

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DELİKLİ CTP KİRİŞLERİN AŞAMALI GÖÇME ANALİZİ**  
**İLE YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN İNCELENMESİ**

**Selami TUNCA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Programı

Danışman

Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN

Temmuz, 2023

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DELİKLİ CTP KİRİŞLERİN AŞAMALI GÖÇME ANALİZİ**  
**İLE YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNİN İNCELENMESİ**

Selami TUNCA tarafından hazırlanan tez çalışması 06.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Çağrı MOLLAMAHMUTOĞLU, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Arcan YANIK, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_


\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Danışmanım Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Delikli CTP Kirişlerin Aşamalı Göçme Analizi ile Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selami TUNCA

İmza



*Prof. Dr. Mustafa İnan anısına ...*

## TEŞEKKÜR

---

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca danışmanlığımı üstlenen, bilgi birikimi ve teknik becerileriyle bana örnek olan, süreç boyunca beni her zaman araştırmaya yönelten, mesleğimin ciddiyetinin ve sorumluluklarının farkında olmamı sağlayan, saygıdeğer hocam Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN' a ve başta Mekanik Anabilim Dalı olmak üzere, İnşaat Fakültesi' nde görev yapan tüm hocalarıma,

Ders dönemim sırasında gerekli desteği veren, mesleki ve akademik olarak gelişmemde desteklerini esirgemeyen, Milenyum Proje ve Danışmanlık firmasındaki işverenlerim Dr. İnş. Müh. Onur AVCIOĞLU ve Yük. İnş. Müh. Abdullah TOKMAK' a,

Tez çalışmam boyunca, yoğun iş temposunda çalışmalarımı yürütmemde desteklerini esirgemeyen, özel projelerde çalışma fırsatı sunan ve mesleki gelişimime katkıda bulunan, Orion Ağır Çelik Yapı Mühendisliği Genel Müdürü Yük. İnş. Müh. Hüdai KAYA, Mühendislik Müdürü Yük. İnş. Müh. Tolga YAZAN, ekip liderlerim İnş. Müh. Atacan KADIOĞLU (YM), İnş. Müh. Murat KASKAN ve tüm mesai arkadaşlarıma,

Maddi, manevi tüm varlıklarıyla hayatımın her anında yanımda olan, mesleki ve kişisel gelişimimde desteklerini esirgemeyen, bana her zaman, her koşulda inanan sevgili annem, babam ve ablama,

Varlıklarıyla motivasyon kaynağım olan sevgili yeğenlerim Defne ve Dila' ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Selami TUNCA

# İÇİNDEKİLER

<b>TEŞEKKÜR</b>	<b>iv</b>
<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xiii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvi</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>18</b>
1.1 Tezin Amacı .....	18
1.2 Literatür Özeti.....	18
1.3 Dört Noktalı Eğilme Deneyi.....	21
<b>2 KOMPOZİT MALZEMELER</b>	<b>22</b>
2.1 Genel Bilgi .....	22
2.2 Kompozit Malzemelerin İnşaat Sektöründeki Yeri.....	23
2.3 Hasar Modları .....	23
2.4 Tabakalı Kompozit Malzemeler .....	25
2.5 Ortotropik Malzemelerde Şekil Değiş-tirmeler.....	26
2.6 Ortotropik Malzemelerde Gerilmeler.....	29
2.7 Kuvvetler ve Momentler .....	30
<b>3 MALZEME HASAR MODELİ</b>	<b>34</b>
3.1 Ls-Dyna/MAT262 Malzeme Modelinin Tanıtılması .....	34
3.2 Malzeme Hasar Modeli.....	35
<b>4 LİF TAKVİYELİ KOMPOZİT KİRİŞİN SONLU ELEMAN MODELİ</b>	<b>40</b>
4.1 Sonlu Elemanlar Metodu.....	40
4.2 Lif Takviyeli Kompozit Kirişin Tanıtılması .....	41
<b>5 SAYISAL ANALİZ</b>	<b>46</b>
5.1 Farklı Delik Çaplarına Sahip Kirişlere Ait Analizler .....	46
5.2 Farklı Delikler Arası Mesafelere Sahip Kirişlere Ait Analizler.....	50
5.3 Gövde Oryantasyonu Farklı Delikli Kirişlere Ait Analizler.....	54
5.4 Delik Etrafında Karbon–Cam Fiber Takviyeli Kirişlerin Sayısal Analizi .....	57

<b>6 SONUÇLAR</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>64</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>68</b>



## SİMGE LİSTESİ

$\tau_T, \tau_L$	Açılı kırılma durumunda kesme gerilmeleri
MANGLE	AOPT = 0 için malzeme açısı
XP, YP, ZP	AOPT = 1 ve 4 için p noktasının koordinatları
A1, A2, A3	AOPT = 2 için a vektörünün bileşenleri
D1, D2, D3	AOPT = 2 için d vektörünün bileşenleri
V1, V2, V3	AOPT = 3 için v vektörünün bileşenleri
$\sigma_x, \sigma_y$	Asal gerilmeler
$\emptyset_0$	Basınç matris modu için kırılma açısı
XT, XC	Boyuna çekme, basınç dayanımı
GXT, GXC	Boyuna kırılma tokluğu (çekme, basınç)
XCO, XTO	Büküm noktasındaki boyuna basınç, çekme dayanımı
GXCO, GXTO	Çift doğrusal hasar değişiminin tanımlanmasında kullanılan boyuna basınç kırılma tokluğu
PFL	Dağılmanın başlaması için gereken katman yüzdesi
Ld	Delikler arası mesafe
$\tau_{xy}$	Düzlem gerilmesi
SIGY	Düzlem içi kayma akma gerilmesi
BETA	Düzlem içi kayma plastisitesi sertleşme parametresi
ETAN	Düzlem içi kayma teğet modülü
$\tau_{eff}$	Efektif kayma gerilmeleri
$\sigma_{11}, \sigma_{22}$	Eksenel gerilmeler
EA, EB, EC	Elastisite modülü
YT, YC	Enine çekme, basınç dayanımı
GYT, GYC	Enine kırılma tokluğu (çekme, basınç)
$X_M$	Gerçek dayanım
$E_M$	Gerçek elastisite modülü
$G_M$	Gerçek kırılma tokluğu
-m	Gerilme tensörü

X, Y, Z	Global eksenler
EPS, EFS	Göçme noktasındaki şekil değiştirme
$\varphi_{2+}, \varphi_{2-}$	Hasar aktivasyon fonksiyonları
D_F	İntegrasyon noktasını kontrol eden etiket
DAF, DKF, DMF, DSF	İntegrasyon noktasını kontrol eden etiketler
$\varnothing^c$	Kaçıklık açısı
$\sigma_{12}^m, \sigma_{22}^m$	Kaçıklık doğrultusundaki gerilme bileşenleri
L	Karakteristik eleman boyutu
$\theta$	Kayma açısı
S, S <sub>L</sub> , S <sub>T</sub>	Kayma dayanımı
GAB, GBC	Kayma modülü
GCA	
$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$	Kayma şekil değiştirmeleri
FIO	Kırılma açısı
$\varepsilon_{fr}$	Kırılma şekil değiştirmesi
$I_{elem}$	Kritik eleman boyutu
$N_x, N_y, N_{xy}$	Kuvvetler
RO	Kütle yoğunluğu
$u, v, w$	Lamina düzleminde herhangi bir noktadaki yer değiştirmeler
$\alpha$	Lif oryantasyon açısı
1, 2, 3	Lokal eksenler
AOPT	Malzeme eksen opsiyonu
MID	Malzeme kimlik numarası
$\mu_L, \mu_T$	Malzeme sürtünme parametreleri
<>	McCauley operatörü
$G_{Ic}, G_{IIc}$	Mod 1, mod 2 basınç kırılma toklukları
g	Mod 1, mod 2 basınç kırılma toklukları oranı ( $G_{Ic}/G_{IIc}$ )
$M_x, M_y, M_{xy}$	Momentler

$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	Normal şekil değiştirmeleri
$a$	Orta düzlem eğimi
$\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$	Orta düzlem şekil değiştirmeleri
$u_0, v_0, w_0$	Orta düzlem yer değiştirmeleri
$k_x, k_y, k_{xy}$	Plaka eğrilikleri
$\nu$ , PRBA, PRCB	Poisson oranı
PRCA	
PUCK	Puck hasar kriterini kontrol eden etiket
$[\bar{Q}]$	Rijitlik matrisi
$d_{1+}, d_{1-}, d_{2+},$ $d_{2-}, d_6$	Skaler hasar değişkenleri
$\varphi_{1+}, \varphi_{1-}$	şekil değiştirme kriterleri
$h$	Tabaka kalınlığı
$n$	Tabaka sayısı
MSG	Uyarı mesajlarını kontrol eden etiket
$H(d)$	Uygunluk matrisi
$A, B, D$	Uzama rijitliği, bağlantı rijitliği, eğilme rijitliği matrisleri
SOFT	Yumuşama bölgesi azaltma faktörü

## KISALTMA LİSTESİ

---

CTP	Cam takviyeli polimer
KTP	Karbon takviyeli polimer
SE	Sonlu eleman, sonlu elemanlar
SEA	Sonlu elemanlar analizi
SEM	Sonlu elemanlar metodu



## ŞEKİL LİSTESİ

<b>Şekil 1.1</b>	Dört noktalı eğilme deneyi .....	21
<b>Şekil 2.1</b>	Lif takviyeli lamina kompozit.....	22
<b>Şekil 2.2</b>	Takviye fazının matris fazındaki geometrisine göre kompozitlerin sınıflandırılması a) Partikül b) Pul c) Lif [36]....	23
<b>Şekil 2.3</b>	Lif takviyeli kompozitlerde hasar modları a) matris basınç b) matris çekme c) lif basınç d) lif çekme .....	24
<b>Şekil 2.4</b>	Lif oryantasyon açısı ve lokal eksenler .....	25
<b>Şekil 2.5</b>	Laminanın eğilme altında xz düzlemindeki deformasyonları [35] .....	27
<b>Şekil 2.6</b>	Farklı katmanlardan oluşan lamina kesiti [35] .....	31
<b>Şekil 3.1</b>	Burkulma bandı gerilme tensörü [23] .....	37
<b>Şekil 3.2</b>	MAT262 Gerilme-şekil değiştirme eğrileri [38].....	38
<b>Şekil 4.1</b>	Delikli kirişe ait yükleme koşulları ve geometrik büyüklükler (mm) .....	42
<b>Şekil 4.2</b>	I kirişe ait tipik SE modelleri a) deliksiz b) delikli.....	43
<b>Şekil 5.1</b>	Göçme anında I kirişteki hasar dağılımı a) deliksiz, yanal ötelenmesi önlenmiş b) delikli yanal ötelenmesi önlenmiş c) deliksiz yanal ötelenmesi serbest d) delikli yanal ötelenmesi serbest .....	47
<b>Şekil 5.2</b>	Deliksiz kiriş ve farklı delik çaplarına sahip kirişlerin yük-yer değiştirme grafikleri a) yanal ötelenmesi önlenmiş b) yanal ötelenmesi serbest .....	48
<b>Şekil 5.3</b>	Farklı delikler arası mesafelere sahip kirişlerin SE modelleri a) $L_d = 100$ mm b) $L_d = 150$ mm c) $L_d = 250$ mm.....	50
<b>Şekil 5.4</b>	Göçme anında yanal ötelenmesi önlenmiş delikli I kirişlerdeki hasar dağılımı a) $L_d = 250$ mm b) $L_d = 200$ mm c) $L_d = 150$ mm d) $L_d = 100$ mm .....	51
<b>Şekil 5.5</b>	Farklı delikler arası mesafelere sahip kirişlerin yük-yer değiştirme grafikleri a) yanal ötelenmesi önlenmiş b) yanal ötelenmesi serbest .....	52
<b>Şekil 5.6</b>	Gövde oryantasyonu farklı, delikli kirişlere ait tipik SE modeli .....	55
<b>Şekil 5.7</b>	Göçme anında yanal ötelenmesi serbest delikli I kirişlerdeki hasar dağılımı a) GO-0 b) GO-15 c) GO-30 d) GO-45 e) GO-9056 .....	57
<b>Şekil 5.8</b>	Gövde oryantasyonu farklı, yanal ötelenmesi serbest delikli kirişlere ait yük-yer değiştirme eğrileri.....	57

<b>Şekil 5.9</b> Delik çevresinde karbon-cam lif takviyeli, delikli kirişlere ait tipik SE modeli.....	58
<b>Şekil 5.10</b> Delik çevresinde karbon-cam lif takviyeli, delikli kirişlere ait isimlendirme a) KD-50 b) KD-100 c) KD-128 d) KD-150 e) KD-200.....	60
<b>Şekil 5.11</b> Göçme anında yanal ötelenmesi serbest delikli I kirişlerdeki hasar dağılımı a) KD-50 b) KD-100 c) KD-128 d) KD-150 e) KD-200.....	61
<b>Şekil 5.12</b> Delik çevresinde karbon ve cam takviyeli, yanal ötelenmesi serbest delikli kirişlere ait yük-yer değiştirme eğrileri.....	62



## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 3.1</b> LS-Dyna MAT262 hasar modeli parametreleri [38] .....	34
<b>Tablo 3.1</b> LS-Dyna MAT262 hasar modeli parametreleri (devamı) [38].	35
<b>Tablo 4.1</b> Cam takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri.....	44
<b>Tablo 4.1</b> Cam takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri (devamı) .....	45
<b>Tablo 4.2</b> Cam takviyeli polimer için fiziksel olmayan parametreler.....	45
<b>Tablo 5.1</b> Yanal burkulması önlenmiş, farklı delik çaplarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları .....	49
<b>Tablo 5.2</b> Yanal burkulması serbest, farklı delik çaplarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları.....	49
<b>Tablo 5.2</b> Yanal burkulması serbest, farklı delik çaplarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları (devamı) .....	50
<b>Tablo 5.3</b> Yanal burkulması önlenmiş, farklı delik aralıklarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları .....	53
<b>Tablo 5.4</b> Yanal burkulması serbest, farklı delik aralıklarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları .....	53
<b>Tablo 5.5</b> Gövde oryantasyonu farklı, delikli kirişlere ait isimlendirme ..	54
<b>Tablo 5.6</b> Karbon takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri.....	58
<b>Tablo 5.6</b> Karbon takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri (devamı) .....	59
<b>Tablo 5.7</b> Karbon takviyeli polimer için fiziksel olmayan parametreler ..	59
<b>Tablo 5.7</b> Karbon takviyeli polimer için fiziksel olmayan parametreler (devamı) .....	60

## **Delikli CTP Kirişlerin Aşamalı Göçme Analizi ile Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi**

Selami TUNCA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN

Son yıllarda, lif takviyeli polimer taşıyıcı elemanlar yüksek dayanım/ağırlık oranından dolayı inşaat mühendisliği uygulamalarında betonarme ve çelik malzemesine alternatif olarak görülmektedir. Takviyeli polimer ince cidarlı profil elemanlar, uygulamada yüksek dayanım ve esneklik ile beraber alternatiflerine kıyasla oldukça hafif yapıların imal edilmesine imkan tanımaktadır. Bu çalışmada delikli cam takviyeli polimer (CTP) I kirişin eğilme altında yük taşıma kapasitesi, aşamalı göçme analizi yöntemiyle araştırılmıştır. Kirişin ANSYS/LS-Dyna Prepost programında detaylı bir sonlu eleman (SE) modeli oluşturularak doğrusal olmayan analiz ile limit yük kapasitesi farklı senaryolar için hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan analizde benzetilmiş statik yaklaşım ve “explicit” zaman integrasyonu kullanılmıştır. Benimsenen aşamalı hasar modeli bir sürekli ortam hasar modeli olmakla beraber birçok malzeme parametresi gerektirmektedir. Modelde kullanılan parametreler, CTP ve karbon takviyeli polimer (KTP) malzemesi için

literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilerek kalibre edilmiştir. Oluşturulan detaylı SE modeli ile delik çaplarının, aralıklarının, lif oryantasyonlarının ve KTP malzemesinin kirişin göçme yükü ve moduna etkileri incelenmiştir. Delik çapının artması ve delik mesafesinin azalması beklendiği üzere göçme yükünün azalmasına neden olsa da tasarımda gerekli dayanım değerlerinin karşılanabileceği görülmüştür. Lif oryantasyon açılarının değiştirilmesiyle dayanımda değişiklikler olduğu görülmüş, ek olarak boyuna dayanımı yüksek malzemelerin kullanılmasıyla dayanımın artırılmayacağı gözlenmiştir. Ancak enine dayanımı ve kırılma tokluğu yüksek malzemelerin kullanılmasıyla gerekli dayanıma erişilebileceği görülmüştür. Böylelikle yapısal sistemlerin ağırlığı azaltılarak malzeme tasarrufu sağlanabilir ve özellikle titreşim kaynaklı yüklerin azaltılması mümkün olabilir. Bunun yanında lif oryantasyon açıları değiştirilerek, malzeme ağırlığı değiştirilmeden nispeten daha yüksek dayanımlara erişilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Lif takviyeli kompozit polimerler, aşamalı göçme analizi, malzeme hasar modeli, sonlu eleman analizi

# **Investigation of The Load-Bearing Capacity of Perforated FRP Beams Using Progressive Failure Analysis**

Selami TUNCA

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Doç. Dr. Yıldırım Serhat ERDOĞAN

Recently, fiber-reinforced polymer beams are adopted as an alternative to reinforced concrete and steel materials in civil engineering applications due to their high strength/weight ratio. Reinforced polymer thin-walled profiles, with their high strength and flexibility, allow the production of very light structures compared to their alternatives. In this study, the load carrying capacity of a perforated glass fiber reinforced polymer (GFRP) I beam was investigated by progressive failure analysis. A detailed finite element (FE) model of the beam was created in the ANSYS/LS-Dyna Prepost program and the limit load capacity was calculated for different scenarios using nonlinear damage analysis method. Quasi static loading approach and explicit time integration methods are used in the nonlinear analysis. The progressive damage model adopted is a continuum damage model, which requires many material parameters. The parameters used in the model were calibrated by obtaining from the experimental studies in the literature conducted for the GFRP an carbon fiber reinforced polymer (CFRP) material. The effects of

hole diameters and spacings on the failure load and the failure mode of the beam were investigated with the detailed SE model. Although the increase in the hole diameter and the decrease in the hole spacing cause a decrease in the collapse load as expected, it has been seen that the required strength values can be maintained for design requirements. It was observed that there were changes in strength by changing the fiber orientation angles. Additionally, it was observed that the strength could not be increased by using materials with high longitudinal strength. However, it has been observed that the required strength can be achieved by using materials with high transverse strength and fracture toughness. In this way, reduction of the weight of structural systems together with the reduction of vibration-induced loads can be achieved. In addition, by changing the fiber orientation angles, relatively higher strengths can be achieved without changing the material weight.

**Keywords:** Fiber reinforced polymer composites, progressive failure analysis, material damage model, finite element modelling

### 1.1 Tezin Amacı

Lif takviyeli kompozit elemanlar hafiflik, yüksek dayanım, korozyon direnci, elektrik yalıtkanlığı ve yüksek ısı dayanımı gibi özelliklerinden dolayı başta uzay-havacılık olmak üzere birçok mühendislik disiplinde tercih edilmektedir. Son yıllarda, hafiflik, yüksek dayanım ve kolay işlenebilir olması sebebiyle betonarme ve çelik malzemesine alternatif olarak inşaat mühendisliği uygulamalarında da kullanılmaktadır. Özellikle cam takviyeli polimerden (CTP) yapılmış yapısal taşıyıcı elemanların görece düşük maliyetleri bu elemanları uygulama açısından cazip hale getirmiştir.

Bu çalışmada, kompozitlerin daha çok kolay işlenebilirlik özelliklerinden faydalanarak sayısal analizler yapılmıştır. Aynı zamanda hafif olması sebebiyle, geometrik olarak da farklı alternatifler sunmaktadır. Oldukça geniş bir ölçekte kompozit kesitinde farklı malzemeler, farklı oryantasyon açıları kullanılabilir. İşçilik ve ekonomi gibi etkenler de göz önünde bulundurularak, beton ve çelikte mümkün olmayan geometrilerde uygulamalar yapılabilir. Bu nedenle çalışmanın ilk aşamasında kiriş gövdesine dairesel delikler açılıp delik çapları ve aralıklarının etkisi incelenmiştir. Daha sonra mevcut delikli kirişlerde lif oryantasyon açıları ve malzemeler değiştirilerek kirişlerin dört noktalı eğilme deneyi altında genel davranışı incelenmiştir.

### 1.2 Literatür Özeti

Delikli kirişlerin çeşitli yüklemeler altında davranışını inceleyen birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Bunun yanında karbon veya cam takviyeli tabakalı kompozit elemanların davranışını incelemek için son yıllarda birçok aşamalı göçme modeli geliştirilmiş ve uygulanmıştır ([31] Rozylo ve diğ. 2021, [32] Gonilha ve diğ. 2021, [26] Fernandes ve diğ. 2020, [33] Turan ve diğ. 2014). Fakat bu çalışmanın da konusu olan eleman

üstünde açılan deliklerin kompozit elemanlara etkisi, genelde plak türü elemanlar için incelenmiştir. [1] Shaterzadeh ve diğ., termomekanik koşullar ve çift eksenli basınç altında, grafit-epoksi ve cam-epoksiden oluşmuş, farklı oryantasyon açılarına sahip delikli kompozit plakanın stabilite analizini incelemiştir; [2] Pathak ve diğ., düzlem içi termomekanik yükleme altında, dikdörtgen kompozit plakaların burkulma yükünü incelerken [3] Chhorn ve Jung, eliptik deliğe sahip kompozit plakanın, değişken parametrelerle termal burkulma yükünü incelemiştir. [4] Chang ve diğ. ise çelik halkalardan oluşmuş delikli kirişlerin üç ve dört noktalı eğilme deneyi altındaki davranışını açıklayan deneysel ve analitik bir çalışma sunmuştur. [5] Silva ve diğ., sürekli ve yarı sürekli, delikli, çelik-beton kompozit kirişlerin kritik elastik moment altında yanal burkulma modlarını hesaplamıştır. [6] Oliveria ve diğ., ise başlık ve gövde arasındaki etkileşimi göz önünde bulundurarak eğilme altında delikli kirişlerin kritik lokal elastik burkulma gerilmesinin tahmini için açık denklemler geliştirmiştir. [7] Hosseinpour ve Sharifi, delikli kirişlerin burkulma davranışı üzerindeki gövde eğilmesinin etkilerini incelemiştir; [8] Hacıoğlu, düzlem için yer değiştirmeleri engellenmiş izotropik ve anizotropik plakların uniform sıcaklık değişimi ile kritik burkulma sıcaklıkları hakkında bir çalışma sunmuştur. [9] Tarfaoui, Moumen ve Lafdi, ise delikli karbon-epoksi kompozit plaklarda, çekme etkisi altında, hasar mekaniği teorisine göre ilerlemeli hasar analizi yapmış ve kuvvet - yer değiştirme eğrilerini elde etmiştir. [10] Yang ve diğ. 3 noktalı eğilme deneyi altında, Hashin hasar modeli ve kohezif bölge metoduna göre lamine kompozitlerin davranışını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir; [11] Matous ise partikül takviyeli kompozitlerde, hasar ilerlemesini dönüşüm alanı analizini ve kusurlu ara yüzeyleri göz önünde bulundurarak incelemiştir. [12] Thomas ve diğ., çelik-kompozit bağlanma yüzeyi parametreleri altında, karbon fiber takviyeli polimerle güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş, delikli kirişlerin davranışını incelemiştir ve nihai taşıma güçlerini belirlemiştir; [13] Young ve diğ., yüksek sıcaklıklarda, korumasız delikli kompozit kirişlerin ve deliksiz çelik kirişlerin doğrusal olmayan davranışını incelemiştir; [14] Ellobody ve diğ. ise yanal burulma ve

distorsiyonel burkulma modları altında, farklı açıklık ve kesitlere sahip, yüksek dayanımlı, delikli çelik kirişlerin doğrusal olmayan davranışını incelemiştir. [15] Yiming ve diğ., Talreja hasar modeline dayanarak, piezoelektrik laminaların doğrusal olmayan dinamik tepkileri ve yorulma hasarı üzerindeki etkilerini incelemiştir; [16] Castroa ve diğ. ise, yorulma yüklemesi altında cam takviyeli epoksi kompozitlerde, liflerin hasar başlangıcını ve ilerlemesini incelemiştir, yorulma ömrü boyunca lif hasarının ilerlemesini izlemek amacıyla tek eksenli çekme ve yorulma testleri yapmışlardır. [17] Yuan ve diğ., düzgün yayılı yanal yük altında, altıgen ve dairesel deliklere sahip kirişler üzerinde analitik ve sayısal çözümler yapmış ve sehim kapasiteleri üzerinde çalışmışlar; [18] Soltani ve diğ., doğrusal olmayan malzeme ve geometrik koşulları göz önünde bulundurarak, altıgen ve sekizgen deliklere sahip kirişlerin göçme davranışını incelemiştir. [19] Daryan ve diğ., delikli kirişlerin, moment gradyan yüklemesi altında, kiriş ve çaprazların dönme kapasitesine olan etkisini incelemiştir; [20] Hartono ve diğ. ise, beton başlıklardan oluşan delikli kompozit I kirişin yarım kesitinin farklı açıklıklar altında, doğrusal olmayan hasar davranışını, deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir.

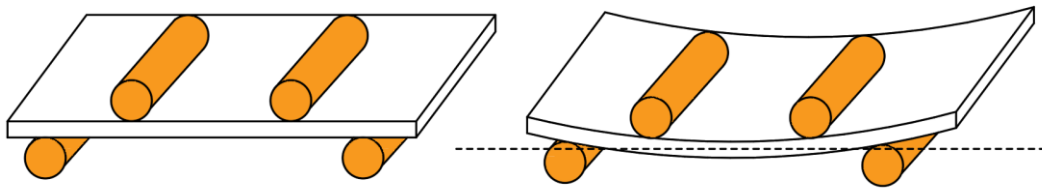
Mevcut çalışmalar çoğunlukla, kompozit malzemedeki yapılmış plaklarda delik etkisini incelemektedir. Bu çalışmalar genelde elemanların farklı elemanlar ile bağlanması amacıyla açılan deliklerin davranışa etkisini araştırmıştır. Fakat deliklerin yapısal taşıyıcı eleman ölçeğinde davranışa etkisi konusunda çok sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, delik çap ve aralıklarının uygulamada sıkça kullanılan I kirişlerin göçme yükü ve mekanizmasına etkisi incelenmiştir. I kirişin üç boyutlu bir sonlu eleman (SE) modeli oluşturularak aşamalı göçme analizi yapılmıştır. Aşamalı göçme analizinde, tabakalı kompozitler için geliştirilen sürekli ortam hasar mekanizmasına dayanan bir hasar modeli benimsenmiştir. Analizler genel amaçlı bir SE programı olan ANSYS/LS-Dyna Prepost programında gerçekleştirilmiştir. Farklı delik çapları ve aralıklarının I kirişin göçme yüküne ve moduna etkilerini incelemek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Delik çaplarının artması ve aralıklarının azalması, dayanımda

belirgin bir düşüş meydana getirdiği görülmüştür. Buna rağmen delikli kirişler ile tasarımda istenen dayanım seviyelerine ulaşarak malzeme tasarrufu ve ağırlık açısından avantaj sağlanabilmesi mümkün görülmektedir.

### 1.3 Dört Noktalı Eğilme Deneyi

Bir malzemenin eğilme dayanımı belirlemek için literatürde farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin ortak amacı, malzeme türüne ve çalışma prensibine göre gerçeğe en uygun yükleme koşullarını test etmektir. Bu yöntemlerden biri de dört noktalı eğilme deneyidir. Günümüzde teknolojinin de ilerlemesiyle, birçok deney cihazı üretilmektedir. Bu cihazlar malzeme kalitesi ve ticari prensiplere göre farklılık gösterebilirken, aynı amaca hizmet etmektedir.

Dört noktalı eğilme deneyinde, test cihazına yerleştirilen numune üzerine Şekil 1.1’ de görüldüğü gibi genellikle silindirik çelik malzemeler sabitlenir. Daha sonra belli bir yükleme hızında, malzemeye yükleme yapılır. Göçme yüküne erişen malzeme, gerekli dayanımı sağlayamadığında kırılma başlar ve yükleme sona erer. Deney sonunda göçme yükü ve maksimum sehim gibi sayısal değerlerin okuması yapılabilir.

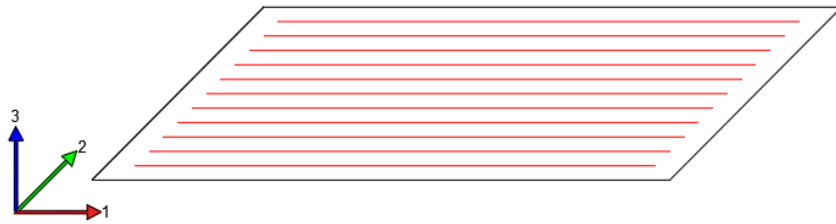


**Şekil 1.1** Dört noktalı eğilme deneyi

**2.1 Genel Bilgi**

İnsanlık tarihi boyunca birçok malzeme, mühendislik yapıları için farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmıştır. Kil, ahşap ve doğada serbest halde bulunan doğal taşlar, en temel yapı malzemeleri olarak nitelendirilebilir. Zaman içinde artan statik ve mimari ihtiyaçlar doğrultusunda çimento icat edilmiş ve beton diğer malzemelerin yerini almıştır. Bu gelişmelerle birlikte beton ve çelik bir arada kullanılarak 1900' lü yılların başında betonarme binalar inşa edilmeye başlamıştır [21].

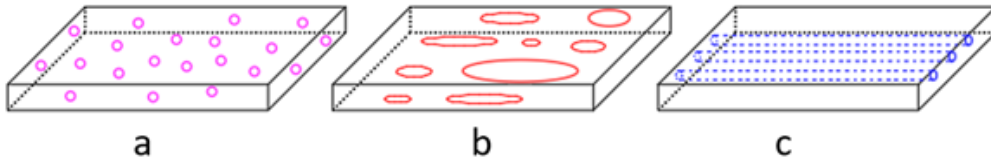
Kompozit malzemeler, farklı fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin, bileşik oluşturmadan, makro ölçekte bir araya getirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler, tek başlarında kullanılıncaya genelde tasarım hedeflerini karşılamazken, bir arada kullanılıncaya anlam ifade etmektedirler [8]. Örneğin; beton ve donatı çeliğinden oluşan betonarme malzeme, günümüzde inşaat sektöründe kullanılan en temel kompozit malzemedir. Beton basınç gerilmelerine, çelik çekme gerilmelerine karşı yüksek mukavemet gösterir. Ancak betonun çekme gerilmelerine karşı dayanımı, çeliğe oranla oldukça düşüktür. Bu nedenle iki malzeme bir arada kullanılır.



**Şekil 2.1** Lif takviyeli lamina kompozit

Kompozit yapı içinde bulunan malzemeler matris ve takviye fazı olarak ikiye ayrılır. Takviye malzemesi, kompozit yapının taşıma gücü özelliklerini belirlerken, matris malzeme de plastik deformasyon bölgesine geçerken oluşabilecek çatlakların ilerlemesini engelleyici özelliğe sahiptir. Bunun

yanında yükleme altında takviye malzemelerinin kopmasını geçiktirip, aderansa katkıda bulunmaktadır [8]. Uygulama koşulları ve statik hedefler doğrultusunda matris ve takviye malzemeleri çeşitlilik gösterebilir. Polimer, seramik ve metal gibi malzemeler matris eleman kullanılırken, cam, karbon ve metaller takviye elemanı olarak kullanılabilir, Aynı zamanda Şekil 2.2’ de gösterildiği gibi takviye elemanının matris içindeki geometrik yapısı ve konumuna göre kompozit malzemeler sınıflandırılabilir. Partikül, pul ve lif takviyeli kompozit malzemeler en yaygın bilinen örneklerdir [36].



**Şekil 2.2** Takviye fazının matris fazındaki geometrisine göre kompozitlerin sınıflandırılması a) Partikül b) Pul c) Lif [36]

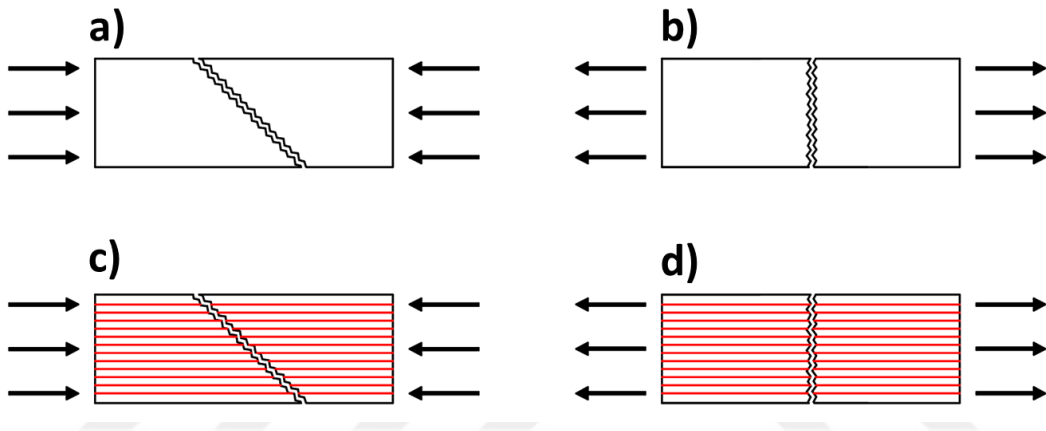
## 2.2 Kompozit Malzemelerin İnşaat Sektöründeki Yeri

Kompozit malzemelerin inşaat sektöründeki kullanımı, otomotiv ve havacılık sektörüne kıyasla daha kısıtlıdır. Çoğunlukla mimari cephe kaplama ve iç mekan tasarımı gibi alanlarda kullanılan kompozitler, bina güçlendirme çalışmalarında da kullanılmaktadır. Deprem kuşağı üstünde bulunan ülkemizde başta kamu binaları olmak üzere yapısal güçlendirme çalışmaları uzunca bir süredir yapılmaktadır. Ekonomi, zaman, işçilik gibi etkenler bu tarz uygulamalarda oldukça önemli değişkenlerdir. Tüm bunları göz önünde bulundurunca, yeni yöntemlerin keşfedilmesi kaçınılmaz olmuştur. Bunlardan birisi de kolon ve kirişlerin lif takviyeli kompozitler ile sargılanmasıdır. Bu sayede hasarlı elemanın takviye edilerek güçlendirilmesi mümkündür.

## 2.3 Hasar Modları

Kompozit malzemeler için farklı hasar modları söz konusudur. Yükleme altında taşıma gücüne erişen kompozitlerde bu hasar modları aktif olup, malzemenin göçmesine neden olur. [35]’ e göre lif takviyeli kompozitler için

beş ana hasar modu vardır. Bunlar delaminasyon, lif çekme hasarı, matris çekme hasarı, lif basınç hasarı ve matris basınç hasarıdır. [23]' e göre günümüzde kompozitlerin “explicit” analizlerinde kullanılan ticari yazılımlar, bütün hasar modlarını mikroskobik ölçekte yakalayamayabilir. Bunun sebebi bu yazılımların çoğunun makro mekaniğe dayalı olmasıdır. Buna karşın global enerji emisyonu hakkında oldukça doğru tahminler yapabilirler. Ancak simülasyonların doğruluğunu değerlendirmek için bu hasar modlarının farkında olmak önemlidir. Şekil 2.3' te hasar modları geometrik olarak temsil edilmiştir.



**Şekil 2.3** Lif takviyeli kompozitlerde hasar modları a) matris basınç b) matris çekme c) lif basınç d) lif çekme

**Delaminasyon:** Farklı tabakalardan oluşan kompozit malzemelerde, katmanlar birbirinden ayrılma eğilimindedirler. Hasar durumunda ayrılma gerçekleşmese bile, laminaların eğilme rijitliğinde azalma gözlenir. Sayısal analizlerde bu davranışı tahmin edebilmek için dekohezyon elemanları tanımlamak gerekir [34].

**Lif çekme hasarı:** Hasar durumunda, diğer hasar modlarına oranla büyük miktarda enerji açığa çıkar. Yeniden yük dağılımının mümkün olmadığı yapılarda ileri hasarlara neden olabilir [34].

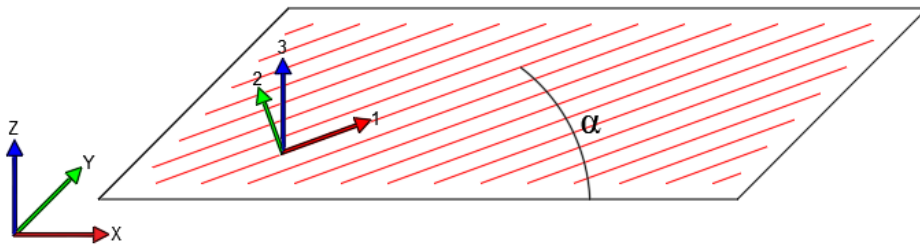
**Matris çekme hasarı:** Tipik bir matris çekme hasarında, kırılma yüzeyi genellikle yükleme yönüne diktir. Bununla birlikte bir miktar lif ayrılması gözlenebilir [34].

**Lif basınç hasarı:** Matrisin kesme davranışı ve başlangıç lifinin kusurlu yerleşimi gibi etkenler bu davranış modunu oldukça etkilemektedir. Mikro ölçekte basınç altındaki lifte burkulma bantları oluşur ve bunun sonucunda kırılma gerçekleşir [34].

**Matris basınç hasarı:** Genellikle basınç hasarı olarak bilinen bu durum, kayma gerilmelerinden dolayı oluşur. Basınç altındaki malzemede kırılma belli bir açıda olur [34].

## 2.4 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Kompozitler diğer mühendislik malzemelerinin aksine izotropik değil, anizotropik davranış sergilerler. Yani mukavemet, tokluk gibi mekanik özellikleri, lokal eksenlerinde farklılık gösterir [23]. Şekil 2.1' de gösterildiği gibi lokal eksenler genellikle 1, 2, 3 rakamları veya A, B, C harfleri ile gösterilir. Lif malzemelerin genellikle çekme dayanımı yüksek olduğu için uzanma yönleri olan 1 eksen, güçlü eksen olarak nitelendirilir. Zayıf eksenleri olan 2 ve 3 eksenleri enine mekanik özelliklerini belirler. Bu mekanik özellikler, malzeme kesitinin her katmanında farklı özellikler gösterebilir. Çünkü bu değerler katmana özeldir. Her katmanın mekanik özelliklerine ait sayısal değerler ve lif oryantasyon açısı bulunur. Bu açı ( $\alpha$ ) Şekil 2.4' te gösterildiği üzere lif doğrultusunun 1 lokal eksenine olan açısı olarak tanımlanır. Farklı lif oryantasyon açılara sahip katmanlar birleştirilip bir kesit oluşturulduğunda, her katmana ait mekanik özellikler dönüştürülür ve bir global eksen takımının özelliklerini belirler [23].



**Şekil 2.4** Lif oryantasyon açısı ve lokal eksenler

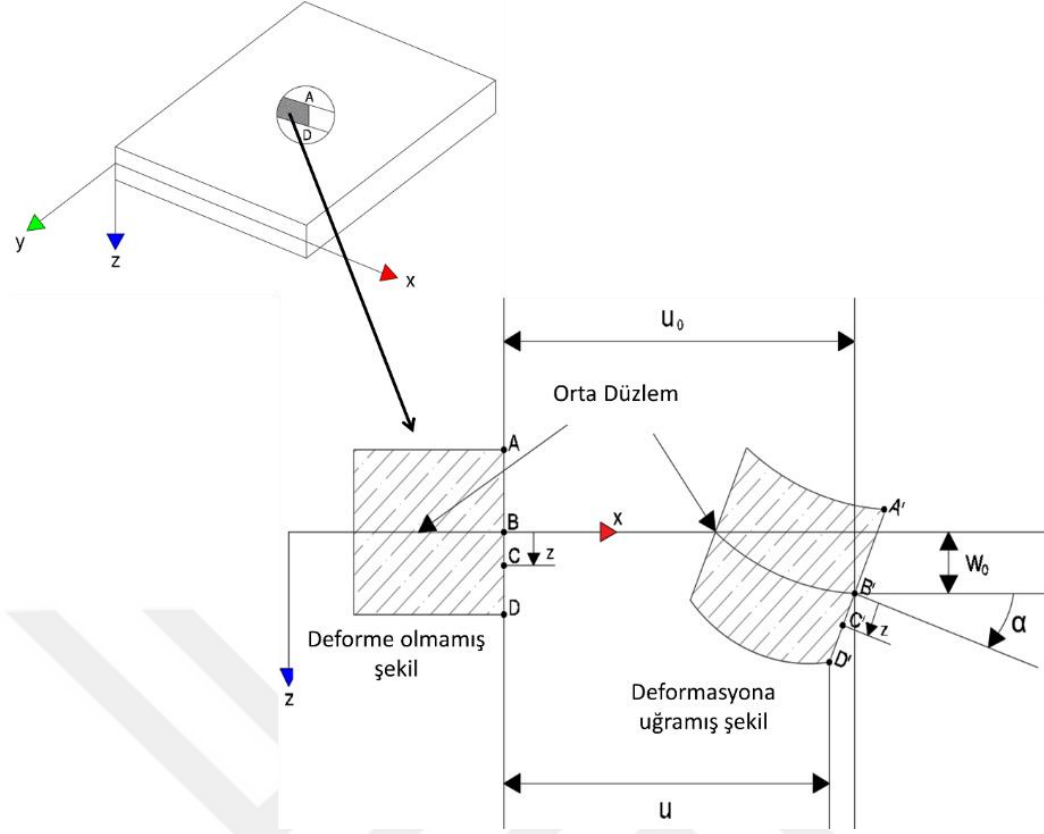
Lif takviyeli kompozitlerin en önemli avantajlarından biri anizotropilerinin veya mekanik özelliklerinin efektif bir şekilde kontrol edilebilmesidir.

Malzeme ve imalata ait değişkenler değiştirilerek, istenilen özellikler farklı yönlerde kolayca elde edilebilir [35]. Örneğin; bir kompozit plakanın çekme dayanımının yüksek olması isteniyorsa, liflerin yük doğrultusunda yerleştirilmesiyle daha yüksek sayısal değerler elde edilebilir. Aynı şekilde enine özellikleri, boyuna özelliklerine nispeten daha kötü olan liflerin oryantasyon açıları değiştirilerek kesme dayanımı iyileştirilebilir.

## **2.5 Ortotropik Malzemelerde Şekil Değiştirmeler**

İnce bir tabakanın herhangi bir noktasında, gerilmeler, düzlemdeki yer değiştirmeler ve eğrilikleri temsil eden denklemler aşığıdaki gibi geliştirilmiştir. Bu denklemlerde, ayrıca tabakanın farklı yön özelliklerine sahip birkaç tabakadan oluştuğu varsayımı yapılarak, tabaka kalınlığı boyunca gerilim değişimleri sunulmuştur.

Şekil 2.5' te gösterildiği üzere bir laminatın üzerindeki sonsuz küçük bir parçanın, xz düzlemindeki deformasyonu incelenmiştir. Yapılan varsayıma göre düz ve laminatın orta düzlemine dik olan bir ABCD çizgisi bulunmaktadır. Deformasyon sonrasında da bu çizginin,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$  kayma şekil değiştirmelerinin ihmal edilmesiyle düz ve orta düzleme dik olduğu varsayılır. B noktasının x, y, z doğrultularındaki yer değiştirmeleri sırasıyla  $u_0$ ,  $v_0$ ,  $w_0$  şeklinde ifade edilir.



**Şekil 2.5** Laminanın eğilme altında xz düzlemindeki deformasyonları [35]  
Normal ABCD üzerindeki, orta düzlemden z uzaklıkta bulunan C noktasının, x yönündeki  $u$  yer değiştirmesi, orta düzlemin x yönündeki eğimi  $\alpha$ , (2.1) ve (2.2)' de ifade edilmiş ve bu denklemlerden türetilen  $u$  yer değiştirmesi, (2.3)' te sunulmuştur.

$$u = u_0 - za \quad (2.1)$$

$$a = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (2.3)$$

Benzer şekilde orta düzlemden z mesafesi kadar uzaktaki herhangi bir noktanın y yönündeki  $v$  yer değiştirmesi (2.4)' te belirtilmiştir.

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (2.4)$$

ABCD üzerindeki herhangi bir noktanın z yönündeki w yer değiştirmesi, orta düzlemin  $w_0$  yer değiştirmesiyle normalin uzaması veya ksalmasının toplamına eşittir. Ancak bu eşitlikte ABCD normalinin Şekil değiştirmesi ihmal edilir. Byylelikle  $\epsilon_z$  de ihmal edilir. Dolayısıyla laminadaki herhangi bir noktanın yer değiştirmesi, orta düzlemin yaptığı yer değiştirme  $w_0$ ' a eşit olur [35].  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  ve  $\gamma_{xy}$ ' ye eşit olan lamina Şekil değiştirmeleri,  $u$  ve  $v$  cinsinden aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (2.6)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (2.7)$$

Şekil değiştirme ve yer değiştirme ilişkisi başka bir ifadeyle, düzlem Şekil değiştirmeleri ve plaka eğrilikleri cinsinden (2.8)' deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

Aynı Şekilde orta düzlem Şekil değiştirmeleri ve plaka eğrilikleri (2.9) ve (2.10)' daki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{pmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{xy} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

## 2.6 Ortotropik Malzemelerde Gerilmeler

Kompozit katmanlar, tek katmana sahip kesit gibi davranacak şekilde üretilir. Klasik laminasyon teorisine göre, bu katmanlar arasındaki bağı kusursuz olduğu ve kaymayla deforme olmayacağı varsayılır. Böylece tabakalar birbirleri üzerinde kaymaz ve yer değiştirmeler bağlantı yüzeyi boyunca sabit kalır. Tabakalı kompozit malzeme kesitinde, farklı mekanik özelliklere sahip tabakalar bulunmasına rağmen şekil değiştirmeler kalınlık boyunca doğrusal olarak değişir. Bu değişim, katmanlar arası kayma kuvvetinin ihmal edilmesinin bir sonucudur. Tek bir tabaka boyunca şekil değiştirmelerin değişimi doğrusal olurken, toplam tabaka kalınlığı boyunca gerilim değişimi birkaç doğrusal parçadan oluşacaktır [35]. Lamina üstündeki herhangi bir  $k$  noktasındaki gerilmeler, tabaka rijitlik matrisi  $[\bar{Q}]$  ve gerilme – şekil değiştirme cinsinden (2.11) ve (2.12)' de ifade edilmiştir.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{pmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$\{\sigma\}_k = [\bar{Q}]_k \{\epsilon^0 + zk\} \quad (2.12)$$

Tabaka rijitliği matrisi, her katman için sabittir. Bu nedenle kalınlık boyunca doğrusal bir gerilim değişimi gözlenir. Birleşik tabakalar, farklı rijitliklere sahip olduğunda ise doğrusal değişim yerine, süreksizliklerin ve gerilme sıçramalarının olduğu bir gerilme diyagramı gözlenir [35].

## 2.7 Kuvvetler ve Momentler

Bir tabakadaki gerilmeler, katmandan katmana değişir. Bu nedenle, laminanın toplam kesitine etki eden, daha basit ve eşdeğer kuvvet - moment sistemi ile çalışmak daha uygundur. Bu kuvvetler ve momentler aşağıdaki denklemlerde tarif edilmiştir. Elde edilen kuvvetler, (2.13), (2.14) ve (2.15)'te görüldüğü üzere, eşdeğer gerilmenin, tabaka kalınlığı (h) boyunca yapılan integrasyonundan elde edilir [23].

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \quad (2.13)$$

$$N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad (2.14)$$

$$N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz \quad (2.15)$$

Benzer şekilde elde edilen momentler, (2.16), (2.17) ve (2.18)'de görüldüğü üzere, orta düzleme karşılık gelen moment kolu ve gerilme çarpımının tabaka kalınlığı boyunca yapılan integrasyonundan elde edilir [35].

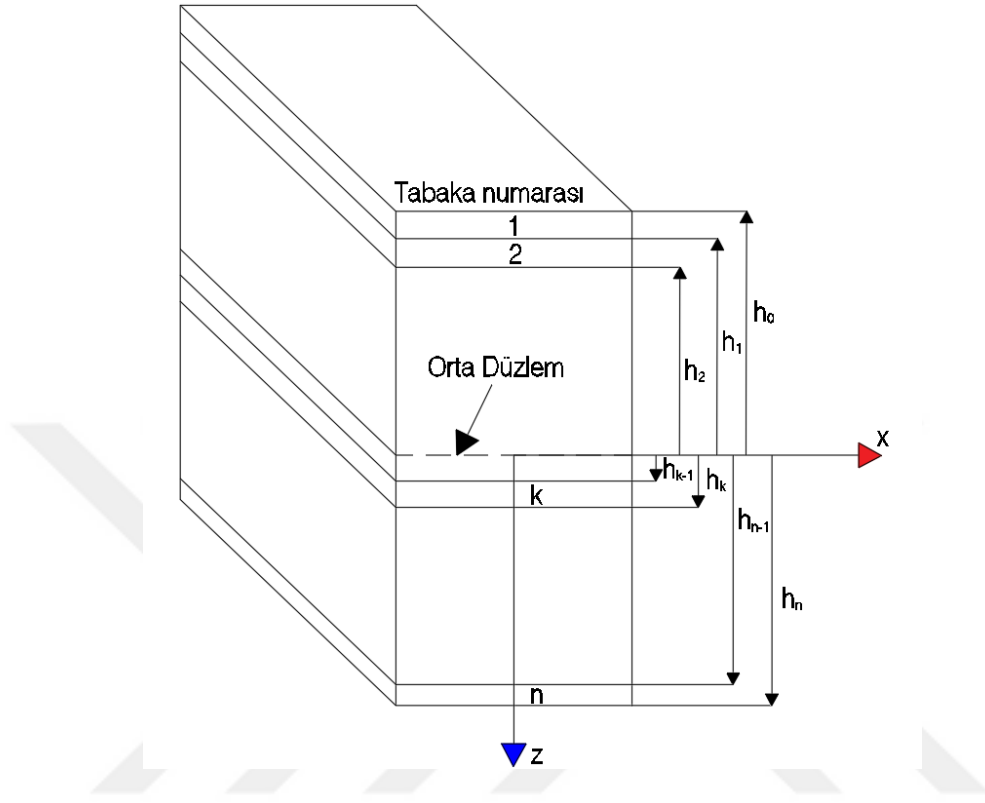
$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \quad (2.16)$$

$$M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \quad (2.17)$$

$$M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz \quad (2.18)$$

Önceki denklemlerde verilen kuvvetler ve momentler birim uzunluk başına olan değerlerdir. Kuvvetler ve momentler, lamina üzerindeki gerilim sistemine eşdeğer, ancak geometrik orta düzlemde uygulanan bir sistem oluşturur. Bu kuvvetler ve momentler, lamina kalınlığı, yüklemeler ve z koordinatını açıkça içermeyen bir sisteme indirgenmiştir [35].

Şekil 2.6’ da n adet tabakadan oluşan bir lamina sistemi temsil edilmiştir. Bu sistemin orta düzlemine etki eden kuvvet - moment sistemine ait her katmanın katkısı (2.19) ve (2.20)’ deki gibidir.



**Şekil 2.6** Farklı katmanlardan oluşan lamina kesiti [35]

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad (2.19)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (2.20)$$

Bu denklemlerdeki kuvvetler ve momentler, orta düzleme etki eden şekil değiştirmeler ve plaka eğrilikleri ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Böylelikle (2.21) ve (2.22) elde edilir.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} dz \right. \\ \left. + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{pmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{xy} \end{pmatrix} z dz \right\} \quad (2.21)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} z dz \right. \\ \left. + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{pmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{xy} \end{pmatrix} z^2 dz \right\} \quad (2.22)$$

Orta düzlem şekil değiştirmeleri ve plaka eğrilikleri yalnızca bir tabaka için değil, tüm tabakalar için sabit kaldığı varsayımıyla toplama işareti dışına alınabilir. Aynı zamanda  $[\bar{Q}]$  matrisi, bir tabaka içinde sabit kaldığı için integral işareti dışına alınabilir. Böylelikle geliştirilmiş denklemler (2.23) ve (2.24) elde edilir.

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz \right] \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} \\ + \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right] \begin{pmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right] \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} \\ + \left[ \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz \right] \begin{pmatrix} k_x \\ k_x \\ k_{xy} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Her bir katman için lokal - global eksen dönüşümü yapıldığında, katmanların mekanik özellikleri üç farklı matris altında toplanabilir. Bunlar (2.25) ve (2.26)' da belirtilen uzama rijitliği matrisi (A), bağlantı rijitliği matrisi (B) ve

eğilme rijitliği (D) matrisidir. B ve D matrislerinin katkısı laminanın orta düzlemine olan mesafesine bağlıdır. Bu matrisler katmandaki şekil değiştirmeler ve eğrilikler için kuvvetleri ve momentleri birleştiren matrislerdir [35].

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.26)$$

A, B ve D matrislerinin tanımları aşağıdaki gibidir.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (2.27)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (2.28)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (2.29)$$

(2.25) ve (2.26)'nın birleştirilmesiyle, sistem (2.30) altında özetlenebilir.

$$\begin{Bmatrix} N \\ - \\ M \end{Bmatrix} = \left[ \begin{array}{c|c} A & B \\ \hline - & D \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \epsilon^0 \\ - \\ k \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

# 3

## MALZEME HASAR MODELİ

### 3.1 Ls-Dyna/MAT262 Malzeme Modelinin Tanıtılması

Ls-Dyna Prepost, gerçek mühendislik problemlerini simule edebilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar analizi (SEA) programıdır. İlk uygulamalarda, çeşitli darbe yüklerine maruz kalan yapılarda gerilme analizi amacıyla geliştirilmiştir. “Implicit” ve “explicit” analizlerde kullanılan, oldukça gelişmiş bir yazılımdır [37].

Bu çalışmada kullanılan aşamalı göçme modeli [29, 30] Maimi ve diğ. 2007 tarafından tabakalı kompozitler için geliştirilen bir sürekli ortam hasar modeline dayanmaktadır. Bu model, Ls-Dyna Prepost programında MAT262 malzeme kartı ile tanımlanmıştır. Model, kabuk ve katı elemanlar için uygulanmaktadır. MAT262 malzeme kartı için programa tanımlanan veriler Tablo 3.1’ de gösterildiği üzere yedi karttan oluşmaktadır. Kart 1’ de ortotropik malzeme özellikleri tanımlanmaktadır. Hasar davranışını kontrol eden özellikler kart 2, farklı yönler için mukavemet parametreleri ve kırılma toklukları kart 4 ve 5’ te, çift yönlü doğrusal davranışı temsil eden mukavemet özellikleri ve kırılma toklukları kart 6’ da, doğrusal olmayan kesme davranışı ve mukavemet yumuşatma parametreleri kart 7’ de tanımlanmıştır [38].

**Tablo 3.1** LS-Dyna MAT262 hasar modeli parametreleri [38]

<b>Kart 1</b>	MID	RO	EA	EB	EC	PRBA	PRCA	PRCB
<b>Kart 2</b>	GAB	GBA	GCA	AOPT	DAF	DKF	DMF	EF5
<b>Kart 3</b>	XP	YP	ZP	A1	A2	A3		
<b>Kart 4</b>	V1	V2	V3	D1	D2	D3	MANGLE	

**Tablo 3.1** LS-Dyna MAT262 hasar modeli parametreleri (devamı) [38]

<b>Kart 5</b>	GXC	GXT	GYC	GYT	GSL	GXCO	GXTO	
<b>Kart 6</b>	XC	XT	YC	YT	SL	XCO	XTO	
<b>Kart 7</b>	FIO	SIGY	ETAN	BETA	PFL	PUCK	SOFT	

### 3.2 Malzeme Hasar Modeli

Hasar aktivasyonu katman seviyesinde LaRC04 kırılma kriterine [29, 30] dayanmaktadır. [22] Cherniaev ve diğ.' de hasar modeli farklı malzeme modelleri ile karşılaştırılmış ve model parametrelerinin model cevabına etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Lif doğrultusunda aksenal çekme ve basınç için verilen maksimum şekil değiştirme kriterleri (3.1) ve (3.2)' de verilmiştir [22].

$$\varphi_{1+} = \frac{\sigma_{11} - \nu_{12}\sigma_{22}}{X_T} = 1 \quad (3.1)$$

$$\varphi_{1-} = \frac{\langle |\sigma_{12}^m| - \mu_L \sigma_{22}^m \rangle}{S} = 1 \quad (3.2)$$

McCauley ( $\langle \rangle$ ) operatörünün içinde yer alan  $\mu_L$  katsayısı, asal eksenler için içsel malzeme sürtünme parametresi olarak tanımlanır. Kaçıklık doğrultusundaki gerilme bileşenleri  $\sigma_{12}^m$ ,  $\sigma_{22}^m$ , kaçıklık açısı olan  $\varnothing^c$  ve  $\mu_L$  katsayısı;

$$\sigma_{22}^m = \sigma_{11} \sin^2(\varnothing^c) + \sigma_{22} \cos^2(\varnothing^c) - 2|\sigma_{12}| \sin(\varnothing^c) \cos(\varnothing^c) \quad (3.3)$$

$$\sigma_{12}^m = (\sigma_{22} - \sigma_{11}) \sin(\varnothing^c) \cos(\varnothing^c) + |\sigma_{12}| (\cos^2(\varnothing^c) - \sin^2(\varnothing^c)) \quad (3.4)$$

$$\mu_L = \frac{S_L \cos(2\varnothing_0)}{Y_C \cos^2(\varnothing_0)} \quad (3.5)$$

$$\phi^c = \arctan \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \left( \frac{S_L}{X_C} + \mu_L \right) \frac{S_L}{X_C}}}{2 \left( \frac{S_L}{X_C} + \mu_L \right)} \right] \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir [10].

Matris çekme modunda kırılma, yüklenme yönüne dik bir düzlemde, yani 90° kırılma açısıyla meydana gelir. Enine çatlak, düzlem içi kayma ve enine çekme gerilmesinin kombine etkisi ile büyür. Basınç matris modu için kırılma açısının [34]' e göre  $\phi_0 = 53^\circ$  olduğu varsayılır. Hasar, sürtünme katsayısı ve kırılma açısı ile birlikte kırılma düzlemine etki eden efektif kayma gerilmelerine ( $\tau_{eff}$ ) bağlıdır. Buna bağlı olarak hasar aktivasyon fonksiyonu, orta düzlem dik kırılma durumu için;

$$\phi_{2+} = \begin{cases} \sqrt{(1-g) \frac{\sigma_{22}}{Y_T} + g \left( \frac{\sigma_{22}}{Y_T} \right)^2 + \left( \frac{\tau_{12}}{S_L} \right)^2} = 1, & \sigma_{22} \geq 0 \\ \frac{< |\sigma_{12}| > - \mu_L \sigma_{22}}{S} = 1, & \sigma_{22} < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Dik olmayan kırılma durumu için;

$$\phi_{2-} = \sqrt{\left( \frac{\tau_T}{S_T} \right)^2 + \left( \frac{\tau_L}{S_L} \right)^2} = 1, \quad \sigma_{22} < 0 \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir [22].

Burada;  $g = G_{Ic}/G_{IIc}$  kırılma tokluğu oranını,  $\mu_T = -1/\tan(2\phi_0)$  enine sürtünme katsayısını,  $S_T = Y_C \cos(\phi_0) [\sin(\phi_0) + \cos(\phi_0)/\tan(2\phi_0)]$  enine kesme kuvveti dayanımını,  $\theta = \arctan((-|\sigma_{12}|)/\sigma_{22} \sin(\phi_0))$  kayma açısını temsil eder. Açılı kırılma düzlemindeki kesme gerilmeleri ise (3.9) ve (3.10)' da verilmiştir.

$$\tau_T = < -\sigma_{22} \cos(\phi_0) [\sin\phi_0 - \mu_T \cos(\phi_0) \cos(\theta)] > \quad (3.9)$$

$$\tau_L = < \cos(\phi_0) [|\sigma_{12}| + \mu_L \sigma_{22} \cos(\phi_0) \sin(\theta)] > \quad (3.10)$$

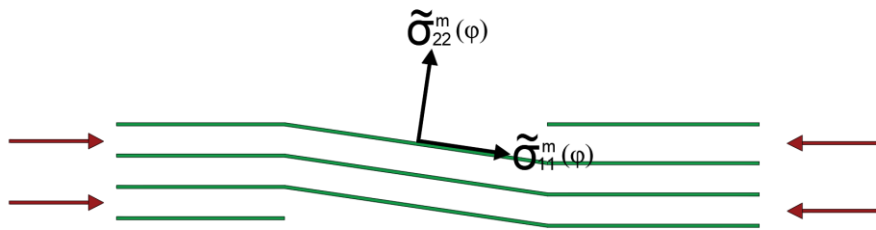
Hasar aktive edildiğinde, katmandaki hasar ilerlemesinde skaler hasar değişkenleri  $d_{1+}$ ,  $d_{1-}$ ,  $d_{2+}$ ,  $d_{2-}$  ve  $d_6$  hasar parametreleri ile ifade edilir. Buna bağlı olarak katman için uygunluk matrisi ve hasar katsayıları aşağıdaki gibi verilmiştir [22].

$$H(d) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 \\ \frac{1}{(1-d_1)E_1} & \frac{1}{(1-d_2)E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{(1-d_2)E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_6)G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$d_1 = d_{1+} \frac{\langle \sigma_{11} \rangle}{|\sigma_{11}|} + d_{1-} \frac{\langle -\sigma_{11} \rangle}{|\sigma_{11}|} \quad (3.12)$$

$$d_2 = d_{2+} \frac{\langle \sigma_{22} \rangle}{|\sigma_{22}|} + d_{2-} \frac{\langle -\sigma_{22} \rangle}{|\sigma_{22}|} \quad (3.13)$$

Hasar katsayıları her iki yön için de basınç ve çekme etkilerinin toplamından oluşmaktadır. Çekme modu için aktivasyon fonksiyonu, yönetici denklemlerden hesaplanan efektif şekil değiştirme tensörü ile izin verilen maksimum şekil değiştirme kriterine göre türetilir. Basınç modu için ise matris elemandan liflere iletilen iç kuvvetlerin oluşturacağı basınç gerilmesi nedeniyle hasar durumunda bir burkulma bandının oluştuğu varsayımına dayanır. Lif kayması bu bandın oluşumundan kaynaklanır ve Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kaymanın açısına dönüştürülen -m gerilme tensörü tarafından hasar koşulları dahil edilir [23].



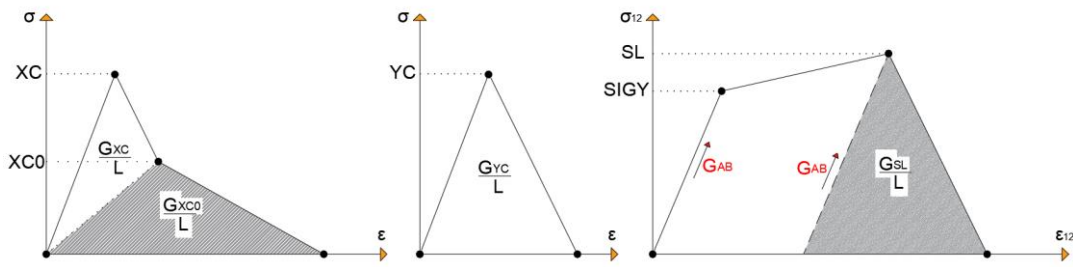
**Şekil 3.1** Burkulma bandı gerilme tensörü [23]

Bu modelde kırılma tokluğunun uygulanmasıyla ilgili önemli hususlar bulunmaktadır. Öncelikle model kırılma tokluğunun, elemanın karakteristik

uzunluğuna göre normalleştirilmesine dair yaygın bir yaklaşım kullanır. Böylelikle elemanın çatlaması için gerekli enerji, boyutlardan bağımsız olup, farklı boyutlardaki elemanlarda aynı olacaktır. Ancak eleman boyutu çok büyük ayarlanırsa geri tepme olup, yanlış analiz sonuçları okunabilir [23]. Yüklemeden dolayı elemanın uzaması beklenirken Şekil değiştirme azaltılmaya zorlanırsa geri tepme olur. Bundan kaçınmak için, modelde malzemenin gerçek kırılma tokluğu, mukavemeti ve elastisite modülünün bir fonksiyonu olarak tanımlanan kritik bir eleman boyutu ( $I_{elem}$ ) vardır;

$$I_{elem} \leq \frac{2E_M \cdot G_M}{X_M^2} \quad (3.14)$$

$M = 1+, 1-, 2+, 2-, 6$  indislerini ifade eder [22].



**Şekil 3.2** MAT262 Gerilme–Şekil değiştirme eğrileri [38]

Eleman bu koşulu sağlayacak kadar küçük değilse, kırılma tokluğu ozc tarafından ayarlanacaktır. Bir başka husus olarak lif yönündeki gerilme–Şekil değiştirme davranışı hasar oluşumundan sonra basınç ve çekme için doğrusal bir davranış gösterir.  $XCO/XC$  ve  $XTO/XT$  oranları MAT054 ve MAT058 malzeme modellerine ait gerilme limit faktörlerine benzer bir davranış gösterebilir. Ancak, bu uygulama daha fazla esneklik sağlar. Çünkü gerilme aynı seviyede kalmak yerine Şekil 3.2' de gösterildiği gibi kademeli olarak azalabilir. Bu davranış  $GXCO$  ve  $GXTO$  tarafından kontrol edilir.  $GXCO$ , kırılma noktasındaki dayanım ( $XCO$ ), karakteristik eleman boyu ( $L$ ) ve gerilme–Şekil değiştirme grafiğinin yatay eksenle keşisim noktası olan kırılma Şekil değiştirmesinin ( $\epsilon_{fr}$ ) bir fonksiyonu olarak tanımlanır [22].

$$GXCO = \frac{L}{2} \cdot XCO \cdot \epsilon_{fr} \quad (3.15)$$

Elemanın göçmeye kadar boyuna doğrultuda dayanım gösterebilmesi için, kırılma şekil değiştirmesinin  $(\epsilon_{fr}) \geq$  EPS eşitsizliğini sağlamalıdır. Burada EPS göçme noktasındaki şekil değiştirme olarak tanımlanmıştır [22].



## LİF TAKVİYELİ KOMPOZİT KİRİŞİN SONLU ELEMAN MODELİ

---

### 4.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu (SEM), mühendislik problemlerini çözümlmek için geliştirilen ve oldukça popüler olan bir sayısal yöntemdir. Gerilme, ısı transferi, akışkan ve elektromanyetizma analizlerinde zamana bağımlı, bağımsız ve doğrusal olan, olmayan gibi problemler sonlu elemanlar metodu ile çözülebilir. SEM' nin başlangıcı, bazı araştırmacıların elastik sürekli bir ortamın ayrık eşdeğer çubuklarla yaklaşık olarak modellendiği 1900' lü yılların başına kadar dayanmaktadır. Gelişim süreci içindeki diğer gelişmelere rağmen, SEM Clough tarafından 1960' lı yıllarda popüler hale getirilmiştir [40].

Günümüzde sonlu elemanlar analizi (SEA) için birçok ticari yazılım üretilmekte ve geliştirilmektedir. Bunlardan en popüler olanlarından birisi de ANSYS programıdır. ANSYS, otomotiv, havacılık ve elektronik gibi birçok mühendislik alanında kullanılan güçlü bir yazılımdır. Bunun yanında inşaat sektöründe, global çözümlerde çok tercih edilmese de araştırma-geliştirme projelerinde sıkça başvurulan bir yazılımdır. Bu çalışmada doğrusal olmayan malzeme modeli Ls-Dyna Prepost 4.9 yazılımı ile oluşturulmuştur. Çözücü olarak ise Ansys Mechanical APDL 18.1 kullanılmıştır. ANSYS programında problemin çözülmesi üç ana başlık altında toplanabilir;

1. Ön işlem aşaması
2. Çözüm aşaması
3. Son işlem aşaması

Ön işlem aşamasında problemin tanımı yapılır. Gerekli girdiler, koordinat sistemleri, eleman ve malzeme özellikleri gibi veriler kullanıcı tarafından tanımlanır. Program tarafından kullanıcıya farklı analiz opsiyonları sunulmaktadır. Opsiyonel olarak seçilen analiz metoduyla birlikte, eleman için denklemler geliştirilir, tüm sistemi temsil eden global rijitlik matrisi oluşturulur.

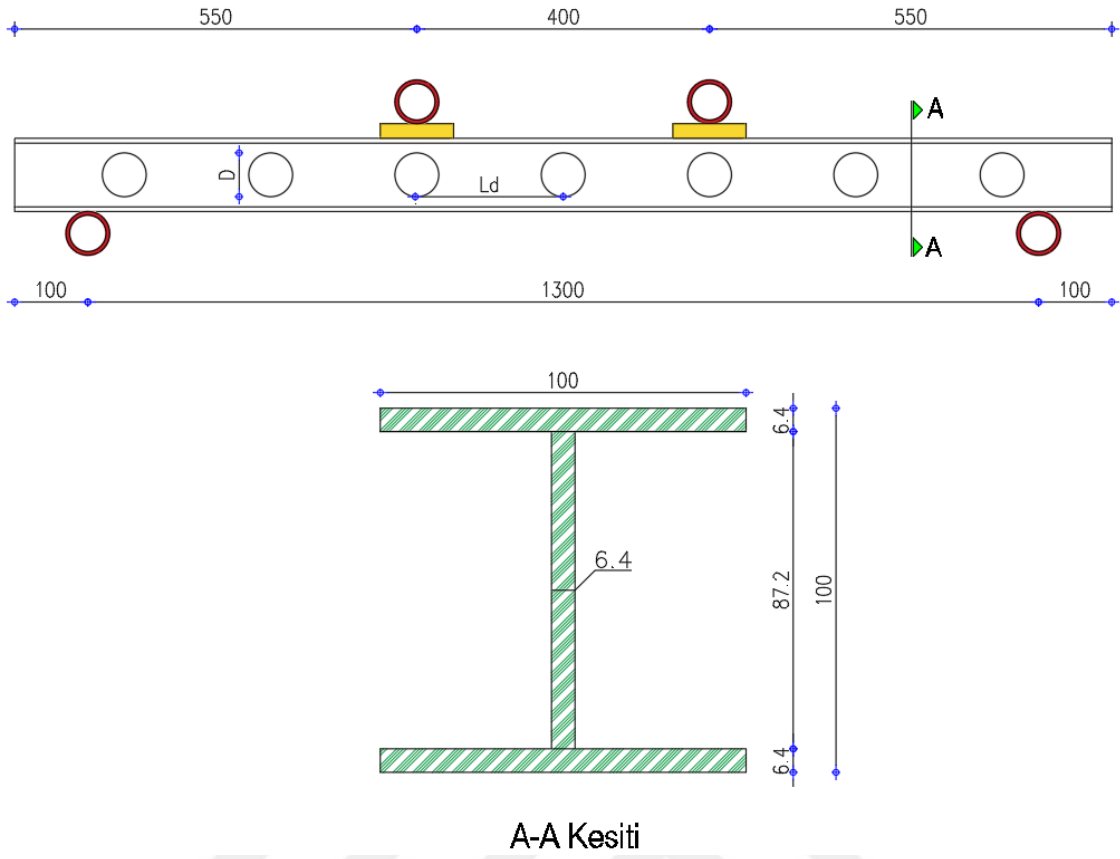
Modellenen katı model üzerinde serbestlik dereceleri, sınır şartları ve yüklemeler belirlenir [8]. Ancak bu çalışma özelinde geometrik model, ANSYS ve Ls-Dyna Prepost programlarında oluşturulmuş, bahsedilen parametreler Bölüm 5' te anlatıldığı üzere Ls-Dyna Prepost yazılımında tanımlanmıştır.

İşleme aşamasında tanımlanan veriler doğrultusunda doğrusal veya doğrusal olmayan bir denklem takımı çözülür. Çözüme göre düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler hesaplanır [41]. Bu aşamada çözüm süresi, SE modelinin ne kadar detaylı olduğuyla doğrudan ilgilidir. Maksimum sonlu eleman boyu, ne kadar küçükse o kadar çok sonlu eleman ve düğüm noktası çözüme dahil olacaktır. Haliyle çözülmesi gereken denklem sayısı artacaktır. Bilgisayar performansına da bağlı olarak analizler oldukça uzun zamanlara yayılabilir.

Son işlem aşamasında analizden elde edilen sonuçlar derlenir ve görüntülenir. Gerilmeler, şekil değiştirmeler ve benzer sayısal sonuçlar görüntülenir [41]. ANSYS ve Ls-Dyna Prepost programları sonuçları görüntülemek için geniş bir donanımına sahiptir. Kullanıcı talebine göre, sonuçlar “.txt” uzantılı bir dosyada kaydedilebilir veya katı model üstünde görüntülenebilir.

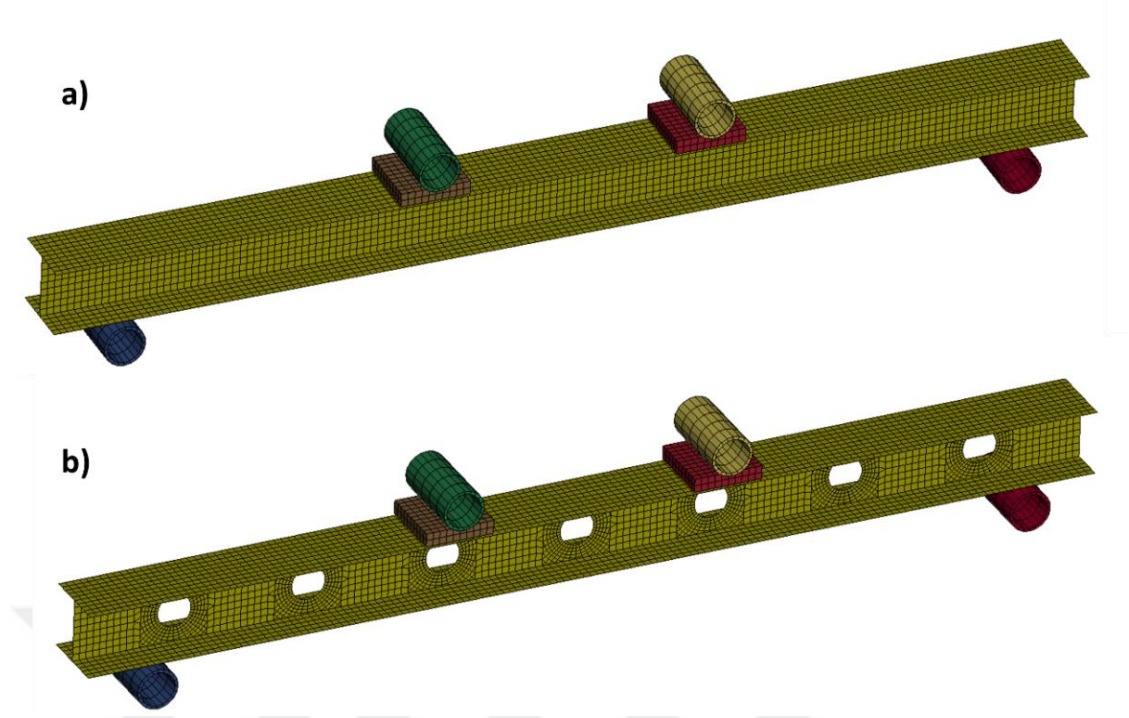
## **4.2 Lif Takviyeli Kompozit Kirişin Tanıtılması**

Önceki bölümlerde teorik modeli açıklanan malzeme hasar modeli LS-Dyna Prepost genel amaçlı SE programında MAT262 kodlu malzeme modeli ile tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan davranışı incelenen I kirişin boyutları, [24] Alaedini ve diğ. 2020'den alınmış, tipik kirişe ait geometrik büyüklükler ve yükleme koşulları Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



**Şekil 4.1** Delikli kirişe ait yükleme koşulları ve geometrik büyüklükler (mm)

Yanal burkulması serbest ve engellenmiş kirişlerin dört noktalı eğilme deneyi altında davranışı incelenmiştir. Tipik SE modelleri Şekil 4.2’ de sunulan delikli ve deliksiz kirişler, ANSYS ve LS-Dyna Prepost programlarında kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Yarı statik analiz yaklaşımı ile “explicit” zaman integrasyonu kullanılmıştır. Oluşturulan detaylı modelde hesaplama yükünü azaltmak için kütle ölçeklendirme ve tek noktalı integrasyon kullanılmıştır. Kütle ölçeklendirmede kinetik enerjinin toplam enerjiye oranı dikkate alınmış ve analizlerde % 1’ in altında olduğu görülmüştür. Ayrıca tek noktalı integrasyonun sebep olduğu fiziksel olmayan “hourglass” modlarından kaçınmak için program tarafından sunulan “hourglass” kontrol algoritması kullanılmıştır. Yük ve sınır koşullarını temsil eden silindirler ve kiriş arasına yüzey kontakları tanımlanmıştır. Ayrıca kiriş başlıkları altındaki yerel gerilme yoğunluklarını azaltmak için yük silindirleri altına elastik kauçuk takozlar tanımlanmıştır. SE ağı için en uygun eleman boyutları dikkate alınarak delik çevresinde ağ sıklaştırılması yapılmıştır.



**Şekil 4.2** I kirişe ait tipik SE modelleri a) deliksiz b) delikli

Aşamalı göçme analizinde kullanılan LS-Dyna Prepost programındaki MAT262 kodlu malzeme modeli birçok fiziksel ve fiziksel olmayan ve analizi kontrol eden parametreler içermektedir. Bu parametreler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’ de verilmiştir. Esasında fiziksel malzeme parametreleri çeşitli yönetmelikler ile tanımlanan çok sayıda deney ile belirlenmelidir. Fakat bu çalışmada sadece genel davranış incelendiğinden, malzeme parametreleri, literatürdeki CTP malzemesi ile ilgili mevcut deneysel çalışmalardan ortalama değerler olarak alınmıştır. Malzeme değerleri daha çok pultrüzyon ile üretilmiş CTP elemanlar için yapılan çalışmalardan alınmıştır. Enine ve boyuna doğrultulardaki elastisite modülü, çekme dayanımı, kayma dayanımı, kayma modülü, düzlem içi kayma akma gerilmesi ve teğet modülü gibi parametreler [25] Zhang ve diğ. 2018’deki eksen dışı çekme sonuçları kullanılarak kalibre edilmiştir. Kırılma toklukları ile ilgili parametreler ise [26] Fernandes ve diğ. 2020, [27] Fernandes ve diğ. 2019, [28] Coelho ve diğ. 2015’den yaklaşık değerler olarak seçilmiştir. Fiziksel olmayan parametre değerleri için ise [22] Cherniaev ve diğ. 2018’ den yararlanılmıştır.

**Tablo 4.1** Cam takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Kütle yoğunluğu (RO)	kg / m <sup>3</sup>	Kütle ölçeklendirmeye bağlı
Boyuna doğrultuda elastisite modülü (EA)	Pa	21500e+6
Enine doğrultuda elastisite modülü (EB, EC)	Pa	7200e+6
Poisson oranı (PRCA, PRCB)	-	0.08
Poisson oranı (PRBA)	-	0.07
Kayma modülü (GBC, GCA)	Pa	7700e+6
Kayma modülü (GAB)	Pa	7500+6
Boyuna çekme dayanımı (XT)	Pa	360e+6
Boyuna basınç dayanımı (XC)	Pa	288e+6
Enine çekme dayanımı (YT)	Pa	115e+6
Enine basınç dayanımı (YC)	Pa	230e+6
Kayma dayanımı (SL)	Pa	97e+6
Kırılma açısı (FIO)	Derece	53
Düzlem içi kayma akma gerilmesi (SIGY)	Pa	25e+6
Düzlem içi kayma teğet modülü (ETAN)	Pa	2300e+6
Kırılma tokluğu – enine doğrultu (GSL)	N/m	10000

**Tablo 4.1** Cam takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri (devamı)

Kırılma tokluğu – boyuna doğrultu – çekme (GXT)	N/m	20000
Kırılma tokluğu – boyuna doğrultu – basınç (GXC)	N/m	28000
Kırılma tokluğu – enine doğrultu – çekme (GYT)	N/m	5000
Kırılma tokluğu – enine doğrultu – basınç (GYC)	N/m	5000

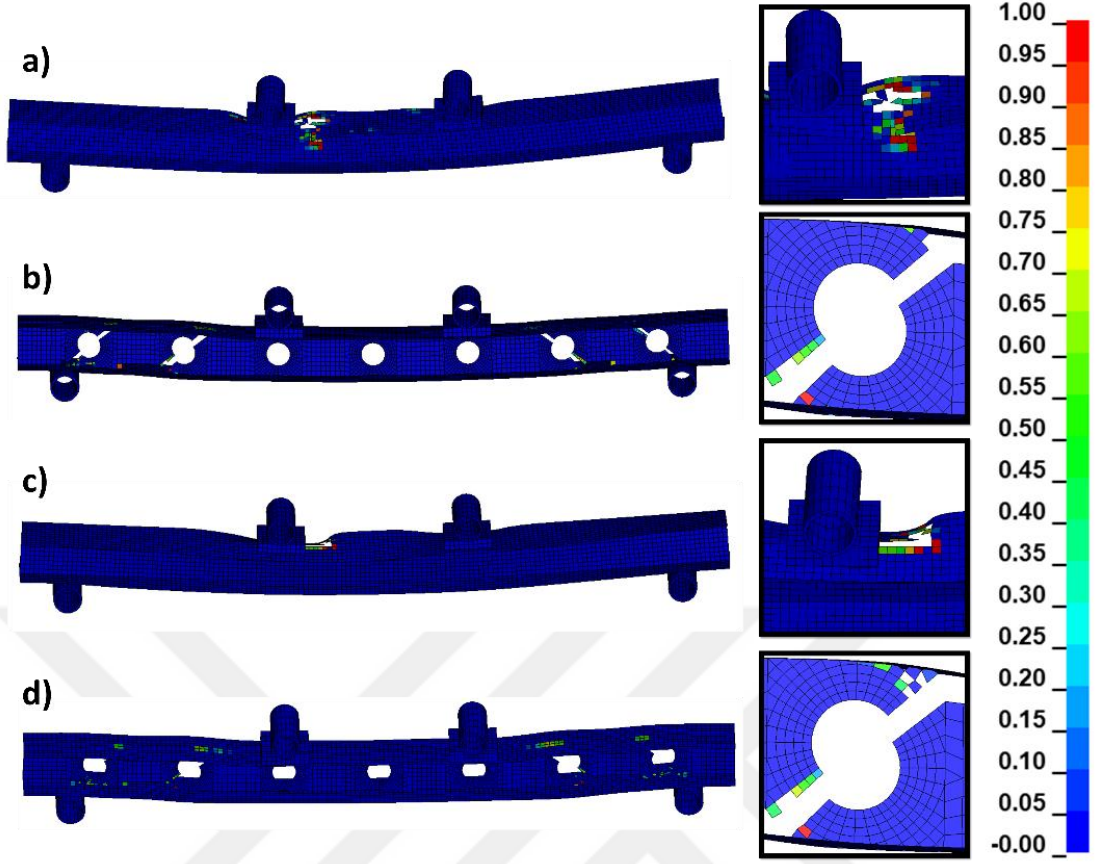
**Tablo 4.2** Cam takviyeli polimer için fiziksel olmayan parametreler

Parametre	Açıklama	Birim	Değer
D_F	İntegrasyon noktasının göçmesini kontrol eden etiket	-	0
EPS	Katman göçmesi için maksimum efektif şekil değiştirme	m/m	-
SOFT	Yumuşama bölgesi azaltma faktörü	-	0.57
PFL	Dağılmanın başlaması için göçmesi gereken katman yüzdesi	-	100
GXCO	Çift doğrusal hasar değişiminin tanımlanmasında kullanılan boyuna basınç kırılma tokluğu	N/m	691200
GXTO	Çift doğrusal hasar değişiminin tanımlanmasında kullanılan boyuna basınç kırılma tokluğu	N/m	864000
XCO	Büküm noktasındaki boyuna basınç dayanımı	Pa	230.4e + 6
XTO	Büküm noktasındaki boyuna çekme dayanımı	Pa	288e + 6

### 5.1 Farklı Delik aplarına Sahip Kirişlere Ait Analizler

Bu b3l3mde boyutları ve y3kleme durumu 3nceki kısımlarda verilen I kirişte farklı delik çapları için g3me durumuna ait sayısal sonuçlar sunulmuştur. Parametrik alışma için aşamalı g3me analizi 50, 60, 70 ve 80 mm delik çaplı, lifleri boyuna doğrultuda yerleştirilen kirişlere uygulanarak y3k-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

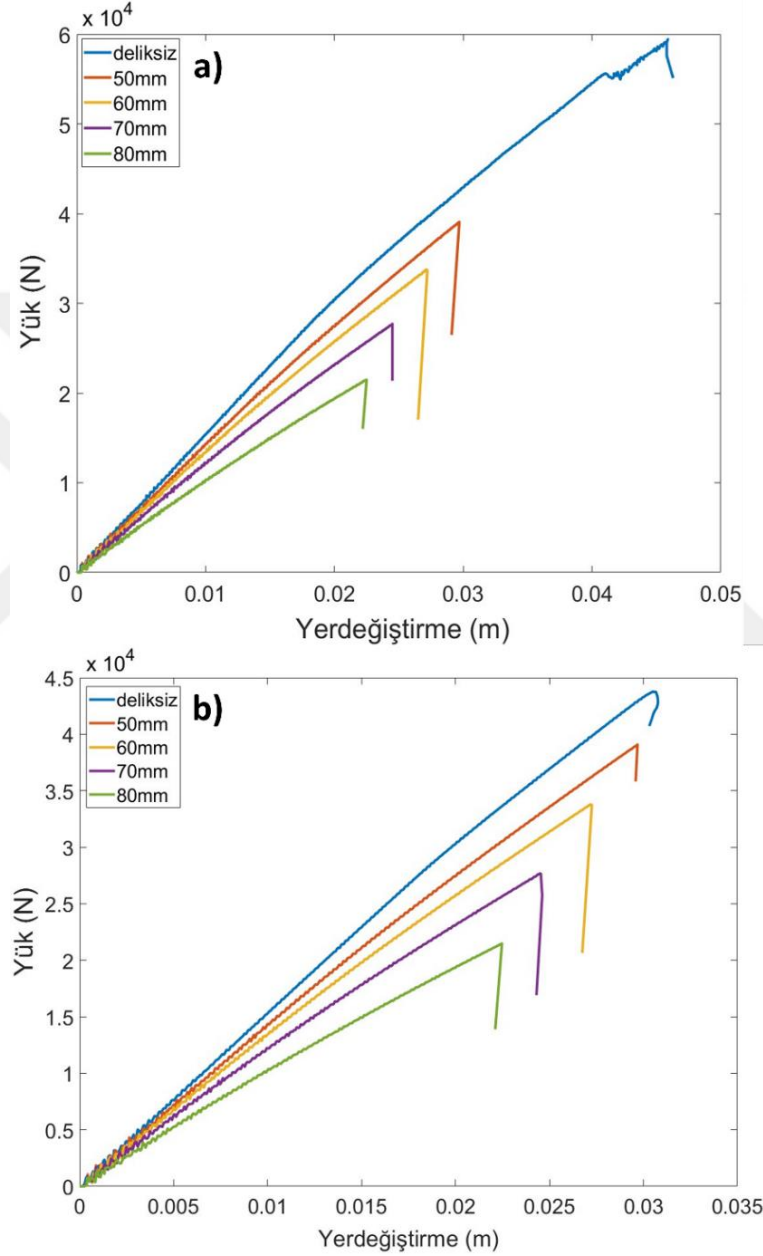
Bileşik katmanlarda, kalınlık boyunca integrasyon noktalarında hasar meydana geldiğinde, hasar alan eleman silinir. Elemanla birlikte d3đ3m noktaları da silinir. Bu elemanlar “crashfront” 3geleri haline gelir. Yumuşama b3lgesi parametresi (SOFT) kullanılarak bu elemanların rijitlikleri d3ř3r3lebilir [39]. Bundan dolayı hasar durumunda silinen elemanlar program aray3z3nde g3r3nt3lenmez, ancak g3me mekanizması hakkında fikir 3retilir.



**Şekil 5.1** Göçme anında I kirişteki hasar dağılımı a) deliksiz, yanıl ötelenmesi önlenmiş b) delikli yanıl ötelenmesi önlenmiş c) deliksiz yanıl ötelenmesi serbest d) delikli yanıl ötelenmesi serbest

Şekil 5.1' den görüldüğü üzere yanıl ötelenmesi serbest ve önlenmiş deliksiz kirişlerde göçme başlık burkulmasından kaynaklanmaktadır. Yanıl ötelenmesi önlenmiş deliksiz kirişte göçme yükü, serbest olan duruma görece daha yüksektir. Delikli kirişlerde ise gövde kesitinin zayıflamasından dolayı kayma göçmesi meydana gelmektedir. Bundan dolayı yanıl ötelenmesi önlenmiş ve serbest olan delikli kirişlerde göçme yükünde değişim gözlenmemiştir. Şekil 5.2' de farklı delik çapları için yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Görüldüğü üzere delikli ve deliksiz durumlar için göçme yüklerinde önemli bir fark meydana gelmektedir. Ayrıca kirişte bulunan deliklerin çapları arttıkça, göçme yüklerinde düşüş gözlenmektedir. Bununla birlikte tüm durumlarda, kompozit kirişlerde sıkça gözlemlenen gevrek kırılma hakimdir. Kirişler göçme yüküne kadar neredeyse doğrusal davranmakta, göçme yüküne ulaşıldığında ise rijitlik aniden düşmektedir. Hasar hızlı bir şekilde ilerleyerek rijitliğin azalmasına ve kirişin göçmesine sebep olmaktadır. Delikli kirişlerdeki göçme öncesi davranış, deliksiz

kirişe göre daha doğrusal bir karakteristiğe sahiptir. CTP kirişlerde kayma gerilme ve şekil değiştirmeleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu bilinmektedir. Fakat delikli kirişlerde kayma kapasitesinin azalması, kayma şekil değiştirmelerinin yaptığı işin de azalmasına sebep olarak göçme öncesi davranışın doğrusala daha yakın olmasını sağlamıştır.



**Şekil 5.2** Deliksiz kiriş ve farklı delik çaplarına sahip kirişlerin yük-yer değiştirme grafikleri a) yanall ötelenmesi önlenmiş b) yanall ötelenmesi serbest

Delikli kirişlerin uygulanmasındaki amaçlardan biri sistemin ağırlığını azaltıp, taşıma gücünü ağırlığına göre optimum bir değerde tutmaktır. Analizlerden

görüldüğü üzere kirişin ağırlığındaki azalma oranı, göçme yükündeki azalmaya oranla oldukça düşüktür. Maksimum delik çapı 80 mm ve minimum delik çapı 50 mm' ye sahip kirişler kıyaslanacak olursa, ağırlık oranındaki azalma % 1' den küçük iken, göçme yükündeki düşüş oranı % 45 civarındadır. Deliksiz kiriş ile 50 mm çaplı deliğe sahip kirişler arası göçme yükündeki düşüş oranı ise % 35 civarındayken, ağırlığın azalma oranı yine % 1'in altındadır. Farklı delik çaplarına ait kirişlere ait analiz sonuçları yanal burkulması önlenmiş ve serbest durumlar için Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 de sunulmuştur.

**Tablo 5.1** Yanal burkulması önlenmiş, farklı delik çaplarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları

Delik Çapı (mm)	Kiriş Boyu (mm)	Toplam Ağırlık (kg)	Dayanım (N)	Dayanım/Ağırlık (N/kg)
deliksiz	1500	4.96 <sup>1</sup>	60606	1211.6
50	1500	4.81 <sup>1</sup>	39096	8136.5
60	1500	4.74 <sup>1</sup>	33764	7130.7
70	1500	4.65 <sup>1</sup>	27720	5957.4
80	1500	4.56 <sup>1</sup>	21482	4713

1: Ağırlık hesabında kütle yoğunluğu 1800 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaba katılmıştır.

**Tablo 5.2** Yanal burkulması serbest, farklı delik çaplarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları

Delik Çapı (mm)	Kiriş Boyu (mm)	Toplam Ağırlık (kg)	Dayanım (N)	Dayanım/Ağırlık (N/kg)
deliksiz	1500	4.96 <sup>1</sup>	43753	8821
50	1500	4.81 <sup>1</sup>	39094	8128

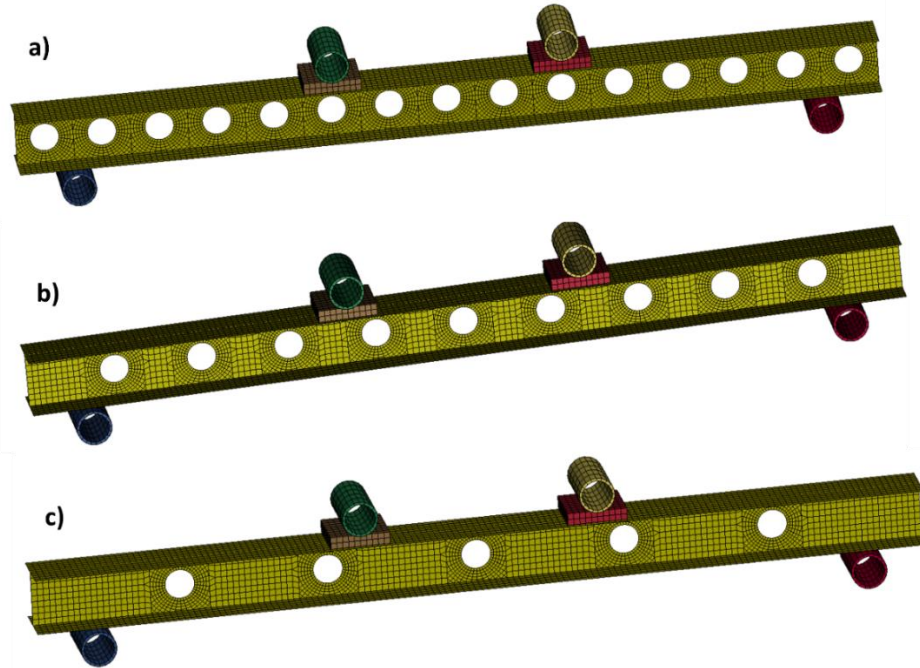
**Tablo 5.2** Yanal burkulması serbest, farklı delik çaplarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları (devamı)

60	1500	4.74 <sup>1</sup>	33794	7130
70	1500	4.65 <sup>1</sup>	27701	5957
80	1500	4.56 <sup>1</sup>	21479	4710

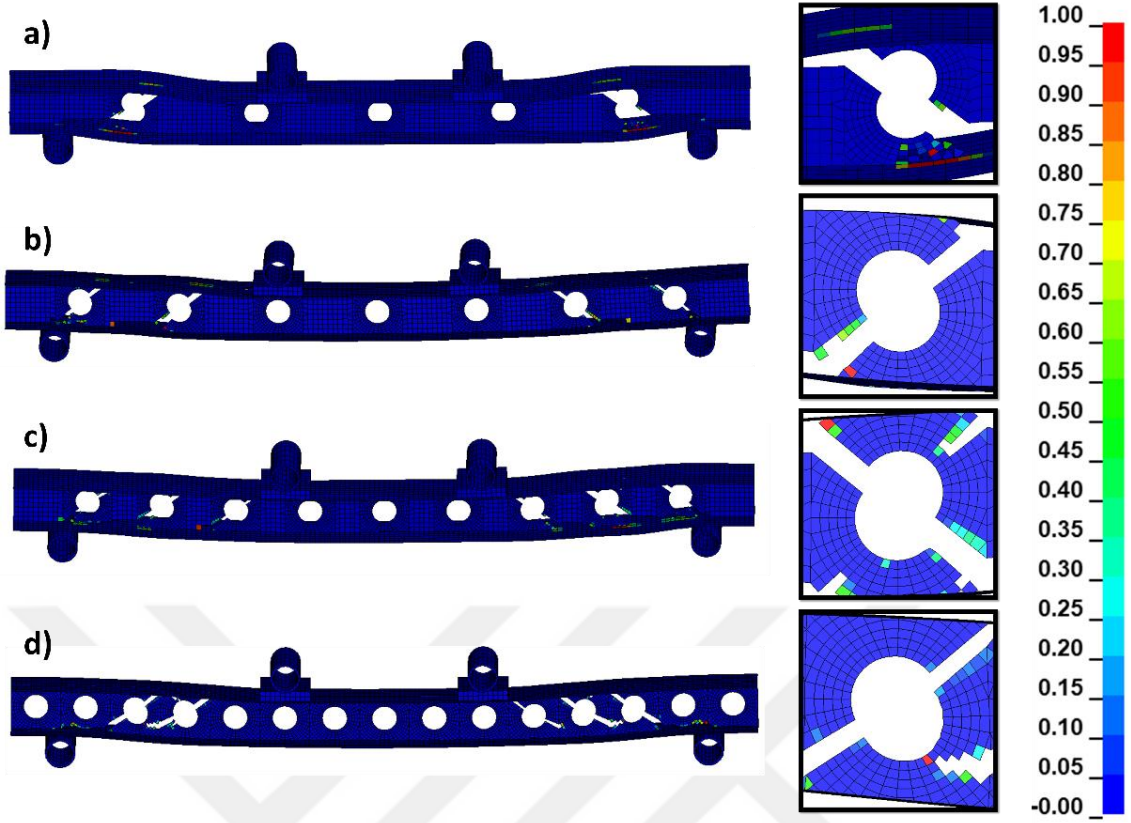
1: Ağırlık hesabında kütle yoğunluğu 1800 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaba katılmıştır.

## 5.2 Farklı Delikler Arası Mesafelere Sahip Kirişlere Ait Analizler

Bölüm 5.1’ de yapılan analizlerde delikler arası mesafe (Ld) 200 mm olarak alınmıştır. Bu bölümde, 50 mm çaplı deliğe sahip kirişte, kiriş ortasındaki deliğin konumu sabit tutulmuş, delikler arası mesafe parametrik olarak değiştirilerek göçme mekanizmasına olan etkisi incelenmiştir. Analizler, SE modelleri Şekil 5.3’ de sunulan Ld mesafesi 100, 150 ve 250 mm için tekrarlanmıştır.

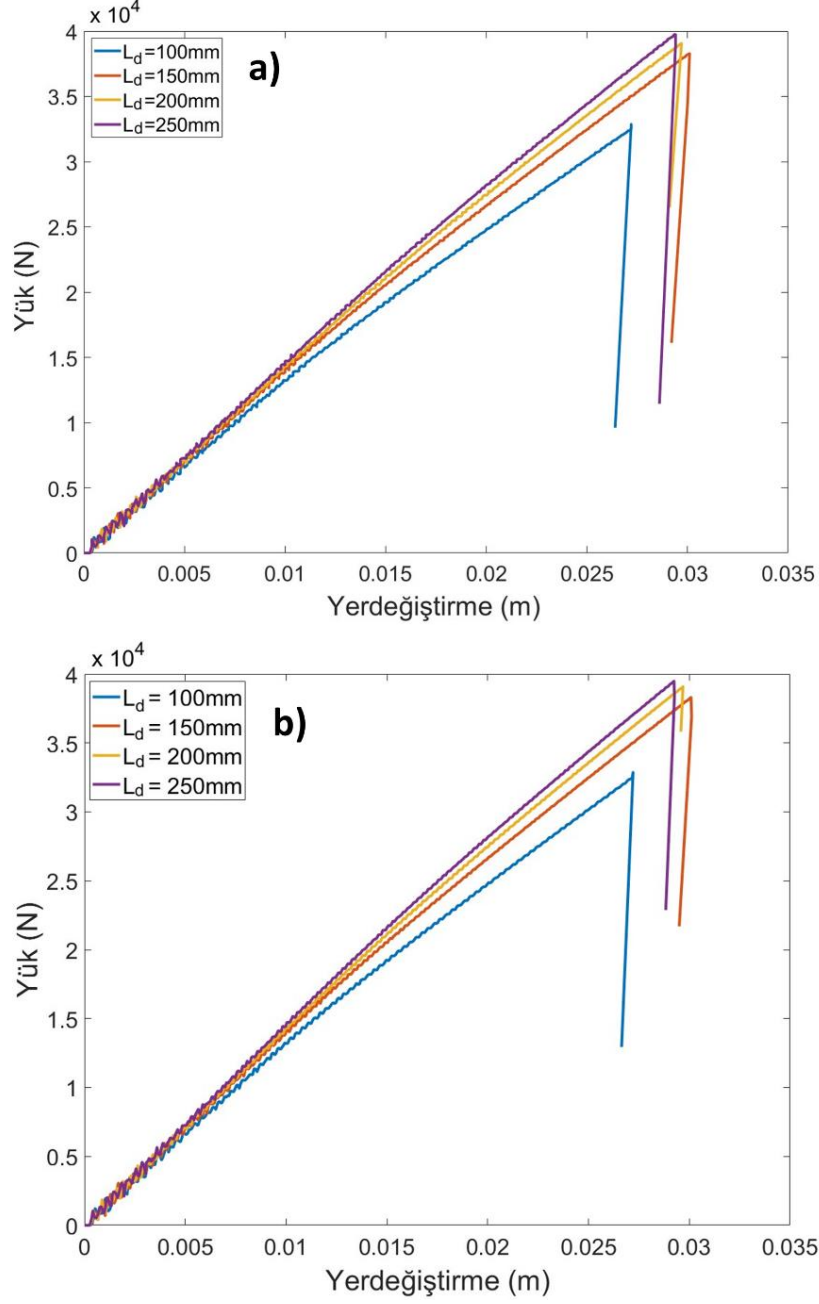


**Şekil 5.3** Farklı delikler arası mesafelere sahip kirişlerin SE modelleri a) Ld = 100 mm b) Ld = 150 mm c) Ld = 250 mm



**Şekil 5.4** Göçme anında yanal ötelenmesi önlenmiş delikli I kirişlerdeki hasar dağılımı a)  $L_d = 250$  mm b)  $L_d = 200$  mm c)  $L_d = 150$  mm d)  $L_d = 100$  mm

Farklı  $L_d$  mesafelerine sahip, yanal ötelenmesi önlenmiş ve serbest delikli kirişlere ait yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 5.5' te sunulmuştur. Delik aralıklarının göçme yüküne etkisinin delik çapına etkisine göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, Şekil 5.4' de görüldüğü gibi göçmenin global olması ile ilgili değil de, delik çevresinde oluşan yerel hasar ile ilgilidir. Hasar yerel olarak delik çevresinde başlayarak hızlıca ilerlemektedir. 150, 200, 250 mm delik aralıklarına sahip kirişte taşıma gücünde büyük farklılıklar gözlenmezken, 100 mm aralık mesafesine sahip kirişte taşıma gücü diğer kirişlere görece daha düşüktür.



**Şekil 5.5** Farklı delikler arası mesafelere sahip kirişlerin yük-yer değiştirme grafikleri a) yanal ötelenmesi önlenmiş b) yanal ötelenmesi serbest

Delikli kirişlerde hasar delik çevresinde meydana geldiğinden dolayı, göçme anında başlıklarda bir hasar gözlenmemektedir. Bu nedenle kirişin yanal ötelenmesinin önlenmiş veya serbest olması sonuçlara etki etmemektedir. Tablo 5.3 ve Tablo 5.4' de de görüldüğü üzere yanal ötelenmesi önlenmiş ve serbest kirişlere ait dayanım/ağırlık oranlarındaki tutarlılık %100' e yakındır.

**Tablo 5.3** Yanal burkulması önlenmiş, farklı delik aralıklarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları

Delikler Arası Mesafe (mm)	Delik Sayısı	Toplam Ağırlık (kg)	Dayanım (N)	Dayanım/Ağırlık (N/kg)
250	5	4.85 <sup>2</sup>	39778	8202
200	7	4.81 <sup>2</sup>	39072	8132
150	9	4.76 <sup>2</sup>	38291	8045
100	15	4.62 <sup>2</sup>	32884	7112

2: Ağırlık hesabında kütle yoğunluğu 1800 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaba katılmıştır.

**Tablo 5.4** Yanal burkulması serbest, farklı delik aralıklarına sahip kirişlerin dayanım/ağırlık oranları

Delikler Arası Mesafe (mm)	Delik Sayısı	Toplam Ağırlık (kg)	Dayanım (N)	Dayanım/Ağırlık (N/kg)
250	5	4.85 <sup>2</sup>	39493	8143
200	7	4.81 <sup>2</sup>	39094	8128
150	9	4.76 <sup>2</sup>	38310	8048
100	15	4.62 <sup>2</sup>	32882	7117

2: Ağırlık hesabında kütle yoğunluğu 1800 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaba katılmıştır.

Minimum 100 mm ve maksimum 250 mm delik aralığına sahip kirişlerde delik sayısı sırasıyla 15 ve 5' tir. Bu iki durumda 100 mm delik aralığına sahip kirişe göre taşıma güçleri arasında değişim oranı % 21, ağırlık oranındaki düşüş ise % 5 civarındadır. Kirişteki hasar bölgesel ve delik çevresinde olduğu için, Ld mesafesi, delik sayısı gibi parametrelere görece, delik çapının büyüklüğü taşıma gücüne daha çok etki etmektedir.

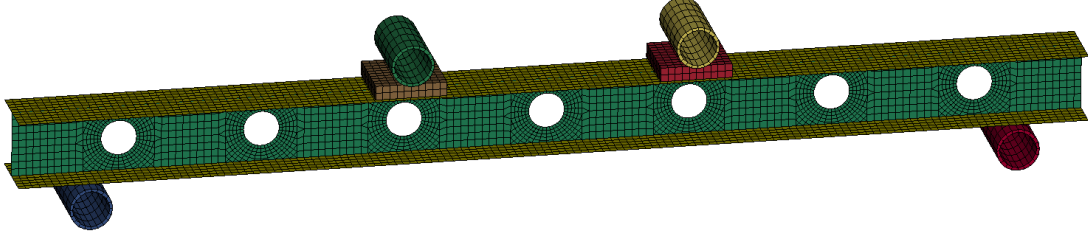
### 5.3 Gövde Oryantasyonu Farklı Delikli Kirişlere Ait Analizler

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, delikli kirişlerde göçme gövdedeki delik varlığından dolayı yerel olarak gerçekleşmektedir. Bu bölümde gövdede boyuna doğrultuda uzanan liflerin, oryantasyonları değiştirilerek analizler 50 mm çaplı deliğe sahip kiriş için tekrarlanmıştır. Beş eş katmandan oluşan 6.4 mm kalınlığa sahip gövde kesiti, kalınlık sabit tutulup yedi eş katmana bölünmüştür. Simetri eksenindeki, yani kesit ortasındaki katman yine boyuna doğrultuda uzanıp, çevresindeki katmanların oryantasyonları değiştirilerek göçme mekanizmasına olan etkisi incelenmiştir. Bahsi geçen kirişlerin isimlendirmesi ve oryantasyonları Tablo 5.5’ te sunulmuştur.

**Tablo 5.5** Gövde oryantasyonu farklı, delikli kirişlere ait isimlendirme

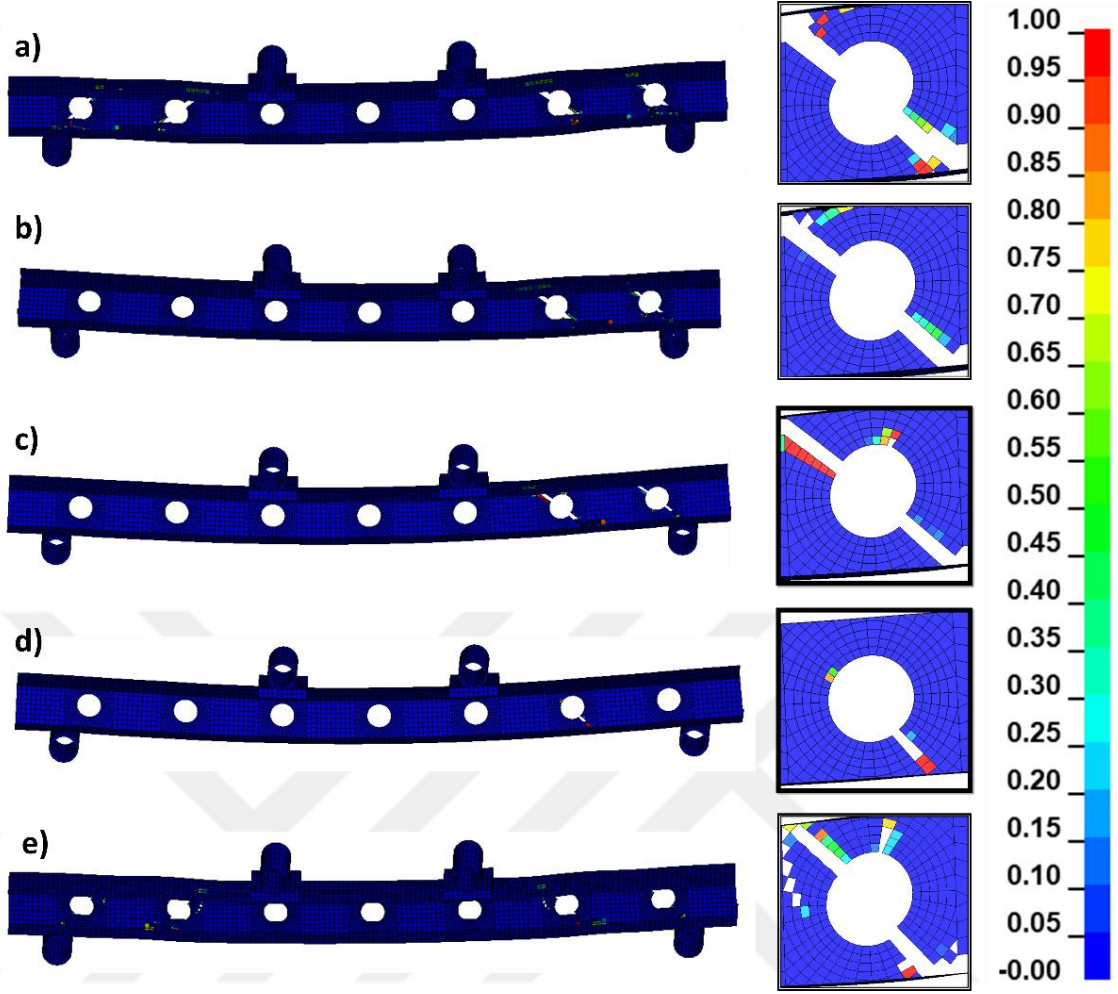
Kiriş İsmi	Oryantasyon
GO-0	[0] <sub>7</sub>
GO-15	[15/-15/15/0/15/-15/15]
GO-30	[30/-30/30/0/30/-30/30]
GO-45	[45/-45/45/0/45/-45/45]
GO-90	[90] <sub>7</sub>

Delikli kirişlerde, başlığın yanal ötelenmesi önlenmiş veya serbest olmasının göçme mekanizmasına etkisinin yok denilecek kadar az olduğu önceki bölümlerde görülmüştür. Bu nedenle Tablo 5.5’ te belirtilen kirişler için analizlerde başlıkların yanal ötelenmesi önlenmemiştir. Tipik SE modeli ise Şekil 5.6’ daki gibidir.



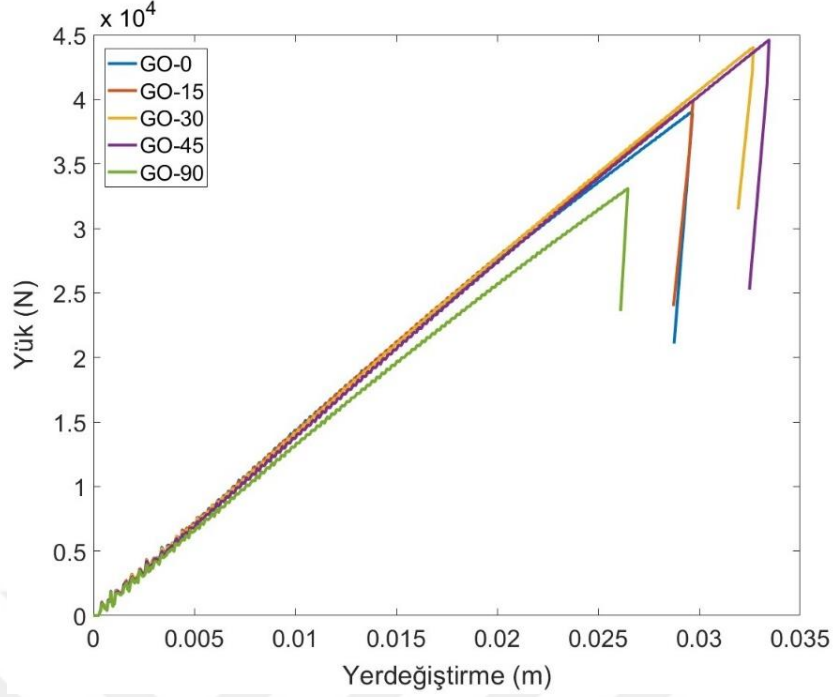
**Şekil 5.6** Gövde oryantasyonu farklı, delikli kirişlere ait tipik SE modeli

Temel mekanik yasalarına göre, inşaat sektöründe çokca kullanılan I kesitli kirişlerde, gövde kesiti kesme kuvvetlerine karşı çalışacaktır. Kirişin lifli yapısından dolayı liflerin oryantasyon açısının değiştirilmesiyle kiriş gövdesinin davranışı da değişecektir. Boyuna doğrultuda yerleştirilen liflerin aksine açılı yerleştirilen liflerin bulunması durumunda, düşey yükler ortotropik eksenler boyunca dağıtılır. Bu nedenle liflerin oryantasyon açısı, yüklerin güçlü ve zayıf eksenlere dağıtılmasında etkilidir. Böylelikle malzemenin mekanik özellikleri değiştirilmeden, boyuna doğrultuda uzanan liflerin oryantasyonları değiştirilerek taşıma kapasitesi iyileştirilebilir. Şekil 5.7’ de görüldüğü gibi, gövde oryantasyonu farklı delikli kirişlerin göçme anındaki hasar dağılımları bazı farklılıklar içermektedir. Beklenildiği üzere göçme kayma gerilmelerinden kaynaklanmakta ve yerel bir bölgede oluşmaktadır. Ancak liflerin oryantasyonununun  $45^\circ$  ye yaklaşmasıyla, göçmenin nispeten daha yerel, yani daha dar bir alanda gerçekleştiği görülmektedir.



**Şekil 5.7** Göçme anında yanal ötelenmesi serbest delikli I kirişlerdeki hasar dağılımı a) GO-0 b) GO-15 c) GO-30 d) GO-45 e) GO-90

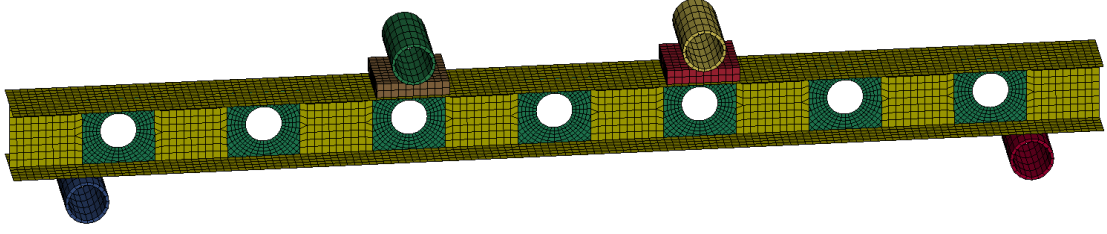
GO-0, GO-15, GO-30, GO-45 ve GO-90 kirişlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 5.8' de sunulmuştur. GO-0 ile GO-15, GO-30 ile GO-45 kirişlerinin göçme yükleri yakın seviyelerde gözlemlenirken, GO-90 kirişinde göçme daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Bunun temel sebebi, liflerin kayma gerilmelerine karşı yaptığı işin daha düşük olmasıdır. Bu durumda basınç yükleri altındaki lifler bir burkulma bandı olarak çalışır ve matris malzemesinin kayma gerilmelerine karşı yaptığı iş daha büyük olur. Bunun sonucunda yeterli dayanımı gösteremeyen GO-90 kirişi nispeten daha düşük yüklerde göçer.



**Şekil 5.8** Gövde oryantasyonu farklı, yanal ötelenmesi serbest delikli kirişlere ait yük-yer değiştirme eğrileri

#### 5.4 Delik Etrafında Karbon-Cam Fiber Takviyeli Kirişlerin Sayısal Analizi

Bu bölümde önceki bölümlerin aksine, 50 mm delik çapına sahip kirişlerde sadece CTP malzemesi değil, karbon takviyeli polimer (KTP) ve CTP bir arada kullanılmıştır. Hasarın delik çevresinde yerel olarak oluşmasından dolayı, sadece delik çevresinde KTP ve CTP bir arada kullanılmıştır. Geometrik büyüklükler değiştirilmeden, tüm lifler boyuna doğrultuda yerleştirilmiş ve delik çevresinde kesitin ortasına belli kalınlıklarda karbon lif yerleştirilerek göçme mekanizmasına olan etkisi incelenmiştir. Delik çevresinde KTP malzemesi kullanılan kirişlerin tipik SE modeli Şekil 5.9' da gösterilmiştir. Tablo 5.6 ve Tablo 5.7' de sunulan KTP malzemesine ait fiziksel ve fiziksel olmayan parametreler için [22] Cherniaev ve diğ. 2018'den yararlanılmıştır. Bununla birlikte enine ve boyuna çekme-basınç dayanımları literatürdeki mevcut çalışmalardaki değerler kalibre edilerek yaklaşık olarak kullanılmıştır.



**Şekil 5.9** Delik çevresinde karbon-cam lif takviyeli, delikli kirişlere ait tipik SE modeli

**Tablo 5.6** Karbon takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Kütle yoğunluğu (RO)	kg / m <sup>3</sup>	Kütle ölçeklendirmeye bağlı
Boyuna doğrultuda elastisite modülü (EA)	Pa	16500e+7
Enine doğrultuda elastisite modülü (EB, EC)	Pa	9000e+6
Poisson oranı (PRBA, PRCA)	-	0.0185
Poisson oranı (PRCB)	-	0.5
Kayma modülü (GAB, GCA)	Pa	5600e+6
Kayma modülü (GBC)	Pa	2800+6
Boyuna çekme dayanımı (XT)	Pa	1867e+6
Boyuna basınç dayanımı (XC)	Pa	1531e+6
Enine çekme dayanımı (YT)	Pa	260e+5
Enine basınç dayanımı (YC)	Pa	210e+6
Kayma dayanımı (SL)	Pa	100e+6

**Tablo 5.6** Karbon takviyeli polimer için fiziksel malzeme özellikleri (devamı)

Kırılma açısı (FIO)	Derece	53
Düzlem içi kayma akma gerilmesi (SIGY)	Pa	600e+5
Düzlem içi kayma teğet modülü (ETAN)	Pa	800e+6
Kırılma tokluğu – enine doğrultu (GSL)	N/m	750e+6
Kırılma tokluğu – boyuna doğrultu – çekme (GXT)	N/m	91600
Kırılma tokluğu – boyuna doğrultu – basınç (GXC)	N/m	79900
Kırılma tokluğu – enine doğrultu – çekme (GYT)	N/m	200
Kırılma tokluğu – enine doğrultu – basınç (GYC)	N/m	760

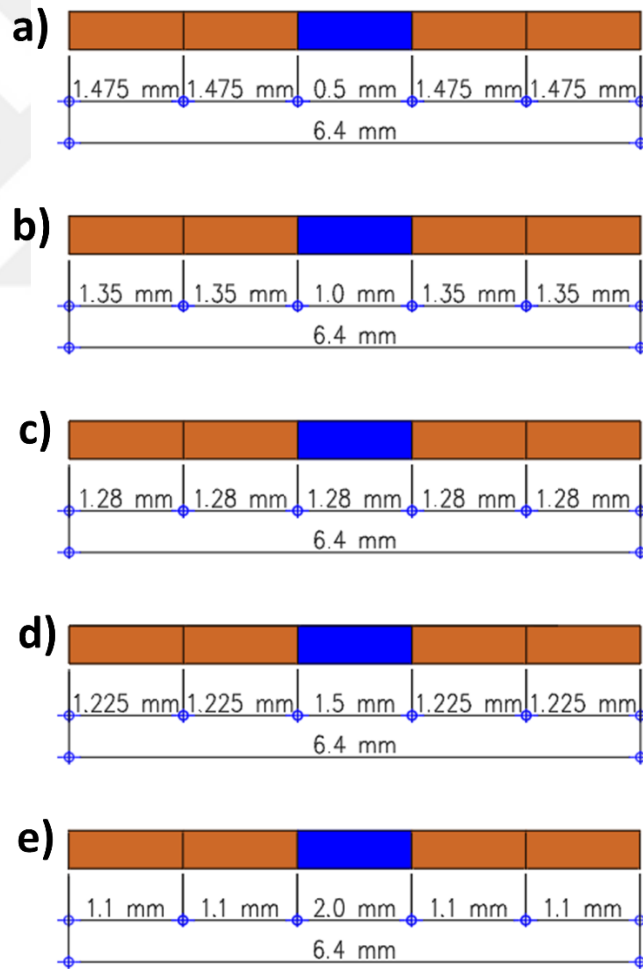
**Tablo 5.7** Karbon takviyeli polimer için fiziksel olmayan parametreler

<b>Parametre</b>	<b>Açıklama</b>	<b>Birim</b>	<b>Değer</b>
D_F	İntegrasyon noktasının göçmesini kontrol eden etiket	-	0
EPS	Katman göçmesi için maksimum efektif şekil değiştirme	m/m	-
SOFT	Yumuşama bölgesi azaltma faktörü	-	0.57
PFL	Dağılmanın başlaması için göçmesi gereken katman yüzdesi	-	100
GXCO	Çift doğrusal hasar değişiminin tanımlanmasında kullanılan boyuna basınç kırılma tokluğu	N/m	1526000

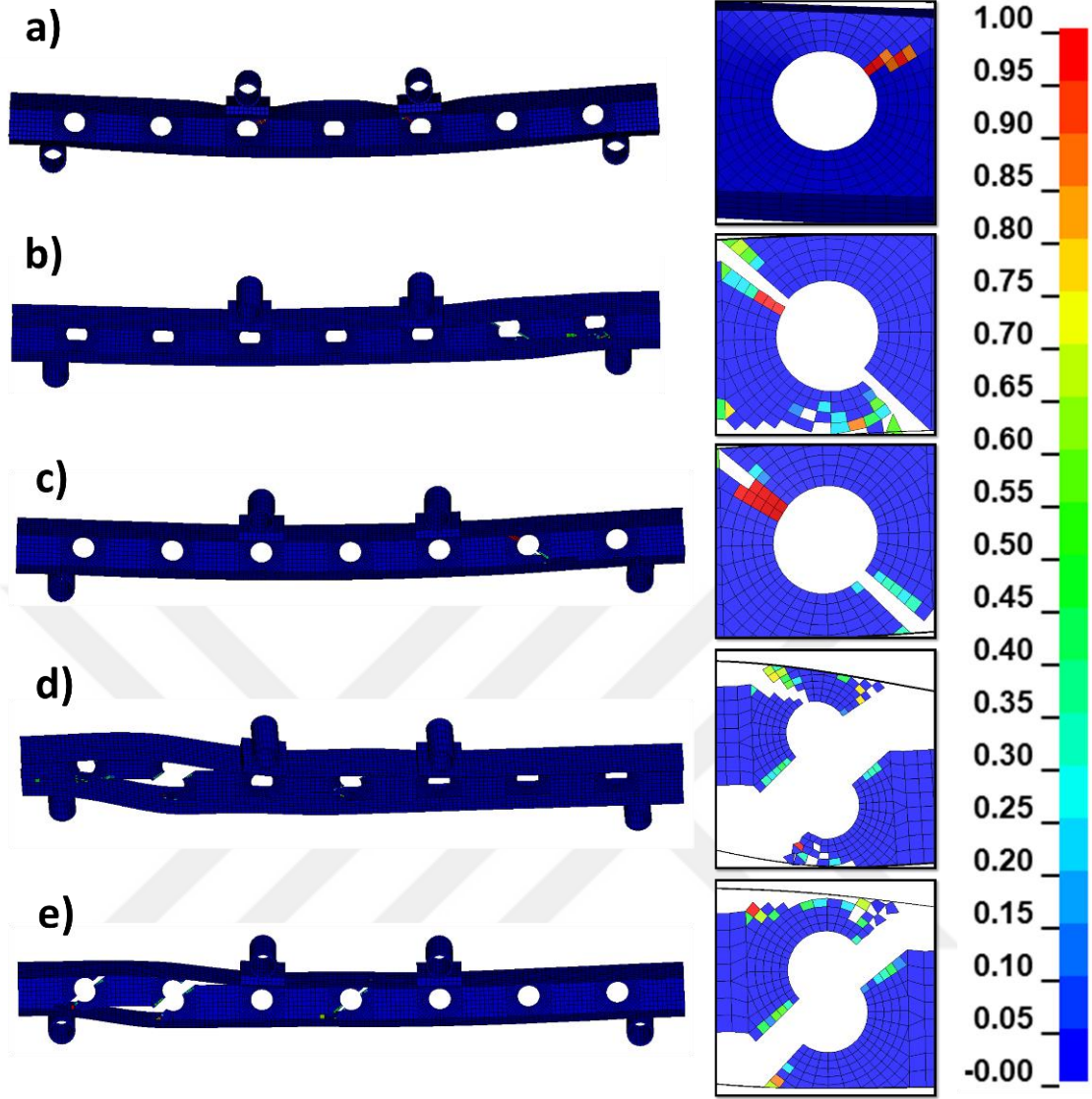
**Tablo 5.7** Karbon takviyeli polimer için fiziksel olmayan parametreler (devamı)

GXTO	Çift doğrusal hasar değişiminin tanımlanmasında kullanılan boyuna basınç kırılma tokluğu	N/m	30700
XCO	Büküm noktasındaki boyuna basınç dayanımı	Pa	1300e+6
XTO	Büküm noktasındaki boyuna çekme dayanımı	Pa	26e+6

Gövde kesiti 6.4 mm olan delikli kirişlerde, kesit beş eş katmandan oluşmaktadır. Kesitin ortasına 0.5, 1, 1.28, 1.5 ve 2 mm kalınlıkta karbon lifleri yerleştirilmiştir. Kalan kesit kalınlığında ise, dört eş katman olmak üzere cam lifler yerleştirilmiştir. Kirişlere ait isimlendirme Şekil 5.10' da gösterilmiştir.



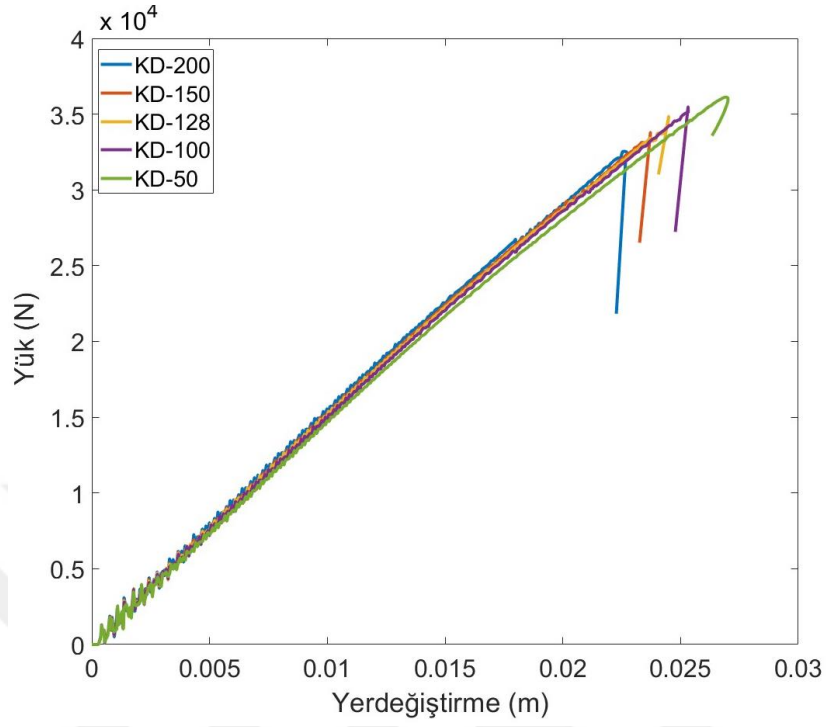
**Şekil 5.10** Delik çevresinde karbon-cam lif takviyeli, delikli kirişlere ait isimlendirme a) KD-50 b) KD-100 c) KD-128 d) KD-150 e) KD-200



**Şekil 5.11** Göçme anında yanal ötelenmesi serbest delikli I kirişlerdeki hasar dağılımı a) KD-50 b) KD-100 c) KD-128 d) KD-150 e) KD-200

Şekil 5.11' de, kirişlerde göçme anındaki hasar dağılımları gösterilmiştir. Beklenildiği üzere göçme delik çevresinde yerel olarak gerçekleşmiştir. Ancak karbon lif kalınlığının artmasıyla göçmenin daha geniş bir alanda gerçekleştiği görülmektedir. Seçilen malzeme özelliklerinde KTP ve CTP' nin boyuna ve enine dayanım değerleri yakın seviyelerdedir. Ancak kayma gerilmelerine karşı CTP malzemesinin kırılma tokluğu değeri, KTP' ye göre daha yüksektir. Yani karbon lif kalınlığının daha düşük olduğu durumlarda, kiriş göçmesi için daha büyük miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. Dolayısıyla Şekil 5.11' de görüldüğü üzere KD-50 kirişi nispeten daha rijit davranmış ve göçme oldukça kısıtlı bir alanda gerçekleşmiştir. Gözlemlenen bu etkiden dolayı taşıma güçlerinde de farklılıklar

vardır. Şekil 5.12' de görüldüğü üzere, yük-yer değiştirme eğrileri, karakteristik olarak benzer davranış gösterse de, en yüksek dayanımı KD-50 kirişi göstermiştir.



**Şekil 5.12** Delik çevresinde karbon ve cam takviyeli, yanal ötelenmesi serbest delikli kirişlere ait yük-yer değiştirme eğrileri

## 6 SONUÇLAR

Bu çalışmada delikli cam lif takviyeli kompozit kirişlerin taşıma gücü dört noktalı eğilme deneyi altında aşamalı hasar analizi yöntemiyle incelenmiştir. Geleneksel malzemelere göre oldukça hafif olan kompozit malzemelerin de yüksek taşıma kapasitelerine erişebileceği görülmüştür. Fakat gevrek davranışa sahip bu kirişlerde, delikli durumda dayanımda önemli miktarda azalma görülmüştür. Delik çapı arttıkça dayanımdaki azalma artarken, dayanım/ağırlık oranında önemli bir artış olmamaktadır. Bunun sebebinin yerel hasarın delik çevresinde başlayarak hızla ilerlemesi ve kirişi göçme yüküne ulaştırması olarak görülmüştür. Gövde delikleri kirişte kayma kapasitesini önemli ölçüde düşürerek gevrek kırılmanın düşük yüklerde meydana gelmesine sebep olmaktadır. Hasarın yerel olarak meydana gelmesinden dolayı delik aralıklarının göçme yüküne etkisi daha düşük kalmaktadır. Bu noktada gövdede daha fazla delik oluşturulmasına izin verilebilir. Gövde liflerinin oryantasyonun  $45^{\circ}$  ye yaklaştırılmasıyla, kiriş dayanımının daha yüksek değerlere erişebileceği görülmüştür. Ancak aynı oryantasyonlarda katman sayısının düşük, dolayısıyla lif kalınlığının daha yüksek olması durumunda, gerilme süreksizliklerini düşük olmasıyla nispeten daha yüksek taşıma güçlerine erişilebilir. Gövde delikleri taşıma gücü açısından dezavantaj meydana getirirse de delik çevresinin karbon lif gibi yüksek boyuna dayanımlı malzemeler ile değil de, kayma dayanımı ve kırılma toklukları daha yüksek malzemelerle güçlendirilmesi ile taşıma gücünün iyileştirilmesi mümkündür. Bu şekilde yerel hasarın oluşması geciktirilerek delikli kirişin, ağırlığı azaltma, yapıdaki mekanik ve elektrik donanımlarının daha kolay yerleştirilmesi gibi yapısal avantajlarından yararlanılabilir.

## KAYNAKÇA

- [1] A. Shaterzadeh, H. Behzad, M. Shariyat, “Stability Analysis of Composite Perforated Annular Sector Plates Under Thermomechanical Loading by Finite Element Method”, in *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, Oca. 2018. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1142/S0219455418501006>
- [2] D.K. Pathak, R. Purohit, A. Soni, H.S. Gupta, “Buckling analysis of composite laminated plate in different boundary conditions under thermo mechanical loading”, in *Materials Today: Proceedings*, Oca. 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.355>
- [3] B. Chhorn, W. Jung, “A Parametric Study on the Elliptical hole Effects of Laminate Composite Plates under Thermal Buckling Load”, in *Science and Engineering of Composite Materials*, Şub. 2020. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0019>
- [4] S. Chang, M. Yang, Z. Chen, L. Tian, X. Lu, “Bending behavior of steel ring-web beam”, in *Journal of Constructional Steel Research*, Ağus. 2019. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105742>
- [5] C.C. Silva, R.B. Caldas, R.H. Fakury, J.V.F. Dias, H. Carvalho, “Elastic Critical Moment of Lateral Distortional Buckling of Castellated Composite Beams under Uniform Hogging Moment”, in *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Kas. 2020. [Çevrimiçi]. Mevcut: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000518](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000518)
- [6] J.P. de Oliveira, D.C.T. Cardoso, E.D. Sotelino, “Elastic flexural local buckling of Litzka castellated beams: Explicit equations and FE parametric study”, in *Engineering Structures*, May. 2019. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.034>
- [7] M. Hosseinpour, Y. Sharifi, “Finite element modelling of castellated steel beams under lateral-distortional buckling mode”, in *Structures*, Şub. 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.038>
- [8] E. Hacıoğlu, “Plakların Termal Burkulması”, Y.L. tezi, FBE, İTÜ, İstanbul, TR, 2009. [Çevrimiçi]. Mevcut: <http://hdl.handle.net/11527/4772>
- [9] M. Tarfaoui, A. El Moumen, K. Lafdi, “Progressive damage modeling in carbon fibers/carbon nanotubes reinforced polymer composites” in *Composites Part B: Engineering*, Mar. 2017. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.056>
- [10] Y. Yang, X. Liu, Y. Wang, H. Gao, R. Li, Y. Bao, “A progressive damage model for predicting damage evolution of laminated composites subjected to three point bending” in *Composites Science and Technology*,

- Ağu 2017. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.08.009>
- [11] K. Matous, “Damage evolution in particulate composite materials” in *International Journal of Solids and Structures*, Mar. 2003. [Çevrimiçi]. Mevcut: [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00669-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00669-8)
- [12] A. C. Thomas, K. Baskar, “Behaviour of thin-walled castellated beams strengthened using CFRP” in *Structures*, Nis. 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.083>
- [13] E. Ellobody, B. Young, “Nonlinear analysis of composite castellated beams with profiled steel sheeting exposed to different fire conditions” in *Journal of Constructional Steel Research*, Eki. 2015. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.02.012>
- [14] E. Ellobody, “Interaction of buckling modes in castellated steel beams” in *Journal of Constructional Steel Research*, May. 2011. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.012>
- [15] Z. Fuhui, F. Yiming, “Nonlinear dynamic response and fatigue damage evolution for piezoelectric laminated plates with matrix cracks” in *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Haz. 2008. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2008.02.005>
- [16] O. Castro, P. A. Carraro, L. Maragoni, “Fatigue damage evolution in unidirectional glass/epoxy composites under a cyclic load” in *Polymer Testing*, Nis. 2019. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.12.027>
- [17] W. Yuan, N. Yu, Z. Bao, L. Wu, “Deflection of castellated beams subjected to uniformly distributed transverse loading” in *International Journal of Steel Structures*, Eyl. 2016. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1007/s13296-015-0120-2>
- [18] M. R. Soltani, A. Bouchair, M. Mimoune, “Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams” in *Journal of Constructional Steel Research*, Mar. 2012. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.10.016>
- [19] A. S. Daryan, M. Sadri, H. Saberi, V. Saberi, A. B. Moghadas, M. Karimlu, “Rotational capacity of castellated steel beams” in *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Haz. 2012. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1002/tal.743>
- [20] W. Hartono, S. P. Chiew, “Composite Behaviour of Half Castellated Beam with Concrete Top Slab” in *Advances in Steel Structures (ICASS '96)*, Ara. 1996. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/B978-008042830-7/50069-3>

- [21] O. Karahan, “Türkiye’ de Yapım Tekniği Olarak Betonarmenin Erken Kullanımı: Hennebique Betonarme Sistemi ve Koruma Değerleri”, Dr. tezi, FBE, İTÜ, İstanbul, TR, 2018.
- [22] A. Cherniaev, C. Butcher, J. Montesano, “Predicting the axial crush response of CFRP tubes using three damage-based constitutive models”, in *Thin-Walled Structures*, Ağu. 2018. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.05.003>
- [23] M. Andersson, P. Liedberg. “Crash behavior of composite structures. A CAE benchmarking study”, Y.L. tezi, Uyg. Mek. Böl., CTH, Göteborg, SE, 2014. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/199981>
- [24] S. Alaedini, M.Z. Kabir, R. Al-Mahaidi, “Stability performance of thin-walled pultruded beams with geometric web-flange junction imperfections”, in *Journal of Building Engineering*, Oca. 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101549>
- [25] S. Zhang, C. Caprani, A. Heidarpour, “Influence of Fibre Orientation on Pultruded GFRP Material Properties”, in *Composite Structures*, Tem. 2018. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.104>
- [26] L. Almeida-Fernandes, N. Silvestre, J.R. Correia, M.R.T. Arruda, “Fracture toughness-based models for damage simulation of pultruded GFRP materials”, in *Composites Part B: Engineering*, Nis. 2020. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107818>
- [27] L. Almeida-Fernandes, N. Silvestre, J.R. Correia, “Characterization of transverse fracture properties of pultruded GFRP material in tension”, in *Composites Part B: Engineering*, Eki. 2019. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107095>
- [28] A.M.G. Coelho, J.T. Mottram, K.A. Harries, “Finite element guidelines for simulation of fibre-tension dominated failures in composite materials validated by case studies” in *Composite Structures*, Ağu. 2015. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.071>
- [29] P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, “A continuum damage model for composite laminates: Part I – Constitutive model”, in *Mechanics of Materials*, Eki. 2007. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2007.03.005>
- [30] P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, “A continuum damage model for composite laminates: Part II – Computational implementation and validation”, in *Mechanics of Materials*, Eki. 2007. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2007.03.006>

- [31] P. Rozylo, P. Wysmulski, “Failure analysis of thin-walled composite profiles subjected to axial compression using progressive failure analysis (PFA) and cohesive zone model (CZM)”, in *Composite Structures*, Nis. 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113597>
- [32] J.A. Gonilha, N. Silvestre, J.R. Correia, V. Tita, L. Almeida-Fernandes, “Novel progressive failure model for quasi-orthotropic pultruded FRP structures: Application to compact tension and web-crippling case studies (Part II)”, in *Composite Structures*, Oca. 2021. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112973>
- [33] K. Turan, M. Gur, M.O. Kaman, “Progressive Failure Analysis of Pin-Loaded Unidirectional Carbon-Epoxy Laminated Composites”, in *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Ara. 2013. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://doi.org/10.1080/15376494.2012.677109>
- [34] S.T. Pinho, C.G. Davila, P.P. Camanho, L. Iannucci, P. Robinson, “Failure models and criteria for frp under in-plane or threedimensional stress states including shear non-linearity”, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, NASA/TM-2005-213530, Şub. 01, 2005. [Çevrimiçi]. Mevcut: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050110223>
- [35] B. D. Agarwal, L. J. Broutman, K. Chandrashekhara, *Analysis and Performance of Fiber Composites*, 3. Baskı. Yeni Delhi, IN: Wiley, 2006
- [36] A. K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2. Baskı. Florida, USA: Taylor & Francis, 2006
- [37] *Ls-Dyna Keyword User’s Manual, Volume 1*, Livermore Software Technology (LST), an Ansys Company, Kaliforniya, USA, 2021
- [38] *Ls-Dyna Keyword User’s Manual, Volume 2*, Livermore Software Technology (LST), an Ansys Company, Kaliforniya, USA, 2021
- [39] *Ls-Dyna Keyword User’s Manual, Volume 3*, Livermore Software Technology (LST), an Ansys Company, Kaliforniya, USA, 2021
- [40] S. Moaveni, *Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS*, Yeni Jersey, USA, 1999

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

## **Konferans Bildirileri**

**1.** S. Tunca, Y. S. Erdoğan, “ Delikli CTP Kirişlerin Aşamalı Göçme Analizi ile Yük Taşıma Kapasitesinin İncelenmesi “, 4th International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences 2023 (IEACES2023), Karabük, Türkiye, 31 May. - 2 Haz. 2023, ss. 308-317.

