabakalı ve sekiz tabakalı simetrik olarak üretilmesine karar verilmiş olup plakalar bu düzende üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalar Şekil 4.9' da gösterilmiştir. Ayrıca kompozit malzemenin mekanik özelliklerini tespit edebilmek için ASTM standartlarına uygun olarak malzeme üretimi de gerçekleştirilmiştir. Matris malzemesi için epoksi 100/80 Ciba Geigy, Bisphenol A, CY-225 epoksi ve Ciba Geigy, Anhydride, HY-225 sertleştiricinin karışımını içermektedir.



Şekil 4.9 : Üretilen kompozit plakalar

Bu proje çalışması kapsamında yapılan deneylerde kullanılan tüm numuneler, n 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 4.10' da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 : Su jeti ile numune kesimi

Şekil 4.11’de montajı yapılmış numuneler gösterilmektedir. I şeklindeki kilit bağlama elemanı sıkı geçme şekliyle yarı numunelere monte edilmiştir.



Şekil 4.11 : Montajlanmış deney numunesi

### 4.3 Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikleri

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 ile karşılaşılabilir. 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 yüklemeye

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.

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

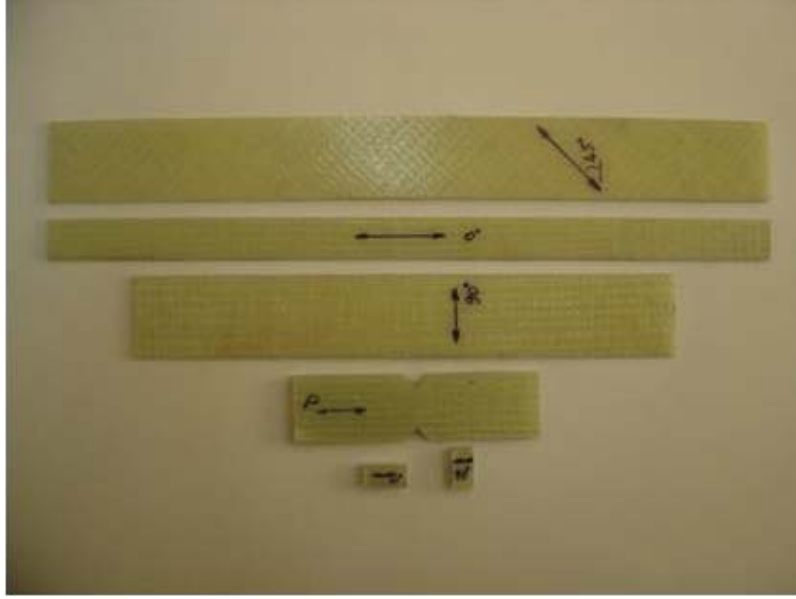
$$\%V_f = \frac{V_f}{V_T} \cdot 100 \quad (4.2)$$

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

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  $\rho_K = 2,026$  g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

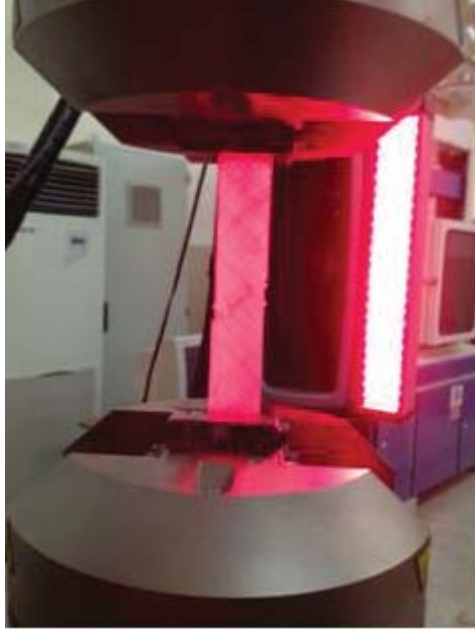
$$\rho_K = V_f \cdot \rho_f + V_m \cdot \rho_m \quad (4.4)$$

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 4.12'de mekanik özelliklerin tespiti için gerekli olan numunelerden örnekler gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : 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 4.13’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 kalemiyle 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.

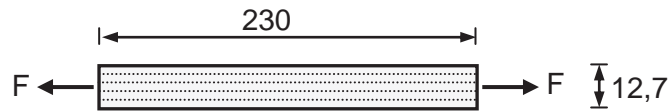


Şekil 4.13 : Video ekstansometre ile deneyin yapılışı

#### 4.4 Kompozit Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

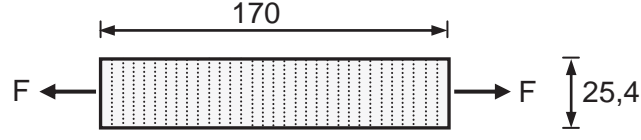
Aşağıda verilen ilgili ASTM standartlarına göre deney numuneleri boyutlandırılmış ve statik çekme, basma ve kayma yükleri altında ilgili özellikler tespit edilmiştir.

ASTM 3039–76 standardına göre, Boyuna elastisite modülü ( $E_1$ ), Poisson oranı ( $\nu_{12}$ ) ve boyuna çekme mukavemeti ( $X_t$ ), Şekil 4.14’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.



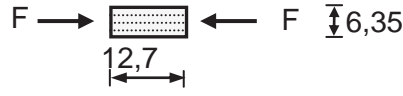
Şekil 4.14 :  $[0]_6$  çekme numunesi

Enine elastisite modülü ( $E_2$ ) ve enine çekme mukavemeti ( $Y_t$ ) ASTM 3039-76 standardına göre, Şekil 4.15’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.



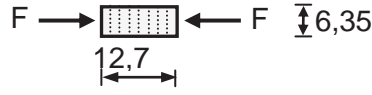
Şekil 4.15 :  $[90]_6$  çekme numunesi

ASTM 3410–75 standart test metoduna göre, statik basma yoluyla tek yönlü Şekil 4.16’daki 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.



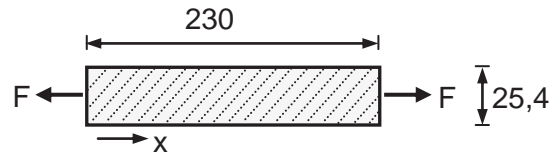
Şekil 4.16 :  $[0]_{16}$  basma numunesi

Enine basma mukavemeti ( $Y_c$ ) özelliği Şekil 4.17’de 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 4.17 :  $[90]_{16}$  basma numunesi

ASTM 3518–76 standart test metoduna göre, asal eksenini  $45^\circ$  olan Şekil 4.18’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 4.18 :  $[45]_6$  kayma numunesi

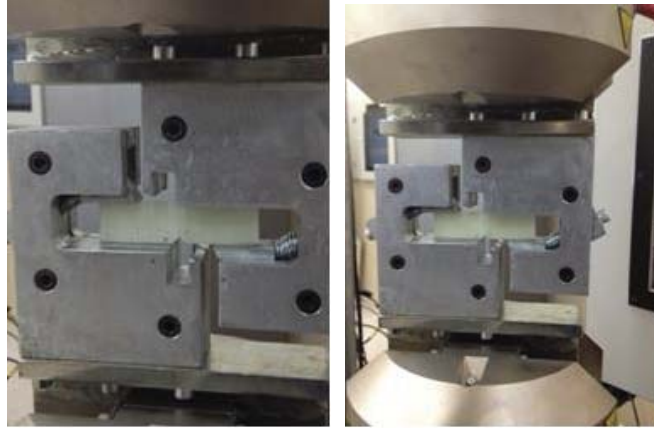
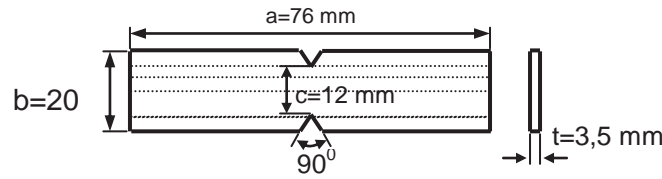
Kayma numunesinin x yönündeki veya çekme yüklemesi yönündeki şekil değiştirmesi dolayısıyla elastisite modülü tespit edilerek Jones’a göre (4.5) denklemiyle;



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

hesaplanmıştır (Jones1999).

ASTM D 5379 standart test metoduna göre Iosipescu kayma test metodu kayma mukavemetini (S) belirlemek için kullanılmıştır. Bu mekanik özellik Şekil 4.19’da 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 4.19 : 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

## 4.5 Deney Cihazının Tanıtımı

### 4.5.1 8801 Servo hidrolik test cihazı

Proje çalışması kapsamında yapılan deneyler, Şekil 4.20’de gösterildiği gibi Instron 8801 Servo Hidrolik kontrollü 50 kN yük kapasiteli test cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.20 : 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.

#### **4.5.2 Video ekstensometre**

Deneyler sırasında eksenel ve yanal yüzeylerde oluşan birim uzamanın/daralmanın doğru olarak ölçülmesi gerekmektedir. Şekil 4.21'da görülen temassız video ekstensometre ile deney sırasında birim uzamanın sağlıklı bir şekilde bulunması sağlanmıştır.



Şekil 4.21 : 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.
- Aksenal 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.

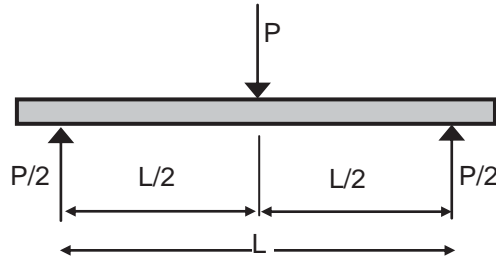
Tablo 4.2: Video ekstansometrenin teknik özellikleri

	<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 ve DÖRT NOKTA EĞİLME DENEYLERİ VE DENEY APARATLARI

### 5.1 Üç Nokta Eğilme Deneyi

Üç noktalı eğilme deneyi, eğilme testleri içerisinde en yaygın kullanılan deney yöntemidir. Deneyin temel prensibi, kullanılan malzemeyi “kiriş” modeli olarak kabul etmesidir. Kiriş denklemini 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]. Deneyin sınır koşulları “basit kiriş” modellenmesi ile aynıdır. Test numunesi uzunlamasına yatay bir pozisyonda destekler üzerine konurken, üzerine tam ortasından kuvvet uygulanır. Şematik gösterim Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Üç Noktadan Eğilme Deney Düzenegi

Deney boyunca, P kuvveti artırılırken, malzemenin tam ortasında oluşan sehim değeri ölçülür. Ölçülen değerler sonucu kuvvete karşılık gelen sehim grafiği elde edilir. Bu ölçümler, tüm malzeme için en yüksek sehim ve momentin oluştuğu orta noktasında yapılır. Mukavemet bilgileri kullanarak, üç noktalı eğilme deneyi için gerekli hesaplamalar elde edilir.

$$M = \frac{P \cdot L}{4} \quad , \quad \sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot c}{I}$$

Kiriş Denklemi (küçük deformasyonlar hipotezi):

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{E.I}$$

Burada;

y : Sehim (mm),

M : Moment (Nmm)

P : Kuvvet (N)

E : Young's modülü (GPa, 1 GPa=10<sup>3</sup> MPa)

I : Kesitin atalet momenti (mm<sup>4</sup>)

L : Test uzunluğu (mm)

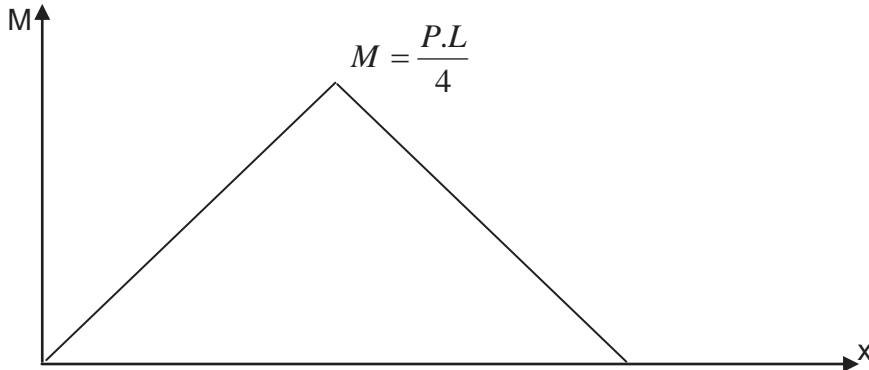
c : Nötral eksen kesitin en uç noktasının mesafesi (mm) olarak tanımlanmıştır.

Üç noktalı eğilme deneyi sınır koşulları ile kiriş denkleminin malzeme orta noktasındaki çözümü;

$$y_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \text{ denklemini verir.}$$

Bu denklem sayesinde malzemenin Young's modülü hesaplanır. Elastik bölge için ise Hooke kanunu kullanılabilir ( $\sigma = E.\varepsilon$ ). Plastik bölgede ise boyun verme olmayacaktır. Sünek malzemeler kolaylıkla şekil verilebilir olduklarından dolayı, bu malzemelerde kırılma gözükmeden deney sonuçlandırılır.

Üç noktalı eğme deneyine ait moment ve uzunluk diyagramı Şekil 5.2 ile aşağıda verilmiştir.

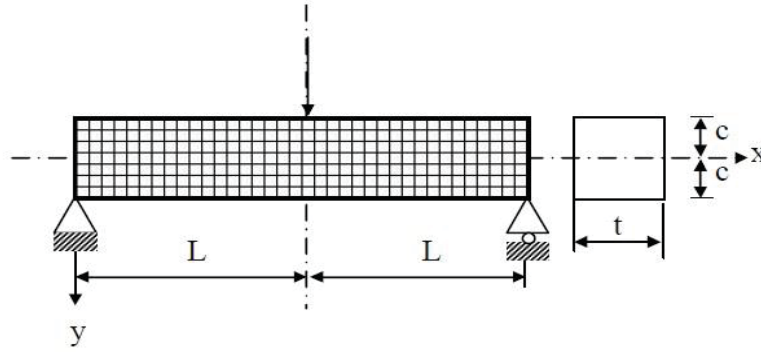


Şekil 5.2 : Üç Noktadan Eğme Moment Diyagramı

### 5.1.1 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 5.3 : Ortasından tekil yüke maruz basit kiriş

Düzlem gerilme durumu için Lekhnitskii (Lekhnitskii, 1981) tarafından verilen denge denkleminde elde edilen denklemler (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.

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

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

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

$$\gamma_{xy} = a_{16} \cdot \sigma_x + a_{26} \cdot \sigma_y + a_{66} \cdot \tau_{xy}$$

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;

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5.6)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

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

$$y = \bar{y}c \text{ için } \sigma_y = 0 \quad (5.7)$$

$$y = \bar{y}c' \text{ de } \tau_{xy} = 0$$

$$x=0' \text{ da } \int_{-c}^c \tau_{xy} t \, dy = \frac{P}{2}$$

$$x=0' \text{ da } \int_{-c}^c \sigma_x t \, dy = 0 \quad (5.8)$$

$$x=0' \text{ da } \int_{-c}^c \sigma_x t y \, dy = 0$$

$t \rightarrow$  kiriş kalınlığı.

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

$$F = \frac{d_4}{6} xy^3 + \frac{e_4}{12} y^4 + \frac{a_2}{2} y^2 + b_2 xy \quad (5.9)$$

$$e_4 = \frac{\bar{a}_{16}}{\bar{a}_{11}} d_4 = m d_4$$

Gerilme bileşenleri bu fonksiyondan bulunur.

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = xy d_4 + m y^2 d_4 + a_2$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = 0 \quad (5.10)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = -\frac{d_4}{2} y^2 - b_2$$

Sınır koşullarından;

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

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

Böylece elastik gerilme bileşenleri denklem (6.12) gibi olur;

$$\sigma_x = \frac{P}{2I} (xy + my^2 - \frac{rc^2}{3})$$

$$\sigma_y = 0 \quad (5.12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P}{4I} (c^2 - y^2)$$



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

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

$$\sigma_y = 0 \quad (5.13)$$

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

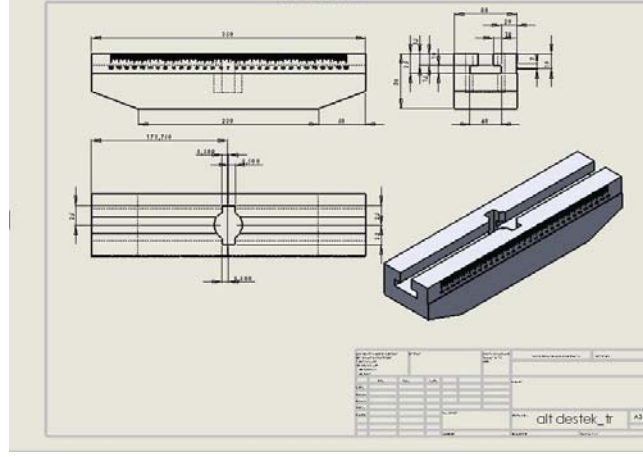
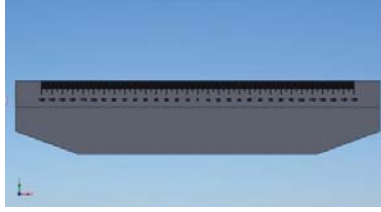
### 5.1.2 Üç nokta eğilme deney düzeneği

Deneylerde kullanılacak üç nokta eğilme test aparatı ASTM D 790-D 6272 standartlarına göre tasarlanmış ve imal edilmiştir. Instron Universal Malzeme Test Cihazı alt kısmına kiriş düzeneği bağlanmıştır. Hareketli üst kolona ise, test malzemesine orta noktasından temas edecek eğme ucu yerleştirilmiştir. Malzeme ile eğme ucu arasında hafif temas ayarlandıktan sonra, cihaz çalıştırılmıştır. Kuvvete karşılık oluşan sehim bilgisayar ortamında elde edilmiş ve kayıt altına alınmıştır. Sehim miktarlarının tespiti mekanik aksamlı klasik ölçme yöntemleri yerine temassız lazer sistemiyle yapılmıştır.

Üç nokta eğilme deneyine ait aparatların tasarımı, CAD yazılımı olan SolidWorks Premium ile gerçekteştirilmiştir. Üç nokta eğilme deneyi aparatları; alt tutucu, üst tutucu, alt çeneler, üst çene ve lazer ölçüm ünitesinden oluşmaktadır.

#### -Alt Tutucu (kiriş)

şekil 5.4'de eğme yük aparatından uygulanan kuvvetin numune üzerinde yarattığı etkiyi karşılamak ve çenelerin farklı konumlarda hareketini sağlamak amacıyla tasarlanmış olan bir alt tutucu bir başka deyişle kiriş bölümü gösterilmektedir.

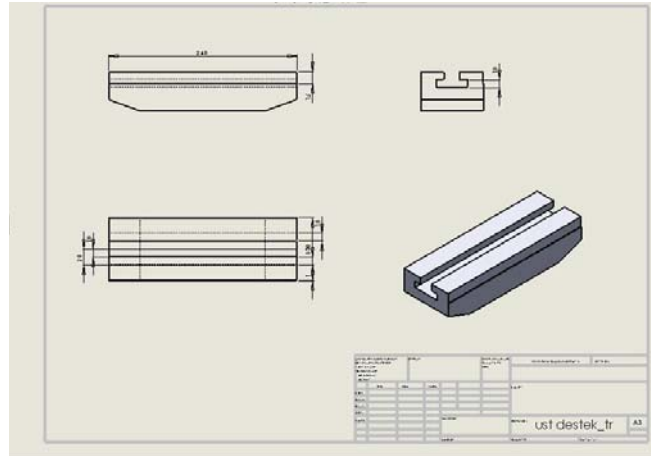


Şekil 5.4 : Üç Nokta Eğilme Düzeneği için Alt Tutucu

### -Üst Tutucu

Şekil 5.5’de deney numunesinin orta noktasından kuvvet uygulamak amacıyla kullanılan üst tutucu parça gösterilmektedir. Tutucu parça üzerindeki kanal sayesinde karşılıklı iki mesnetin değişik konumlarında eğme yük çenesinin konumunun ayarlanmasına imkan vermektedir.

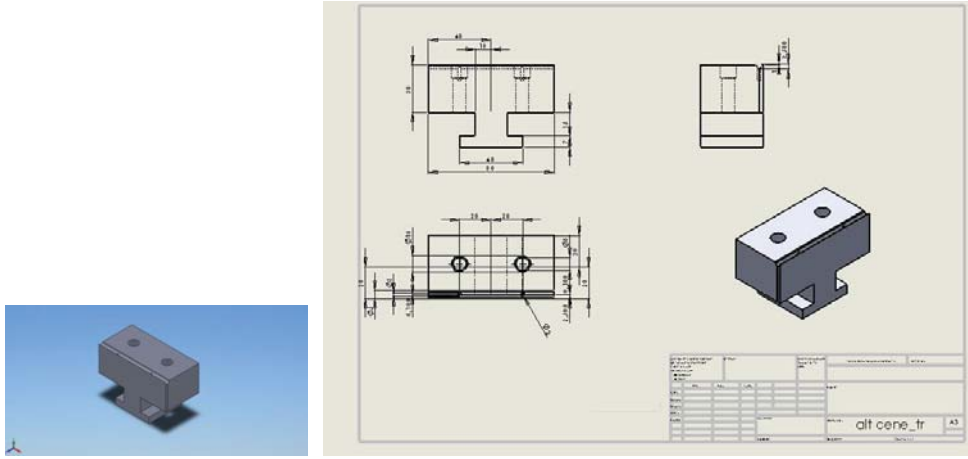
Bu koşullar sayesinde numune üzerine farklı konumlarda kuvvetler oluşturularak mesnetlere göre farklı momentler oluşturulabilir.



Şekil 5.5 : Üç Nokta Eğilme Düzeneği için Üst Tutucu

### -Alt Çene

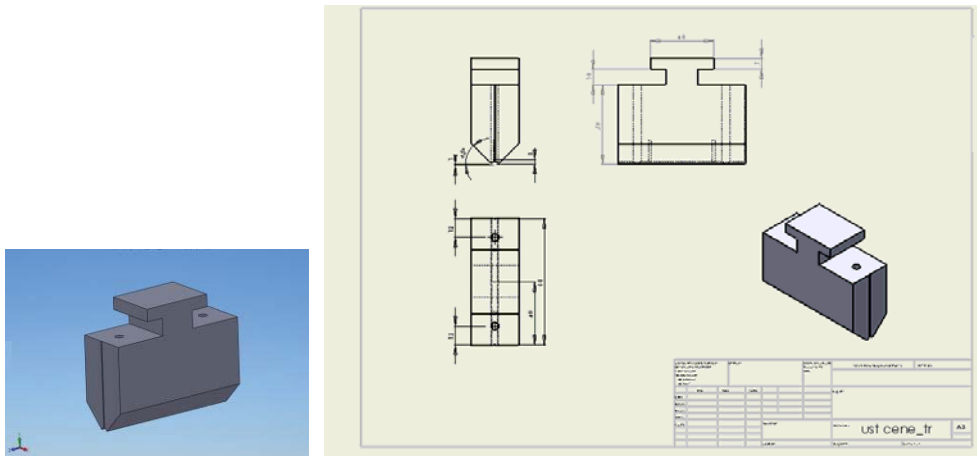
Şekil 5.6'da gösterildiği gibi eğme aparatının kızakları içine konan ve deney yapılacak numunenin istenen konumlarda tutulmasını yardımcı olan elemandır.



Şekil 5.6 : Üç Nokta Eğilme Düzeneği için Alt Çene

### -Üst Çene

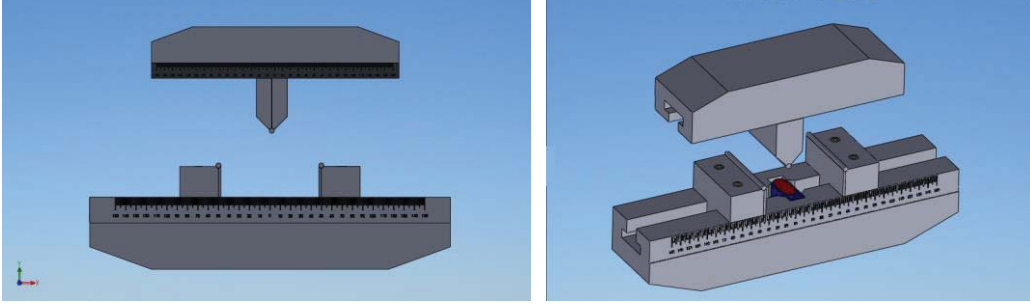
Şekil 5.7'de gösterildiği gibi eğme aparatının kızakları içine konan ve deney yapılacak numunenin istenen konumlarda tutulmasını yardımcı olan elemandır.



Şekil 5.7 : Üç Nokta Eğilme Düzeneği için Üst Çene

## -Üç Nokta Eğilme Deneyi Aparatlarının Montajı

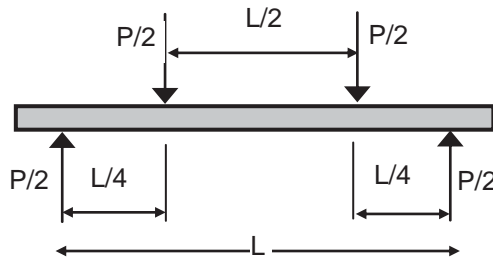
Üç nokta eğilme deneyine ait olan tüm tasarlanmış parçaların montajı Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.8 : Üç Nokta Eğilme Düzeneği için Komple Montaj

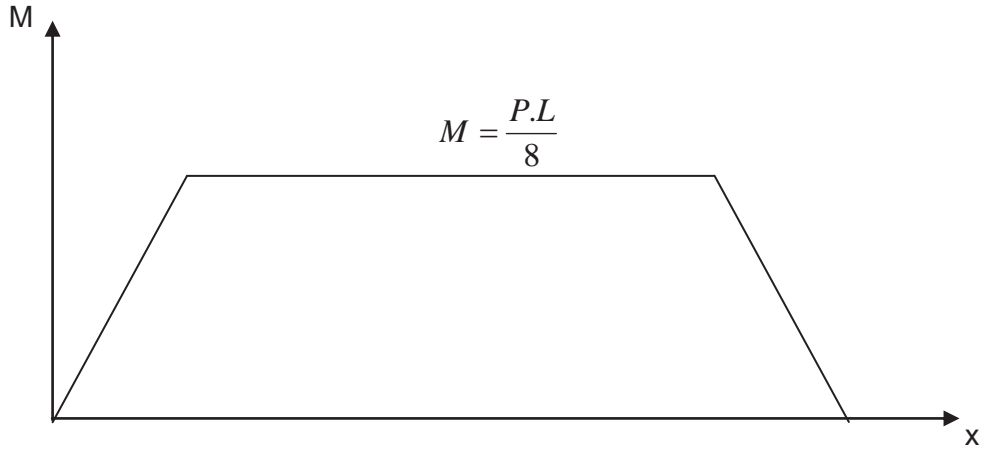
## 5.2 Dört Nokta Eğilme Deneyi

Üç noktadan eğme metodunda tekil yük yoğunlaştırılmış olarak bir noktadan uygulanmaktadır. Bu nedenle yükün uygulandığı yerde gerilme yığılması oluşmaktadır. Eğer yük ikiye bölünerek uygulanırsa daha düzgün bir gerilme dağılımı elde edilebilmektedir. Böylece dört noktadan eğilme test metodu, üç noktadan eğilme test metoduna göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Şekil 5.9’da dört noktadan eğme deney düzeneği şematik olarak görülmektedir.



Şekil 5.9 : Dört Noktadan Eğme Deney Düzeneği

Şekil 5.10’da dört noktadan eğme deney düzeneğine ait Moment-uzunluk diyagramı verilmiştir.



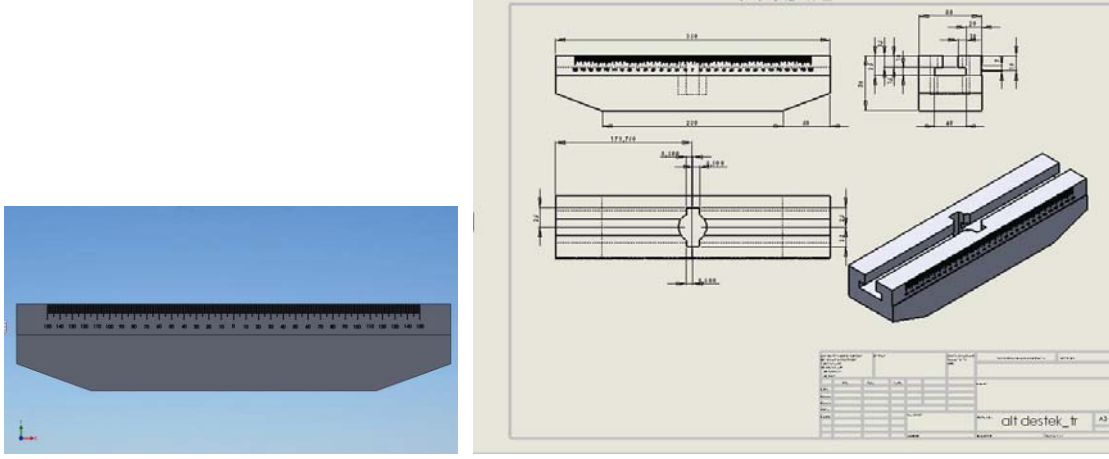
Şekil 5.10 : Dört Noktadan Eğmeye Ait Moment Diyagramı

### 5.2.1 Dört nokta eğilme deney düzeneği

Dört nokta eğilme deney düzeneği, tarafımızdan tasarlanmış olan deney aparatları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğilme düzeneğinden farklı olarak üst tutucuda iki adet yük yükleme çeneleri bulunmaktadır. Dört nokta eğilme deneyine ait aparatların tasarımı, CAD yazılımı olan SolidWorks Premium ile gerçekleştirilmiştir. Dört nokta eğilme deneyi aparatları; alt tutucu, üst tutucu, alt çeneler, üst çeneler ve lazer ölçüm ünitesinden oluşmaktadır.

#### -Alt Tutucu

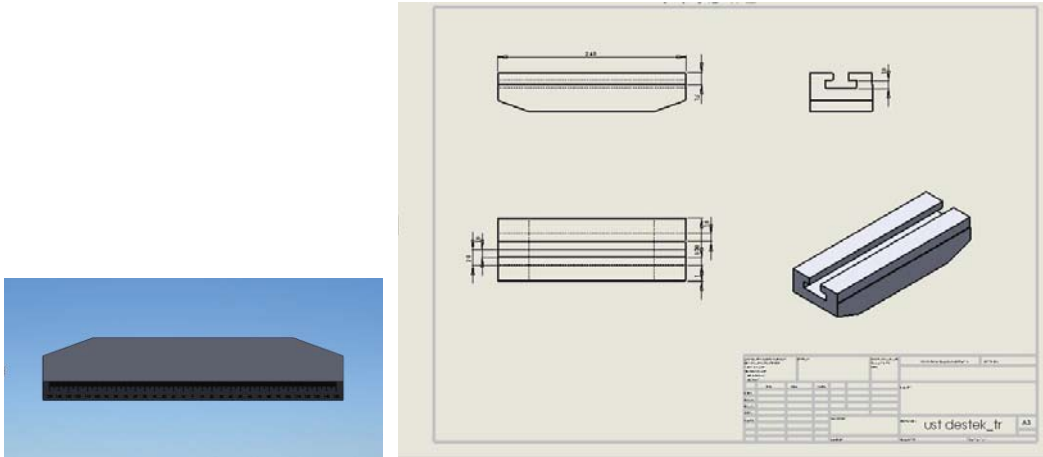
Eğme cihazından uygulanan kuvvetin numune üzerinde yarattığı etkiyi karşılamak ve çenelerin farklı konumlarda hareketini sağlamak amacıyla tasarlanmış olan bir parçadır. (Şekil 5.11)



Şekil 5.11 : Dört Nokta Eğilme Düzeneği için Alt Tutucu

### -Üst Tutucu

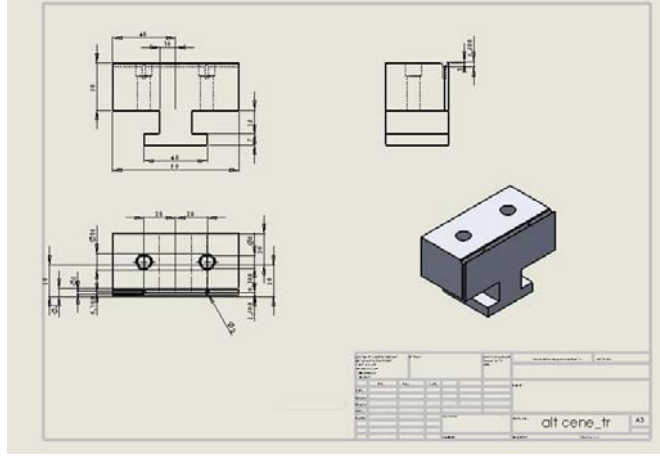
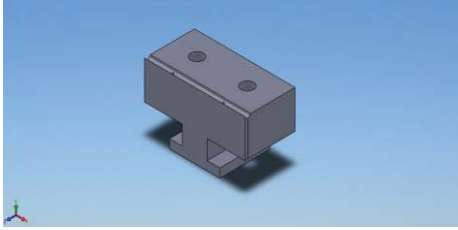
Eğme cihazından uygulanacak kuvvetin deney numunesinin orta noktasından karşılıklı mesnetler yardımıyla Şekil 5.12’de gösterildiği gibi malzemeye kuvvet uygulamak amacıyla kullanılan parçadır. Çene ile üst parça birbirlerine M12 vida ile sabitlenip tutturularak bu parça üzerindeki kanal sayesinde karşılıklı iki mesnetin değişik konumlarında yük yüklemeye imkan vermektedir. Bu koşullar sayesinde numune üzerine farklı konumlarda kuvvetler oluşturularak mesnetlere göre farklı momentler oluşturulabilir.



Şekil 5.12 : Dört Nokta Eğilme Düzeneği için Üst Tutucu

### -Alt Çene

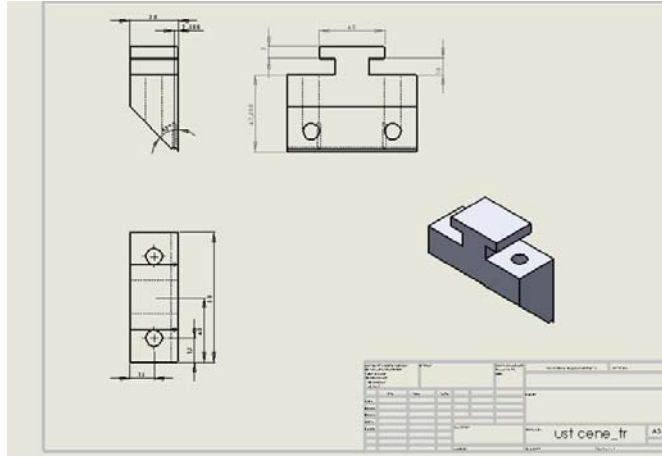
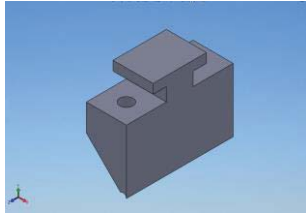
Eğme aparatının kızıakları üstüne konan ve deney yapılacak numunenin istenen konumlarda tutulmasını yardımcı olan elemanıdır. (Şekil 5.13)



Şekil 5.13 : Dört Nokta Eğilme Düzeneği için Alt Çene

### -Üst Çene

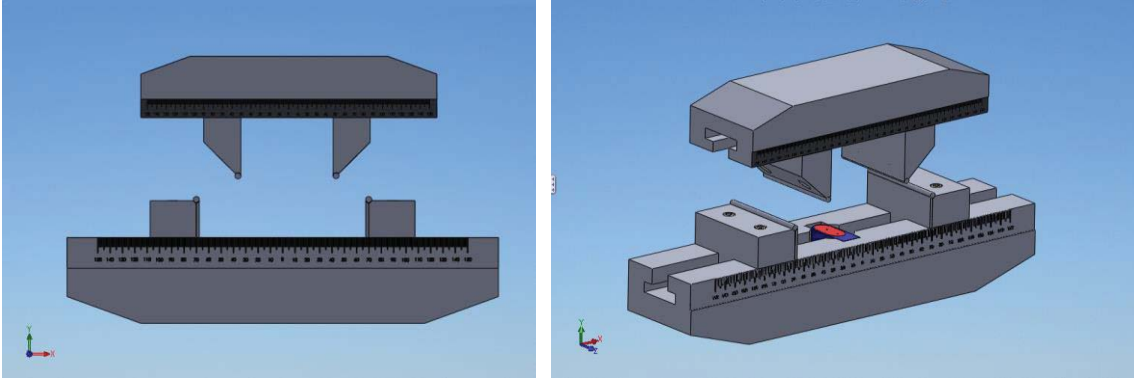
Eğme aparatının kızıkları üstüne konan ve deney yapılacak numunenin istenen konumlarda tutulmasını yardımcı olan elemandır.(Şekil 5.14)



Şekil 5.14 : Dört Nokta Eğilme Düzeneği için Üst Çene

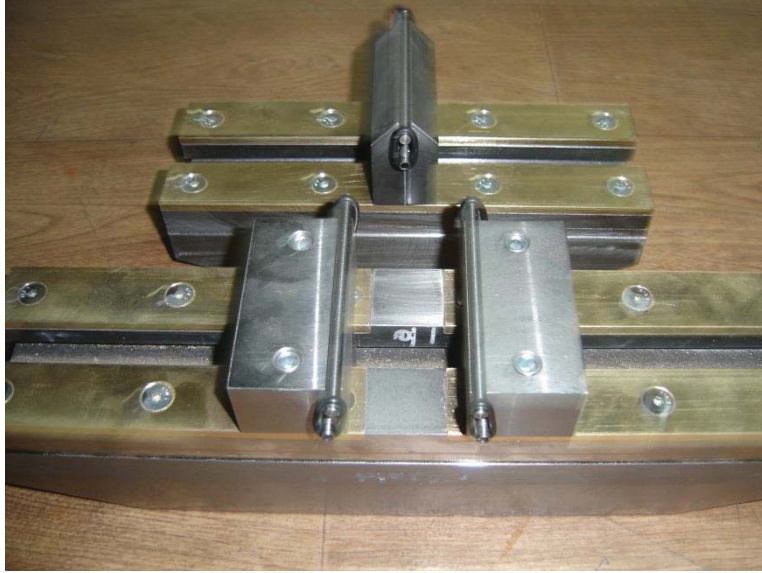
### -Dört Noktalı Eğme Deneyi Aparatlarının Montajı

Dört nokta eğilme deneyine ait tüm tasarlanmış parçaların montajı Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 : Dört Nokta Eğilme Düzeneği için Komple Montaj

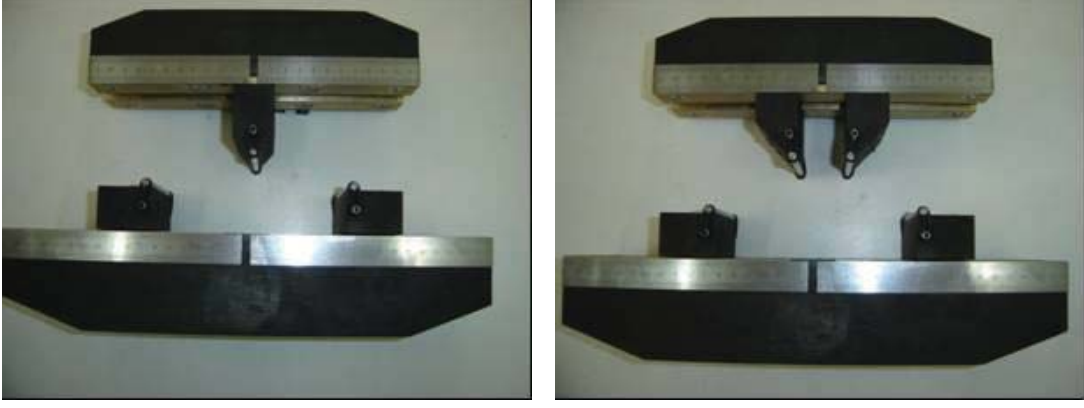
Yapım aşamasında olan üç nokta eğilme test aparatı Şekil 5.16' da gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : Yapım Aşamasındaki Üç Nokta Eğilme Test Aparatı

Şekil 5.17'de gösterildiği gibi üç ve dört nokta eğilme aparatı imalatlarının tamamlanmasından sonra özellikle statik deneyler için hazır duruma getirilmiştir.

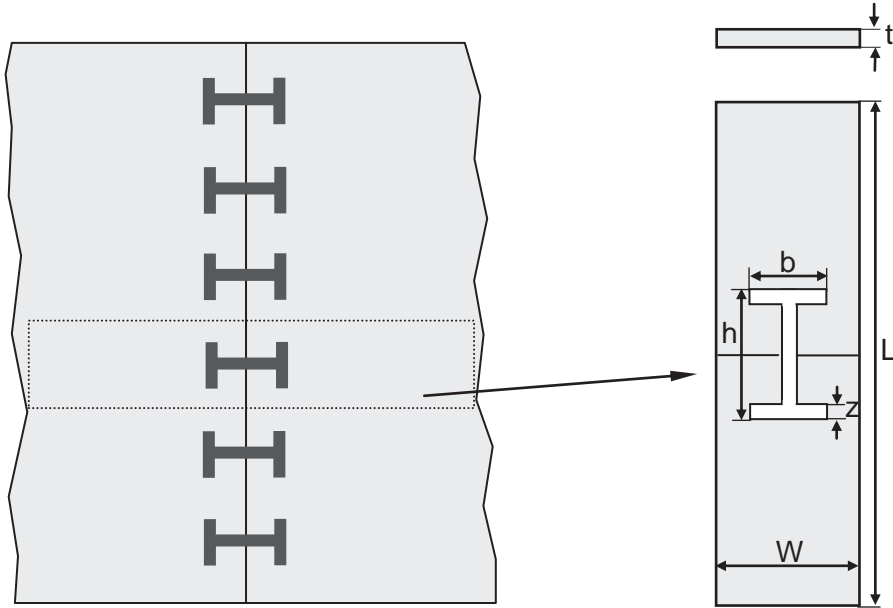




Şekil 5.17 : Üç ve Dört Nokta Eğilme Aparatı

## 6. DEĞİŞİK YÜKLEMELER ALTINDA BİRLEŞTİRME ELEMANININ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, I profilli bağlantı elemanı ile alın altına birleştirilmiş kompozit yapıların çeki-eğilme yüklemeleri altındaki yük taşıma kapasiteleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Şekil 6.1’de gösterilen deneyi yapılacak I profilli alın birleştirilmiş numuneye ait modelin şematik görünümü ve modellenmesi için belirlenen boyutsal parametreler gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Deneyi yapılacak I profilli alın birleştirilmiş numuneye ait modelin şematik görünümü

Yapılan bu çalışmada kompozit malzemesi  $[0/90]_{4s}$  olan numunelerin tam boyu  $L=200$  mm, genişliği  $W=40$  mm ve kalınlığı  $t=2,8$  mm olarak alınmıştır. Birleştirme elemanı iki yarım numune arasında kitleme şeklinde bağlantı yapıldığından dolayı kilit bağlantı elemanı olarak

adlandırılmıştır. Kompozit plakaları alın altına birleştirmek için sıkı geçme yöntemi kullanılmıştır. Sıkı geçme yönteminde tolerans %3 olarak alınmıştır. Kilit bağlantı elemanının uç ve orta genişliği  $z$  ile, boyu veya yüksekliği  $h$  ile ve genişliği  $b$  ile gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada bağlantı kilidinin kalınlığı ve malzemesi yarı numunelerin kalınlığı ve malzemesiyle aynı alınmıştır. Bağlantı kilidi geometrik boyutları bakımından simetrik yapıdadır. 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. Bu oranlara bağlı olarak elde edilen geometri boyutları Tablo 6.1’de verilmiştir. Burada kilit genişliğinin yarı numune genişliğine oranı ( $b/W$ ), kilit orta genişliğinin kilit genişliğine oranı ( $z/b$ ) ve kilit boyunun yarı numune genişliğine oranı ( $h/2W$ )’dır.

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 geometrik oranlarında üretim yapılamamıştır. Dolayısıyla optimizasyon, üretimi mümkün olan tüm oranlarda gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları göz önüne alınarak kilit bağlantı elemanı geometrik olarak geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen kilit bağlantı elemanlarının yük taşıma kapasitesindeki değişimi deneysel olarak bir sonraki dönemde yapılacaktır.

Bağlantı kilit elemanı ile alın altına birleştirilmiş kompozit yapıların yük taşıma kapasitelerinin nümerik analizi, sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu bir bilgisayar programı yardımıyla yapılan nümerik çözümleme analizidir. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan nümerik çözümlemede Abaqus 6.11 ticari paket programı kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları nümerik analizle desteklenmiştir. Ayrıca nümerik ve daha önce yapılan deneysel çalışmaların sonuçları göz önüne alınarak kilit bağlantı elemanının geometrik yapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen kilit elemanlarının yük taşıma kapasitesindeki değişimleri nümerik olarak incelenmiştir.

Tablo 6.1: Boyut tasarımlarının gerçekleştirildiği geçme şekil elemanlarının geometrik parametreleri

Boyut Oranları			b/W					Boyut (mm)
			0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	
			12	16	20	24	28	<b>b</b>
Boyut Oranları	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 Üç Nokta Eğilme Yüğü Altında Birleştirme Elemanın Optimizasyonu

Birleştirme elemanın optimizasyonu üç nokta eğilme yüklemesi altında hem deneysel olarak hem de nümerik olarak yapılmıştır.

### 6.1.1 Üç nokta eğilme yüğü altında birleştirme elemanın 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) yüğü-kilit deplasman grafikleri çizdirilmiştir. Uygulanan yükte bir miktar düşüş meydana geldiği gözlemlendiği anda deney sonlandırılmıştır. Numuneye ait hasar yüğü uygulanan yükteki ilk düşümde meydana gelmiştir.

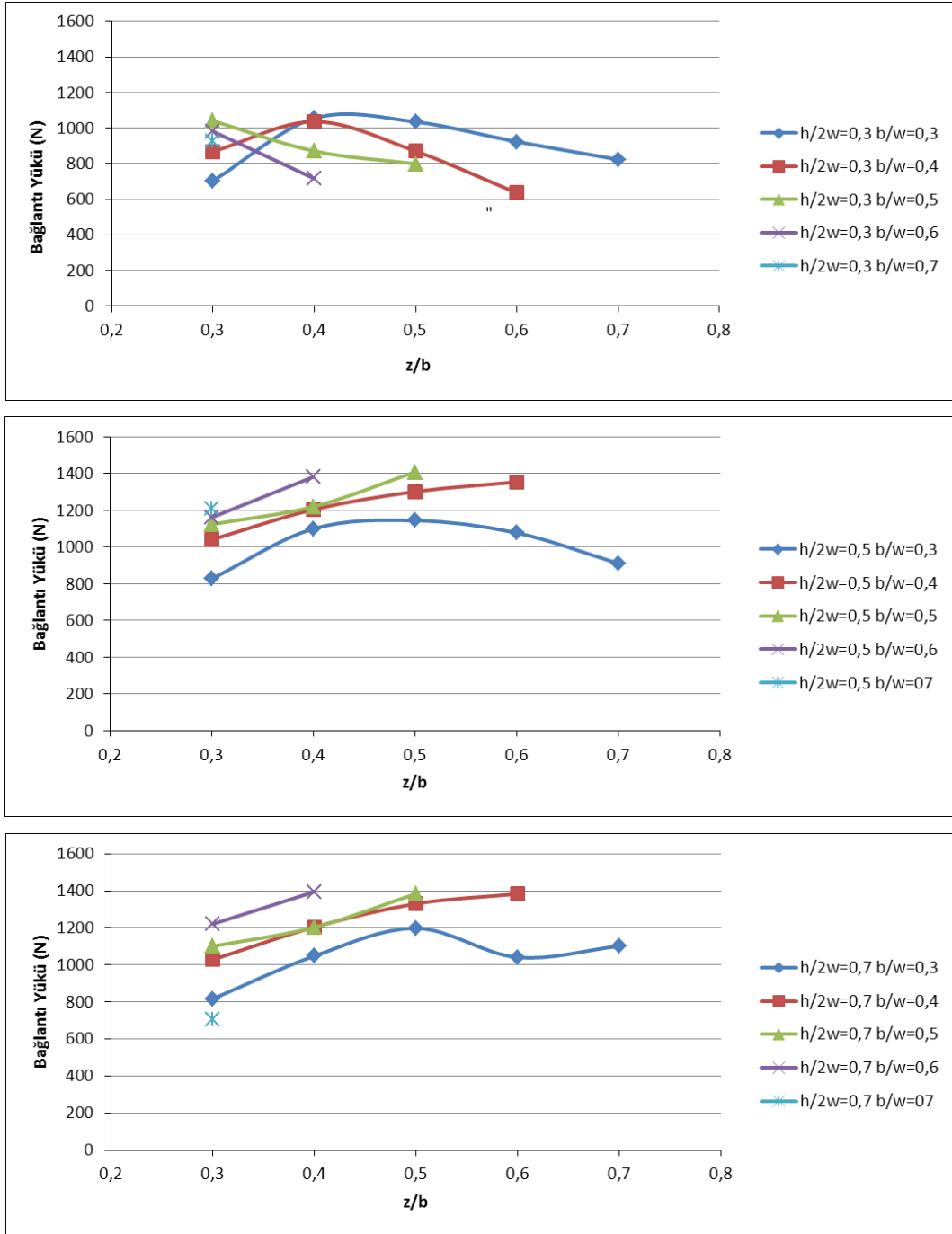


Şekil 6.2 : Eğilme düzeni

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.

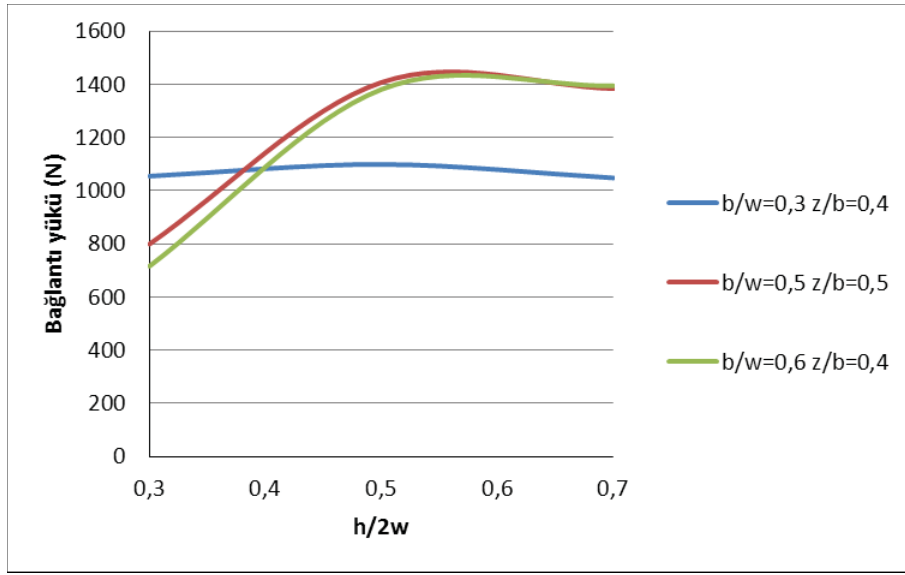
Değişik  $(h/2W)$  oranlarındaki kilit bağlantı elemanlarıyla yapılmış numunelerin,  $(z/b)$  oranlarına göre yük taşıma kapasiteleri Şekil 6.3' de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi yük taşıma kapasitesi daha çok  $(z/b)$  ve  $(b/W)$  oranlarına bağlıdır.  $(h/2W)$  oranının 0,5 ve 0,7 olması 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 incelendiğinde 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

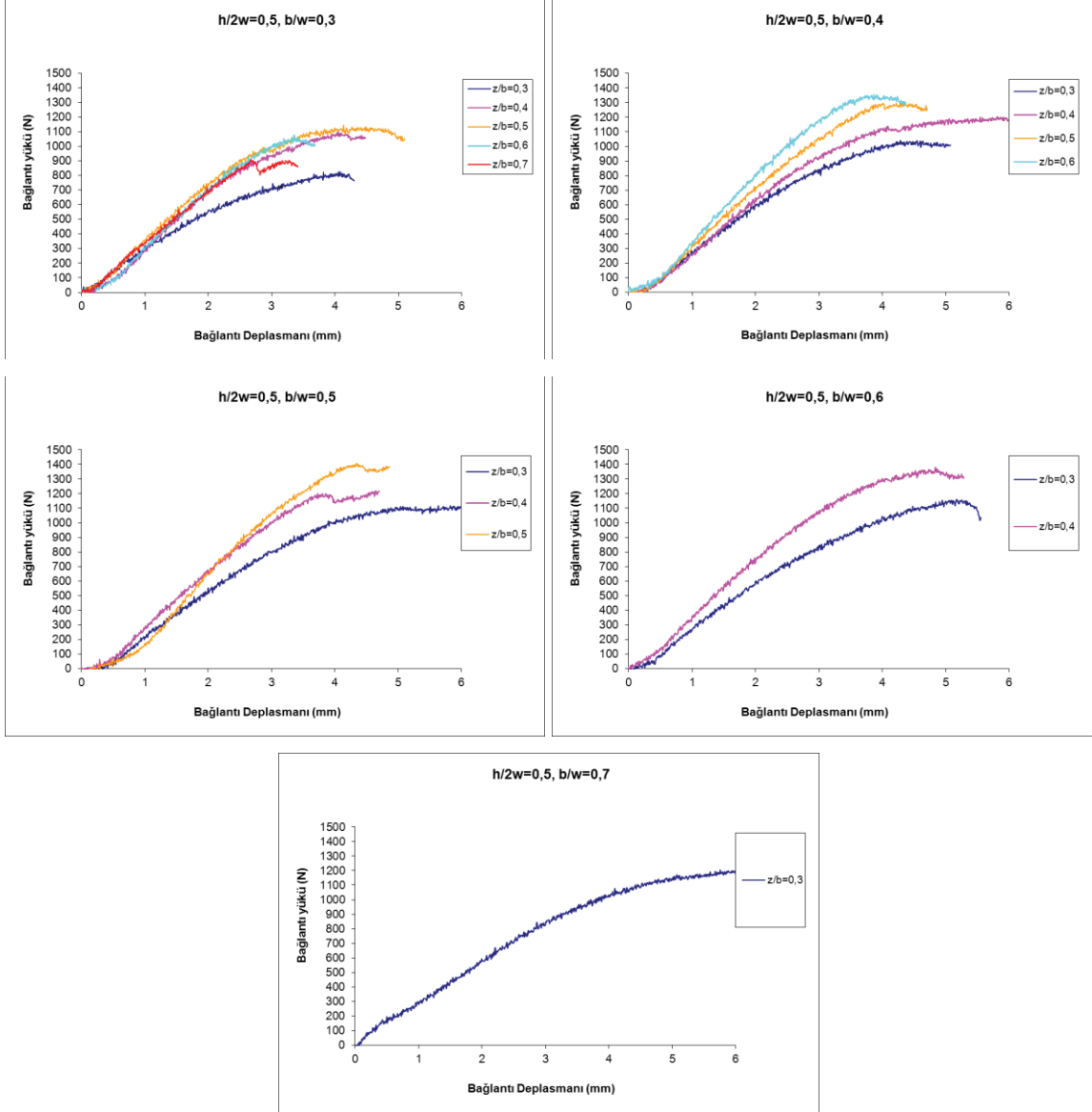
Şekil 6.3’de belirlenen maksimum bağlantı yüklerin elde edildiği parametrelerin kilit boyutlarındaki etkileri incelenmiştir. Buna göre değişik kilit boyları için kilitli birleştirmelerin maksimum hasar yüklerindeki değişimleri ve hasar şekilleri Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi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

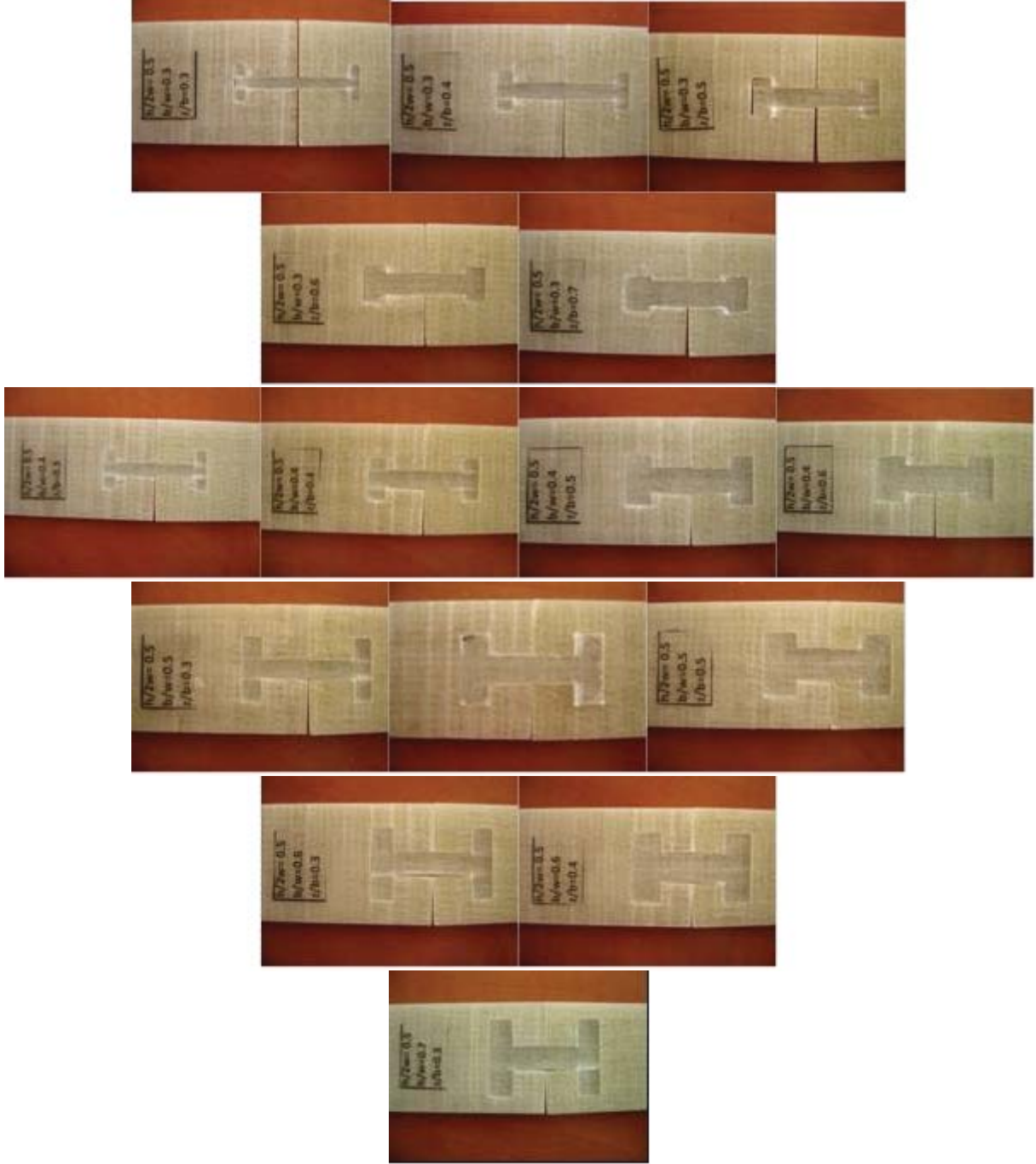




Şekil 6.5 : Bağlantı yüksekliğinin  $h/2w=0,5$  oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi

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 olarak 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 bđyđk değerlerinde ise hasarların ilk önce numune ile beraber matris ezilmesi olarak oluştuğu gözlemlenmiştir.



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

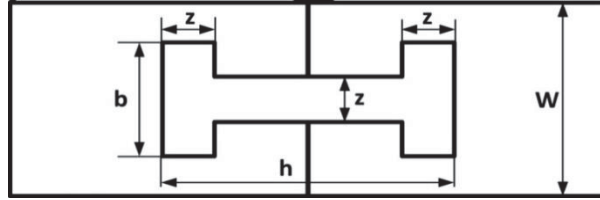
Deneysel çalışmanın sonucu olarak kompozit plakadan yapılan kilit bağlantı elemanları ile oluşturulan birleştirmelerin yük taşıma kapasiteleri, kilit boyu ( $h/2W$ ) oranının 0,5, ( $b/W$ ) oranının 0,5 ve ( $z/b$ ) oranının 0,5 olması durumlarında maksimum olarak tespit edilmiştir.

### 6.1.2 Üç nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının nümerik optimizasyonu

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

#### 6.1.2.1 Eğilme yükü altında nümerik çözüm adımları

Şekil 6.7’ de gösterilmiş olan Mekanik alın birleştirilmiş kompozit numunelerin eğilme gerilmesi altındaki nümerik çözümlemesi gerçekleştirilecektir.



Şekil 6.7 : Sonlu Elemanlar Metodu ile analizi yapılacak modelin şematik görünümü

Eğilme yüklemesi altında 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

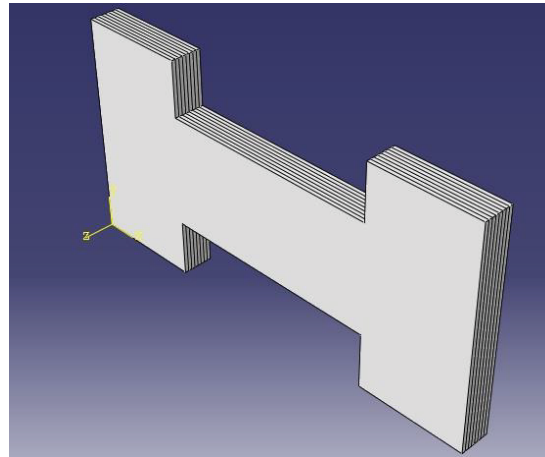
- Parçaların Birbirleriyle Etkileşiminin Sağlanması
- Modelin Çözüm Ağının Oluşturulması
- Analiz Adımlarının Birleştirilerek Bir İş Yaratılması ve Çözüme Verilmesi
- Elde Edilen Sonuçların Görüntülenmesi

#### 6.1.2.1.1 Parça oluşturma

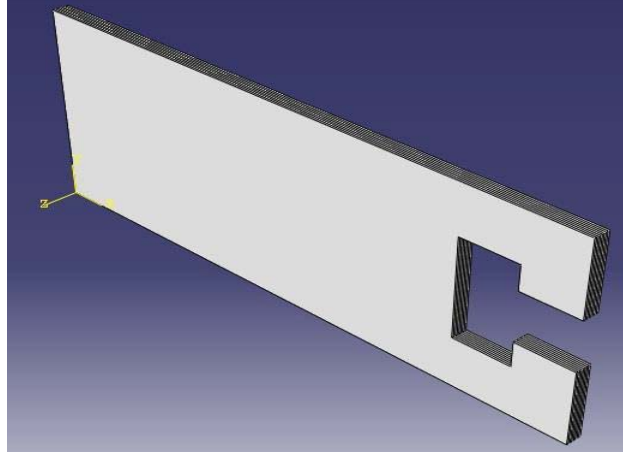
Bu ilk adımda; numune kesiti iki boyutta çizilip üçüncü boyuta girilen bir derinlik değeri kadar ötelenerek oluşturulması sağlanmıştır. Destekler iki boyutta çizilip üçüncü boyuta girilen bir derinlik değeri kadar ötelenerek modellenmiştir. Modelde bulunan toplam parça adedi beş olup, tasarlanacak olan 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.

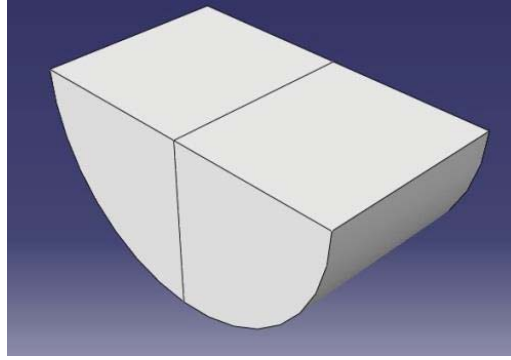
Tablo 6.1' den faydalanarak seçilen geometrik yapıların ekran görüntüleri Şekil 6.8-Şekil 6.9-Şekil 6.10'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 : Tasarımı yapılan bağlantı kilidinin üç boyutlu model görünümü



Şekil 6.9 : Tasarımı yapılan birleştirme numunesi üç boyutlu model görünümü



Şekil 6.10 : Tasarımı yapılan desteğin üç boyutlu model görünümü

#### 6.1.2.1.2 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 yazılımına Tablo 4 ve Tablo 5'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 Tablo 6.4’da verildiği gibi atanmıştır.

Tablo 6.2: Bağlantı kilidi ve numune için malzeme özellikleri

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

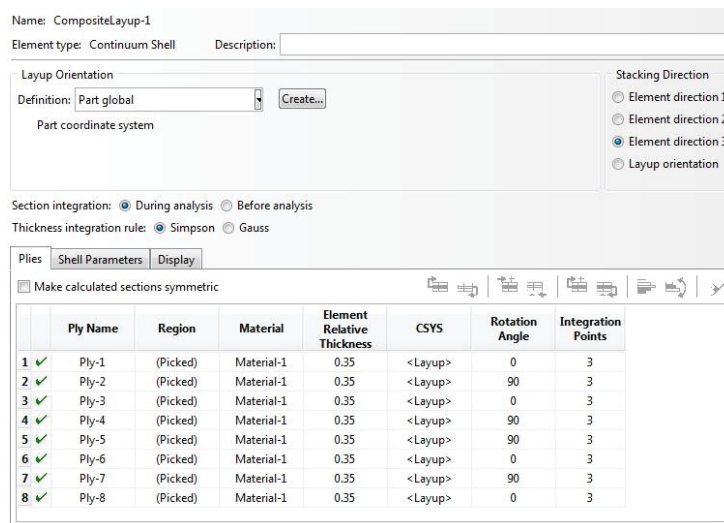
Tablo 6.3: Destekler için malzeme özellikleri

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

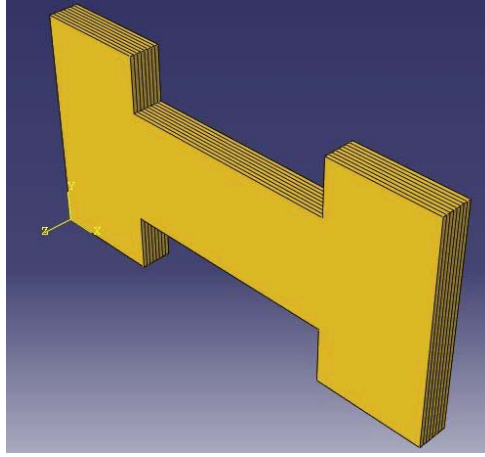
Kullanılan kompozit malzeme tabakalı bir yapıya sahip olduğu için Şekil 6.11’de gösterildiği gibi composite layup ekranından 8 tabaka tanımlanmış ve oryantasyon yönleri belirtilmiştir.



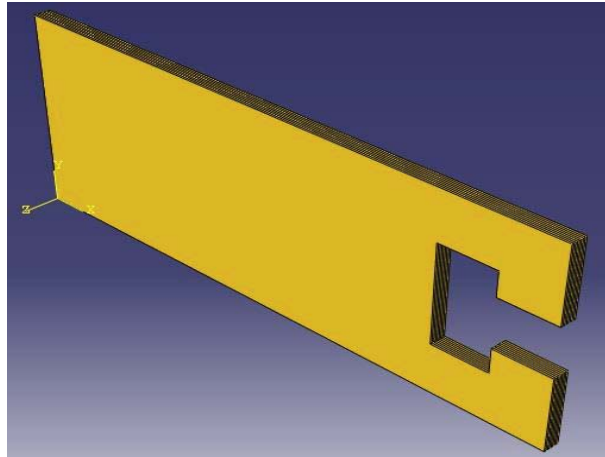
Şekil 6.11 : Oryantasyon yönleri ve malzeme özelliklerinin atandığı composite layup ekranı

### 6.1.2.1.3 Kesit özelliklerini tanımlama ve parça atama

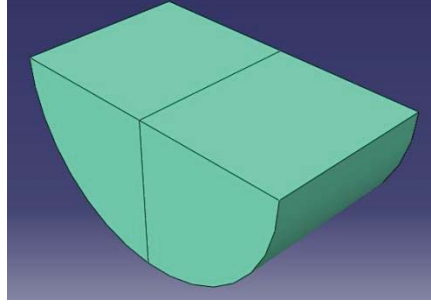
Bundan sonraki analiz adımında yukarıda tanımlanmış olan malzeme özelliklerinin kesit olarak parçaya ve desteğe atanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar programında tabakalı olarak modellenen bağlantı kilidi ve yarı numunenin rengi, çelik olarak modellenen destekten farklı olduğu şekillerde görülmektedir. Ataması yapılan özelliklerin model bileşenleri üzerindeki görünümü Şekil 6.12-Şekil 6.13-Şekil 6.14’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12 : Bağlantı Kilidi Üzerine Kesitin Atanması



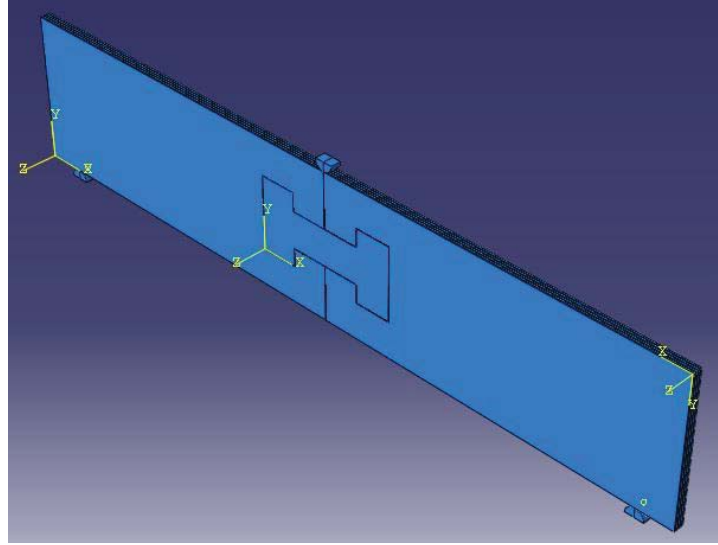
Şekil 6.13 : Birleştirme Numunesi Üzerine Kesitin Atanması



Şekil 6.14 : Destek Üzerine Kesitin Atanması

#### 6.1.2.1.4 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 6.15’de gösterilmiştir.



Şekil 6.15 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde birleştirilmesi

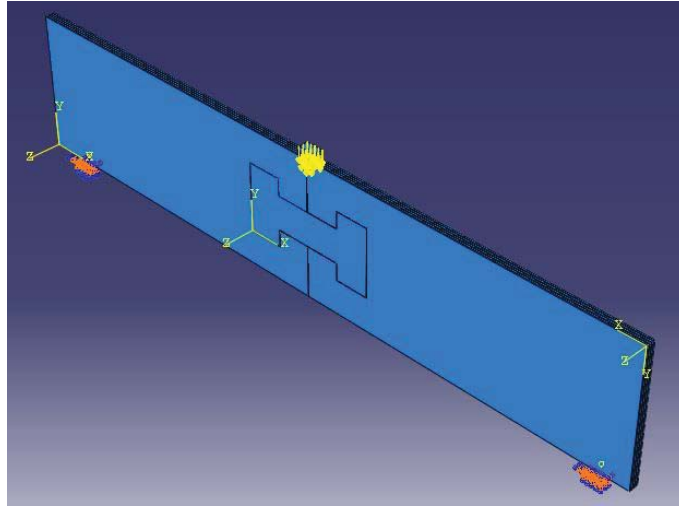


#### 6.1.2.1.5 Çözüm adımının tanımlanması

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.

#### 6.1.2.1.6 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 6.16'da gösterilmiştir.



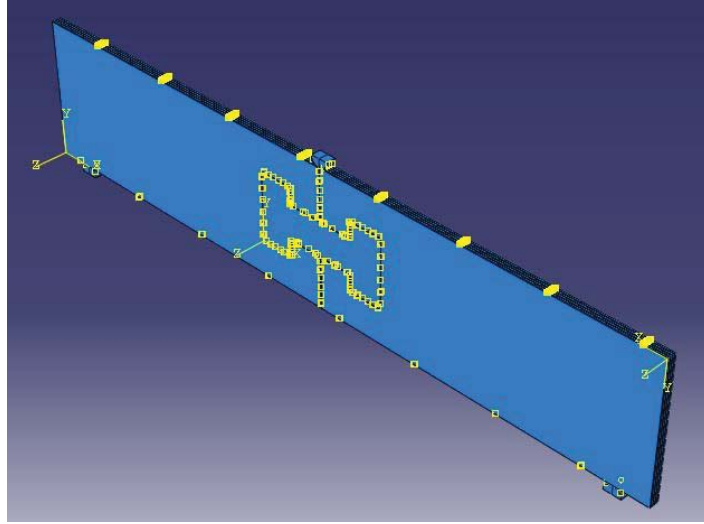
Şekil 6.16 : Modelin sabitlenmesi ve eğilme yükünün uygulanması

#### 6.1.2.1.7 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.

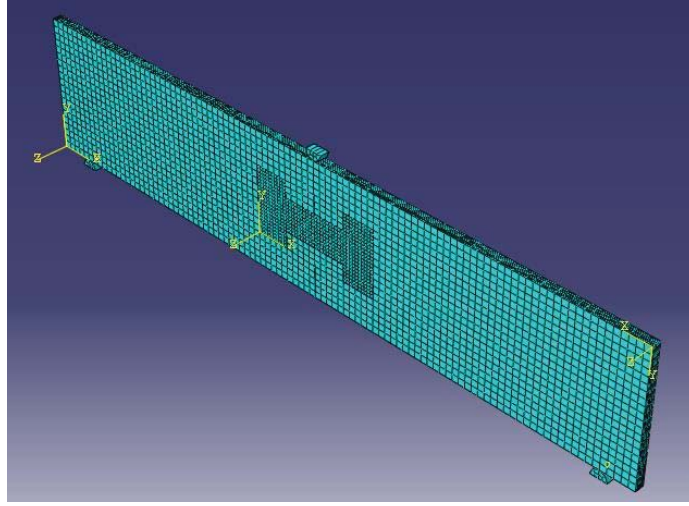
Temas tanımlamasının yapılabilmesi için Modül Interaction olarak ayarlanmıştır. Modelin içerisinde bulunan ve birbirleriyle temas edeceği bilinen yüzeylerin seçim işlemi gerçekleştirilerek tanımlanmasının yapıldığı Şekil 6.17 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17 : Model bileşenlerinin arasında temas tanımlaması gerçekleştirilmesi

#### **6.1.2.1.8 Modelin çözüm ağının oluşturulması**

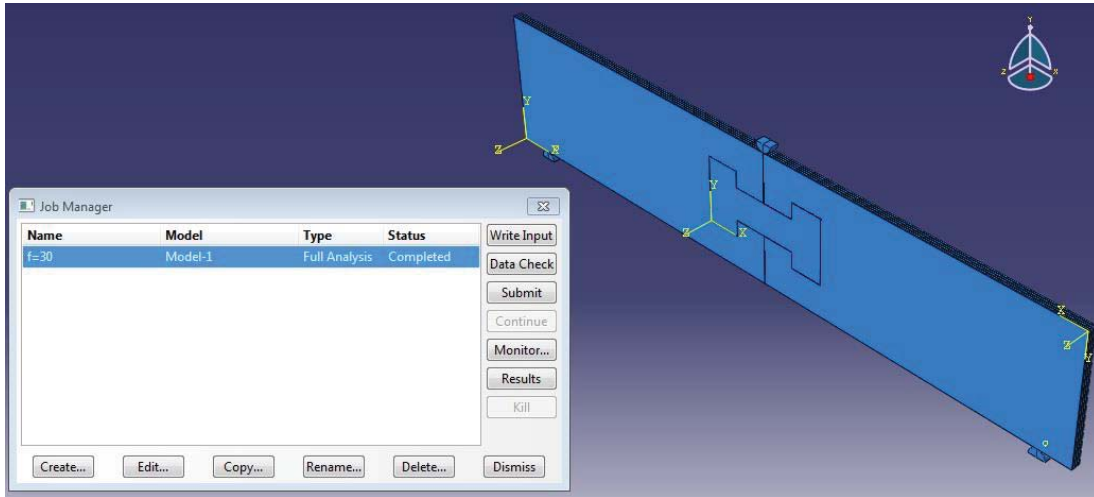
Modelin analizi için bu bölümde çözüm ağı oluşturulacaktır. Kilit bağlantı elemanlarının geometrileri değiştirildiğinden dolayı kilit üzerindeki gerilmelerin bilinmesi ve oluşabilecek hasar yerlerinin belirlenebilmesi, yapının güvenilirliği için önem arz etmektedir. Bundan dolayı kilit bağlantı elemanlarına, 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 yarım 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 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.18 : Modelin uygun çözüm ağı oluşturulması

#### 6.1.2.1.9 Analiz adımlarının birleştirilerek bir iş oluşturulması ve çözüme verilmesi

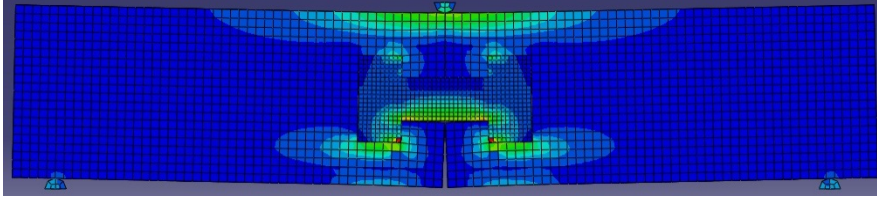
Analizi yapılacak modele ait oluşturulan adımlar ile sonlu elemanlar modeli kurulmuştur. Bu bölümde ise model çözüme hazırlanmış ve verilmiştir. Modül Job komutuna ayarlanmıştır. Çözüm Submit komutuyla başlatılmıştır. Şekil 6.19'da sorunsuz bir çözümün yapıldığı gösterilmiştir.



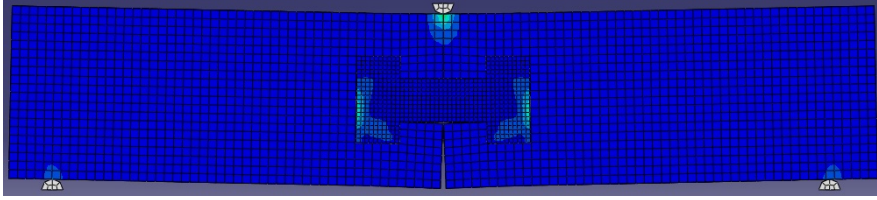
Şekil 6.19 : Modelin çözüme verilmesi

#### 6.1.2.1.10 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 6.20 ve Şekil 6.21’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



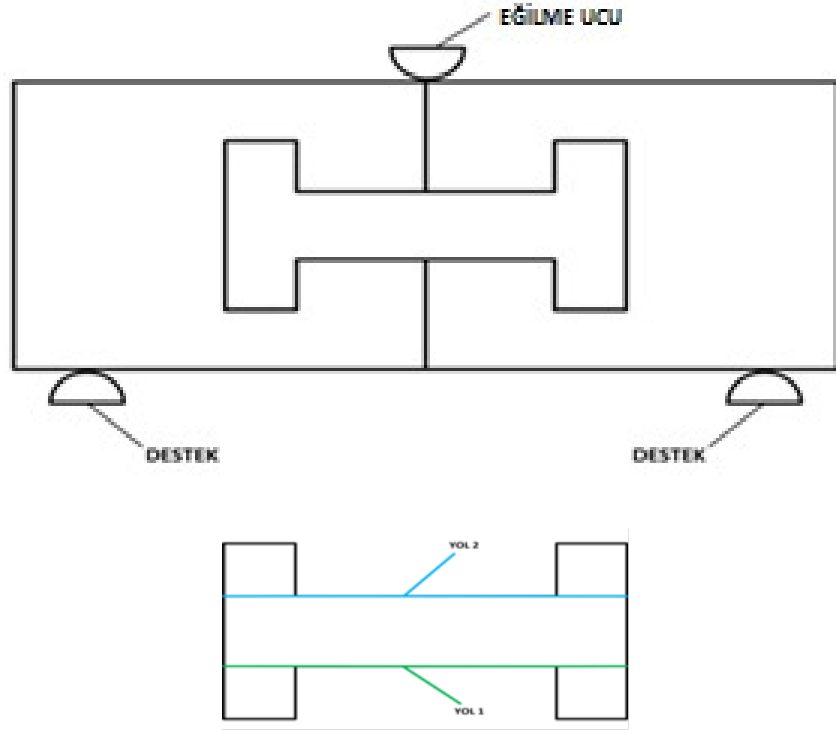
Şekil 6.20 : Modelin gerilme dağılımı



Şekil 6.21 : Modelin Hashin hasar teorisine göre matris bası hasar gerilme dağılımı

#### 6.1.2.2 Üç nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının gerilme dağılımları

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 6.22’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.

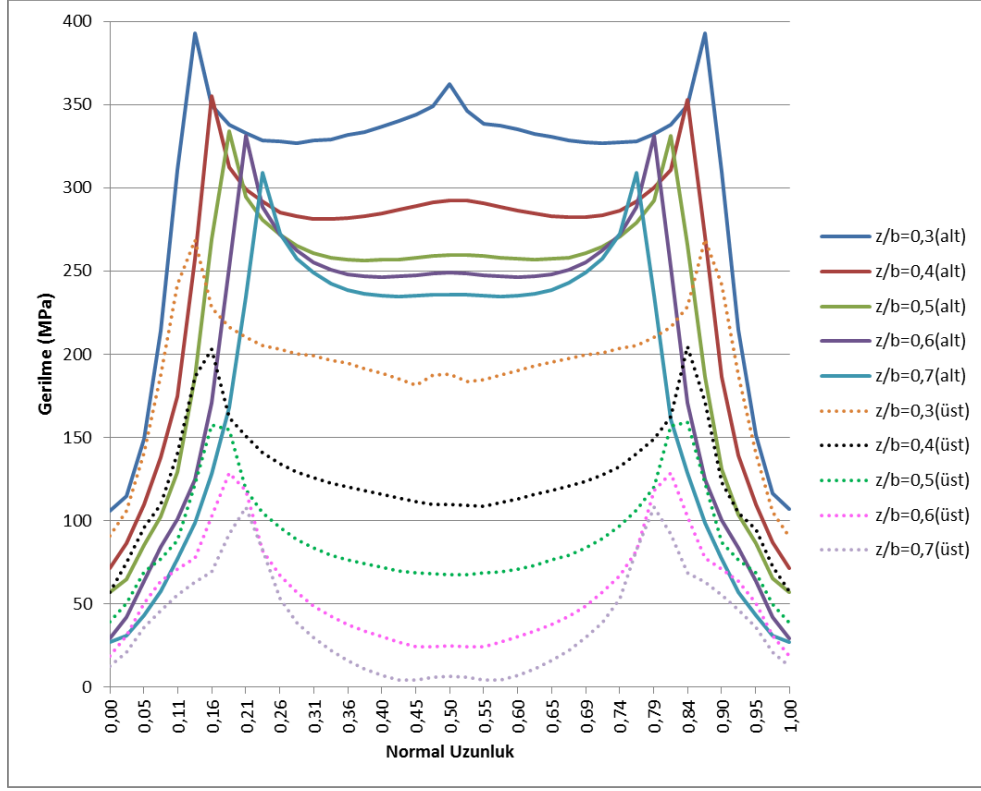


Şekil 6.22 : Gerilme dağılımlarının incelendiği Yol 1 ve Yol 2

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 altına 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 6.23'de gösterilmiştir. Genel olarak elde edilen gerilme dağılımları incelendiğinde maksimum gerilmelerin beklenildiği gibi bağlantı kilitinin orta gövdesi ile uç kollarının köşelerinde meydana gelmektedir. Şekil 6.23'de gösterilen her gerilme dağılım grafiklerinde elde edilen iki maksimum gerilme değerleri arasındaki gerilme

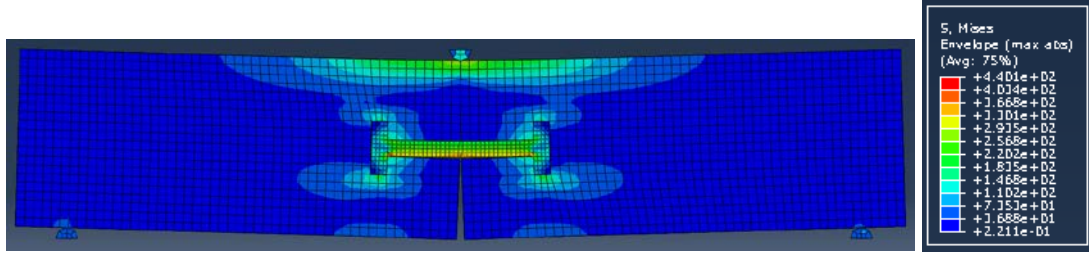
dağılımları bağlantı kilitinin orta gövdesindeki gerilme dağılımını göstermektedir. Bağlantı kilitinin özellikle orta gövdesindeki gerilme dağılımının yaklaşık sabit ve belli bir değerde olmasıyla birleştirme elemanının yük taşıma performansını olumlu yönde etkileyerek hasar oluşumunun da diğerlerine 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 bekleneceğinden 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.



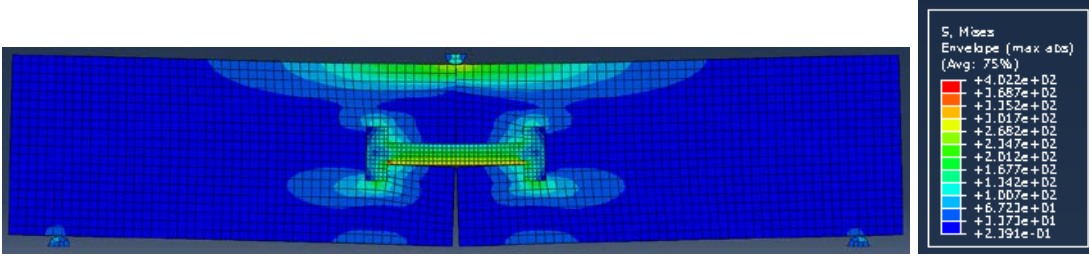
Şekil 6.23 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.24'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 6.24 (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 olduğu Şekil 6.24 (d)'de gösterilmiştir. Hasara bu bölgelerden uğrayacağı düşünülmektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin maksimum gerilmesi diğer birleştirme oranlarına göre daha düşük olduğu belirlenmiş ve Şekil 6.24 (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.

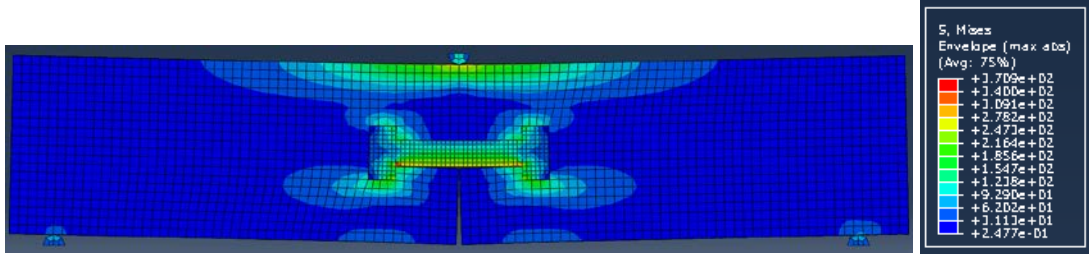




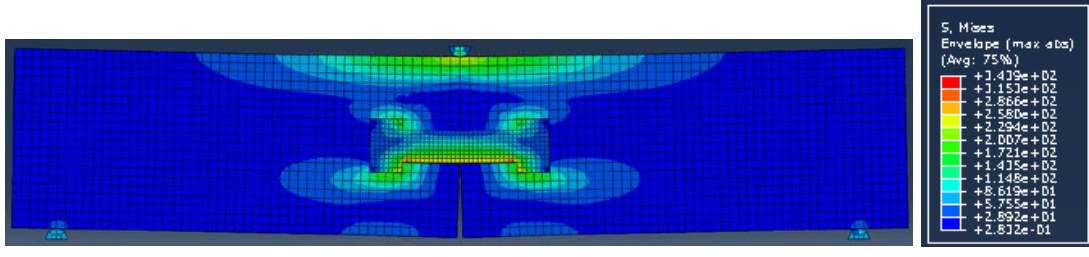
(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,3$



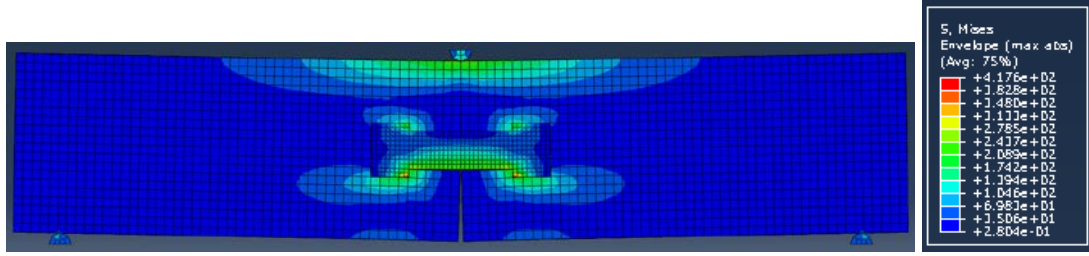
(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,4$



(c)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,5$



(d)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,6$

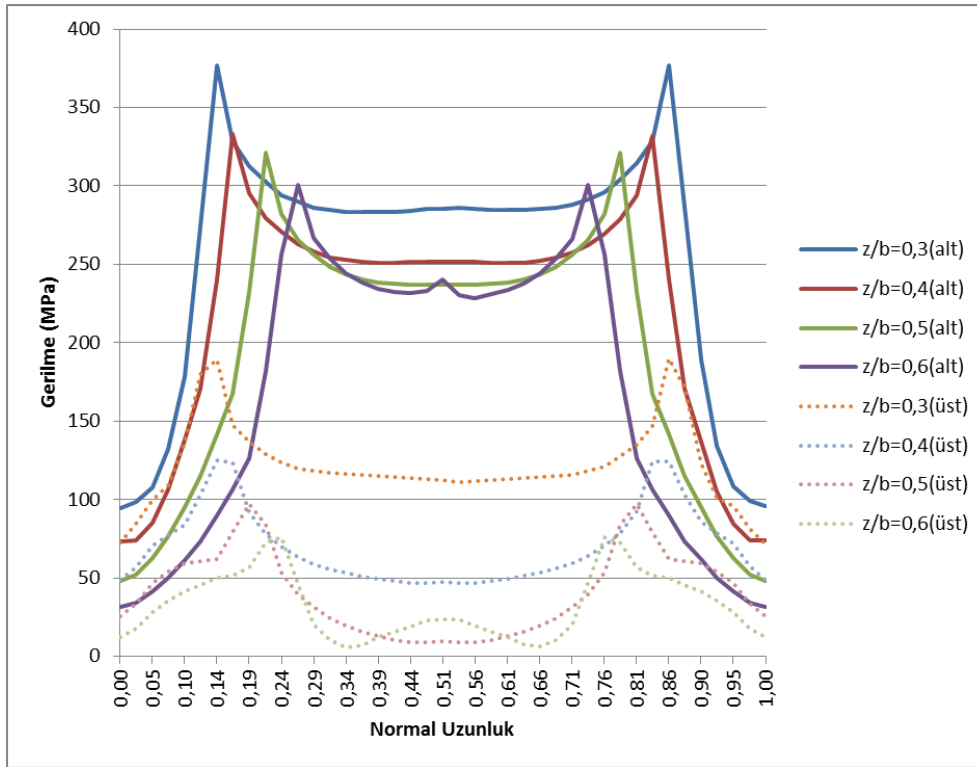


(e)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,7$

Şekil 6.24 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı

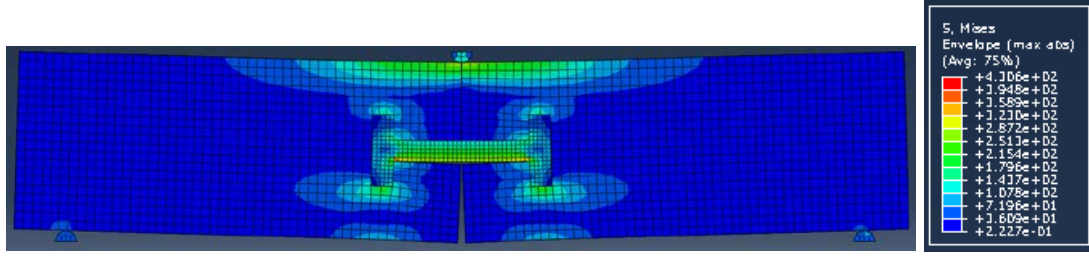


$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.25’de gösterilmiştir. Gerilme değerleri açısından karşılaştırdığımızda  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2’ de oluşan gerilme değerlerinin diğer oranlardaki 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 göstermekte olup 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 düşünölmektedir. Sonuç olarak  $z/b= 0,6$  oranındaki birleştirme yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olacağı ve hasara daha geç uğrayacağı belirlenmiştir.

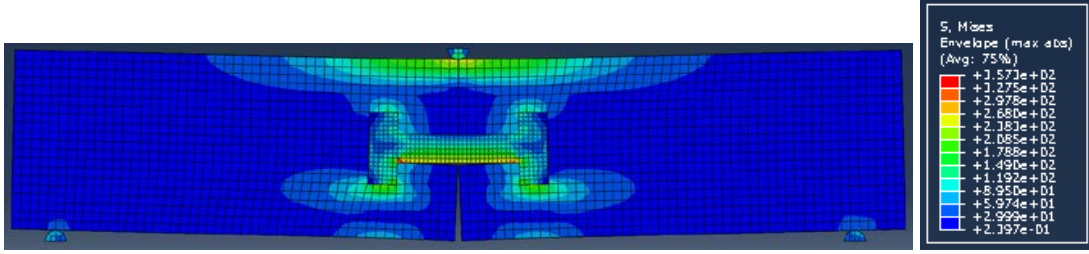


Şekil 6.25 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

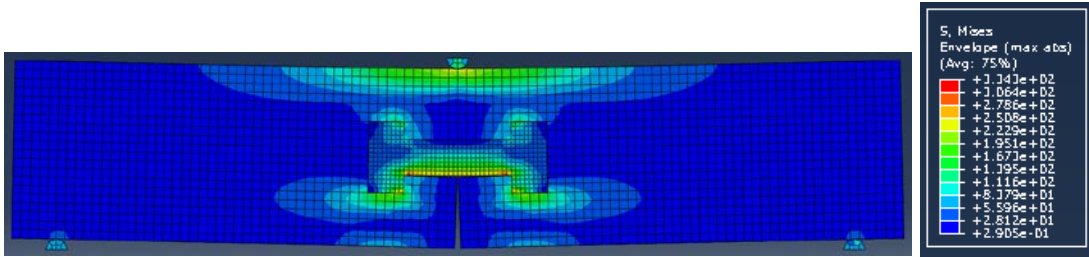
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanın tamamı ve sistem bütünüyle incelendiğinde maksimum gerilmenin  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede olduğu görülmektedir. Bu orandaki birleştirmede maksimum gerilmenin kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında gerçekleştiği Şekil 6.26 (a)'da görülmektedir ve bu bölgeden hasara uğrayacağı düşünölmektedir. 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 oluştuğu Şekil 6.26 (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 düşünölmektedir.



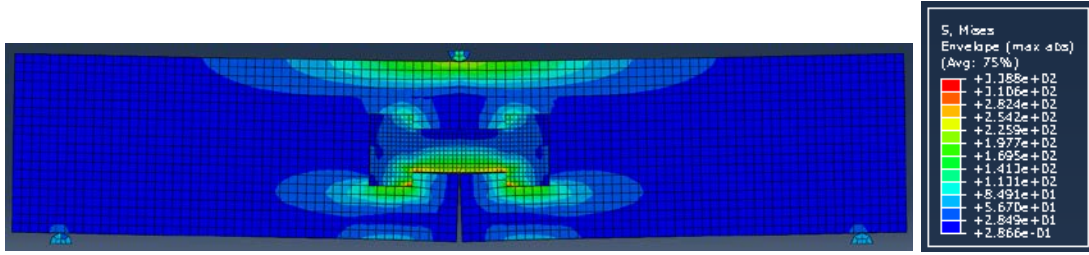
(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,3$



(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,4$



(c)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,5$

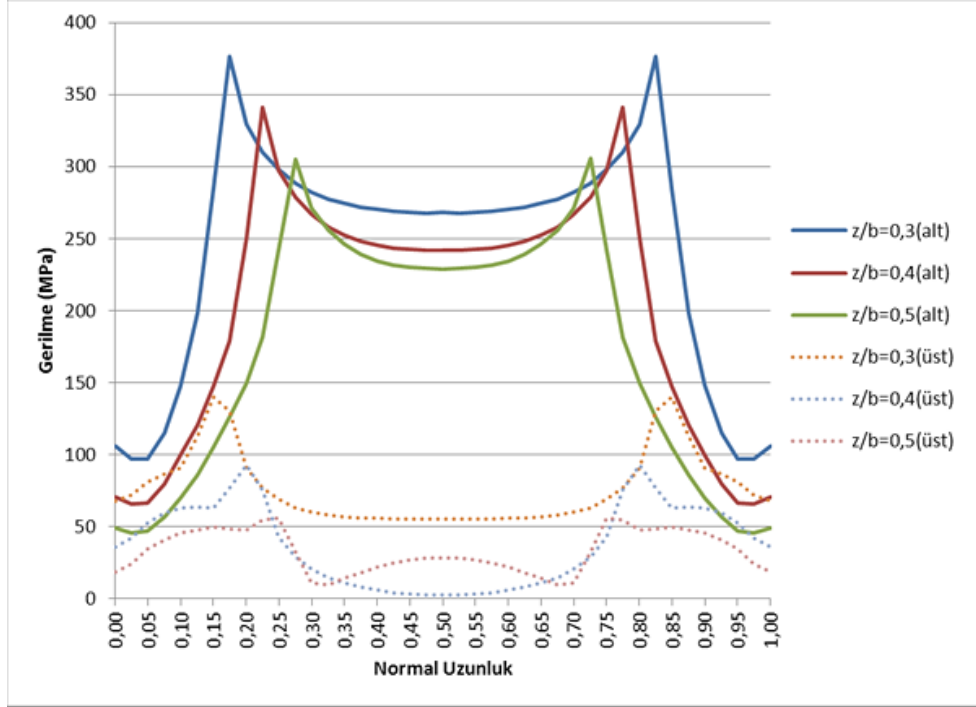


(d)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,6$

Şekil 6.26 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.27’de gösterilmiştir.  $z/b=0,3$  ve  $z/b=0,4$  oranlarındaki birleştirmelerin Yol 1 ve Yol 2 gerilme değerleri çok yüksek olduğu Şekil 6.27’den görülmektedir.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2’ nin gerilme dağılımı  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmeye benzerlik göstermektedir ama gerilme değerleri

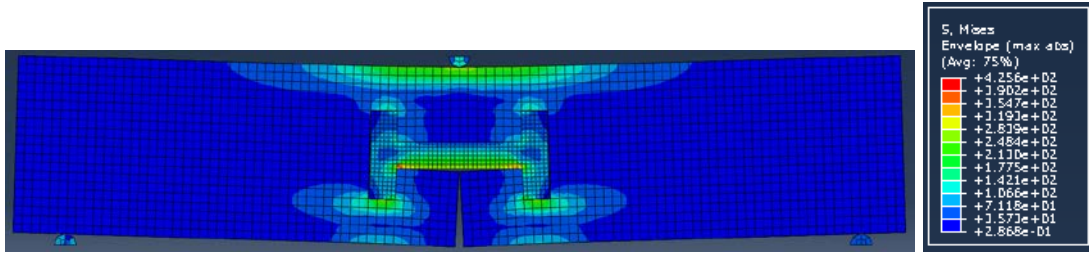
daha düşük elde edilmiştir.  $z/b=0,5$  oranında yapılan birleştirmelerde oluşan gerilme değerleri diğer  $z/b$  oran değerlerinde elde edilenlere göre en düşük olarak elde edilmiştir. Düşük gerilme değerleri elde edilen geometrilere daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde edileceği beklenmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirme diğer modellere göre daha büyük hasar yüküne sahip olacağı tespit edilmiştir.



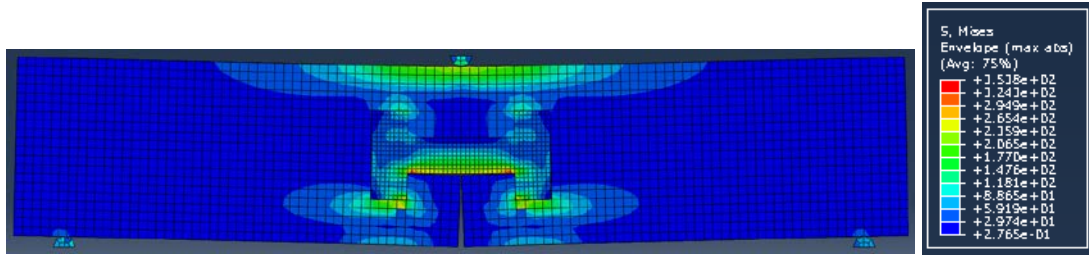
Şekil 6.27 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.28'de gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanının 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 6.28 (a)'da görülmektedir ve bu bölgeden hasara uğrayacağı düşünülmektedir. Şekil 6.28 (b)'de gösterildiği 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

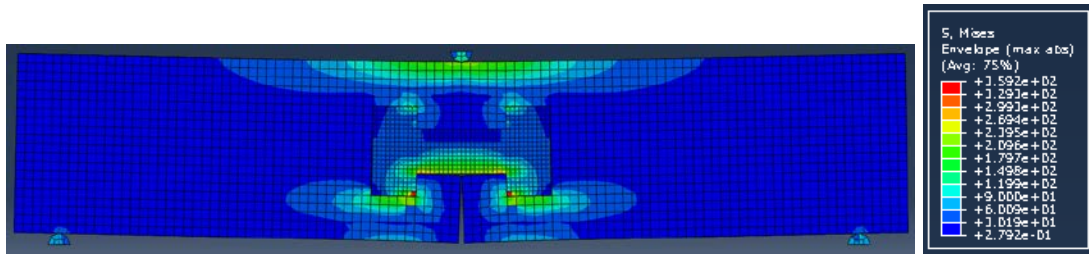
uğrayacağından ve dolayısıyla yük taşıma kabiliyeti daha fazla olacağından bu orandaki birleştirme belirlenmiştir.



(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,5$ ,  $z/b=0,3$



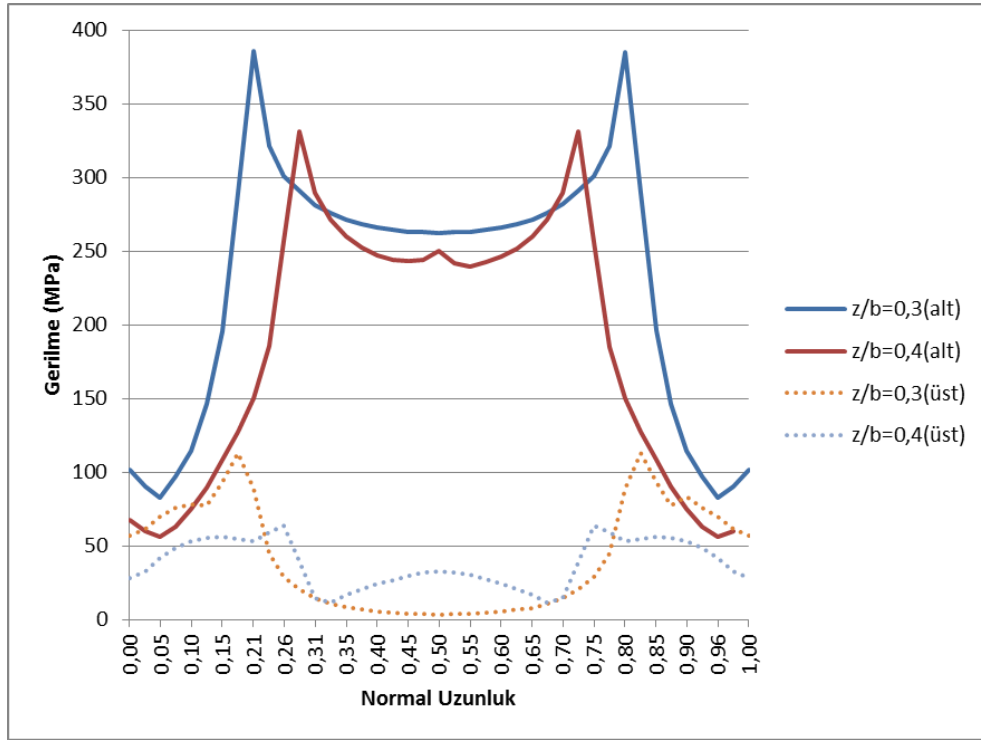
(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,5$ ,  $z/b=0,4$



(c)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,5$ ,  $z/b=0,5$

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

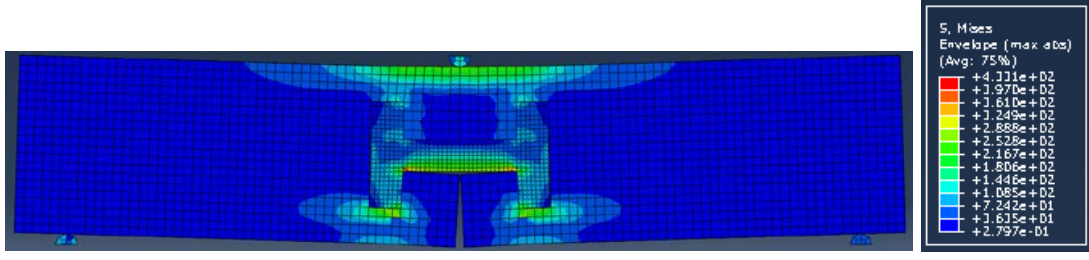
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.29'da gösterilmiştir.  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirme ile  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmenin Yol 1 ve Yol 2 boyunca gerilme değerleri birbirlerine oldukça benzer olduğu Şekil 6.29'da 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.



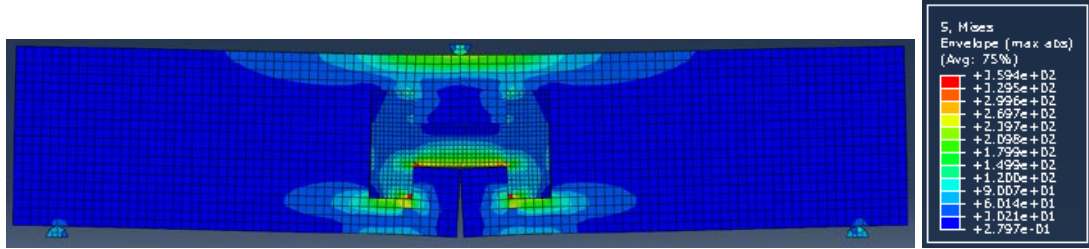
Şekil 6.29 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.30'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.





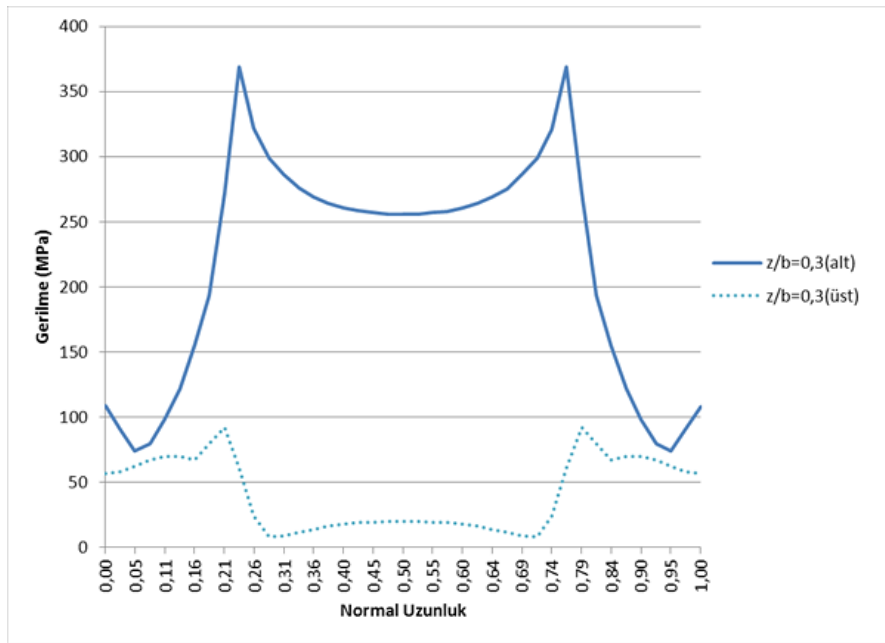
(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,6$ ,  $z/b=0,3$



(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,6$ ,  $z/b=0,4$

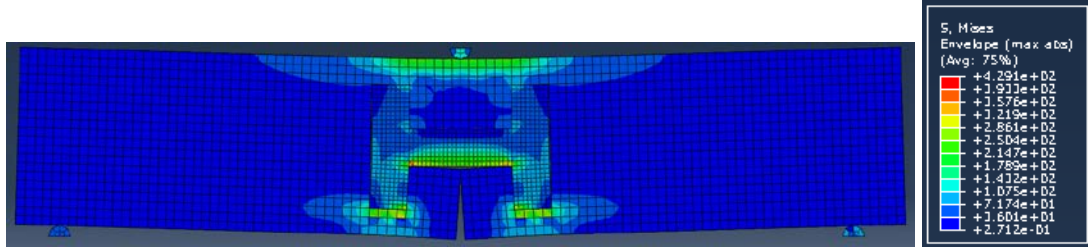
Şekil 6.30 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.31'de gösterilmiştir. Şekil 6.31'de görüldüğü gibi Yol 2 boyunca oluşan gerilme dağılımı hem uç bölgelerde hem de orta bölgelerde sabit bir gerilme civarındadır.



Şekil 6.31 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.32’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum gerilme değerleri kilit bağlantı elemanının baş kısmıyla gövde kısmının birleşim yerinde meydana geldiği görülmektedir.



$h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,7$ ,  $z/b=0,3$

Şekil 6.32 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranının gerilme dağılımları

Sonuç olarak;

Maksimum gerilmelerin kilit bağlantı elemanının orta ve iç köşe bölgelerinde meydana geldiği görülmektedir. Kilit bağlantı elemanının farklı  $h/2W$  oranında gerilme sonuçları bulunmuştur. Her bir 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. En yüksek yük taşıma kapasitesi ve hasara en geç uğraması beklenen I bağlantı elemanı  $h/2w=0,5$ - $b/w=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki geometri olarak tespit edilmiştir. Matris bası hasarının dışındaki fiber bası ve matris çeki hasarlarının maksimum gerilmeleri kilit bağlantı elemanında ve yarı numunelerde meydana geldiği belirlenmiştir. Deneylerden ve Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar incelendiğinde kilit bağlantı elemanı ve yarı numuneler üzerindeki hasarların oluşturuğu bölgeler birbirleriyle oldukça yakındır. Böylelikle deneysel çalışmalar ile nümerikler çalışmalarının birbirlerini desteklediği belirlenmiştir.

### 6.1.3 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 bütünlüğünün 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 getirmezse 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 yüklenme sınırlarını tespit edebilmektir.

Yaygın olarak kullanılan teoriler alt başlıklar halinde incelenmiştir.

#### 6.1.3.1 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;

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_1}{X_t} &< 1 \\ \frac{\sigma_2}{Y_t} &< 1\end{aligned}\quad (6.1)$$

Bası gerilmeleri için;

$$\begin{aligned}\left|\frac{\sigma_1}{X_b}\right| &< 1 \\ \left|\frac{\sigma_2}{Y_b}\right| &< 1\end{aligned}\quad (6.2)$$

Kayma gerilmesi için;

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

### 6.1.3.2 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;

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{x,\varphi}} &> 1 \\ \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{y,\varphi}} &> 1 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Bası şekil değiştirmesi;

$$\begin{aligned} \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{x,b}} \right| &> 1 \\ \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{y,b}} \right| &> 1 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Kayma şekil değiştirmesi;

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

### 6.1.3.3 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.

#### 6.1.3.4 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.

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

#### 6.1.3.5 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 proje çalışmasında Hashin hasar teorisi ile ilk hasarın nerede meydana geldiği ve hasara uğratan bu kuvvetin bulunması amaçlanmıştır.

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.

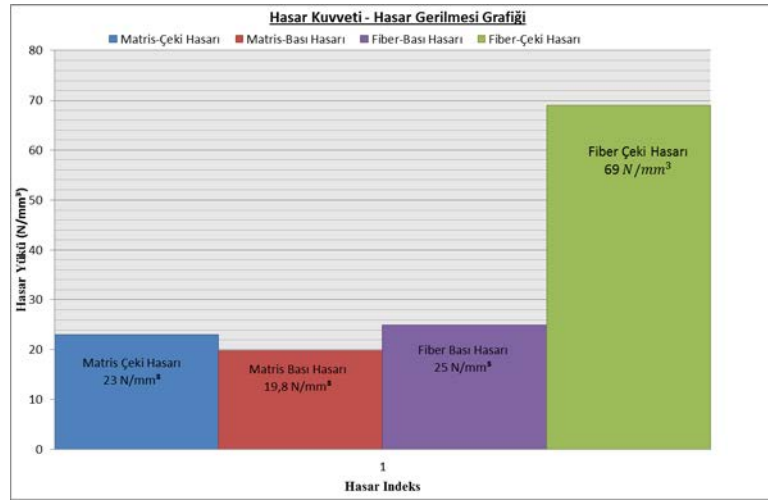
$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (6.11)$$

- 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.

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

### 6.1.3.6 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 6.33’ de gösterilmiştir. Hashin Hasar Kriterine göre hasar indeksinin bir (1) değerine ulaşmasıyla kompozit malzemede ilk hasar oluşumları meydana gelmektedir. Hasar yükleri sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen hasar indeksi değerinin 1 değerine yaklaştırılması ile bulunmuştur. Şekilde elde edilen hasar indeksleri ve buna bağlı olarak hasar yükleri, kompozit yapının ilk hasara uğrayan tabakalarına ait hasar yükü değerleridir.



Şekil 6.33 :  $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranına göre oluşturulan birleştirmeye ait ilk hasar kuvvetleri

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. Tabloda, matris ve fiber hasarlarının yapı içinde yeni oluşması durumunda yani 1 olması durumunda diğer hasar şekillerinin de hasar oluşumlarını tahmin edebilmek için hasar indeksleri 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  $632,5 \text{ N}$ , ilk fiber bası hasarı  $687,5 \text{ N}$  ve ilk fiber çeki hasarı  $1897,5 \text{ N}$  olarak belirlenmiştir.

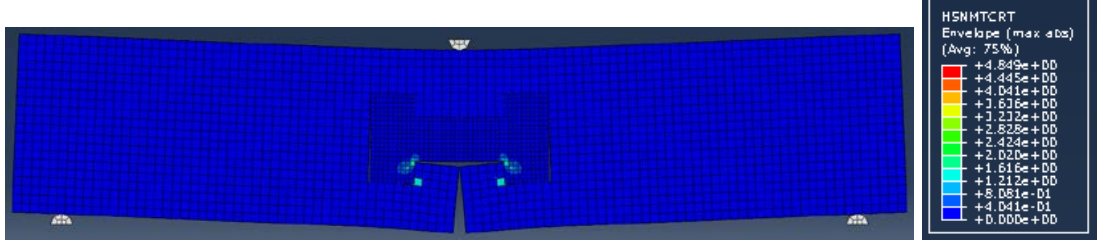
Tablo 6.5: Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri

İlk Hasar Oluşum Yükleri ( $\text{N/mm}^3$ )	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

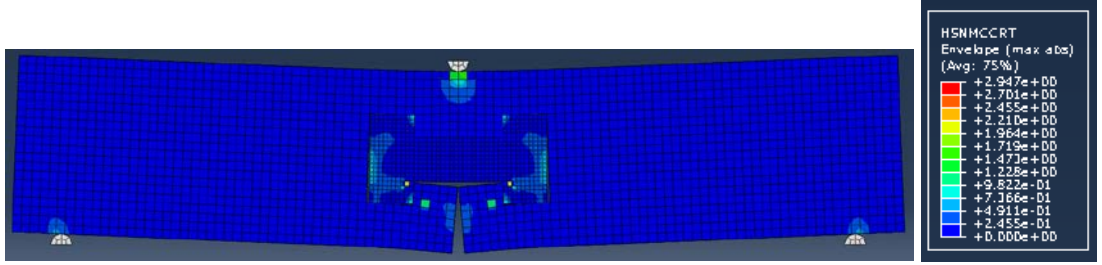
Bağlantı kilitinin maksimum deney hasar yükünde oluşan hasar indeksleri Tablo 6.6'da gösterilmiştir.  $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki bağlantı kilitine ait Hashin hasar analizi hem matris hem de fiber bileşenlerinin çeki ve bası durumları için gerilme dağılımları ve değerleri Şekil 6.34'de verilmiştir.  $1375 \text{ N}$  yüklemde matris çeki hasarı bağlantı kilitinin üzerinde iç köşe kısımlarında meydana geldiği Şekil 6.34 (a)'da görülmektedir. Matris bası hasarı ise bağlantı kilitinin iç köşelerinde, kollarında ve eğme pim ucunun kuvveti uyguladığı yarı numunelerde oluştuğu Şekil 6.34 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 6.34 (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 6.34'den de anlaşılacağı gibi matris bası hasarı oluştuktan sonra fiber bası hasarı oluştuğu görülmektedir.

Tablo 6.6 Bağlantı kilitinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri

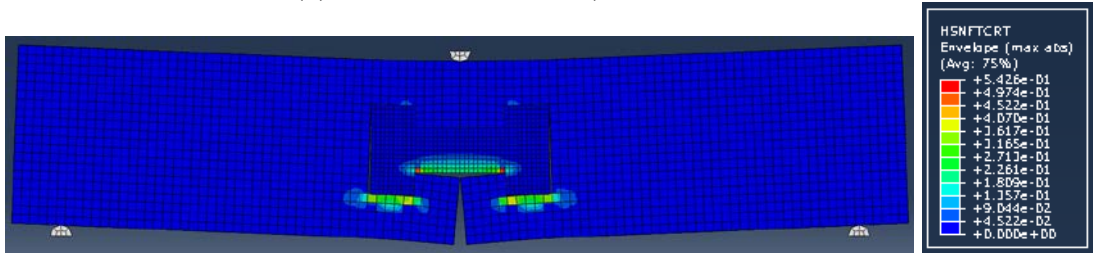
Deney yükü (N/mm <sup>3</sup> )		Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
50	Maksimum hasar indeksi değeri	2,947	4,849	3,347	0,542
	İlk hasarın meydana geldiği dış yüzeydeki hasar indeksi değeri	1	0	0,3	0



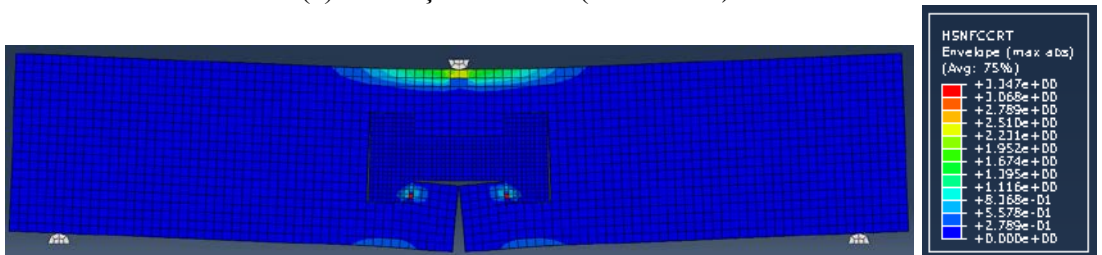
(a) Matris Çeki Hasarı (50 N/mm<sup>3</sup>)



(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>)

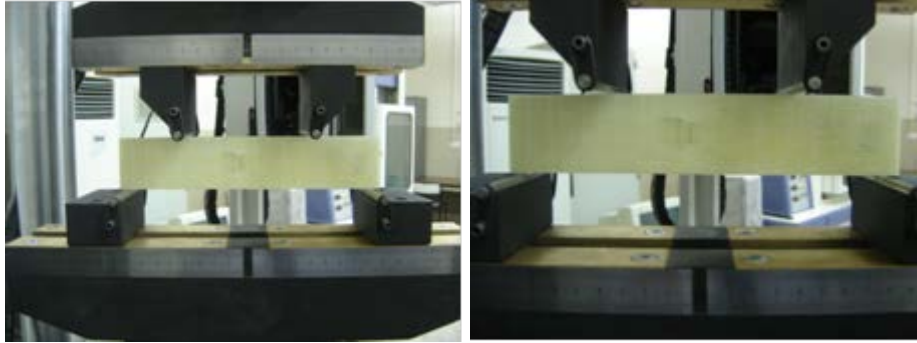
Şekil 6.34 :  $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeye ait 50 N/mm<sup>3</sup> kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak hasar analizleri

## 6.2 Dört Nokta Eğilme Yükü Altında Birleştirme Elemanının Optimizasyonu

Birleştirme elemanın optimizasyonu dört nokta eğilme yüklemesi altında hem deneysel olarak hem de nümerik olarak yapılmıştır.

### 6.2.1 Dört nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının deneysel optimizasyonu

Dört nokta eğilme deneyleri, Şekil 6.35’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.



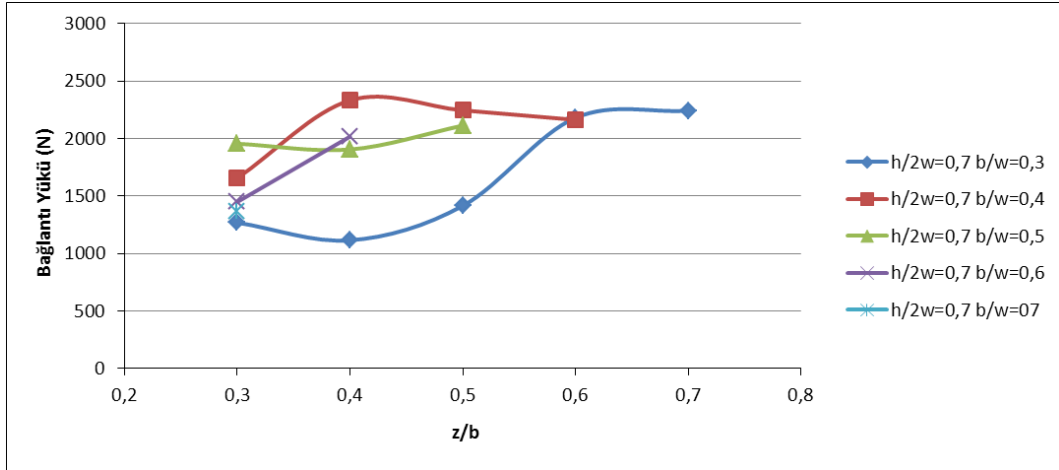
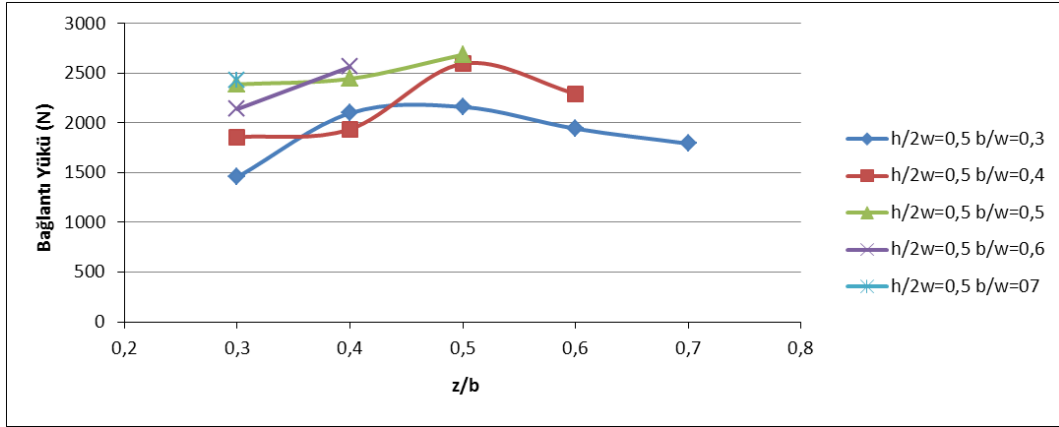
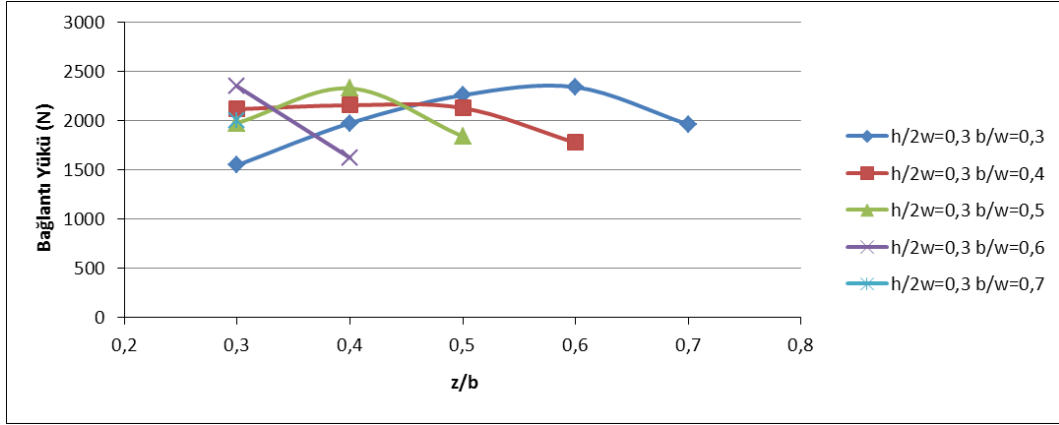
Şekil 6.35 : Eğilme düzeni

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  $(h/2W)$  ve  $(b/W)$  oranlarındaki kilit bağlantı elemanlarıyla yapılmış numunelerin,  $(z/b)$  oranlarına göre yük taşıma kapasitelerindeki Şekil 6.36’da gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi yük taşıma kapasitesi  $(z/b)$ ,  $(b/W)$  ve  $(h/2W)$  oranlarına bağlıdır.  $(h/2W)$  oranının 0,5 olması durumunda kilitli numunelerin yük taşıma kapasiteleri diğer boylarına göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Şekilden de  $(h/2W)$  oranının 0,5 değerinde ve



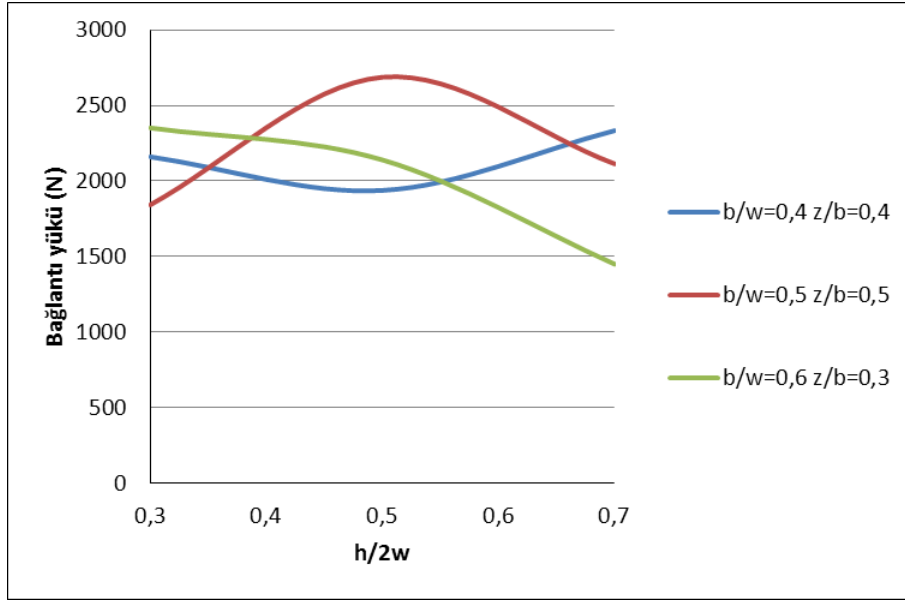
özellikle  $(z/b)$  oranının 0,5 değerinde elde edilen bağlantı yük değerlerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Bağlantı yükü,  $(h/2W)$  oranının 0,3 değerinde ise geometriye bağlı olarak kesit azalmaları mevcut olduğu için değişik  $(z/b)$  değerlerinde daha düşük olarak tespit edilmiştir.  $(b/W)$  oranı açısından bağlantı yükleri incelendiğinde ise  $(h/2W)$  oranının 0,3 ve 0,5 değerlerinde genel olarak 0,5 ve 0,6 değerlerinde maksimum olarak elde edilmiştir.  $(h/2W)$  oranının 0,7 değerinde olması durumunda ise bağlantı yükü  $(b/W)$  oranının 0,4 değerlerinde maksimum olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeni olarak, bağlantı elemanı boyunun uzamasıyla oluşan sehim miktarının artması sonucunda oluşan bağlantı üzerinden yük aktarma kaybı olarak belirlenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre  $(h/2W)$  oranının 0,3 değeri için  $(b/W)$  oranının 0,6 ve  $(z/b)$  oranının 0,3 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 0,4 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  $(b/w)$  ve  $(h/2W)$  oranlarının artmasıyla değişmesi, kilit genişliğinin ve boyunun da önemini göstermektedir.



Şekil 6.36 : Bağlantı yüksekliğinin değişik h/2w oranı için bağlantı yüklerinin z/b oranlarındaki değişimi

Şekil 6.36’da elde edilen maksimum bağlantı yüklerin elde edildiği geometrik parametrelerin kilit boyutlarındaki etkileri incelenmiştir. Değişik kilit boyları için kilitli birleştirmelerin maksimum hasar yüklerindeki değişimleri ve hasar şekilleri Şekil 6.37’de gösterilmiştir.

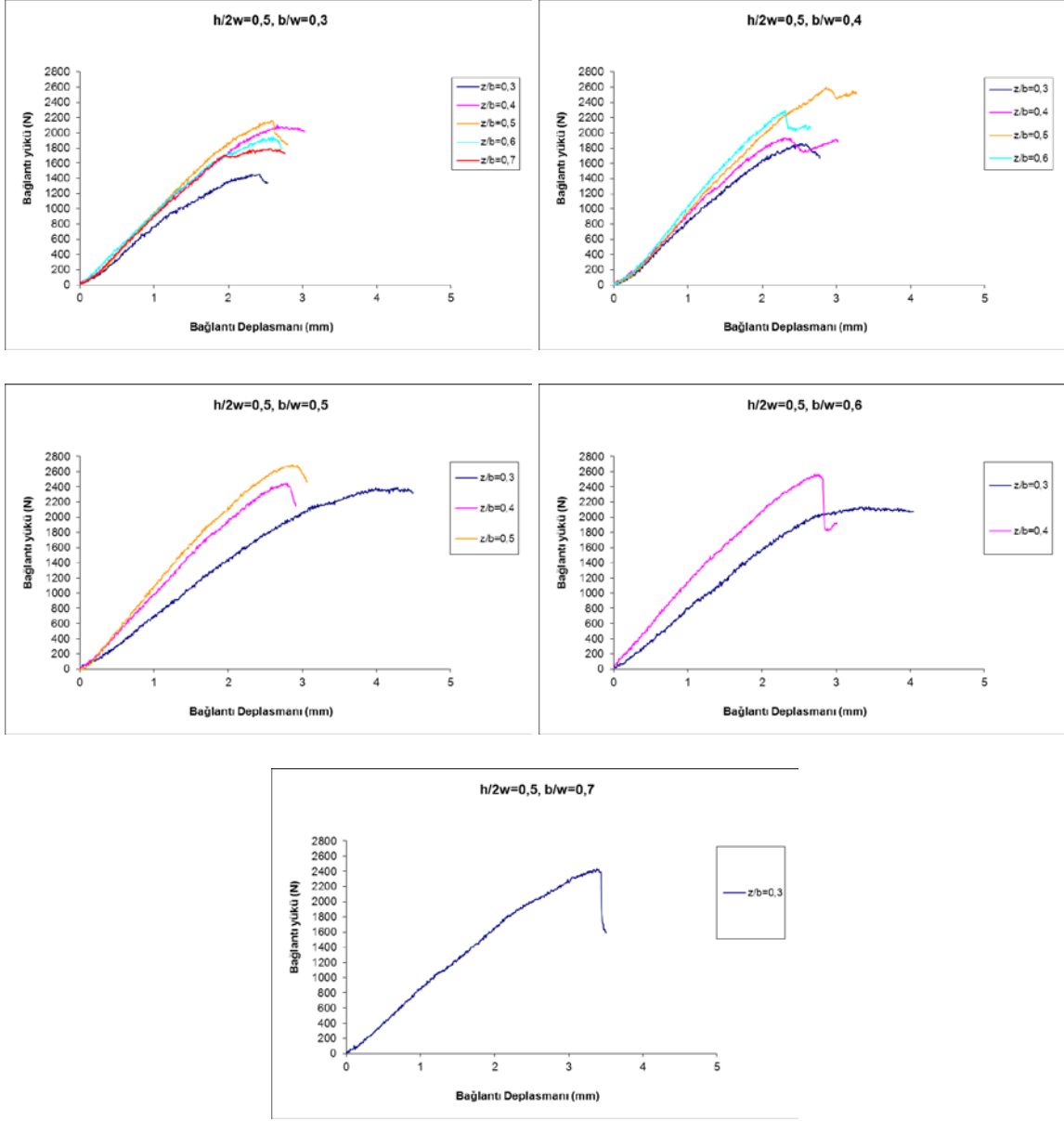
Şekilden de görüldüğü gibi (b/W) oranının 0,5 ve (z/b) oranının 0,5 değerlerinde kilit boyu (h/2W) oranının 0,5 değeri için bağlantı yük kapasitesinin maksimum olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada dört nokta eğilme için kilit boyu (h/2W) oranının 0,5 değerindeki numuneler ayrıca ele alınmış ve incelenmiştir. Ayrıca diğer kilit boyları için de aynı incelemeler yapılmıştır. Ayrıca şekilde (b/W) oranının 0,5 ve (z/b) oranının 0,5 değerlerinde kilit boyu (h/2W) oranının değişimiyle meydana gelen hasar şekilleri verilmiştir.



Şekil 6.37 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik h/2w oranlarındaki yük değişimleri

Kompozit plakalardan yapılan kilit bağlantı elemanları ile oluşturulan birleştirilmiş numunelerin kilit boyu (h/2W) oranının 0,5 değeri için yük taşıma kapasitelerindeki değişimleri Şekil 6.38'de gösterilmiştir. Kilit genişliğinin numune genişliğine oranı (b/W) arttıkça bağlantı kilidinin maksimum yük kapasitelerinde meydana gelen bağlantı deplasmanının giderek arttığı şekilden de görüldüğü gibi 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 ta (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. Dört nokta eğilme yüklemelerinde elde edilen bağlantı deplasmanları numunelerin bu yükleme altında çökme miktarlarını göstermektedir. (b/W) oranının 0,4'e kadar artan değerlerinde ve değişik (z/b) değerlerinde maksimum çökme miktarları ortalama 2,3 mm olarak tespit edilmiştir. Ancak (b/W) oranının diğer artan değerlerine paralel olarak çökme miktarlarının da arttığı ve maksimum çökme miktarları ortalama 3,2 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.38 : Bağlantı yüksekliğinin  $h/2w=0,5$  oranı için bağlantı elemanlarının taşıyabileceği yüklere göre deplasman değişimi

Kilit boyu ( $h/2W$ ) oranının 0,5 değerinde değişik ( $b/W$ ) ve ( $z/b$ ) geometrik oranları değerlerinde yapılan kompozit kilitli birleştirmelere ait deneylerden sonra elde edilen hasar şekilleri Şekil 6.39'da gösterilmiştir. Dört nokta eğilme yükü durumundan dolayı kilidin üst kısmı bası alt kısmı ise çeki yüklemelerine maruz kalmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi ( $z/b$ ) oranının küçük değerlerinde özellikle kilidin 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.



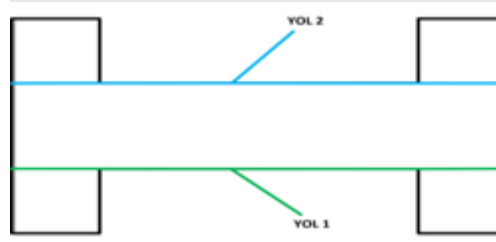
Şekil 6.39 : Bağlantı yüksekliğinin  $h/2w=0,5$  oranı için bağlantı elemanlarının hasar şekilleri

## 6.2.2 Dört nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının nümerik optimizasyonu

Nümerik optimizasyon, sonlu elemanlar metodu ile yapılan çözümlere sonuçlarını kullanarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan nümerik çözümlerde Abaqus 6.11 programı kullanılmıştır. Yapılan nümerik çözümlerde takip edilen sonlu elemanlar modelleme adımları yükleme adımı hariç üç nokta eğilme modellemesiyle aynıdır.

### 6.2.2.1 Dört nokta eğilme yükü altında birleştirme elemanının gerilme dağılımları

Kilit elemanı ile birleştirilmiş numuneler üç boyutlu olarak modellenmiştir. Kilit bağlantı elemanlarının geometrileri değiştirildiğinden dolayı Kilit üzerindeki gerilmelerin bilinmesi ve oluşabilecek hasar bölgelerinin belirlenebilmesi, yapının güvenilirliği için önem arz etmektedir. Bundan dolayı kilit bağlantı elemanlarına, yarım numunelerden daha sıkı bir çözüm ağı yapılmıştır. Çeşitli geometrilerdeki birleştirmelerde oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için Şekil 6.40'da da gösterildiği gibi kilit üzerinden (Yol 1 ve Yol 2) gerilmeler ele alınmıştır. Yapılan analizlerde yük değeri birbirleriyle karşılaştırabilmek amacıyla 30 N olarak seçilmiştir. Aynı yük altında yapılan gerilme analizlerinden elde edilen gerilme değerleri değişik z/b oranlarından dolayı farklı olarak elde edilmiştir.

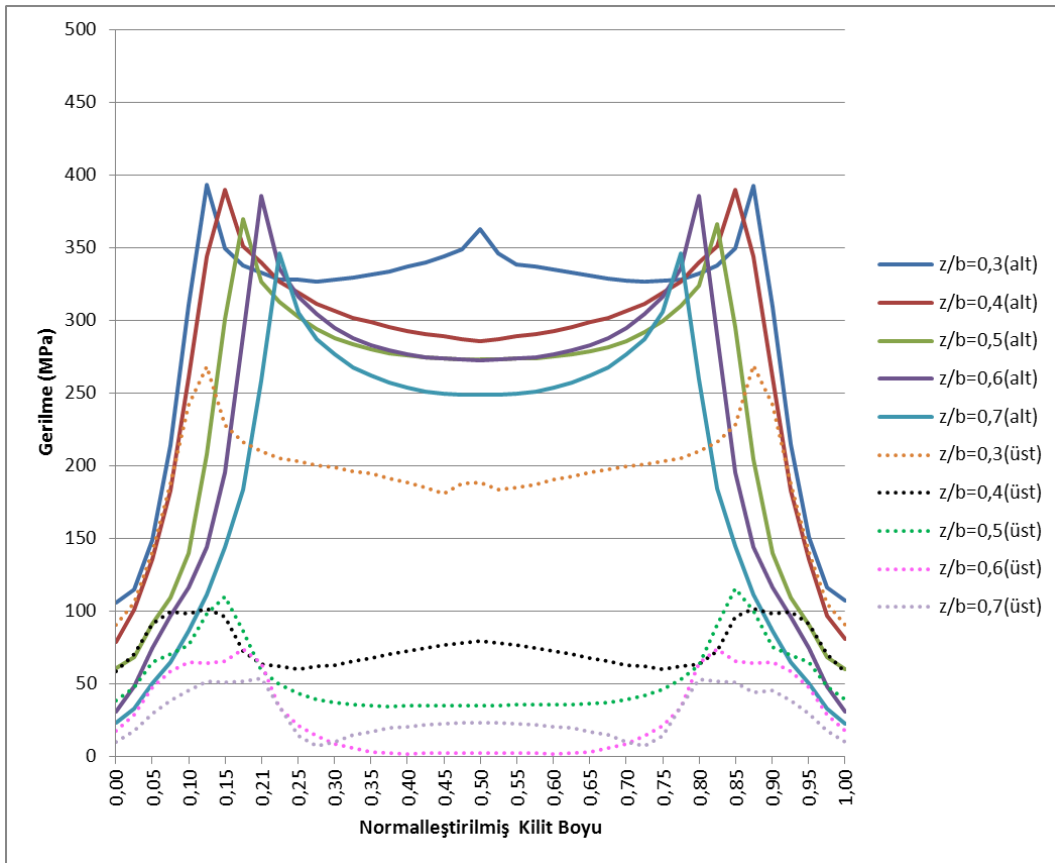


Şekil 6.40 : Gerilme dağılımlarının incelendiği Yol 1 ve Yol 2

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen çözümlere ait gerilme sonuçları sayısal değer ve renksel dağılım olarak elde edilmiştir. Gerilme ve normalleştirilmiş kilit boyu grafikleri oluşturularak alın altına birleştirilmiş kompozit numunelerinin en yüksek gerilme değerleri ve 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.

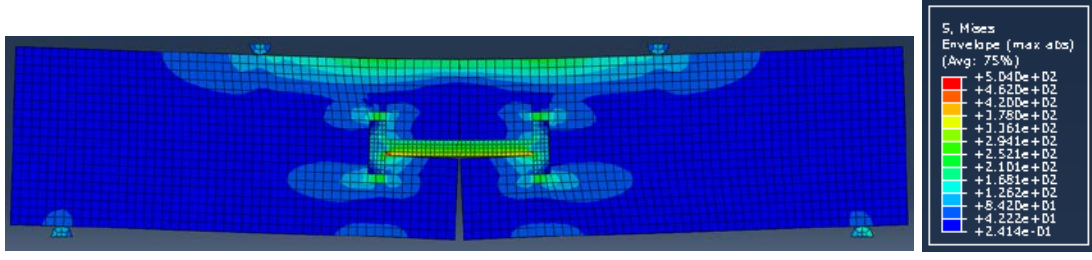
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri oranlarında değişik  $z/b$  oranlarının Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değişimleri Şekil 6.41'de gösterilmiştir.  $z/b=0,3, 0,4$  ve  $0,6$  oranlarındaki birleştirmelerin özellikle Yol 1 boyunca elde edilen gerilme değerlerinin çok yüksek olduğu şekilden de görülmektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmede elde edilen gerilme dağılımı  $z/b=0,7$  oranındaki birleştirmeye benzerlik göstermektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmede maksimum gerilmenin olduğu kollar arasındaki gerilme değişiminin  $z/b=0,7$  oranındakine göre yüksek elde edilmesi kilit gövdesinin yük transferi görevini yerine getirdiğini göstermektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirme diğer modellere göre daha büyük bağlantı (hasar) yüküne sahip olması beklenmektedir.



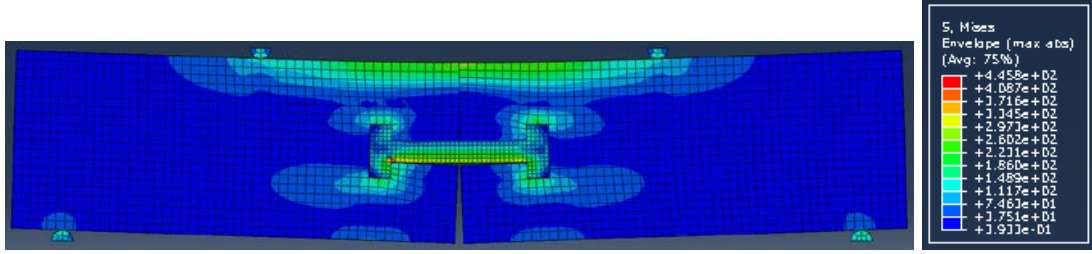
Şekil 6.41 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri



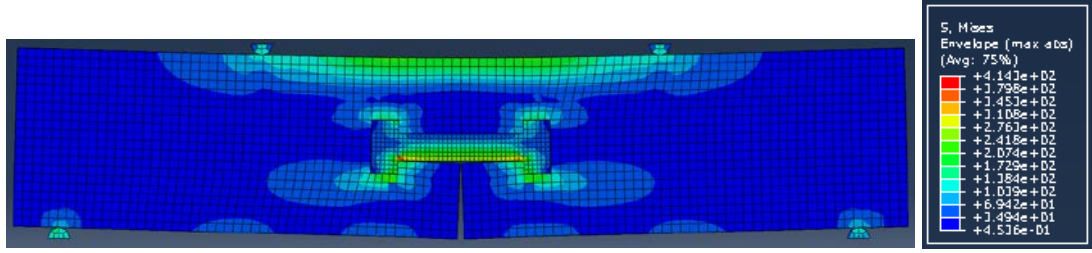
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.42’de gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanın tamamı ve sistem bütünüyle incelendiğinde maksimum gerilmenin  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede olduğu görülmektedir.  $z/b=0,3$  ve  $0,4$  oranlarındaki birleştirmelerde maksimum gerilmelerin kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında gerçekleşmiştir. Bu durumdan dolayı bu bölgelerden hasara uğraması beklenmektedir.  $z/b=0,6$  ve  $0,7$  oranındaki birleştirmede gerilmelerin yüksek elde edildiği bölgeler ise hem kilit bağlantı elemanının uç kısmıyla gövde kısmının birleşim kısmında hem de kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında oluştuğu Şekil 6.42 (d) ve (e)’den de görülmektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin maksimum gerilmesi diğer birleştirme oranlarına göre daha düşük olduğu belirlenmiş ve Şekil 6.42 (c)’de gerilmenin daha homojen dağıldığı gösterilmiştir. Dolayısıyla bu orandaki birleştirmenin hasara daha geç uğraması beklenmektedir. Dolayısıyla  $z/b=0,5$  oranına sahip birleştirmenin maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olması beklenmektedir.



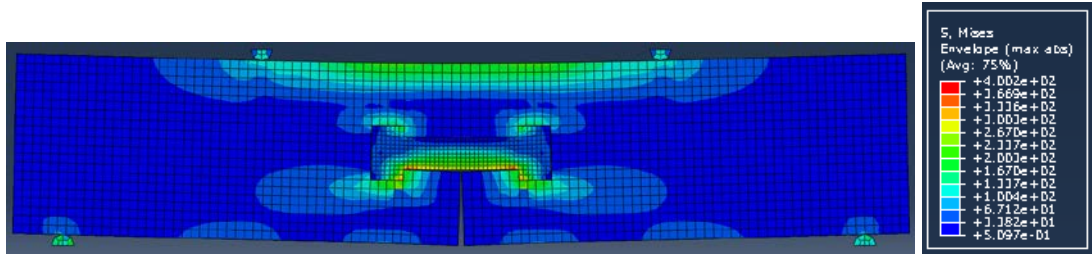
(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,3$



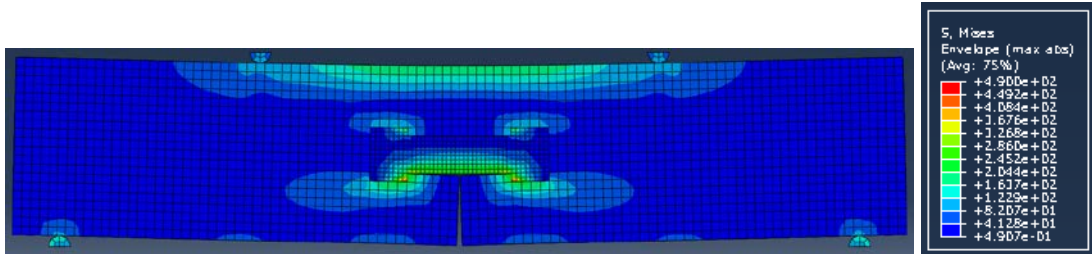
(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,4$



(c)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,5$



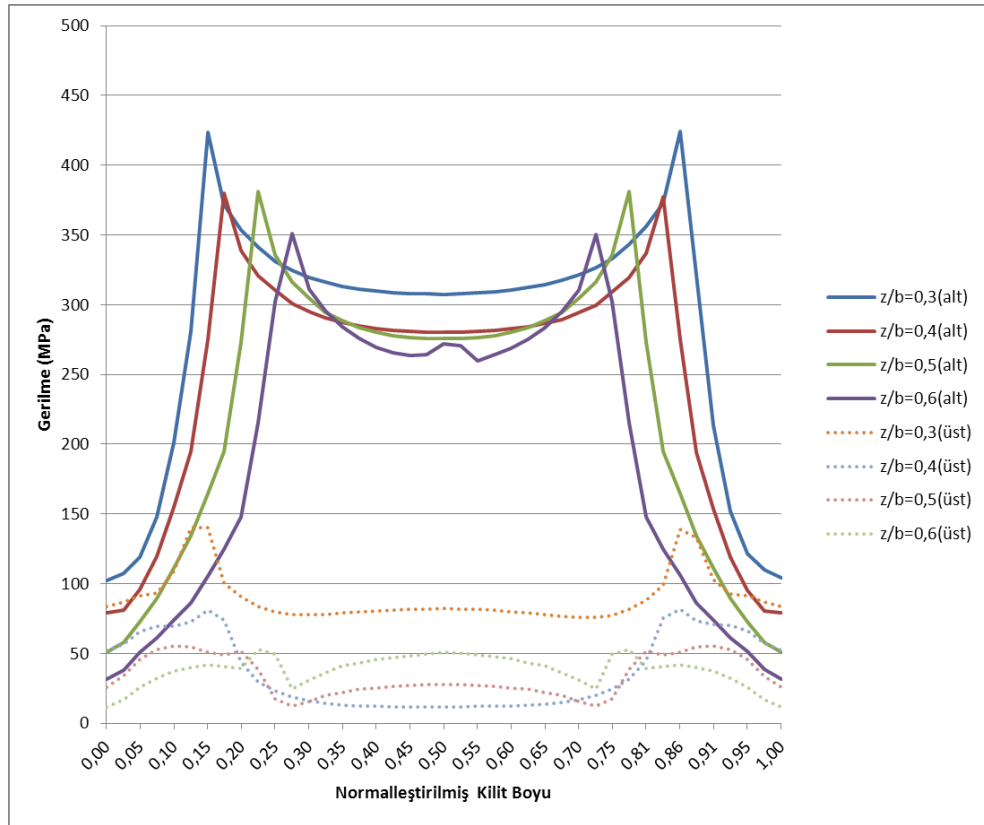
(d)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,6$



(e)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,3$ ,  $z/b=0,7$

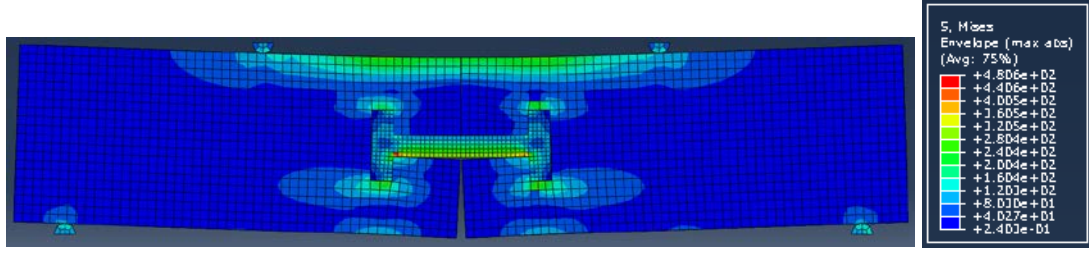
Şekil 6.42 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.43’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.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2’nin gerilme dağılımı  $z/b=0,3$  oranına benzerlik göstermekte olup gerilme değerleri daha düşük olduğu belirlenmiştir.  $z/b=0,6$  oranındaki birleştirmede Yol 1 gerilme değerlerinin düşük olduğu ve kilit gövdesinde gerilme dağılımının düzgün olmadığı görülmektedir. Gerilme değerleri açısından karşılaştırıldığında  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2 arasındaki gerilme farkının daha az olmasından dolayı kilit bağlantı elemanın yükü homojen yüklenmesinin mümkün olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirme yük taşıma kapasitesinin daha yüksek olacağı ve hasara daha geç uğrayacağı belirlenmiştir.

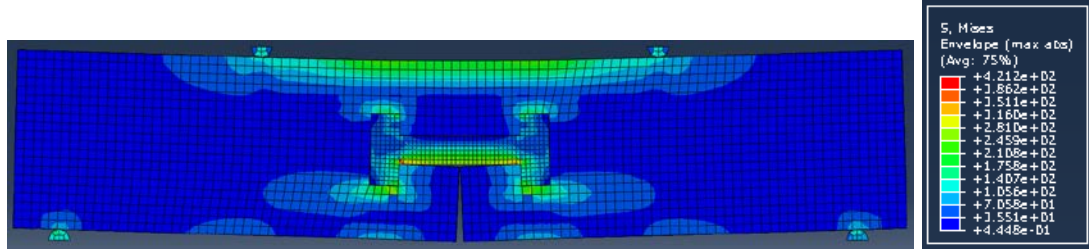


Şekil 6.43 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

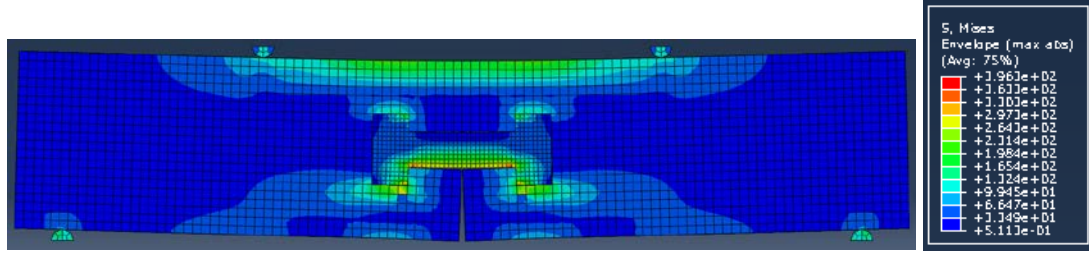
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.44'de gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanın tamamı ve sistem bütünüyle incelendiğinde maksimum gerilmenin  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmede olduğu görülmektedir. Bu orandaki birleştirmede maksimum gerilmenin kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında gerçekleştiği Şekil 6.44 (a)'da görülmektedir ve bu bölgeden hasara uğrayacağı düşünölmektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin maksimum gerilme değeri  $z/b=0,3$ 'e göre düşük olduğu belirlenmişse de gerilmenin daha çok kilit bağlantı elemanının iç köşe kısmında oluştuğu Şekil 6.44 (c)' de gösterilmektedir.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirme  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeye göre bağlantı kilitinin gövde kısmında gerilmelerin hemen hemen aynı dağılmasına karşın iç köşelerde oluşan gerilme değerleri  $0,5$  oranındakine göre düşük olduğu için  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmenin daha fazla yük taşıdığı düşünölmektedir.



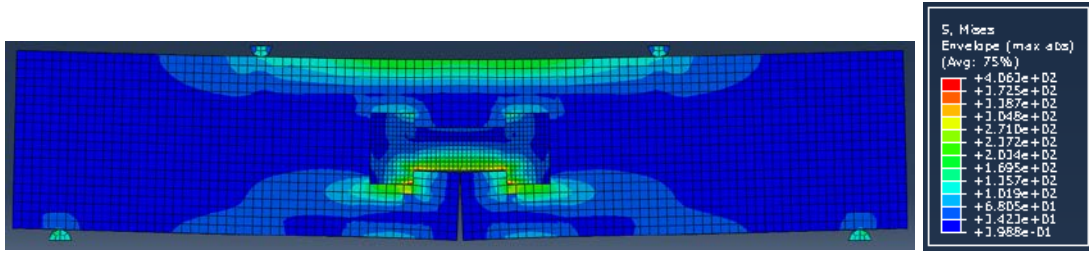
(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,3$



(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,4$



(c)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,5$



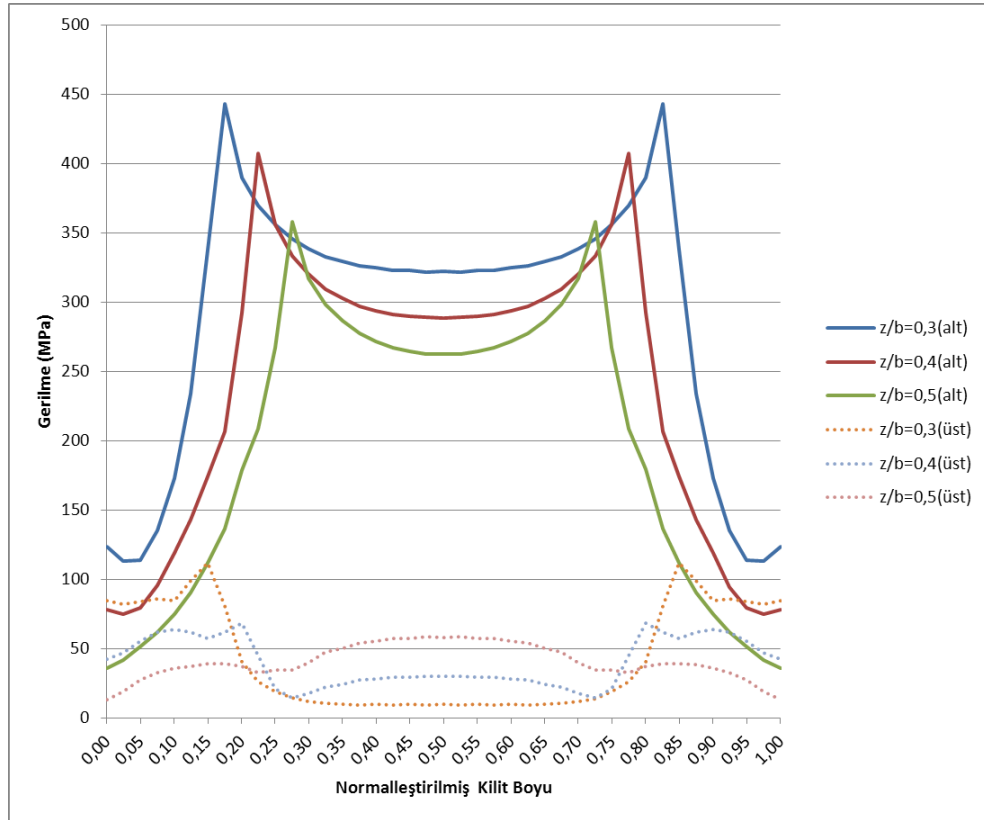
(d)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,4$ ,  $z/b=0,6$

Şekil 6.44 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 55’de gösterilmiştir.  $z/b=0,3$  ve  $z/b=0,4$  oranlarındaki birleştirmelerin Yol 1 ve Yol 2 gerilme değerleri çok yüksek olduğu Şekil 6.45’den görülmektedir.  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmede Yol 1 ve Yol 2’ nin gerilme dağılımı  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirmeye benzerlik göstermektedir ama gerilme değerleri daha düşük elde edilmiştir.  $z/b=0,5$  oranında yapılan birleştirmelerde oluşan gerilme değerleri diğer  $z/b$  oran

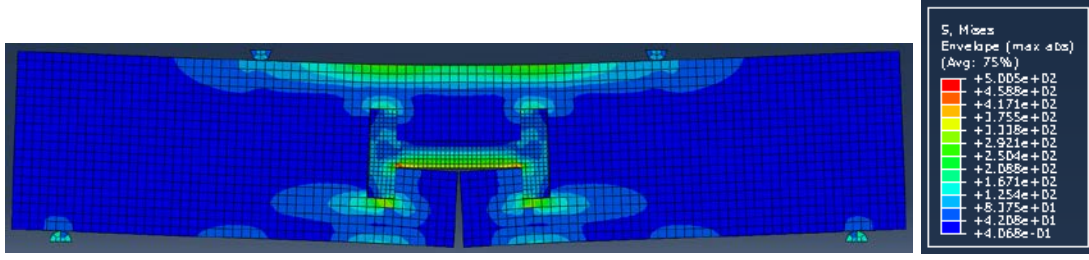
değerlerinde elde edilenlere göre en düşük olarak elde edilmiştir. Düşük gerilme değerleri elde edilen geometrilerden daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde edileceği beklenmektedir. Sonuç olarak  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirme diğer modellere göre daha büyük hasar yüküne sahip olacağı tespit edilmiştir.

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.46'da gösterilmiştir. Kilit bağlantı elemanının 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 6.46 (a)'da görülmektedir ve bu bölgeden hasara uğrayacağı düşünülmektedir.  $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmenin daha geç hasara uğrayacağından ve dolayısıyla yük taşıma kabiliyeti daha fazla olacağından bu orandaki birleştirme belirlenmiştir.

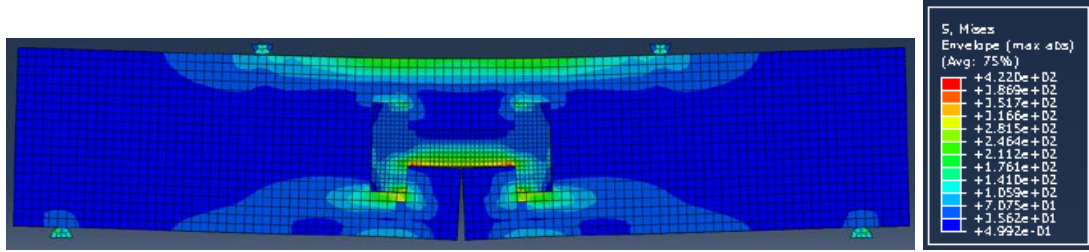


Şekil 6.45 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

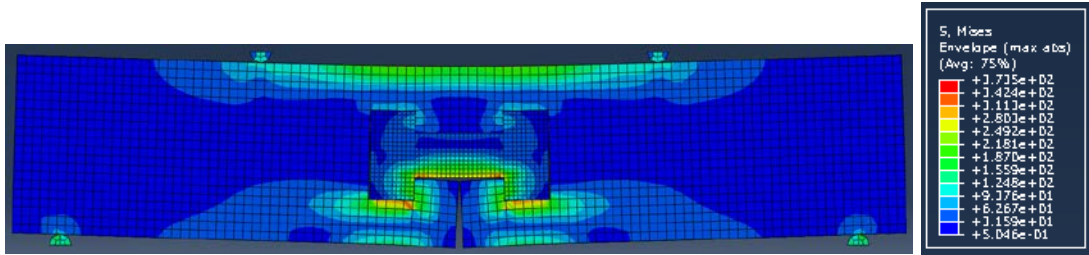




(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,5$ ,  $z/b=0,3$



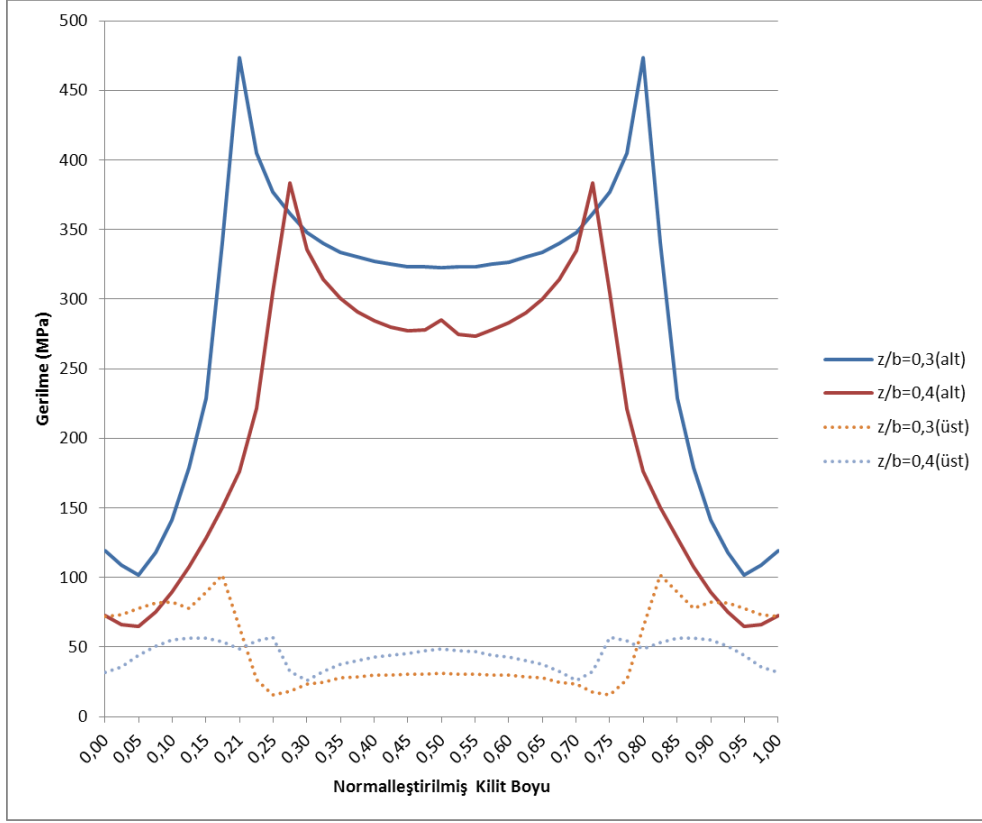
(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,5$ ,  $z/b=0,4$



(c)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,5$ ,  $z/b=0,5$

Şekil 6.46 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

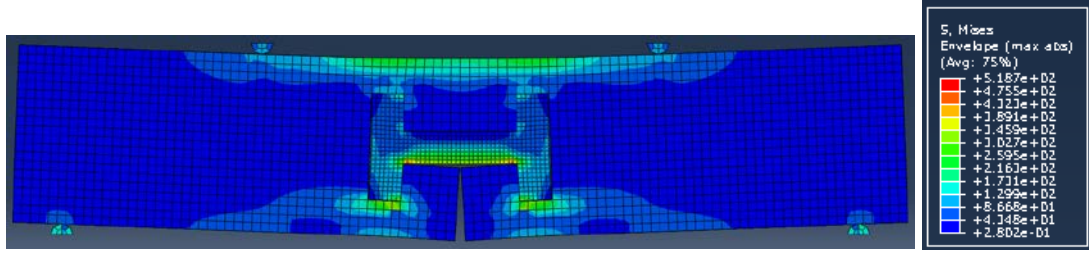
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.47’de gösterilmiştir.  $z/b=0,3$  oranındaki birleştirme ile  $z/b=0,4$  oranındaki birleştirmenin Yol 1 ve Yol 2 boyunca gerilme değerleri birbirlerine oldukça benzer olduğu Şekil 6.47’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.



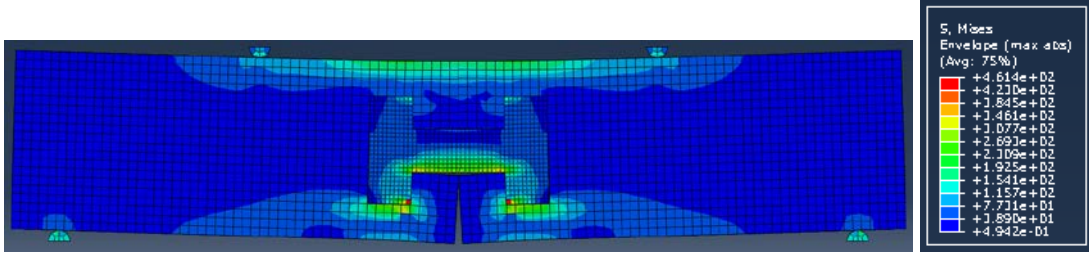
Şekil 6.47 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.48’de 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.





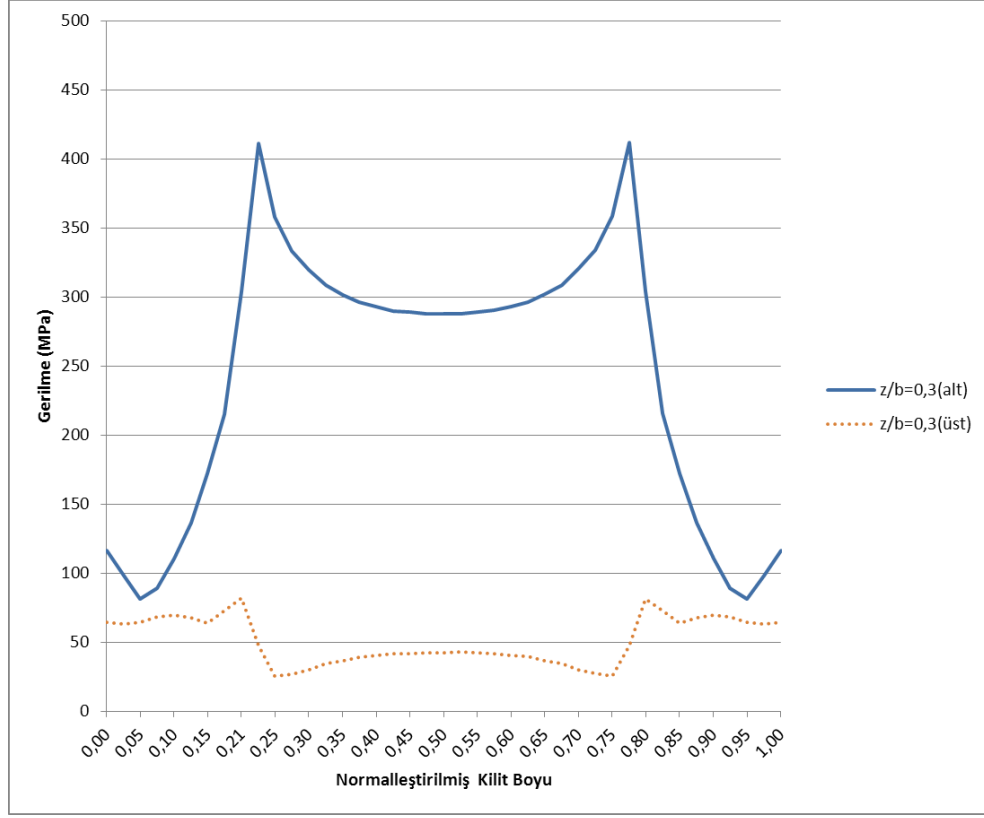
(a)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,6$ ,  $z/b=0,3$



(b)  $h/2w=0,5$ ,  $b/w=0,6$ ,  $z/b=0,4$

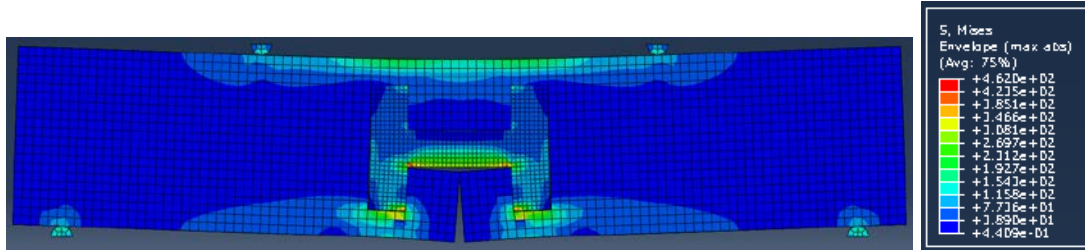
Şekil 6.48 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerinde değişik  $z/b$  oranlarında Yol 1 ve Yol 2 boyunca oluşan gerilme değerleri Şekil 6.49'da gösterilmiştir. Şekil 6.49'da görüldüğü gibi oluşan gerilme dağılımı özellikle kilit orta bölgelerinde düzgün bir dağılım içerisindedir.



Şekil 6.49 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımı Şekil 6.50'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum gerilme değerleri kilit bağlantı elemanının baş kısmıyla gövde kısmının birleşim yerinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.50 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometri parametrelerine göre değişik  $z/b$  oranlarının gerilme dağılımları

### 6.2.3 Dört nokta eğilme yükü altında hasar analizi

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen gerilme analizlerinden elde edilen en iyi yük taşıma kapasitesine sahip olan numunenin hasar analizi, Hashin Hasar Kriteri kullanılarak  $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranlarına sahip olan numune için gerçekleştirilmiştir. Böylece gerilme analizinden elde edilen sonuçlar hasar analizi ile desteklenmiştir. Kompozit yapı üzerindeki gerilme değerlerinin yüksek olduğu bölgeler, hasar analizi sonrasında hasar oluşumunun gerçekleştiği bölgeler olarak tespit edilmiştir. Hashin Hasar Kriterine göre hasar indeksinin bir (1) olması durumunda hasarın oluştuğundan dolayı hasar yükleri, sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen hasar indeksi değerinin 1 değerine yaklaştırılması ile bulunmuştur.

Abaqus sonlu elemanlar programında tabakalı olarak modellenmiş ve birleştirilmiş yarı numunelerine ait hasar oluşumlarının ilk önce bağlantı kilidinde meydana gelmesinden dolayı bağlantı kilidini oluşturan kompozit tabakalarına ait hem fiber ve hem de matris için ilk hasar yükleri Tablo 6.7'de verilmiştir. Bu modelde kullanılan eğilme yükünün uygulandığı eğme pim ucunun hacmi  $27,5 \text{ mm}^3$ 'dir. 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 çeki hasarının merkezdeki tabakada oluştuğu ve yükleme miktarını arttırdıkça da hasarın merkezden numunenin dış yüzeyine doğru ilerlediği belirlenmiştir. İkinci hasar şekli olarak matris bası hasarı elde edilmiş ve bu hasara ait indeks incelendiğinde matris çeki hasar indeksine çok yakın değerlerde olduğu elde edilmiştir. Daha sonra fiber bası ve oldukça yüksek yüklerde de fiber çeki hasarlarının oluştuğu belirlenmiştir.

Tablo 6.7 Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri

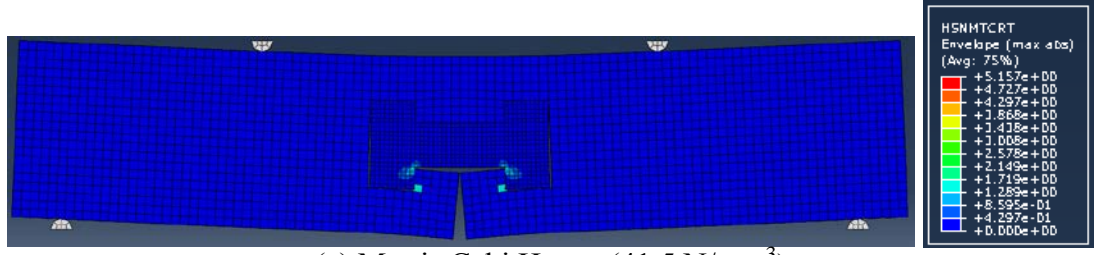
İlk Hasar Oluşum Yükleri (N/mm <sup>3</sup> )	Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
21,5	1	1,210	0,654	0,138
20	0,912	1	0,552	0,119
26	1,313	1,789	1	0,204
50,6	8,487	2,1	8,875	1

Hasar oluşumları kesit boyunca incelendiğinde hasarın veya hasarların kompozit numunenin dış yüzeylerine ulaştığı anda kompozit yapının tümüyle hasara uğramıştır. Buna göre bağlantı kilidinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri Tablo 6.8’de gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi kompozit yapının dış yüzeyinde ilk hasarın matris bası hasarı olarak meydana geldiği ve hasar indeksi değeri 1 olarak tespit edilmiştir.

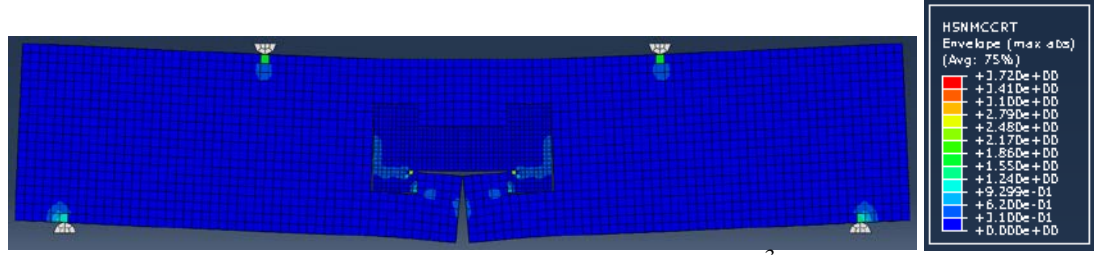
Tablo 6.8 Bağlantı kilidinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri

Deney yükü (N/mm <sup>3</sup> )		Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
41,5	Maksimum hasar indeksi değeri	3,72	5,157	4,117	0,573
	İlk hasarın meydana geldiği dış yüzeydeki hasar indeksi değeri	1	0	0,2	0

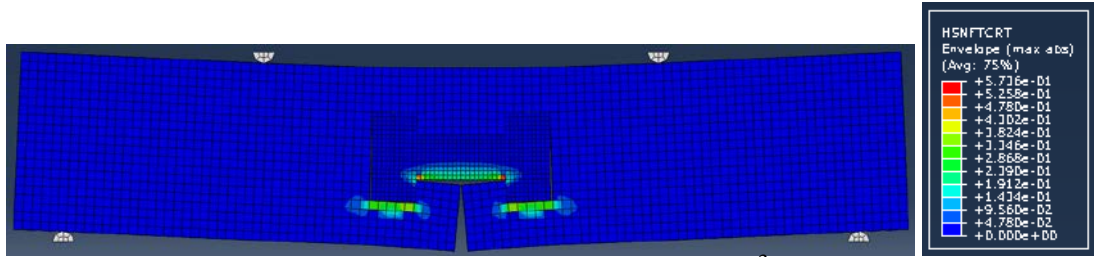
$h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki bağlantı kilidine ait Hashin hasar analizi hem matris hem de fiber bileşenlerinin çeki ve bası durumları için gerilme dağılımları ve değerleri Şekil 6.51’de verilmiştir. Matris çeki hasarı bağlantı kilidinin üzerinde iç köşe kısımlarında meydana geldiği Şekil 6.51 (a)’da görülmektedir. Matris bası hasarı ise daha çok bağlantı kilidinin kollarında olduğu Şekil 6.51 (b)’de gösterilmiştir. Şekil 6.51 (c)’de fiber çeki hasarı çeki gerilmesine maruz kaldığından dolayı bağlantı kilidinin orta gövdesinde ve yarı numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Ancak indeks değerlerine baktığımızda daha tam olarak hasara uğramadığı tespit edilmiştir. Fiber bası hasarı bağlantı kilidinin kollarının uç köşe kısımlarında meydana gelmiştir.



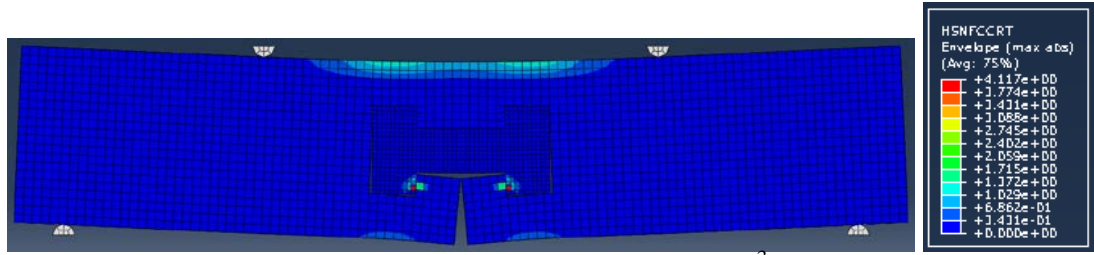
(a) Matris Çeki Hasarı ( $41,5 \text{ N/mm}^3$ )



(b) Matris Bası Hasarı ( $41,5 \text{ N/mm}^3$ )



(c) Fiber Çeki Hasarı ( $41,5 \text{ N/mm}^3$ )



(d) Fiber Bası Hasarı ( $41,5 \text{ N/mm}^3$ )

Şekil 6.51 :  $h/2W=0,5-b/W=0,5-z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeye ait  $41,5 \text{ N/mm}^3$  kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak hasar analizleri

Sonuç olarak hasar analizinden elde edilen maksimum hasar yükü değeri ile deneylerden elde edilen maksimum hasar yükü değeri birbirlerini desteklediği tespit edilmiştir.

### 6.3 Çekme Yüğü Altında Birleştirme Elemanın Optimizasyonu

Birleştirme elemanın optimizasyonu çekme yüklemesi altında hem deneysel olarak hem de nümerik olarak yapılmıştır.

#### 6.3.1 Çekme yüğü altında birleştirme elemanın deneysel optimizasyonu

Çekme deneyleri, Şekil 6.52’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) yüğü-kilit (bağlantı) deplasman grafikleri çizdirilmiştir. Uygulanan yükte bir miktar düşüş meydana geldiği gözlemlendiği anda deney sonlandırılmıştır. Numuneye ait hasar yüğü uygulanan yükteki ilk düşümde meydana gelmiştir.

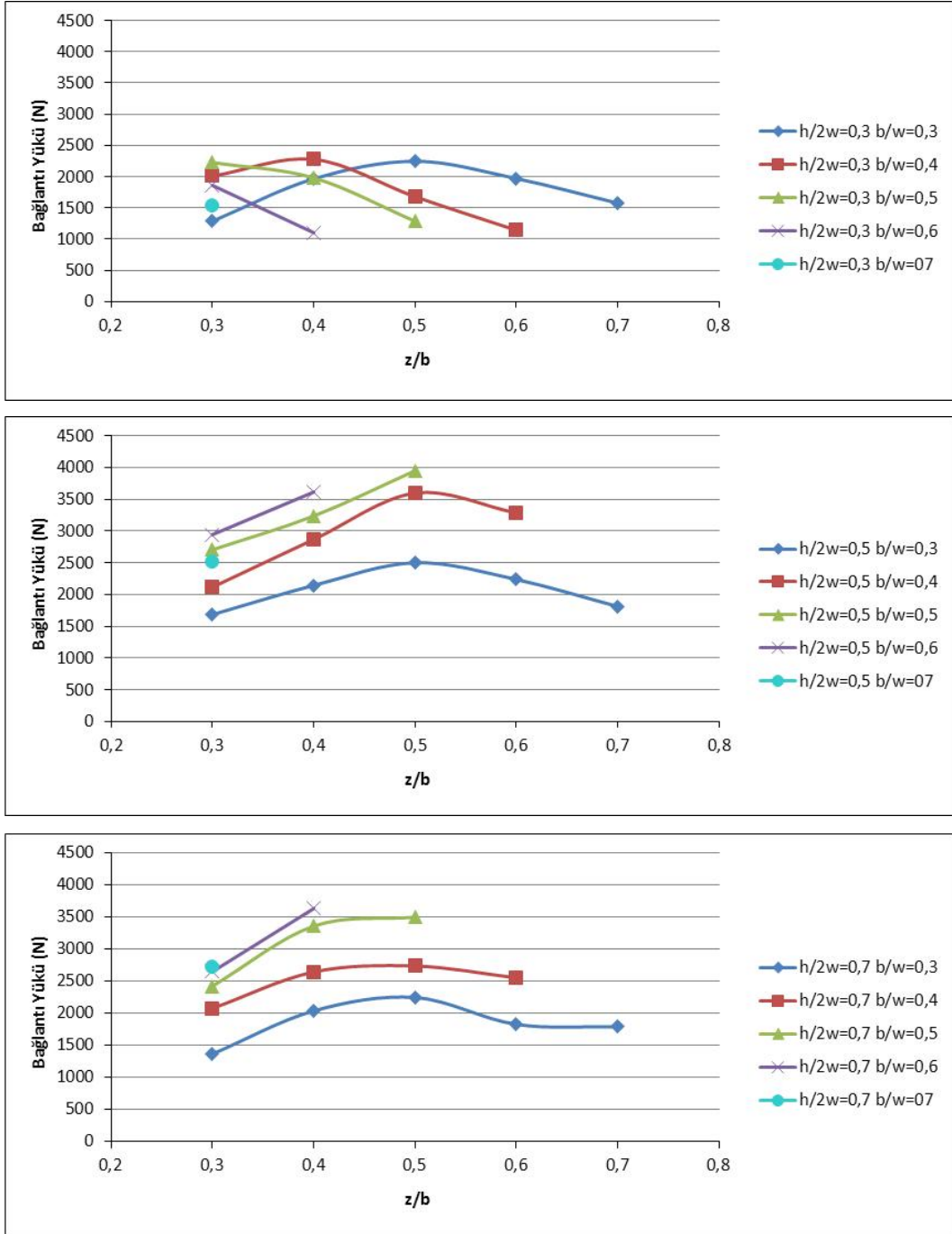


Şekil 6.52 : Çekme düzeni

Uygulanan yüğü; numune hasar yüğüne 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 ( $h/2W$ ) ve ( $b/W$ ) oranlarındaki kilit bağlantı elemanlarıyla yapılmış numunelerin, ( $z/b$ ) oranlarına göre yük taşıma kapasitelerindeki Şekil 6.53’de gösterilmiştir. Şekillerden de

görüldüğü gibi yük taşıma kapasitesi daha çok  $(z/b)$  ve  $(b/W)$  oranlarına bağlıdır.  $(h/2W)$  oranının 0,5 olması durumunda kilitli numunelerin yük taşıma kapasitesi diğer boylarına göre daha yüksek olarak 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. Hasar yükleri  $(h/2W)$  oranının 0,3 değerinde ise geometriye bağlı olarak kesit azalmaları mevcut olduğu için değişik  $(z/b)$  değerlerinde düşüktür.  $(b/W)$  oranı açısından bağlantı yüklerini incelediğimizde genel olarak 0,4, 0,5 ve 0,6 değerlerinde maksimum olarak elde edilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre  $(h/2W)$  oranının 0,3 değeri için  $(b/W)$  oranının 0,4 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.

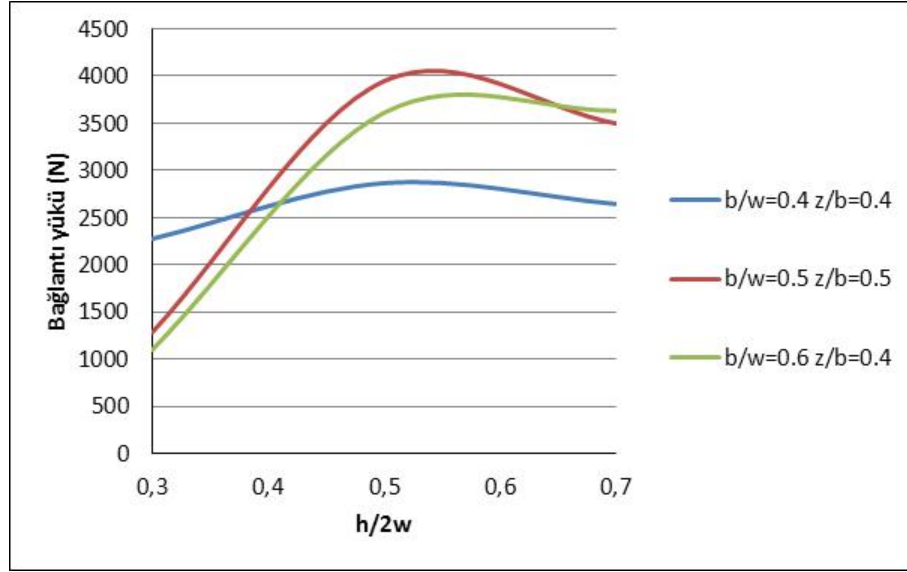


Şekil 6.53 : Bağlantı yüksekliğinin  $h/2w$  oranı için bağlantı yüklerinin  $z/b$  oranlarındaki değişimi

Şekil 6.53’de elde edilen maksimum bağlantı yüklerin elde edildiği geometrik oranların kilit boylarındaki değişimlerinin etkisi ayrıca incelenmiştir. Değişik kilit boyları için kompozit kilitli birleştirmelerin maksimum hasar yüklerindeki değişimleri ve hasar şekilleri Şekil 6.54’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kilit boyu ( $h/2W$ ) oranının 0,5 değeri için

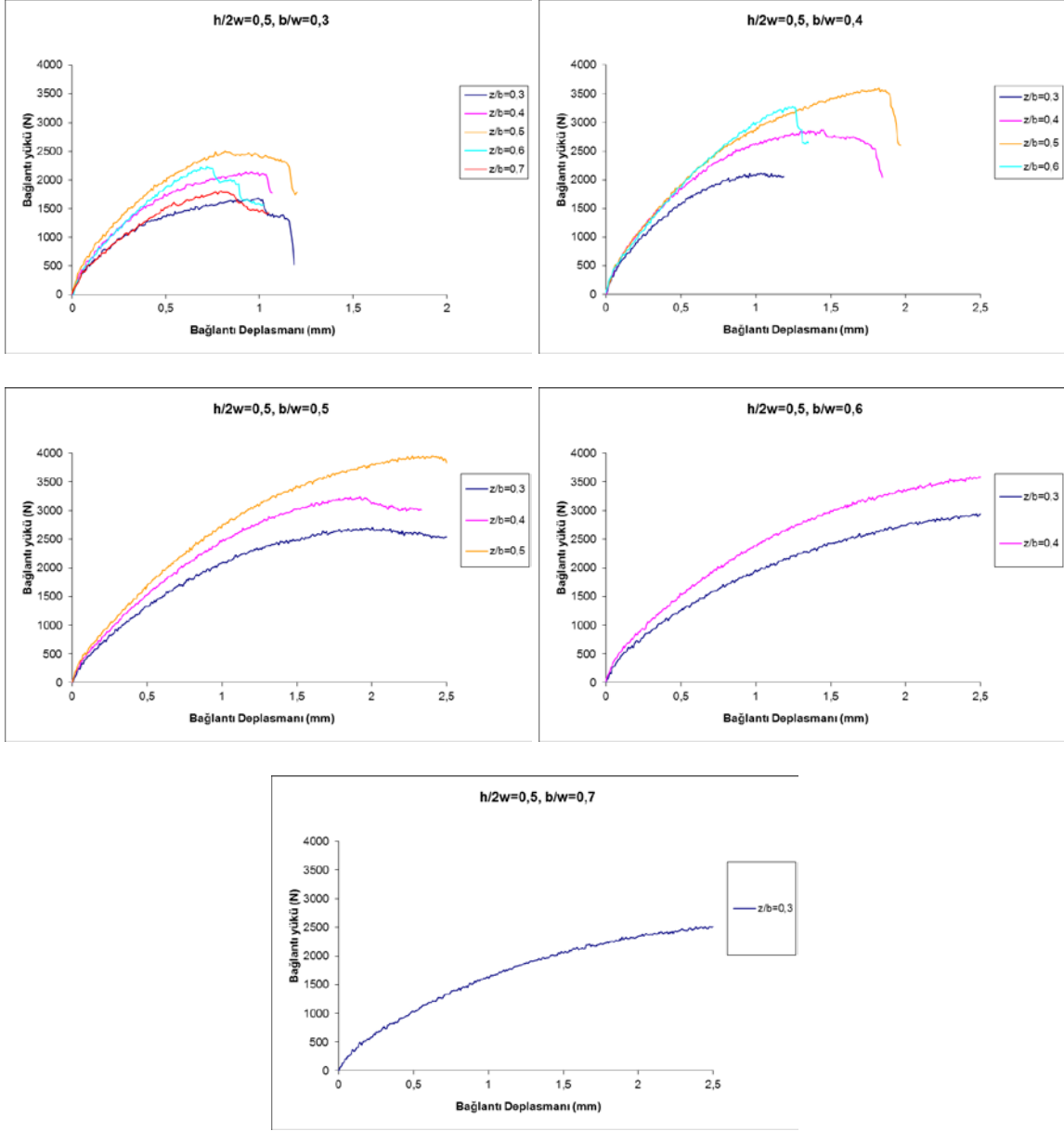


hasarın maksimum olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı bu kısımda kilit boyu ( $h/2W$ ) oranının 0,5 değeri olanı ayrıca ele alınmış ve incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırmaların yapılabilmesi için diğer kilit boyları için de aynı incelemeler yapılmıştır.



Şekil 6.54 : Maksimum bağlantı hasar yüklerinin elde edildiği geometrik parametrelerinin değişik  $h/2w$  oranlarındaki yük değişimleri

Kilit bağlantı elemanları ile oluşturulan birleştirmelerin yük taşıma kapasitelerindeki değişimleri, kilit boyu ( $h/2W$ ) oranının 0,5 değeri için Şekil 6.55’de gösterilmiştir. Kilit genişliğinin numune genişliğine oranı ( $b/W$ ) arttıkça maksimum yük miktarı esnasında kilit deplasmanının giderek arttığı şekilden görülmektedir. Kilit genişliğinin numune genişliğine oranı ( $b/W$ ) 0,5 iken, ( $z/b$ ) oranlarının tüm değerlerinde numunenin diğer numunelere göre maksimum yük taşıdığı tespit edilmiştir. Sabit bir  $W$  genişliğinde olan numunede kilit genişliğinin artmasıyla kilit bağlantı elemanının her iki tarafındaki zayıflayan bölgeden numunenin hasara uğramasıyla yük taşıma kapasitesinin düşümüne neden olduğu gözlemlenmiştir. ( $z/b$ ) 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 ta ( $z/b$ ) 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 tespit edilmiştir.



Şekil 6.55 : 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 çekme deneyleri maksimum hasar yüklerine ulaştıktan sonra yük taşıma kabiliyetleri düşünceye kadar devam ettirilmiştir. ( $h/2W$ ) oranının 0,5 olarak sabit ve ( $b/W$ )-( $z/b$ ) geometrik oranlarının değişik değerlerinde yapılan kompozit kilitli birleştirmelerin deneylerde oluşan hasar şekilleri Şekil 6.56'da gösterilmiştir. Şekil 6.56'da görüldüğü gibi ( $b/W$ ) oranının artmasıyla kayma hasar şekillerinin daha da netleştiği tespitlenmiştir. ( $z/b$ )

oranının küçük değerlerinde daha çok kayma hasarı oluşurken oranın artan değerlerinde ise numune ile beraber matris ezilmesi hasarlarının da olduğu gözlemlenmiştir.



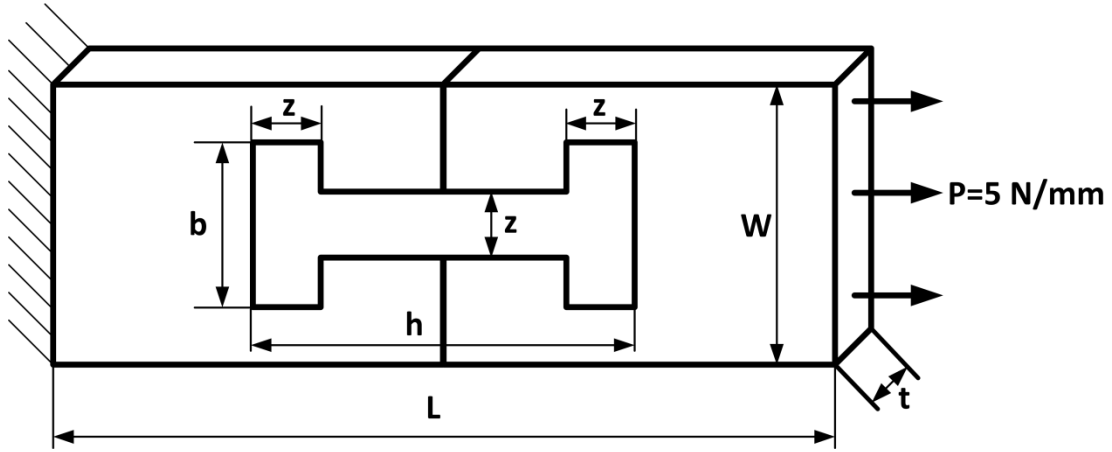
Şekil 6.56 : Bağlantı yüksekliğinin  $h/2w=0,5$  oranı için bağlantı elemanlarının hasar şekilleri

### 6.3.2 Çekme yükü altında birleştirme Elemanının Nümerik Optimizasyonu

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

### 6.3.2.1 Fiziksel Problemin Modellenmesi

Bu çalışmada, Şekil 6.57’de şematik olarak gösterilmekte olan mekanik alın birleştirilmiş kompozit plakaların çeki gerilmesi altındaki modelleme çözümlemesine örnek olarak seçilen  $b=12\text{ mm}$ ,  $z=3,6\text{ mm}$  ve  $h=56\text{ mm}$  yapısal birleştirmesi için gerçekleştirilecektir. Her numune için  $W=40\text{ mm}$ ,  $L=200\text{ mm}$  ve  $t=3,2\text{ mm}$  olarak sabit değerlerinde alınmıştır. Bu modelin ABAQUS/CAE 6.11 Sonlu elemanlar yazılımı ile modelin hazırlanmasına yönelik gerekli analiz adımları hakkında bilgi verilmesi ile birlikte ayrıca model üzerinde gerilme ve Hashin hasar kriterine göre hasar analizinin yapılması amaçlanmıştır.



Şekil 6.57 : Analizi yapılacak modelin şematik görünümü

Bu modele ait aşağıdaki analiz adımları kullanılacak olup, ayrıca açıklamaları da verilmiştir.

- Parça oluşturma ve malzeme özelliklerini tanımlama
- Kesit özelliklerini tanımlama ve parçaya atama
- Model montajı
- Çözüm adımının tanımlanması
- Sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması
- Parçalar arası etkileşiminin sağlanması
- Modelin çözüm ağının oluşturulması
- Bir iş oluşturularak çözüme verilmesi ve elde edilen sonuçların görüntülenmesidir.

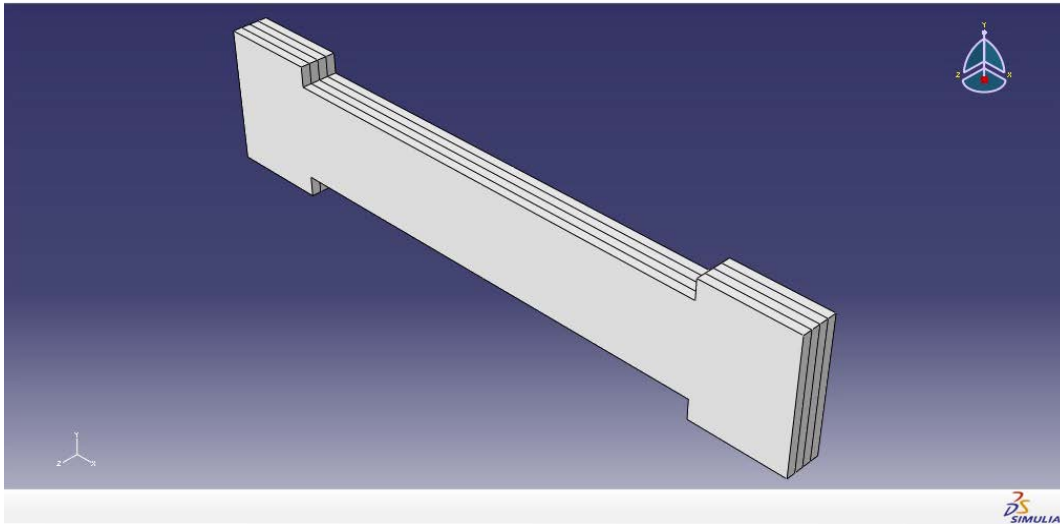
### 6.3.2.1.1 Parça oluşturma ve malzeme özelliklerini tanımlama

Modelin oluşturulmasının bu ilk adımında, model kesiti iki boyutta çizilip üçüncü boyuta girilen bir derinlik değeri kadar ötelenerek oluşturulması sağlanacaktır. Modelde bulunan toplam parça adedi üç olup, tasarlanacak olan parça adedi ikidir. Bunun sebebi bağlantı kilidinin birleştirmiş olduğu numune plakalarının simetrik olmasıdır. Bir adet numune ve bir adet bağlantı kilidi oluşturulup, montaj yapım adımı sırasında diğer numune simetrik olarak konumlandırılarak model tamamlanmış olacaktır.

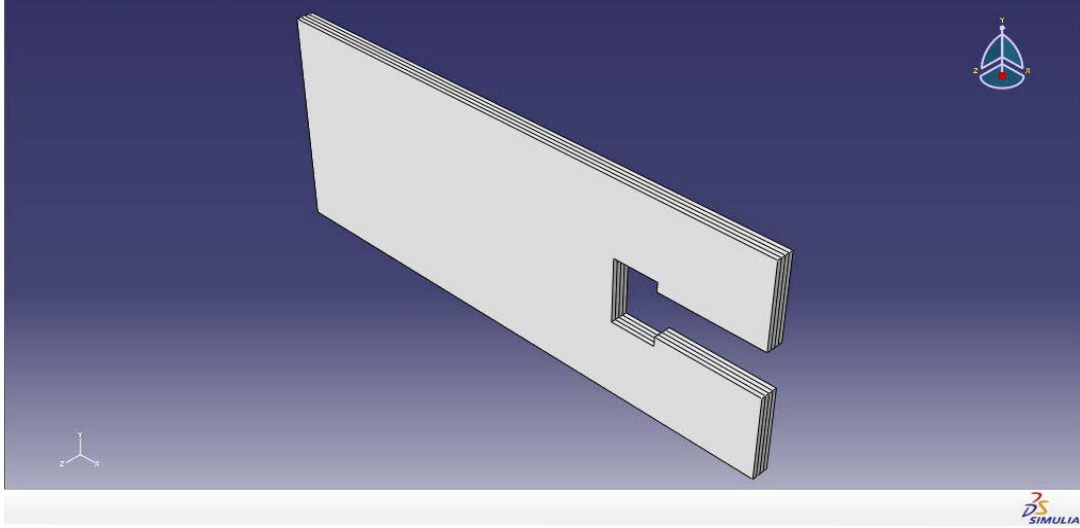
*Create Part* komutu kullanılarak Bağlantı Kilidi oluşturulmasına başlanır. Parça oluşturma iletişim penceresinde yapacağımız parçanın modelleme ortamı 3D, modelleme tipi Deforme olacak şekilde ve temel özelliği Katı ve ötelenebilir olmasına yönelik gerekli seçimler gerçekleştirilir.

Bağlantı kilidi ve birleştirilecek olan numunelerin boyut oluşturmunda, proje kapsamında yapımı planlanmış olan tüm modellerin boyutlandırılmasına yönelik hazırlanan aşağıda verilen tablo kullanılmış olup, bu örnek model uygulaması için, yazılım arayüzünde bulunan eskiz çizimi bölümünde gerek duyulacak ölçülerin elde edilmesinde belirtilmiş boyut oranlarından faydalanılmıştır.

Tablo 6.1'den faydalanarak seçilen boyut oranlarından faydalanılarak tasarımı yapılan parçaların yapının ekran görüntüleri Şekil 6.58 ve 6.59'da ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 6.58 : Tasarımı yapılan bağlantı kilidinin üç boyutlu model görünümü



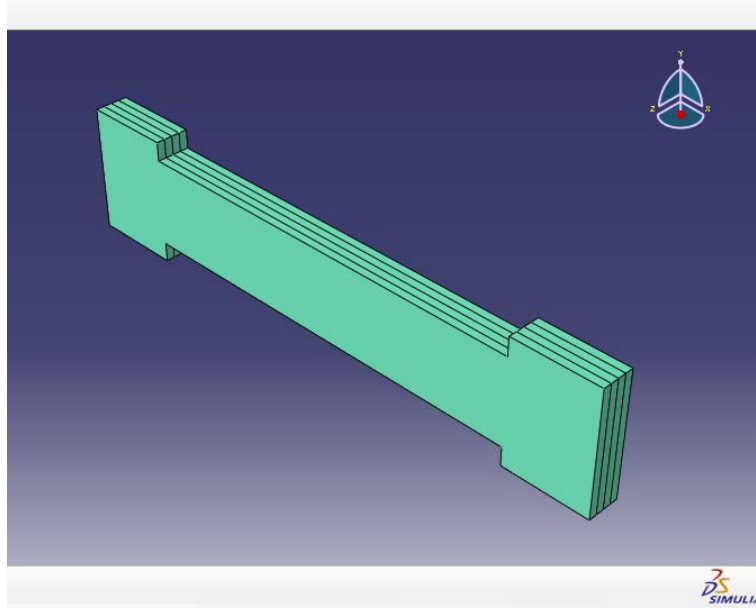
Şekil 6.59 : Tasarımı yapılan birleşme numunesini üç boyutlu model görünümü

Modelin alt parçalarına yönelik yapılan tasarımların analiz içerisinde mekanik özelliklerinin anlamlı olabilmesi için model bileşenlerinin teknik malzeme özelliklerinin oluşturulması gerekmektedir. Model içerisinde bulunan tüm alt bileşenlerin tamamı Tabakalı Kompozit Malzeme olduğu için gerekli malzeme özellikleri şu şekilde ABAQUS/CAE Sonlu elemanlar yazılımının içerisinde girilmiştir.

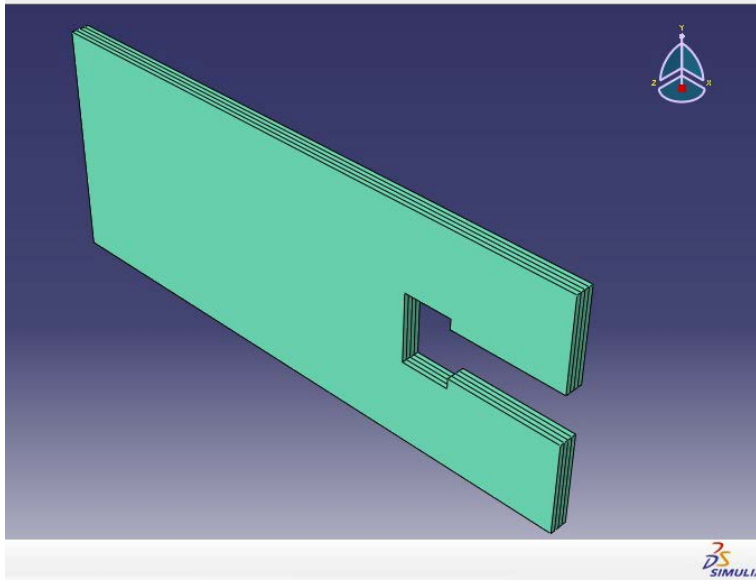
Malzeme tanımlaması için, Modül *Property* olarak ayarlanır. Girilecek özelliklere sahip malzeme için gerekli ayarlamalar yapılır ve gerekli mekanik değerler girilir. Malzemeye ait mekanik değerler ile Hashin Hasar Kriteri için gerekli değerler Tablo 6.2 ve 6.4’de verilmiş olmakla beraber ilgili değerleri sonlu elemanlar analizlerinin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla literatürde yer alan Altan vd (2010) çalışması ile de karşılaştırılması yapılmıştır.

### 6.3.2.1.2 Kesit özelliklerini tanımlama ve parçaya atama

Bundan sonraki analiz adımında yukarıda tanımlanmış olan malzeme özelliklerinin model alt bileşenlerine kesit özellikleri dâhilinde olarak atanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Ataması yapılan özelliklerin model bileşenleri üzerindeki görünümü ekil 6.60 ve 6.61’de verilmiştir.



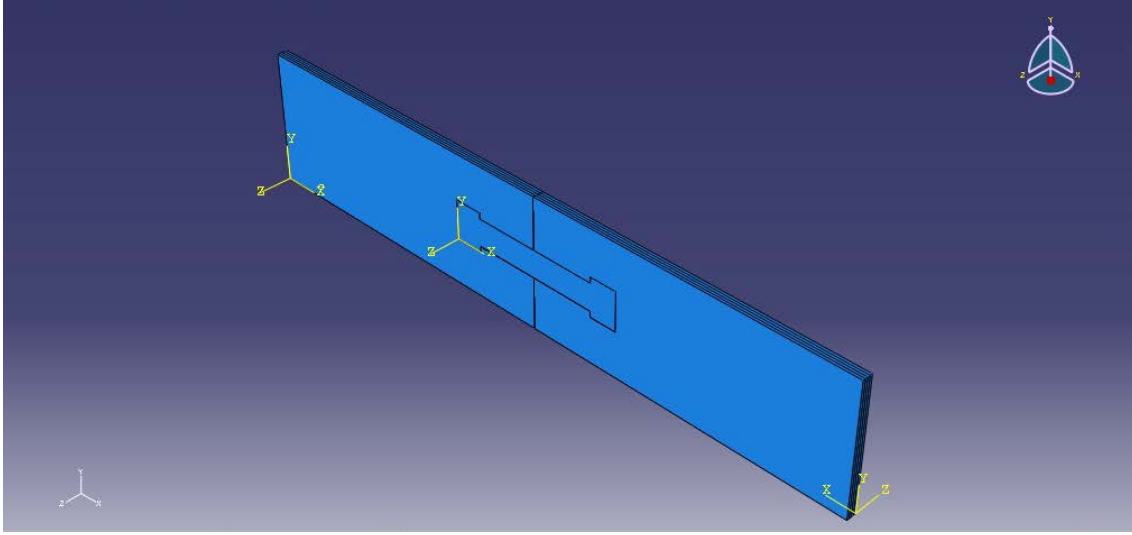
Şekil 6.60 : Bağlantı Kilidi Üzerine Kesit Atanması



Şekil 6.61 : Birleşme Numunesi Üzerine Kesit Atanması

### 6.3.2.1.3 Model montajı

Yapılacak bu model iki adet birleşme numunesi ve bir adet bağlantı kilidinden oluşmaktadır. Bu alt bileşenlerin montaj yapılabilmesi için Modül *Assembly* olarak ayarlanır. Ardından *Create Instance* komutu kullanılarak parçalar üç boyutlu çalışma ortamı içerisine dâhil edilerek ve gerekli konumlandırmaların sağlanması ile montaj işlemi ekil 6.62’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 6.62 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde birleştirilmesi

#### 6.3.2.1.4 Çözüm adımının tanımlanması

Bu model uygulamasında katı olarak modellenmiş, bir ucu ankastre olan modelin uygulanacak çeki kuvvetine karşı statik cevabı incelenecektir. Bu nedenle modelin analizine yönelik tek bir çözüm adımının gerçekleştirilmesi uygundur. Sonuç itibarıyla analizi yapılacak modelin toplamda iki çözüm adımına sahip olacaktır.

- Başlangıç Çözüm Adımı: Sınır şartları içerir.
- Genel Statik Çözüm Adımı: Çeki Yükünün tanımlanmasını içerir.

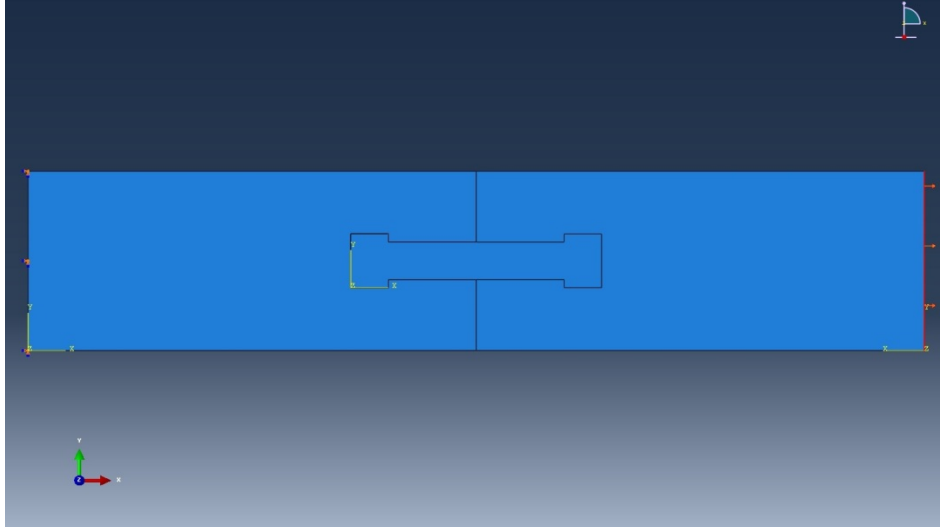
ABAQUS/CAE yazılımının Modül ayarlaması Step olarak ayarlanır ve gerekli tanımlamalar yukarıda anlatılanlar dâhilinde gerçekleştirilmiştir.

#### 6.3.2.1.5 Sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması

Şekil 6.63'de gösterildiği gibi sınır koşulu olarak modelin alt bileşeni olan birleşme numunesinin uzun kenarına dik olan yüzey alanı üzerinden ankastre sabitlenmesi gerçekleştirilmiş olup, diğer simetrik birleşme numunesinin uzun kenarına dik olan yüzey alanı üzerinden çeki yükünün uygulanması sağlanmıştır.

Bunların yapılabilmesi amacıyla Modül *Load* olarak ayarlanır ve yukarıda tanımlaması yapılmış özellikler sonlu elemanlar yazılımına tanıtılır.



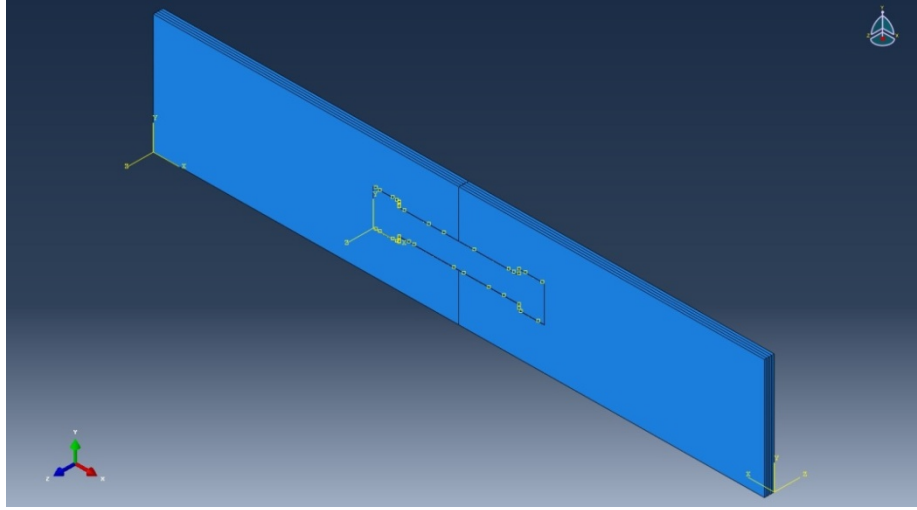


Şekil 6.63 : Model bileşenlerinin çalışma ortamı içinde sınır koşullarının ve yüklemelerinin tanımlanması

Sayısal analizi gerçekleştirilecek olan tüm numunelerde uygulanacak olan kuvvet miktarının, kompozit yapıların hasar oluşturmadığı yani kompozit yapıların işlevsel halde olmasını sağlayacak en uygun yük değerinin tespiti yapılmıştır. Bu kuvvet değerinin belirlenebilmesi için bütün numuneleri kapsayacak şekilde çeşitli analizler yapılmış olup, bu analizler içerisinde en uygun değer  $5 \text{ N/mm}$  olduğu belirlenmiştir. Proje kapsamında sayısal analizi yapılan tüm numuneler için aynı yük altında en iyi yük iletimini yapıya en az hasarı verecek olan yapısal numunenin belirleme hedefi doğrultusunda uygulanan bu yükleme değeri kullanılabilir bir değer olduğu görülmüştür.

#### 6.3.2.1.6 Parçalar arası etkileşiminin sağlanması

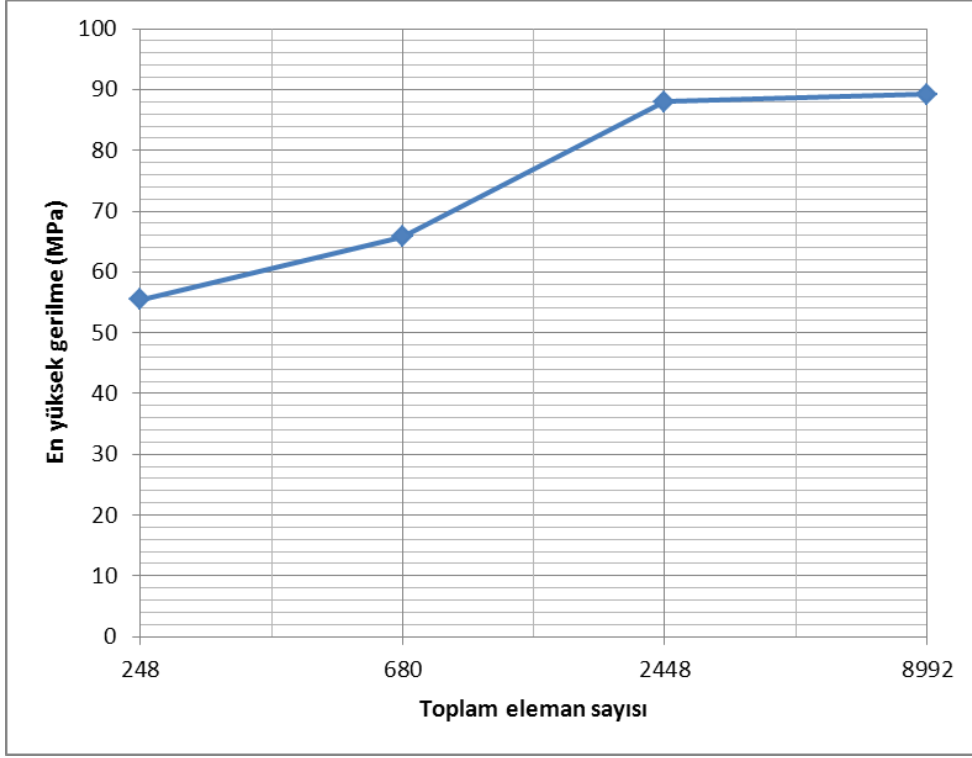
Proje kapsamında analizi yapılacak olan bu modelin birden çok alt parça bileşenin bulunması, ABAQUS/CAE 6.11 Sonlu elemanlar yazılımı içerisinde, analize girecek olan bu alt parçaların birbirlerine tanımlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle parçalar arasında temas özelliği ve temas tanımlanmalıdır. Temas özelliği olan parçalar arasındaki sürtünme katsayısı 0.1 alınmıştır. Temas tanımlamasının yapılabilmesi için Modül *Interaction* olarak ayarlanmıştır. Temas edeceği öngörülen yüzeyler seçilerek ilgili mekanik özellikler yazılıma aşağıda verilmiş olan Şekil 6.64’de gösterildiği gibi tanımlanmıştır.



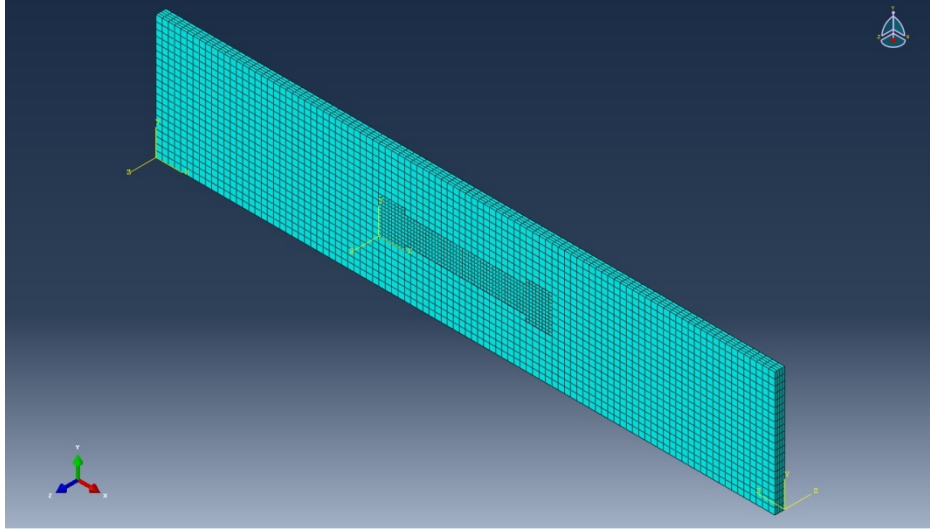
Şekil 6.64 : Model bileşenlerinin arasında temas tanımlamasının gerçekleştirilmesi

#### 6.3.2.1.7 Modelin çözüm ağının oluşturulması

Modelin analizine ait bu bölümünde çözüm ağı oluşturulacaktır. Çözüm ağının oluşturulabilmesi için öncelikle temel çözüm ağı kontrol parametrelerinin yapılacak analize uygun olup olmadığını belirleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca alın altına birleştirilmiş kompozit plakalara uygulanan gerilme analizlerinde, yük taşıma kapasitelerini ve gerçekleşebilecek hasar şekillerini en iyi bir şekilde belirleyebilmek için bir tür yakınsama testi yapılarak, çözüm ağı elemanının boyutları çeşitli değerlerde uygulanmıştır. Böylece en uygun eleman boyutlarının tespiti yapılmıştır. Örnek olarak alınan bu numuneye ait en yüksek yapısal gerilme değerinin, oluşturulan eleman sayısı arasındaki ilişkisi Şekil 6.65’de belirtilmiştir. Elde edilen toplam eleman sayılarına bağlı olarak çözüm ağı elemanları; yarı numune için eleman boyutu 2 mm, kilit için 1 mm olarak uygulandığında en iyi bir yakınsama ile boyutlandırma sağlanmıştır. Uygulama sonucunda oluşan çözüm ağı Şekil 6.66’da gösterilmiştir.



Şekil 6.65 : Eleman sayısına karşılık en yüksek yapısal gerilme değerleri

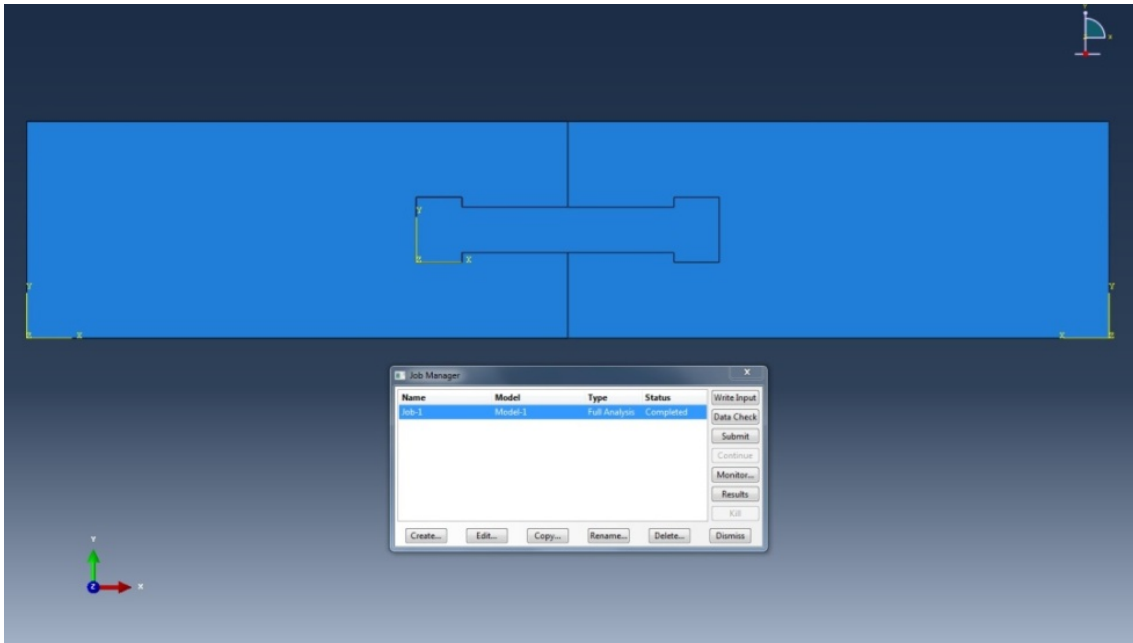


Şekil 6.66 : Modelin çözüm ağıının gerçekleştirilmesi

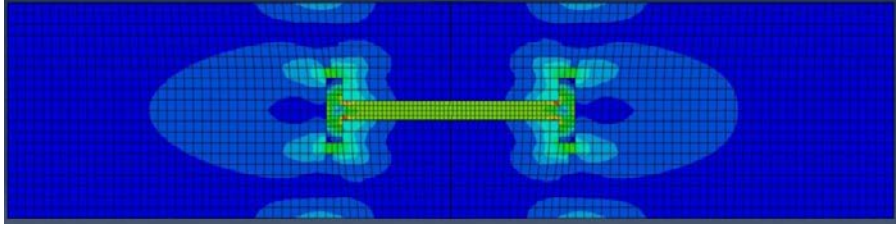
### 6.3.2.1.8 Bir iş oluşturularak çözüme verilmesi ve sonuçların elde edilmesi

Analizi yapılacak modele ait oluşturulan adımlar, sonlu elemanlar modelinde bu bölüme kadar hazırlanmıştır. Artık hazırlanan model çözüme verilebilir. Bunun için yeni bir iş oluşturmak için Modül *Job* olarak ayarlanarak çözüm bölümü oluşturulur. Çözüm Şekil 6.67’de gösterildiği gibi *Submit* komutu kullanılarak başlatılır.

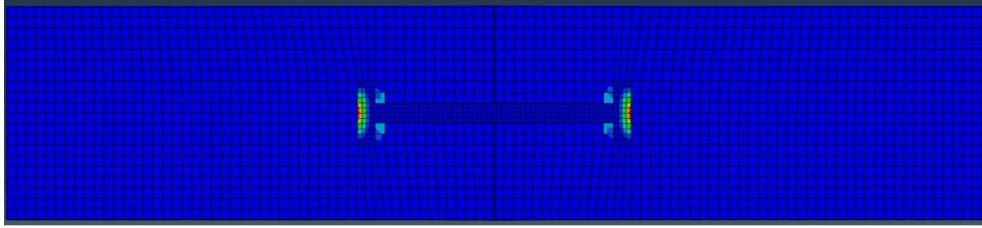
Analiz adımlarının dahil edilerek oluşturulan işin başarılı bir şekilde çözümü tamamlanmasının ardından model üzerinde uygulanan çeki kuvveti sonucunda oluşan gerilme dağılımı ile Fiber ve Matris üzerinde oluşan hasar sonuçları Hashin Hasar Kriterine göre elde edilmiş olup Şekil 6.68’de gösterilmiştir.



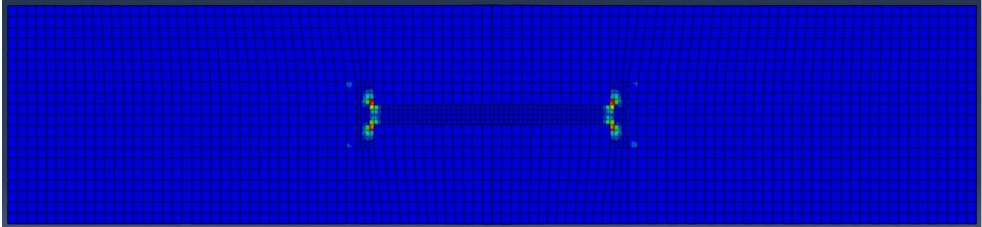
Şekil 6.67 : Modelin çözüme verilmesi



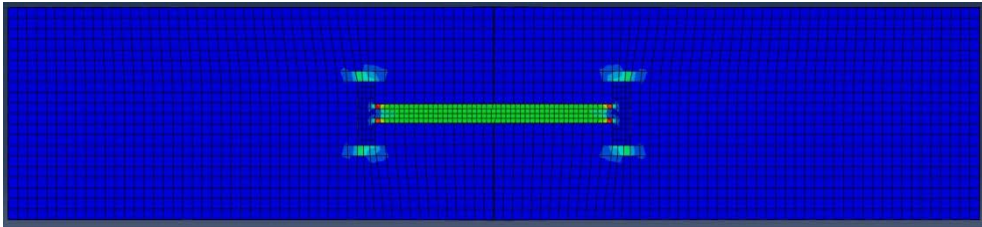
(a) Gerilme dağılımı



(b) Hashin bası matris hasarı dağılımı



(c) Hashin çeki matris hasarı dağılımı

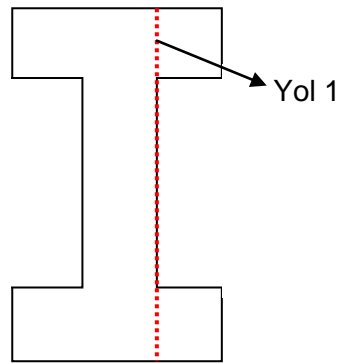


(d) Hashin çeki fiber hasarı dağılımı

Şekil 6.68 : Elde edilen analiz sonuçlarının görüntülenmesi

### 6.3.2.2 Çekme yükü altında birleştirme elemanının gerilme dağılımları

Kilit elemanı ile birleştirilmiş numuneler üç boyutlu olarak modellenmiştir. Kilit bağlantı elemanlarının geometrileri değiştirildiğinden dolayı kilit üzerindeki gerilmelerin bilinmesi ve oluşabilecek hasar yerlerinin belirlenebilmesi, yapının güvenirliliği için önem arz etmektedir. Bundan dolayı kilit bağlantı elemanlarına, yarım numunelerden daha sıkı bir çözüm ağı yapılmıştır. Çeşitli geometrilerdeki birleştirmelerde oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için Şekil 6.69'da da gösterildiği gibi kilit üzerindeki (Yol 1) gerilme değişimleri ele alınmıştır. Geometrik oranları birbirleriyle karşılaştırma yapabilmek amacıyla yapılan nümerik analizlerde çekme yüklemesinin değeri  $5 \text{ N/mm}^2$  olarak seçilmiştir.

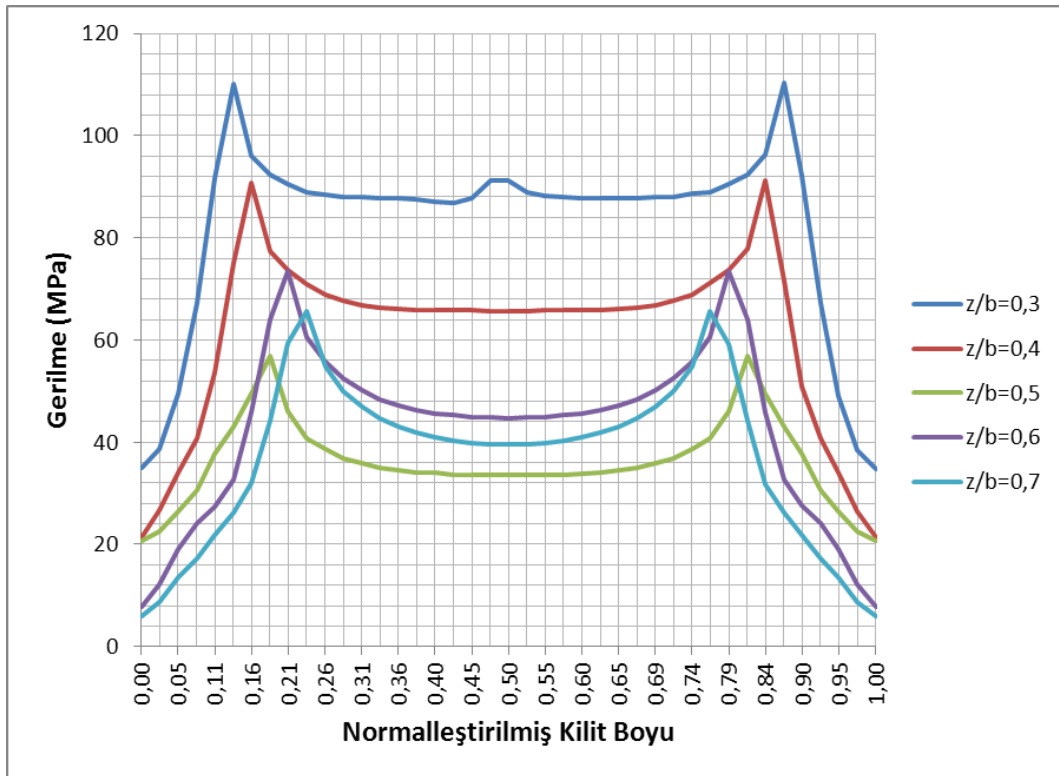


Şekil 6.69 : Kilit üzerinde oluşan gerilme dağılımlarının incelendiği Yol

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen çözümlmeye ait gerilme sonuçları tüm kompozit yapı üzerinde sayısal değer ve renksel dağılım olarak elde edilmiştir. Gerilme ve normalleştirilmiş kilit boyu grafikleri oluşturularak alın altına birleştirilmiş numunelerin en yüksek gerilme değerleri ve 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. Bu amaca ulaşmak için özellikle kilit üzerinde meydana gelen gerilmelerin değişimleri incelenmiş ve bulunan gerilmelerin en düşük ve düzgün dağılımda olan bağlantı kilidinin daha yüksek yük kapasitesine sahip olabileceği belirlenmiştir.

I profilli kilit elemanı üzerinde belirlenen Yol 1 boyunca elde edilen Gerilme-Normalleştirilmiş kilit boyu değerleri Şekil 6.70'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kilitler üzerinde belirlenen Yol 1 hattı boyunca, en yüksek gerilme değerleri ( $z/b$ ) oranı 0,3-

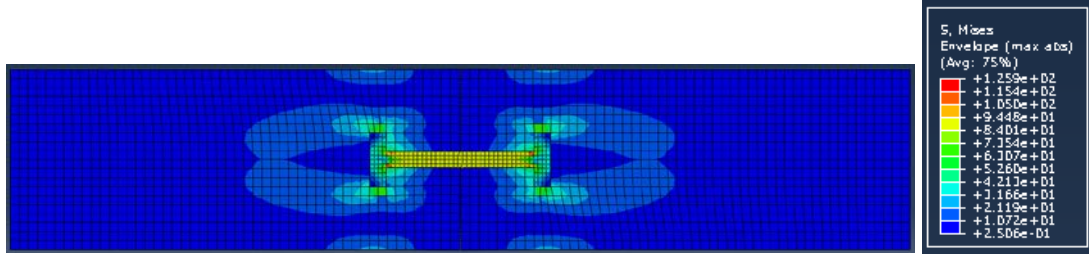
0,4-0,6'e eşit olduğu durumlarda kilitlerin iç köşe kısımlarına yakın bölgelerinde meydana gelmiştir. (z/b) oranı 0,6-0,7 değerlerinde olduğu durumlarda ise kilitlerin orta bölgelerindeki gerilme değerleri, kilitlerin uç bölgelerine göre daha yüksek elde edilmiştir. (z/b) oranı 0,5'e eşit olduğu numunelerde ise, Yol 1 boyunca meydana gelen gerilmelerin olabildiğince tüm gerilme değerleri arasında ani değişimlerin olmadığı görülmüştür. Kilit iç köşelerinde meydana gelen maksimum gerilme değerleri bakımından da (z/b) oranı 0,5 olduğunda en düşük olarak elde edilmiştir. Eşit yükler altında elde edilen gerilme dağılımlarının Yol 1 boyunca oluşturdukları ani değişimlerinin gerçekleştiği bölgeler, meydana gelebilecek hasarlı bölgeler olarak öngörülmektedir.



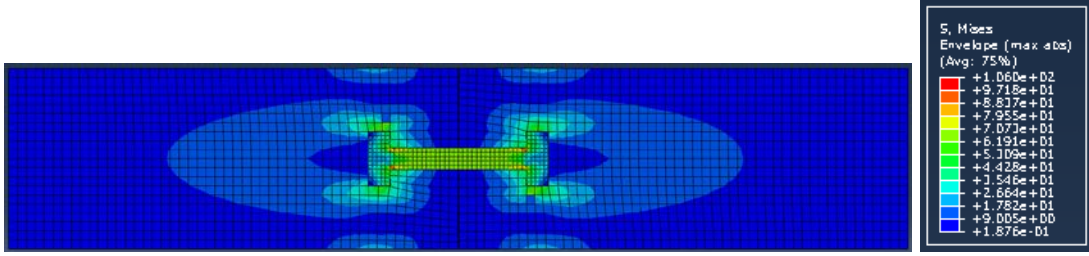
Şekil 6.70 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometrik parametrelerinin değişik z/b oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  sabit geometrik parametrelerinin değişik (z/b) oranlarında olan I profilli kilit birleştirmeli kompozit yapılara ait gerilme dağılımları ve yapısal gerilme değerleri Şekil 6.71'de verilmiştir. Kompozit yapıları oluşturma oranı olan (z/b) oranı 0,3'den 0,5 değerine kadar en yüksek gerilme değerleri düşme eğiliminde olup, (z/b) oranı 0,6 ve 0,7 değerlerinde en yüksek gerilme değerleri 0,5 oranlarına göre artış göstermektedir.

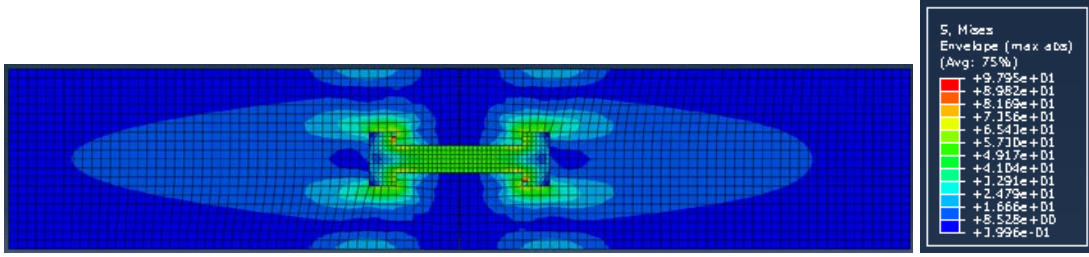




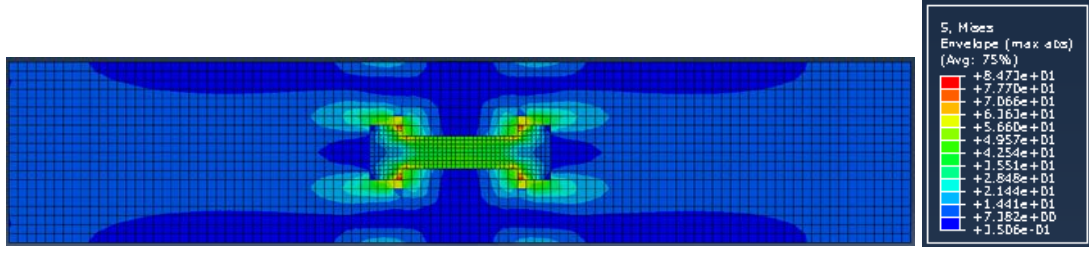
(a)  $z/b=0,3$



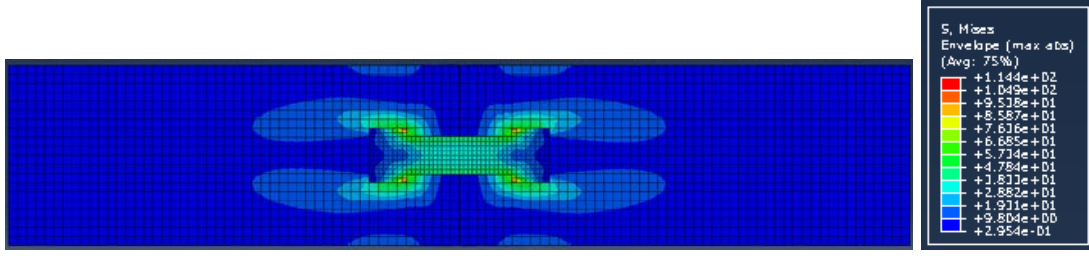
(b)  $z/b=0,4$



(c)  $z/b=0,5$



(d)  $z/b=0,6$

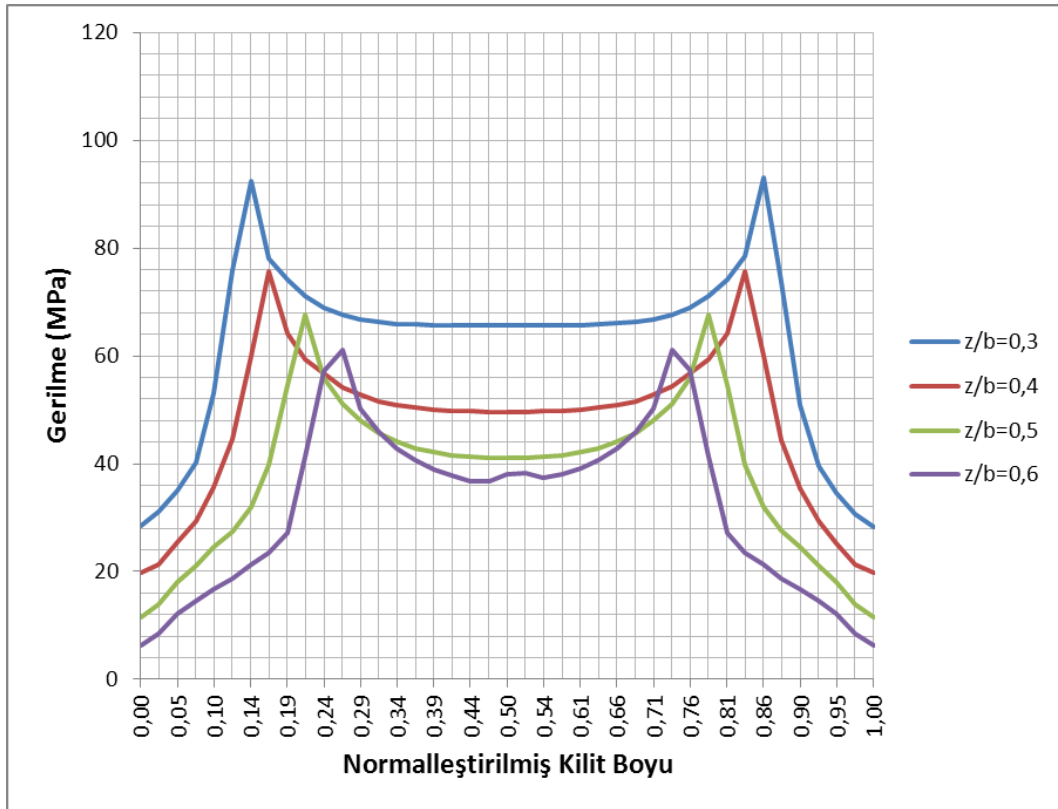


(e)  $z/b=0,7$

Şekil 6.71 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,3$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri



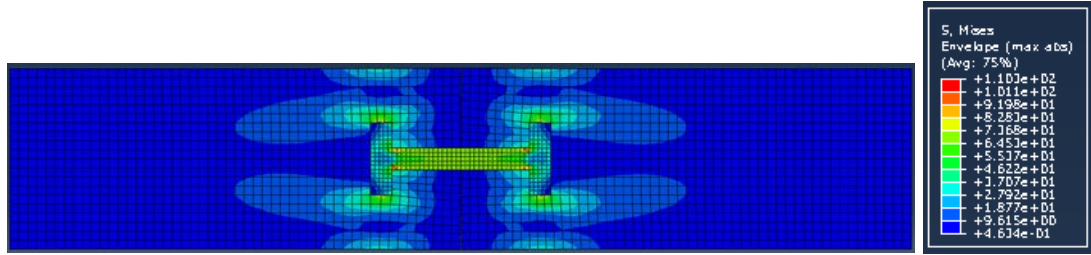
I profilli kilit elemanı üzerinde belirlenen Yol 1 boyunca elde edilen Gerilme-Normalleştirilmiş kilit boyu değerleri Şekil 6.72’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kilitler üzerinde belirlenen Yol 1 hattı boyunca, en yüksek gerilme değerleri sırasıyla (z/b) oranı 0,3-0,4-0,5 ve 0,6’ya eşit olduğu durumlarda kilitlerin iç köşe kısımlarına yakın bölgelerinde meydana gelmiştir. (z/b) oranı 0,6 ve 0,5 değerlerinde kilitlerin orta bölgelerindeki gerilme değerleri, kilitlerin uç bölgelerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum ani değişimleri meydana getirdiği için kilit gövdesi yükü taşıyamadan gerilmenin yüksek olduğu bölgelerden hasara uğramasına sebep olacağını düşündürmektedir. (z/b) oranı 0,4’e eşit olduğu numunede ise, Yol 1 boyunca meydana gelen gerilmeler incelendiğinde özellikle orta gövde kısmında ani değişimlerin olmadığı görülmüştür.



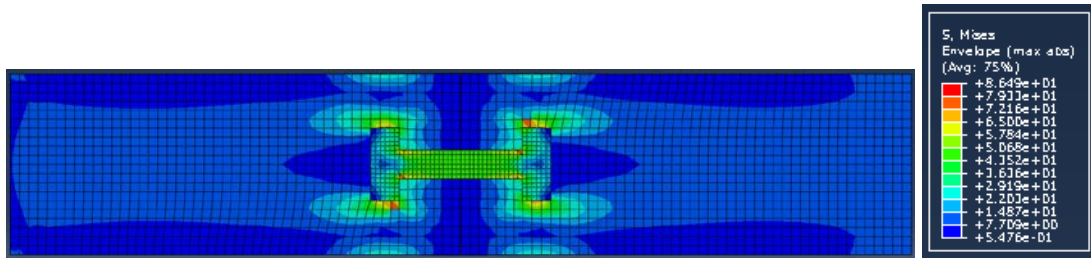
Şekil 6.72 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometrik parametrelerinin değişik z/b oranlarına göre Yol 1’den elde edilen gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  sabit geometrik parametrelerinin değişik (z/b) oranlarında olan I profilli kilit birleştirmeli kompozit yapılara ait gerilme dağılımları ve yapısal gerilme değerleri

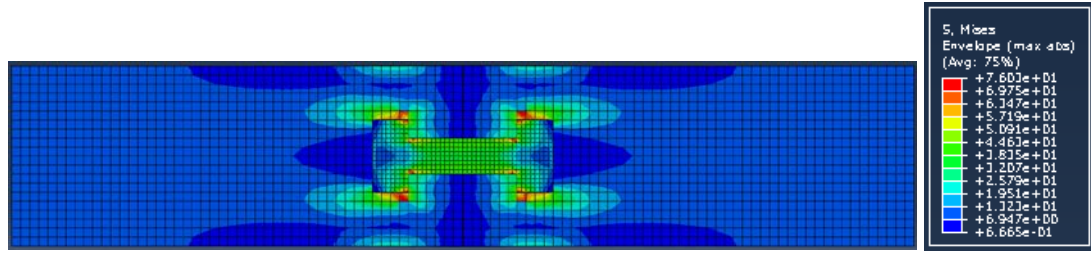
Şekil 6.73'de verilmiştir. Kompozit yapıları oluşturma oranı olan (z/b) oranı 0,3'den 0,6 değerine kadar en yüksek gerilme değerleri düşme eğiliminde olup, (z/b) oranı 0,3 değerinde en yüksek gerilme değeri maksimum artış göstermektedir.



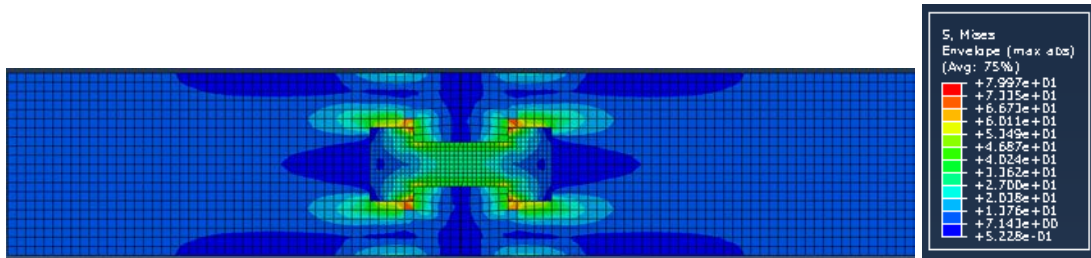
(a) z/b=0,3



(b) z/b=0,4



(c) z/b=0,5

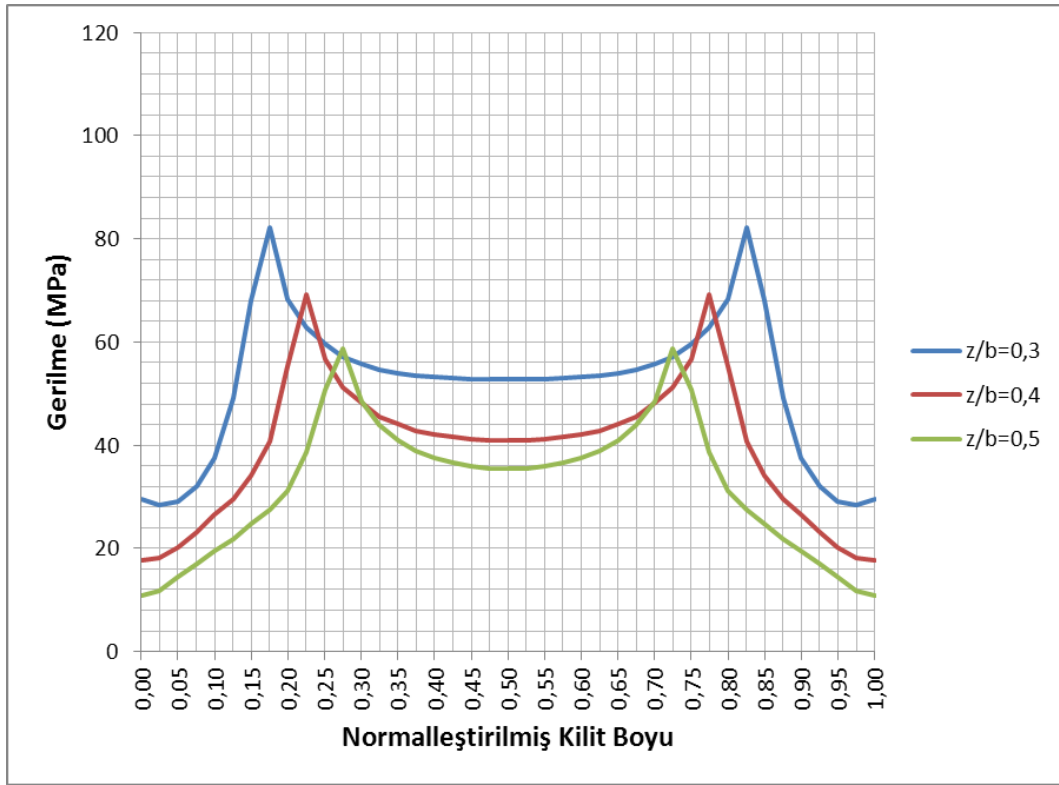


(d) z/b=0,6

Şekil 6.73 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,4$  geometrik parametrelerinin değişik z/b oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri

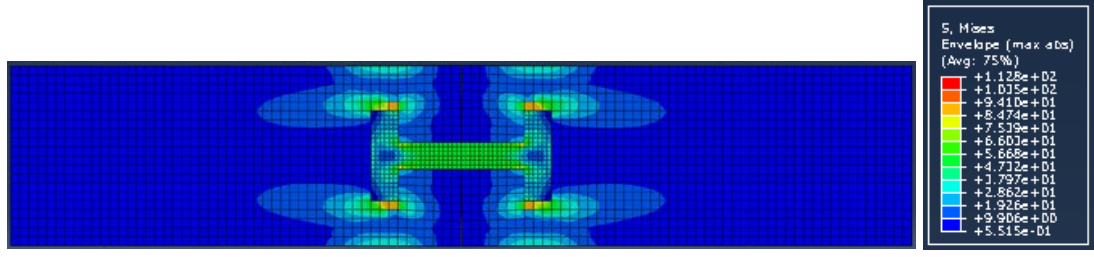
I profilli kilit elemanı üzerinde belirlenen Yol 1 boyunca elde edilen Gerilme-Normalleştirilmiş kilit boyu değerleri Şekil 6.74'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi

kilitler üzerinde belirlenen Yol 1 hattı boyunca, en yüksek gerilme değerleri ( $z/b$ ) oranı 0,3-0,4-0,5'e eşit olduğu durumlarda kilitlerin iç köşe kısımlarına yakın bölgelerinde tepe yapmış bir biçimde meydana gelmiştir. ( $z/b$ ) oranı 0,5 değerinde olduğu durumda ise kilidin orta bölgesindeki gerilme değerleri, kilidin uç bölgelerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Eşit yükler altında elde edilen en yüksek gerilme bölgeleri ve gerilme değerlerinin Yol 1 boyunca oluşturdukları ani değişimlerinin gerçekleştiği bölgeler, meydana gelebilecek hasar bölgeleri olarak öngörülmektedir. Tüm bu göstergeler göz önünde bulundurularak, ( $z/b$ ) oranı 0,5'e eşit olduğunda, Yol 1 boyunca oluşan en yüksek gerilmelerin en düşük değerinde ve olabildiğince bütün gerilme değerleri arasında ani değişimlerin gerçekleşmediği kilit bağlantısının, en iyi yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

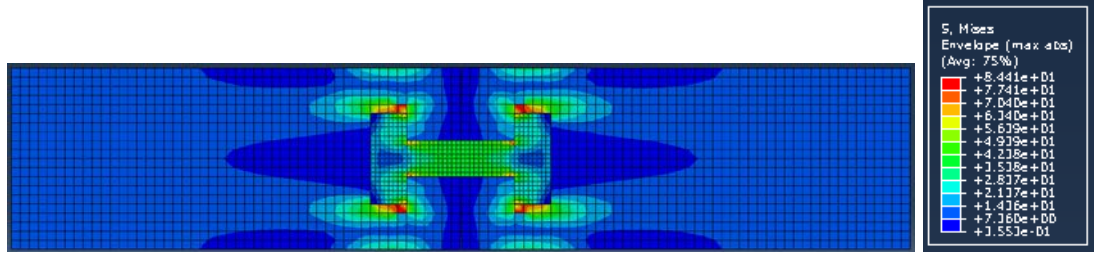


Şekil 6.74 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri

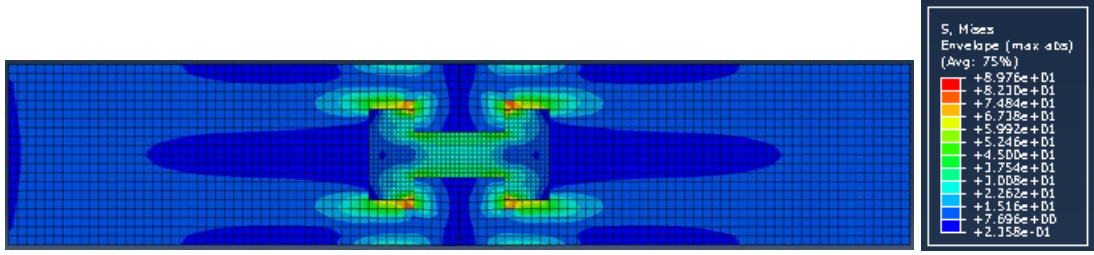
$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  sabit geometrik parametrelerinin değişik ( $z/b$ ) oranlarında olan I profilli kilit birleştirmeli kompozit yapılara ait gerilme dağılımları ve yapısal gerilme değerleri Şekil 6.75'de verilmiştir. Şekilden de ( $z/b$ ) oranı 0,3'den 0,5 değerine kadar en yüksek gerilme değerleri düşme eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır.



(a)  $z/b=0,3$



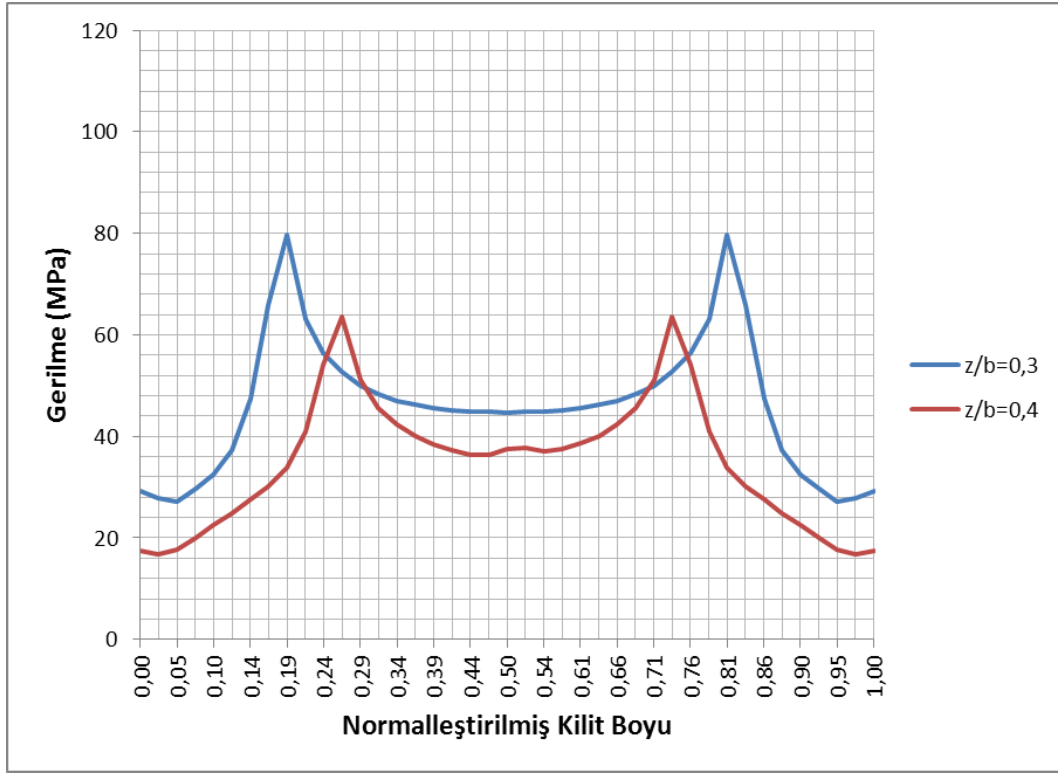
(b)  $z/b=0,4$



(c)  $z/b=0,5$

Şekil 6.75 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,5$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri

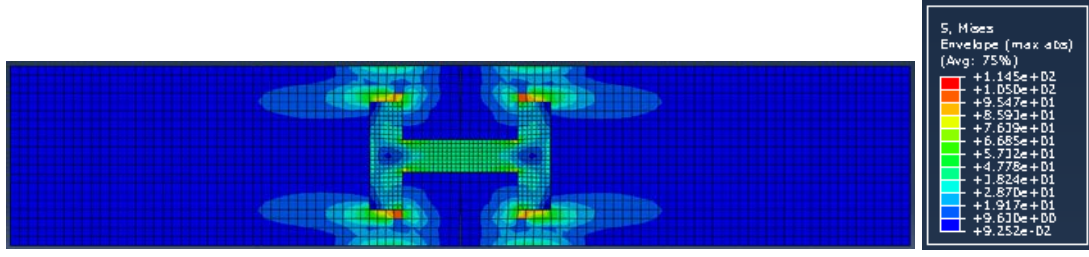
I profilli kilit elemanı üzerinde belirlenen Yol 1 boyunca elde edilen Gerilme-Normalleştirilmiş kilit boyu değerleri Şekil 6.76'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kilitler üzerinde belirlenen Yol 1 hattı boyunca, en yüksek gerilme değerleri ( $z/b$ ) oranı 0,3'e eşit olduğu durumda kilidin uç kısımlarına yakın bölgelerinde tepe yapmış bir biçimde meydana gelmiştir. ( $z/b$ ) oranı 0,4 değerinde olduğu durumda ise kilidin orta bölgelerindeki gerilme değerleri, kilidin uç bölgelerine göre daha yüksek elde edilmiştir. Eşit yükler altında elde edilen en yüksek gerilme bölgeleri ve gerilme değerlerinin Yol 1 boyunca oluşturdukları ani değişimlerinin gerçekleştiği bölgeler, meydana gelebilecek hasarlı bölgeler olarak öngörülmektedir. ( $z/b$ ) oranı 0,4'ye eşit olduğunda, Yol 1 boyunca oluşan en yüksek gerilmelerin en düşük değerde ve kilit orta kısmında da gerilme değerlerinde ani değişimlerin gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Bundan dolayı bu kilit bağlantısının en iyi yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



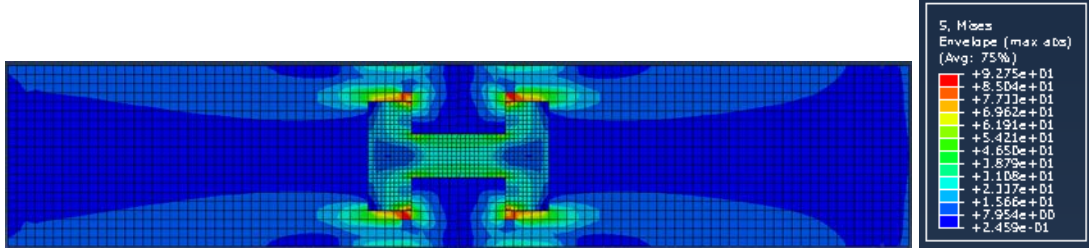
Şekil 6.76 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre Yol 1'den elde edilen gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  sabit geometrik parametrelerinin değişik ( $z/b$ ) oranlarında olan I profilli kilit birleştirmeli kompozit yapılara ait gerilme dağılımları ve yapısal gerilme değerleri Şekil 6.77'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kompozit yapıları oluşturma oranı olan ( $z/b$ ) oranı 0,3'den 0,4 değerine kadar en yüksek gerilme değerleri düşme eğilimindedir.





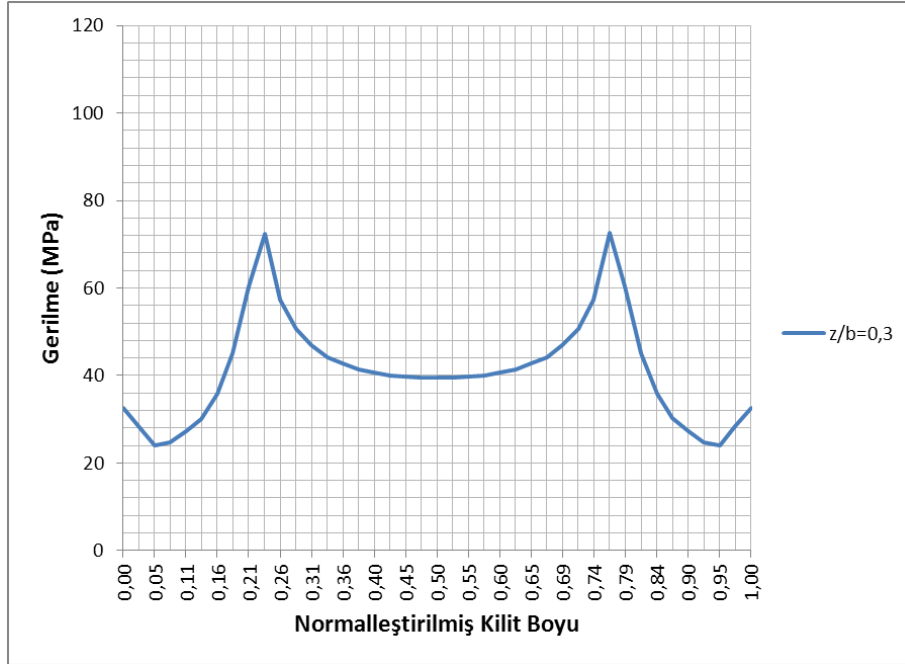
(a)  $z/b=0,3$



(b)  $z/b=0,4$

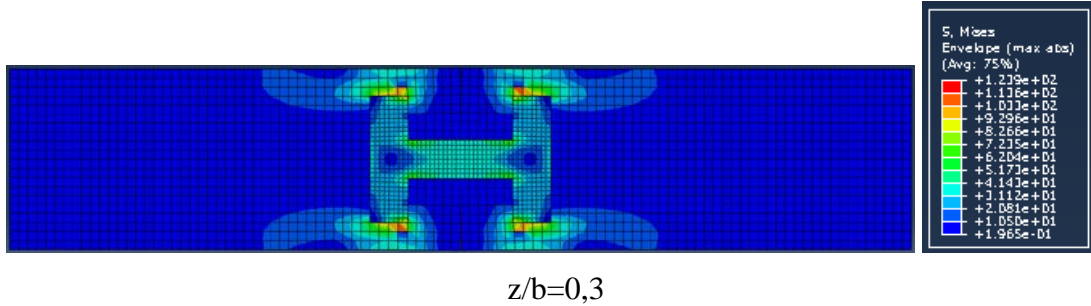
Şekil 6.77 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,6$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri

I profilli kilit elemanı üzerinde belirlenen Yol 1 boyunca elde edilen Gerilme-Normalleştirilmiş kilit boyu değerleri Şekil 6.78’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kilitler üzerinde belirlenen Yol 1 hattı boyunca, en yüksek gerilme değeri kilidin iç köşe kısımlarına yakın bölgelerde tepe yapmış bir biçimde meydana gelmiştir.



Şekil 6.78 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre Yol 1’den elde edilen gerilme değişimleri

$h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  sabit geometrik parametrelerinin  $z/b=0,3$  oranında olan I profilli kilitli kompozit yapılara ait gerilme dağılımları ve yapısal gerilme değerleri Şekil 6.79'da verilmiştir.



Şekil 6.79 :  $h/2W=0,5$  ve  $b/W=0,7$  geometrik parametrelerinin değişik  $z/b$  oranlarına göre oluşturulan birleştirmelerin Abaqus yazılımı ile gerilme analizleri

### 6.3.3 Çekme yükü altında hasar analizi

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilen gerilme analizlerinden elde edilen en iyi yük taşıma kapasitesine sahip olan numunenin hasar analizi Hashin Hasar Kriteri kullanılarak  $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranlarına sahip olan numune için gerçekleştirilmiştir. Böylece gerilme analizinden elde edilen sonuçlar hasar analizi ile desteklenmiştir. Hashin Hasar Kriterine göre hasar indeksinin bir (1) olması durumunda hasarın oluştuğundan dolayı hasar yükleri, sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen hasar indeksi değerinin 1 değerine yaklaştırılması ile bulunmuştur.

Abaqus sonlu elemanlar programında tabakalı olarak modellenmiş ve birleştirilmiş yarı numunelerine ait hasar oluşumlarının ilk önce bağlantı kilidinde meydana gelmesinden dolayı bağlantı kilidini oluşturan kompozit tabakalarına ait hem fiber ve hem de matris için ilk hasar yükleri Tablo 6.9'da verilmiştir. 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 çeki hasarının merkezdeki tabakada oluştuğu ve yükleme miktarını arttırdıkça da hasarın merkezden numunenin dış yüzeyine doğru ilerlediği belirlenmiştir. İkinci hasar şekli olarak

matris bası hasarı elde edilmiş ve bu hasara ait indeks incelendiğinde matris çeki hasar indeksine çok yakın değerlerde olduğu elde edilmiştir. Daha sonra fiber bası olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.9 Oluşan ilk hasar yükleri ve hasar indeksleri

İlk Hasar Oluşum Yükleri (N/mm <sup>2</sup> )	Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
16,8	1	1,01	0,572	0,138
16,75	0,999	1	0,569	0,137
22,1	1,387	1,757	1	0,239

Hasar oluşumları kesit boyunca incelendiğinde hasarın veya hasarların kompozit numunenin dış yüzeylerine ulaştığı anda kompozit yapının tümüyle hasara uğramıştır. Buna göre bağlantı kilidinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri Tablo 6.10'da gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi kompozit yapının dış yüzeyinde ilk hasarın matris bası hasarı olarak meydana geldiği ve hasar indeksi değeri 1 olarak tespit edilmiştir.

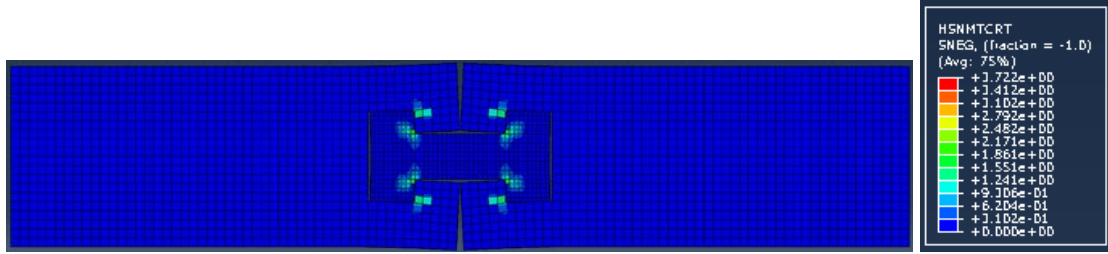
Tablo 6.10 Bağlantı kilidinin maksimum hasar yükünde oluşan hasar indeksleri

Deney yükü (N/mm <sup>2</sup> )		Matris Bası Hasarı	Matris Çeki Hasarı	Fiber Bası Hasarı	Fiber Çeki Hasarı
32	Maksimum hasar indeksi değeri	2,23	3,72	2,19	0,50
	İlk hasarın meydana geldiği dış yüzeydeki hasar indeksi değeri	1	1,40	1,20	0,29
22,3	Maksimum hasar indeksi değeri	1,40	1,78	1,02	0,24
	İlk hasarın meydana geldiği dış yüzeydeki hasar indeksi değeri	0,61	1	1	0,14

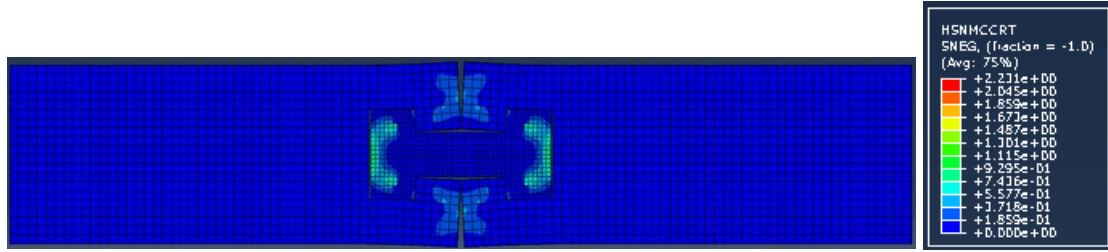
$h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki bağlantı kilidine ait Hashin hasar analizi hem matris hem de fiber bileşenlerinin çeki ve bası durumları için gerilme dağılımları ve değerleri Şekil 6.80'de verilmiştir. Matris çeki hasarı bağlantı kilidinin üzerinde iç köşe kısımlarında ve yarı



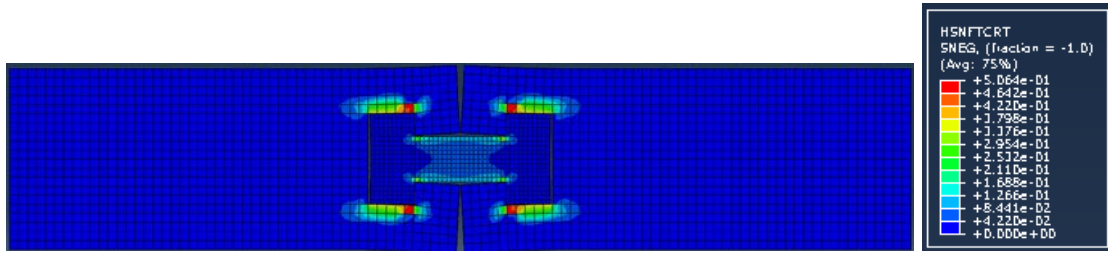
numuneler üzerinde meydana geldiği Şekil 6.80 (a)'da görülmektedir. Matris bası hasarı ise daha çok bağlantı kilidinin genişliği boyunca olduğu Şekil 6.80 (b)'de gösterilmiştir. Şekil 6.80 (c)'de fiber çeki hasarı bağlantı kilidinin orta gövdesinde ve yarı numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Ancak indeks değerlerine baktığımızda daha tam olarak hasara uğramadığı tespit edilmiştir. Fiber bası hasarı bağlantı kilit kollarının uç köşe kısımlarında meydana gelmiştir.



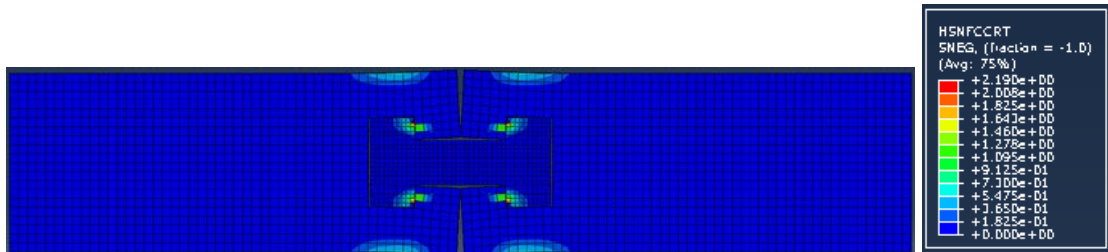
(a) Matris Çeki Hasarı (32 N/mm<sup>2</sup>)



(b) Matris Bası Hasarı (32 N/mm<sup>2</sup>)



(c) Fiber Çeki Hasarı (32 N/mm<sup>2</sup>)



(d) Fiber Bası Hasarı (32 N/mm<sup>2</sup>)

Şekil 6.80 :  $h/2W=0,5$ - $b/W=0,5$ - $z/b=0,5$  oranındaki birleştirmeye ait 32 N/mm<sup>2</sup> kuvvet altında Hashin Hasar Teorisi kullanılarak hasar analizleri

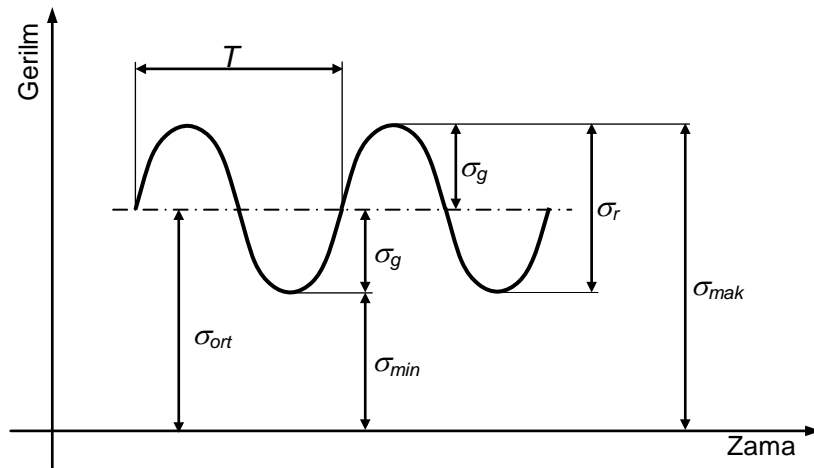
Sonuç olarak hasar analizinden elde edilen maksimum hasar yükü değeri ile deneylerden elde edilen maksimum hasar yükü değeri birbirlerini desteklediği tespit edilmiştir.

#### 6.4 Bağlantı Elemanının Yorulma Performansı

$[0/90]_{4s}$  tabakalı birleştirilmiş kompozit yapılarda oluşan yorulma performansları deneysel olarak incelenmiştir. Yorulma deneylerinde kullanılan I şekilli geçme bağlantı elemanları, deneysel ve nümerik olarak elde edilen optimizasyon verilerine göre  $h/2W=0,5$ ,  $b/W=0,5$ ,  $z/b=0,5$  olarak seçilmiştir. Deney numuneleri ve kelebek şeklindeki kilit bağlantı elemanları, kompozit bir plakadan su jeti yardımıyla geometrik parametrelere uygun bir şekilde kesilmiştir. Yorulma deneyleri 0,1 sabit yük oranında ve farklı maksimum yorulma yüklerinde yapılmıştır. Yapılan birleştirmeleri birbirleri ile karşılaştırabilmek için deneyler 10 Hz'lik bir yorulma frekansı altında ve sinüs eğrisi şeklindeki sabit bir genlikte çeki-çeki yükü altında gerçekleştirilmiştir.

##### 6.4.1 Tekrarlı Yükleme Durumu

Yorulma, malzemelerin statik gerilme veya yük altındaki davranışlarından farklı olarak tekrarlı gerilme veya yüklemelerin söz konusu olduğu durumlardaki davranışlardır. Genel olarak yük değişimi sinüzoidal olur. Tekrarlı yükleme çeşitleri sırasıyla; genel değişken, dalgalı değişken ( $R=0$ ) ve tam değişken ( $R=-1$ ) yükleme tipleridir (Sayman, 1997). Bu proje çalışmasındaki yorulma deneylerinde yükleme durumu olarak, Şekil 6.81'de gösterildiği gibi genel değişken yükleme durumu kullanılmıştır.



Şekil 6.81 : Genel değişken yükleme durumu

Tekrarlı yüklemelerde gerilmeler  $\sigma_{maks}$  maksimum üst gerilme ile  $\sigma_{min}$  minimum alt gerilme arasında değişir. Ortalama gerilme  $\sigma_{ort}$  maksimum ve minimum gerilmelerinin cebirsel ortalamasıdır. Ortalama gerilme aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$$

Gerilme aralığı  $\sigma_r$ ; aşağıdaki gibi maksimum gerime ile arasındaki minimum gerilme arasındaki cebirsel farka eşittir.

$$\sigma_r = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$$

Gerilme genliği  $\sigma_g$ , gerilme aralığının yarısına eşittir. Aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\sigma_g = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$$

Gerilme oranı ( $R$ ) ve genlik oranı ( $A$ ) olmak üzere iki tip tekrarlı tesir halinde yorulma yapılır ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Gerilme oranı; } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}}, \quad \text{genlik oranı; } A = \frac{\sigma_g}{\sigma_{ort}}$$

Diğer yorulma parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$\text{Periyot süresi} = T (s)$$

$$\text{Yük tekrar sayısı} = N$$

$$\text{Yük frekansı} = f = \frac{1}{T} (\text{Hz})$$

#### 6.4.2 Farklı Yük Seviyelerinde Yorulma Performansları

Yorulma deneyleri 23°C oda sıcaklığında ve %50 bağıl nem koşullarında yapılmıştır. Değişik  $F_{maks}$  yükleri altında birleştirmelerin yorulma performansları incelenmiştir.  $F_{maks}$  yorulma

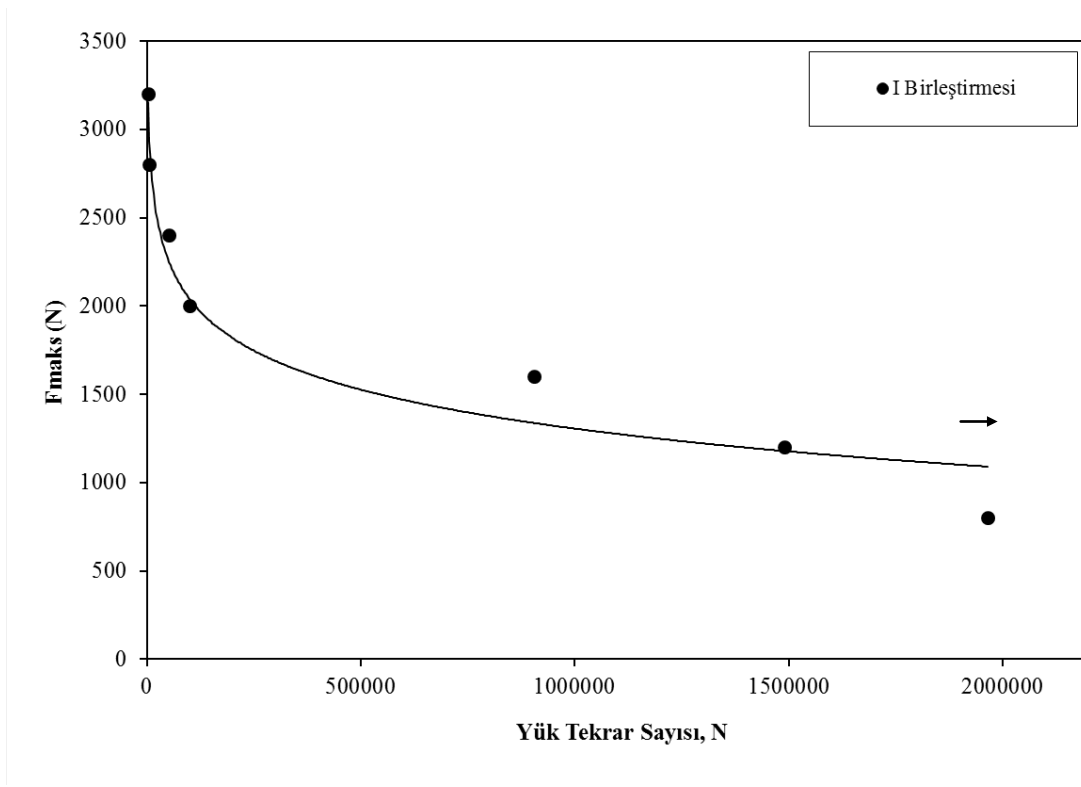
yükü, sıkı geçme I birleştirmelerinin ortalama statik hasar yükü olan 4000N'un %80, %70, %60, %50, %40, %30 ve %20 değerlerinde alınmıştır.

I birleştirmelerinin değişik yorulma yükleri altında gerçekleşen yorulma yük tekrar sayıları Tablo 6.11'de verilmiştir. Her bir yorulma deneyi en az üç kere yapılmıştır. Tabloda her bir maksimum yük oranının ortalama yük değerleriyle genlik yük değerleri verilmiştir. Ayrıca tabloda, aynı yorulma şartlarında elde edilen yorulma yük tekrar sayılarının ortalamaları da verilmiştir. Burada yapılan yorulma deneyleri 2.000.000 yük tekrar sayısından sonra numunelerin hasara uğramaları beklenilmeden sonlandırılmıştır.

Tablo 6.11 R=0,1 yük oranında sıkı geçme kelebek birleştirmelerinin yorulma verileri

<b>Maksimum Yük oranı</b>	<b>F<sub>maks</sub> (N)</b>	<b>F<sub>min</sub> (N)</b>	<b>Ort. Yük (N)</b>	<b>Genlik Yükü (N)</b>	<b>Yorulma Yük Tekrar Sayısı, N</b>	<b>Ortalama Yorulma Yük Tekrar Sayısı, N</b>
%80	3200	320	1760	1440	3076	<b>3018</b>
					3091	
					2889	
%70	2800	280	1540	1260	5875	<b>5425</b>
					5246	
					5156	
%60	2400	240	2640	1080	52568	<b>52734</b>
					50292	
					55344	
%50	2000	200	1100	900	105350	<b>101739</b>
					107320	
					92548	
%40	1600	160	880	500	929870	<b>905956</b>
					893453	
					894545	
%30	1200	120	660	540	1486447	<b>1491042</b>
					1512413	
					1474267	
%20	800	80	440	360	1984257	<b>1965847</b>
					1945100	
					1968184	

Birleştirmelerin yorulma yük tekrar sayılarının maksimum yorulma yüklerine göre değişimleri Şekil 6.82’de gösterilmiştir. Maksimum yük oranının %20 seviyelerinde yapılan yorulma deneylerinde yorulma hasarının meydana gelmemesinden dolayı 2.000.000 yük tekrar sayısından sonra deney sonlandırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum yük oranının %50 seviyelerinden sonra oldukça yüksek yorulma performanslarının elde edildiği tespit edilmiştir.

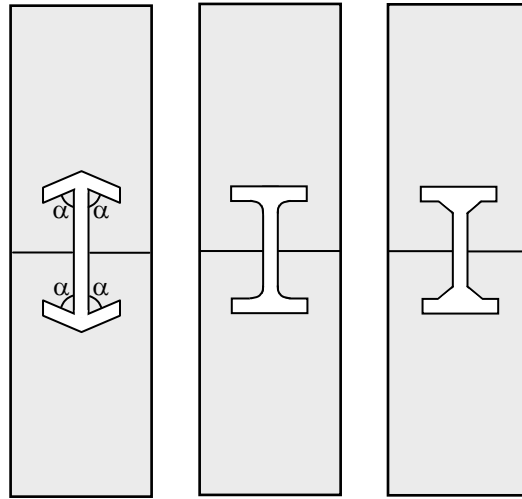


Şekil 6.82 : Birleştirmelerin yorulma performansları

## 6.5 Değişik Yükleme Durumlarına Göre Geometrik Geliştirme

Optimizasyon çalışmalarının sonuçları göz önüne alınarak I şeklindeki geçme bağlantı elemanı Şekil 6.83’de gösterildiği gibi geometrik olarak geliştirilecektir. İlk olarak I şeklindeki geçme bağlantısının alt ve üst yatay kollarının açılarının etkileri ve daha sonra geometrik olarak tasarım değişikliklerinin etkileri incelenmiştir. Burada kol açısı olarak 45° ve 60° açıları alınmıştır. Kol radüs ve pah ölçütleri ise 2,5 mm olarak alınmıştır. Yapılan deney ve gerilme analizinden  $(h/2W)=0,5$ ,  $(b/W)=0,5$  ve  $(z/b)=0,5$  oranlarındaki kilidinin yük taşıma

kabiliyetinin en iyi olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı bu oranlardaki kilit elemanın geometrik olarak iyileştirilmesi yapılmıştır. Geometrik olarak geliştirilen kilitli numuneler çekme yüklemesi, üç nokta eğilme yüklemesi ve dört nokta eğilme yüklemesi olmak üzere toplam üç farklı yüklemeye çeşidi altında deneysel analizi ve sonlu elemanlar metodunu kullanan ABAQUS programı ile gerilme analizi yapılmıştır. Deneyler en az üçer adet yapılmış ve ortalama değerleri alınmış ve en yakın grafik gösterimleri verilmiştir. Geliştirme analizlerinde kullanılan yüklemeye değerleri optimizasyon için kullanılan yüklemeye değerleri ile aynı kullanılmıştır. Bu şekilde aynı yüklemeler ile oluşan gerilme yığılmalarından yeni hasar bölgeleri tahmin edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre de geometrik model biraz daha geliştirilmiştir.

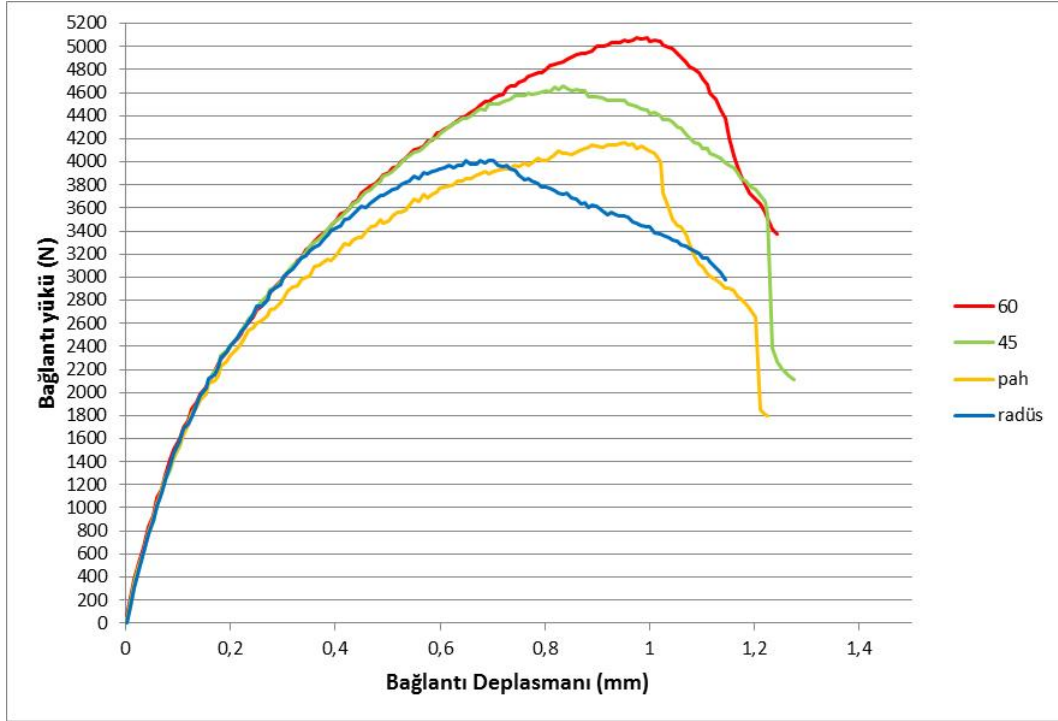


Şekil 6.83 : Geometrik geliştirme

### 6.5.1 Çekme Yüklemesi

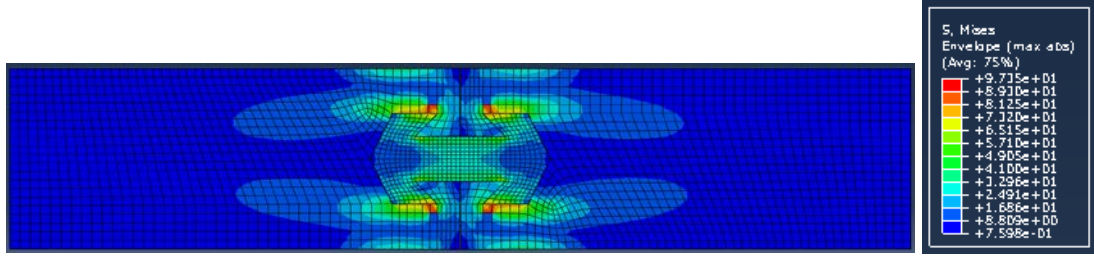
Seçilen kilit elemanın uç kolları ile kilit gövdesinin arasındaki açılarının  $60^\circ$  ve  $45^\circ$  olma durumu ile kilit elemanın uç kollarının gövdeye göre dik kalması durumunda iç köşelerindeki pah ve radüs değışiklerinin etkileri deneysel olarak Şekil 6.84’de gösterilmiştir. Radüslü ve pahlı numunelerde hemen hemen aynı hasar yükleri elde edilirken açılı durumlarda hasar yükü daha yüksek olarak elde edilmiştir. Hasar yükü değerlerini göz önüne aldığımızda  $60^\circ$  açılı kilitin hasar yükü diğerlerine göre en yüksek olarak elde edilmiştir. Çekme yüklemesi deneyi esnasında özellikle kilit elemanın her iki tarafındaki yarı numune

kısımlarının yana doğru açılmalarını açılı kilit kollarının bir miktar engellediği gözlemlenmiştir. Bu nedenden dolayı 60°lik açılı kilit bağlantıda hasar yükü 5000N civarında maksimum olarak elde edilmiştir. Klasik kilit bağlantıda elde edilen hasar yükleri ortalama 4000N civarında bulunduğuna göre 60°lik açılı kilit bağlantıda hasar yükü % 25 civarında iyileştirilmiştir.

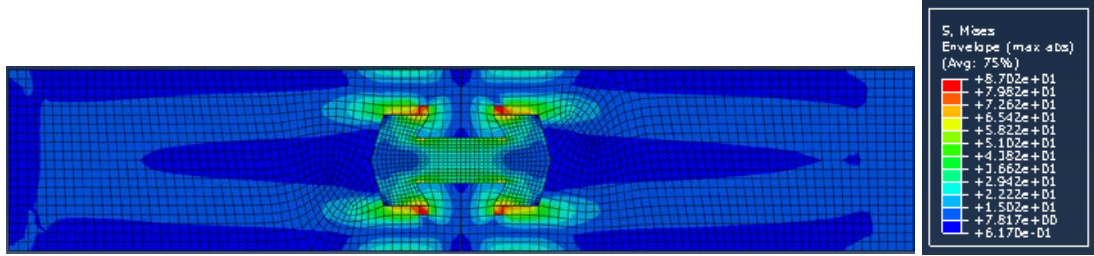


Şekil 6.84 : Geometrik geliştirmelerin çekme yükü deneyleri

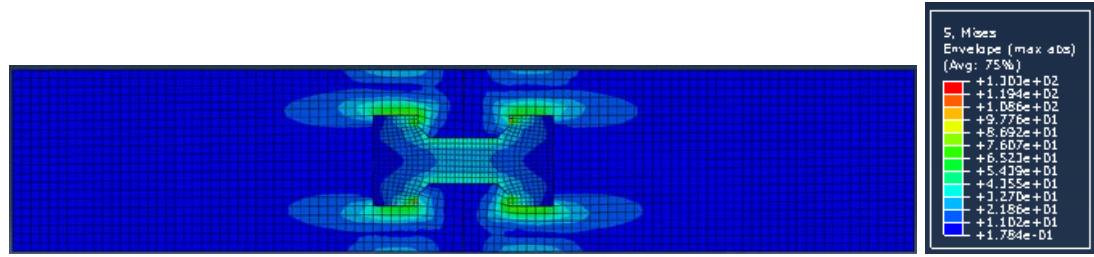
Seçilen kilit elemanın uç kolları ile kilit gövdesinin arasındaki açılarının 60° ve 45° olma durumundaki gerilme yığılmaları Şekil 6.85 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Kilit elemanının uç kollarının gövdeye göre dik kalması durumunda iç köşelerindeki pah ve radüs değişiklerinin etkileri Şekil 6.85 (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Radüslü ve pahlı numunelerde hasar kilit uçlarında beklenirken açılı durumlarda hasar daha çok numune üzerinde olması beklenmektedir. Gerilme değerlerini de göz önüne aldığımızda 60° açılı kilit diğerlerine göre daha geç hasara uğraması beklenmektedir. Bu durumun da deneysel verilerle örtüşmekte olduğu görülmektedir. Böylelikle hem deneysel veriler hem nümerik veriler birbirleriyle desteklenmiştir.



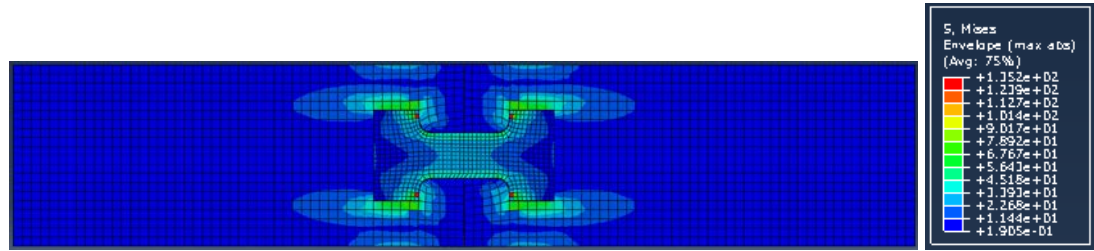
(a) 45



(b) 60



(c) pah



(d) radüs

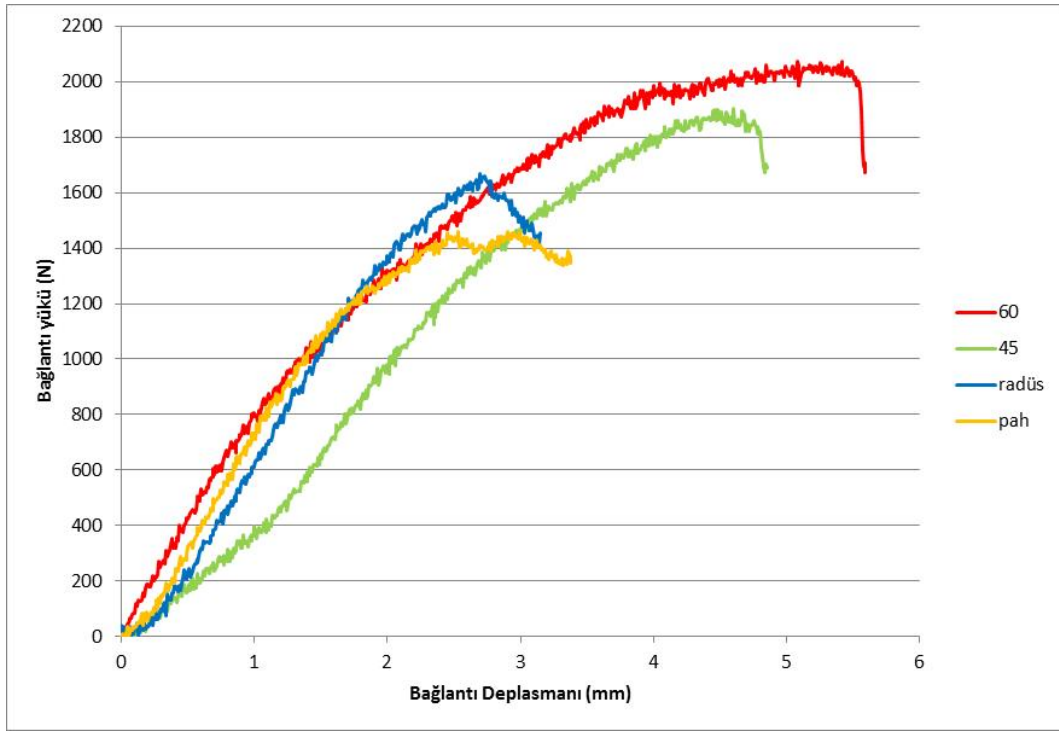
Şekil 6.85 : Çekme yükü altında geometrik geliştirme

## 6.5.2 Üç Nokta Eğilme Yükleme

Seçilen kilit elemanın uç kollarının 60°, 45°, pahlı ve radüslü olma durumlarında yapılan deneylerden elde edilen ortalama veriler grafikler halinde Şekil 6.86’da gösterilmiştir. Radüslü ve pahlı numunelerde klasik numunelerden elde edilen ortalama hasar yüküne hemen hemen yakın hasar yükleri elde edilmiştir. Açılı durumlarda hasar yükü pahlı ve radüslü

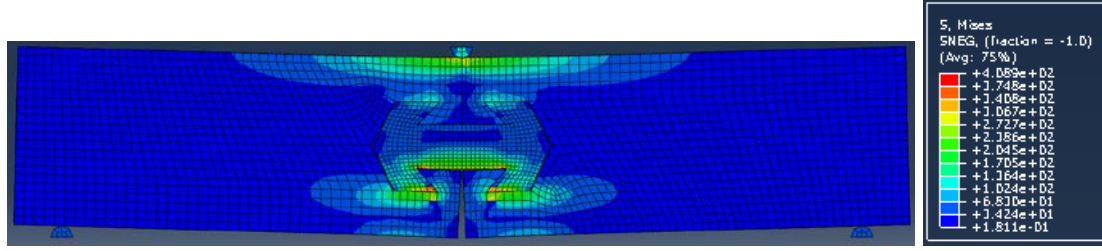


durumlara göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Hasar yükü değerlerini göz önüne aldığımızda 60° açılı kilitin hasar yükü diğerlerine göre en yüksek olarak elde edilmiştir. Açılı kilit elemanın eğilme esnasında yarı numuneleri ekstra tutma durumundan dolayı 60°lik açılı kilit bağlantıda hasar yükü 2000N civarında maksimum olarak elde edilmiştir. Klasik kilit bağlantıda elde edilen hasar yükleri ortalama 1400N civarında bulunduğuna göre 60°lik açılı kilit bağlantıda hasar yükü ortalama % 40 civarında iyileştirilmiştir.

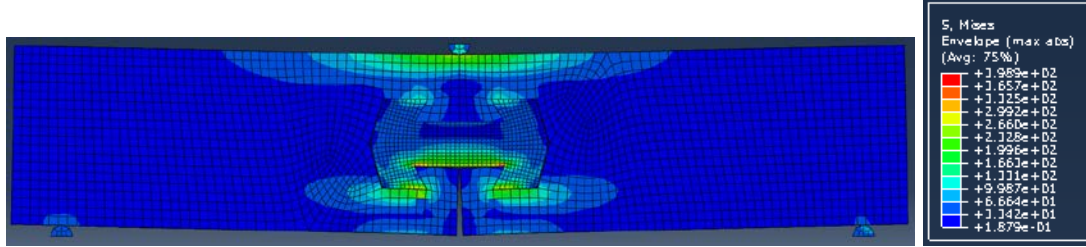


Şekil 6.86 : Geometrik geliştirmelerin üç nokta eğilme yükü deneyleri

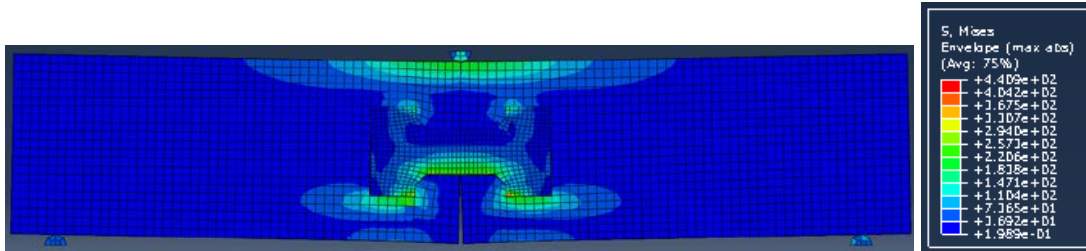
Seçilen kilit elemanın uç kolları ile kilit gövdesinin arasındaki açılarının 60° ve 45° olma durumdaki gerilme yığılmaları Şekil 6.87 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Kilit elemanının uç kollarının gövdeye göre dik kalması durumunda iç köşelerindeki pah ve radüs değişiklerinin etkileri Şekil 6.87 (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Radüslü ve pahlı numunelerde hasar kilit uçlarında beklenirken açılı durumlarda hasar hem kilit uç köşelerinde hem de kilit gövde iç köşelerinde olması beklenmektedir. Gerilme değerlerini de göz önüne aldığımızda 60° açılı kilit diğerlerine göre daha geç hasara uğraması beklenmektedir.



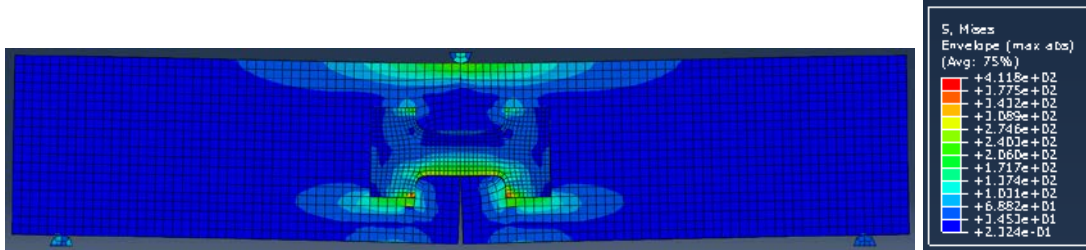
(a) 45



(b) 60



(c) pah



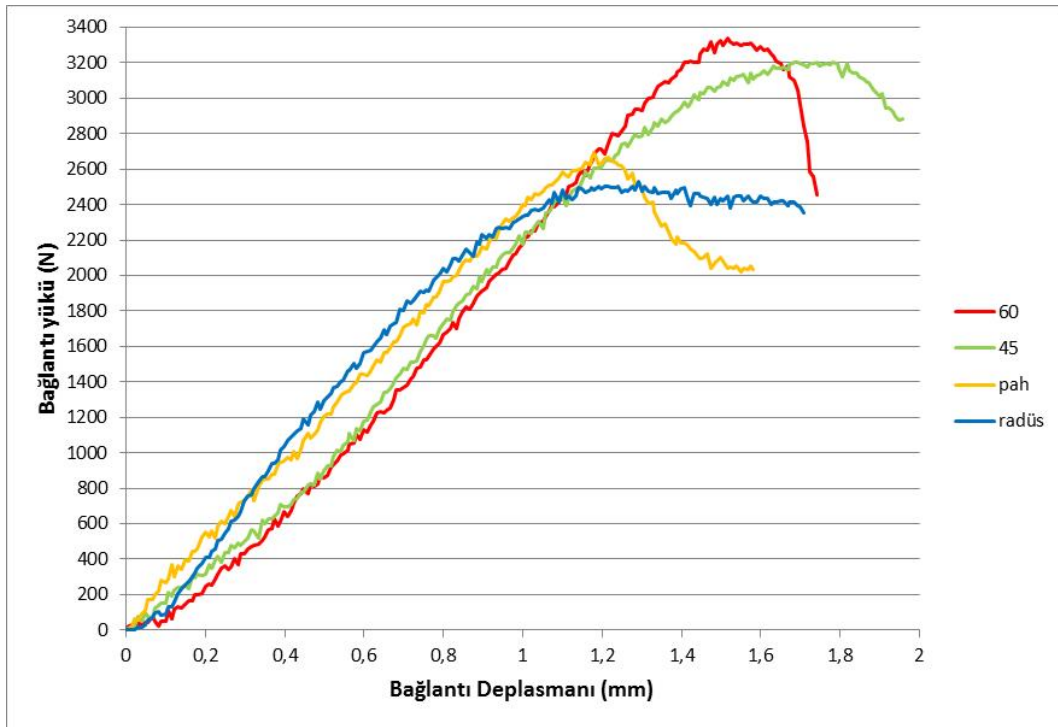
(d) radüs

Şekil 6.87 : Üç nokta eğilme yükü altında geometrik geliştirme

### 6.5.3 Dört Nokta Eğilme Yükleme

Seçilen kilit elemanın uç kollarının 60°, 45°, pahlı ve radüslü olma durumlarında yapılan dört nokta eğilme deneylerinden elde edilen ortalama veriler grafikler halinde Şekil 6.88'de gösterilmiştir. Radüslü ve pahlı numunelerde klasik numunelerden elde edilen ortalama hasar yüküne hemen hemen yakın hasar yükleri elde edilmiştir. Açılı durumlarda hasar yükü pahlı

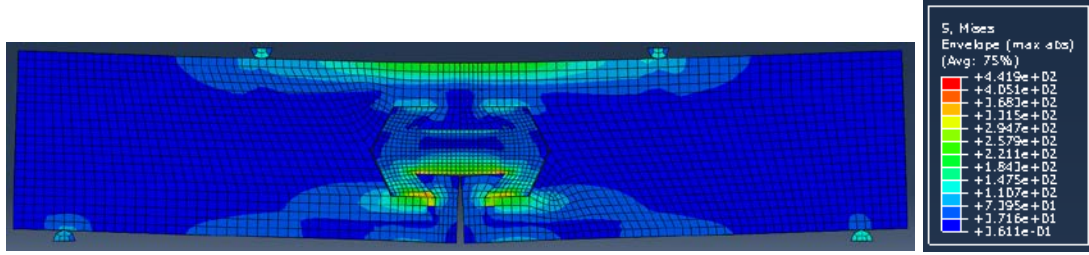
ve radüslü durumlara göre daha yüksek olarak elde edilmiştir. Hasar yükü değerlerini göz önüne aldığımızda 60° açılı kilitin hasar yükü değerlerine göre en yüksek olarak elde edilmiştir. Fakat 45° açılı kilitin hasar yükü değerlerine oldukça yakın elde edilmiştir. Açılı kilit elemanın eğilme esnasında yarı numuneleri ekstra tutma durumundan dolayı 60°lik açılı kilit bağlantıda hasar yükü 3300N civarında maksimum olarak elde edilmiştir. Klasik kilit bağlantıda elde edilen hasar yükleri ortalama 2600N civarında bulunduğuna göre 60°lik açılı kilit bağlantıda hasar yükü ortalama % 27 civarında iyileştirilmiştir.



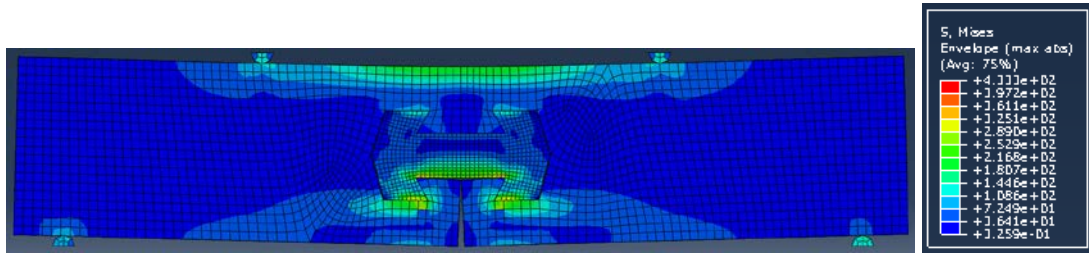
Şekil 6.88 : Geometrik geliştirmelerin dört nokta eğilme yükü deneyleri

Seçilen kilit elemanın uç kolları ile kilit gövdesinin arasındaki açılarının 60° ve 45° olma durumundaki gerilme yığılmaları Şekil 6.89 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Kilit elemanın uç kollarının gövdeye göre dik kalması durumunda iç köşelerindeki pah ve radüs değişikliklerinin etkileri Şekil 6.89 (c) ve (d)'de gösterilmiştir. Radüslü ve pahlı numunelerde hasar kilit uçlarında beklenirken açılı durumlarda hasar hem kilit uç köşelerinde hem de kilit gövde iç köşelerinde olması beklenmektedir. Gerilme değerlerini de göz önüne aldığımızda 60° açılı kilit diğerlerine göre daha geç hasara uğraması beklenmektedir. 60° açılı kilit bağlantı

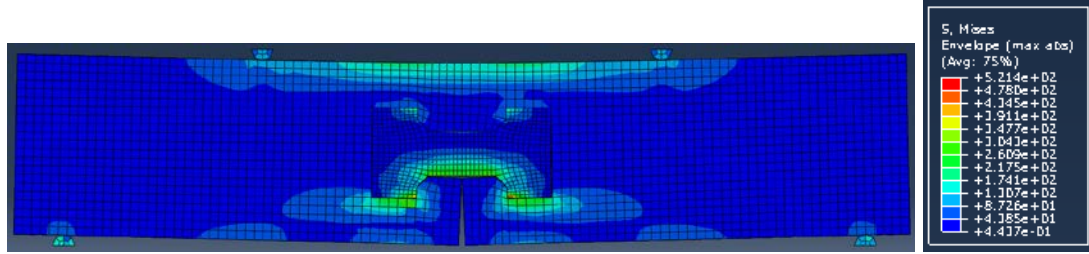
elemannın köşe bölgelerinin geliştirilmesi ile yük taşıma kapasitesinin daha da artması beklenmektedir.



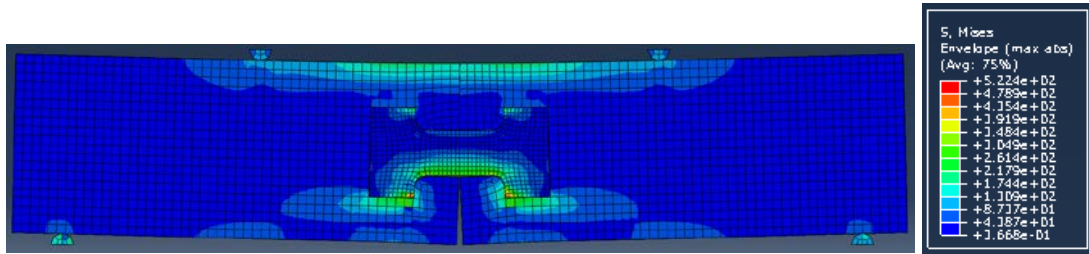
(a) 45



(b) 60



(c) pah



(d) radius

Şekil 6.89 : Dört nokta eğilme yükü altında geometrik geliştirme

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1 Sonuçlar

Bu çalışmada I profilli bağlantı elemanının farklı geometrik parametrelerinin ( $z/b$ ,  $b/W$ ,  $h/2W$ ) hasar yükleri üzerindeki etkileri hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar metodu ile analizi ABAQUS paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney ve nümerik çalışma çekme, üç nokta ve dört nokta eğilme yüklemesi altında yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan cam elyaf-epoksi kompozit malzeme sıcak presleme yöntemiyle imal edilmiştir.

Çeşitli geometrilerdeki I profilli bağlantı elemanı üzerlerinde oluşan gerilme dağılımlarını ve değerlerini karşılaştırabilmek için değişik Yol hatları üzerindeki gerilmeler ele alınmıştır.

- 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.
- 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.
- Deneysel çalışmada ( $z/b$ ) 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.
- Deneysel 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
- Özellikle çekme yüklemesinde, I profilli kilidin uç genişliğinin numune genişliğine oranının büyük olduğu değerlerde, bağlantı ve numune üzerinde ilk hasarın daha hızlı oluştuğu ile birleştirmenin daha az yük iletebildiği belirlenmiştir.
- I profilli kilidin yarı uzunluğunun numune genişliğine oranının küçük olduğu değerlerde, numunelerin üzerlerindeki gerilme alanları daha dar olmakla beraber daha çok kilit üzerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak mevcut diğer geometrik parametrelerin değerlerinin azaltıldığı numunelerde ise ilk hasar oluşumu geç meydana gelmiş olup önemli bir bölümünün kilit üzerinde bulunduğu tespit edilmiştir. Bu numunelerde I profilli kilitlerin, kompozit yapının kullanım ömrünün daha uzun olmasını sağladığı belirlenmiştir.
- Kullanılan alın birleştirmelerinde oluşabilecek ani hasar gelişimine bağlı olarak kopmalardan dolayı ana yapının tamiri mümkün olamamaktadır. Alın birleştirmeler, I profilli birleştirmeler ile desteklenecek olursa hasar oluşumu önlenerek yapının kullanım süresi arttırılabilir böylece ekonomik olması da sağlanabilir.

## 7.2 Öneriler

I profilli aln birleştirmelerin tasarımı sürecinde kullanılan geometrik parametrelerle oluşturulan birleştirmelerin geometrik şekillerindeki ani kesit değişimleri nedeniyle, yük iletimi esnasındaki gerilme yığılmalarını en aza indirecek şekilde bağlantı modelinin geometrisi geliştirilebilir. Ek olarak birleştirmenin çeşitli yapıştırıcı ve takviyelerle yapılmasıyla da I profilli bağlantı kilidi ile numuneler arasında daha farklı ve yüksek mekanik performanslar elde edilebilir. Ayrıca diğer aln birleştirme türleri ile beraber kullanılarak karma bir bağlantı yapısı da oluşturulabilir.

## KAYNAKLAR

- Adams, R.D.**, 1989: Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherents, A Review. *Journal of Adhesion.*, 30: 219-242.
- Airoldi, 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
- Aktaş, A., Dirikolu M. H.**, 2004: An experimental and numerical investigation of strength characteristics of carbon-epoxy pinned-joint plates. *Composites Science and Technology* 64, 1605–1611.
- Aktaş, A., Polat Z.**, 2010: Improving Strength Performance of Adhesively Bonded Single-lap, *Composite Joints*. DOI: 10.1177/0021998310369594.
- 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.
- Altan, G., Topçu, M.**, 2010: Experimental and numerical assessment of the improvement of the load-carrying capacities of butterfly-shaped coupling components in composite structures, *Journal of Mechanical Science and Technology*. DOI 10.1007/s12206-010-0340-5.
- 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, American Society for Testing and Materials.
- Aymerich, F., Onnis, R., Priolo, P.**, 2006: Analysis of the effect of stitching on the fatigue strength of single-lap composite joints. *Composites Science and Technology* 66, 166–175.
- 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.
- Baucom, J. N., Thomas, W. R., Qidwai, M. A.**, 2010: Tiled Composite Laminates, *Journal of Composite Materials* 2010 44: 3115, DOI: 10.1177/0021998310373516.
- 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.
- Boscolo, M., Zhang, X.**, 2010: A modelling technique for calculating stress intensity factors for structures reinforced by bonded straps. Part I: Mechanisms and formulation, *Engineering Fracture Mechanics* 77, 883–895.
- Boyd, S. W., Dulieu Barton, J. M., Rumsey, L.**, 2006: Stress analysis of finger joints in pultruded GRP Materials, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 26, 498–510.
- Breitzman, T. D., Iarve, E. V., Cook, G. A., Schoeppner, L. R. P.**, 2009: Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading, *Composites: Part A* 40, 1921–1930.
- Brink, D. D., Mailand, J. C., Levi, C. G., Leckie, F. A.**, 2009: Deformation behavior of model MMC scarf joints, *Composites: Part A* 40, 1407–1418.
- Broughton, W. R., Crocker, L. E. and Urquhart, J. M.**, 2001: Strength of Adhesive Joints: A Parametric Study. Project PAJex1 - Report 3.
- Buchholzi, F. G., Rikards, R. and Wang, H.**, 1997: Computational Analysis of Interlaminar Fracture of Laminated Composites. *International Journal of Fracture* 86: 37–57.
- Cagatay, M. B., Anil, O.**, 2010: Anchorages Effects on CFRP-to-concrete Bond Strength DOI: 10.1177/0731684408100259.

- Camanho, P. P., Lambert, M.**, 2006: A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials, *Composites Science and Technology* 66, 3004–3020.
- Campilho, R. D. S. G., Moura, M. F. S. F., Domingues, J. J. M. S.**, 2008: Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs, *International Journal of Solids and Structures* 45, 1497–1512.
- Carbajal, N. and Mujika, F.**, 2009: Determination of Compressive Strength of Unidirectional Composites by Three-Point Bending Tests. *Polymer Testing* 28 (2009) 150–156.
- 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.
- Chalkey, P., Rose, F.**, 2001: Stress analysis of double-strap bonded joints using a variational Method, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 21, 241–247.
- 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.
- Chen, J., Ravey, E., Hallett, S., Wisnom, M., Grassi, M.**, 2009: Prediction of delamination in braided composite T-piece specimens, *Composites Science and Technology* 69, 2363–2367.
- Cheng, J., Wu, X., Li, G., Pang, S., Taheri, F.**, 2007: Analysis of an adhesively bonded single-strap joint integrated with shape memory alloy (SMA) reinforced layers, *International Journal of Solids and Structures* 44, 3557–3574.
- 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.
- Chisti, M., Wang, C. H., Thomson, R. S., Orifici, A.**, 2010: Progressive Damage in Single Lap Countersunk Composite Joints. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 10, 012064 DOI: 10.1088/1757-899X/10/1/012064.
- Chuan, S. H.**, 1999: Stress analysis of adhesively-bonded lap joints, *Composite Structures* 47, 673±678.
- 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.

**Dano, M. L., Gendron, G., Picard, A.,** 2000: Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates, *Composite Structures* 50, 287±296.

**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.

**Dvorak, J. G., Bahei, Y. A.,** 2001: New designs of adhesive joints for thick composite laminates, *Composites Science and Technology* 61, 19±40.

**Dvorak, J. G., Zhang, J., Canyurt, O.,** 2001: Adhesive Tongue-and-Groove Joints for Thick Composite Laminates, *Composites Science and Technology* 61, 1123–1142.

**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. 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.
- Fawzia, S., Zhao, X. L., Mahaidi, R.,** 2006: Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP, *Composite Structures* 75, 156–162.
- Fawzia, S., Zhao, X. L., Mahaidi, R.,** 2010: Bond–slip models for double strap joints strengthened by CFRP, *Composite Structures* 92, 2137–2145.
- Feiha, S., Shercliff, H. R.,** 2005: Composite failure prediction of single-L joint structures under bending, *Composites: Part A* 36, 381–395.
- Fredrickson, B. M., Schoeppner, G. A., Mollenhauer D. H., Palazotto, A. N.,** 2008: Application of three-dimensional spline variational analysis for composite repair, *Composite Structures* 83, 119–130.
- Fu, M., Mallick, P. K.,** 2001: Fatigue of hybrid joints in SRIM composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 21, 145-159.
- Gama, B. A., Mahdi, S., Cichanowski, C., Yarlagağda, S., Gillespie, J. R.,** 2004: Static and Dynamic Strength of Scarf-Repaired Thick-Section Composite Plates, *Joining and Repair of Composite Structures*, ASTM STP 1455, K. T. Kedward and H. Kim, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 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.
- Gunnion, A. J., 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. *COMPOSITES*, 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.

- 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 Strength of Woven Glass Fiber-Epoxy Composites Pinned Joints. *Composite Structures*, 37:1337-1350.
- 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.
- Jones, R. M.,** 1975: *Mechanics of Composite Materials*, Mc. Graw-Hill, Tokyo.
- Jones, R. M.,** 2009. “*Mechanics of composite materials (5th ed.)*”. US: Taylor & Francis Inc.
- 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*.
- Kedward, K. T., Whitney, J. M.,** 2002. “*Design studies (Volume 5)*”, In L.A. Carlsson and J.W. Gillespie (Eds.), Basic configurations. Lancaster, A technomic Publishing Company.
- Kim, J. H., Park, B. J., Han, Y. W.,** 2004: Evaluation of fatigue characteristics for adhesively bonded composite stepped lap joint, *Composite Structures* 66, 69–75.
- Kinloch, A. J., Kodoklan, G. K. A.,** 1992: The Design of Double-Overlap Joints Using Thermoplastic-Fibre Composites, *J. Adhesion*, Vol. 37, pp. 33-45.
- Kradinov, V., Madenci, E., Ambur, D. R.,** 2005: Bolted lap joints of laminates with varying thickness and metallic inserts, *Composite Structures* 68, 75–85.

- 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.
- Lubineau, G., Ladeveze, P.**, 2008: Construction of a micromechanics-based intralaminar mesomodel, and illustrations in ABAQUS/Standard, *Computational Materials Science* 43, 137–145.
- 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.
- Mines, R. A. W., Alias, A.**, 2002: Numerical Simulation of the Progressive Collapse of Polymer Composite Sandwich Beams Under Static Loading. *Composites: Part A* 33, 11-26.
- 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.
- Monteiro, A. H., Sampaio, E. M., Costamattos H. S.**, 2010: Static failure analysis of axially loaded aluminium–epoxybutt joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 30, 774–780.
- 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. 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.**, 2006: On the Difference Between Flexural Moduli Obtained by Three-Point and Four-Point Bending Tests. *Polymer Testing* 25, 214–220.
- Mujika, F., Carbajal, N., Arrese, A. and Mondragon, I.**, 2006: Determination of Tensile and Compressive Moduli by Flexural Tests. *Polymer Testing* 25, 766–771.

- 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.
- 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.
- Naik, N. K., Azad, N. M., Prasad P. D.,** 2002: Stress and Failure Analysis of 3D Angle Interlock Woven Composites, *Journal of Composite Materials*, 36: 93, DOI: 10.1177/0021998302036001303.
- Nie, J., Lu, S., Gu B.,** 2006: Fractional Formula Description of Angle-interlock Woven Fabric Construction. DOI: 10.1177/1528083706067690.
- 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.
- Okutan B.,** 2001. “*Stres and failure analysis of laminated composite pinned joints*”, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 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
- Ouyang, Z., Li G.,** 2009: Cohesive zone model based analytical solutions for adhesively bonded pipe joints under torsional loading. *International Journal of Solids and Structures* 46, 1205–1217.
- 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.
- Sangree, R. H., Schaffer B. W.,** 2009: Experimental and numerical analysis of a halved and tabled traditional timber scarf joint. *Construction and Building Materials* 23, 615–624.

- Sangree, R. H., Schaffer B. W.,** 2009: Experimental and numerical analysis of a stop-splayed traditional timber scarf joint with key. *Construction and Building Materials* 23, 376–385.
- Santiuste, C., Barbero E., Miguelez M. H.,** 2011: Computational analysis of temperature effect in composite bolted joints for aeronautical applications, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30: 3, DOI: 10.1177/0731684410385034.
- 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.
- Şerban D. A., Marşavina, L. and Silberschmidt, V.,** 2011: Behaviour of Semi-Crystalline Thermoplastic Polymers: Experimental Studies and Simulations. *Computational Materials Science*.
- 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.
- 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.
- Soni, S., Das S., Chattopadhyay A.,** 2009: Simulation of Damage-features in a Lug Joint using Guided Waves, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20: 1451, DOI: 10.1177/1045389X09103064.
- Srinivasa, C.V. and Friends.,** 2011: Static Bending and Impact Behaviour of Areca Fibers Composites. *Materials and Design* 32, 2469–2475.
- Starikov, R., Schön, J.,** 2002: Local fatigue behaviour of CFRP bolted joints. *Composites Science and Technology* 62, 243–253.
- 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.
- 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.
- Tzetzis, D., Hogg, P. J.,** 2008: Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs. *Materials and Design* 29, 436–449.
- 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.
- Wanga, C. H., Gunnion, A. J.,** 2009: Optimum shapes of scarf repairs, *Composites: Part A* 40, 1407–1418.
- 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.
- Xiao, X., Foss, P. H., Schroeder, J. A.,** 2004: Stiffness prediction of the double lap shear joint, Part 2: Finite element modeling, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 24, 239–246.
- Yang, C., Huang, H., Tomblin J. S., Sun, W.,** 2004: Elastic-plastic Model of Adhesive-bonded Single-lap Composite Joints. DOI: 10.1177/0021998304039268.
- Yang, Z., Su, X., Liu, G.,** 2010: Finite Element Modelling Of Complex 3d Static And Dynamic Crack Propagation By Embedding Cohesive Elements In Abaqus, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 23, No. 3, ISSN 0894-9166.
- Yusof and Saleh, A. L.,** 2010: Flexural Strengthening of Timber Beams Using Glass Fibre Reinforced Polymer. *Electronic Journal of Structural Engineering* (10), 45-56.
- Zhao, L., Qin, T., Shenoi, R. A., Zhang, J., Liang, X., Huang, H.,** 2010: Strength Prediction of Composite P Joints Under Tensile Load, *Journal of Composite Materials* 44: 2759, DOI: 10.1177/0021998310369593.

**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.

**TÜBİTAK  
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 110M250
<b>Proje Başlığı:</b> <b>Mekanik Alın Birleştirilmiş Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Statik ve Dinamik olarak İncelenmesi</b>
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> <b>Doç. Dr. Gürkan ALTAN Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU</b>
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> <b>Pamukkale Üniversitesi Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kınıklı Kampüsü DENİZLİ</b>
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b>
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01.12.2010-01.06.2013
<b>Öz (en çok 70 kelime)</b> <b>Bu çalışmada, kompozit plakaların alın altına birleştirilmesinde kullanılan yapıştırma tekniği yerine kullanılabilir, I profiline sahip bir bağlantı kilidi ile yapılan mekanik birleştirmeler önerilmiştir. I profilli bağlantı kilidini karakterize eden temel geometrik parametrelerinin değişimi ile oluşturulmuş farklı boyutlardaki kilidlerin yük taşıma yeteneği, kompozit yapı bileşenlerinin dayanımı ve ilk hasar oluşumunun üzerine etkileri nümerik olarak incelenmiş olup içlerinden en uygun dayanıma sahip olan birleştirmenin tespiti de gerçekleştirilmiştir.</b>
<b>Anahtar Kelimeler:</b> <b>Kompozit malzeme, geometrik birleştirme, hasar analizi</b>
<b>Fikri Ürün Bildirim Formu</b> Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> <small>Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.</small>
<b>Projeden Yapılan Yayınlar:</b> <b>ALTAN G., TOPÇU M., "An Investigation on Damage Loads of Mechanical Butt Joints in Composite Structures", Journal of Reinforced Plastics and Composites, (Under Review) , 2013</b> <b>ALTAN G., TOPÇU M., BAŞBUĞ F., "Investigation of Mechanical Behaviours of Mechanical Butt Jointed Composite Plates with Three Point Bending Test", Composite Structures, (Under Review) , 2013</b> <b>ALTAN G., TOPÇU M., "The Improvement of Mechanical Butt Joints under Bending Loads", Advances in Engineering Software, (Under Review) , 2013</b>
<b>Ekte Bulunan "ARDEB Başarı Öyküsü Formu", "Kazanımlar" Bölümünde Belirtilen Kriterlere Göre Proje Çıktılarınızın Başarı Öyküsü Niteliği Taşdığını Düşünüyorsanız "ARDEB Başarı Öyküsü Formu"nu doldurunuz.</b>