

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**DEĞİŞKEN CAM ELYAF DİZİLİMLİ İZOLATÖRLERDE MEKANİK
VE DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

SELÇUK İLHAN BİLGİN

DOKTORA TEZİ

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Enver YALÇIN** (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Hakan ÇETİNEL (Eş Danışman)
Prof. Dr. Sare ÇELİK
Prof. Dr. Uğur ÇAVDAR
Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ
Doç. Dr. Mehmet AYVAZ

BALIKESİR, ARALIK- 2025

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Değişken cam elyaf dizimli izolatörlerde mekanik ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Selçuk İlhan BİLGİN

ÖZET

**DEĞİŞKEN CAM ELYAF DİZİLİMLİ İZOLATÖRLERDE MEKANİK VE
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
DOKTORA TEZİ
SELÇUK İLHAN BİLGİN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ENVER YALÇIN)
(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. HAKAN ÇETİNEL)
BALIKESİR, ARALIK - 2025**

Bu çalışmada, kum dolgulu ve farklı fiber yönlendirmeli cam elyaf takviyeli kompozit izolatörlerin fiber dizilimine bağlı olarak mekanik ve elektriksel performanslarındaki değişim incelenmiştir. Literatürde çoğunlukla kum dolgu veya sabit yönlendirmeye üretilen izolatörlerin aksine, bu tez kapsamında farklı yönlendirilmiş laminasyon stratejileri (0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$) uygulanmıştır. Amaç, fiber diziliminin hem mekanik dayanım hem de dielektrik özelliklerinin üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır.

Yapılan üretimlerde fiber hacim oranı sabit tutulmuş, el yatırması yöntemiyle numuneler hazırlanmıştır. Çekme ve eğilme deneyleri sonucunda, fiber yöneliminin kritik bölgelerdeki kırılma davranışına etkisi değerlendirilmiş, daha dayanıklı ve daha kompakt izolatör tasarımları için veri sağlanmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak izolatör yapıları bilgisayar ortamında modellenmiş, bu sayede farklı fiber yönelimlerine ait gerilme dağılımları ve mekanik tepkiler detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Buna ek olarak, değişken fiber diziliminin izolatörlerin dielektrik performansı üzerindeki etkileri, meger testi, uygulanan gerilim ve kısmi deşarj testleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar Maxwell analiziyle doğrulanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Cam elyaf takviyeli kompozitler, çekme deneyi, dielektrik test, eğilme deneyi, elektriksel izolatör, fiber oryantasyonu.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES IN VARIABLE ORIENTED GLASS FIBER REINFORCED INSULATORS

PH. D THESIS

SELÇUK ILHAN BILGIN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. ENVER YALÇIN)

(CO-SUPERVISOR: PROF. DR. HAKAN ÇETİNEL)

BALIKESİR, DECEMBER - 2025

In this study, the variation in mechanical and electrical performance of sand-filled, glass-fiber-reinforced composite insulators with different fiber orientations were investigated as a function of fiber layup. Unlike most studies in literature which typically examine sand-filled or fixed-orientation insulators, this thesis implements diversified laminations (0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$). The aim is to elucidate how fiber architecture affects both mechanical strength and dielectric properties.

In the fabrication process, the fibre volume fraction was kept constant, and specimens were prepared using the hand lay-up method. Tensile and bending tests were conducted to evaluate the impact of fibre orientation on fracture behaviour in critical regions, providing data for designing more robust and compact insulator configurations. In addition, the insulator structures were modelled in a computer environment using the finite element method (FEA), allowing for a detailed analysis of stress distributions and mechanical responses associated with different fibre orientations.

Additionally, the effect of variable fibre orientation on the dielectric performance of the insulators was assessed through meger test, applied voltage and partial discharge tests. The results were validated by Maxwell analysis.

KEYWORDS: Glass fibre reinforced composites, tensile test, dielectric test, bending test, electrical insulators, fibre orientation.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	x
1. GİRİŞ	1
1.1 İzolatörlerin Tanımı ve Önemi	8
1.2 İzolatörlerin Fonksiyonları ve Yük Taşıma Özellikleri	9
2. YÖNTEM	12
2.1 Deneysel Çalışma	13
2.1.1 Kalıp tasarımı ve imalatı	13
2.1.2 Numune Tasarımı ve İmalatı	14
2.1.3 Kalıplama ve imalat	15
2.1.4 Mekanik testler	16
2.1.4.1 Çekme testi	16
2.1.4.2 Eğilme testi	17
2.1.5 Elektriksel testler	20
2.1.5.1 Meger testi	21
2.1.5.2 Uygulanan gerilim testi	22
2.1.5.3 Kısmi deşarj testi	23
2.2 Sayısal Modelleme	24
3. BULGULAR	30
3.1 Çekme Deneyleri	30
3.1.1 90° laminasyonlu numunelerin test sonucu	31
3.1.2 0° laminasyonlu numunelerin test sonucu	32
3.1.3 ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu	34
3.1.4 ±45° Laminasyonlu numunelerin test sonucu	35
3.1.5 Kum katkılı tesiste üretilen izolatör numunelerinin test sonucu	36
3.1.6 Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu	38
3.2 Eğilme Deneyleri	42
3.2.1 Eğme kuvveti fibere dik laminasyonlu numunelerin test sonucu	42
3.2.2 Kuvvet yönüne paralel laminasyonlu numunelerin test sonucu	44
3.2.3 ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu	46
3.2.4 ±45° laminasyonlu numunelerin test sonucu	47
3.2.5 Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu	49
3.2.6 Kum katkılı tesiste üretilen izolatör numunelerinin test sonucu	50
3.3 Elektriksel Testler	53
3.3.1 Meger testi	53
3.3.2 Uygulanan gerilim testi	54
3.3.3 Kısmi deşarj testi	54
3.3 Çekme Gerilmesi Analizleri	56
3.3.1 0° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu	57
3.3.2 90° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu	61
3.3.3 ±90° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu	65
3.3.4 ±45° Laminasyonlu numunelerin analiz sonucu	68
3.3.5 Kum dolgulu fabrikada üretilen numunelerin analiz sonucu	72

İÇİNDEKİLER (devam)

3.4 Eğilme Gerilmesi Analizleri	73
3.4.1 0° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu.....	74
3.4.2 90° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu.....	77
3.4.3 ±90° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu	81
3.4.4 ±45° Laminasyonlu numunelerin analiz sonucu	86
3.4.5 Kum dolgulu fabrikada üretilen numunelerin analiz sonucu	93
3.5 Elektrik Alan Analizi	93
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	95
5. KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: İzolatörler genel görünüş	9
Şekil 1.2: Trafo üzerine montajlı izolatör	9
Şekil 1.3: Sevk sonrası kırılmış izolatörler	10
Şekil 2.1: L300 cam elyaf unidirectional kumaş.....	12
Şekil 2.2: LT600 Cam Elyaf Biaxial Kumaş	12
Şekil 2.3: X600 cam elyaf biaxial kumaş.....	12
Şekil 2.4: Yatay kalıp tasarımı	13
Şekil 2.5: Dikey kalıp tasarımı.....	14
Şekil 2.6: Kalıbın frezede işlenmesi.....	14
Şekil 2.7: Tasarım aşamasında çalışılan insertler	15
Şekil 2.8: Çekme testi	17
Şekil 2.9: Standart eğilme testi düzeneği(ASTM International, 2017).....	18
Şekil 2.10: Fikstür tasarımı	18
Şekil 2.11: Analiz sonucu saplama üzerindeki gerilim.....	19
Şekil 2.12: Analiz sonucu izolatör üzerindeki gerilim.....	20
Şekil 2.13: Eğilme testi düzeneği.....	20
Şekil 2.14: Statik yapısal analiz altındaki yapı	25
Şekil 2.15: ACP Pre altındaki yapı	25
Şekil 2.16: Ansys analiz ağacı görünümü	26
Şekil 3.1: Çekme yükleme yönü tanımlaması.....	30
Şekil 3.2: 90° laminasyonlu numune test sonucu	31
Şekil 3.3: 90° laminasyonlu numune görselleri	31
Şekil 3.4: 0° laminasyonlu numune test sonucu	32
Şekil 3.5: 0° laminasyonlu numune görselleri	33
Şekil 3.6: ±90° laminasyonlu numune test sonucu	34
Şekil 3.7: ±90° laminasyonlu numune görselleri	34
Şekil 3.8: ±45° laminasyonlu numune test sonucu	35
Şekil 3.9: ±45° laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri.....	35
Şekil 3.10: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu.....	36
Şekil 3.11: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu görselleri.....	37
Şekil 3.12: Mevcut kullanılan izolatör numunelerin test sonucu.....	38
Şekil 3.13: Mevcut kullanılan izolatör numunelerin test sonucu görselleri.....	38
Şekil 3.14: Mevcut kullanılan izolatörün kesit görünüşü	40
Şekil 3.15: Çekme testi genel değerlendirme grafiği.....	41
Şekil 3.16: Çekme testi genel değerlendirme eğrisi.....	41
Şekil 3.17: Basma yükleme yönü tanımlaması	42
Şekil 3.18: 0° laminasyonlu numunelerin test sonucu	42
Şekil 3.19: 0° laminasyonlu numune test sonucu görselleri	43
Şekil 3.20: 90° laminasyonlu numunelerin test sonucu	44
Şekil 3.21: 90° laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri	45
Şekil 3.22: ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu	46
Şekil 3.23: ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri.....	46
Şekil 3.24: ±45° laminasyonlu numunelerin test sonucu	47
Şekil 3.25: ±45° laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri.....	48
Şekil 3.26: Mevcut kullanılan izolatör numunelerin test sonucu.....	49
Şekil 3.27: Mevcut kullanılan izolatör numunelerin test sonucu görselleri.....	49

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 3.28: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu.....	50
Şekil 3.29: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu görselleri.....	51
Şekil 3.30: Eğilme testi genel değerlendirme grafiği.....	52
Şekil 3.31: Eğilme testi genel değerlendirme eğrisi	52
Şekil 3.32: Meger testi	53
Şekil 3.33: 10 kV altındau uygulanan gerilim testi.....	54
Şekil 3.34: Kısmi deşarj test düzeneği	55
Şekil 3.35: Çekme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük öncesi).....	56
Şekil 3.36: Çekme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük sonrası).....	57
Şekil 3.37: 0° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test.....	58
Şekil 3.38: 0° için equivalent strain	58
Şekil 3.39: 0° laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri.....	58
Şekil 3.40: 0° için fiber yönelimi gösterimi.....	59
Şekil 3.41: 0° için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6.....	60
Şekil 3.42: 90° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test.....	61
Şekil 3.43: 90° için equivalent strain	62
Şekil 3.44: 90° laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri.....	62
Şekil 3.45: 90° için fiber yönelimi gösterimi.....	63
Şekil 3.46: 90° için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6.....	63
Şekil 3.47: ±90° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test	65
Şekil 3.48: ±90° için eşdeğer gerinim	66
Şekil 3.49: ±90° laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri	66
Şekil 3.50: ±90° için fiber yönelimi gösterimi.....	67
Şekil 3.51: ±90° için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 4, d) Katman 6.....	67
Şekil 3.52: ±45° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test	69
Şekil 3.53: ±45° için eşdeğer gerinim	69
Şekil 3.54: ±45° laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri	70
Şekil 3.55: ±45° için fiber yönelimi gösterimi.....	71
Şekil 3.56: ±45° için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6.....	71
Şekil 3.57: Reçine dolgusu ile üretilen numune çekme analiz sonucu	72
Şekil 3.58: Eğilme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük öncesi).....	73
Şekil 3.59: Eğilme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük sonrası)	73
Şekil 3.60: 0° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test.....	74
Şekil 3.61: 0° için eşdeğer gerinim	75
Şekil 3.62: 0° laminasyonlu numunelerin eğilme analizi sonucu normal gerilmeleri	75
Şekil 3.63: 0° için eğilme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6.....	76
Şekil 3.64: 90° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test.....	78
Şekil 3.65: 90° için eşdeğer gerinim	78
Şekil 3.66: 90° laminasyonlu numunelerin eğilme analizi sonucu normal gerilmeleri	79
Şekil 3.67: 90° için eğilme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6.....	80
Şekil 3.68: ±90° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test	82
Şekil 3.69: ±90° için eşdeğer gerinim	82
Şekil 3.70: ±90° laminasyonlu numunelerin eğilme analizi sonucu normal gerilmeleri	83

ŞEKİL LİSTESİ (devam)

Şekil 3.71: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 1. katman	84
Şekil 3.72: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları a) Üst görünüş b) Alt görünüş	84
Şekil 3.73: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 3. katman	84
Şekil 3.74: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 4. Katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	85
Şekil 3.75: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 5. katman	85
Şekil 3.76: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 6. Katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	85
Şekil 3.77: $\pm 45^\circ$ için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test	87
Şekil 3.78: $\pm 45^\circ$ için eşdeğer gerinim	87
Şekil 3.79: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune 1. Tabaka X yönü eğilme analizi sonucu normal gerilmeler	88
Şekil 3.80: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune 1. Tabaka Y yönü eğilme analizi sonucu normal gerilmeler	88
Şekil 3.81: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune 1. Tabaka z yönü eğilme analizi sonucu normal gerilmeler	88
Şekil 3.82: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 1. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	89
Şekil 3.83: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 2. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	90
Şekil 3.84: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 3. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	90
Şekil 3.85: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 4. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	91
Şekil 3.86: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 5. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	91
Şekil 3.87: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 5. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş	92
Şekil 3.88: Reçine dolgusu ile üretilen numune eğilme analiz sonucu	93
Şekil 3.89: Elektrik alan dağılımı	94

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Mevcut ve optimize insertin ortalama çekme kuvvetine etkisi karşılaştırması.	15
Tablo 2.2: Uygulanan gerilim testi aşamaları.....	23
Tablo 2.3: Kısmi deşarj testi aşamaları	24
Tablo 3.1: 90° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı.....	32
Tablo 3.2: 0° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı.....	33
Tablo 3.3: ±90° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı	35
Tablo 3.4: ±45° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı	36
Tablo 3.5: Kum katkılı tesiste üretilen izolatörlerin mekanik performansı.....	37
Tablo 3.6: Mevcut kullanılan izolatörlerin mekanik performansı	40
Tablo 3.7: Çekme testi genel değerlendirmesi	40
Tablo 3.8: Eğme kuvveti ile aynı yönde laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı	44
Tablo 3.9: 90° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı.....	46
Tablo 3.10: ±90° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı	47
Tablo 3.11: ±45° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı	48
Tablo 3.12: Mevcut kullanılan izolatörlerin mekanik performansı	50
Tablo 3.13: Kum katkılı tesiste üretilen izolatörlerin mekanik performansı.....	51
Tablo 3.14: Eğme testi genel değerlendirmesi	51
Tablo 3.15: Tüm tipler için kısmi deşarj sonuçları.....	55
Tablo 3.16: Çekme yönüne dik fiber dizilimi için tekrarlanan test sonuçları	56
Tablo 3.17: 0° laminasyon için gerilme IRF değerleri	59
Tablo 3.18: 90° laminasyon için gerilme IRF değerleri	62
Tablo 3.19: ±90° laminasyon için gerilme IRF değerleri	67
Tablo 3.20: ±45° laminasyon için gerilme IRF değerleri	70
Tablo 3.21: 0° laminasyon için gerilme IRF değerleri	75
Tablo 3.22: 90° laminasyon için gerilme IRF değerleri	79
Tablo 3.23: ±90° laminasyon için gerilme IRF değerleri	83
Tablo 3.24: ±45° laminasyon için gerilme IRF değerleri	89
Tablo 4.1: Çekme deneyleri özet tablosu	95
Tablo 4.2: Eğilme deneyleri özet tablosu	97
Tablo 4.3: Hibrit çekme dizimi denemeleri.....	101
Tablo 4.4: Hibrit eğilme dizimi denemeleri	101

SEMBOL LİSTESİ

FRP	: Fiber takviyeli polimer kompozit
GFRP	: Cam elyaf takviyeli polimer kompozit
PVC	: Polivinil klorür
CFRP	: Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit
UD	: Tek yönlü
FI	: Failure index
FF	: Fiber failure
IFF	: Inter fiber failure
IRF	: Inverse reserve factor
KD	: Kısmi deşarj
MΩ	: Mega ohm
DC	: Doğru akım
R	: Direnç (ohm)
V	: Gerilim (volt)
I	: Akım (amper)
AC	: Alternatif akım
KD	: Kısmi deşarj
pC	: Piko coulomb
pf	: Fiber failure
pmA	: Matrix tension failure
pmB	: Matrix compression failure
pmC	: Matrix shear failure
pd	: Delamination
U	: İntegralin alındığı hacim bölgesi
ε	: Dielektrik katsayısı
V	: Elektrik alan şiddeti

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez sürecinde bana destek olan değerli hocalarıma ve sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Balıkesir, 2025

Selçuk İlhan BİLGİN

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı bileşenlerin bir araya getirilmesiyle özel olarak tasarlanabilen özellikler sunmaları sayesinde, çeşitli endüstrilerde temel mühendislik malzemeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler arasında, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler; yüksek mukavemet, hafiflik ve çevresel etkilere karşı direnç arasında mükemmel bir denge sunmalarıyla dikkat çekmektedir. Bu çok yönlülükleri sayesinde havacılık, otomotiv ve enerji sektörlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadırlar.

Denizcilik sektöründe ise, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozit paneller, gemi gövde kaplamasını oluşturan sandviç panellerin dış yüzeylerinde kullanılmaktadır. Bu uygulamaya güncel bir örnek, İsveç Donanması envanterinde yer alan Visby Korveti'dir. Bu gemide, polivinil klorür (PVC) çekirdek yapı etrafına, hibrit karbon ve cam elyaflardan oluşan polimer laminasyonlar katmanlar hâlinde yerleştirilmiştir. Bu sandviç kompozit paneller, korvetin dış yüzey kaplamasında kullanılmıştır (Mouritz et al., 2001).

Havacılık sektöründen örnekler ele alındığında, Airbus A380 uçağının kabin basıncının korunmasında hayati öneme sahip olan arka basınç bölmesi, karbon fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilmiştir. Bu bileşenin, basınçlı yakıt bölmesini uçağın arka kısmından ayırdığı göz önüne alındığında, oldukça kritik bir konumda görev yaptığı söylenebilir. Benzer şekilde, 7 x 4 metre ölçülerindeki Airbus A400M uçağının kargo kapısı da karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılarak imal edilmiştir (Middendorf and Metzner, 2011).

GFRP kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci ve ağırlık azaltımı yoluyla yakıt verimliliğini artırma potansiyeli sayesinde otomotiv endüstrisinde de giderek artan uygulama alanı bulmuştur. Bu malzemeler, yapısal ve yarı yapısal bileşenlerde —örneğin yaprak yaylar, tampon kirişleri ve gövde panelleri — yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrikli araçlara yönelik yakın tarihli bir çalışmada, GFRP, arka süspansiyon sistemine ait enlemesine yerleştirilmiş bir kompozit yaprak yay tasarımında kullanılmıştır. Özellikle, takviye malzemesi olarak E-cam elyaflarının tercih edilmesi, bu malzemelerin hafif araç platformlarında yük taşıyıcı uygulamalara uygunluğunu ortaya koymuştur (McLellan, 2023; Van Hulle, 2023).

Son yıllarda, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler; mükemmel mekanik dayanımları, hafif yapıları, korozyon dirençleri ve dielektrik özellikleri sayesinde elektriksel yalıtım uygulamalarında giderek daha önemli hale gelmiştir. Özellikle izolatör üretiminde, cam elyaflarının epoksi gibi termoset reçine matrisleriyle birleştirilmesi, maliyet açısından etkili ve yüksek uyarlanabilirliğe sahip bir çözüm olarak kendini kanıtlamıştır. Kompozit izolatörlerin mekanik ve dielektrik davranışlarını etkileyen en önemli faktörlerden biri fiber yönelimidir. Farklı katman dizilimleri ve elyaf yerleşim desenleri, yüklenme altında oluşan gerilme dağılımını, çatlak ilerleyişini ve genel kırılma davranışını önemli ölçüde değiştirebilir. Bu durum, özellikle fiberlerin elle yerleştirildiği el yatırması yöntemi için kritik öneme sahiptir; çünkü bu yöntem, nihai ürün kalitesinde değişkenliğe yol açabilecek insan hatalarına açıktır. El yatırması yöntemi, basitliği ve düşük maliyetiyle bilinse de fiberlerin dağılımındaki tutarsızlıklara, liflerin yeterince reçine emmemesi ve boşluk oluşumuna karşı oldukça hassastır. Literatürde şeker kamışı lifi ile takviye edilmiş epoksi matrisli kompozitler üzerinde yapılan bir çalışmada da fiber yöneliminin mekanik ve termal özellikler üzerinde belirleyici olduğu rapor edilmiştir (Prasanthi et al., 2024). Çalışmada, farklı fiber yerleşim açılarında (0°, 45°, 90°) yapılan deneyler sonucunda, 0° yöneliminin elastisite modülünü %88 artırdığı, 45° yöneline göre %67 iyileşme sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca, lif oranı arttıkça boylamasına ısı iletkenliğinin yükseldiği, ancak enine ısı iletkenliğinin hemen hemen sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle enine yönelimin, boylamasına yöneline göre yaklaşık %98 oranında daha düşük ısı iletkenliği sağladığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar, fiber yöneliminin yalnızca mekanik değil, aynı zamanda termal özellikler üzerinde de kritik etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Kompozit malzemeler, dielektrik uygulamalar için oldukça faydalıdır. Günümüz elektrikli cihazları, yüksek dielektrik sabiti, düşük dielektrik kaybı ve artırılmış dielektrik dayanımı sunan malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Dielektrik özellik, bir elektrik sisteminin yalıtım tasarımında büyük önem taşımaktadır. Polimer matrisli nano dielektrikler, özellikle epoksi reçine esaslı olanlar, üstün özellikleri nedeniyle yalıtım sistemlerinde yoğun araştırma konusu olmuştur. Ayrıca, polimer kompozitlerin dielektrik özellikleri, dolgu malzemeleri ile polimer arasındaki ara yüzey sayesinde geliştirilmiş ve bu geliştirilmiş özellikler; motorlar, jeneratörler, kablo ve teller, enerji depolama sistemleri gibi birçok yüksek gerilim uygulamasında kullanılmaya başlanmıştır (Ali et al., 2020; Pleşa et al., 2016). Üstün bir dielektrik sabit elde etmek için, polimer bazlı kompozitler seramik gibi diğer dielektrik malzemelerle birleştirilmektedir. Ayrıca, bazı cam esaslı reçineler, dielektrik özellikleri

artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Aşağıdaki tabloda bazı cam esaslı reçinelerin dielektrik özellikleri görülmektedir. Dielektrik özellikler olarak E camı öne çıkmaktadır. Tez çalışmasında da E camı kullanılmıştır(Bhalerao et al., 2022)

Tablo 1.1: Bazı Cam tiplerinin dielektrik özellikleri

Fiber tipi	Dielektrik sabit		Kayıp faktörü	
	1 MHz	9.375 GHz	1 MHz	9.375 GHz
E camı	5.8	6.13	0.001	0.0039
S camı	4.35	5.21	0.002	0.0068
D camı	3.56	4	0.0005	0.0026
Silica	-	3.78	-	0.002
Polyster 301	3.4 - 3.6	-	0.015 - 0.016	-

Haider silika fiber/epoksi kompozitler üzerine yapılan başka bir araştırmada ise fiber oranının hem dielektrik hem de mekanik özellikler üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir (Haider et al., 2023). Çalışmada, silika fiber oranının artırılmasıyla birlikte kompozitin dielektrik sabiti ve kayıp faktöründe önemli bir azalma sağlandığı; buna karşılık, çekme, basma ve eğilme dayanımlarında belirgin artışlar elde edildiği rapor edilmiştir. Özellikle, %30'dan %80'e kadar artırılan silika fiber oranı, çekme dayanımını yaklaşık %70, basma dayanımını %57, eğilme dayanımını ise %62 oranında artırmıştır. Bununla birlikte, fiber oranının %90'a çıkarılmasıyla mekanik özelliklerde hafif bir düşüş gözlemlenmiş, ancak dielektrik performansın değişmediği belirtilmiştir. Ayrıca, fiber oranının artırılması, termo-stabiliteyi iyileştirirken, nem emiliminin düşük seviyelerde kaldığı vurgulanmıştır. Bu bulgular, düşük maliyetli silika fiber takviyesiyle, mikroelektronik uygulamalarda kullanılacak hem dielektrik hem de mekanik performansı ayarlanabilir kompozitlerin üretilebileceğini göstermektedir.

Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve mükemmel dielektrik özellikleri sayesinde elektriksel ve mekanik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, Tuncer tarafından bildirildiği üzere, GFRP'nin dielektrik delinme dayanımı, malzeme kalınlığına ve elektrik alan yönüne bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir (Tuncer et al., 2009). Söz konusu çalışmada, FR4 ve kriyojenik sınıf GFRP numuneleri arasında %14'e varan bir delinme dayanımı farkı gözlemlenmiş ve artan kalınlıkla birlikte dielektrik dayanımının güç yasına uyan bir azalma eğilimi gösterdiği rapor edilmiştir. Bu durum, özellikle karmaşık alan yönlerine sahip uygulamalar

veya el yatırması gibi manuel üretim süreçleri için lamine kalitesinin ve üretim tutarlılığının önemini ortaya koymaktadır. Bu bulgular, farklı fiber yönelimlerine sahip GFRP kompozitlerin hem mekanik hem de elektriksel performanslarının daha ayrıntılı olarak araştırılması gerektiğini desteklemektedir.

Kompozit izolatörlerin mekanik özellikleri, özellikle eğilme rijitliği ve eşdeğer elastik modülü, fiber yönelimi ve yerleşim açıları tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir. Wang, $\pm 30^\circ$ gibi belirli sarım açlarına sahip eğik-simetrik laminaların, mesnet izolatörlerinin yük altındaki mekanik tepkisini etkilediğini vurgulamıştır (Wang et al., 2020a). Ayrıca, çalışmalarında, laminasyon teorisine dayalı teorik tahminlerin, deneysel sonuçlarla büyük ölçüde uyumlu olduğunu göstererek, fiber diziliminin yapısal rijitliğin optimize edilmesinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymuşlardır. Bu bulgular, özellikle el yatırması yöntemi gibi manuel olarak üretilen sistemlerde, doğru fiber yerleşiminin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitler, mükemmel dielektrik özellikleri, yüksek mekanik dayanımları ve çevresel etkilere karşı dirençleri sayesinde dış ortam elektrik yalıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Park'ın da vurguladığı gibi, cam elyafların epoksi reçine ile kombinasyonu, ultraviyole ışınlarına, neme ve kirliliğe karşı dayanıklılığı artırmakta ve bu yapıları yüksek gerilimli izolatörler için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (H. Park et al., 2004a). Ancak, bu tür kompozitlerin mekanik ve yalıtım performansı yalnızca malzeme bileşenlerine değil, aynı zamanda elyafların yönelim düzenine de önemli ölçüde bağlıdır. Elyaf hizalama açıları, yük transfer verimliliğini, kırılma mekanizmalarını ve kompozitin rijitliğini belirlemektedir. Elyafların yanlış hizalanması veya 0° , $\pm 45^\circ$ ya da $\pm 90^\circ$ gibi ideal olmayan açılardan sapmalar, özellikle manuel yerleştirmenin değişkenlik oluşturduğu el yatırması yönteminde, gerilme yığılmalarına, katmanlar arası ayrılmalara (delaminasyon) ve erken kırılmalara yol açabilir. Bu nedenle, GFRP tabanlı izolatörlerde hem mekanik hem de dielektrik performansın tutarlılığını sağlamak için fiber yöneliminin doğru anlaşılması ve optimize edilmesi kritik öneme sahiptir.

Ayrıca, birçok çalışma cam elyaf takviyeli polimerlerin, uygulanan yük lif doğrultusuyla paralel hizalandığında en yüksek mekanik dayanımı gösterdiğini; yük lif yönüne dik uygulandığında ise en düşük dayanımı sergilediğini ortaya koymuştur. Bu anizotropik

davranış, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler için hem bir avantaj hem de uygulama ve yükleme koşullarına bağlı olarak bir sınırlama oluşturmaktadır. Bu olgu, mevcut çalışmada da gözlemlenmiş olup, fiber yönelimine bağlı olarak çekme performansında anlamlı farklılıklar kaydedilmiştir (Mallick, n.d.; Ogbonna et al., 2022). Salgar %40, %50 ve %60 oranlarında farklı fiber hacim fraksiyonlarına sahip epoksi matrisli kompozitler üretmiş ve bunların çekme test sonuçlarını karşılaştırmıştır. En iyi mekanik performans, %50 fiber içeriğinde elde edilmiştir (Swapnil et al., 2017).

Sheng, kompozit izolatörlerin ve silindirik elektrikli ekipmanların sismik davranışını simüle etmek üzere yeni bir mekanik model önermiştir (S. Li et al., 2018). Bu model, deneysel ve sayısal çalışmaların bir arada yürütülmesiyle geliştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada, histeretik eğilme altında kompozit izolatörlerin kırılma davranışı incelenmiş ve üç farklı kırılma tipi tanımlanmıştır:

1. Metal flanşın çatlaması,
2. Cam elyaf takviyeli kompozit tüpün yırtılması,
3. Kompozit tüp ile çevresindeki bileşenler arasındaki yapışma (bağlantı) hatası.

Park, cam elyaf kumaş takviyeli kompozitlerin mekanik ve dielektrik özelliklerini araştırmıştır (C. H. Park, 1987). Çalışma sonucunda, fiber yönelimi ile çekme yükleme eksenini arasındaki açının artmasıyla, cam elyaf-epoksi kompozitlerin yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı ortaya konulmuştur.

Karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin tabakalar arası dayanımı düşüktür. Bu zayıflığı izlemek için kullanılan yöntemlerden biri, CFRP yapının elektriksel direnç değişimini kullanarak hasar tespiti yapan bir yöntemidir. Literatürde farklı bir çalışmada, söz konusu analiz yöntemi geliştirilerek cross-ply laminasyonların CFRP yapılarındaki elektrik akımının hesaplanması sağlanmıştır (Todoroki, 2016). Yine burada delaminasyon çatlaklarının yarattığı potansiyel fark ölçülerek malzeme içerisindeki hasar yorumlanabilmektedir. Yöntemin etkinliğini doğrulamak için iki farklı katman dizilimine sahip kiriş tipi çapraz katmanlı laminalar üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada, delaminasyon çatlaklarının neden olduğu elektriksel gerilim değişimleri ortaya konulmuştur.

Güç yasasına bağlı olarak kalınlık arttıkça delinme dayanımı azalır. Bu durum, özellikle polimer ve fiber takviyeli kompozit malzemelerde uzun süredir bilinen ve literatürde sıklıkla

rapor edilen bir eğilimdir. Malzeme kalınlığının artmasıyla birlikte, mikro ölçekte meydana gelen boşluklar, kusurlar ve malzeme heterojenlikleri gibi yapısal düzensizliklerin sayısı da artmakta, bu da elektrik alanın yerel olarak yoğunlaşmasına ve erken delinme riskinin yükselmesine neden olmaktadır. Kalınlık arttıkça, yapının içinde kritik boyutta kusurların bulunma olasılığı artar. Bu durum, elektronların bu kusurlar içinde hız kazanarak yeterli enerjiye ulaşması ve elektriksel delinmenin başlaması için uygun bir ortam oluşturur. Bu nedenle, ince malzemeler daha yüksek delinme dayanımı gösterirken, kalın malzemelerde bu değer düşüş eğilimindedir. Bu ilişki literatürde genellikle güç yasası modeli ile tanımlanmakta olup, delinme dayanımı şu şekilde ifade edilmektedir (Tuncer et al., 2009b):

$$E = at^b \quad (1.1)$$

Burada $a=38.9$ Vrms/mm, t malzeme kalınlığı ve $b=-0.33$ 'ü ifade eder. Bu ilişki, IEC 60243-1 standardında da belirtildiği gibi, kalınlık arttıkça delinme dayanımının azaldığını ortaya koymaktadır (International Electrotechnical Commission, 2013).

Malzeme kalınlığının delinmeye etkisi ile alakalı olarak rüzgâr türbini kanatlarında yapılan çalışmada kaplama(coating) + laminasyon bileşik numunelerde hem de yalnızca laminasyonda, malzeme kalınlığı arttıkça delinme ve dayanım alan şiddetinin azaldığını göstermektedir (Madsen et al., 2004). Bu azalma, belirli bir kalınlığa kadar daha hızlı gerçekleşirken, bu noktadan sonra yavaşlamaktadır. Bu durum, kompozit yapı içindeki hava boşlukları nedeniyle oluşan hacim etkisiyle açıklanmaktadır. Kaplama katmanı incelendiğinde ise, küçük boşluklar ve safsızlıklar bulunmasına rağmen, laminasyona göre çok daha az olduğu ve kalınlığın alan şiddetine önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. İnce numunelerde kritik boyutta boşluk bulunma olasılığı düşükken, kalın numunelerde bu olasılık artmaktadır. Elektrik alan altında hava boşluklarında hızlanan elektronlar, boşluk boyutuna bağlı olarak enerji kazanır ve bu enerji yeterli seviyeye ulaştığında delinme meydana gelir.

Çatlakların başlama veya ilerleme sınırı, takviye malzemesinin yönüne veya uygulanan kuvvetin yönüne bağlıdır. Kuvvet yönünün dielektrik delinme dayanımı üzerindeki etkisi, gerilme değişimleri incelenerek ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada yük altında çalışan GFRP malzemenin, oda sıcaklığı ve cryogenic sıcaklık koşullarında elde edilen verilerde, GFRP malzemelerin dielektrik delinme dayanımı değerlerinin artan çekme gerilmesiyle birlikte azaldığı gözlemlenmiştir (Nishijima and Hara, 1998). Yani hasar noktasına kadar dielektrik dayanım değerinin kademeli olarak azaldığı görülmüştür.

Haider yapılan çalışmada, silika fiberi (SiO_2) elyaf oranı arttıkça (30%–80%), kompozitin 4 GHz 'deki dielektrik sabiti 3.82'den 3.17'ye kadar azalmıştır (Haider et al., 2023b). Ancak, silika oranı 90% seviyesine çıkıldığında dielektrik sabitte değişim gözlenmemiştir. En yüksek dielektrik sabitleri 30%–60% aralığında elde edilmiştir. Aynı şekilde, maksimum çekme dayanımı da 91.6 MPa' dan 155.7 MPa' ya kadar artmıştır. En yüksek dayanım 80% SiO_2 elyaf oranında elde edilmiştir. Ancak 90% oranına çıkıldığında, ara yüzey zayıflıkları nedeniyle çekme dayanımı 146.3 MPa' ya düşmüştür. Bu da fiber-matris dengesinin bozulduğunu göstermektedir. Sonuçlar, optimum fiber-matris oranının hem dielektrik hem de mekanik performansı artırmada kritik olduğunu ortaya koymuştur.

Kompozit izolatörlerin uzun vadeli kullanımının doğrulanabilmesi için uzun süreli mekanik dayanım testleri gereklidir (De Turreil et al., 1985). Üç farklı tasarıma sahip, 450 kN üzerinde kırılma yüküne sahip izolatörler, -25°C ile $+100^\circ\text{C}$ arasında yaklaşık 3 yıl boyunca tek eksenli çekme yükleri altında test edilmiştir. Elde edilen veriler, bu tasarımların uzun vadede günlük yükleri aşmadan çalışabileceğini göstermektedir. Sonuçlar, sıcaklık düştükçe izolatörlerin kırılma yükünün arttığını, bu durumun soğuk iklimlerde avantaj sağladığını ortaya koymuştur.

Önceki çalışmalar, lif ağırlık oranının %55'e kadar artırılmasının çekme dayanımı ve rijitliği artırdığını, ancak yüzey kusurları ve gözeneklilik nedeniyle eğilme dayanımının azalabileceğini göstermiştir (Mishra et al., 2024).

GFRP kompozitlerde farklı dizilim (lay-up) sekansları, çekme performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve mekanik özellikler, elyaf yönelimi ile tabakaların yerleşim düzenine göre değişiklik gösterir. Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde el yatırması yöntemi hâlâ yaygın olarak kullanılmakta olup, bu yöntemin çekme performansı üzerindeki etkisi çeşitli çalışmalarda değerlendirilmiştir (J. S. Kim et al., 2022); bu da yöntemin, bu çalışma gibi deneysel araştırmalar açısından önemini desteklemektedir.

Son dönem çalışmalarda, el yatırması ve vakum infüzyonu gibi farklı üretim teknikleri karşılaştırılmış; bu kapsamda, el yatırması yöntemiyle üretilen GFRP laminatların, artan gözeneklilik ve düşük lif hacim oranı nedeniyle genellikle daha düşük çekme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir (S. Y. Kim et al., 2014). Bu bulgular, el yatırması yöntemiyle

üretileen kompozitlerin deneysel çalışmalarda performans karşılaştırmaları açısından anlamlı bir referans oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Lif takviyeli kompozitlerde meydana gelen hasar mekanizmaları, lif yönelimine bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Yaygın hasar türleri arasında matris çatlağı, lif kırılması ve tabakalar arası delaminasyon yer almaktadır. Bu tür hasar mekanizmaları hem tek yönlü hem de çok yönlü laminatlarda yaygın olarak görüldüğünden, yakın tarihli literatürde kapsamlı Şekilde ele alınmıştır (J.; Z. H. Li, 2020). Öte yandan, son araştırmalarda cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozitlerin enerji iletim hatlarında elektriksel izolatör olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu çalışmada epoksi ve polyester matrisli kompozitler karşılaştırılarak; çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerin yanı sıra, özellikle nem ve asit gibi çevresel zorlanmalar altında dielektrik davranışları değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda, nem emiliminin delinme gerilimini olumsuz etkilediği, asit yaşlandırmasının ise çekme dayanımında hafif bir düřüŐe neden olduğu belirlenmiştir. Epoksi esaslı GFRP kompozitlerin kimyasal bozunmaya karşı daha yüksek direnç sergilediği görülmüş ve bu durum, yüksek gerilimli yalıtım uygulamaları açısından daha güvenilir bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur (Amini & Khavandi, 2018).

1.1 İzolatörlerin Tanımı ve nemi

Enerji, transformatörün terminal noktalarından alınır. Bu terminallerde, transformatörün vektör grubuna uygun Şekilde düzenlenmiş alüminyum veya bakır baralar yer alır. Bu baraları mekanik olarak destekleyen ve aynı zamanda farklı gerilim seviyeleri ile akım değerlerine sahip iletkenleri taşıyan parçalara izolatör denir. Şekil 1.1' de görülmektedir. İzolatörler, Şekil 1.2'de ilk bakışta yalnızca birer mekanik taşıyıcı gibi görünseler de elektriksel izolasyonun sağlanması ve özellikle elektriksel atlama mesafesinin (krepaj mesafesi) korunmasında kritik rol üstlenirler.



Şekil 1.1: İzolatörler genel görünüş

Krepaj, izole bir yüzeyde iki iletken nokta arasındaki en kısa yüzeyel mesafedir. Bu mesafenin artırılması, yüzey boyunca elektriksel kaçakların önlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle izolatör yüzeyleri mesafeyi uzatmak için genellikle lineer formdan kaçınılarak tasarlanır. Bu yapı bombeli veya girintili-çıkıntılı (zigzag) bir formda olabilir; bu sayede elektriksel yürüme yolu uzatılmış olur. Üzerlerindeki bu krepaj hatları sayesinde izolatörler hem mekanik yükleri taşır hem de yüksek gerilim altında elektriksel dayanımı korur.



Şekil 1.2: Trafo üzerine montajlı izolatör

1.2 İzolatörlerin Fonksiyonları ve Yük Taşıma Özellikleri

İzolatörler;

- Terminal baralarını taşıma ve sabitleme (mesnetleme),

- Kısa devre sırasında oluşan ani kuvvetler,
- Deprem gibi sismik etkiler,
- Nakliye veya montaj sırasında oluşabilecek mekanik zorlamalar

gibi durumlarda baralar üzerine gelen;

- Çekme
- Eğilme

gibi yükleri güvenle taşımak zorundadır. Bu nedenle, izolatörlerin hem mekanik hem de elektriksel açıdan yeterli performansa sahip olması gereklidir.



Şekil 1.3: Sevk sonrası kırılmış izolatörler

Bu tez kapsamında, cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerden farklı fiber dizilimlerine sahip izolatör numuneleri üretilmiştir. Hedef, mevcut sistemlerde kullanılan izolatörlere kıyasla daha yüksek mekanik dayanım ve daha iyi elektriksel performans sağlayan alternatif yapılar geliştirmektir.

Fiber yönlendirmesi sayesinde krepaj mesafesi artırılmakta ve böylece daha kompakt boyutlarda izolatör üretimi mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, fiber yönlendirme sayesinde yalnızca kesit alanı artırılarak değil, malzemenin dizilim parametreleri değiştirilerek de mukavemet artırımı sağlanabilecektir. Bu yaklaşım, izolatör üretimine yenilikçi bir perspektif kazandıracaktır.

Mevcutta kullanılan izolatörlerde fiber dizilimi bulunmamaktadır. Silika kumu dolgusu vardır. Kum dolgusu için de yönlendirmeden bahsedilememektedir. Reçine ve kum belirli oranlarda karıştırılarak yapı oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, cam elyaf kumaşlar belirli açılarda (0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$) yönlendirilerek kalıba yerleştirilmiş ve el yatırması yöntemiyle üretim gerçekleştirilmiştir.

Elektriksel testlerde, özellikle mekanik zorlamalara maruz kalan baralar arasında bulunan izolatörlerin Şekil 1.3'teki gibi kırılması durumunda, transformatör kabul şartlarını sağlayamamakta, testten kalmakta ve kalite problemlerine neden olmaktadır. Bir trafoda genellikle 6 ila 10 adet kullanılan ve birim fiyatı 5 Euro'yu bulmayan izolatörlerin, kabul sürecinde başarısızlığa neden olması durumunda ortaya çıkan maliyetler (örneğin yurt dışı test hizmetleri, saha süpervizörlerinin gönderimi, tekrar üretim maliyetleri) on binlerce Euro'ya ulaşabilmektedir. Bu nedenle, izolatörlerin dayanımının artırılması hem teknik hem de ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir.

2. YÖNTEM

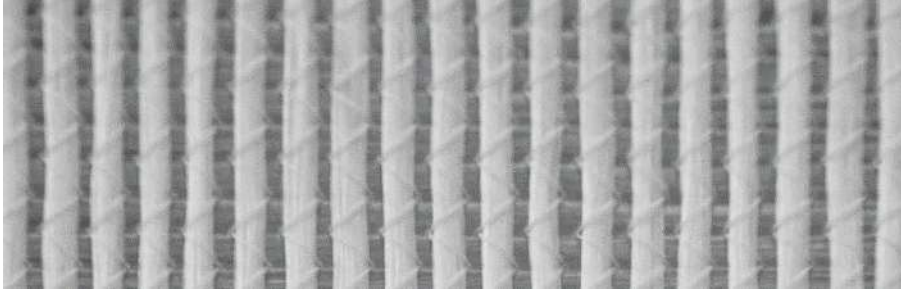
Bu çalışmada, farklı fiber yönelimleri kullanılarak epoksi matrisli kompozit izolatör numuneleri üretilmiştir. Kullanılan takviye malzemeleri arasında, Metyx firması tarafından üretilen E-cam elyaf kumaşları yer almaktadır. Kullanılan elyaf tipleri sırasıyla:

- L300 Cam Elyaf Tek Yönlü (UD)Kumaş 300 g/m² Metyx üretimidir. Çekme yönüne dik ve paralel olarak 2 tip numune üretiminde kullanılmıştır.



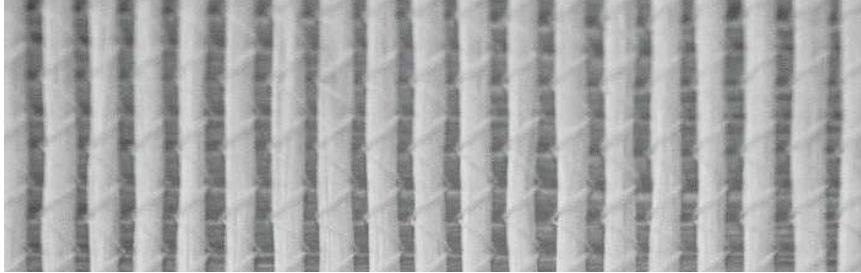
Şekil 2.1: L300 cam elyaf unidirectional kumaş

- LT600 biaxial kumaş (600 g/m²) $\pm 90^\circ$ unidirectional yerleşimli numunelerde kullanılmıştır.



Şekil 2.2: LT600 Cam Elyaf Biaxial Kumaş

- X600 biaxial kumaş (600 g/m²) $\pm 45^\circ$ yönelimli numunelerde kullanılmıştır.



Şekil 2.3: X600 cam elyaf biaxial kumaş

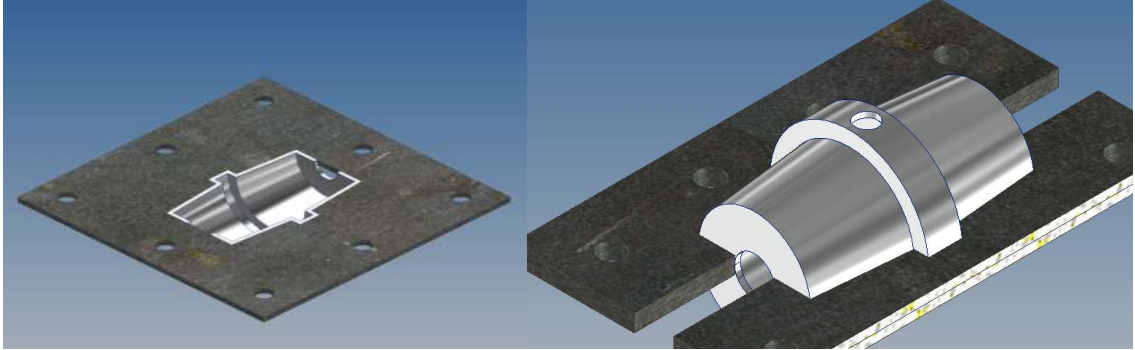
Reçine sistemi, %55 epoksi ve %45 sertleştirici oranında karıştırılarak 70 °C’de hazırlanmış ve dökülmüş, ardından kontrollü sıcaklık koşullarında kürlenmiştir. Tüm numune tiplerinde hem 300 g/m² hem de 600 g/m² elyaf kumaşları kullanılmış olmasına rağmen, yaklaşık %40 fiber hacim oranı sabit tutulmuş ve böylece farklı laminasyonlar arasında malzeme içeriğinin tutarlılığı sağlanmıştır.

2.1 Deneysel Çalışma

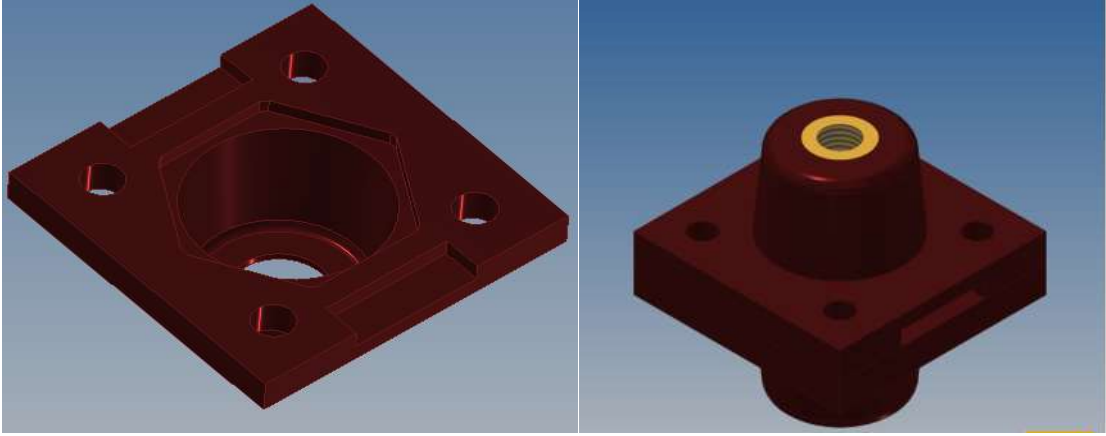
Bu bölümde, deneysel çalışmanın tüm aşamaları sistematik olarak sunulacaktır. Öncelikle kalıp tasarımı ve imalatında izlenen yöntem verilerek, numune geometrisinin ve bağlantı/insert detaylarının nasıl belirlendiği açıklanacaktır. Ardından kalıplama ve imalat sürecinde kullanılan malzemeler, el yatırması/yerleştirme sırası, reçine hazırlama ve kütleme koşulları ile süreç özetlenecektir. Mekanik testler başlığı altında çekme ve eğilme deneylerinin numune hazırlığı, mesnet düzenekleri, yükleme hızı gibi parametreler ayrıntılandırılacak; çekme için ISO 527-4/5 esas alınan prosedür, eğilme için kullanılan düzenek ve ölçüm stratejisi kısaca belirtilecektir. Takiben elektriksel testler kapsamında meger ile yalıtım direnci ölçümü, uygulanan gerilim deneyi ve kısmi deşarj ölçümleri için elektrot düzeni, gerilim seviyesi bilgileri verilecektir. Tüm alt başlıklardan alınan veriler, Bölüm 3'te sunulacak bulguların temelini oluşturan deneysel altyapı ortaya konacaktır.

2.1.1 Kalıp tasarımı ve imalatı

Kalıp tasarım sürecinde ilk karar, üretilecek izolatorün dik ekseninde mi yoksa enine ekseninde mi yerleştirileceğine yönelik olmuştur. İlk aşamada, izolatorün dik ekseninde simetrik olarak yerleşeceği bir kalıp tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Ancak üretim kolaylığı ve işlenebilirlik açısından enine simetrik bir kalıp tasarımı da değerlendirilmiş ve her iki yöntem karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.4: Yatay kalıp tasarımı



Şekil 2.5: Dikey kalıp tasarımı

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, torna ve freze tezgâhlarında işlenmesi daha kolay olan Şekil 2.5'teki enine simetrik olan kalıp modeli tercih edilmiştir. Bu tercih sayesinde üretim sürecinde daha düşük işleme zorluğu ve daha kısa üretim süresi sağlanmıştır. Ayrıca, üretimde kullanılmayacak dış yüzeylerin işlenmesinden özellikle vazgeçilmiş, bu sayede gereksiz CNC işleme süresi ve maliyetleri azaltılmıştır. Kalıp tasarımında, merkezleme hassasiyetini artırmak amacıyla konik pim yuvaları eklenmiş ve döküm sonrası kalıbın kolay açılabilmesi için levye ağız detayları işlenmiştir. Bu özellikler hem üretim sürecinin verimliliğini hem de kullanıcı güvenliğini artırmıştır.

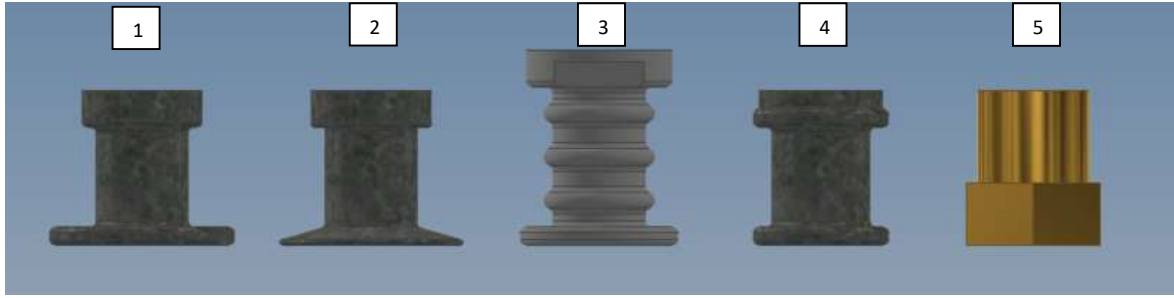


Şekil 2.6: Kalıbın frezede işlenmesi

2.1.2 Numune Tasarımı ve İmalatı

Kompozit izolatör tasarım sürecinde, metal insert geometrisinin belirlenmesi kritik adımlardan biri olmuştur. Sökülme ve sıyrılma gibi olası hasar mekanizmalarını engellemek

amacıyla farklı tasarım modelleri üzerinde çalışmalar yapılmış, nihai olarak Şekil 2.7’de 3 numaralı tip üzerinde karar kılınmıştır.



Şekil 2.7: Tasarım aşamasında çalışılan insertler

Literatürde yapılan taramalar sonucunda, tabanı geniş ve konik formdaki bu insert geometrisinin, özellikle taşıt ve tekne gövdelerinde kompozit parçaların birbirine bağlandığı montaj noktalarında yaygın olarak kullanıldığı belirlenmiştir (Daynes et al., 2022; Gebhardt et al., 2018; Muth et al., 2018). Insert tabanındaki halka çapının belirlenmesinde, izolatörün dış genişliği sınır koşulu olarak dikkate alınmıştır. Insertin yüzey alanını artırarak kayma ve sıyrılmayı önlemek, aynı zamanda tutunma kuvvetini artırmak amacıyla boyu 5 mm uzatılmış ve dış yüzeyine radyal kanallar işlenmiştir. Bu tasarım sayesinde mekanik bağlantı performansının artırılması hedeflenmiştir. Ayrıca, insert yüzeyine işlenen nervür geometrisinin, TS 708 Donatı Çeliği Standardında tanımlanan nervür geometrisi ve adımıyla uyumlu olan radyal nervür eklenmiştir (Türk Standardları Enstitüsü, 2010). Yapılan optimizasyon sonrası, çekme kapasitesinde yaklaşık %15’e kadar artış elde edilmiştir. Böylece, çalışma başlangıcında uygulanan insert geometrisi iyileştirmesinin yerinde bir karar olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır.

Tablo 2.1: Mevcut ve optimize insertin ortalama çekme kuvvetine etkisi karşılaştırması

Tip	Mevcut tasarım Ortalama Kuvvet (N)	Optimize tasarım Ortalama Kuvvet (N)	Ortalama Kuvvet Değişimi (%)
±90°	21266,66	23510,59	10,55
±45°	19891,23	22726,44	14,25
90°	14073,54	16363,70	16,27
0°	25025,00	28479,52	13,80
Tesiste üretilen	18496,33	20033,82	8,31

2.1.3 Kalıplama ve imalat

Numuneler, el yatırması yöntemiyle üretilmiştir. Cam elyaf kumaşlar, önceden hazırlanmış metal insertler üzerine kesilerek yerleştirilmiş ve silindirik şekil verilerek önceden ısıtılmış kalıba yerleştirilmiştir. Kalıp, önce 70 °C’de 30 dakika tutulmuş, ardından her 4 saatte bir 10 °C artırılarak sıcaklık 120 °C’ye çıkarılmıştır. Bu sıcaklıkta son kütleme işlemi

tamamlandıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Üretilen tüm numunelerde yaklaşık %40 fiber hacim oranı sağlanmıştır. Çalışmada dört farklı fiber yönelimine sahip numune üretilmiştir:

- Çekme yönüne dik fiber dizilimi (90°),
- Çekme ile aynı yönlü fiber dizilimi (0°),
- $\pm 90^\circ$ fiber dizilimi,
- $\pm 45^\circ$ fiber dizilimi.

Her bir fiber yönelimine sahip numuneden üçer adet üretilmiş ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. Bu dört fiber takviyeli kompozit numunenin yanı sıra, reçine-silika dolgulu izolatör numuneleri de üretilmiştir. Tesiste üretilen numune adıyla çalışmada kayıtlara geçirilmiştir. Ayrıca, günlük uygulamalarda yaygın olarak kullanılan piyasadan temin edilen bir izolatör de karşılaştırma amacıyla benchmark olarak çalışmaya dahil edilmiştir. Ticari olarak temin edilen numune adıyla çalışmada yer almıştır.

2.1.4 Mekanik testler

Bu çalışmada, üretilen kompozit izolatör numunelerinin mekanik performanslarının belirlenmesi amacıyla çekme ve eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme testi, izolatörlerin gerçek kullanım koşullarında karşılaşacakları bükülme ve burkulma yüklerine karşı dayanımını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Çekme testi ise malzemelerin doğrusal ekseninde yük taşıma kapasitelerini, uzama miktarlarını ve kırılma davranışlarını ortaya koymak için uygulanmıştır.

2.1.4.1 Çekme testi

Mekanik deneyler Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Deneyler için Zwick-Roell marka test cihazı kullanılmıştır. Numune, test cihazının çeneleri arasına sıkıştırılmıştır (Şekil 2.8). Deney için numuneye her iki tarafından M12 saplama bağlanmıştır. Bu esnada test cihazının bağlı bulunduğu bilgisayarda test modülü açılmıştır. ISO 527-4(International Organization for Standardization, 2023) ve ISO 527-5(International Organization for Standardization, 2021)'e göre çekme testinde, elyaf takviyeli plastiklerin elastik parametreleri çekme modülü ve Poisson oranının yanı sıra ana malzeme yönlerindeki çekme mukavemeti belirlenir. ISO 527-4, izotropik ve anizotropik elyaf takviyeli plastikler için test koşullarını içerir. Bu, matlar, kumaşlar veya kesilmiş elyaflar gibi tek yönlü olmayan takviyelere sahip kompozit

malzemelerin yanı sıra tek yönlü ayrı katmanlardan oluşan çok yönlü laminasyonları da içerir. ISO 527-5, tek yönlü (UD) fiber takviyeli plastikler için test koşullarını içerir. Her iki standart da çekme özelliklerinin belirlenmesine yönelik genel prensipler için ISO 527-1'e atıfta bulunmaktadır (International Organization for Standardization, 2019). İlgili standartlarda standart test numuneleri köpek kemiği (dogbone) veya dambıl gibi şekillere atfedilerek belirli en boyut şartlarıyla üretilir. Ancak bu çalışmada piyasada kullanılan ve çeşitli tedarikçiler tarafından aynı boylarda üretilen ve yukarıda bahsedilen standartlardaki ölçülere uymayan bir numune kullanılmaktadır. Boyutlar olarak ISO 527 standart alınamamıştır. Ancak standarda uygun olarak çekme hızı 2 mm/dk belirlenmiştir.



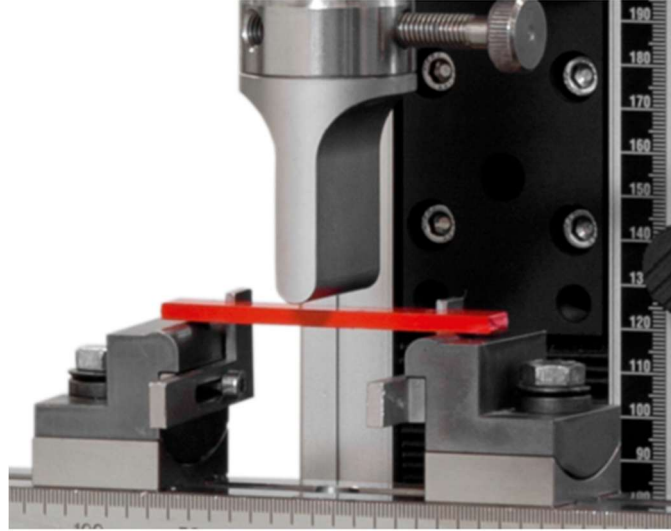
Şekil 2.8: Çekme testi

2.1.4.2 Eğilme testi

İzolatörlerin mekanik performansını değerlendirmek amacıyla yapılan testler, genellikle standartlarda açık şekilde belirtilmemektedir. IEC 60273, IEC 60168, IEC 61109, IEC 60660 gibi bazı teknik kaynaklarda yalnızca nominal bükülme yükü (flexural load) verilirken, üretici teknik föylerinde ise daha çok maksimum çekme kuvveti (pull-out strength) gibi bilgiler paylaşılmaktadır (International Electrotechnical Commission, 1994),(International Electrotechnical Commission, 1999),(International Electrotechnical Commission, 1990),(International Electrotechnical Commission, 2025). Ancak, özellikle kompozit malzemelerin kullanımında mekanik yükler altındaki davranışlarını değerlendirmek için eğilme testleri kritik öneme sahiptir.

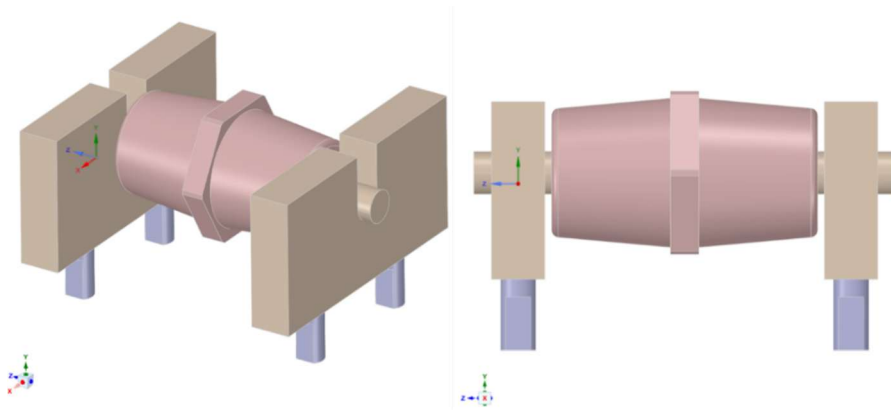
Bu bağlamda, izolatör numuneleri eğilme testine tabi tutulmuştur. ASTM D790 (ASTM International, 2017) standardı eğilme testlerinde yaygın olarak kullanılsa da bu standart

genellikle $3.2 \times 12.7 \times 127$ mm boyutlarındaki "thin plate" veya "dogbone" tipi düz numuneler için tasarlanmıştır. Ancak izolatörlerin standartta atfedilen geometriye uymaması test prosedürünün doğrudan uygulanmasını teknik olarak mümkün kılmamaktadır. Bu nedenle, ASTM D790 standardına birebir bağlı kalınmadan, izolatör geometrisine uyarlanmış bir test yaklaşımı benimsenmiştir.



Şekil 2.9: Standart eğilme testi düzeneği(ASTM International, 2017)

Test sürecinin uygun şekilde gerçekleştirilebilmesi için özel fikstür tasarımı gerekmiştir. Bu doğrultuda, üniversite laboratuvarları ve özel test merkezleriyle görüşmeler yapılmış, standart eğilme test cihazlarının izolatör formundaki numuneler için yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, numunelerin doğal formunu bozmayacak şekilde, izolatör geometrisine özel test düzeneği geliştirilmiş ve eğilme testleri bu düzenekle gerçekleştirilmiştir.

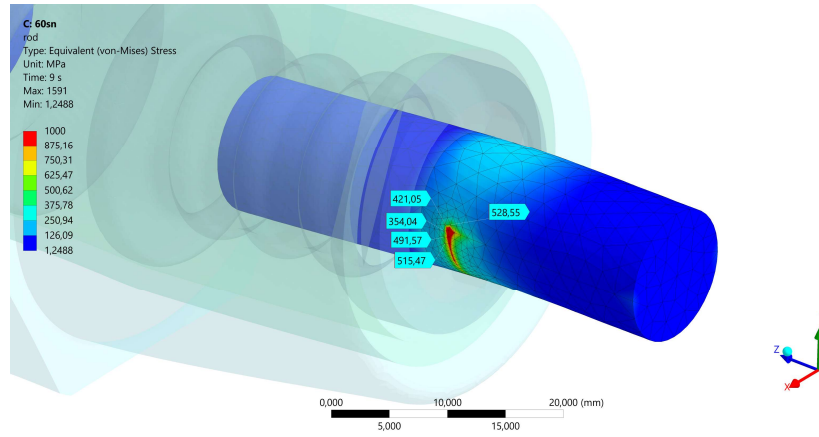


Şekil 2.10: Fikstür tasarımı

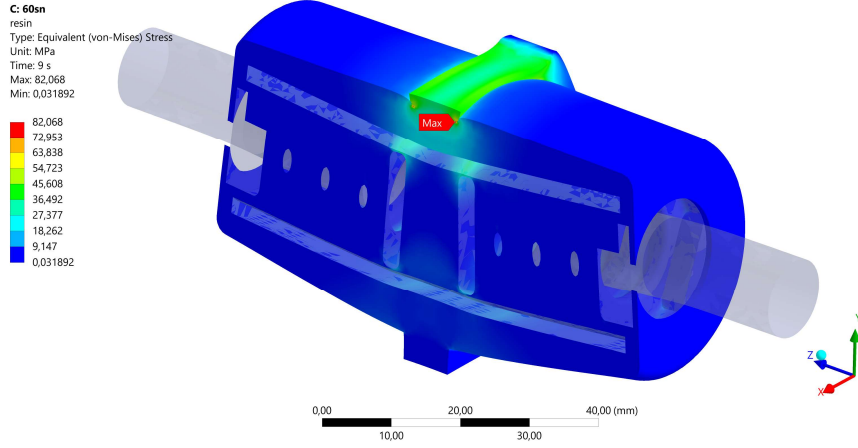
Şekilde sunulan özel fikstür, izolatör numunesinin geometrik özelliklerine uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu fikstür, test düzeneğine entegre edilmeden önce yapısal yeterliliği

açısından sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmiş ve mekanik açıdan uygunluğu doğrulanarak test sürecinde kullanılabilirliği teyit edilmiştir.

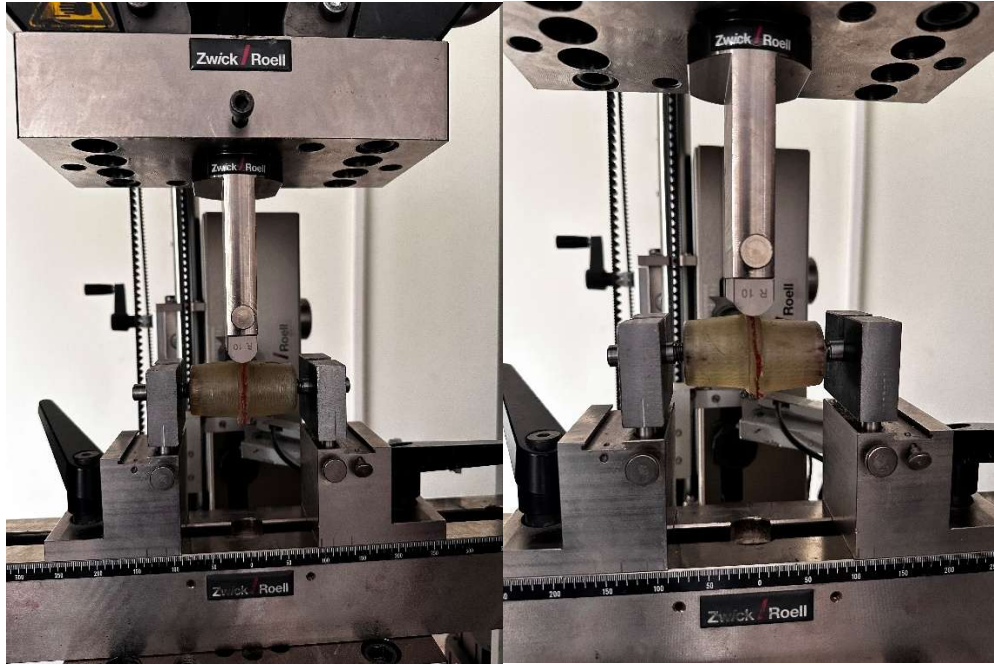
Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda, sistemdeki gerilme dağılımında matris malzemesinin dayanım sınırının belirleyici bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Zaman bağımlı olarak yürütülen analizlerde, matris bölgelerinde gerilme değerlerinin 80–90 MPa seviyelerine ulaşmasıyla birlikte, diğer yapısal bileşenlerde oluşan gerilmeler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde, fiyktür ayakları ve taşıyıcı bağlantı elemanlarının S355JR (St52) malzemeden imal edilmesinin yapısal bütünlük açısından yeterli olacağı görülmüştür. Öte yandan, saplama bölgesinde tespit edilen yaklaşık 500 MPa düzeyindeki maksimum gerilme değeri, bu bölgede daha yüksek dayanımlı bir malzeme kullanımını gerekli kılmıştır. Bu kapsamda, çekme dayanımı 980–1180 MPa aralığında olan 34CrNiMo6 çeliği uygun görülmüş ve saplama elemanı bu malzemeyle tasarlanmıştır. Nihayetinde, yapılan analizler sonucunda saplama bölgesinde herhangi bir plastik deformasyonun oluşmadığı belirlenmiş, böylece tasarımın yapısal yeterliliği doğrulanmıştır.



Şekil 2.11: Analiz sonucu saplama üzerindeki gerilim



Şekil 2.12: Analiz sonucu izolatör üzerindeki gerilim



Şekil 2.13: Eğilme testi düzeneği

2.1.5 Elektriksel testler

Mekanik testlere ek olarak, izolatörlerin elektriksel yalıtım performanslarını değerlendirmek amacıyla çeşitli elektriksel testler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üç farklı test uygulanmıştır:

- Meger (Yalıtım Direnci) Testi
- Uygulanan Gerilim (Dielektrik Dayanım) Testi
- Kısmi Deşarj Testi (KD)

Meger (Yalıtım Direnci) testinde izolatörlerin elektriksel yalıtım direncini ölçmek amacıyla Meğer cihazı kullanılmıştır. Bu test, izolatörün düşük akım kaçığına karşı gösterdiği

performansı değerlendirmek için uygulanmıştır. Ölçümler, belirli bir gerilim seviyesinde yalıtım direncinin $M\Omega$ cinsinden değerini vermektedir.

Uygulanan gerilim (Dielektrik Dayanım) testinde izolatörlere kısa süreli olarak yüksek gerilim uygulanarak delinme veya elektriksel bozulma olmadan dayanım gösterip göstermedikleri değerlendirilmiştir. Test, elektriksel dayanım sınırlarının belirlenmesine yardımcı olmuştur.

Kısmi deşarj testinde izolatörlerin mikro seviyedeki elektriksel boşalma (kısmi deşarj) davranışları ölçülmüştür. Bu test, izolatör içerisinde veya yüzeyinde gizli boşluklar, hatalı bölgeler veya zayıf noktaların tespit edilmesini sağlamış, uzun vadeli yalıtım performansı hakkında bilgi vermiştir.

Uygulanan bu elektriksel testler, üretilen izolatörlerin yalıtım performanslarının endüstriyel gereklilikleri karşılayıp karşılamadığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu sayede hem mekanik hem de elektriksel açıdan güvenilirlikleri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

2.1.5.1 Meger testi

Meger cihazı, izolasyon direncini ölçmek için kullanılan bir test cihazıdır. Elektrik tesisatlarında, makinelerde, kablolarda ve diğer elektrik ekipmanlarında izolasyon direncini belirleyerek kaçak akım, izolasyon hataları veya elektriksel riskleri tespit etmek amacıyla kullanılır. "Meger", aslında bu cihazı üreten bir marka adıdır, ancak zamanla bu tür cihazlar için genel bir isim haline gelmiştir. Meger cihazının temel görevi:

- İzolasyon direncinin ölçülmesi,
- Kabloların, elektrik motorlarının ve devrelerin sağlıklı olup olmadığının kontrolü,
- İzolasyon hatalarının tespit edilmesi,
- Elektriksel güvenliğin sağlanmasıdır.

Meger cihazı, test edilen sisteme yüksek DC gerilim (500V, 1000V veya daha fazla) uygulayarak izolasyon direncini ölçer. Yüksek gerilimle birlikte akımın ne kadar kaçak yaptığını analiz eder ve Ohm (Ω) cinsinden bir direnç değeri verir.

Çalışma Prensipleri:

1. Gerilim Uygulama: Cihaz, test edilen izolasyon malzemesine (örneğin kablo izolasyonu) yüksek bir doğru gerilim (DC) uygular.

2. Kaçak Akım Ölçümü: İzolasyonun kalitesine bağlı olarak, çok küçük bir kaçak akım akmaya başlar. Sağlam bir izolasyonda bu akım çok düşük olacaktır.
3. Direnç Hesabı: Ohm Yasası'na göre;

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

Burada:

- R: İzolasyon direnci (Ohm)
 - V: Uygulanan gerilim (Volt)
 - I: Ölçülen kaçak akım (Amper)
4. Sonuç Gösterimi: Cihaz, ölçülen izolasyon direncini bir ekranda veya kadran üzerinde gösterir. Sağlıklı bir izolasyonda bu değer yüksek olur ($M\Omega$ veya $G\Omega$ seviyesinde).

2.1.5.2 Uygulanan gerilim testi

Uygulanan gerilim testi, bazen “alternatif akım (AC) dayanım gerilimi testi”, “güç frekans dayanım testi” veya İngilizce literatürde Power-Frequency Withstand Voltage Test olarak geçer. Amaç, yalıtımın belirlenmiş bir AC gerilime kısa süre maruz bırakıldığında ark veya delinme olmadan görevini sürdürebileceğini kanıtlamaktır. Kompozit mesnet izolatörleri için temel dayanak standart IEC 62217 (eski IEC 61109) ve genel yüksek gerilim deney tekniği standardı IEC 60060-1'dir (International Electrotechnical Commission, 2012), (International Electrotechnical Commission, 2010).

Testin hedefi:

1. İmalat hatası (hava boşluğu, kirletici dâhil) veya süreç kusuru varsa erkenden ortaya çıkarmak.
2. İzolatörün işletmede karşılaşacağı nominal gerilimin katları kadar strese dayanabileceğini doğrulamak.
3. Kısmi deşarj testinden bağımsız olarak “katı” bir geçti/kaldı kriteri vermek.

Testin aşamaları ise tabloda özetlenmiştir.

Tablo 2.2: Uygulanan gerilim testi aşamaları

Aşama	Açıklama
Hazırlık	Numune temizlenir, hazırlanır. Topraklamalar ve elektrot bağlantıları kontrol edilir.
Gerilimin Yükseltilmesi	AC gerilim, 50 Hz güç kaynağından doğrusal olarak arttırılır. IEC tipik eğim: 1 kV/s (yüksek gerilim sahasında 3–5 kV/s de kullanılır).
Nominal Test Gerilimine Ulaşma	Standart değer genellikle $\bullet 1,2 \times U_r$ (rutin fabrikada) veya $\bullet 2,5 \times U_0$ (tip/sunum testi) civarındadır. İzolatör için değer 10 kV'dur .
Bekletme Süresi	Test gerilimi 60 s boyunca sabit tutulur.
Gözlem	Kısa devre, yüzey arkı, delinme, aşırı ses veya gerilim düşmesi olmamalıdır.
Sonlandırma	Gerilim kademeli olarak sıfıra indirilir, numune topraklanır, görsel inceleme yapılır.

Başarı Kriteri olarak deney süresince flashover (yüzey arkı), puncture (delinme) veya ekipmanda aşırı akım tetikleyecek dielektrik kopuşu gözlenmemelidir. Uygulanan gerilim testi sayısal sonuç üretmez. Geçti / kaldı şeklinde sonuç verir.

2.1.5.3 Kısmi deşarj testi

Kısmi deşarj (KD) testi, elektriksel yalıtım malzemelerinin içinde veya yüzeyinde oluşabilecek mikroskobik boşlukların veya zayıf bölgelerin tespit edilmesi için yapılan hassas bir testtir. Bu testin amacı yalıtım malzemesinin kusurlarını, delinmeye neden olmadan önce fark etmektir. KD tanım olarak elektriksel yalıtım malzemesi içinde veya yüzeyinde oluşan çok küçük bir elektriksel boşalma türüdür.

- Tam bir ark değildir.
- Yalıtımın sadece küçük bir bölgesini etkiler (bu yüzden “kısmi” denir).
- Ancak bu küçük boşalmalar zamanla büyür ve yalıtımın delinmesine, arızaya neden olabilir.

Tablo 2.3: Kısmi deşarj testi aşamaları

Adım	Açıklama
1. Numune hazırlanır	İzolatör kuru ve temiz olmalı. Gürültüsüz bir test ortamı gerekir.
2. Gerilim uygulanır	Genellikle U_0 veya $1.2 \times U_0$ seviyesinde AC gerilim verilir.
3. PD ölçüm cihazı devrede olur	Kablo veya elektrotlara bağlanan hassas ölçüm sistemleri ile deşarj sinyali tespit edilir.
4. Değerler analiz edilir	Kısmi deşarj miktarı picoCoulomb (pC) cinsinden ölçülür.

Testin sonuçlarının başarı kriteri ise şöyle özetlenebilir:

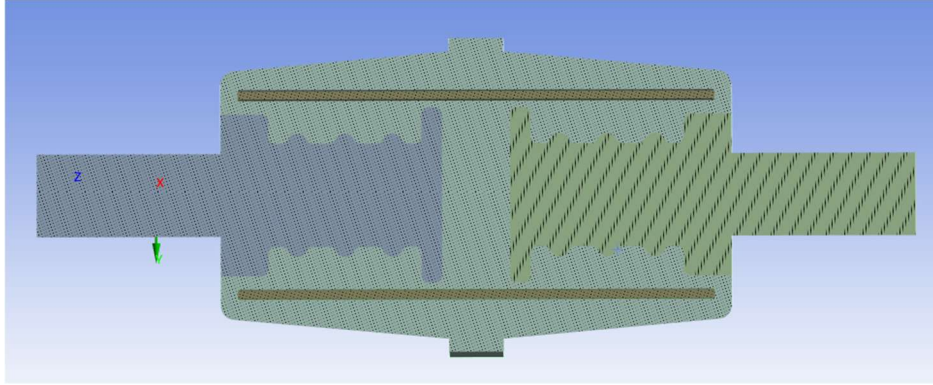
- 0-5 pC Çok iyi – yüksek kaliteli yalıtım
- 5-20 pC Uygun – çoğu IEC standardı için kabul edilir
- 20-50 pC Sınırdaki – dikkatli izlenmeli
- 50+ pC Riskli

KD olması durumunda yapı içerisinde zamanla karbonlaşma, yalıtım zayıflaması, ısınmaya bağlı olarak termal hasarlar ve sonunda delinme olur. İlgili testler ise IEC 60270, IEC 60060-01, TEDAŞ şartnameleridir. Bu standartlara göre birçok orta gerilim izolatörü için PD limiti genellikle <10 pC'dir.

2.2 Sayısal Modelleme

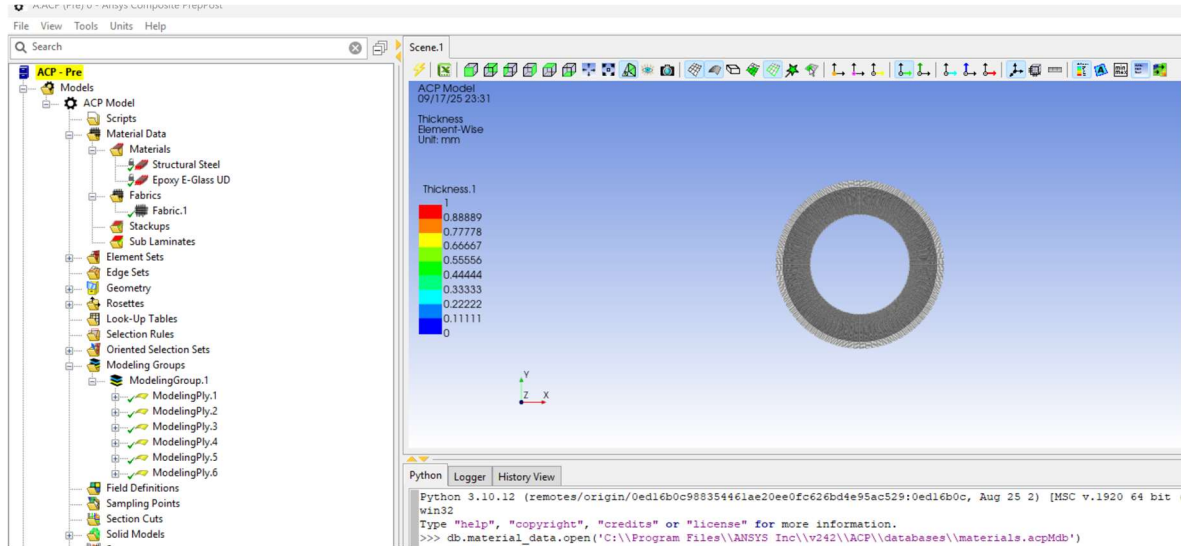
Bu bölümde, cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen bulgular detaylı şekilde sunulmaktadır. Sayısal analizler, ANSYS 2024 R2 sürümü kullanılarak gerçekleştirilmiş; kompozit yapıların modellenmesi için ANSYS Composite PrepPost (ACP) modülünün Pre arayüzü kullanılmış, analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve görselleştirilmesi ise ACP Post arayüzü aracılığıyla yapılmıştır. Modellenen yapılar, farklı fiber yönelimlerine ve katman dizilimlerine sahip olacak şekilde tanımlanmış ve her bir konfigürasyon için ayrı ayrı analizler yürütülmüştür. Analiz sürecinde, deneysel çalışmalardan elde edilen mekanik özellikler temel alınmış; yapısal yükleme altında oluşan gerilme, şekil değiştirme ve gerinim dağılımları incelenmiştir. Bu analizlerin temel amacı, deneysel çekme ve eğilme testlerinden elde edilen verilerle sonlu elemanlar yöntemi aracılığıyla elde edilen sonuçların karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmesidir. Böylece, kullanılan kompozit yapıların mekanik davranışı daha derinlemesine anlaşılabilir ve sayısal modelin doğruluğu test edilmiştir. Yapılan değerlendirmeler, malzemenin yük altındaki davranışının hem doğrusal tepkileri hem de fiber yönelimi gibi yerel parametrelere bağlı olarak gösterdiği değişimleri kapsamaktadır.

Model, üç ana bileşenden oluşmaktadır: metal insert (gömme parça), cam elyaf takviyeli katman yapısı ve epoksi reçine gövde. İlk olarak statik yapısal modülünde, reçine gövde ile metal insert parçaları tanımlanmış ve detaylı bir ağ yapısı (mesh) oluşturulmuştur. Bu sayede yapının genel geometrik formu, sınır şartları ve yükleme durumları tanımlanarak yapısal çözüm için zemin hazırlanmıştır. Element size 1 mm alınmıştır. 292695 node, 168999 element bulunmaktadır.



Şekil 2.14: Statik yapısal analiz altındaki yapı

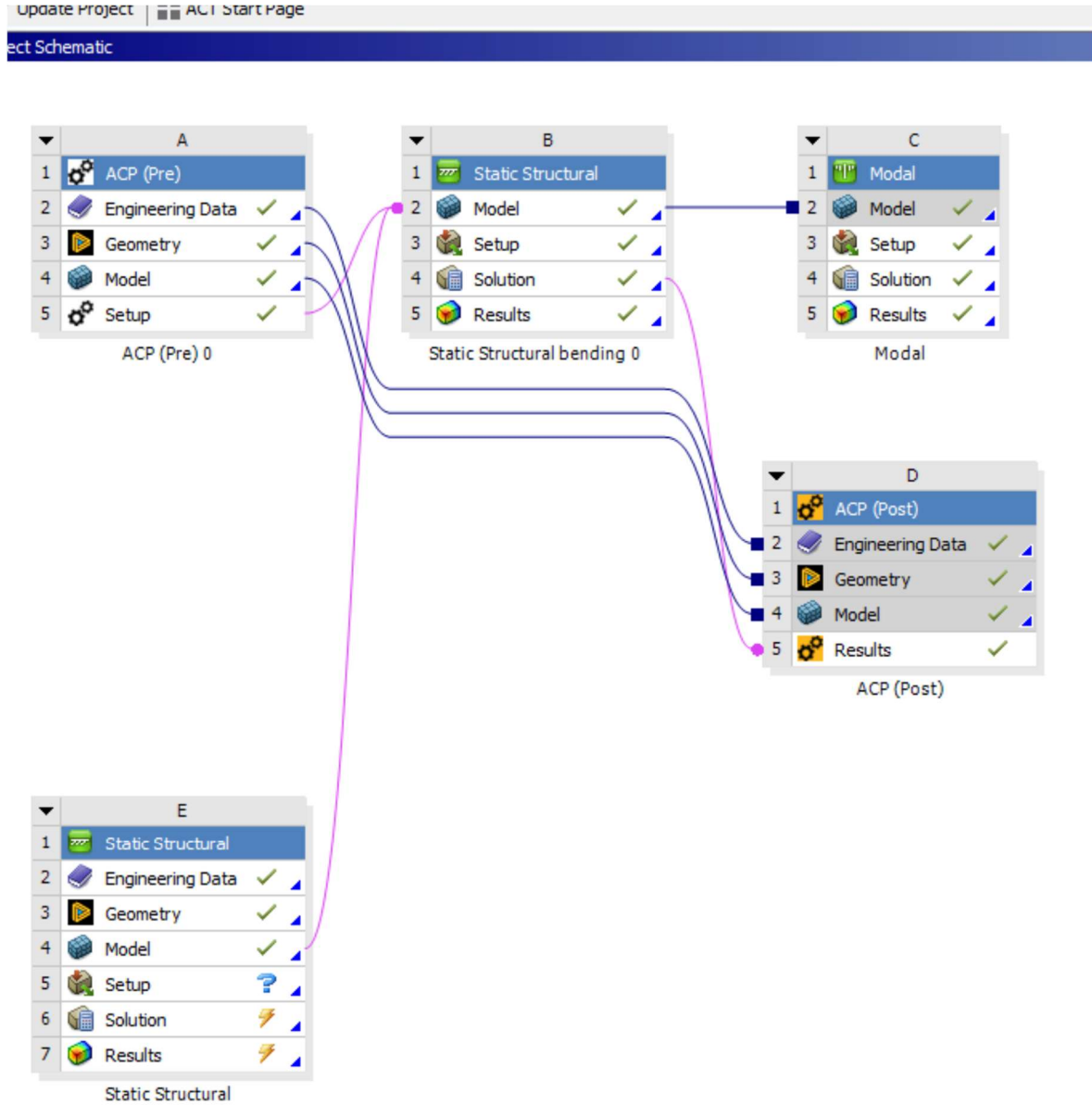
Ardından, kompozit katmanların tanımlanması amacıyla ACP Pre modülü kullanılmış; burada fiber yönelimi, katman sıralaması (lay-up) ve yerel koordinat sistemleri detaylı şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 2.15: ACP Pre altındaki yapı

Kompozit katmanların tanımlanması amacıyla ACP Pre modülü kullanılmıştır. Bu aşamada, Fabrics sekmesi altında kullanılan takviye elyafı tanımlanmış ve ANSYS'in malzeme kütüphanesinden Epoxy E-Glass UD (uni-directional) seçilmiştir. Her bir katman için 0,2 mm kalınlık atanmış ve bu parametre sabit kalacak şekilde analizler yürütülmüştür. Daha

sonra, Modeling Groups sekmesi altında, sarım yönünü temsil edecek şekilde her bir katman için ayrı modeling ply tanımlanmıştır. Bu ply'lara, ilgili üretim koşullarını yansıtacak biçimde farklı fiber yönelim açıları atanmıştır (örneğin 0°, ±45°, 90° gibi). Böylece, çok katmanlı bir kompozit yapının gerçekçi bir şekilde modellenmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.16: Ansys analiz ağacı görünümü

ACP Pre modülünde tanımlanan kompozit yapı ile statik yapısal modülünde modellenen diğer gövde bileşenlerinin birlikte analiz edilebilmesi amacıyla, analiz süreci yeni bir statik yapısal modülü altında devam ettirilmiştir. Bu amaçla, oluşturulan yeni statik yapısal modülünün model sekmesi, hem ACP Pre modülünde hazırlanan kompozit yapı modeline hem de daha önce tanımlanmış olan reçine gövde ve metal insert geometrilerine bağlanmıştır. Böylece, tüm yapı bileşenlerini içeren bütünlüklü bir model elde edilmiştir.

Analizin kurulumu, artık bu yeni statik yapısal modülünde yürütülmüş ve ilgili yükleme ile sınır koşulları bu yapı üzerinde tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen bu analizden elde edilen çözüm sonuçları (solution) ise, kompozit yapının detaylı katman analizlerinin yapılabilmesi ve tabakalar arası gerilme dağılımlarının yorumlanabilmesi amacıyla ACP Post modülüne bağlanmıştır. Bu entegrasyon sayesinde, fiber yönelimine ve katman dizilimine bağlı olarak ortaya çıkan kompozit hasarları, özellikle tabakalar arası (interlaminar) gerilme bileşenleri dikkate alınarak, detaylı şekilde değerlendirilebilmiştir.

Kompozit malzemeler, fiber takviyesi nedeniyle anizotropik (yön bağımlı) mekanik özellikler sergiler. Bu durum, izotropik malzemeler için geliştirilmiş klasik akma kriterlerinin (örneğin von Mises veya Tresca) kompozit malzemelere doğrudan uygulanmasını geçersiz kılar. Von Mises kriteri, malzemenin tüm yönlerde aynı elastik özelliklere ve akma dayanımına sahip olduğunu varsayar. Oysa cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde, lif doğrultusu boyunca (1 yönü) ve liflere dik doğrultuda (2–3 yönleri) elastisite modülleri ve dayanım değerleri birbirinden oldukça farklıdır (Daniel & Ishai, 2006). Bu nedenle, von Mises eşdeğer gerilmesi kompozit malzemelerde gerçek hasar durumunu temsil etmez. Örneğin lif doğrultusundaki düşük bir normal gerilme bile lif çekme dayanımını aşarak hasara neden olabilirken, von Mises değeri “akma” göstermeyebilir. Bu sebeple, bu çalışmada von Mises gerilmesi yalnızca ön gerilme dağılımının kalitatif değerlendirilmesi amacıyla kullanılmış; tasarım veya hasar yorumu yapılmamıştır (Barbero, 2010).

Kompozitlerin kırılma davranışı, farklı yönlerdeki çekme, basma ve kayma dayanımlarının bir kombinasyonu olarak tanımlanır. Literatürde bu davranışı açıklamak için birçok hasar kriteri geliştirilmiştir:

- **Maksimum Gerilme / Maksimum Şekil Değiştirme Kriterleri:** Basit uygulamalar için yeterlidir ancak karma yükleme durumlarını açıklayamaz (Jones, 2018).
- **Tsai–Hill Kriteri (1942):** Von Mises kriterinin ortotropik malzemelere uyarlanmış halidir; ancak çekme–basma asimetrisini dikkate almaz.
- **Tsai–Wu Kriteri (1971):** Çekme–basma asimetrisini ve iki eksenli yükleme etkilerini dikkate alarak daha gerçekçi sonuçlar verir (Tsai & Wu, 1971).
- **Hashin (1980) ve Puck (1996, 1998) Kriterleri:** Hasarı fiziksel olarak lif kırılması (fiber failure) ve matriks kırılması (inter-fiber failure) olarak iki farklı modda değerlendirir (Hashin, 1980)(Schürmann, 2007).

Tsai–Wu kriteri, karma yükleme durumlarında (çekme, basma ve kayma kombinasyonu) yüksek doğruluk sağlayan, enerjisel temelli birçok eksenli hasar teorisi. Lif yönü, liflere dik yön ve kayma gerilmelerini aynı anda değerlendirir. Ayrıca çekme–basma asimetrisini de hesaba kattığı için GFRP gibi gevrek matrisli kompozitlerde uygundur (Tsai & Hahn, 1980).

Puck kriteri, Tsai–Wu’dan farklı olarak yalnızca hasarın varlığını değil, hasar modunu da belirler. Hasar; Fiber Failure (FF) ve Inter-Fiber Failure (IFF) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. IFF altında ise pmA (matrix tension failure), pmB (matrix compression failure), pmC (matrix shear failure), pd(delamination) vardır. Özellikle $\pm 45^\circ$ lif yönelimli tabakalarda görülen matris/kayma etkilerini doğru tahmin ettiği için Puck kriteri, çalışmadaki tabakalar arası davranışın fiziksel yorumlanmasında kullanılmıştır (Puck, 1998),(Schürmann, 2007). Bu çalışmada kompozit izolatör numunesinin hasar analizi, ANSYS ACP ortamında Puck hasar kriteri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda, Puck kriterinin Tsai–Wu kriterine göre daha emniyetli sonuçlar verdiği ve hasar mekanizmasını daha doğru yansıttığı belirtilmiştir (Puck, 1998),(Davila et al., 2005). Puck kriteri, diğer kriterlerden farklı olarak kompozitlerdeki hasarı iki ana bileşene ayırır: lif hasarı (Fiber Failure, FF) ve lifler arası matris hasarı (Inter-Fiber Failure, IFF). Bu ayırım sayesinde, özellikle $\pm 45^\circ$ lif yönelimli tabakalarda gözlenen matris çatlamaları, ara yüz ayrılmaları ve lif sıyrılmaları gibi hasar türleri fiziksel olarak tanımlanabilir hale gelir.

Tsai–Wu kriteri, karma yükleme durumlarını matematiksel olarak temsil etmesine rağmen, hasarın hangi bileşende (lif/matris) başladığını ayırt edemez. Ayrıca çekme–basma asimetrisini doğru şekilde modelleyebilmesi için çok sayıda deneysel dayanım parametresine ihtiyaç duyar. Buna karşılık Puck kriteri, yalnızca yerel tabaka gerilmelerini ($\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$) kullanarak hasar düzlemi (fracture plane) üzerinde normal ve kayma gerilmeleri arasındaki etkileşimi dikkate alır. Böylece hem deneysel gözlemlerle daha uyumlu hem de ANSYS ACP gibi sayısal ortamlarda doğrudan uygulanabilir bir model sunar (Pinho et al., 2006); (Puck & Schürmann, 2002).

Yapılan analizlerde, Puck kriteri ile elde edilen Inverse Reserve Factor (IRF) dağılımları, Tsai–Wu kriterine göre daha düşük hasar indeksleri göstermiştir. Bu durum, Puck modelinin lif–matris ara yüzündeki kayma etkileşimini dikkate alması nedeniyle, daha gerçekçi ve güvenli sonuçlar verdiğini göstermektedir. Literatürde benzer sonuçlar Dávila ve Cuntze & Freund tarafından da rapor edilmiştir (Davila et al., 2005), (Cuntze & Freund, 2004) . Bu

çalışmada da aynı tabakalar için hem Puck hem Tsai Wu ya göre IRF değerleri karşılaştırılmıştır. Puck da elde edilen değerler daha güvenli alanda kalmıştır.

ANSYS ACP'de Inverse Reserve Factor (IRF), uygulanan mevcut yük düzeyinin, seçili hasar ölçütüne göre ilk hasar/akma eşiğine ne kadar yakın olduğunu gösteren boyutsuz büyüklüktür. Matematiksel olarak:

$$RF = \frac{\lambda_{fail}}{\lambda_{applied}}, IRF = \frac{1}{RF} = \frac{\lambda_{applied}}{\lambda_{fail}} \quad (2.2)$$

Burada λ_{fail} , ilgili hasar modeline göre (ör. Puck) malzemenin hasar aldığı yük; $\lambda_{applied}$ ise uygulanan yük çarpanıdır. Boyutsuz olan bu sayının yorumu ise şu şekildedir:

- IRF < 1 Emniyetli bölge (hasar eşiğine mesafe vardır; daha küçük IRF = daha emniyetli).
- IRF = 1 İlk hasar/akma başlar (ölçüt sınırı sağlanır).
- IRF > 1 Ölçüte göre hasar gerçekleşmiş kabul edilir.

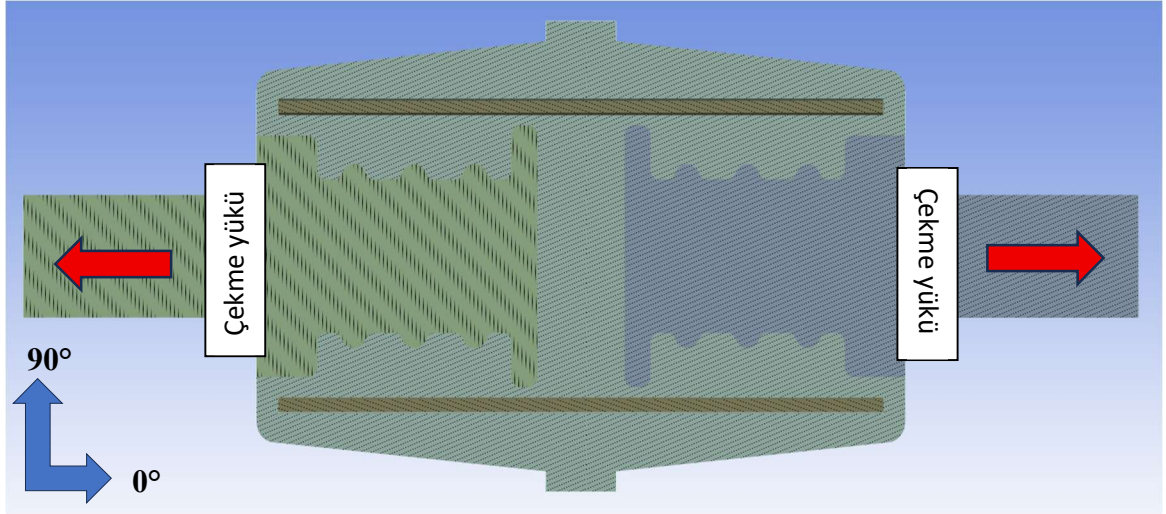
Sonuç olarak, Puck hasar kriteri bu çalışmada kompozit izolatörün tabaka bazlı hasar davranışını en doğru şekilde temsil eden model olarak seçilmiştir. Bu seçim hem literatürdeki geçerliliği hem de ANSYS analiz sonuçlarında gerçek deney davranışına en yakın eğilimi göstermesi nedeniyle tercih edilmiştir.

3. BULGULAR

Bu bölümde, Bölüm 2’de sunulan deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar sistematik biçimde raporlanmıştır. Öncelikle çekme ve eğilme deneylerinden elde edilen kuvvet–yer değiştirme eğrileri, kırılma/hasar görselleri ve özet istatistikler sunulmuş, ardından ANSYS–ACP analizlerinden elde edilen tabaka-bazlı gerilme alanları ve IRF dağılımları paylaşılmıştır. Lifli kompozitlerde sonuçlar PLY1= iç, PLY6= dış katman kuralına göre verilmiş; lif içermeyen reçine–kum numuneler ise kompozit ölçütleri kullanılmadan izotropik (von Mises ve asal gerilmeler) yaklaşımla değerlendirilmiştir. Alt başlıklarda (Çekme, Eğilme, Elektriksel) önce deneysel bulgular, ardından sayısal alanlar ve analiz–deney yakınsaması sırasıyla gösterilmiştir; karşılaştırmalı yorum ve tasarım çıkarımları Bölüm 4’te özetlenmiştir.

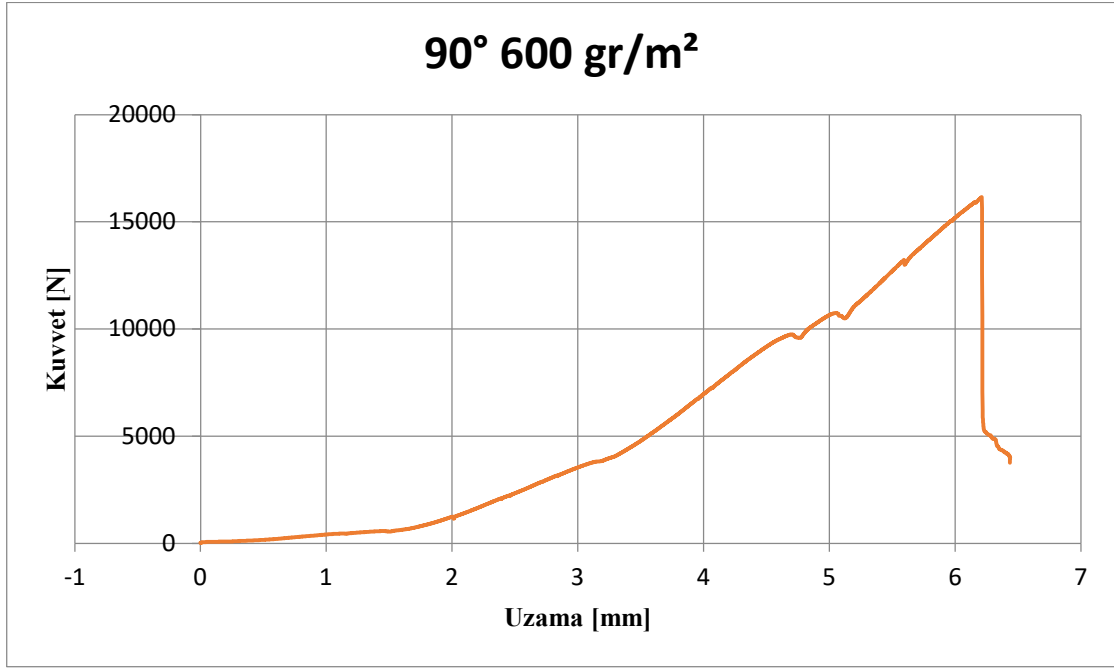
3.1 Çekme Deneyleri

Tanımlamada fiber koordinat düzlemi esas alınmıştır. X eksenini 0° , Y eksenini 90° yönü olarak kabul edilmiştir. Çekmede de yük X ekseninde uygulanmıştır. Her tip için üç adet numune üretilmiş ve test edilmiştir.

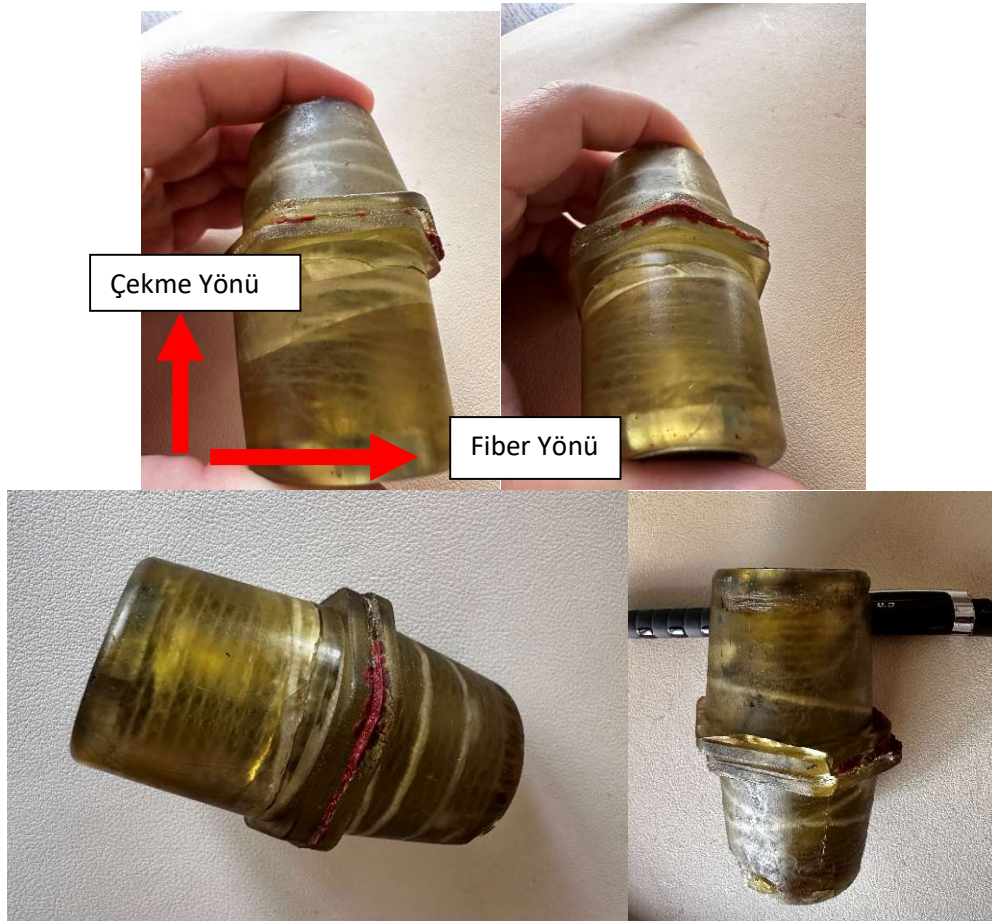


Şekil 3.1: Çekme yükleme yönü tanımlaması

3.1.1 90° laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.2: 90° laminasyonlu numune test sonucu



Şekil 3.3: 90° laminasyonlu numune görselleri

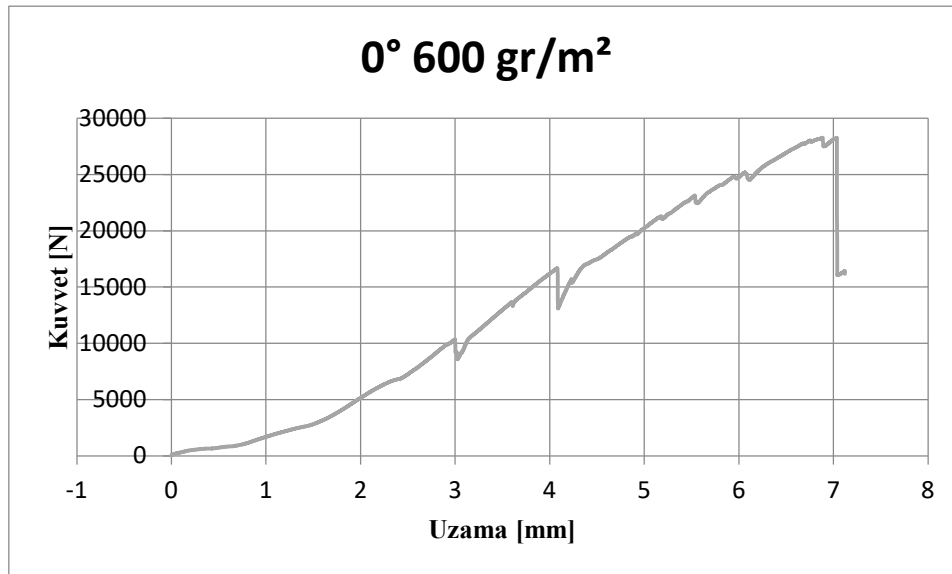
Lif yönelimi çekme kuvvetine dik olan 600 g/m^2 yoğunluklu üç farklı cam elyaf takviyeli kompozit numunenin ortalama kuvvet–uzama grafiği sunulmuştur. Bu tipte kuvvet–uzama eğrisi, doğrusal elastik bir bölgeyi takiben kademeli hasar adımlarını ve $\sim 16 \text{ kN}$ düzeyinde tepe yüke ulaştıktan sonra ani taşıma kaybını göstermiştir. Yük altında ise $\sim 6 \text{ mm}$ uzama sergilemiştir. Kırılma, numune fotoğraflarında görüldüğü üzere flanş/ bel çevresinde çevresel bir çatlak olarak başlamış ve çevresel doğrultuda ilerleyerek numuneyi ayırmıştır. Liflerin yük eksenine dik konumlanması nedeniyle yük taşıma kapasitesi esasen matris ve ara-yüz kalitesi tarafından belirlenmiş, hasar da bu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Grafik üzerinde görülen dalgalanmalar, lif-matris arayüzünde meydana gelen mikroskobik çatlak oluşumu ve lif kopmalarının varlığına işaret etmektedir. Bu durum, yük altında kısmi ve lokal hasarların enerji dağıtımına olanak sağladığını göstermektedir.

Bu sonuçlar, liflerin çekme yönüne dik konumlandırıldığı durumlarda yük taşıma kapasitesinin büyük ölçüde matris kalitesine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Matrisin taşıyıcı olarak görev aldığı bu tipte, liflerin sınırlı performansının sonuçlara etkisi belirgindir.

Tablo 3.1: 90° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

90°	Uzama [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	6.71	16363

3.1.2 0° laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.4: 0° laminasyonlu numune test sonucu



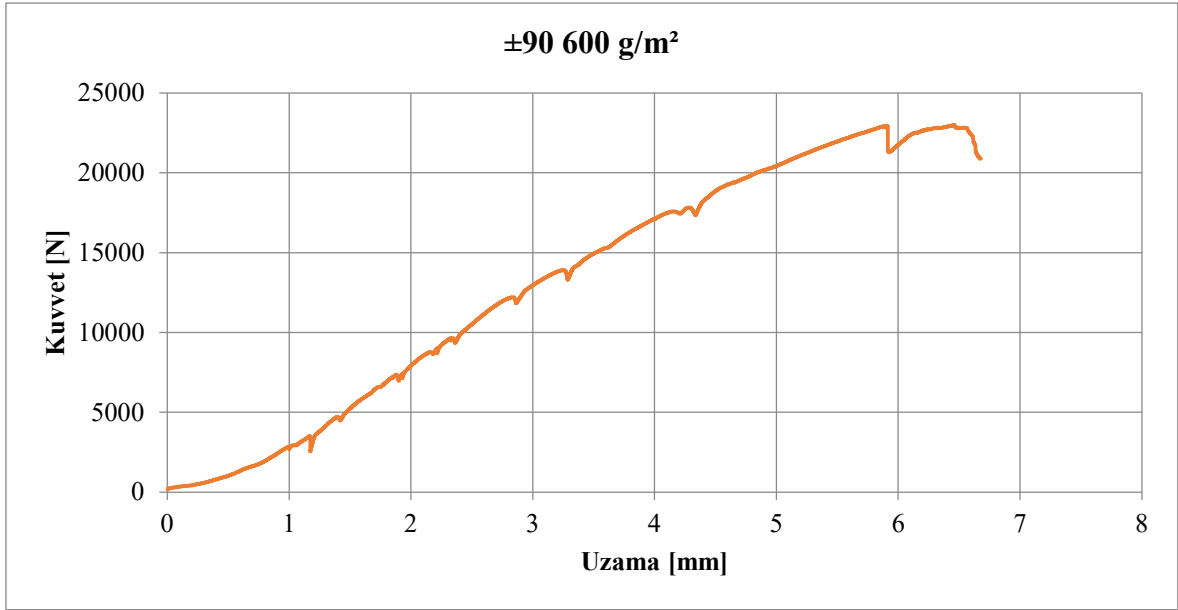
Şekil 3.5: 0° laminasyonlu numune görselleri

Lif ile kuvvetin aynı yönlü olduğu (600 g/m^2) numunenin kuvvet–uzama eğrisi, başlangıçtan yaklaşık 3-4 mm'ye kadar belirgin doğrusal-elastik bir artışla yüksek eksenel rijitliği ortaya koyuyor; ardından 6 mm civarına dek görülen küçük dişlenmeler, lif doğrultusunda ilerleyen mikro-çatlaklar ve yer yer tabakalar arası ayrılmaların kademeli olarak devreye girdiğini gösteriyor. Tepe yük yaklaşık 26–27 kN, uzama ise $\sim 6,8\text{--}7,0$ mm düzeyine ulaşarak liflerin yük taşıma kapasitesini maksimuma çıkardığını gösteriyor; kopma bu tepeyi takiben ani bir düşüşle, yani yüksek taşıma sonrası gevrek sonlanma biçiminde gerçekleşiyor. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi eksenel yarıma çizgileri bu yorumu destekliyor: kırılma esas olarak lif doğrultusunda ilerlemiş, matris ve ara-yüz bu hat boyunca birbirinden ayrılmıştır. Kısacası, liflere paralel dizilim çekmede en yüksek dayanım ve rijitliği sağlayarak lif-kontrollü bir kırılma karakteri sergilemiştir. Liflerin paralel dizilimi, yükün büyük kısmını liflerin taşımasını sağlamıştır. Bu yüksek yük taşıma kapasitesi, liflerin yükleme yönüyle aynı doğrultuda yerleştirilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.2: 0° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

0° numuneler	Uzama [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	7.6	28479,52

3.1.3 $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.6: $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numune test sonucu



Şekil 3.7: $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numune görselleri

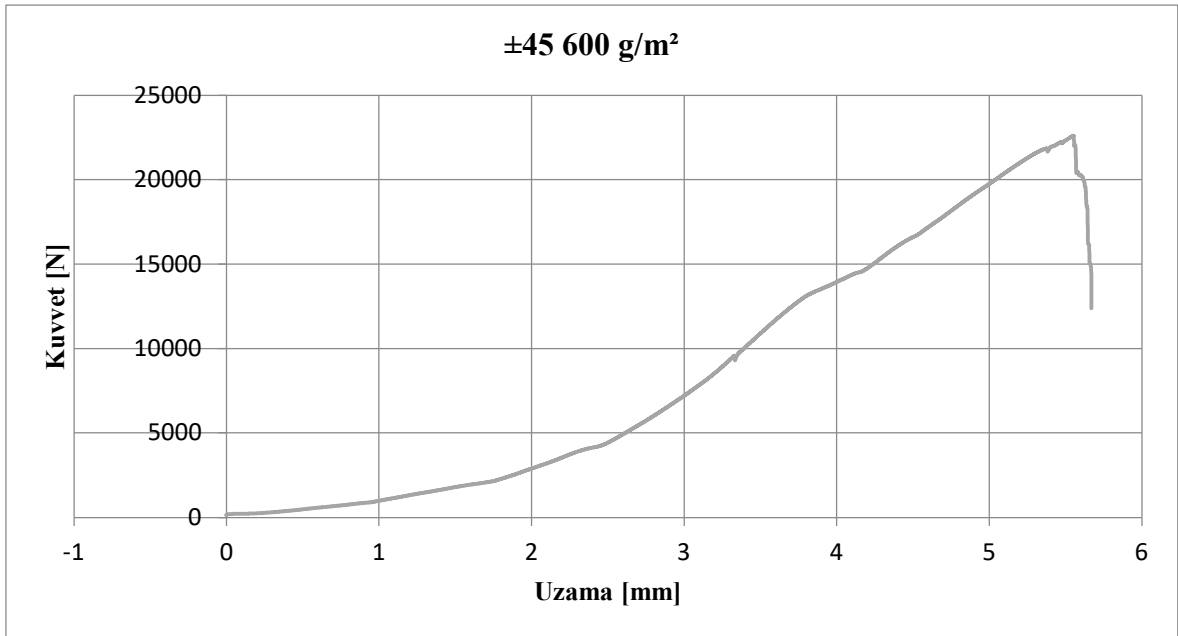
$\pm 90^\circ$ yönlendirmeli 600 g/m^2 numunenin ortalama kuvvet-uzama eğrisi, başlangıçtan tepe noktaya kadar belirgin biçimde artan ve yer yer küçük kademeler (tırtıklı iniş-çıkışlar) içeren bir karakter sergilemektedir. İlk $\sim 1-1,5 \text{ mm}$ 'de eğri orta eğimli bir hatla yükselir (orta rijitlik), ardından $6-7 \text{ mm}$ 'ye kadar uzayan uzun bir yük taşıma bölgesi görülür; bu bölgede ardışık küçük düşüşler, çatlak başlangıcı ve yerel lif/matris ayrışmalarının kademeli ilerlemesine işaret eder. Tepe kuvvet $\sim 22-23 \text{ kN}$ civarında yakalanmış, hemen sonrasında ani olmayan sınırlı bir düşüşle kırılma gerçekleşmiştir; bu da gevrek tek atımlı kopmadan

ziyade ilerlemeli hasar mekanizmasını düşündürür. Numune fotoğraflarında gövde boyunca aksnel uzayan açık renkli çizgiler, eğrideki kademeli düşüşlerle uyumlu olarak hem 90° yönünde katmanlar arası ayrılma (delaminasyon) hem de aksnel doğrultuda çatlak bileşenin beraber geliştiğini göstermektedir. Sonuç olarak $\pm 90^\circ$ dizilim, orta-yüksek süneklikle (uzama kapasitesi yüksek), kademeli hasar birikimi ve karışık kırılma moduna (delaminasyon + aksnel çatlak) sahip tipik bir davranış ortaya koymuştur.

Tablo 3.3: $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

$\pm 90^\circ$ laminasyonlu numuneler	Uzama [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	7.1	23510,59

3.1.4 $\pm 45^\circ$ Laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.8: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune test sonucu



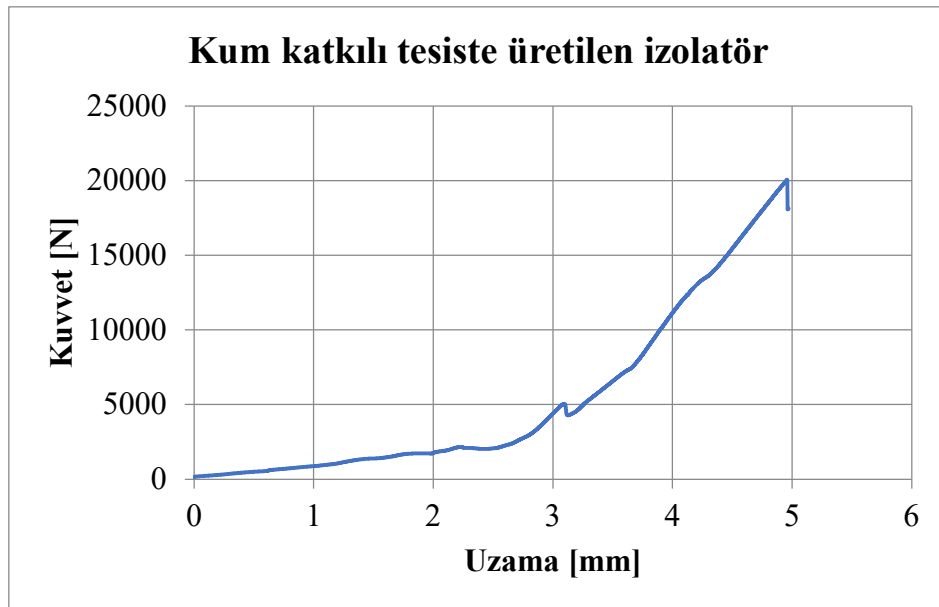
$\pm 45^\circ$ (600 g/m^2) lamineli numunenin ortalama kuvvet–uzama eğrisi, aksel çekmede tipik “kademeli hasar birikimi” davranışını göstermektedir. Eğri başlangıçta düşük rijitlikli fakat kararlı bir artışla ilerlemekte, $\sim 3\text{--}3,5 \text{ mm}$ civarında belirgin bir eğim artışıyla taşıma kapasitesi hızla yükselmekte ve $\sim 5,3\text{--}5,5 \text{ mm}$ uzamada $\sim 22 \text{ kN}$ mertebesinde tepe yüküne ulaşmaktadır. Eğri üzerindeki ardışık küçük düşüş–toparlanma salınımları, matris içinde kesme çatlaklarının oluşup yayılması ve lif–matris ara yüzünde yerel ayrılmaların devreye girdiğini düşündürür; yani hasar ani değil, kademeli olarak ilerler. Tepe noktasından sonraki keskin düşüş, ana kırılmanın gerçekleştiğini ve yük taşımanın hızla sona erdiğini gösterir.

Liflerin $\pm 45^\circ$ açılarla yerleştirilmiş olması, yük altında liflerin makaslama davranışı ile deformasyonu absorbe etmesini sağlamakta, bu da kırılma öncesi yüksek gerinim değerlerine ulaşılmasını mümkün kılmaktadır. Deney sonrası çekilen numune fotoğrafları bu yorumu destekler niteliktedir. Özellikle kırılma bölgelerinde gözlemlenen çapraz çatlak izleri ve reçine matrisinde oluşan deformasyonlar, $\pm 45^\circ$ fiber yönelimli yapının makaslama etkisi altında çalıştığını ve yük aktarımının lif yönleri boyunca yayıldığını göstermektedir. Sonuç olarak, $\pm 45^\circ$ fiber yönelimli kompozit izolatörler yüksek deformasyon kapasitesi ve enerji absorpsiyon yetenekleri ile başarılı bir performans sergilemiştir.

Tablo 3.4: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

$\pm 45^\circ$ laminasyonlu numuneler	Uzama [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	5.64	22726,44

3.1.5 Kum katkı tesiste üretilen izolatör numunelerinin test sonucu



Şekil 3.10: Kum katkı tesiste üretilen numunelerin test sonucu



Şekil 3.11: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu görselleri

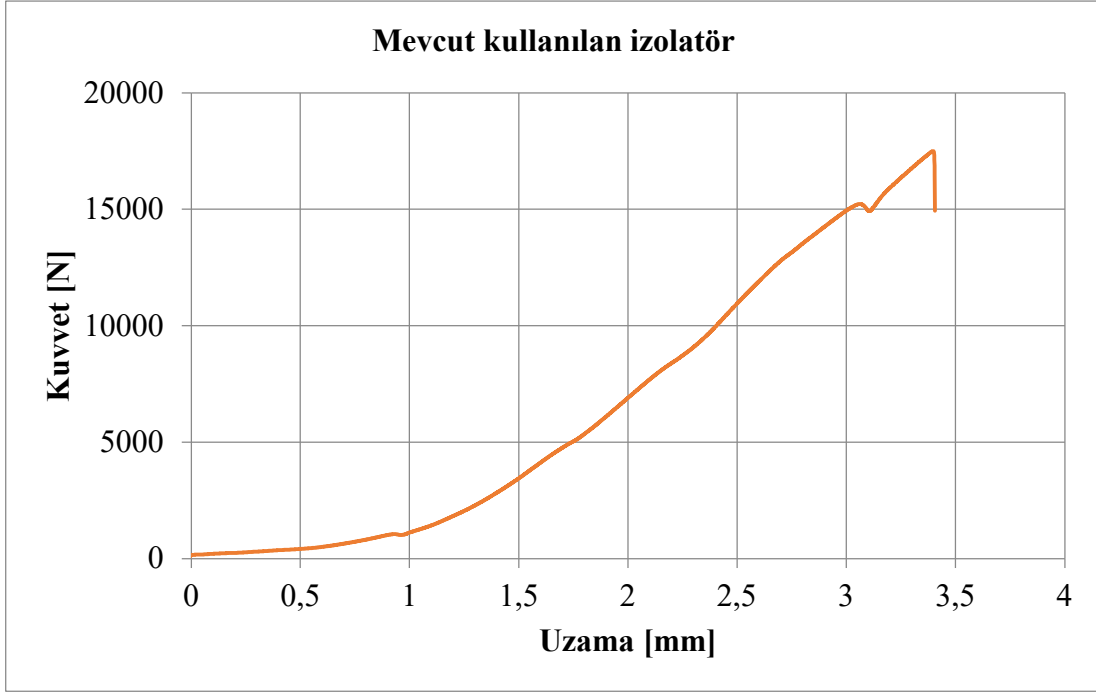
Grafikte kum katkılı tesiste üretilen (kum–reçine esaslı) izolatörün kuvvet–uzama eğrisi verilmiştir. Bu tip içerisinde elyaf içeren bir fiber dolgu yoktur. Eğri, yaklaşık 0–2,5 mm aralığında düşük eğimli ve düzenli artan bir bölümle başlamakta; 2,5–3,2 mm civarında küçük kademeli düşüş–toparlanma adımları görülmektedir. Bu adımlar, fotoğraflarda da izlenen çevresel yöndeki ince çatlakların ilk kez belirmesine karşılık gelmektedir. 3,5 mm’den sonra eğim belirgin biçimde artmakta ve yapı rijitleşerek yaklaşık 5,0 mm uzamada ~20 kN tepe yüke ulaşmaktadır. Tepe sonrası yük ani şekilde düşerek gevrek karakterli bir kırılma gerçekleşmiştir Numune fotoğrafları incelendiğinde, tüm kırılmaların metal insertin bitiş bölgesinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bu bölge, yük aktarımının en fazla olduğu bölge olup, geometrik süreksizlik nedeniyle gerilme yığılması (notch effect) oluşmaktadır. Bunun sonucu olarak çatlaklar bu bölgeden başlamış ve ani kırılmalarla sonuçlanmıştır. Fotoğraflarda gözlenen düzgün yüzeyli kırık yapısı da gevrek kırılmanın diğer bir göstergesidir. Bu yapıda elyaf lifler olmadığından birbirinden ayrılan katmanlar görülmemektedir.

Sonuç olarak, silika dolgulu bu reçine esaslı izolatör numuneleri, mukavemet açısından tatmin edici sonuçlar vermiş olsa da kırılma davranışı bakımından gevrek karakteristik göstermiştir.

Tablo 3.5: Kum katkılı tesiste üretilen izolatörlerin mekanik performansı

Tesiste üretilen numuneler	Uzama [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	4.7	20033

3.1.6 Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu



Şekil 3.12: Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu



Şekil 3.13: Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu görselleri
Grafik ve numune fotoğrafları birlikte değerlendirildiğinde, ticari olarak temin edilen ve mevcut kullanılan izolatörün çekme davranışının baştan sona artan bir kuvvet–uzama eğrisiyle karakterize olduğu, yaklaşık 3,3–3,5 mm uzamada 17–18 kN mertebesinde tepe değere ulaştığı ve hemen ardından ani bir taşıma kaybı yaşandığı görülmektedir.

Ürünün mekanik dayanımının, yalnızca “çekme yönüne paralel laminasyonlu numunelerden iyi olduğu ve cam elyaf takviyeli diğer tüm tiplere kıyasla daha düşük olduğunu

göstermektedir. Bu fark, cam elyaf takviyesinin sunduğu yüksek mukavemetin, yalnızca kum dolgu ile sağlanamadığını açıkça ortaya koymaktadır.

Görsellerde yer alan üç numunede de kırılma bölgelerinin gövde-insert geçiş noktasında olduğu görülmektedir. Bazı numunelerde gözle görülür bir şekilde kırılma izi ya da mikro çatlaklar yer almaktadır. Özellikle tekli numune fotoğrafında, kırılmanın tam olarak insert sonlandığı bölgede gerçekleştiği net biçimde tespit edilmiştir. Test edilen numunelerde, yük altında ani ve kırılğan bir şekilde kırılma gözlenmiştir. Bu durum, özellikle insert (metal gömlek) bölgesinde uç kısmın hizasında gerçekleşen kırılma ile kendini göstermektedir. Bu tip kırılma, çentik etkisi (notch effect) olarak bilinen lokal gerilme yığılmalarının sonucudur (Belgacem et al., 2018; Beyene et al., 2016). Numunenin kesit görünüşü alındığında insert dış çeperlerine radyus verilmediği görülmüştür. Bu da çentik etkisinin varlığını doğrulamaktadır.

Üreticinin ürün datasında belirtilen 20.000 N'luk çekme dayanımı değerine ulaşılammış, deneysel testlerde en fazla 17.313 N değerine ulaşılmıştır. Bu durum, ürünün katalog değerlerini sağlama güvenilirliği konusunda soru işareti oluşturmaktadır.

Dış tedarik edilen kum dolgulu izolatörler, düşük maliyetli ve yaygın kullanıma sahip olmalarına rağmen, mekanik açıdan cam elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla daha zayıf performans göstermiştir. Deney sonuçları, üretici beyanlarının sahada doğrulanmasının önemini vurgularken, çentik etkisi gibi tasarım zayıflıklarının kırılma davranışı üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymaktadır.



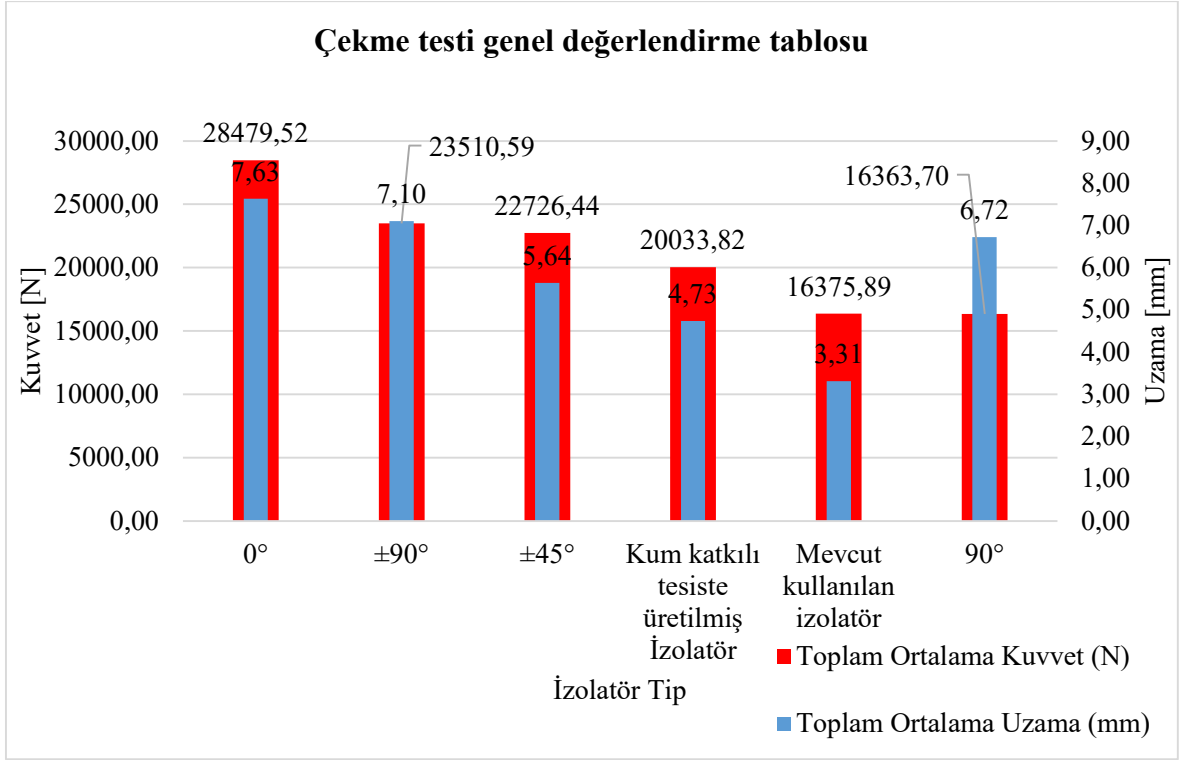
Şekil 3.14: Mevcut kullanılan izolatörün kesit görünüşü

Tablo 3.6: Mevcut kullanılan izolatörlerin mekanik performansı

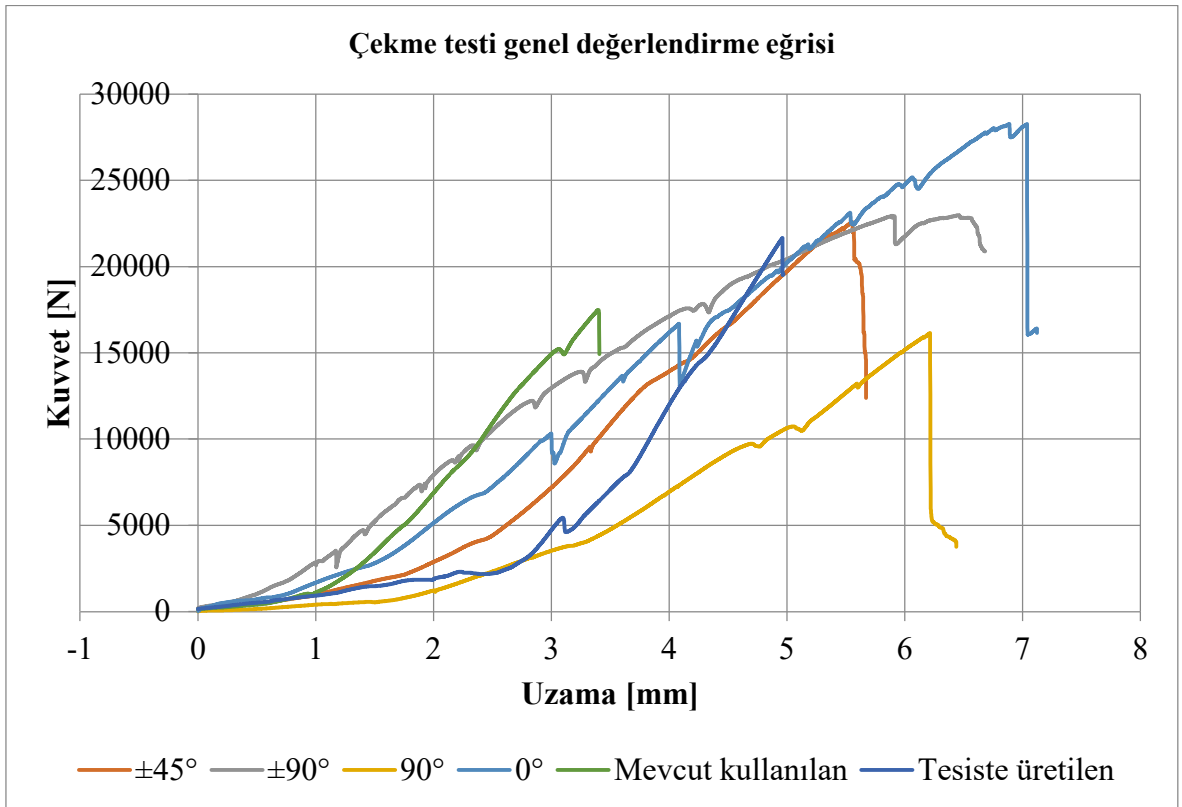
Mevcut kullanılan	Uzama [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	3.3	16375

Tablo 3.7: Çekme testi genel değerlendirmesi

Tip	Ortalama Uzama (mm)	Standart Sapma (mm)	Ortalama Kuvvet (N)	Standart Sapma (N)	% Fark Kuvvet vs Min	% Fark Uzama vs Min
±90°	7,10	0,36	23510,59	604,08	43,67	114,50
±45°	5,64	0,12	22726,44	1742,12	38,88	70,39
0°	7,63	1,11	28479,52	2740,00	74,04	130,51
90°	6,72	1,36	16363,70	1571,32	Referans minimum	103,02
Mevcut kullanılan izolatör	3,31	0,32	16376	1641,99	0,08	Referans minimum
Kum katkılı tesiste üretilmiş izolatör	4,73	0,82	20033,82	1464,66	22,43	42,90



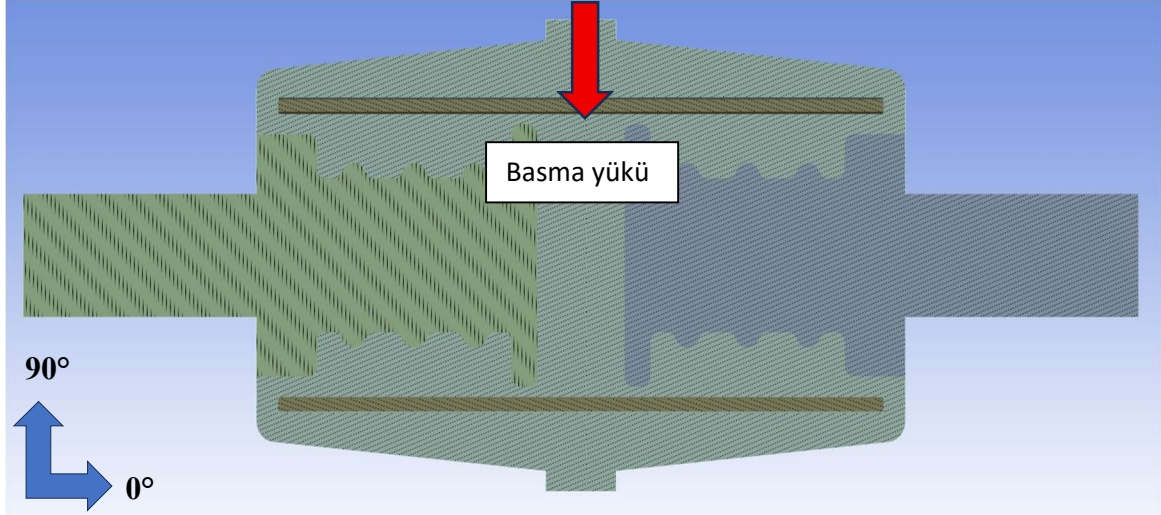
Şekil 3.15: Çekme testi genel değerlendirme grafiği



Şekil 3.16: Çekme testi genel değerlendirme eğrisi

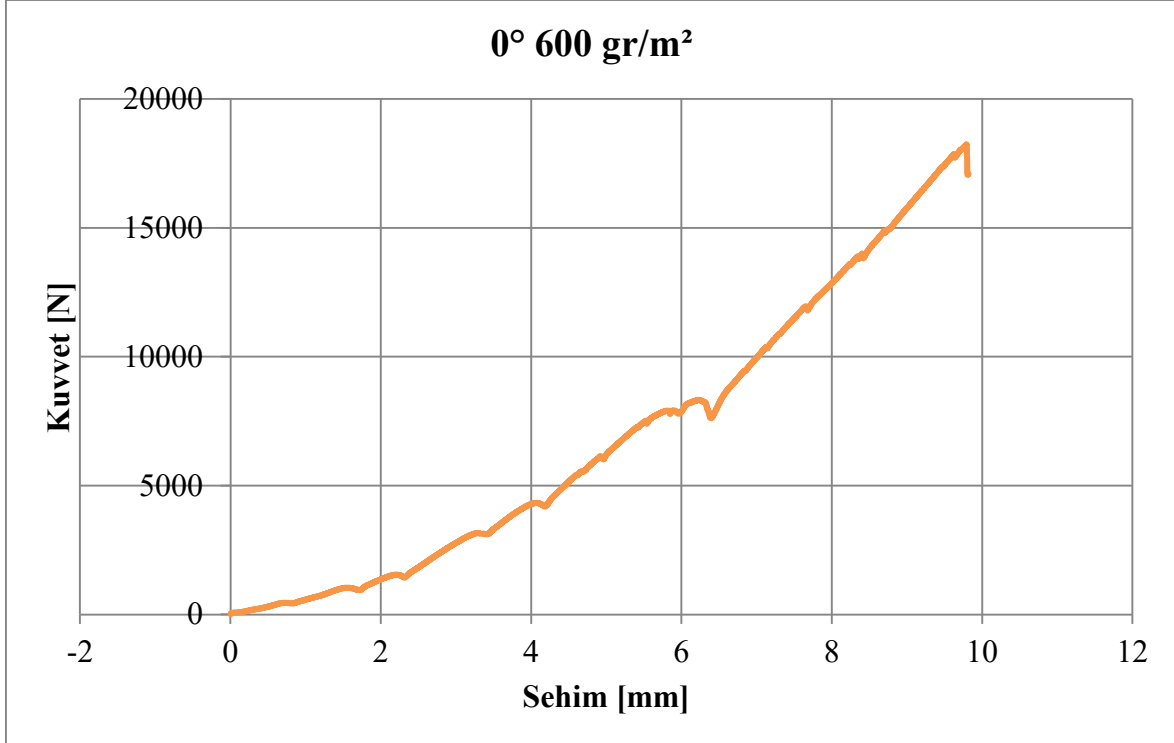
3.2 Eğilme Deneyleri

Tanımlamada fiber koordinat düzlemi esas alınmıştır. X eksenini 0° , Y eksenini 90° yönü olarak kabul edilmiştir. Eğilmede yük Y ekseninde uygulanmıştır. Her tip için üç adet numune üretilmiş ve test edilmiştir.

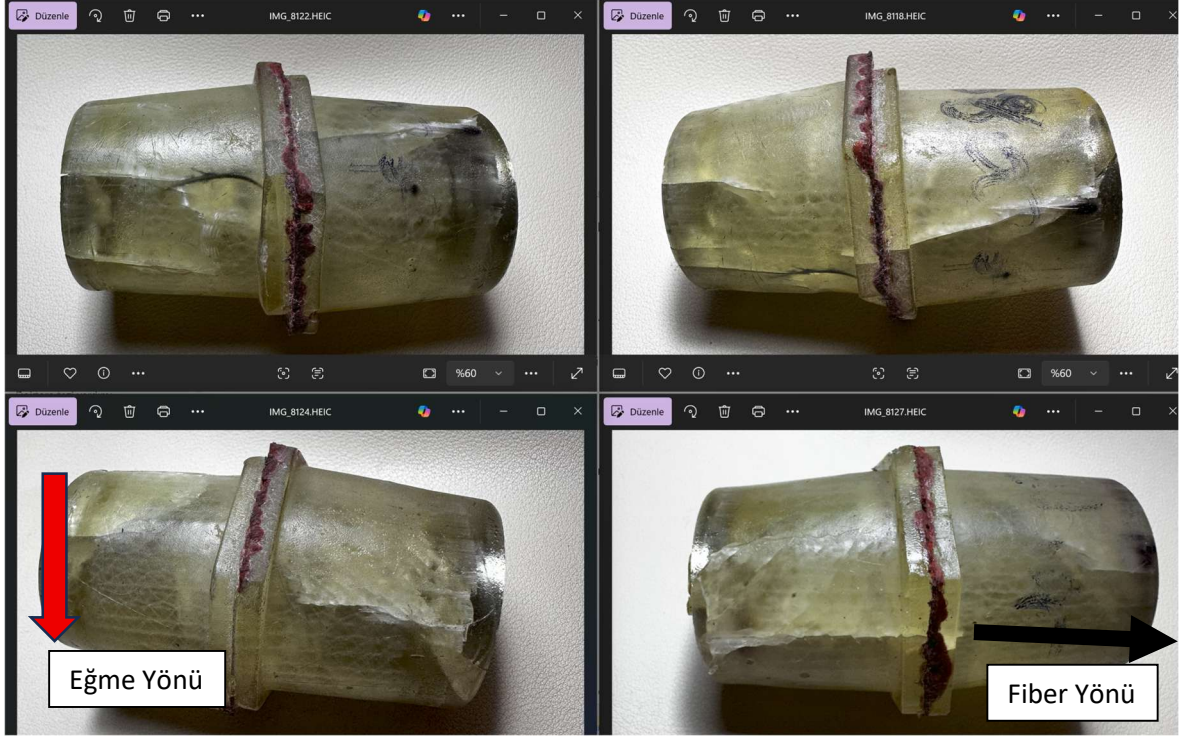


Şekil 3.17: Basma yükleme yönü tanımlaması

3.2.1 Eğme kuvveti fibere dik laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.18: 0° laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.19: 0° laminasyonlu numune test sonucu görselleri

Kuvvet–sehim eğrisi yaklaşık 10 mm deplasmana kadar düzenli bir artış göstererek ~18 kN civarında tepe değere ulaşmış, tepe öncesinde 6–6,5 mm civarında küçük bir düşüş-yeniden yükseliş “kademeli” görülmüştür. Bu seyir, başlangıçta belirgin bir elastik bölge ve ardından artan rijitlikle kademeli hasar birikimi (matriste mikro-çatlaklar) olduğunu düşündürür. Tepe sonrası ani taşıma kaybı, kırılmanın son aşamada gevrek karakterli geliştiğini gösterir.

Bel/çap geçişi çevresinde gerilme yığılması nedeniyle çatlaklar burada başlamış; fotoğraflarda uzunlamasına/eğik çatlaklar, delaminasyon şeritleri ve matris kırığına bağlı beyazlama net biçimde izlenmiştir. Liflerin boylu boyunca serildiği bu numune tipinde matrisde hasar başlayıp kırılmalar yaşandıkça liflerde boyuna biçimde delamine olmuşlardır. Liflerin yük eksenine dik kalması nedeniyle yük transferi matris ve ara-yüze geçmiş; bu da matris basma ve kesme karakterinde bir kırılma dizgesine karşılık gelmektedir. Analiz kısmında bu kısma detaylı değinilecektir.

Sonuç olarak bu eğilme testi, fiber yönünün yük doğrultusuna paralel olduğu durumlarda;

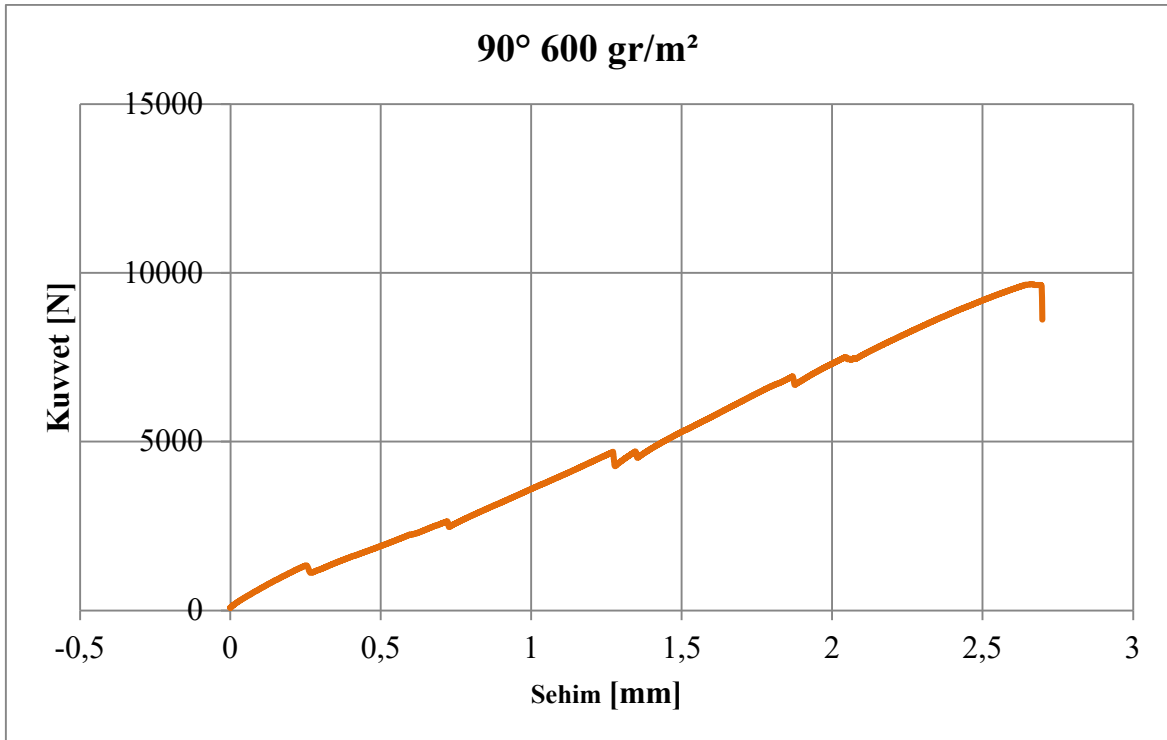
- Liflerin yüke etkin şekilde katkı sağladığı,
- Matris çatlaması ve delaminasyonun baskın hasar modu olduğu,
- Ancak bu hasarın numunenin taşıma kapasitesini bitirmediği, aksine liflerin yük taşıma kapasitesinin sürdüğü,

gibi önemli mekanik davranışları ortaya koymaktadır. Bu durum, fiber yönünün tasarımda kritik bir parametre olduğunu ve yönlendirilmiş fiberlerin yapısal performansı doğrudan etkilediğini kanıtlamaktadır.

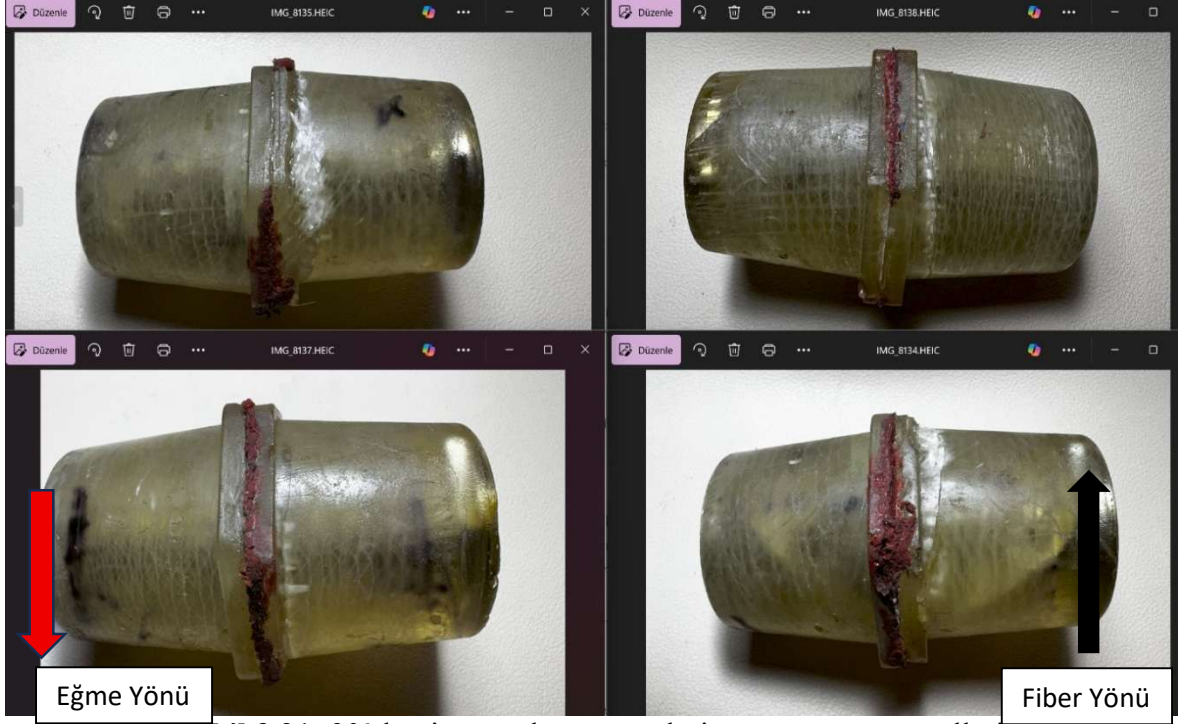
Tablo 3.8: Eğme kuvveti ile aynı yönde laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

0° numuneler	Sehim [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	9.74	17441.16

3.2.2 Kuvvet yönüne paralel laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.20: 90° laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.21: 90° laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri

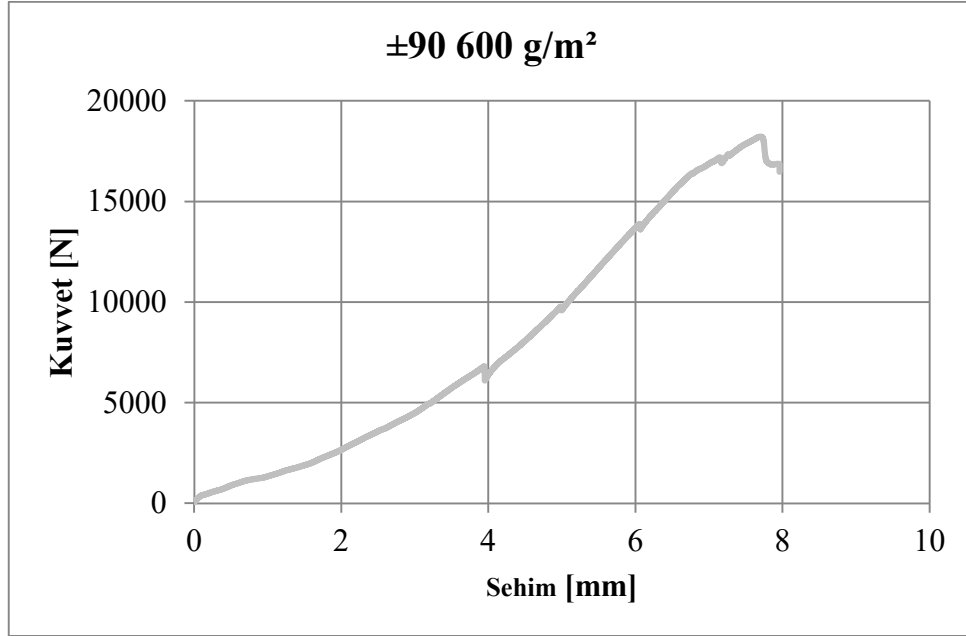
Numunelere ait eğilme test sonuçları ve numunelerin test sonrası görselleri birlikte incelendiğinde, numunelerin mekanik davranışları ile hasar şekilleri arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu numunelerde lif yönelimi, uygulanan eğilme yüküne dik olacak şekilde tasarlanmıştır. Elde edilen eğilme kuvveti – sehim eğrilerinde yaklaşık 3 mm aralığında kırılma gözlenmiştir. Sehim oldukça düşüktür. Ortalama 10.000 N aralığında kopma yaşamış, bu da lif yönünün gerilme hattıyla dik olmasının, yükü taşımada sınırlı etkisi olduğunu düşündürmektedir. Numune görsellerinde ise kırılmaların büyük oranda numune gövdesinin ortasında ve lif hatlarının yoğun olduğu bölgelerde gerçekleştiği görülmektedir. Yükleme sırasında özellikle orta bölgedeki eğilme momentinin etkisiyle matriste yoğun çatlak oluşumları meydana gelmiş, bunu takiben lif-matris arayüzünde delaminasyon hasarları gözlenmiştir. Liflerin kopmaya maruz kaldığı bölgelerde hem boyuna hem de çapraz yönde ilerleyen kırık izleri, yük aktarımının lifler boyunca tam olarak sağlanamadığını ve yapının zayıf noktasının bu bölge olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, bu konfigürasyonda, yapının rijitliğinin ve enerji absorplama kapasitesinin düşük olduğu, dolayısıyla daha erken ve gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlenmiştir. Bu yapı, diğer tiplerle karşılaştırıldığında daha düşük sehim ve kuvvet değerleri üretmiştir.

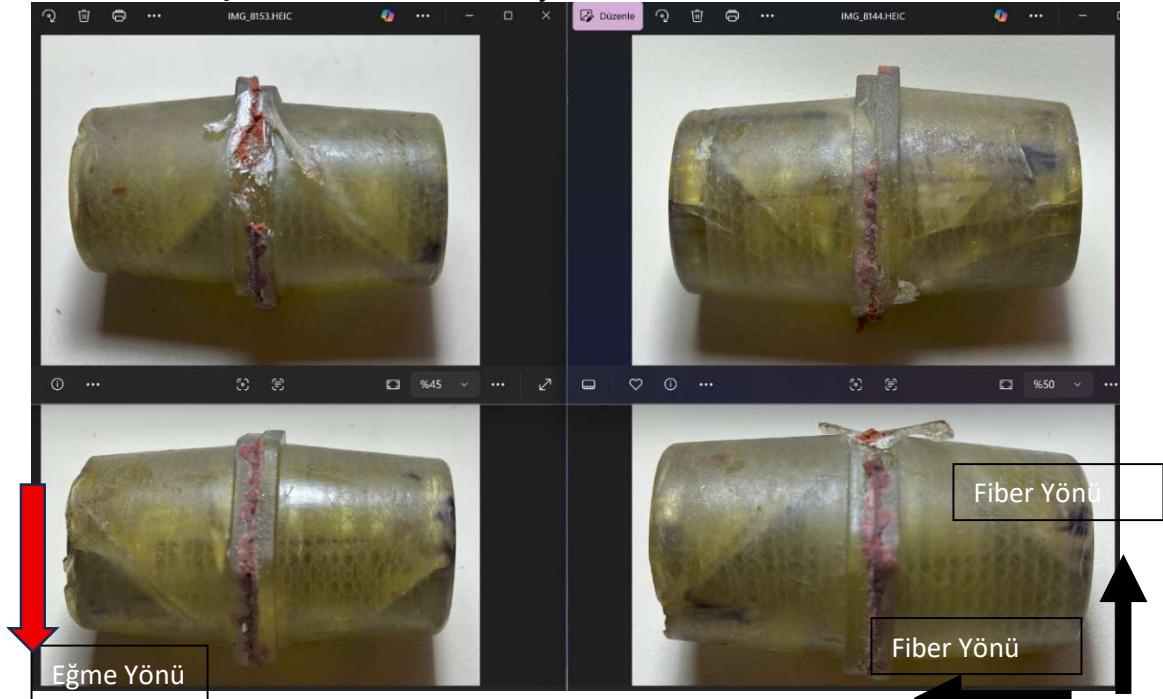
Tablo 3.9: 90° laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

90° numuneler	Sehim [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	3.53	10004.53

3.2.3 ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.22: ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.23: ±90° laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri

Genel olarak, numuneler yüksek deformasyon (8 mm) kapasitesi göstermektedir. Bu, yapının elastik olmayan davranışlara karşı dirençli olduğunu ve enerji sönmeme

özelliğinin yüksek olduğunu gösterir. Maksimum kuvvet değerleri 18.000 N seviyesini görmektedir.

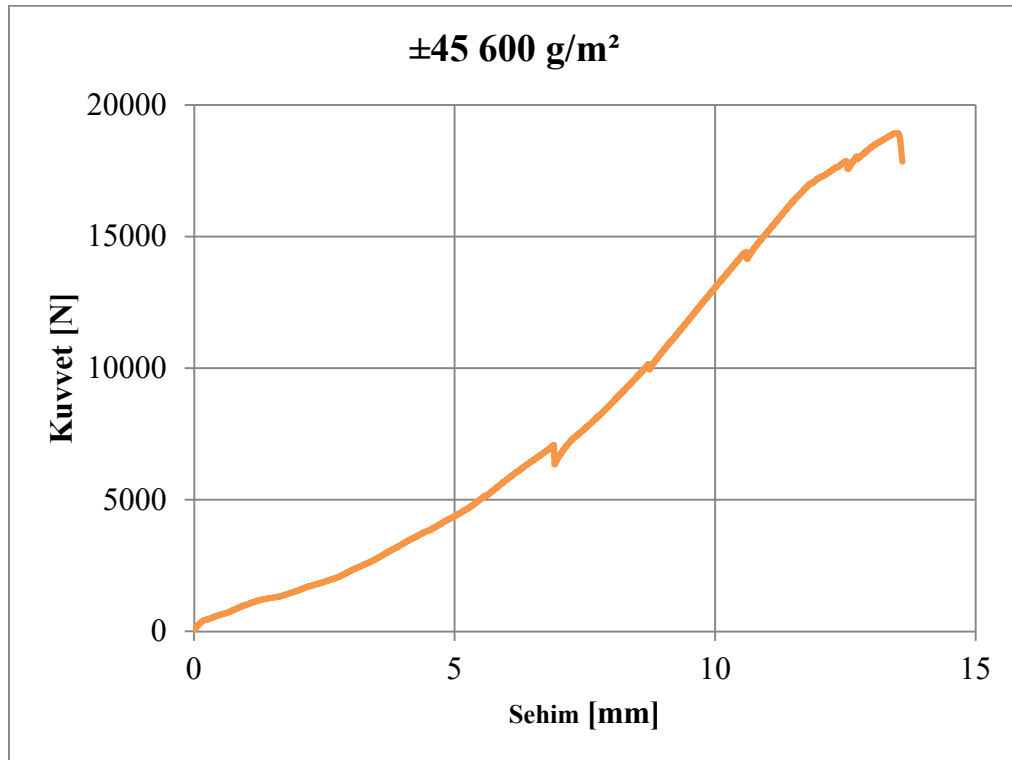
$\pm 90^\circ$ laminasyonda $+90^\circ$ yönlenmedeki fiberler doğrudan yükü taşıırken, 0° yönelimdeki fiberlerin taşıma kapasitesi görece daha zayıf kalmaktadır. İki yönelimin bileşkesi kalan noktada da 45° yönünde kuvvet yapı içinde ortaya çıkmaktadır. Bu kuvvetinde varlığı 45° yönünde matris çatlağıyla görülmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonucu bunu destekler veriler alınmıştır. İleride bahsedilecektir. 4–6 mm aralığında gerilme-gevşeme (stress-relaxation) (Somashekar et al., 2012)(Jae Woo Kim et al., 2013)(Saeed et al., 2020) davranışı dikkat çekiyor. Bu bölgede mikro çatlaklar veya fiber/matris ayrılmaları başlamış olabilir.

$\pm 90^\circ$ dizilimli cam elyaf/epoksi kompozit numuneler, eğilme testi sonucunda yüksek deformasyon kabiliyeti ve tatmin edici kuvvet taşıma kapasiteleriyle dikkat çekmiştir. Özellikle matris çatlağı ve katman ayrılması gibi hasar türlerinin ağırlıkta olması, 0° fiberlerin doğrudan yük taşıyamamasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.10: $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

$\pm 90^\circ$ numuneler	Sehim [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	8.49	18080.27

3.2.4 $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.24: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numunelerin test sonucu



Şekil 3.25: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numunelerin test sonucu görselleri

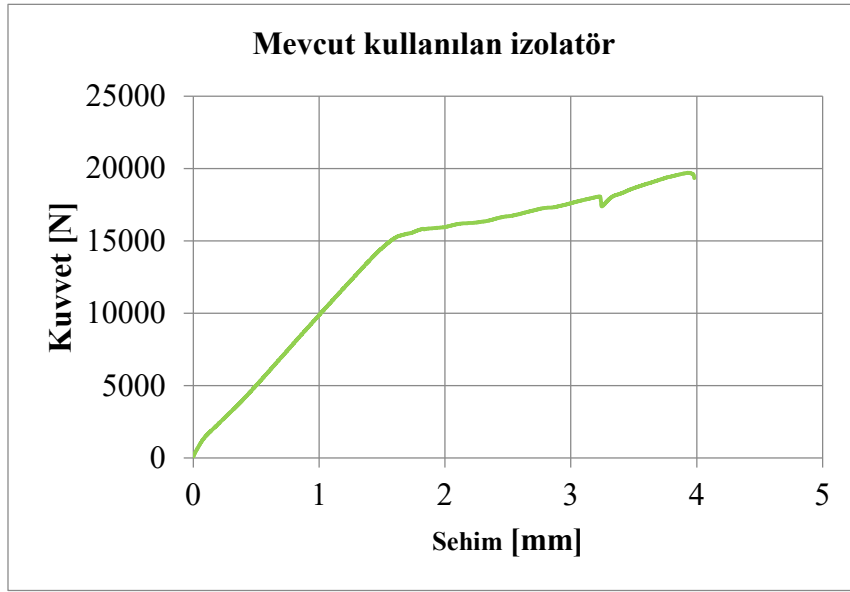
$\pm 45^\circ$ dizilimli numuneler, hem lif yönünün eğilmeye çapraz gelmesi hem de simetrik dağılım nedeniyle yüksek enerji sönmüleme kabiliyeti sergilemektedir. Numuneler 12 mm ve üzeri sehime ulaştıktan sonra kırılma eğilimi göstermiştir. Ortalama 19.000 N yük taşıma kapasitesine ulaşmışlardır. Bu, liflerin yöneliminin yükü doğrudan taşımanın yanında dağıtıcı etki yaptığına işaret eder. Lifler yükü aynı doğrultuda olmadıkları için, doğrudan yük taşımazlar ama makaslama (shear) etkisine karşı önemli direnç sunarlar. Eğrilere görülen dalgalanmalar, mikroyapısal kırılmaların (matris çatlakları, lif-matris arayüz ayrılmaları) oluştuğunu gösterir.

Sonuç olarak $\pm 45^\circ$ cam elyaf dizilimli numuneler, yüksek uzama kabiliyeti ve dengeli yük taşıma eğilimleri sayesinde darbelere ve ani zorlamalara karşı oldukça dayanıklı bir yapı sergilemektedir. Bu davranış biçimi, özellikle sünek deformasyonun arandığı ve yük şoklarının emilmesinin kritik olduğu örneğin sismik uygulamalar için önemli avantajlar sunar. Tablo 3.14 incelendiğinde $\pm 45^\circ$ dizilim fiber takviyelilerde en yüksek dayanımı sunduğu görülmektedir. Bu yapıdaki cam elyaf takviyeli kompozit izolatör gövdeleri; yüksek süneklik, geniş alana yayılmış çatlak formasyonu ve kademeli hasar gelişimi gibi özellikleriyle öne çıkmakta ve tasarım açısından önemli bir alternatif oluşturmaktadır.

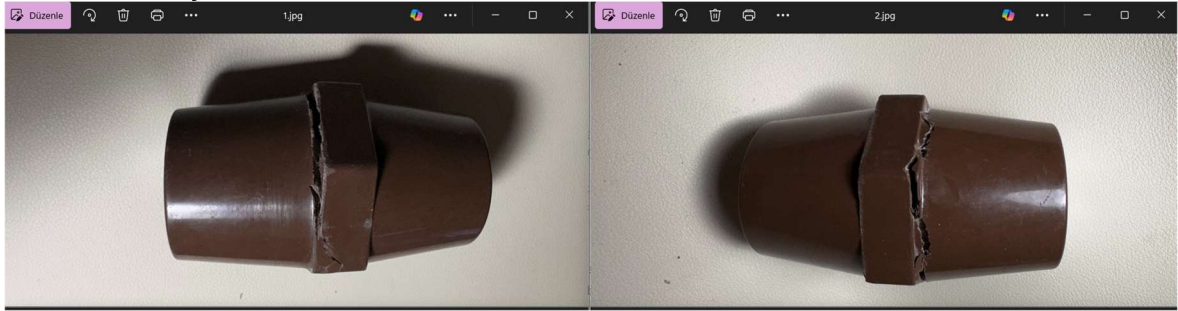
Tablo 3.11: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune ortalama mekanik performansı

$\pm 45^\circ$ laminasyonlu numuneler	Sehim [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	12.76	18424.23

3.2.5 Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu



Şekil 3.26: Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu



Şekil 3.27: Mevcut kullanılan izolatör numunelerinin test sonucu görselleri

Dışarıdan tedarik edilen kum dolgululu ticari izolatör gövdelerine ait eğilme testi sonuçları incelendiğinde, malzemenin oldukça sınırlı bir deformasyon kapasitesine ve düşük süneklik özelliklerine sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu davranış, malzemenin gevrek karakterde olduğunu ve deformasyon altında kademeli enerji yutma veya çatlak yayılımı yerine doğrudan kırılma eğilimi sergilediğini göstermektedir. Grafikte sünek deformasyonun neredeyse hiç görülmemesi, yapının içeriğinde fiber takviyesi yerine sadece epoksi matris içerisinde dağılmış kum dolgusu bulunduğunu açıklamaktadır. Ayrıca deneyler esnasında bir numunenin beklenmedik bir biçimde 14.000 N civarında kopması ürün üretim kalitesini ve güvenilirliğini sorgulatmıştır. Bu erken kopma, malzeme içinde homojen olmayan kum dağılımı, kürlenme eksikliği, mikro boşluklar veya üretim sırasında oluşmuş mikroyapısal kusurlar gibi kalite eksikliklerine işaret ediyor olabilir. Yükün etkili olduğu bölgede neredeyse aynı eksen boyunca gelişmiş tekil ve keskin çatlak hatları izlenmektedir. Kırılma yüzeylerinde yayılma göstermeyen, tam kesit boyunca uzanan bu çatlaklar, malzemenin düşük tokluk değerlerine sahip olduğunu ve çatlak ilerlemesine karşı

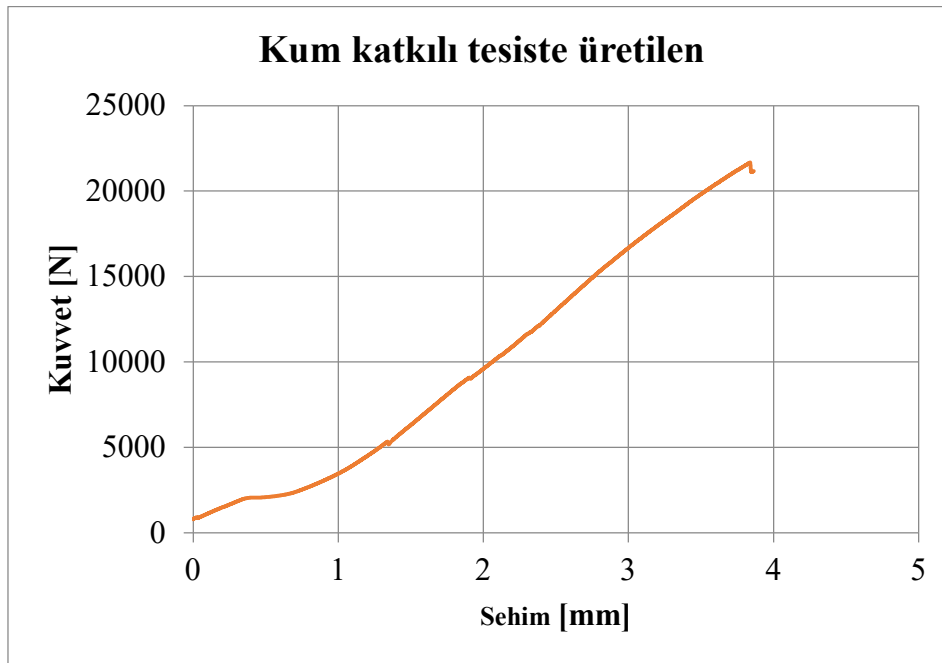
direnç göstermediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, çatlakların lif izlenimi vermemesi ve yüzeyin camsı karakterde kırılmış olması, fiberli kompozitlere özgü delaminasyon ya da matris çatlağı gibi çok mekanizmalı hasar türlerinin bulunmadığını göstermektedir.

Sonuç olarak kum dolgulu epoksi sistemler, belirli yükleme koşullarında rijitlik kazandırmak için tercih edilse de fiber takviyeli kompozitler kadar mekanik performans sağlayamamaktadır. Özellikle eğilme ve darbe gibi karmaşık yükleme durumlarında, fiberlerin bulunmadığı bu tip yapılar ani kırılma ile sonuçlanmaktadır. Bu durum, bu tür malzemelerin yük taşıma kapasitesi yüksek ancak düşük tokluk gerektiren uygulamalarda uygun olabileceğini, ancak enerji yutucu veya sünek deformasyon beklenen sistemlerde yeterli performansı sağlayamayacağını göstermektedir.

Tablo 3.12: Mevcut kullanılan izolatörlerin mekanik performansı

Mevcut kullanılan	Sehim [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	3.29	18700.62

3.2.6 Kum katkılı tesiste üretilen izolatör numunelerinin test sonucu



Şekil 3.28: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu



Şekil 3.29: Kum katkılı tesiste üretilen numunelerin test sonucu görselleri

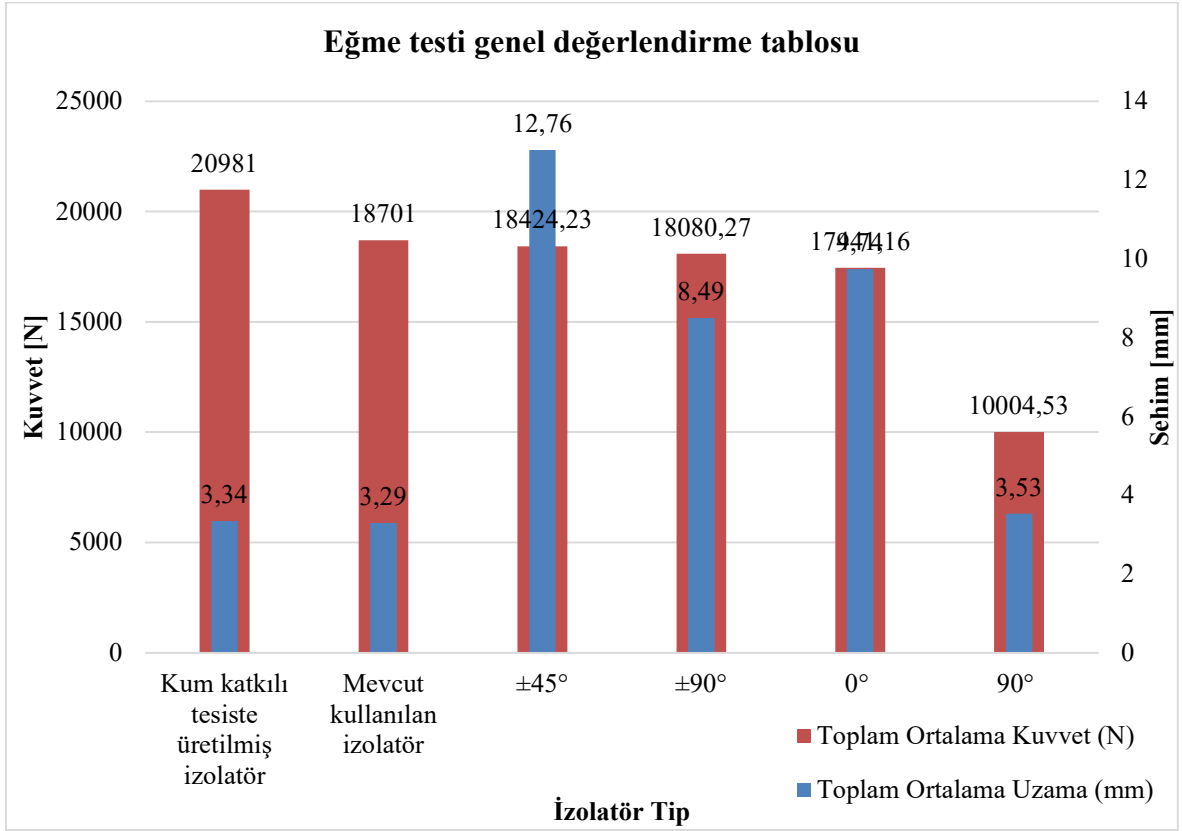
Beklendiği gibi ticari olarak üretilenle benzer bir yapı izlemiştir. Numuneler doğrusal- elastik bir bölge sonrası, maksimum yükte gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Kuvvet- sehim eğrileri yaklaşık 20–22 kN aralığında maksimum değerlere ulaşmaktadır. İzolatör içinde insertin bittiği noktadan bir çektik etkisi yaratarak kırıldığı görülmektedir. Genel kum dolgunun yapıya rijitlik kazandırdığıdır, ancak sünek deformasyon kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.13: Kum katkılı tesiste üretilen izolatörlerin mekanik performansı

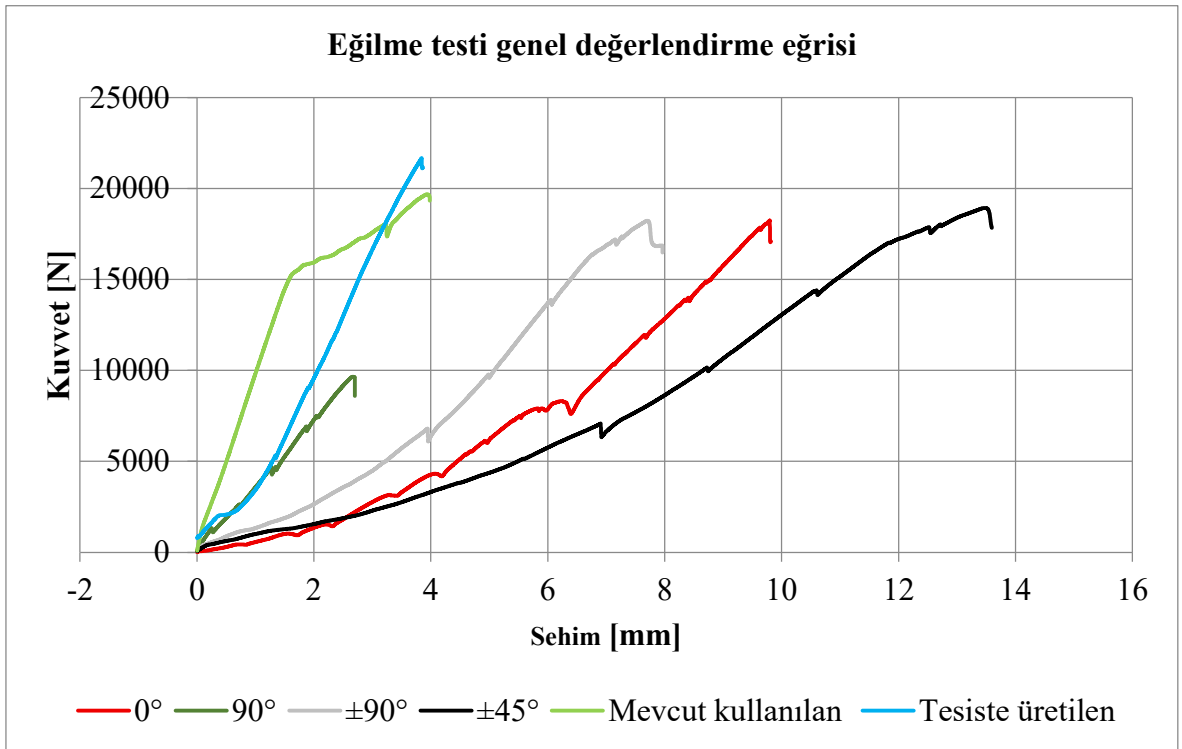
Tesiste üretilen numuneler	Sehim [mm]	Kuvvet (N)
Ortalama	3.34	20981.27

Tablo 3.14: Eğme testi genel değerlendirmesi

Tip	Ortalama Sehim (mm)	Standart Sapma (mm)	Ortalama Kuvvet (N)	Standart Sapma (N)	% Fark Kuvvet vs. Min.	% Fark Uzama vs. Min.
±90°	8,49	1,13	18080,27	1083,00	80,72	158,12
±45°	12,76	0,97	18424,23	445,00	84,16	287,80
0°	3,53	0,89	10004,53	1248,00	Referans (min.)	7,14
90°	9,74	0,92	17441,16	1316,00	74,33	196,16
Mevcut kullanılan izolatör	3,29	1,20	18701	4985,00	86,92	Referans (min.)
Kum katkılı tesiste üretilmiş izolatör	3,34	0,45	20981	918,00	109,72	1,51



Şekil 3.30: Eğilme testi genel değerlendirme grafiği



Şekil 3.31: Eğilme testi genel değerlendirme eğrisi

3.3 Elektriksel Testler

Uygulanan bu elektriksel testler, üretilen izolatörlerin yalıtım performanslarının endüstriyel gereklilikleri karşılayıp karşılamadığını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu sayede hem mekanik hem de elektriksel açıdan güvenilirlikleri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir.

3.3.1 Meger testi

Testin uygulanış sırası şu şekildedir:

1. Cihazı Hazırlama: Megger cihazı uygun test voltajına ayarlanır. Burada 5000 Volta ayarlanır.
2. Test Bağlantılarını Yapma:
 - Pozitif uç: Test edilecek kablonun veya sistemin bir ucuna bağlanır.
 - Negatif uç: Toprak veya diğer referans noktaya bağlanır.
3. Gerilim Uygulama: Cihazı çalıştırarak yüksek DC gerilimi uygulanır.
4. Ölçümü Yapma: İzolasyon direnci değerini okunur.
5. Yorumlama:
 - Yüksek değer ($M\Omega$ seviyesinde): İzolasyon iyi durumda.
 - Düşük değer ($k\Omega$ veya daha düşük): İzolasyonda kaçak veya bozulma var.



Şekil 3.32: Meger testi

Meger testi, izolatörlerin yalıtım direncinin ölçülmesi amacıyla uygulanmıştır. Test süreci, yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir. Ancak yapılan ölçümler sonucunda,

meger cihazı direnç değerini 10 TΩ'dan (10 teraohm) büyük olarak göstermiştir. Bu durum, cihazın ölçüm sınırlarının ötesinde bir değer olması nedeniyle kesin bir ölçüm yapılamadığını ortaya koymuştur. Bu sonuç, üretilen izolatörlerin reçine iç yapısında, yalıtım direncini düşürebilecek herhangi bir süreksizlik veya hava boşluğunun bulunmadığını ve izolasyon direncinin son derece yüksek olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, üretim kalitesinin yalıtım açısından başarılı olduğu söylenebilir. Ancak meger cihazının ölçüm limiti nedeniyle, üretilen farklı numuneler arasında karşılaştırılabilir bir veri elde edilememiştir. Bu nedenle, yalıtım performansının ayrıntılı karşılaştırılması için farklı yöntem veya cihazlara ihtiyaç duyulduğu değerlendirilmiştir.

3.3.2 Uygulanan gerilim testi



Şekil 3.33: 10 kV altındau uygulanan gerilim testi

Bölüm 2'de bahsedildiği gibi başarı kriteri olarak deney süresince flashover (yüzey arkı), puncture (delinme) veya ekipmanda aşırı akım tetikleyecek dielektrik kopuşu gözlenmemelidir. Uygulanan gerilim testi sayısal sonuç üretmektedir. Geçti veya kaldı şeklinde sonuç verir. Deney sonucu tüm numuneler uygulanan gerilim testinde başarıyla geçmiştir.

3.3.3 Kısmi deşarj testi

Bölüm 2'de bahsedildiği gibi testin sonuçlarının başarı kriteri şöyle özetlenebilir:

- 0-5 pC Çok iyi – yüksek kaliteli yalıtım

- 5-20 pC Uygun – çoğu IEC standardı için kabul edilir
- 20-50 pC Sınırdaki – dikkatli izlenmeli
- 50+ pC Riskli



Şekil 3.34: Kısmi deşarj test düzeneği

Tablo 3.15: Tüm tipler için kısmi deşarj sonuçları

Numune Tipi	Numune No	Uygulanan Gerilim	Kısmi Deşarj (pC)	Yorum
0°	1	Testi geçti	3	Başarılı
	2	Testi geçti	2-3	Başarılı
	3	Testi geçti	8-9	Başarılı
90°	1	Riskli	620-640	Yüksek deşarj
	2	Riskli	400-410	Yüksek deşarj
	3	Riskli	220-230	Yüksek deşarj
±90° tek yönlü (unidirectional)	1	Testi geçti	4	Başarılı
	2	Testi geçti	40-45	Kabul edilebilir
	3	Testi geçti	40-45	Kabul edilebilir
±45° fiber dizilimi	1	Testi geçti	2-3	Başarılı
	2	Testi geçti	2-3	Başarılı
	3	Testi geçti	1	Başarılı
Kum dolgu tesiste üretilen	1	Testi geçti	1	Başarılı
	2	Testi geçti	1-1,2	Başarılı
	3	Testi geçti	1-1,2	Başarılı
Kum dolgu mevcut kullanılan	1	Testi geçti	1	Başarılı
	2	Testi geçti	1-1,3	Başarılı
	3	Testi geçti	1-1,1	Başarılı

90° fiber dizilimi olan numuneler yüksek deşarj ölçümü nedeniyle inceleme altına alınmıştır. Karşılaşılan sonucun üretim hatası kaynaklı hava boşlukları olabileceği ihtimali üzerinde durulmuş ve üretim tekrarlanmasına karar kılınmıştır. Yeniden üretilen numunelerde yapılan

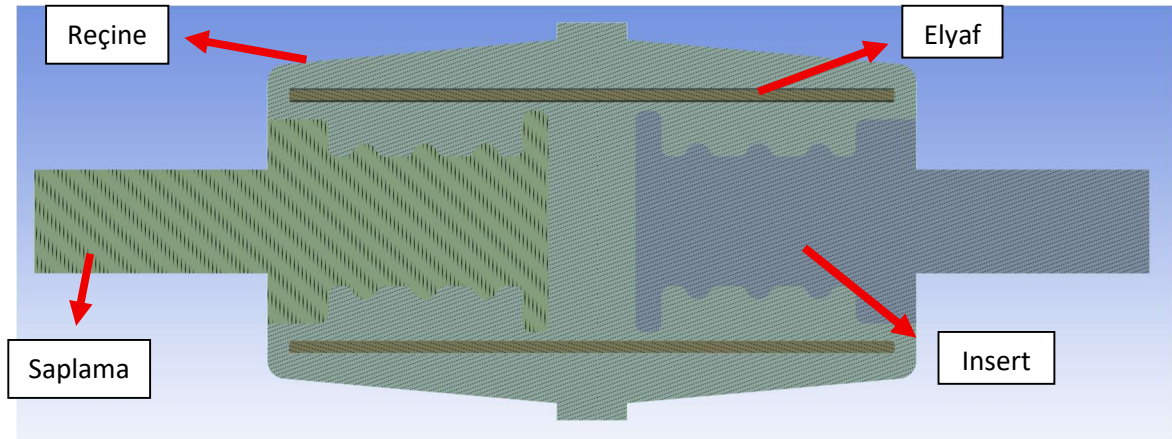
elektriksel testler neticesinde, önceki yüksek kısmi deşarj değerlerinin görölmediği, tüm numunelerin belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı ve testi başarıyla geğtiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yüksek deşarj değerlerinin, üretim sürecine bağlı geğici bir anomali olduğu anlaşılmış; tekrar üretim sonrası izolatörler istenilen dielektrik performansı göstermiştir.

Tablo 3.16: Çekme yönüne dik fiber dizilimi için tekrarlanan test sonuçları

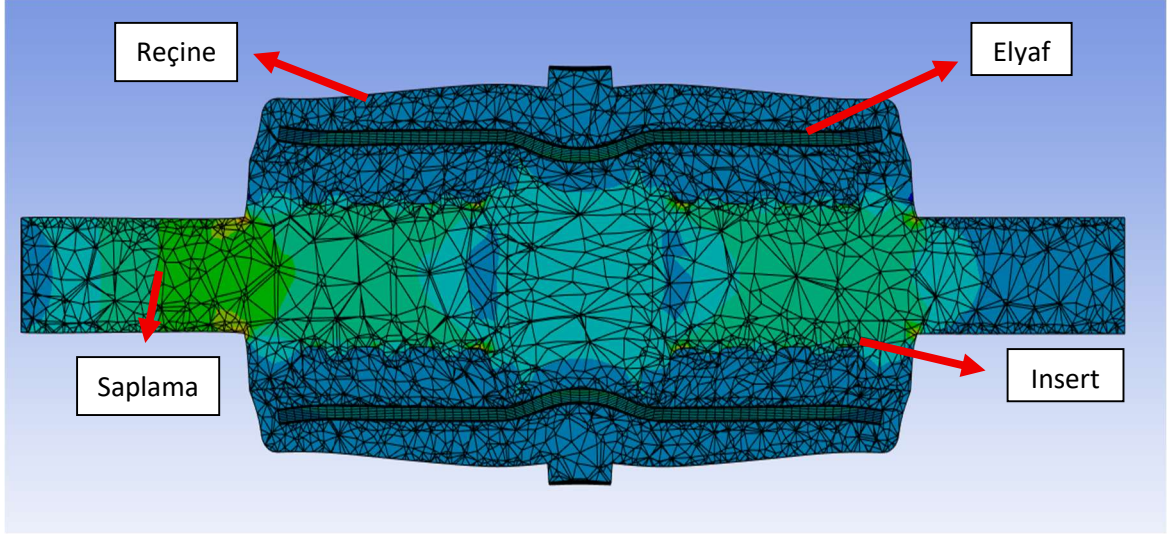
Çekme yönüne	1	Testi geçti	2	Başarılı
dik fiber	2	Testi geçti	2-3	Başarılı
dizilimi	3	Testi geçti	1	Başarılı

3.3 Çekme Gerilmesi Analizleri

Bu alt bölümde, farklı fiber yönlendirmelerine sahip numunelerin çekme yüklemesi altındaki gerilme dağılımları ve IRF temelli hasar göstergeleri sunulmaktadır, aksenal taşıma kapasitesi genel ve tabaka-bazında değerlendirilmiştir. 6 tur bindirme yapılarak sarım yapıldığı için her bir katman ayrı olarak paylaşılmıştır.



Şekil 3.35: Çekme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük öncesi)



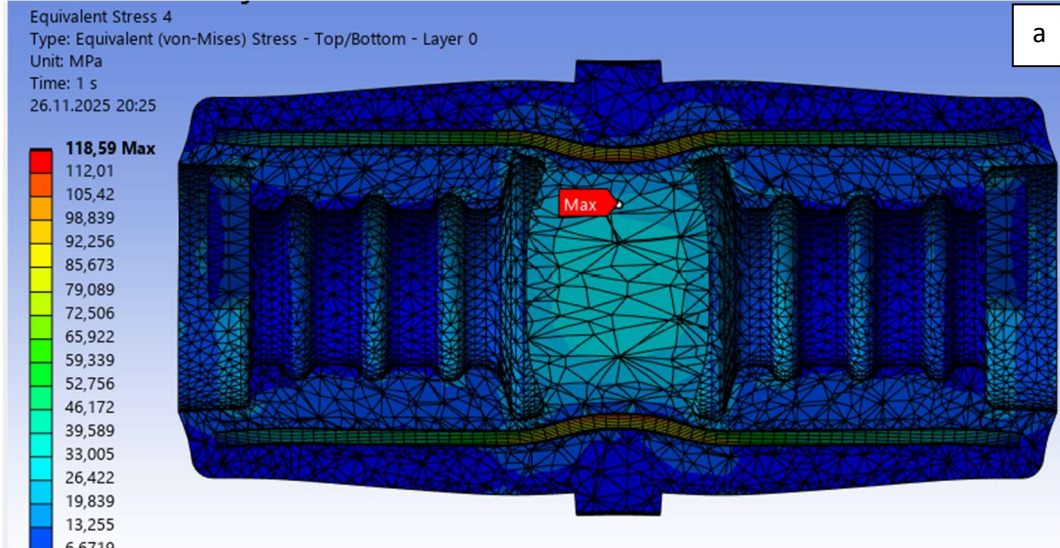
Şekil 3.36: Çekme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük sonrası)

3.3.1 0° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

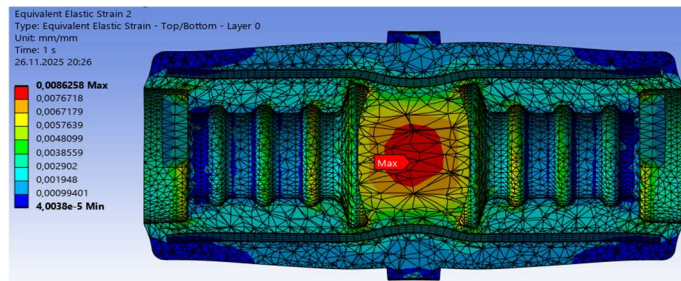
0° dizilimde lifler yük eksenine tam paralel olduğundan, aksenal yükün büyük kısmını lifler taşır ve numune yüksek rijitlik gösterir. Von Mises haritasında maksimum eşdeğer gerilmenin bel/şişkin geçişinde (kesit değişiminin olduğu bölgede) ~118–120 MPa düzeyinde yoğunlaştığı görülüyor; bu, geometrik daralma nedeniyle beklenen bir gerilme yığılmasıdır. Gövde boyunca alan ise görece homojen ve daha düşük seviyededir.

Fotoğraftaki hasar izi bu tabloyla uyumludur. Çatlak başlangıcı bel bölgesinde ve kırık, lif doğrultusunu izleyen uzunlamasına bir yarılmaya bir yarılmaya şeklinde ilerlemiştir. Bu tip 0° numunelerde tipik mekanizma; önce matris boyunca aksenal yarılmaya (lif demetleri arasında ayrılma/delaminasyon) ve akabinde lif demeti kopmalarıyla (lif gerilmesi hâkim) son kırılmadır. Yüzeydeki matris beyazlaması, bu mikroyapısal ayrılma/kademeli hasara işaret eder.

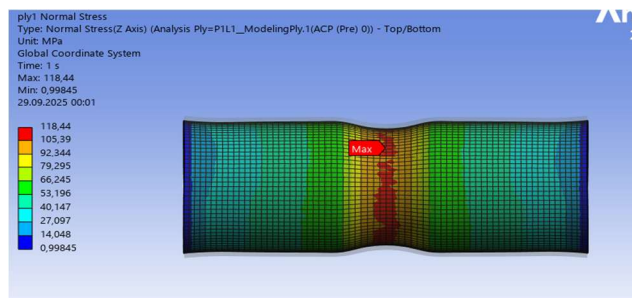
Özetle: analizdeki gerilme tepe bölgesi ile çatlak başlangıç konumu çakışmaktadır. Kırılma doğrultusu lif doğrultusunu takip etmektedir.



Şekil 3.37: 0° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.38: 0° için equivalent strain

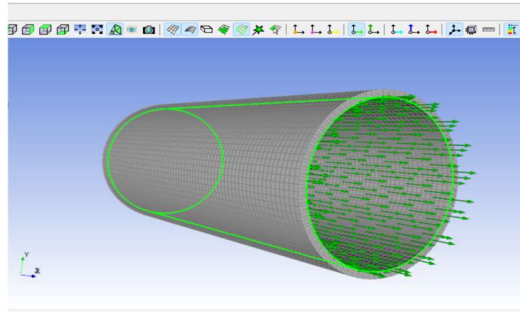


Şekil 3.39: 0° laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri

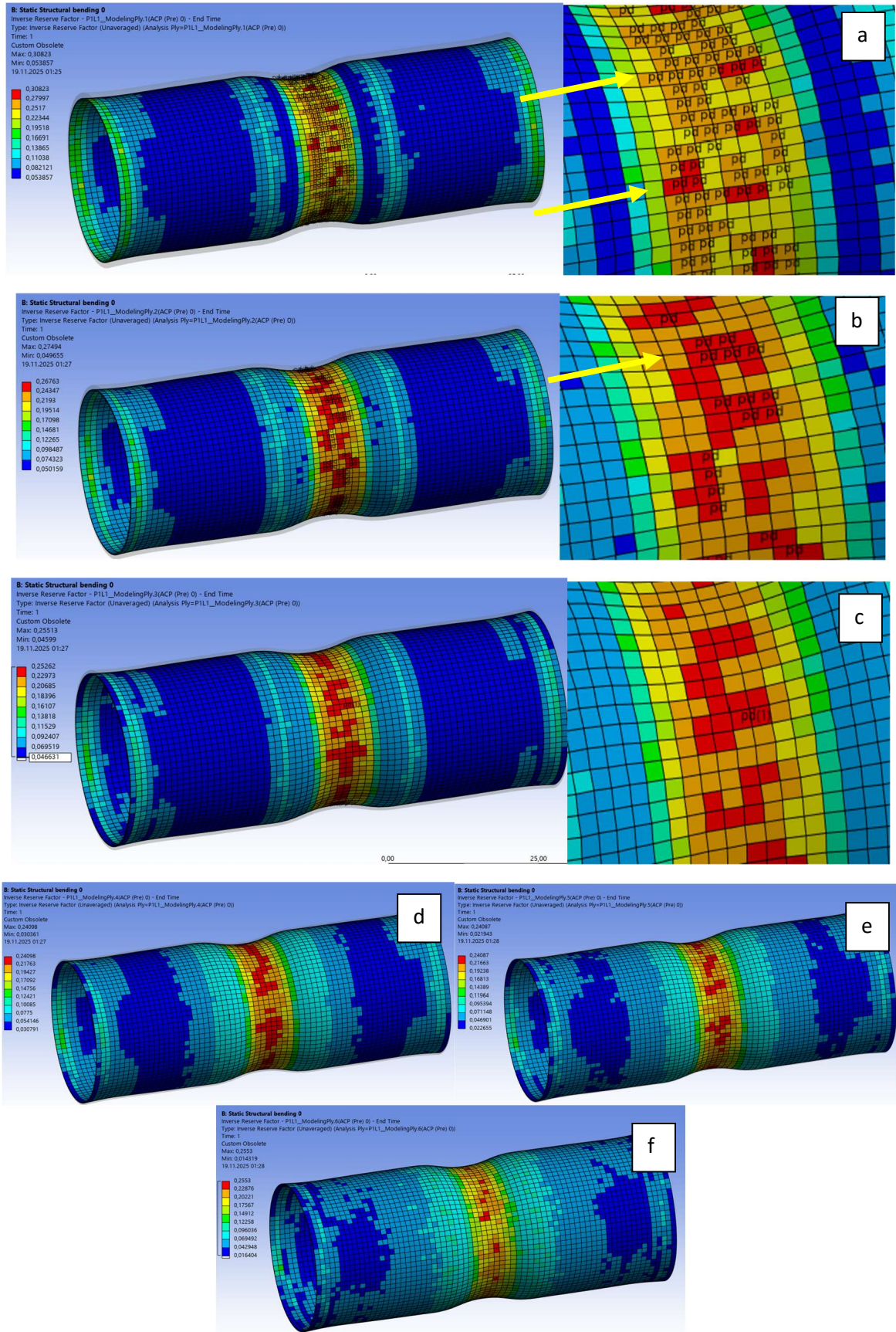
0° laminasyonda yükün büyük bölümü lif doğrultusunda taşınmış, en yüksek σ_1 ve IRF değerleri geometri geçişinin dış yüzeyinde yoğunlaşmıştır. Deneysel kırılma davranışı, hasarın önce matris çatlağı ile başladığını, ardından gelişen lif–matris ayrışması (debonding) ve delaminasyonlar nedeniyle yapı bütünlüğünün bozulduğunu ve nihai kırılmanın bu süreç sonunda gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Şekil 3.41’de görülen pd (delamination) buralarda fiberlerin delaminasyona uğradığını göstermektedir. Şekil 3.39’da görülen katman 1 (PLY1) gerilmesidir. Diğer katmanlar aşağıdaki Tablo 3.17’ de verilmiştir.

Tablo 3.17: 0° laminasyon için gerilme IRF değerleri

	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1	118,59	0,31
Ply2	108,57	0,27
Ply3	101,16	0,26
Ply4	94,42	0,24
Ply5	90,86	0,24
Ply6	98,29	0,26
Ortalama	101,98	0,26



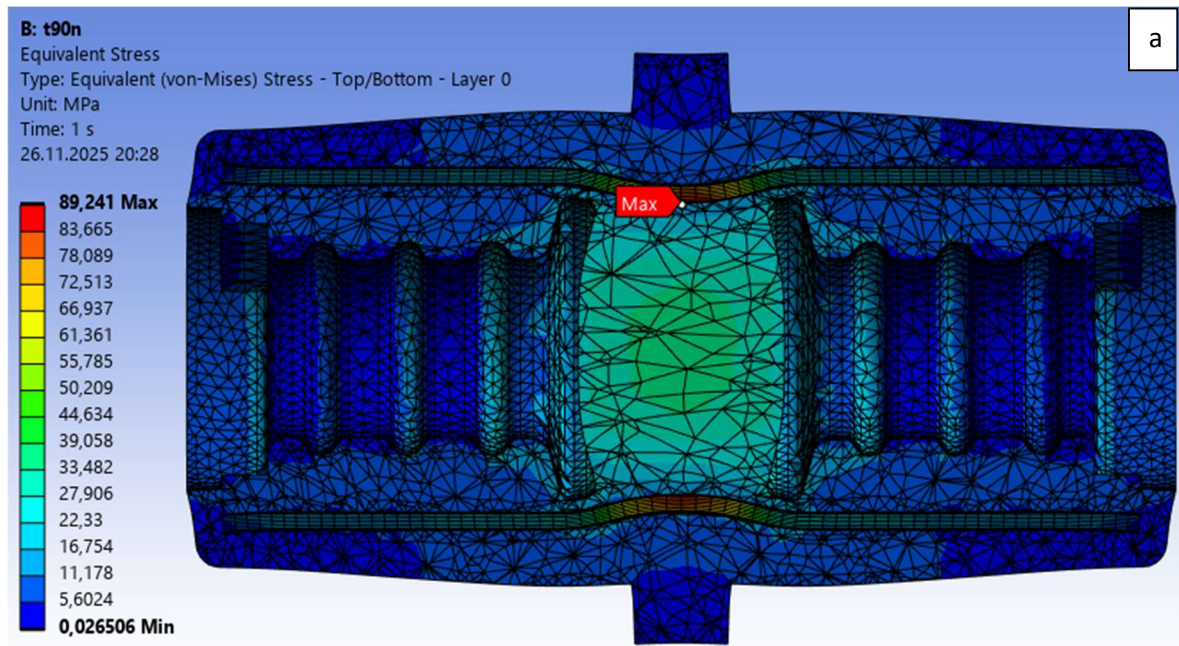
Şekil 3.40: 0° için fiber yönelimi gösterimi



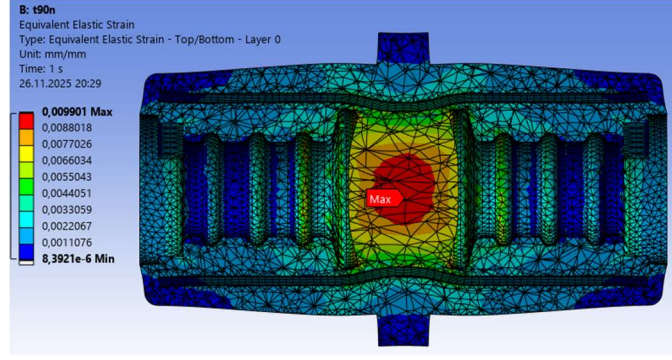
Şekil 3.41: 0° için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6

3.3.2 90° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

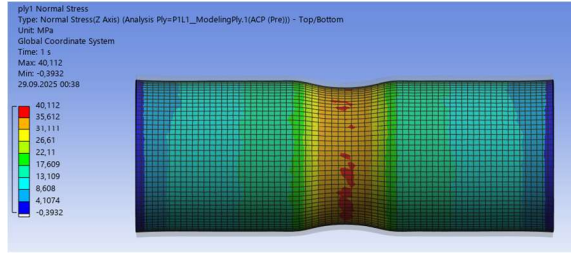
90° laminasyonlu izolatörlerde çekme yüklemesi altında eşdeğer (von Mises) gerilmelerin, laminasyonun başladığı/sona erdiği bel radyüsü çevresinde yoğunlaştığı belirlenmiştir. Eşdeğer elastik şekil değiştirme dağılımlarının aynı bölgede tepe yaptığı gözlenmiş; böylelikle ilk hasarın söz konusu omuz bölgelerinde başlatılacağı öngörülmüştür. Bu laminasyonda liflerin aksenal yüke enine konumlanması nedeniyle yükün esasen matris ve lif-matris ara yüzü tarafından taşındığı, geometri süreksizliğine bağlı olarak matris çekme-kesme gerilmelerinin yükseldiği ve ara yüzde mikro-çatlaklar ile lif ayrılması oluşumlarının tetiklendiği anlaşılmıştır. Hasarın ilerlemesiyle bu mikro-çatlakların çevresel doğrultuda birleştiği ve kırılmanın izolatörü çepeçevre dolaşan bir hat boyunca geliştiği, numune fotoğraflarında görülen halka biçimli kırık izi ve “buzlanma” dokusu ile teyit edilmiştir. Model sonuçları ile gözlemler arasında konum ve hasar biçimi bakımından uyum saptanmıştır.



Şekil 3.42: 90° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.43: 90° için equivalent strain

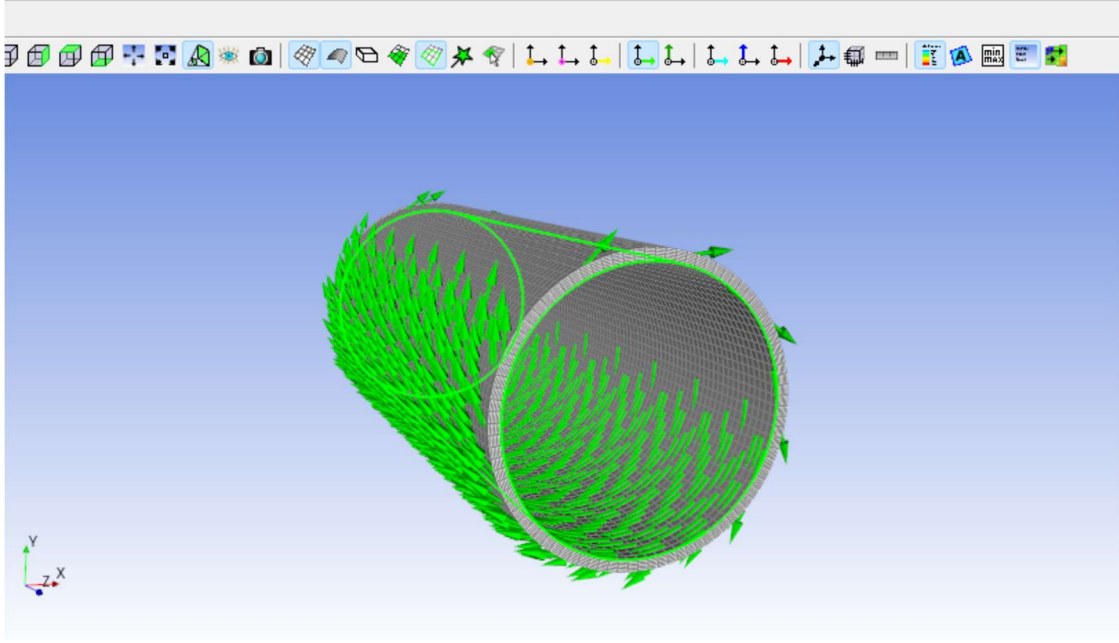


Şekil 3.44: 90° laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri

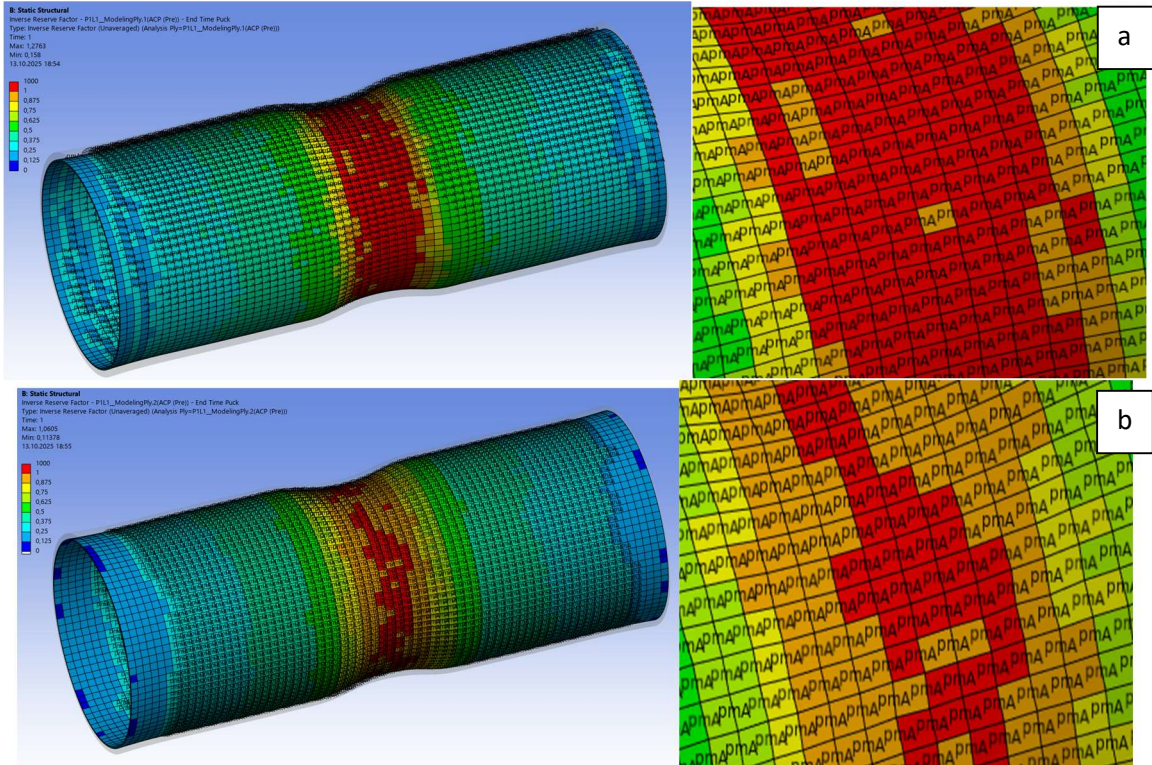
90° laminasyonlu numunede, Puck-IRF konturları bel bölgesinin dış yüzeyinde $IRF > 1$ (ply1: 1.27, ply2: 1.06) göstererek hasarın başladığını ortaya koymuştur. Puck modelinde görülen p_{mA} işareti, hasarın matriste çekme hasarı olduğunu belirtir; yani yük altında matris çekme gerilmesi kritik olup lif-matris ayrışması (debonding) ve delaminasyonun tetiklenmesiyle hasar ilerler. Ayrıca lifler üzerindeki X yönü normal gerilmenin (σ_1) ortalama ≈ 30 MPa düzeyinde ve diğer laminasyon tiplerine kıyasla daha düşük kalması, liflerin yük taşımadaki katkısının sınırlı ve görece az olduğunu göstermektedir. İç katmanlarda $IRF < 1$ kalsa da (ply3-ply5), yerel yığılmalar nedeniyle ply6'da IRF yeniden yükselmektedir. Bu bulgular, 90° tabakalarda yük taşımanın matris/ara-yüz tarafından sınırlandırıldığını ve kırılmanın gevrek karakterde sonlandığını göstermektedir. Şekil 3.44'te görülen PLY1 gerilmesidir. Diğer katmanlar aşağıdaki Tablo 3.18' de verilmiştir.

Tablo 3.18: 90° laminasyon için gerilme IRF değerleri

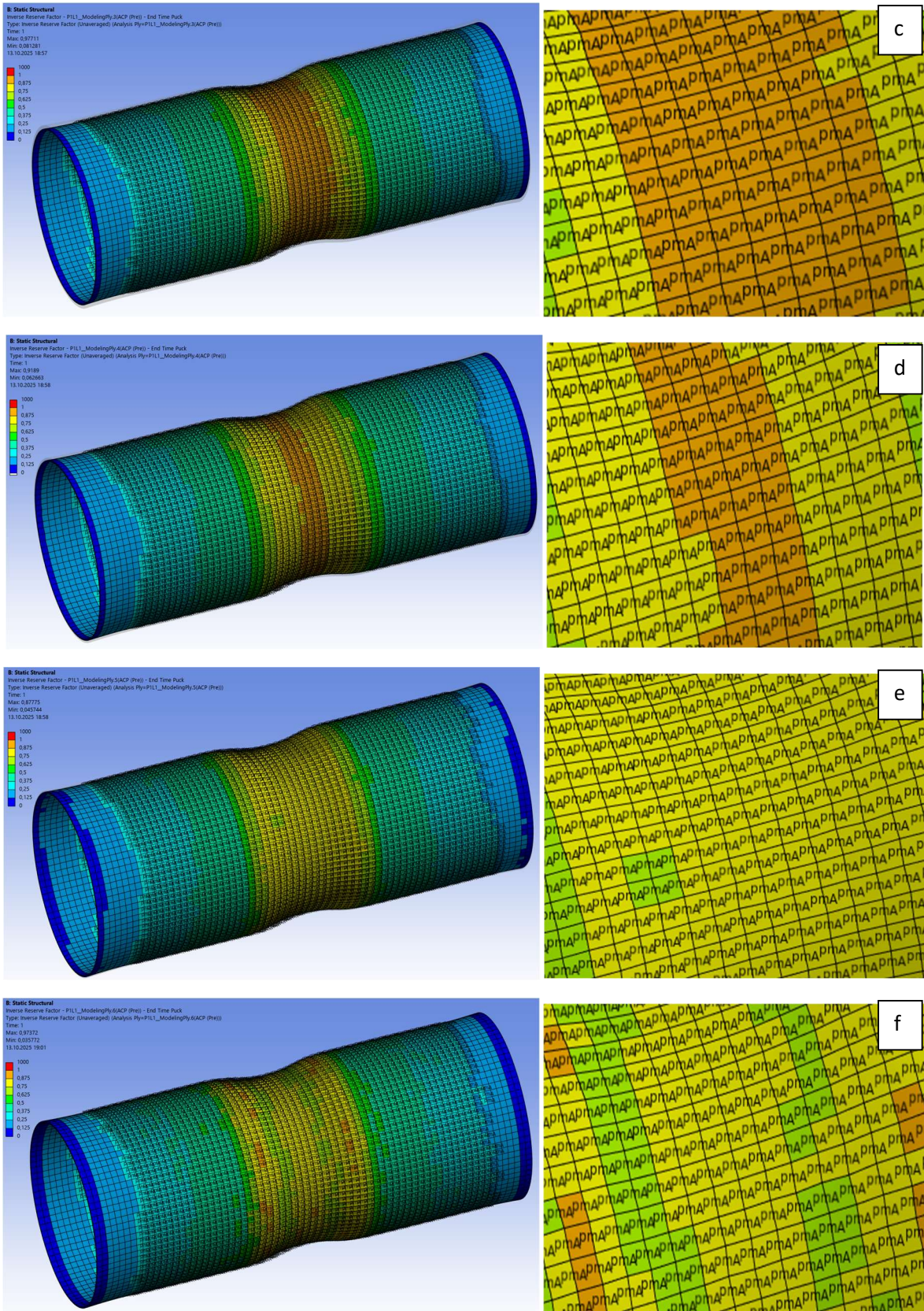
	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1	40,11	1,27
Ply2	36,36	1,06
Ply3	34,03	0,97
Ply4	32,05	0,92
Ply5	30,36	0,88
Ply6	30,30	0,97
Ortalama	33,87	1,01



Şekil 3.45: 90° için fiber yönelimi gösterimi



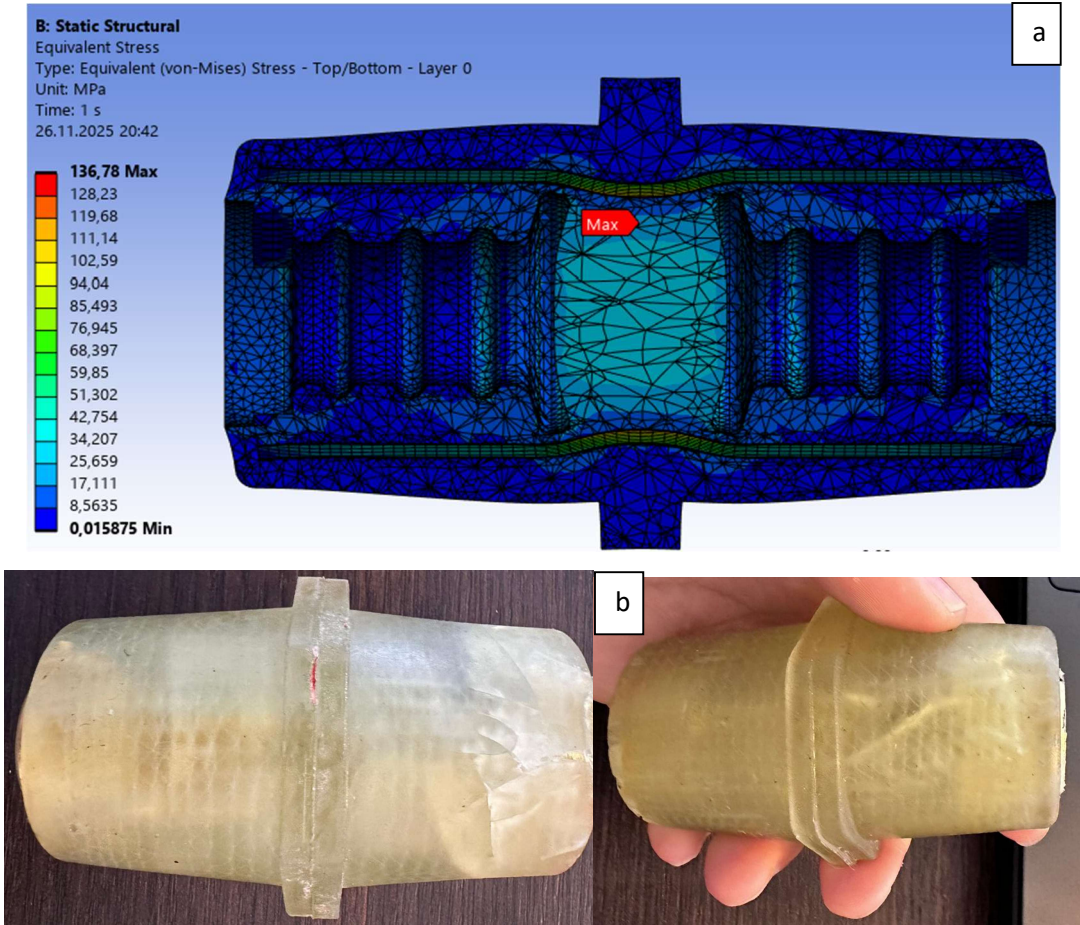
Şekil 3.46: 90° için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6



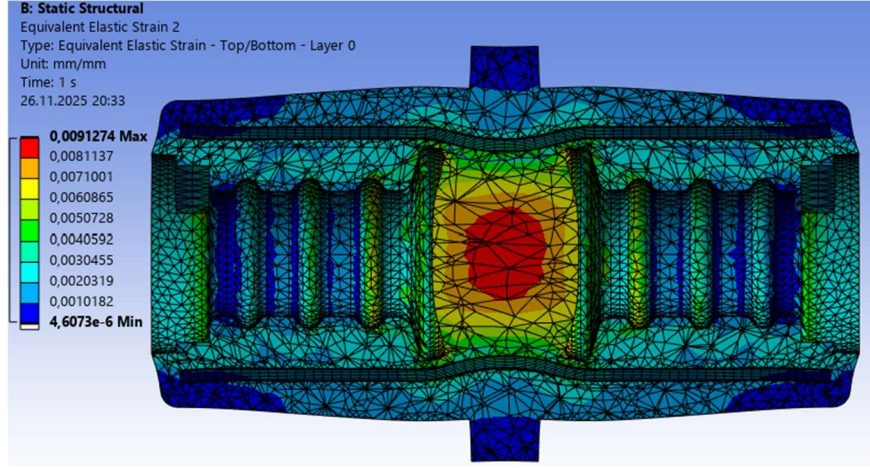
Şekil 3.46(devam)

3.3.3 $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

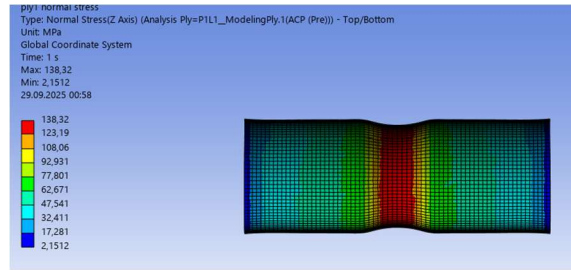
$\pm 90^\circ$ dizilimde lifler yük eksenine hem dik hem de kısmi paralel bileşenler içerdiğinden, lif demetlerinin bir kısmı aksenal yükü doğrudan taşıırken diğer kısmı sınırlı katkı sunmaktadır. Von Mises eşdeğer gerilme dağılımı, gövde bel/radyüs geçişlerinde ve insert çevresindeki yerel geometrik süreksizliklerde belirgin gerilme yığılmalarına işaret etmektedir. Çekme altında kesitte daralma gelişmiş; göbek bölgesinde liflerin uzamaya zorlanmasıyla lif çevresinde en yüksek gerilme düzeyi yaklaşık 130 MPa olarak okunmuştur. Bu tepe değer, lif hattı boyunca uçlara ilerledikçe sönümlenmekte; eşzamanlı olarak insert çap geçişlerinde biriken yığılmalarla birleşerek düzenli olmayan ara yüz ayrılmalarını ve yerel delaminasyonları tetiklemektedir. Numune fotoğrafları da bu tabloyu desteklemekte; çap geçişi hizasında çevresel “buzlanma” görünümüyle birlikte, 0° numunelerinde gözlenen düzlemsel çatlaklara benzer kırık yüzeyleri rapor edilmiştir. Sonuç olarak, $\pm 90^\circ$ numunelerde hasarı başlatan baskın mekanizmanın matris çekmesi ve lif–matris ara yüz ayrılması olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3.47: $\pm 90^\circ$ için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.48: $\pm 90^\circ$ için eşdeğer gerinim

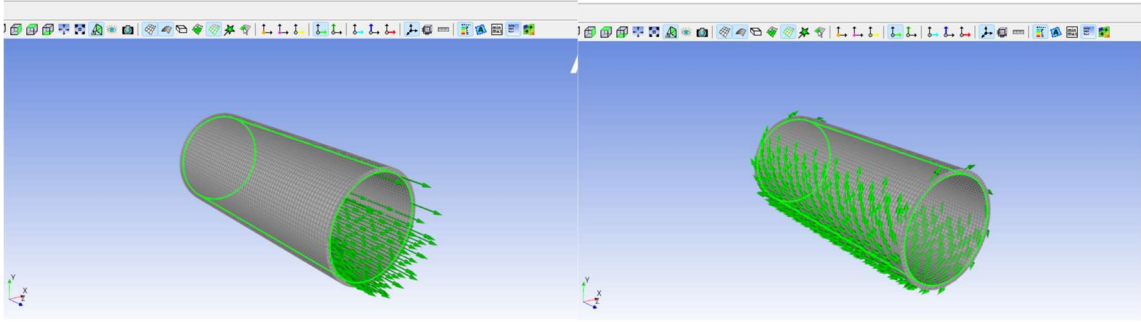


Şekil 3.49: $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri

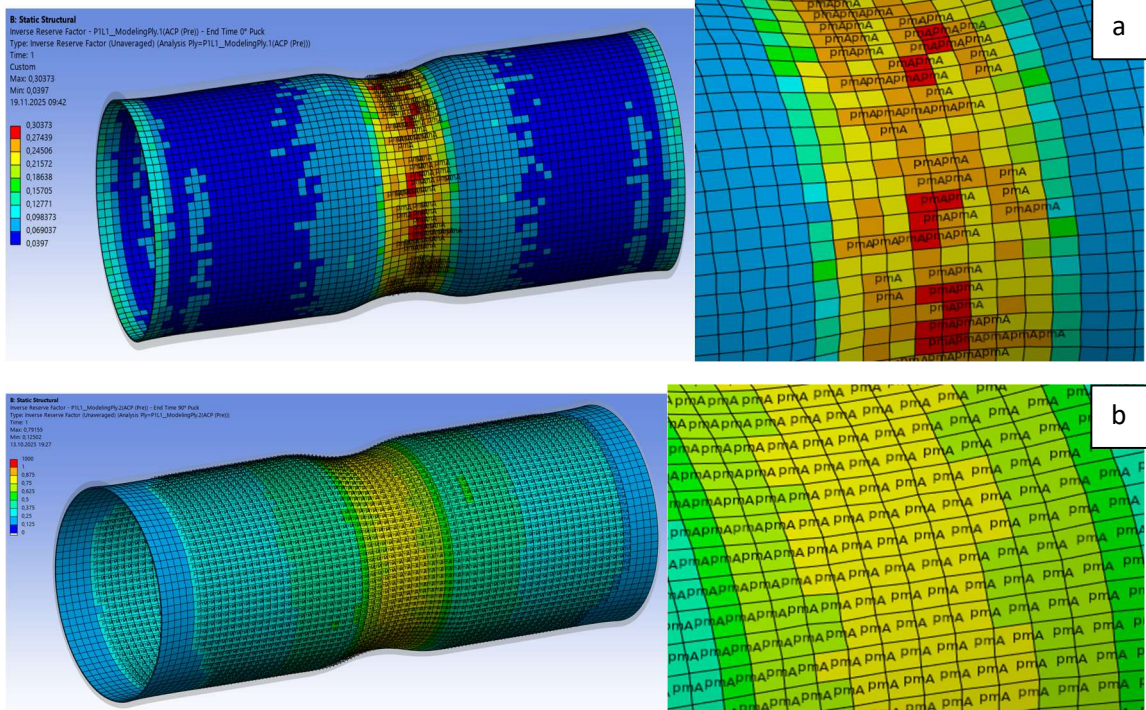
Bel bölgesinin dış yüzeyinde IRF yoğunlaşmakla birlikte tabaka bazında IRF değerleri 0,20–0,79 aralığında kalmıştır (ply1: 0,30, ply2: 0,79, ply3: 0,23, ply4: 0,68, ply5: 0,20, ply6: 0,78; ortalama IRF \approx 0,50). Bu, mevcut yük düzeyinde ilk hasar eşiğinin (IRF=1) altında olduğunu, ancak ply2/ply4/ply6’da emniyet payının dış yüzeye kıyasla daha düşük olduğunu göstermektedir. Tabaka-normal gerilmeler (σ_2) dıştan içe $\sim 138 \rightarrow 24$ MPa azalmaktadır (ply1: 138 MPa, ply3: 120 MPa, ply5: 109 MPa). Genel ilke olarak çekme yüküyle aynı yöndeki fiberler yükü taşıırken, çekme yönüne dik kalan fiberler yük taşımaya sınırlı katkı verir; bu da çekme yönündeki normal gerilmelerin yüksek olduğu tabakalarda yükün fiber tarafından taşındığını, gerilmenin düşük kaldığı tabakalarda ise yükün fiber tarafından taşınmadığını göstermektedir. Haritalarda görülen pmA işareti, hasar modunun matriste çekme hasarı olduğunu doğrular; olası ilerleme matris çatlağı, lif–matris ayrışması (debonding), yerel delaminasyon şeklindedir. Bu bulgular, $\pm 90^\circ$ tabakalarda taşımanın matris/ara-yüz tarafından sınırlandırıldığını ve kırılmanın deneyde gevrek karakterde sonlanacağına işaret etmektedir. Şekil 3.49’ de görülen PLY1 gerilmesidir. Diğer katmanlar aşağıdaki Tablo 3.19’ de verilmiştir.

Tablo 3.19: $\pm 90^\circ$ laminasyon için gerilme IRF değerleri

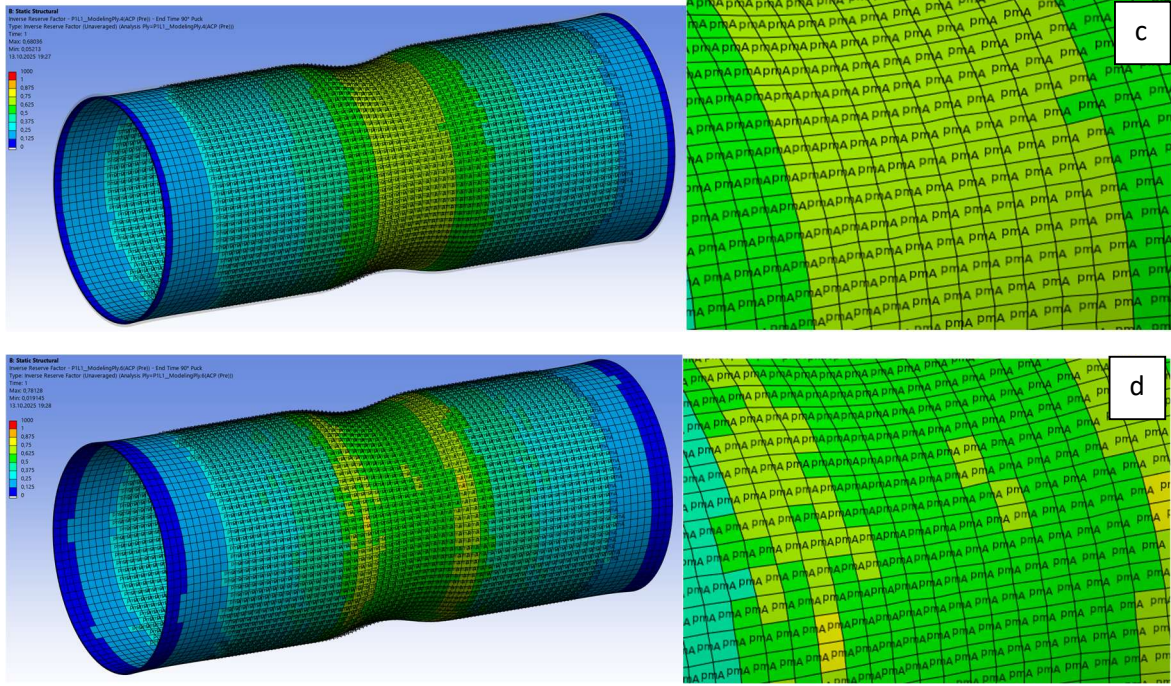
	Normal Gerilme (Mpa)	IRF
Ply1	138,32	0,30
Ply2	27,368	0,79
Ply3	120,27	0,23
Ply4	23,720	0,68
Ply5	108,85	0,20
Ply6	24,056	0,78
Ortalama	73,76	0,50



Şekil 3.50: $\pm 90^\circ$ için fiber yönelimi gösterimi



Şekil 3.51: $\pm 90^\circ$ için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 4, d) Katman 6



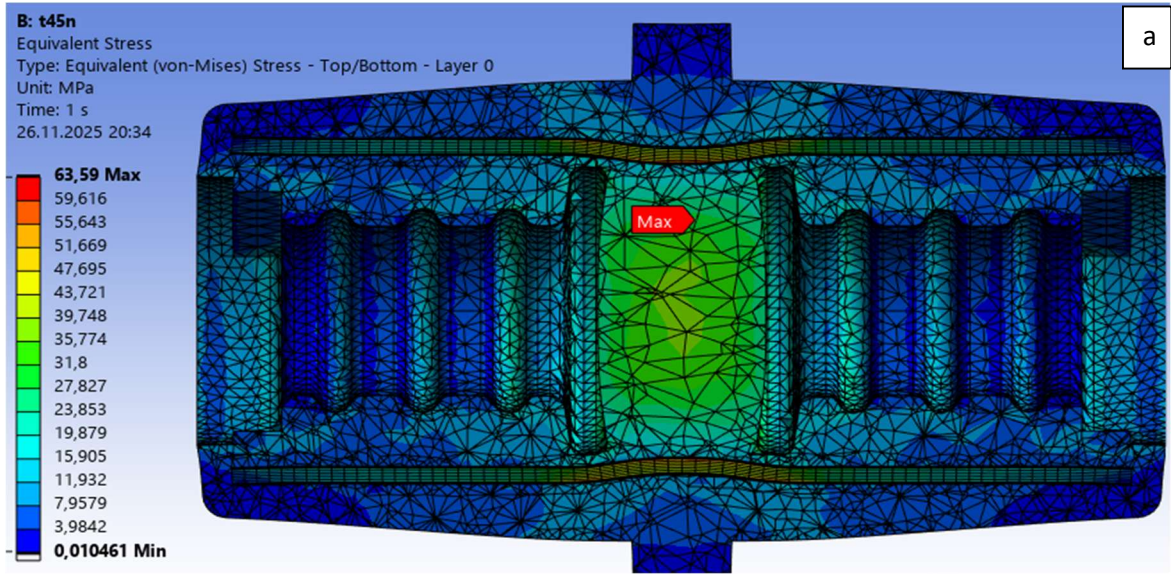
Şekil 3.51(devam)

3.3.4 $\pm 45^\circ$ Laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

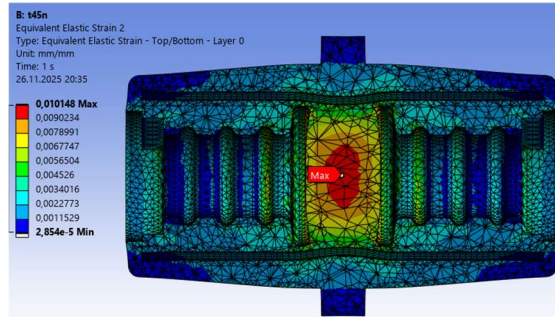
$\pm 45^\circ$ lif dizilimli izolatörde eşdeğer (von Mises) gerilmelerin gövdenin bel/radyüs bölgesinde tepe yaptığı, kesit ortasına doğru düzgün bir gradyanla azaldığı görülmektedir (≈ 63.6 MPa). Aksiyel çekmenin $\pm 45^\circ$ laminasyonda esas olarak düzlem-içi kaymaya dönüştüğü ve yük aktarımının bel geçişlerinde yoğun interlaminar kesme ile ilerlediği düşünülmektedir.

Numune fotoğrafı bel çevresinde eğik/şerit halinde beyazlama (matris çatlakları) ve tabakalar arası ayrılma göstermektedir; bu desen, $\pm 45^\circ$ laminasyonların kayma deformasyonu altında ilerleyen matris kesmesi ve yerel lif ayrılması mekanizmasını işaret eder. Hasar, önce bel-fillet bölgesindeki tabakalar arası kayma tepeliklerinde başlamakta, ardından tabaka-arası düzlemler boyunca 45° doğrultulu eğik bir kırık düzlemi geliştirerek gövde üst kesite doğru ilerlemektedir. Bu ilerleme biçimi, 0° laminasyonlu numunelerdeki lif doğrultusunda gevrek kopmadan ve 90° laminasyonlardaki belirgin enine ayrılmadan farklı olarak kademeli ve enerji soğuran bir hasar evrimine karşılık gelir.

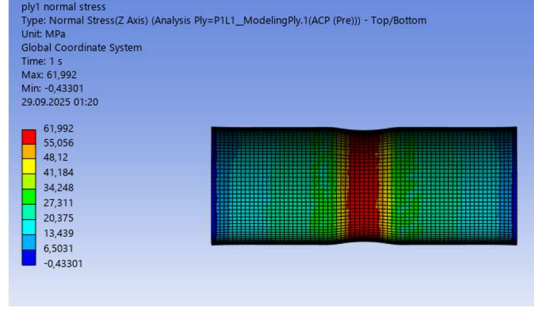
Sonuç olarak, $\pm 45^\circ$ düzeni aksiyal çekmede daha düşük eksenel rijitlik sunsa da yükün kaymaya çevrilmesi sayesinde daha yaygın şekil değiştirme gözlemlenir; kırık fotoğrafındaki eğik/beyazlamış zonlarla sayısal alanların çakışması, bu mekanizmanın deneysel kanıtıdır.



Şekil 3.52: $\pm 45^\circ$ için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.53: $\pm 45^\circ$ için eşdeğer gerinim



Şekil 3.54: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numunelerin çekme analizi sonucu normal gerilmeleri Şekil 3.54’ te görülen PLY1 gerilmesidir. Diğer katmanlar aşağıdaki Tablo 3.20’ de verilmiştir.

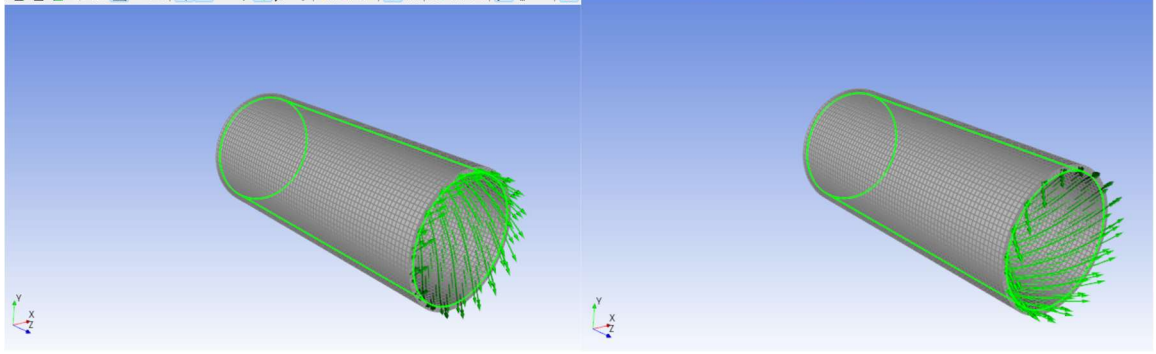
Tablo 3.20: $\pm 45^\circ$ laminasyon için gerilme IRF değerleri

	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1	61,99	0,70
Ply2	56,63	0,55
Ply3	51,99	0,51
Ply4	48,93	0,47
Ply5	48,66	0,45
Ply6	52,71	0,57
Ortalama	53,486	0,54

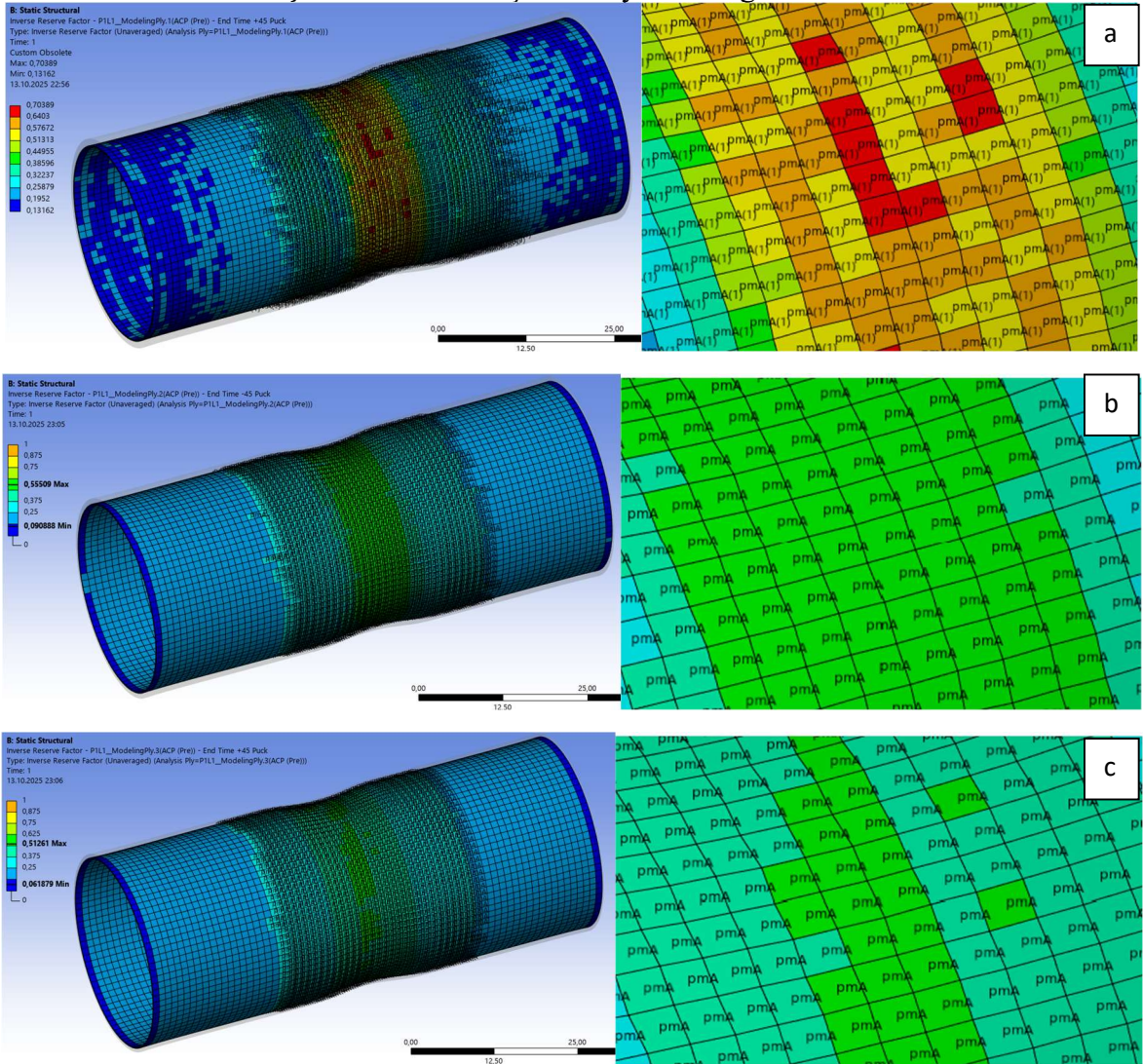
$\pm 45^\circ$ laminasyonlu numunelerde Puck–IRF değerleri tabakalar arasında 0,45–0,70 aralığında olup en kritik tabaka ply1 = 0,70, ortalama IRF \approx 0,54’tür. Tabaka-normal gerilmeleri (σ_2) dıştan içe $\sim 62 \rightarrow 49$ MPa seviyesinde kademeli azalış göstermekte ve tepe değerler bel bölgesindeki geometri geçişinde yoğunlaşmaktadır. Konturlarda görülen pmA işaretleri, hasarın matriste çekme hasarı modunda başladığını; kayma ile etkileşerek lif–matris ayrışması (debonding) ve yerel delaminasyon oluşturduğunu göstermektedir. $\pm 45^\circ$ düzeninde yük aktarımı ağırlıklı olarak düzlem içi kayma (τ_{12}) üzerinden gerçekleştiğinden, nihai dayanım matris/ara-yüz özellikleriyle sınırlandırılmaktadır. Mevcut yük düzeyinde IRF<1 olduğundan ilk hasar eşiğine henüz ulaşılmamıştır; ancak dış yüzeye yakın tabakalar (özellikle ply1) ve bel bölgesi, ilerleyen yüklerde hasarın başlayacağı kritik bölgeler olarak öne çıkmaktadır.

$\pm 45^\circ$ laminasyonlarda, aksel çekme yükü tabaka yerel eksenine 45° dönmüş olduğundan klasik dönüşüm ilişkilerine göre $\tau_{12} = \frac{\sigma_x}{2}$ büyüklüğünde düzlem içi kayma gerilmesi oluşur; bu nedenle yük aktarımı ağırlıklı olarak kayma üzerinden gerçekleşir. Bu kuramsal beklenti, Puck–pmA (matrix tension failure) işaretleri ve IRF \approx 0.45–0.70 aralığındaki bulgularımızla

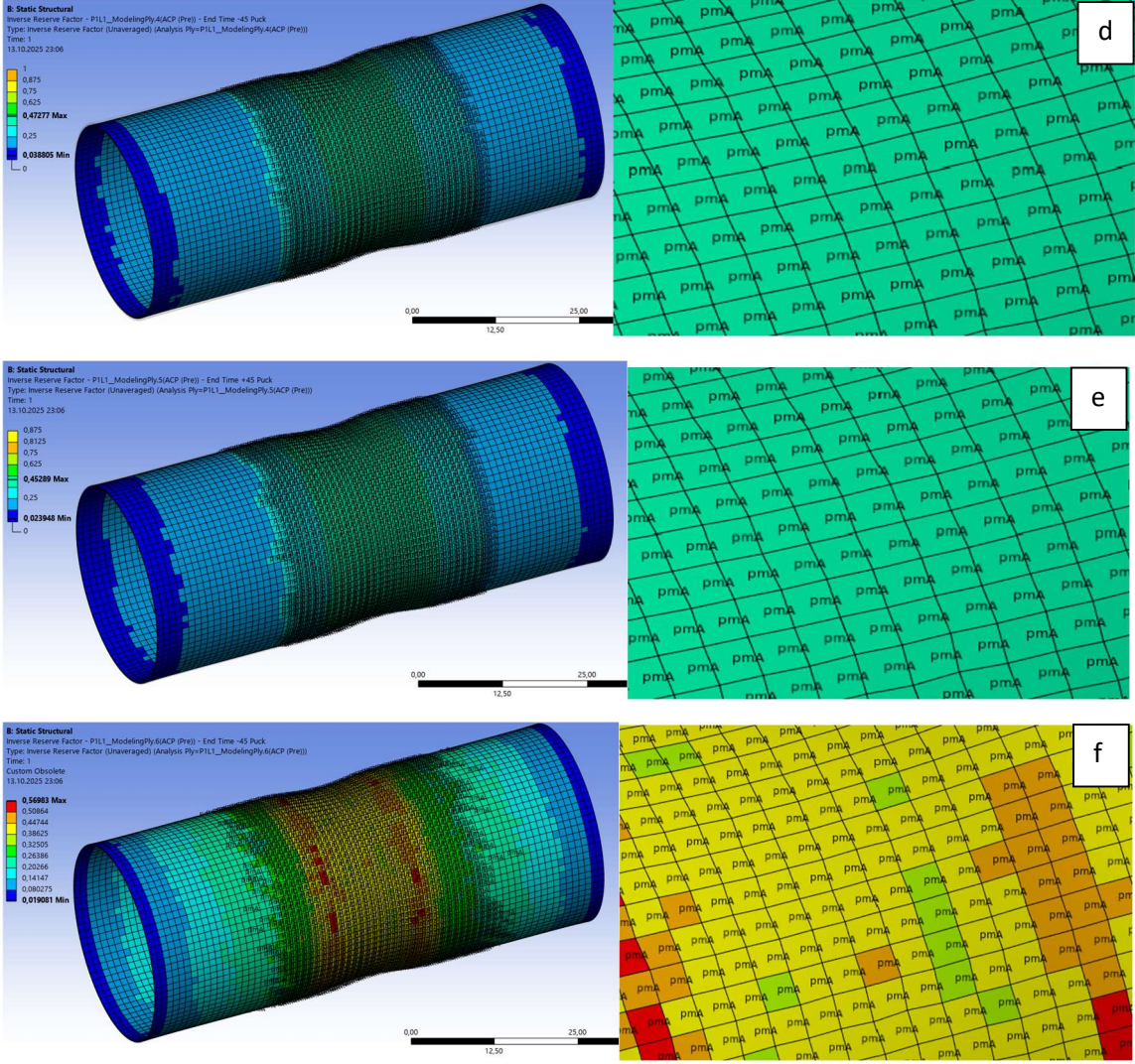
uyumlu olup, hasarın matris çekme/kayma etkileşimi ile başlayıp lif-matris ayrışması ve yerel delaminasyon olarak ilerlediğini göstermektedir.



Şekil 3.55: $\pm 45^\circ$ için fiber yönelimi gösterimi

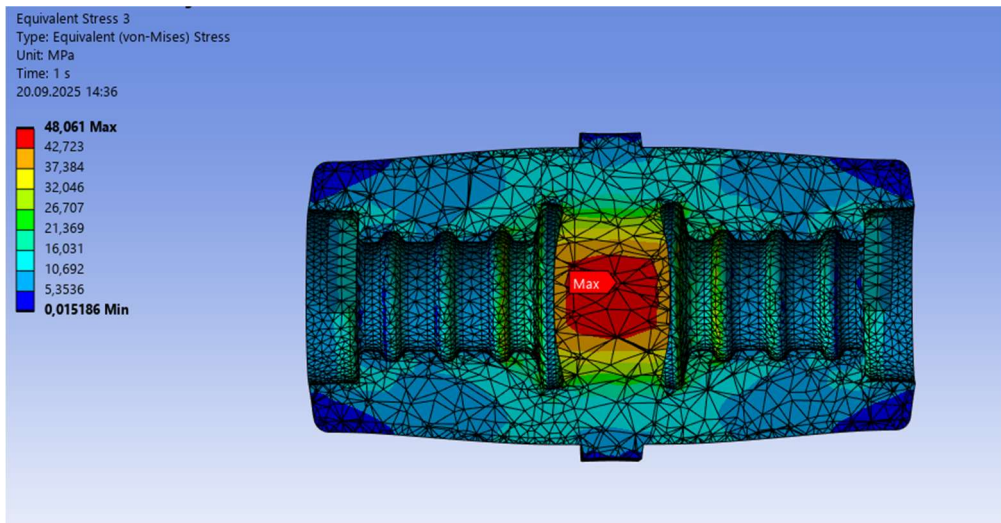


Şekil 3.56: $\pm 45^\circ$ için çekme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6



Şekil 3.56(devam)

3.3.5 Kum dolgulu fabrikada üretilen numunelerin analiz sonucu

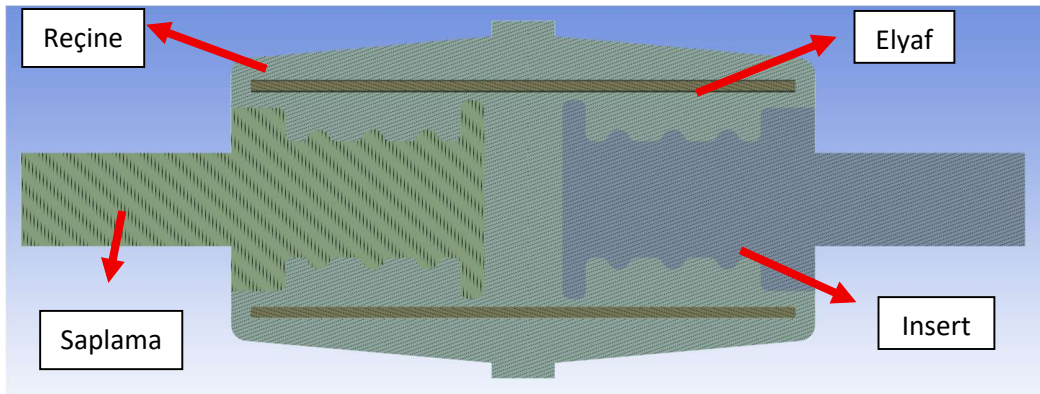


Şekil 3.57: Reçine dolgusu ile üretilen numune çekme analiz sonucu

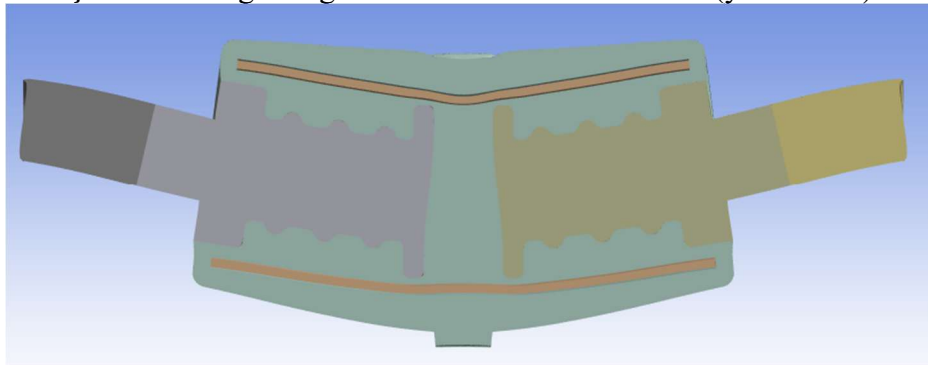
Lif içermeyen izolator gövdesi izotropik kabul edilerek von Mises eşdeğer gerilmesi ve maksimum asal gerilme esas alınmıştır. Statik yükleme altında elde edilen von Mises haritası, gerilme yığılmasının geometri daralmasının bulunduğu bel bölgesinde yoğunlaştığını ve bu bölgede tepe gerilmenin ≈ 48 MPa olduğunu göstermektedir. Yiv/omuz köşeleri ve küçük radyüsler boyunca ikincil yığılmalar izlenmekle birlikte, kritik zon bel geçişinin çekme tarafındaki dış yüzeyidir. Malzeme lif içermediği için yük belirli bir doğrultuda değil, matraste homojen dağılır; dolayısıyla hasar başlangıcı fiber-kaynaklı kriterlerle değil σ_{max} ve von Mises değerlerinin lokal maksimumlarıyla belirlenir. Kırılma davranışı gevrek olup çentik ve radyüs büyüklüğü gerilme tepe değerlerini doğrudan etkiler. Bu nedenle çalışmanın başlangıcında insert yapısında iyileştirmeler yapıp tasarımda radyüs iyileştirmesi, keskin köşelerin yumuşatılması yapılmıştır. Bu yaklaşım, lif takviyesi olmayan izolatorlarda yapısal performansın esasen geometri kaynaklı gerilme yığılmaları tarafından belirlendiğini açıkça ortaya koymaktadır.

3.4 Eğilme Gerilmesi Analizleri

Bu alt bölümde, farklı fiber yönlendirmelerine sahip numunelerin eğilme yüklemesi altındaki gerilme dağılımları ve IRF temelli hasar göstergeleri sunulmaktadır. Oluşan kritik bölgeler genel ve tabaka bazında değerlendirilmiştir.



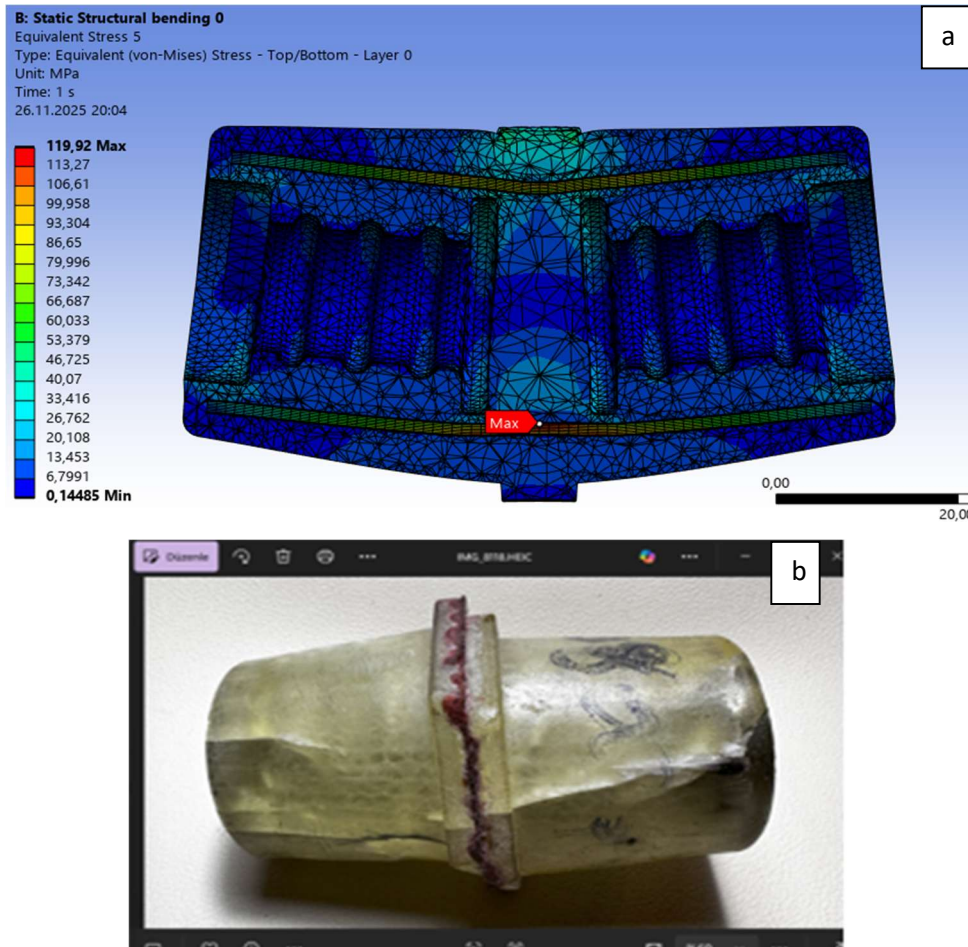
Şekil 3.58: Eğilme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük öncesi)



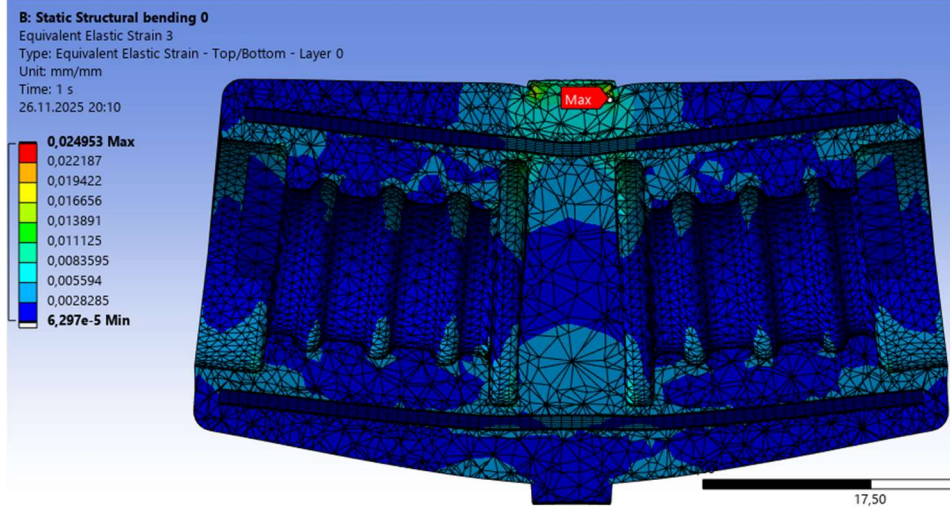
Şekil 3.59: Eğilme gerilmesi analizi modeli kesiti (yük sonrası)

3.4.1 0° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

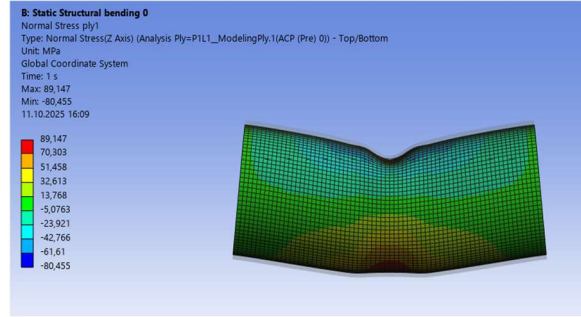
0° laminasyonda eğilme gerilmesi altında Von Mises eşdeğer gerilme haritasında en yüksek değerler (≈ 120 MPa mertebesi) bel/radyüs geçişine komşu, çekme tarafındaki iç fillette toplanmaktadır; bu bölge, geometrik süreksizlik ve kesit modülünün azalması nedeniyle birincil gerilme yığılması noktasıdır. Eşdeğer elastik şekil değiştirme dağılımı ise karşı yüzeyde tepe yapmakta, böylece çekme–bası asimetrisinin tipik eğilme profili doğrulanmaktadır. Kırık yüzey fotoğrafında gözlenen boyuna yönelimli lif ayrılmaları ve bel çevresinden başlayan çatlak izi, sayısal olarak öngörülen bu iki odakla tutarlıdır: önce çekme (alt) tarafında matris çatlağı ve yerel ayrılmalar başlamakta, lif doğrultusundaki boyuna yarılmalar ile çatlak eksen boyunca ilerlemektedir. Liflerde artan gerilmeler doğrultusunda da matris hasara uğramakta ve fiberler dizim yönü olan 0° yönünde ayrılmaktadır. Özetle 0° dizilim, eğilmeye lif-baskın bir taşıma sergilemekte; hasar başlatan mekanizma çekme tarafındaki matris çatlağı–arayüz ayrılması olup, ilerleyen safhada lif boyunca boyuna yarıma ve bel geçişinde şekil değiştirmenin birikmesiyle karışık modlu kırılmaya dönüşmektedir.



Şekil 3.60: 0° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.61: 0° için eşdeğer gerinim



Şekil 3.62: 0° laminasyonlu numunelerin eğilme analizi sonucu normal gerilmeleri

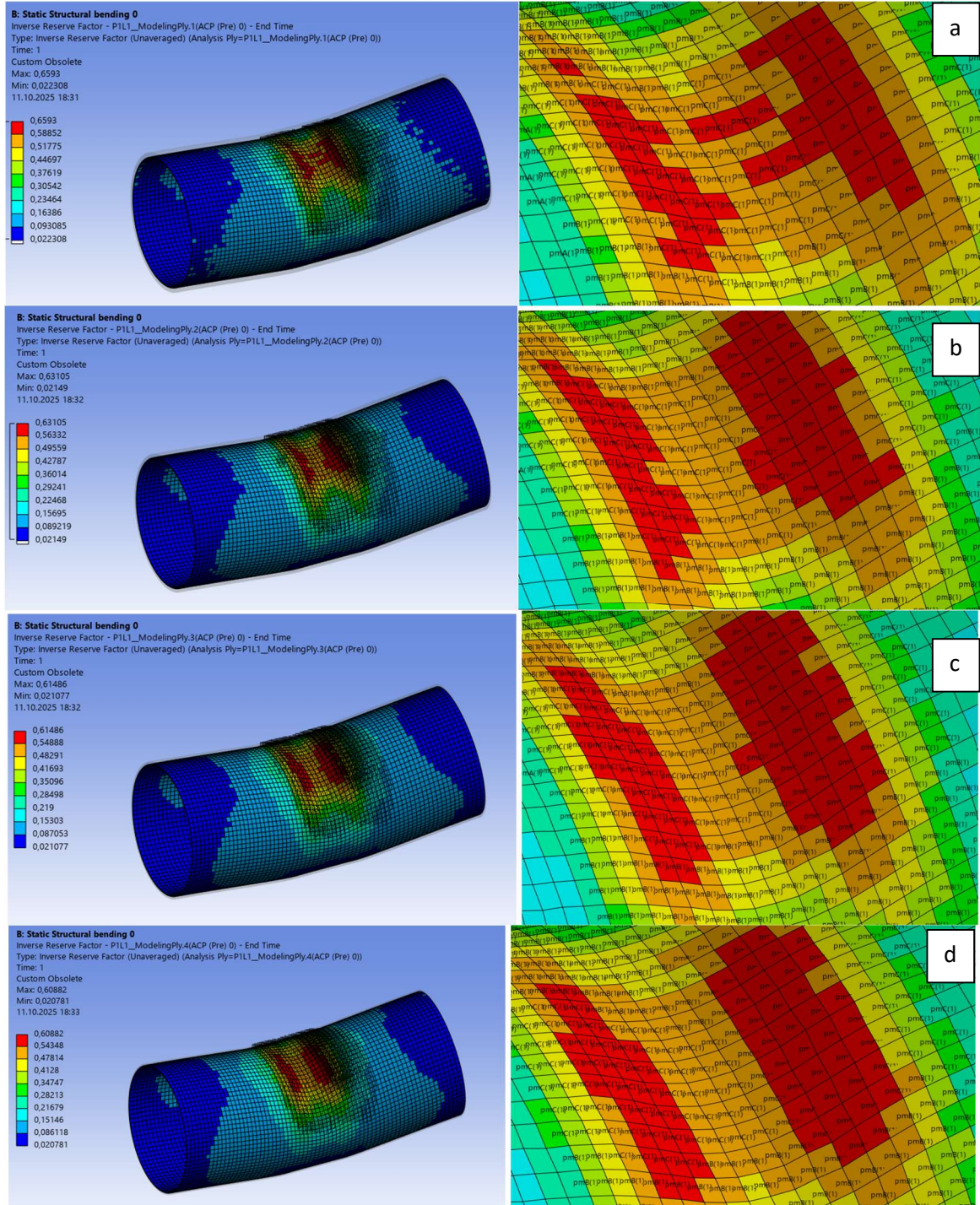
Şekil 3.63' de görülen PLY1 gerilmesidir. Diğer katmanlar aşağıdaki Tablo 3.21' de verilmiştir.

Tablo 3.21: 0° laminasyon için gerilme IRF değerleri

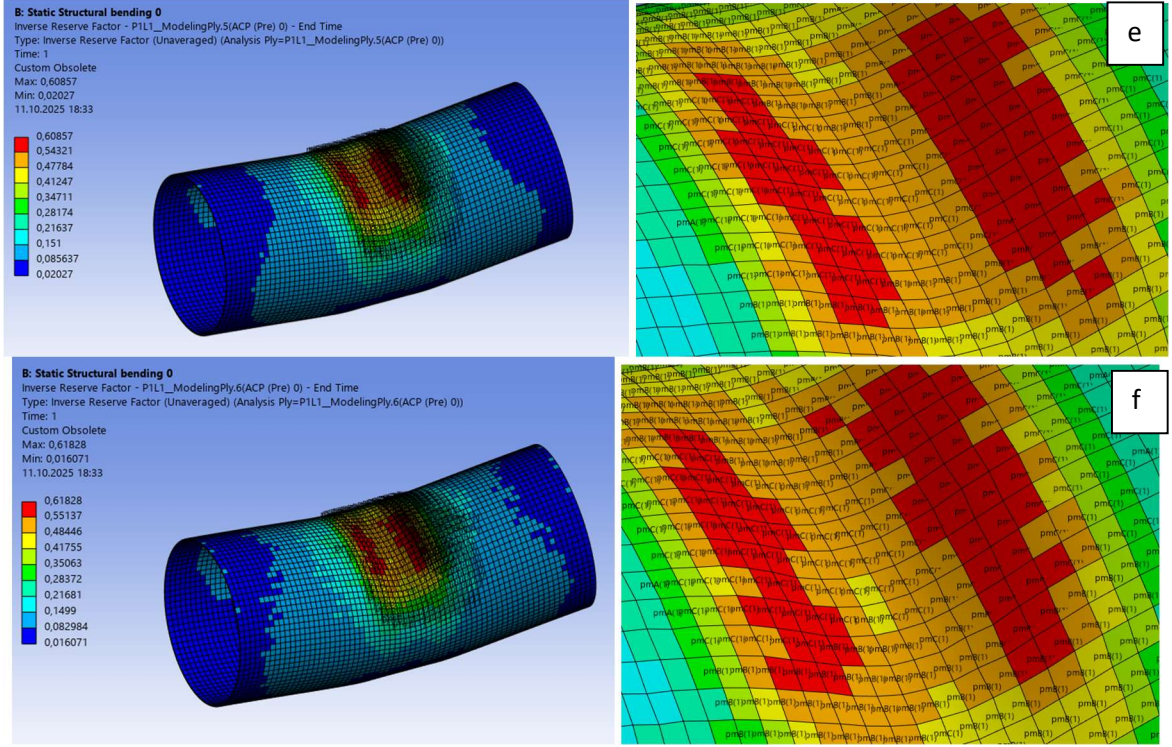
	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1	89,14	0,6593
Ply2	85,90	0,63105
Ply3	83,40	0,61486
Ply4	81,30	0,60882
Ply5	79,79	0,60857
Ply6	79,92	0,61828
Ortalama	83,24	0,62

0° laminasyonlu izolatörün eğilme analizinde Puck–IRF değerleri tabakalar arasında 0.61–0.66, ortalama ≈ 0.62 bulunmuştur. Maksimumlar, bel (daralma) bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Hasar haritalarında görülen pmC (matrix shear failure) etiketleri, kritik mekanizmanın düzlem-içi kayma gerilmesi (τ_{12}) ile maruz kaldığını göstermektedir. Eğilmede kesme kuvveti ve bel geçişindeki geometri süreksizliği nedeniyle τ_{12} yığılması artmakta; bu da matris kayması \rightarrow lif–matris ayrışması \rightarrow yerel delaminasyon şeklinde

ilerleyebilecek bir hasar dizilimini işaret etmektedir. Sonraki bölümde değinilecek olmasına rağmen, pmC'nin baskın oluşu, tasarımda $\pm 45^\circ$ tabaka eklenmesi matris/ara-yüzün kayma dayanımının iyileştirilmesine etken olacaktır.



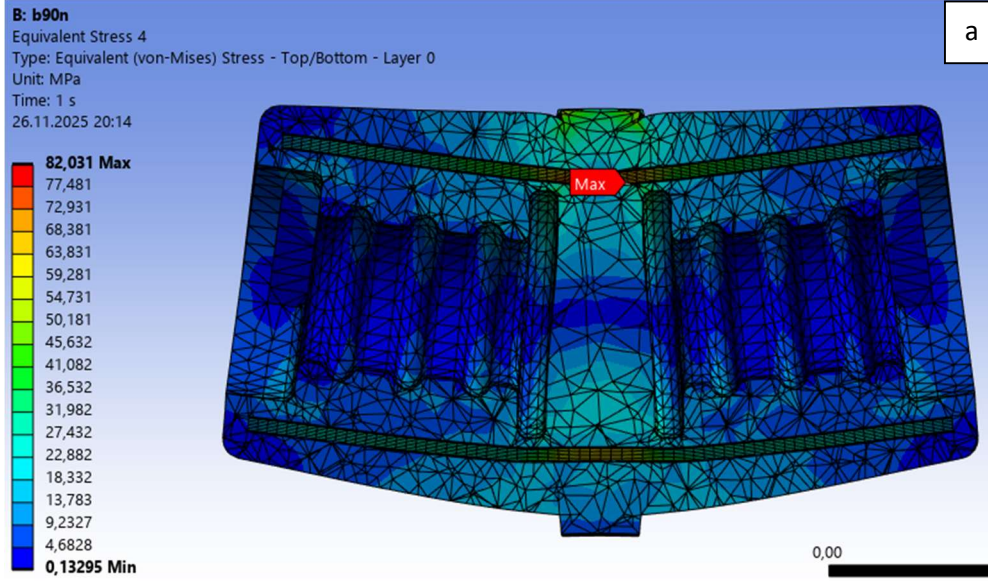
Şekil 3.63: 0° için eğilme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6



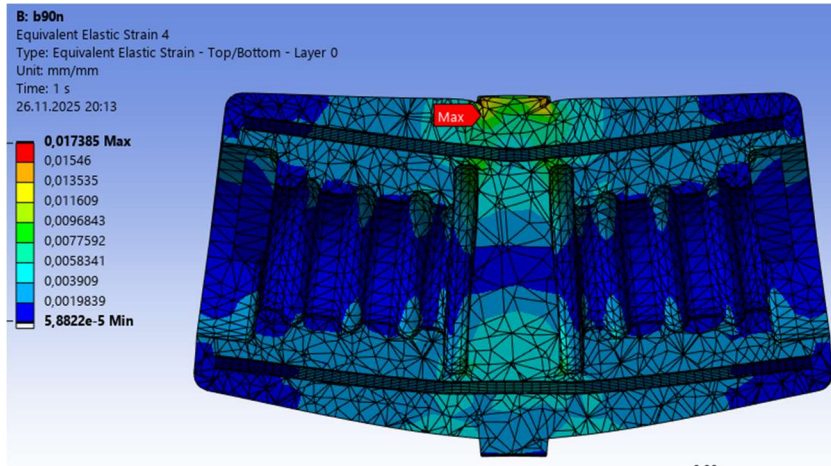
Şekil 3.63(devam)

3.4.2 90° laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

Elde edilen von Mises eşdeğer gerilme alanı, maksimumların bel/radyus bölgesinde ve özellikle üst taraftaki yerel eğrilik geçişinde yoğunlaştığını göstermektedir (≈ 82 MPa). Eşdeğer elastik birim şekil değiştirme haritasında da aynı konumda tepe değerlerin oluştuğu görülmüş, böylece gerilme-şekil değiştirme odaklarının çakıştığı doğrulanmıştır. Nötr eksenenden uzak bölgede hem eğilme normal gerilmeleri hem de tabakalar arası kayma gerilmeleri artmış; insert çevresindeki geometrik süreksizlikler gerilme akışını daraltarak ek bir yığılma üretmiştir. Liflerin 90° yönelimli olması nedeniyle, eğilme eksenini boyunca yük taşınması esasen matrise binmiştir. Deney sonrası numune görüntüsünde gözlenen beyazlama/çatlak izi, modelde işaretlenen tepe bölgesiyle uyumlu olup, çatlağın bel çevresinden başlayıp lif izleri boyunca dairesel olarak ilerlediğini göstermektedir. Sonuç olarak, 90° laminasyonlu numunelerde eğilme altında kırılma; bel/radyus geçişinde başlatılan matris-kontrollü hasarın, lif doğrultusu boyunca gelişen delaminasyon ve yerel kopmalarla büyümesi şeklinde gerçekleşmiştir. Bu bulgu hem gerilme hem de birim şekil değiştirme dağılımlarının deneysel kırılma morfolojisiyle tutarlı olduğunu ortaya koymaktadır.

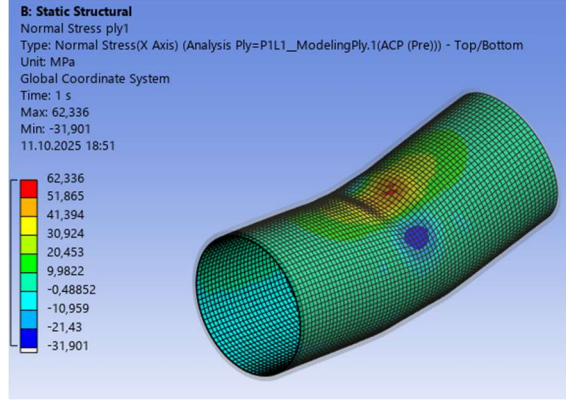


Şekil 3.64: 90° için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.65: 90° için eşdeğer gerinim

Şekil 3.66' da görülen PLY1 gerilmesidir. Diğer katmanlar Tablo 3.22' de verilmiştir.

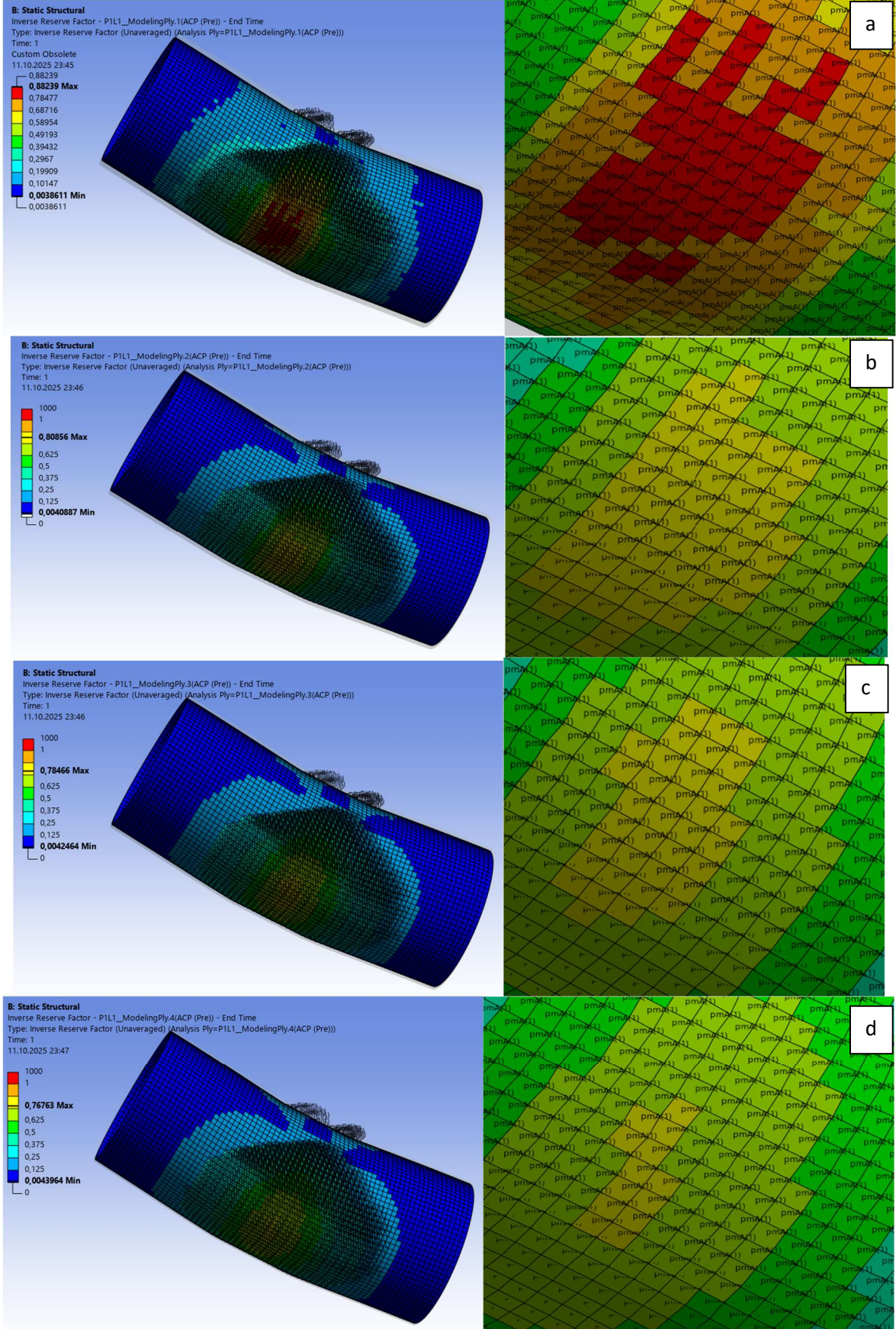


Şekil 3.66: 90° laminasyonlu numunelerin eğilme analizi sonucu normal gerilmeleri

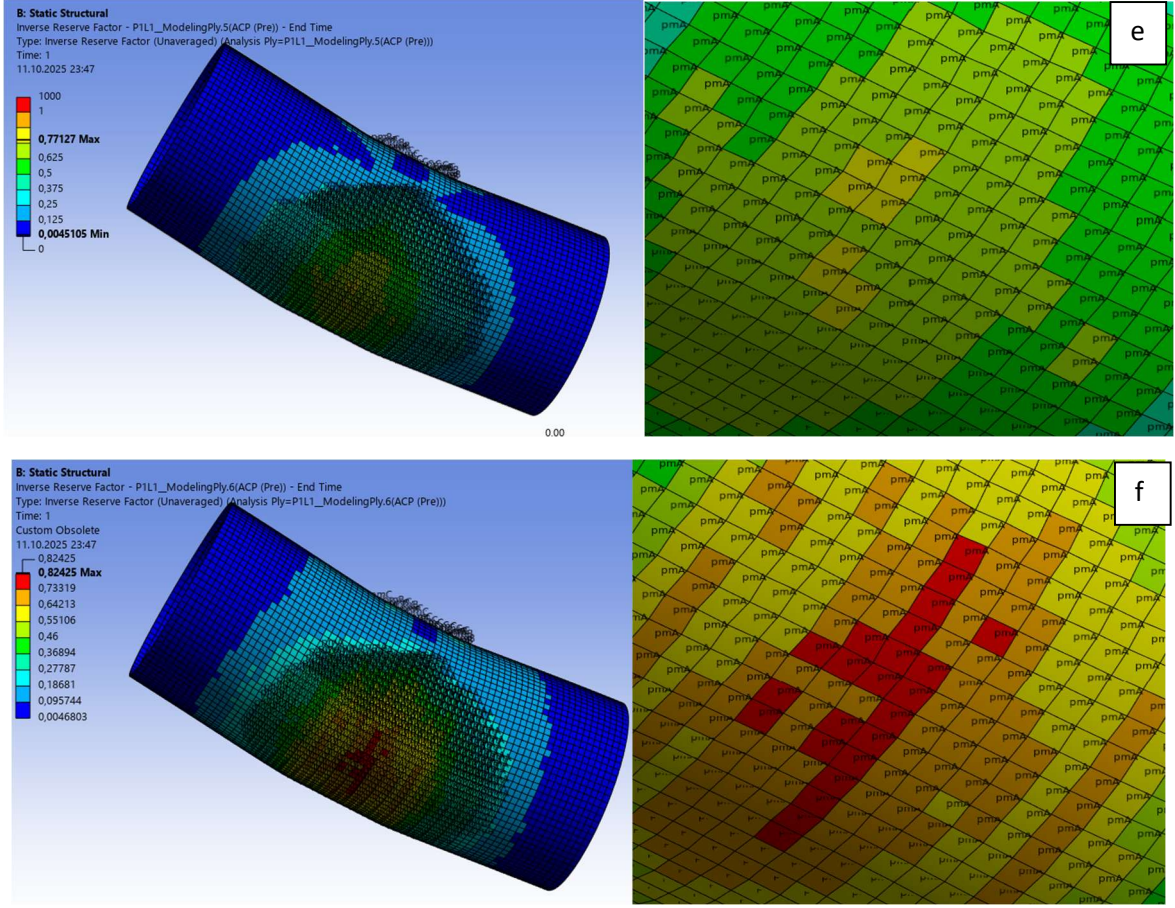
Tablo 3.22: 90° laminasyon için gerilme IRF değerleri

	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1	62,33	0,88
Ply2	54,74	0,81
Ply3	52,26	0,78
Ply4	51,52	0,77
Ply5	51,25	0,77
Ply6	52,61	0,82
Ortalama	54,12	0,81

90° laminasyonlu izolatörün eğilme analizinde Puck tabanlı IRF katsayısı tabakalar arasında 0.77–0.89 aralığında, ortalama IRF ≈ 0.81 olarak elde edilmiştir. IRF tepe değerleri bel (daralma) bölgesinin çekme tarafı dış yüzeyinde toplanmaktadır. Hasar etiketleri pmA (matrix tension failure) modundadır. Eğilme hareketinin de etkisiyle lifler uzamaya zorlanmakta bu da matris çekme hasarına neden olmaktadır. Tabaka bazında lif yönündeki normal gerilme $\sigma_1 \approx 62 \rightarrow 51$ MPa olmuştur.



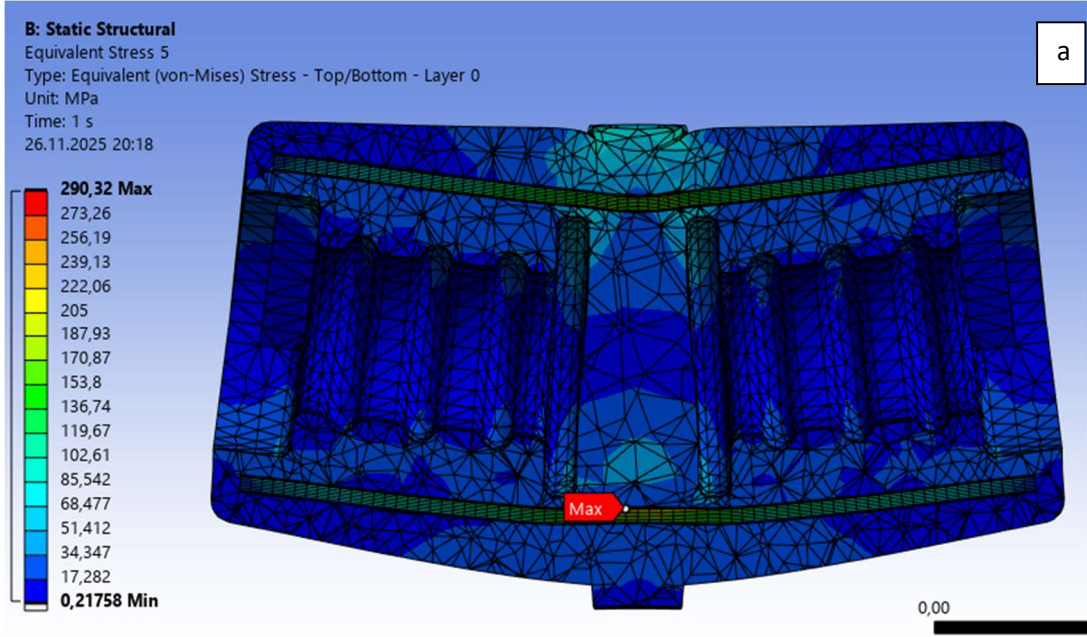
Şekil 3.67: 90° için eğilme hasar modları a) Katman 1, b) Katman 2, c) Katman 3, d) Katman 4, e) Katman 5, f) Katman 6



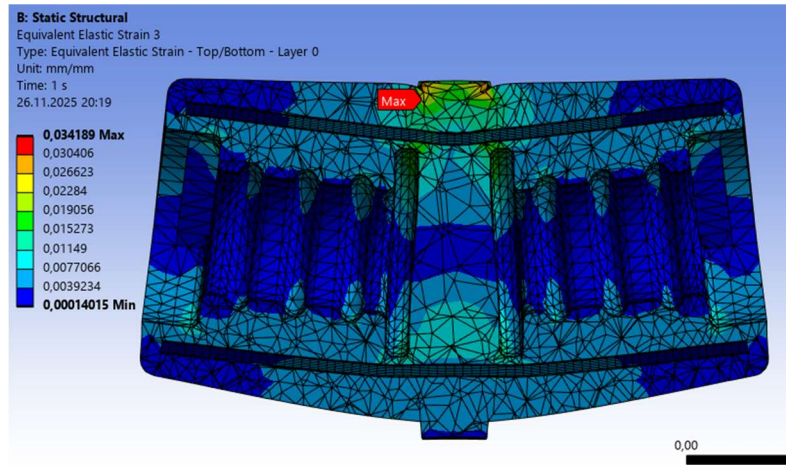
Şekil 3.67(devam)

3.4.3 $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

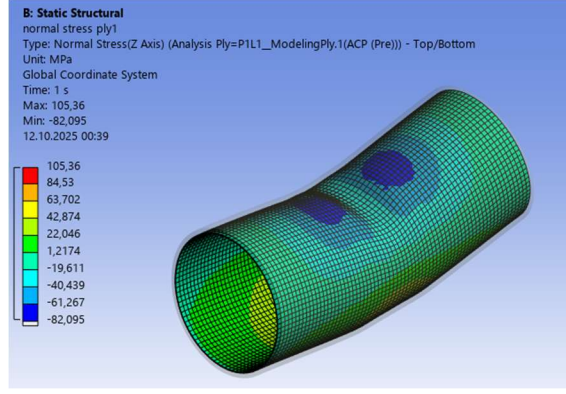
$\pm 90^\circ$ laminasyonlu numunenin eğilme sonuçları, sonlu eleman von Mises haritasıyla kırık morfolojisinin iyi bir tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. En yüksek eşdeğer gerilmeler bel/radyüs bölgesinde toplanmış; bu bölge, fotoğraflarda çevresel yönde görülen halka-benzeri hasar izleriyle örtüşen bir “gerilme yoğunlaşma merkezi” gibi davranmıştır. Buna ek olarak modelde alt kabukta, belden gövdeye doğru uzanan bant şeklinde gerilme yığılmaları görülüyor; bu bantlar, $\pm 90^\circ$ yerel lif doğrultularıyla çakıştığı için çatlağın fotoğraflarda izlenen çapraz (“buzlanma”) hatları boyunca ilerlemesini açıklamaktadır. Basma etkisiyle izolatör üst tarafında basma ve kesme gerilmeleri, şeklin alt tarafında ise uzamaya bağlı olarak çekme gerilmeleri oluşmaktadır. $\pm 90^\circ$ dizilimde modelin öngördüğü diyagonal gerilme bölgeleri, numunedeki çapraz beyazlama/kırılma iziyle uyumlu bir hasar rotası üretmiştir.



Şekil 3.68: $\pm 90^\circ$ için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



Şekil 3.69: $\pm 90^\circ$ için eşdeğer gerinim



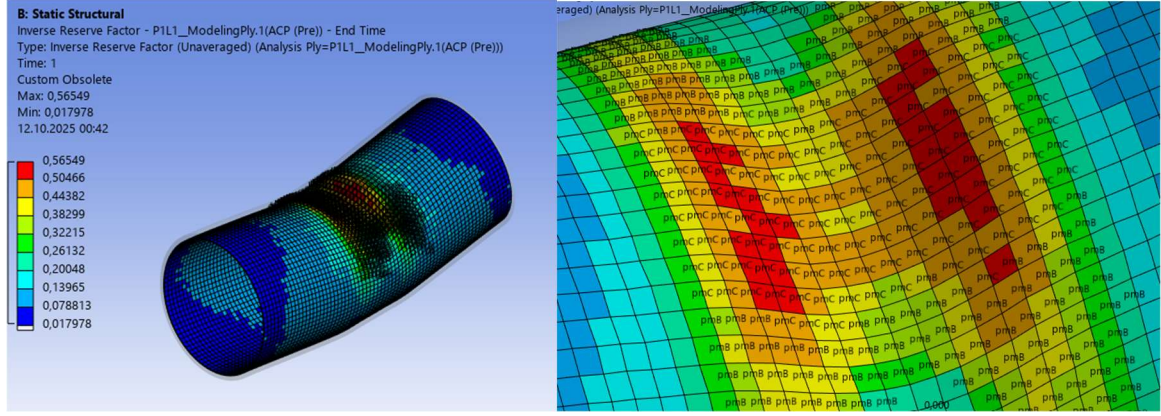
Şekil 3.70: $\pm 90^\circ$ laminasyonlu numunelerin eğilme analizi sonucu normal gerilmeleri

Şekil 3.70’ de görülen PLY1 gerilmesidir. Diğer katmanlar Tablo 3.23’ de verilmiştir.

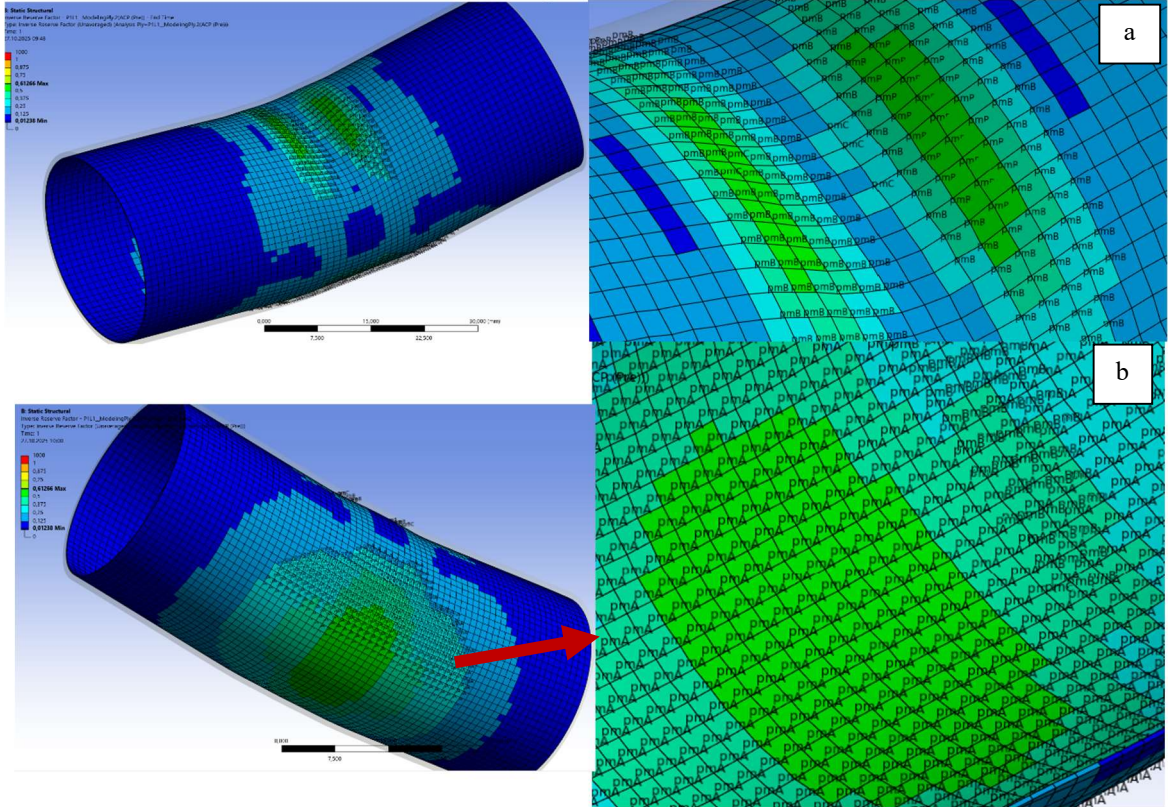
Tablo 3.23: $\pm 90^\circ$ laminasyon için gerilme IRF değerleri

	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1 0°	105,51	0,6
Ply2 90°	76,90	0,7
Ply3 0°	99,73	0,5
Ply4 90°	71,83	0,7
Ply5 0°	97,21	0,6
Ply6 90°	72,50	0,7
Ortalama	87,28	0,63

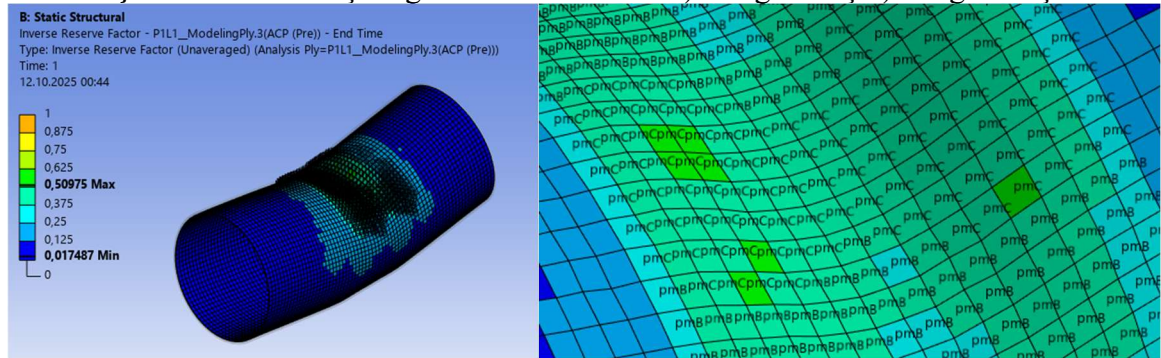
$\pm 90^\circ$ dizilimli numunelerin eğilme analizinde tabaka bazlı IRF 0,50–0,70 aralığındadır (ortalama 0,63). En kritik katmanlar 90° yönlü PLY2, PLY4 ve PLY6 olup IRF $\approx 0,70$ değerleriyle hasar eşiğine daha yakındır; bu katmanlarda çekme tarafında pmC (matris kesme), basma tarafında pmB (matris basma) kümeleri gözlenmiştir. 0° katmanlar (PLY1, PLY3, PLY5) yüksek σ_1 değerleri (≈ 100 MPa civarı) taşımasına karşın daha düşük IRF (0,50–0,60) ile görece emniyetlidir. Bulgular, eğilme altında kritikliğin 90° katmanlardaki matris/ara-yüz tepkisiyle belirlendiğini göstermektedir.



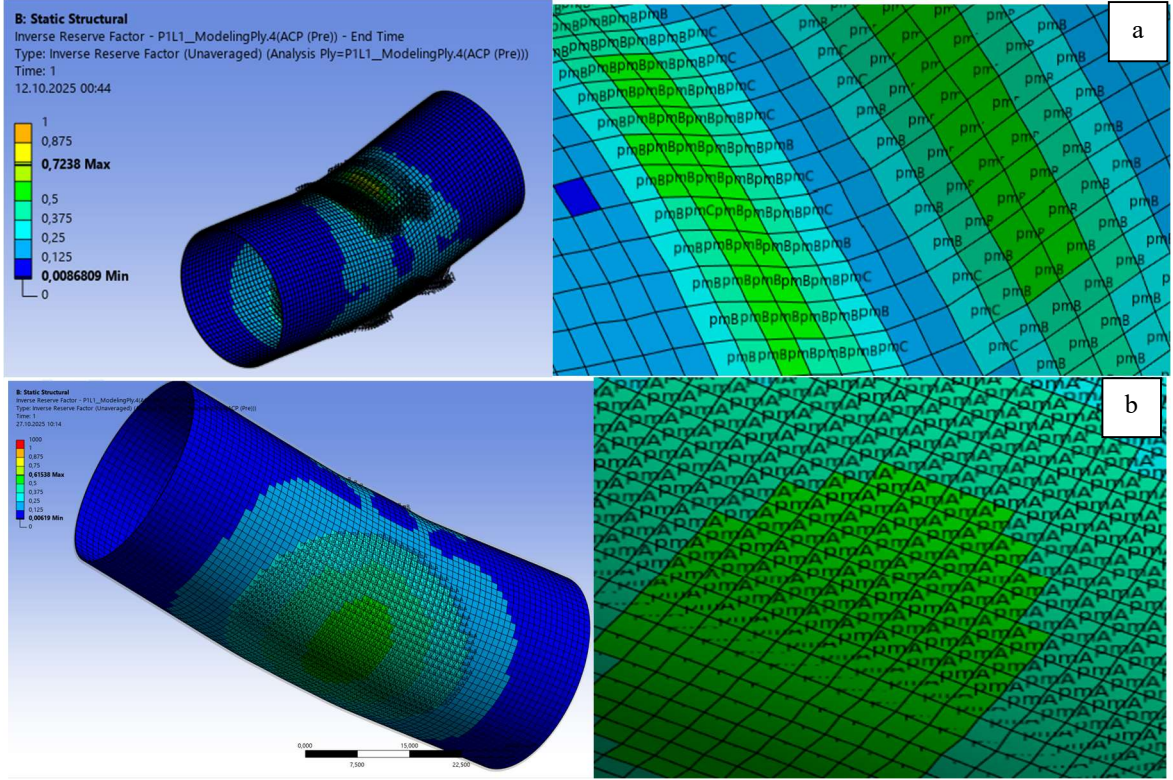
Şekil 3.71: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 1. katman



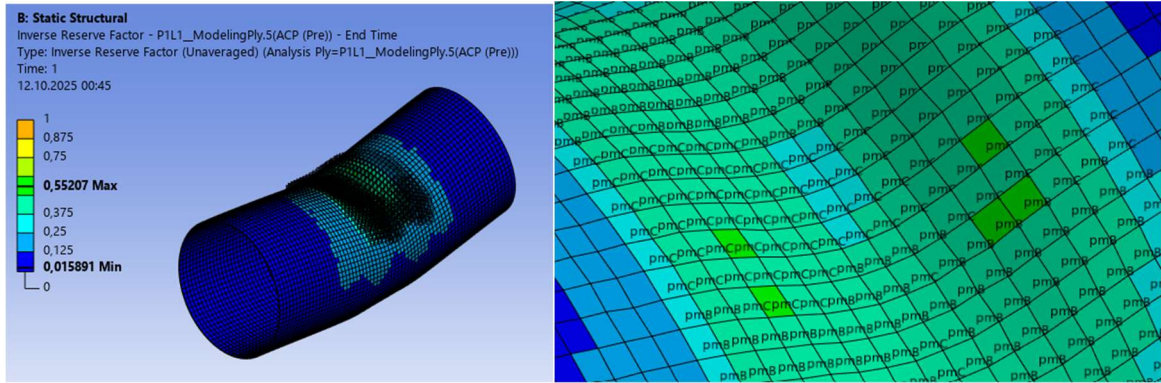
Şekil 3.72: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları a) Üst görünüş b) Alt görünüş



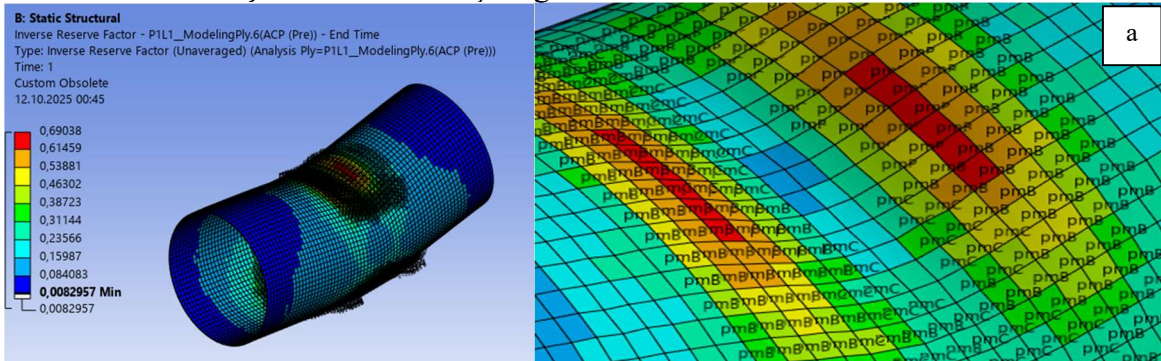
Şekil 3.73: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 3. katman



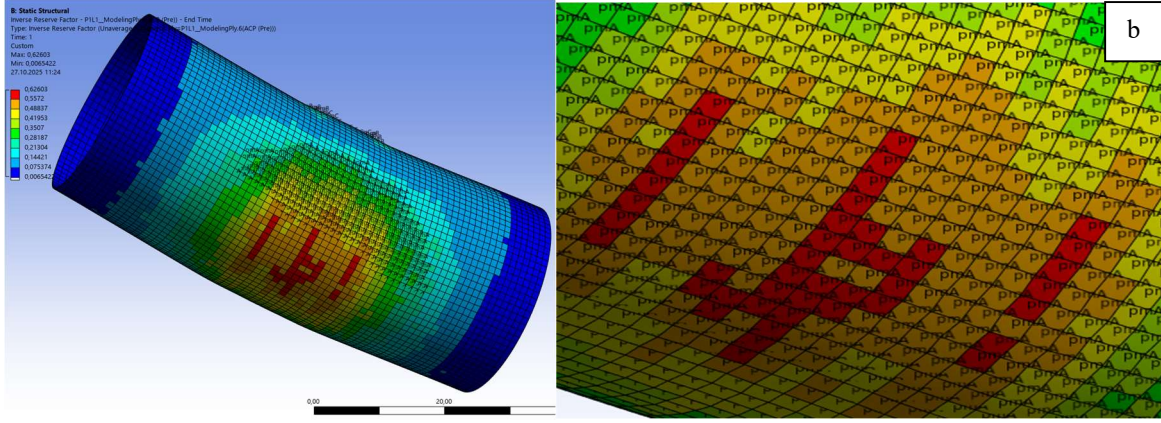
Şekil 3.74: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 4. Katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş



Şekil 3.75: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 5. katman



Şekil 3.76: $\pm 90^\circ$ için eğilme hasar modları 6. Katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş



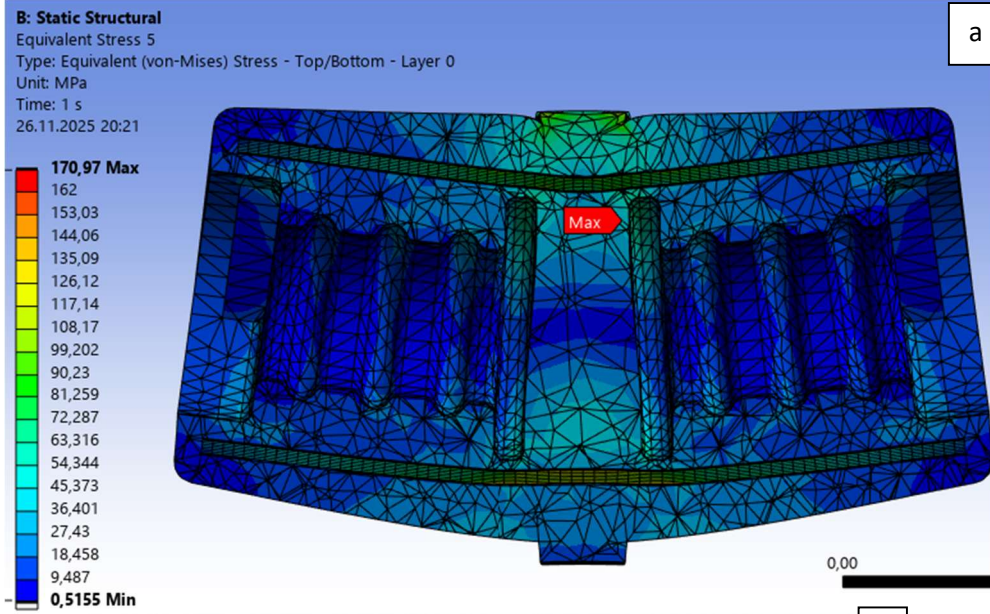
Şekil 3.76(devam)

3.4.4 $\pm 45^\circ$ Laminasyonlu numunelerin analiz sonucu

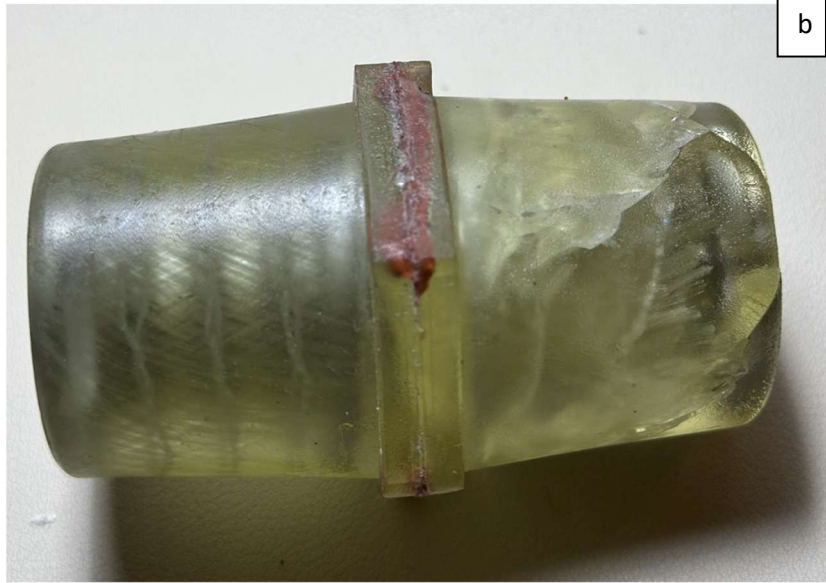
$\pm 45^\circ$ laminasyonda von Mises haritası, en belirgin gerilme yoğunlaşmasının bel (radyüs) bölgesinde ve bu bölgeden gövdenin alt yanına doğru eğik bir bant halinde yayıldığını gösteriyor. Numunedeki kırılma/frosting izleri de tam bu eğik bant boyunca gelişmiş: makro fotoğrafta belden başlayıp lif dizilimine paralel ($\sim \pm 45^\circ$) ilerleyen buzlanma matris kesmesi ve arayüz ayrılması ile başlayan hasarın delaminasyona dönüşerek çapraz doğrultuda yayılmasına işaret ediyor. Nötr eksen göbek boyunca ilerlerken, belin tepe hattında basma; alt yüzeyde ise çekme/uzama görülmektedir.

Bu tipte lifler yük eksenine çapraz çalıştığından, yük aktarımı düzlem-içi kayma üzerinden gerçekleşir; bu da önce matris kesme hasarı, ardından delaminasyon ile sonuçlanır. Analizde bel radyüsünün hemen iç-dış kıvrımlarında okunan maksimumlar da (insert fillet çevresi) bu mekanizmayı tetikleyen geometrik gerilme yığılmalarını doğruluyor.

Özetle, beldeki yüksek gerilme + gövde üzerinde lif doğrultusunda uzayan eğik gerilme bandı, numunedeki çapraz “buzlanma/kırılma” iziyle örtüşmektedir; $\pm 45^\circ$ dizilimli yapı için beklenen kesme temelli ve kademeli hasar ilerleyişi deneyde de gözlenmiş durumdadır.

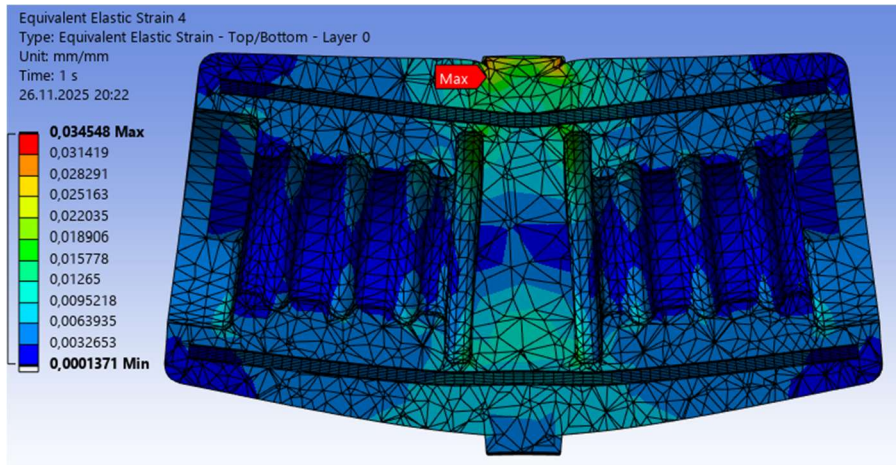


a

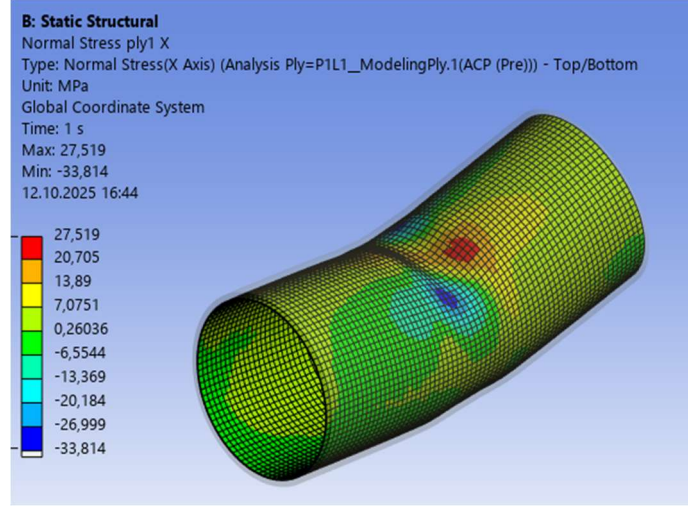


b

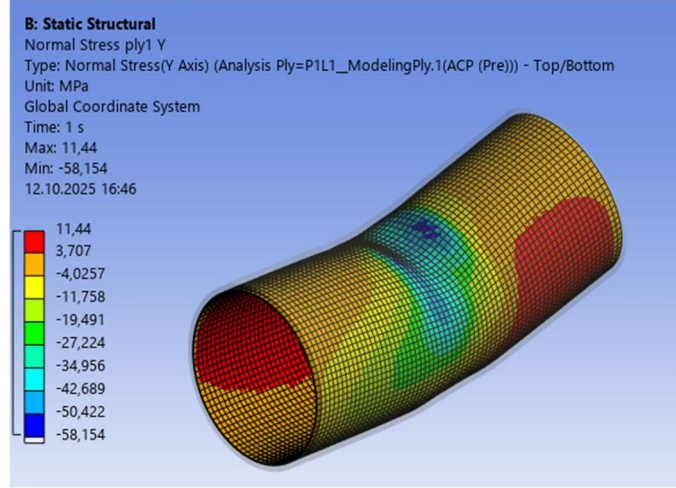
Şekil 3.77: $\pm 45^\circ$ için von misses gerilme karşılaştırması a) Analiz, b) Test



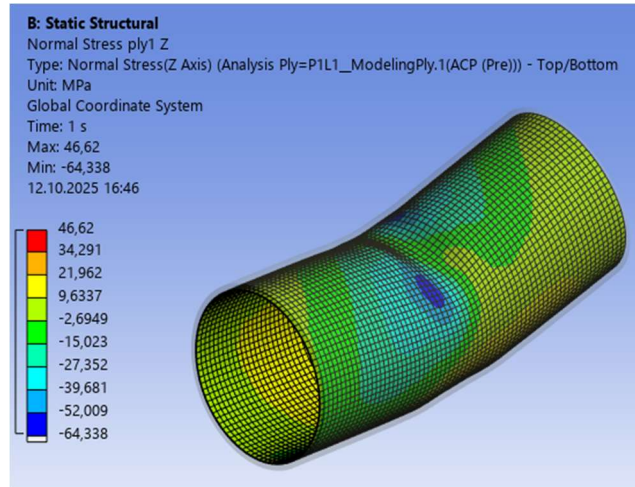
Şekil 3.78: $\pm 45^\circ$ için eşdeğer gerinim



Şekil 3.79: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune 1. Tabaka X yönü eğilme analizi sonucu normal gerilmeler



Şekil 3.80: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune 1. Tabaka Y yönü eğilme analizi sonucu normal gerilmeler



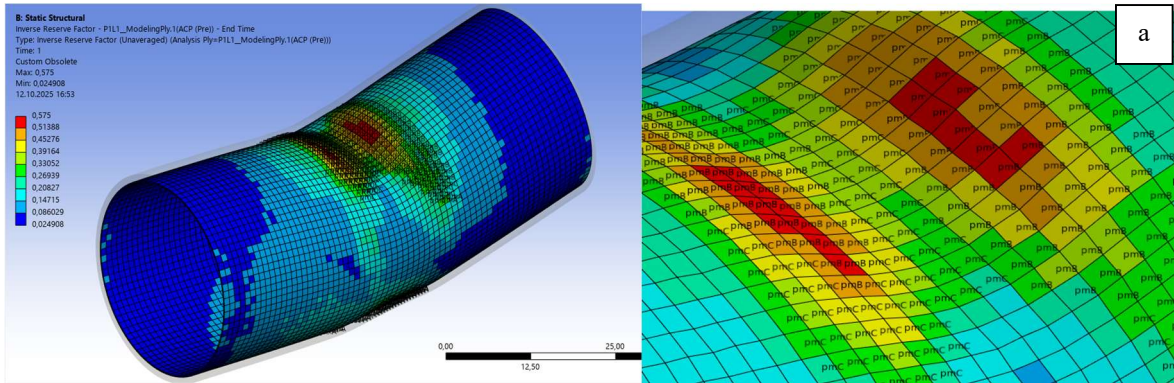
Şekil 3.81: $\pm 45^\circ$ laminasyonlu numune 1. Tabaka z yönü eğilme analizi sonucu normal gerilmeler

45° lif yönelimli tabakalarda eğilme yüklemesi sonucu X, Y ve Z yönlerinde anlamlı büyüklükte gerilmeler oluşmuştur. Bu nedenle, analiz sonuçları tabloya her bir gerilme bileşeni (σ_x , σ_y , σ_z) ayrı olarak işlenmiş ve bileşke gerilme değeri hesaplanmamıştır. 6 katmandaki gerilmeler birbirleriyle aynı olduğu için yukarıda sadece ilk tabaka verilmiştir. Kompozit malzemelerde yön bağımlı davranışın korunması açısından, bu yöntem en uygun yaklaşımdır. Ayrıca kıyaslama yapılabilmesi için Inverse Reserve Factor (IRF) değeri esas alınmıştır.

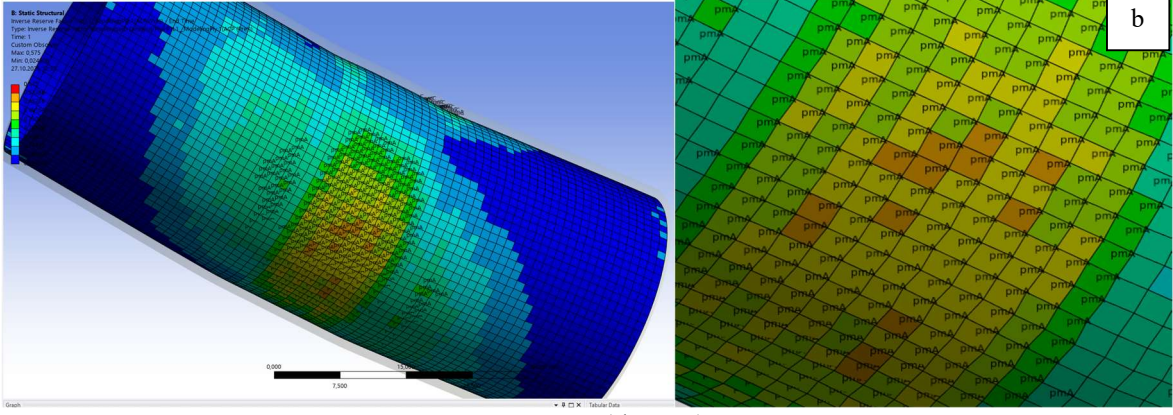
Tablo 3.24: $\pm 45^\circ$ laminasyon için gerilme IRF değerleri

	Normal Gerilme (MPa)	IRF
Ply1 +45°	116,72	0,58
Ply2 -45°	111,26	0,58
Ply3 +45°	104,01	0,56
Ply4 -45°	101,21	0,58
Ply5 +45°	97,23	0,59
Ply6 -45°	97,86	0,60
Ortalama	104,71	0,58

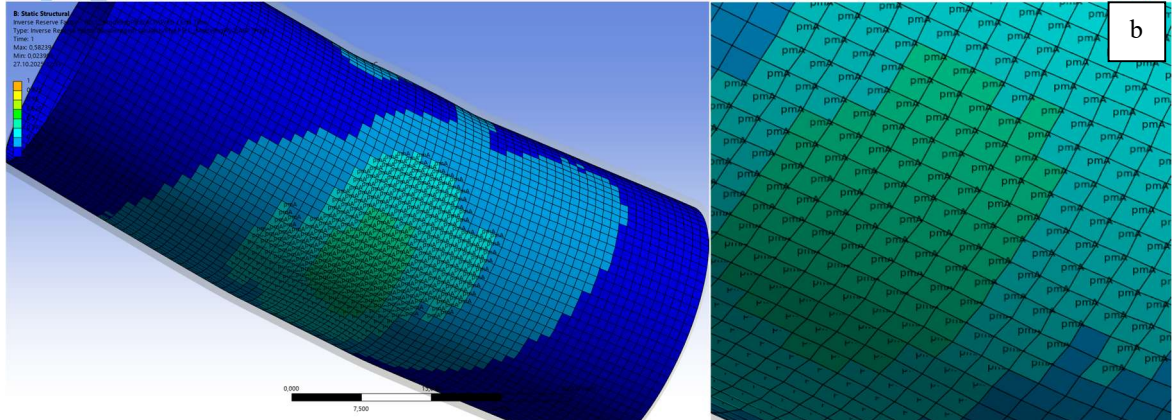
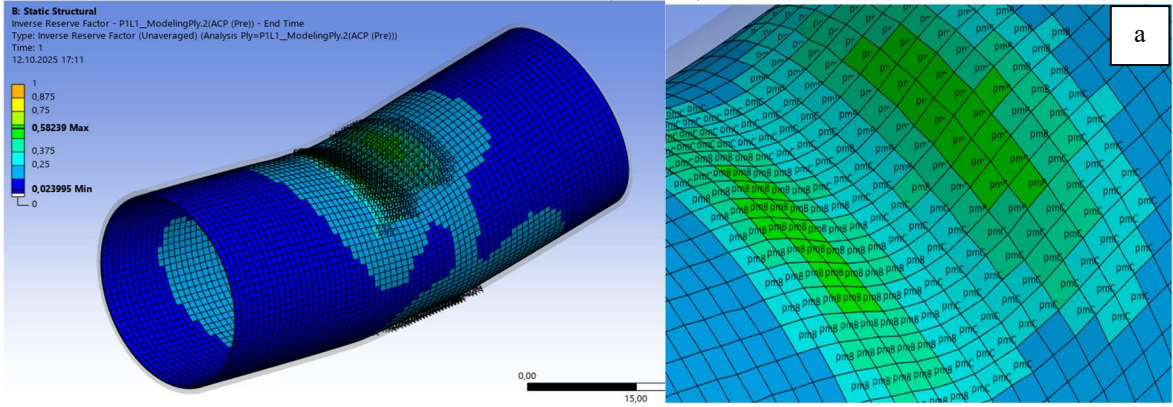
$\pm 45^\circ$ laminasyonlu numunelerin eğilme analizinde katman normal gerilmeleri 97–117 MPa aralığında olup ortalama IRF ≈ 0.58 'dir. IRF'nin 1'e yaklaştıkça emniyetin azaldığı dikkate alındığında, $\pm 45^\circ$ dizilimin 0° ve $\pm 90^\circ$ konfigürasyonlarına kıyasla daha yüksek güvenlik payı sunduğu görülmüştür. Hasar haritalarında baskın mod pmC (matrix shear failure), basınç tarafında yer yer pmB (matrix compression failure) adalarındır. Bu dağılım, eğilme altında $\pm 45^\circ$ liflerin yük aktarımını esas olarak düzlem-içi kayma (τ_{12}) yoluyla gerçekleştirmesiyle uyumludur; dolayısıyla hasar başlangıcı lif kırılması yerine matris-kayma kontrollü gelişmektedir. Katman bazında IRF değerleri birbirine yakın olup asgari emniyet genellikle dış katmanlarda (Ply5–Ply6) oluşur; bu da eğilmede dış yüzeydeki gerilme yığılmasının tipik sonucudur. Sonuç olarak $\pm 45^\circ$ dizilim, başarılı bir performans sergilemiştir.



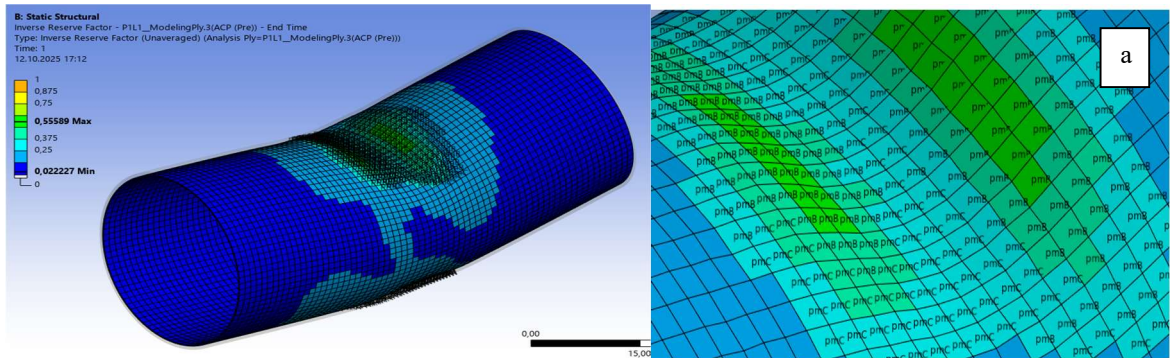
Şekil 3.82: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 1. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş



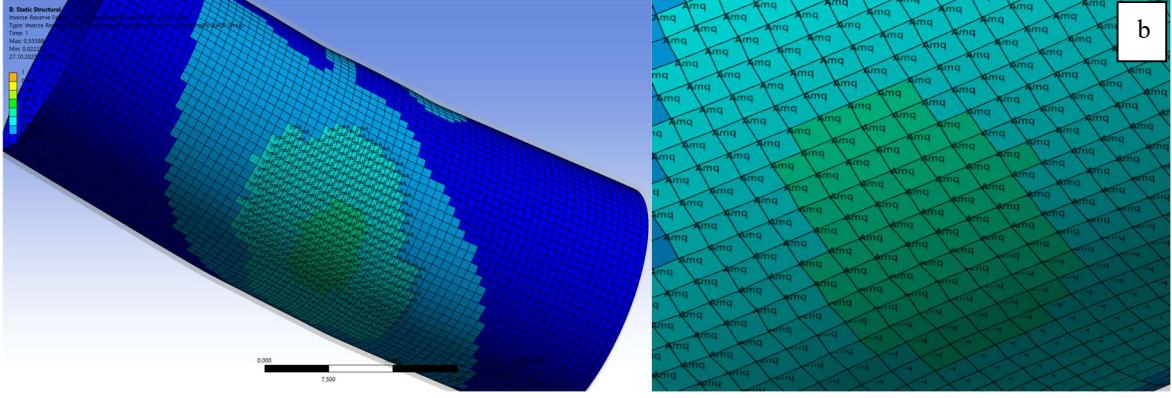
Şekil 3.82(devam)



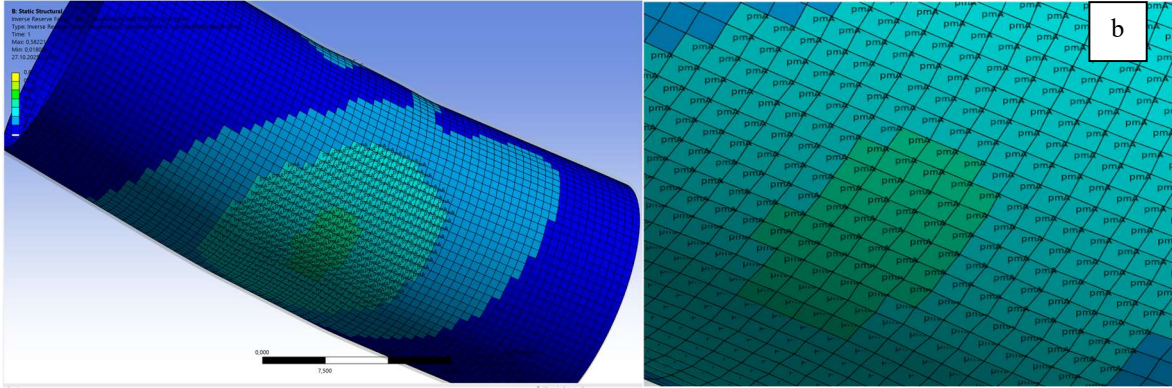
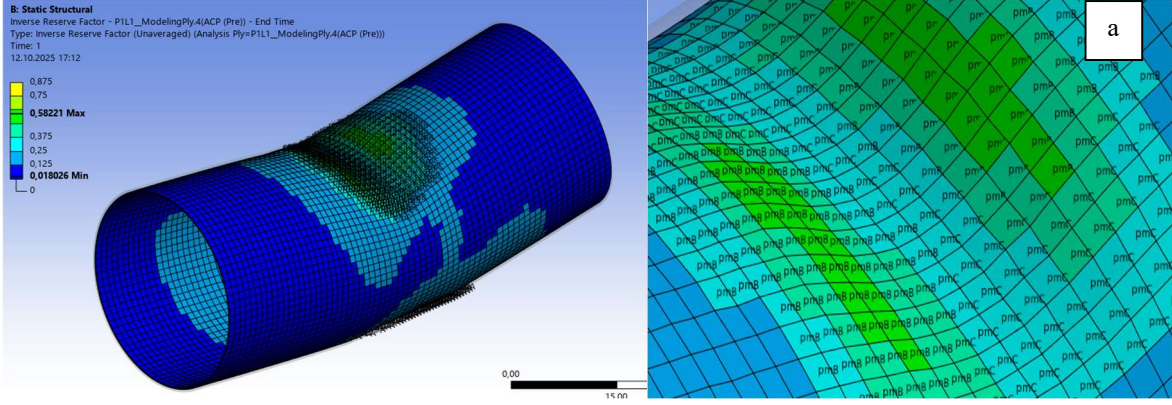
Şekil 3.83: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 2. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş



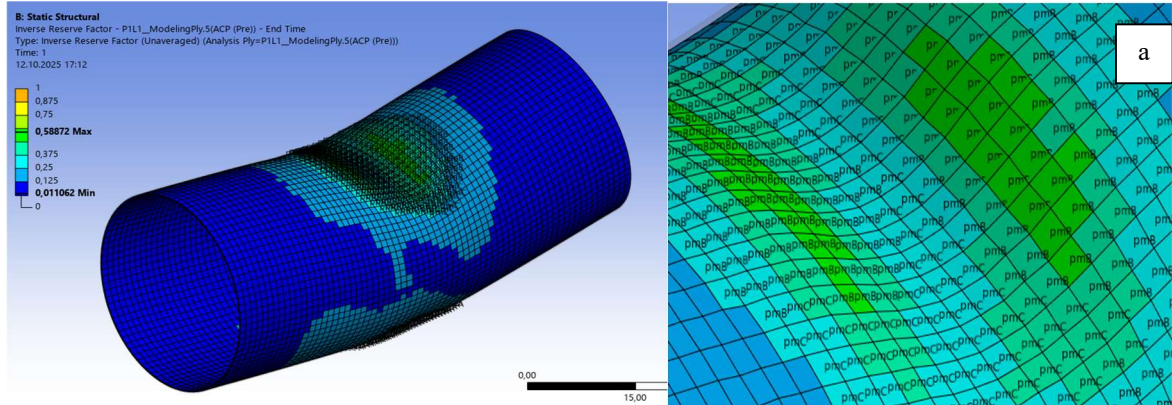
Şekil 3.84: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 3. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş



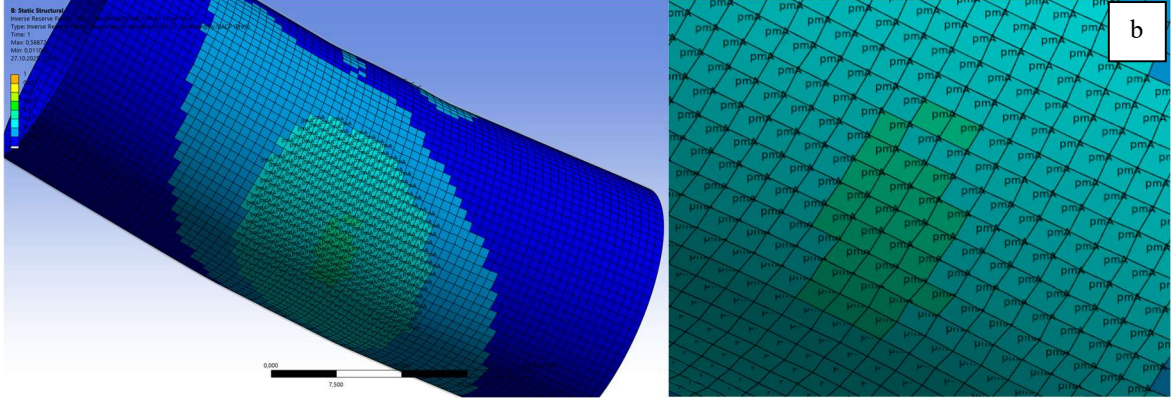
Şekil 3.84(devam)



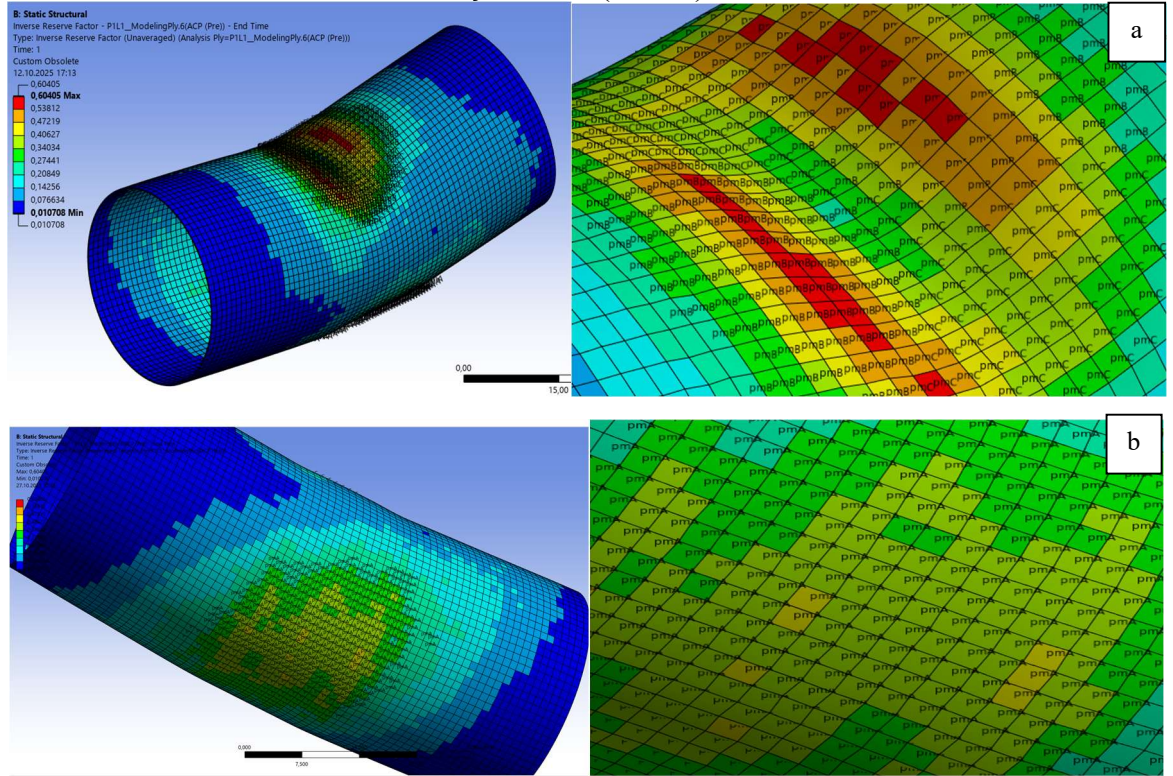
Şekil 3.85: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 4. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş



Şekil 3.86: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 5. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş

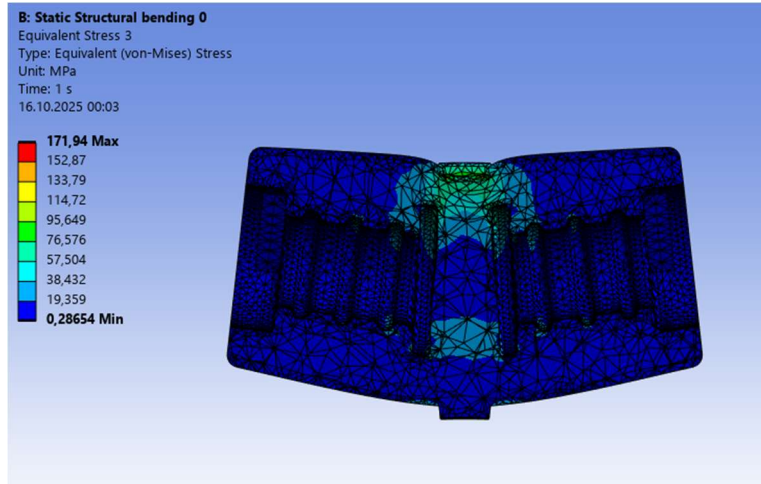


Şekil 3.86(devam)



Şekil 3.87: $\pm 45^\circ$ için eğilme hasar modları 5. katman a) Üst görünüş b) Alt görünüş

3.4.5 Kum dolgululu fabrikada üretilen numunelerin analiz sonucu



Şekil 3.88: Reçine dolgusu ile üretilen numune eğilme analiz sonucu

Fiber takviyesi içermeyen reçine-kum izolator, izotropik karakterde davrandığından kompozit hasar kriterleri (Puck, Tsai-Wu vb.) kullanılmamış; değerlendirme von Mises eşdeğer gerilmesi üzerinden yapılmıştır. Eğilme analizinde en yüksek gerilme değerleri ($\sigma_{vm,max} \approx 172$ MPa) boyun bölgesindeki radyüs/kalınlık geçişinde yoğunlaşmaktadır. Dönüş köklerinde ek gerilme yığılmaları gözlenmektedir. Bu değer aslında bir singularity örneğidir. Esas alınması gereken değer, matris kesme dayanımı olan 60-70 MPa dır. Bu dağılım, hasarın geometri kaynaklı çekme tarafı çatlak başlangıcı ve radyüs boyunca gevrek ilerleme mekanizmasıyla gelişeceğini göstermektedir.

3.5 Elektrik Alan Analizi

Bu çalışmada izolatorün elektrostatik davranışı ANSYS Maxwell 3D ortamında incelenmiştir. IEC 60076-11'e göre çalışma gerilimi $1.1 kV_{RMS}$ olan sistem için, tipik test koşullarını temsil etmek üzere $3 * \sqrt{2}$ kV tepe potansiyel uygulanmıştır. Modelde cıvata uçlarından biri elektrot, diğeri toprak olarak tanımlanmıştır. Bir elektrota gerilim atanmış, karşı uç toprak olarak tanımlanmıştır.

Analiz neticesinde izolator hacmi içinde elde edilen en yüksek elektrik alan şiddeti $E_{max} = 0.869$ kV/mm olarak bulunmuştur. Bu değer, epoksi reçinenin tipik dielektrik dayanımına (yaklaşık 20 kV/mm mertebesi) kıyasla oldukça düşüktür; buna göre emniyet katsayısı $\approx \frac{20}{0.869} \approx 23$ olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, geometri kırınımlarında ve metal-polimer ara yüzey yakınlarında alanın yoğunlaştığını göstermekte; bununla birlikte tepe değerlerin

malzeme dayanım sınırının oldukça altında kaldığı görülmektedir. Bu bulgular, üretilen malzemenin yüksek delinme dayanımına sahip olduğunu teyit etmektedir.

Elektrostatik çözüme eşlik eden alan enerjisi de:

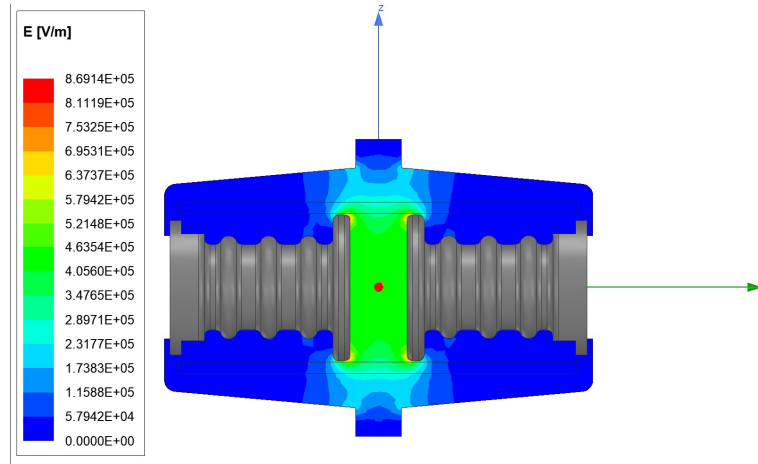
$$W = \frac{1}{2} \int_U \epsilon |\nabla V|^2 dU \quad (3.1)$$

Burada:

U = İntegralin alındığı hacim bölgesi

ϵ = Dielektrik katsayısı

V = Potansiyel fark



Şekil 3.89: Elektrik alan dağılımı

Şekil 3.89’da verilen elektrik alan haritasında, alanın hacim içinde büyük ölçüde uniform (yeşil–açık mavi bantlar, $\approx 0.4\text{--}0.6$ kV/m) dağıldığı, yerel büyümelerin ise elektrot–polimer ara yüzü ile keskin eğrilik/fillet bölgelerinde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu sonuç, çalışma ve test koşullarında delinme riskinin düşük olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli epoksi esaslı kompozit izolatörlerin fiber dizilim yönlerine bağlı olarak mekanik ve dielektrik performanslarındaki değişim sistematik olarak incelenmiştir. Üretimde kullanılan fiber yönlendirme stratejileri (0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$) sabit reçine oranı ve üretim parametreleri altında değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar aşağıdaki bulgular doğrultusunda özetlenmiştir.

Tablo 4.1: Çekme deneyleri özet tablosu

Tip	Deney Sonuçları		Analiz Sonuçları	
	Ortalama Uzama (mm)	Ortalama Kuvvet (N)	Ortalama Normal Gerilme (MPa)	IRF
0°	7,63	28479,52	101,98	0,26
$\pm 90^\circ$	7,10	23510,59	73,76	0,50
$\pm 45^\circ$	5,64	22726,44	53,486	0,54
Kum katkılı tesiste üretilmiş izolatör	4,73	20033,82	48	-
Mevcut kullanılan izolatör	3,31	16375,89	45	-
90°	6,72	16363,70	33,87	1,01

Çekme analizleri sonucunda orta kesitte uzamaya bağlı yerel incelme eğilimi ve buna eşlik eden gerilme yoğunlaşması gözlenmiştir. Bu nedenle orta kısmın konik ve daha büyük çapa sahip olacak biçimde tasarlanması, etkin kesit alanını artırarak söz konusu yoğunlaşmayı azaltıcı etki yapmakta; dolayısıyla yerinde bir izolatör tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir.

Çekme testleri sonucunda, liflerin yükleme eksenine aynı yönde (0°) hizalandığı numuneler $\approx 28\ 000$ N ile en yüksek dayanımı göstermiştir. Bu yüksek taşıma kapasitesi, sayısal analizlerde elde edilen IRF ortalamasının $\approx 0,26$ olmasıyla da doğrulanmıştır (IRF'nin 1'e yaklaştıkça emniyetin azaldığı, düşük IRF'nin daha emniyetli olduğu hatırlanmalıdır). 0° dizilim, liflerin yükü öncül biçimde taşıdığı en emniyetli konfigürasyon olarak öne çıkmıştır. Nitekim 0° tabakalarda ortalama aksenal gerilme ≈ 101 MPa seviyesine ulaşmış ve lif-baskın taşıma net biçimde gözlenmiştir. Wang belirli sarım açılımlarına sahip eğik-simetrik laminaların mesnet izolatörlerinde yük altındaki davranışı anlamlı ölçüde değiştirdiğini ve klasik laminasyon teorisine dayalı öngörülerin deneyle büyük ölçüde örtüştüğünü göstermiştir (Wang et al., 2020b). Bu çalışmada da aynı beklenti doğrulanmıştır: Lif doğrultusuna paralel yükleme 0° çekmede en yüksek taşıma kapasitesini vermiş; deney ve

sayısal analizler birbiriyle uyumlu sonuçlar üretmiştir. Görüldüğü üzere, pd (delamination) hasar etiketlerinin yoğunlaştığı bölgelerde (Bkz. Şekil 3.41) çizgisel ilerleyen hasar bantları oluşmuştur. Bantlar, çekme altında önce matris çatlağının yerel lif–matris ayrışmasını tetiklemiştir. Bunu izleyen delaminasyon gelişimiyle numune üzerinde doğrusal beyaz izler halinde yayılım göstermiştir (Bkz. Şekil 3.37). Buna karşılık 90° yönlendirmede liflerin aksenal yük taşımaya katkısı sınırlı kalmış ve dayanım düşmüştür. Bu bulgular, fiber diziliminin yapısal rijitliğin ve taşıma kapasitesinin optimizasyonunda belirleyici olduğunu bir kez daha ortaya koymaktadır.

$\pm 90^\circ$ yönlendirmeli numuneler, karma bir kırılma karakteri sergilemiştir: hem lif doğrultusunda hem de matris yapısında çatlak oluşumu gözlenmiştir. Numune fotoğraflarında hasar diğer iki laminasyon kadar belirgin olmasa da matris hasarları görülebilmektedir. Dayanım açısından, değerler $\pm 45^\circ$ dizilimine yakın olmakla birlikte bir miktar daha yüksektir; böylece 0° 'den sonra en başarılı laminasyon olarak öne çıkmıştır. Komşu tabakalar arası görülen yüksek gerilme farklılıkları (Bkz. Tablo 3.19), 0° – 90° açılı farkına ve buna bağlı rijitlik uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. Analiz sonuçlarında 90° katmanlarda pmA (matrix tension failure) işaretleri yüksek bulunmuş; bu da matris çekme kaynaklı hasar başlangıcının $\pm 90^\circ$ istifte belirleyici olduğunu doğrulamıştır (Bkz. Şekil 3.51). Ayrıca IRF ortalamasının $\pm 90^\circ$ için $\approx 0,50$, $\pm 45^\circ$ için $\approx 0,54$ olması, düşük IRF = daha emniyetli ilkesiyle birlikte $\pm 90^\circ$ diziliminin çalışma koşullarında bir miktar daha yüksek güvenlik payı sunduğunu göstermektedir.

$\pm 45^\circ$ dizilimli numuneler, çekme altında düzlem-içi kaymanın (τ_{12}) belirleyici olduğu bir kırılma moduna sahiptir. Kayma hâkimiyeti, numune üzerinde çapraz (45° doğrultulu) hasar bantlarıyla görünür hâle gelir (Bkz. Şekil 3.52). Analizde kırmızı ile gösterilmiş alanlarda başlayan hasar, 45° yönelim boyunca ilerlemiştir. Ortalama IRF $\approx 0,54$ elde edilmiştir. Komşu tabakalarda 50–60 MPa bandında, ortalama ≈ 53 MPa aksenal gerilmeler okunmuştur. Çekmeye bağlı olarak oluşan kesit daralmasında en yüksek gerilme ve IRF; PLY 1 de oluşmuştur. Bu nedenle hasar öncelikle matris çekmesi (pmA) ve yerel ayrılma ile PLY1 de başladığı düşünülmektedir. İlerleyen aşamada delaminasyonun 45° doğrultusunda takip eden tabakalar boyunca yayılması beklenir.

Liflerin yükleme eksenine dik olduğu (90°) numunelerde, liflerin etkin yük taşıyamaması nedeniyle çekme dayanımı belirgin biçimde düşmüştür. Park'ın vurguladığı gibi

kompozitlerin mekanik ve yalıtım performansı yalnızca malzeme bileşenlerine değil, aynı zamanda elyafın yönelim düzenine de önemli ölçüde bağlıdır (C. H. Park, 1987). Fiber yönelimi ile çekme yüklemeye eksenindeki açının artmasıyla, cam elyaf-epoksi kompozitlerin yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı ortaya konulmuştur (H. Park et al., 2004b).

Bu grupta kırılma, matris çatlağı ile başlayıp ilerleyen lif-matris ayrışmaları ve yerel delaminasyon ile karakterizedir. Sayısal analizlerde elde edilen IRF ortalamasının ≈ 1.01 gibi en yüksek değerde çıkması, 90° dizilimin kırılma eşiğine en yakın konfigürasyon olduğunu göstermekte ve deney bulgularıyla örtüşmektedir (Bkz. Tablo 3.18). Puck etiketlerinde baskın mod matris çekme gerilmesi (pmA) olup, hasar tetiklendiğini doğrulamaktadır. Analizde bel bölgesinde dairesel bir hat boyunca artan gerilmenin, test numunesi üzerinde de bel boyunca dairesel bir kırılmayla örtüşmesi deney ve analizin tutarlılığını göstermektedir (Bkz. Şekil 3.42).

Lif içermeyen reçine ve kum-dolgulu izolatorler izotropik varsayılarak çekme altında maksimum gerilme (ve yardımcı olarak von Mises) ile değerlendirilmiştir. Deney sonuçları, malzemenin doğrusal-elastik ve gevrek karakterde olduğunu; gerilme yığılmalarının bel/çap geçişi ve iki insertin orta noktasında yoğunlaştığını göstermektedir. Tesiste üretilen kum dolgulu izolator ile mevcut kullanılan numuneler arasında yaklaşık %10 farkla tesiste üretilen öne çıkmıştır. Hasar, lifli yapılardaki delaminasyon/lif kırılmasından farklı olarak, çekme tarafında mikro-çatlak başlama ve radyus boyunca hızlı ilerleme şeklinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle Bölüm 2’de yaptığımız tasarımda radyus iyileştirmeleri doğru bir öngörü ile insert tasarımı yapıldığını ortaya koymaktadır. İmalatta homojen dolgu, düşük boşluk, uygun kür koşulları bu tip için kritik öneme sahiptir.

Tablo 4.2: Eğilme deneyleri özet tablosu

Tip	Deney Sonuçları		Analiz Sonuçları	
	Ortalama Uzama (mm)	Ortalama Kuvvet (N)	Ortalama Normal Gerilme (MPa)	IRF
0°	9,74	17441,16	83,242	0,62
$\pm 90^\circ$	8,49	18080,27	87,279	0,63
$\pm 45^\circ$	12,76	18424,23	104,715	0,58
Kum katkılı tesiste üretilmiş izolator	3,34	20981,27	171,94	-
Mevcut kullanılan izolator	3,29	18700,62	157,67	-
90°	3,53	10004,53	54,118	0,81

Eğilme analizleri sonucunda, bel/orta kısım çevresinde çekme–basma çiftinin yüzeylerde tepe yaptığı ve buna eşlik eden kesme akısının arttığı gözlenmiştir; bu birleşik etki, söz konusu bölgede gerilme yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu nedenle orta kısmının konik ve daha geniş çapa sahip olacak biçimde tasarlanması, etkin kesit alanını artırarak hem eğilme momentinin hem de kesme gerilmelerinin etkisini dağıtıcı yönde çalışmakta; dolayısıyla uygun bir tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilmektedir.

Sıradan incelemeye başlandığında öncelikle yükün fiberlere dik geldiği laminasyon incelenmiştir. ~9,74 mm uzamada ~17,4 kN tepe yük elde edilmiştir. Analizden çıkan ortalama aksenal gerilme ~83 MPa ve IRF $\approx 0,62$ (yerel tepelere doğru 0,65 civarı). Bu değerler, numunenin kırılmaya yaklaşmadan önce anlamlı bir güvenlik payıyla yük taşıdığını göstermektedir.

IRF haritasında 3.52’de bel/radyus bölgesinde doğrusal uzanan matris kesme ve yer yer basma kümelenmeleri gözlenmektedir. Bu bölge, eğilmede eğilme momentinin ve kesme akısının en yüksek olduğu kısımdır. Numuneler üzerinde delaminasyon izleri doğrusal çizgisel biçimde gözlenmiştir. Bel bölgesinde yoğunlaşan matris kesme gerilmeleri Şekil hasarı başlatıp doğrusal biçimde ilerletmiştir. Bu ilerleyiş, analizdeki yüksek IRF “kırmızı bantları” ile de birebir örtüşmektedir. İzolatör geometrisinde söz konusu bölgenin şişkin konik bir biçimde tasarlanması, gerilme yığılmasının olduğu hat boyunca etkin kesit alanını artırdığı için yerinde bir tasarım tercihidir (gerilme yoğunlaşmasını azaltıcı yönde etki eder).

$\pm 90^\circ$ ’yi incelediğimizde: Analizde IRF alanı, bel bölgesinde çapraz ($\pm 45^\circ$) bantlar halinde yoğunlaşmıştır; baskın hasar modları matris kesme ve sıkışma tarafında matris basma etiketleriyle görülmüştür. Deney fotoğraflarında (Bkz. Şekil 3.68) kırık izi ve çatlaklar, gövde üzerinde çapraz/şerit şeklinde ilerleyerek analizin (Bkz. Şekil 3.71) çapraz formdaki kayma bantlarıyla aynı geometrik hatta gelişmiştir. Bu eşleşme, eğilme altında 90° tabakaların yükü düzlem içi kayma üzerinden aktardığını ve matris-kaynaklı bir kırılma karakteri sergilediğini doğrulamıştır. $\pm 90^\circ$ için ortalama yük 18 080 N, uzama 8,49 mm, hesaplanan ortalama normal gerilme $\approx 87,3$ MPa, IRF $\approx 0,63$ ’tür. IRF’ler kıyaslandığında, $\pm 90^\circ$ dizilim $\pm 45^\circ$ ’e kıyasla daha kırılğan bir güvenlik marjı sunmuştur ($\pm 45^\circ$ IRF $\approx 0,58$).

$\pm 45^\circ$ ' yi incelediğimizde: Hasar biçimi pmC ve pmB yani matris kesme ve basma baskındır. IRF haritalarında (Bkz. Şekil 3.82) bel bölgesinde $\pm 45^\circ$ yönlü diyagonal bantlar boyunca hem kesme hem basma etiketlerinin kümелendiği görülüyor. Bu desen, fotoğraflarda görülen helezonsu/çapraz ilerleyen yırtılma ve kayma izleriyle birebir örtüşüyor. Kırık yüzeyler $\pm 45^\circ$ doğrultusunu takip eden kesme-kayma izleri taşıyor.

IRF seviyesi $\pm 45^\circ$ için ortalama 0,58 bulunmuştur. Gerilme büyüklüğü ve tabakalar arası dağılım ise ortalama 105 MPa elde edilmiştir. Bükme altında maksimum gerilmeler kabuk dış yüzeylerinde (PLY6) oluşurken, $\pm 45^\circ$ istif sayesinde tabakalar arasında eksenel gerilme farkları $0^\circ/90^\circ$ dizilime göre daha ılımlıdır (yaklaşık 98–117 MPa bandı). Bu, $\pm 45^\circ$ 'in düzlem içi kaymayı (τ_{12}) etkin taşımasıyla ilişkilidir; yük transferinin büyük bölümü kesme üzerinden yürümektedir.

90° en zayıf konfigürasyon olmuştur. Deneylerde ortalama 10,0 kN taşıma ve 3,53 mm uzama ile en düşük dayanım ve süneklik bu konfigürasyonda ölçülmüştür. Analizde de ortalama eksenel gerilme ≈ 54 MPa ve IRF $\approx 0,81$ ile en riskli durum görülmüştür.

Fotoğraflarda izolatörün bel bölgesinde çizgisel (bant) şekilde ilerleyen hasar (Bkz. Şekil 3.64), ACP' de bel bölgesi çevresinde gözükürken ve burada oluşan yüksek IRF bandı ile aynı eksenel ve aynı formda gözlenmiştir hasar (Bkz. Şekil 3.67). Bu bant; dış lif/katmanlarda çekme, karşı yüzde basma etkilerinin tepe yaptığı kesitte matris-odaklı gerilme yığılmasına karşılık gelmektedir. Benzer bir hasar ilerlemesi Sheng' in kompozit izolatörlerin ve silindirik elektrikli ekipmanların sismik davranışını simüle ettiği çalışmasında gözlemlenmiştir (S. Li et al., 2018). Orta kesitteki flanş yüzeyin çatlamasının ardından kompozit yapının yırtılması ile hasar devam etmiştir. Hasar modu ise IRF haritalarında matris çekme gerilmesi olarak gözükmektedir. Lifler yük doğrultusunda etkin eksenel taşıyıcı olamadığından, hasar matris kontrollü başlamakta ve geometrik süreksizlik boyunca çizgisel olarak ilerlemektedir.

Son olarak reçine/kum dolgulu liffsiz izolatörlerde eğilme yüklemesi altında kuvvet–sehim eğrilerinin kırılma anına dek yaklaşık doğrusal seyrettiği ve kırılmanın gevrek biçimde, düşük sehim değerlerinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Kırılma çatlaklarının bel bölgesinde başladığı ve çevresel doğrultuda çizgisel olarak ilerlediği tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 3.27 ve Şekil 3.29).

Sonlu eleman analizinde maksimum von Mises gerilmelerinin bel radyüsünde yoğunlaştığı belirlenmiş; bu bölgedeki gerilme yığılması, deney numunelerinde çevresel yönde gelişen çizgisel çatlakların konumu ve doğrultusu ile birebirini doğrulamıştır. Numunelerin lif içermemesi nedeniyle kompozit tabanlı hasar kriterleri uygulanmamış, von Mises esaslı bir değerlendirme yapılmıştır. Bel bölgesinde radyüs/taper optimizasyonu ve keskin kesit geçişlerinin azaltılması ile gerilme yığılmalarının azaltılabileceği; ayrıca matris tokluğunun iyileştirilmesi ve proses kaynaklı boşlukların minimize edilmesi ile gevrek kırılma eğiliminin düşürülebileceği değerlendirilmiştir.

Elektriksel performansın hakkında ise şu bulgulara varılmıştır: Meger testi sonuçları, tüm numunelerin yüzey izolasyon dirençlerinin çok yüksek olduğunu ve ölçüm sınırlarının ötesinde kaldığını göstermiştir. Bu durum, üretim sırasında iç yapıda süreksizlik bulunmadığını ve yüksek izolasyon kalitesini desteklemektedir.

Uygulanan gerilim testi sonrası sadece $\pm 90^\circ$ dizilimli numunelerin bazıları yüksek deşarj göstermiştir. Ancak üretimin tekrarlanmasıyla bu numuneler de başarıyla testi geçmiştir. Tuncer'in de belirttiği üzere, özellikle alan yönlerinin karmaşık olduğu uygulamalarda ve el yatırması gibi manuel süreçlerde lamine kalitesi ile üretim tutarlılığı kritik önemdedir; dolayısıyla dielektrik dayanım, malzemenin üretim kalitesinden belirgin biçimde etkilenmektedir (Tuncer et al., 2009b).

Araştırma sonucunda gelecek kullanımlara yol göstermek amacıyla eğilme ve çekme de optimum düzeyde performansı sağlayan bir çiftin de belirlenmesi amaçlanmıştır. Fiber takviyeliler, mevcutta kullanılan ve reçine-kum karışımıyla üretilmiş izolatörler karşılaştırıldığında, fiber takviyeli numuneler eğilmede benzer mukavemet sergileseler de çekme de daha üstün sonuçlar vermiştir. Dielektrik olarak benzer sonuçlar sergileseler de mekanik özelliklerinin daha iyi olması fiber takviyelileri öne çıkarmaktadır.

0° ve 45° yönlendirmeye sahip tiplerin çalışma sonunda daha başarılı performans sergilediği görülmektedir. Buradan yola çıkılarak hibrit bir yapının daha verimli olabileceği düşünülmüştür. Hem çekme de hem de eğilme de çeşitli hibrit yapılar denenmiştir. Bunlardan sıradan dört tanesi Tablo 4.4 ve Tablo 4.5' te işlenmiş, IRF sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 4.3: Hibrit çekme dizimi denemeleri

Deneme 1		Deneme 2		Deneme 3		Deneme 4	
Dizim	IRF	Dizim	IRF	Dizim	IRF	IRF	IRF
Ply1 0°	0,327	Ply1 +45°	0,596	Ply1 +45°	0,739	Ply1 0°	0,326
Ply2 0°	0,288	Ply2 -45°	0,455	Ply2 -45°	0,577	Ply2 +45°	0,456
Ply3 0°	0,265	Ply3 +45°	0,423	Ply3 +45°	0,546	Ply3 0°	0,264
Ply4 +45°	0,39	Ply4 0°	0,253	Ply4 90°	0,881	Ply4 -45°	0,378
Ply5 -45°	0,384	Ply5 0°	0,255	Ply5 90°	0,838	Ply5 0°	0,256
Ply6 +45°	0,511	Ply6 0°	0,273	Ply6 90°	0,948	Ply6 +45°	0,499
Ortalama	0,361	Ortalama	0,376	Ortalama	0,755	Ortalama	0,363

Tablo 4.4: Hibrit eğilme dizimi denemeleri

Deneme 1		Deneme 2		Deneme 3		Deneme 4	
Dizim	IRF	Dizim	IRF	Dizim	IRF	IRF	IRF
Ply1 0°	0,596	Ply1 +45°	0,612	Ply1 +45°	0,568	Ply1 0°	0,59
Ply2 0°	0,565	Ply2 -45°	0,603	Ply2 -45°	0,565	Ply2 +45°	0,608
Ply3 0°	0,549	Ply3 +45°	0,608	Ply3 +45°	0,542	Ply3 0°	0,545
Ply4 +45°	0,593	Ply4 0°	0,552	Ply4 90°	0,724	Ply4 -45°	0,607
Ply5 -45°	0,612	Ply5 0°	0,564	Ply5 90°	0,725	Ply5 0°	0,554
Ply6 +45°	0,655	Ply6 0°	0,583	Ply6 90°	0,773	Ply6 +45°	0,646
Ortalama	0,595	Ortalama	0,587	Ortalama	0,6495	Ortalama	0,592

Ortalama IRF'ler karşılaştırıldığında, Deneme 4 diziliminin çekmede 0,363, eğilmede ise 0,592 ortalama IRF ile, tüm seçenekler arasında en dengeli ve en düşük toplam risk düzeyini sağladığı görülmüştür.

Elde edilen sonuçların mekanik temelleri incelendiğinde; 0° tabakaların içten dışa doğru aralıklı yerleştirilmesiyle aksenal rijitlik ve yük taşıma kapasitesinin çekme altında korunabildiği, $\pm 45^\circ$ tabakaların ise eğilme sırasında baskın olan düzlem-içi kayma gerilmelerini (τ_{12}) taşıyarak pmC (matrix shear failure) eğilimini düşürdüğü ve pd (delaminasyon) riskini azaltacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak, Deneme 4 sekansının hem çekme hem eğilme yüklemelerinde homojen fiber dağılımı sayesinde; yük taşıma, hasar başlatma ve ilerleme direnci açısından en dengeli performansı sunduğu saptanmış ve tez kapsamında her iki yükleme yönü için de kullanılabilir nihai laminasyon olarak seçilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar göstermiştir ki, fiber dizilimi ve reçine yapısı hem izolatörlerin taşıyıcı mekanik performanslarını hem de elektriksel güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Liflerin yönlendirilmesi sayesinde yüksek performanslı ve daha güvenilir izolatörler üretilbileceği ortaya konmuştur. Ayrıca farklı dizilimlerin yerel gerilme dağılımı

ve kırılma mekanizmaları üzerinde yarattığı etkiler, ilerleyen çalışmalar için tasarım optimizasyonuna ışık tutacaktır.

5. KAYNAKLAR

- Ali, H. T., Akrami, R., Fotouhi, S., Pashmforoush, F., Fragassa, C., & Fotouhi, M.** (2020). Effect of the stacking sequence on the impact response of carbon-glass/epoxy hybrid composites. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 18(1), 69–77. <https://doi.org/10.22190/FUME191119010A>
- Amini, M., & Khavandi, A.** (2018). Evaluation of the electrical properties and mechanical behavior of insulator's composite core in harsh environments. *Materials Research Express*, 5(11). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae8d4>
- ASTM International.** (2017). *ASTM D790 standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. <https://doi.org/10.1520/D0790-17>
- Barbero, E. J.** (2010). *Introduction to Composite Materials Design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439894132>
- Belgacem, L., Ouinas, D., Viña Olay, J. A., & Amado, A. A.** (2018). Experimental investigation of notch effect and ply number on mechanical behavior of interply hybrid laminates (glass/carbon/epoxy). *Composites Part B: Engineering*, 145, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.03.026>
- Beyene, A. T., Belingardi, G., & Koricho, E. G.** (2016). Effect of notch on quasi-static and fatigue flexural performance of Twill E-Glass/Epoxy composite. *Composite Structures*, 153, 825–842. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.094>
- Bhalerao, S., Ambhore, N., & Kadam, M.** (2022). Polymer matrix composite in high voltage applications: A review. In *Biointerface Research in Applied Chemistry* (Vol. 12, Issue 6, pp. 8343–8352). AMG Transcend Association. <https://doi.org/10.33263/BRIAC126.83438352>
- Cuntze, R. G., & Freund, A.** (2004). The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates. *Composites Science and Technology*, 64(3–4), 343–377. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00218-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00218-5)
- Daniel, I. M., & Ishai, O.** (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Davila, C. G., Camanho, P. P., & Rose, C. A.** (2005). Failure criteria for FRP laminates. *Journal of Composite Materials*, 39(4), 323–345. <https://doi.org/10.1177/0021998305046452>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Daynes, S., Tran, L. Q. N., Ming, A. Y. W., Canturri, C., & Feih, S.** (2022). Design and strength optimisation of inserts embedded into fibre reinforced laminates. *Composite Structures*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115744>
- De Turreil, C., Roberge, R., & Bourdon, P.** (1985). Long-term mechanical properties of high voltage composite insulators. In *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (Vol. 104, Issue 10). <https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.319138>
- Gebhardt, J., Schwennen, J., Lorenz, F., & Fleischer, J.** (2018). Structure optimisation of metallic load introduction elements embedded in CFRP. *Production Engineering*, 12(2), 131–140. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0820-5>
- Haider, I., Gul, I. H., Umer, M. A., & Baig, M. M.** (2023a). A Low-Cost Silica Fiber/Epoxy Composite with Excellent Dielectric Properties, and Good Mechanical and Thermal Stability. *Materials*, 16(23). <https://doi.org/10.3390/ma16237410>
- Haider, I., Gul, I. H., Umer, M. A., & Baig, M. M.** (2023b). A low-cost silica fiber/epoxy composite with excellent dielectric properties, and good mechanical and thermal stability. *Materials*, 16(23). <https://doi.org/10.3390/ma16237410>
- Hashin, Z.** (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2), 329–334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
- International Electrotechnical Commission.** (1990). *IEC 60273 Characteristics of indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltages greater than 1000 V.*
- International Electrotechnical Commission.** (1994). *IEC 60168 Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1000 V.*
- International Electrotechnical Commission.** (1999). *IEC 60660 insulators—Tests on indoor post insulators of organic material for systems with nominal voltages greater than 1 000 V up to but not including 300 kV.*
- International Electrotechnical Commission.** (2010). *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements.*
- International Electrotechnical Commission.** (2012). *Polymeric HV insulators for indoor and outdoor use – General definitions, test methods and acceptance criteria.*
- International Electrotechnical Commission.** (2013). *IEC 60243-1:2013—Electrical strength of insulating materials—Test methods—Part 1: Tests at power frequencies.*
- International Electrotechnical Commission.** (2025). *IEC 61109 Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators with AC voltage greater than*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 1000 V and DC voltage greater than 1 500 V – Definitions, test methods and acceptance criteria.*
- International Organization for Standardization.** (2019). *ISO 527-1 plastics— Determination of tensile properties—Part 1: General principles.*
- International Organization for Standardization.** (2023). *ISO 527-4 Plastics — Determination of tensile properties — Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites.*
- International Organization for Standardization.** (2021). *ISO 527-5 Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites.*
- Jae Woo Kim, Grigori A. Medvedev, & James M. Caruthers.** (2013). Nonlinear stress relaxation in an epoxy glass and its relationship to deformation induced mobility. *Polymer*, 54(15), 3949–3960. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.034>
- Jones, R. M.** (2018). *Mechanics of Composite Materials.* CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781498711067>
- Kim, J. S., Kim, S. J., Min, K. J., Choi, J. C., Eun, H. S., & Song, B. K.** (2022). A Study on Tensile Behavior According to the Design Method for the CFRP/GFRP Grid for Reinforced Concrete. *Materials*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010357>
- Kim, S. Y., Shim, C. S., Sturtevant, C., Kim, D. D. W., & Song, H. C.** (2014). Mechanical properties and production quality of hand-layup and vacuum infusion processed hybrid composite materials for GFRP marine structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(3), 723–736. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0208>
- Li, J.; Z. H.** (2020). Failure mechanisms of fiber-reinforced composites with varied orientations. *Materials Science and Engineering: A*, 789, 1–20.
- Li, S., Tsang, H. H., Cheng, Y., & Lu, Z.** (2018). Seismic testing and modeling of cylindrical electrical equipment with GFRP composite insulators. *Composite Structures*, 194, 454–467. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.036>
- Madsen, S. F., Mraller, F., Lars, L., Hansen, B., Bertelsen, K., Holboell, J., & Henriksen, M.** (2004). Breakdown tests of Glass Fibre Reinforced Polymers (GFRP) as part of Improved Lightning Protection of Wind Turbine Blades. In *IEEE Intemational Symposium on Electrical Insulation.*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mallick, P.** (n.d.). *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design*.
- McLellan, D.** (2023). *Corvette from the Inside: The 50-Year Development History as Told*. Bentley Publishers. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/B-858/>
- Middendorf, P., & Metzner, C.** (2011). Aerospace applications of non-crimp fabric composites. In *Non-Crimp Fabric Composites: Manufacturing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-762-4.50018-7>
- Mishra, N., Khan, U. A., Srivastava, A., & Asthana, N.** (2024). Effect of the Glass Fiber Orientation on Mechanical Performance of Epoxy based Composites. *Prabha Materials Science Letters*, 3(2), 175–190. <https://doi.org/10.33889/pmsl.2024.3.2.011>
- Mouritz, A. P., Gellert, E., Burchill, P., & Challis, K.** (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*, 53(1), 21–42. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(00\)00175-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00175-6)
- Muth, M., Schwennen, J., Bernath, A., Seuffert, J., Weidenmann, K. A., Fleischer, J., & Henning, F.** (2018). Numerical and experimental investigation of manufacturing and performance of metal inserts embedded in CFRP. *Production Engineering*, 12(2), 141–152. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0829-9>
- Nishijima, S., & Hara, M.** (1998). Mechanical influence on long-term dielectric performance of insulants. In *Cryogenics* (Vol. 38).
- Ogbonna, V. E., Popoola, A. P. I., Popoola, O. M., & Adeosun, S. O.** (2022). A review on corrosion, mechanical, and electrical properties of glass fiber-reinforced epoxy composites for high-voltage insulator core rod applications: challenges and recommendations. In *Polymer Bulletin* (Vol. 79, Issue 9, pp. 6857–6884). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03846-z>
- Park, C. H.** (1987). A study of the dielectric and mechanical property interactions of glass-cloth/epoxy composites. In *IEEE Transactions on Electrical Insulation* (Issue 4).
- Park, H., Ahn, M. S., JLee, T., & ILee, andD.** (2004a). Compressive Strength of FRP for Insulator. In *International Conference on Solid Dielecnicr*.
- Park, H., Ahn, M. S., JLee, T., & ILee, andD.** (2004b). Compressive strength of FRP for insulator. In *International Conference on Solid Dielecnicr*.
- Pinho, S. T., Iannucci, L., & Robinson, P.** (2006). Physically based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- I: Development. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(1), 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.04.016>
- Pleša, I., Nožingher, P. V., Schlögl, S., Sumereder, C., & Muhr, M.** (2016). Properties of polymer composites used in high-voltage applications. In *Polymers* (Vol. 8, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym8050173>
- Prasanthi, P. P., Ramacharyulu, D. A., Babu, K. S., Madhav, V. V. V., Chaitanya, C. S., Saxena, K. K., Revathi, V., Abduvalieva, D., & Bandhu, D.** (2024). Role of fiber orientation and design on thermal and mechanical properties of natural composite. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02042-3>
- Puck, A.** (1998). Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, 58(7), 1045–1067. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(96\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00140-6)
- Puck, A., & Schürmann, H.** (2002). Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models. *Composites Science and Technology*, 62(12–13), 1633–1662. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00208-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00208-1)
- Saeed, U., Al-Turaif, H., & Siddiqui, M. E.** (2020). Stress relaxation performance of glass fiber-reinforced high-density polyethylene composite. *Polymers and Polymer Composites*, 29(6), 705–713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/09673911209320>
- Schürmann, H.** (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72190-1>
- Schwennen, J., Sessner, V., & Fleischer, J.** (2016). A new approach on integrating joining inserts for composite. *ElsevierAS Swapnil, B SatheSandip, P ChaudhariBapu, SJ Vishalmaterials Today: Proceedings, 2017•Elsevier, 44, 310*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.121>
- Somashekar, A. A., Bickerton, S., & Bhattacharyya, D.** (2012). Modelling the viscoelastic stress relaxation of glass fibre reinforcements under constant compaction strain during composites manufacturing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(7), 1044–1052. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.02.004>
- Swapnil, A., SatheSandip, B., ... P. C. today, & 2017, undefined.** (2017). Experimental investigation of mechanical properties of glass fibre/epoxy composites with variable volume fraction. *ElsevierAS Swapnil, B SatheSandip, P ChaudhariBapu, SJ*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vishalmaterials Today: Proceedings, 2017•Elsevier.*
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317310040>
- Todoroki, A.** (2016). New analytical method for electric current and multiple delamination cracks for thin CFRP cross-ply laminates using equivalent electric conductance. *Advanced Composite Materials, 25*(1), 87–101.
<https://doi.org/10.1080/09243046.2014.985420>
- Tsai, S. W., & Hahn, H. T.** (1980). *Introduction to Composite Materials*. Technomic Publishing.
- Tsai, S. W., & Wu, E. M.** (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials, 5*(1), 58–80.
<https://doi.org/10.1177/002199837100500106>
- Tuncer, E., Sauers, I., James, D. R., & Ellis, A. R.** (2009a). Electrical insulation characteristics of glass fiber reinforced resins. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19*(3), 2359–2362. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2018748>
- Tuncer, E., Sauers, I., James, D. R., & Ellis, A. R.** (2009b). Electrical insulation characteristics of glass fiber reinforced resins. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 19*(3), 2359–2362. <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2018748>
- Türk Standardları Enstitüsü.** (2010). *Betonarme için donatı çeliği—Steel for the reinforcement of concrete—Reinforcing steel*.
- Van Hulle, S.** (2023). *Preliminary design of a transverse composite leaf spring for electric vehicles*.
- Wang, Z., Zhang, D., Yang, M., Fang, J., Zhou, S., & Wang, W.** (2020a, September 6). Study on Bending Stiffness of Solid Post Composite Insulator. *7th IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2020 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/ICHVE49031.2020.9279975>
- Wang, Z., Zhang, D., Yang, M., Fang, J., Zhou, S., & Wang, W.** (2020b, September 6). Study on bending stiffness of solid post composite insulator. *7th IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2020 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/ICHVE49031.2020.9279975>
- ASTM International.** (2017). *ASTM D790 3-point flexure test on plastics*.
<https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/3-point-flexure-test-astm-d790/>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Selçuk İlhan BİLGİN

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2019
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2009
Lise	Fatma Emin Kutvar Anadolu Lisesi	2004

Yayın Listesi

Bilgin, S. İ., Çetinel, H., & Yalçın, E. (2025). Investigation of mechanical properties in variable oriented glass fiber reinforced insulators. Dicle University Journal of Engineering. [Tezden türetilmiştir]