



**CAM ELYAF TAKİYELİ KOMPOZİTLERDE LİF YÖNELİMİNİN
ELEKTRİKSEL DİRENÇ DEĞİŞİM DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

Muhammet Hamza BEKGÖZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammet Hamza BEKGÖZ
20/12/2024

CAM ELYAF TAKİYELİ KOMPOZİTLERDE LİF YÖNELİMİNİN ELEKTRİKSEL DİRENÇ DEĞİŞİM DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammet Hamza BEKGÖZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Elyaf takviyeli polimerler (FRP), yüksek özgül mukavemetleri ve korozyon dirençleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. FRP kompozitlerin hizmet koşullarında yapısal bütünlüklerinin korunması için yerinde durum izleme kritik öneme sahiptir. Elektriksel direnç değişimi (ERC) yöntemi, yerinde hasar tespiti için umut verici bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) dolgulu eş yönlü cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin ERC özellikleri üzerinde elyaf yönelimlerinin etkisi üç nokta eğme ve çekme testlerinde incelenmiştir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda, kompozitler içinde elektriksel iletkenlik sağlamak için %0,3 ağırlık oranında MWCNT kullanılmıştır. Kompozitler, eş yönlü 300 gr/m² alansal yoğunluklu cam elyafları 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° açılarında ve dokuma tipi cam elyafları ise 200 gr/m² ve 300 gr/m² alansal yoğunluklu kullanılarak vakum torbalama yöntemi ile üretilmiştir. Testler boyunca numunelerin elektriksel direnci, bir multimetre ile dikkatlice ölçülmüştür. Sonuçlar, kompozitlerin ERC özelliklerinin cam elyaf kompozitlerin takviye elemanlarının yönelimi tarafından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Deney sonuçlarına göre elyaf yönlenmesi 0°'den 90°'ye doğru arttıkça genel olarak direnç değişiminin azaldığı gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : Fiber takviyeli polimerler, self sensing, MWCNT, yapısal sağlık izleme, ERC

Sayfa Adedi : 134

Danışman : Prof. Dr. Nimeti KALAYCI

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Fatih TURAN

EFFECTS OF FIBRE ORIENTATION ON THE ELECTRICAL RESISTANCE CHANGE BEHAVIOUR OF GLASS FIBRE REINFORCED COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Muhammet Hamza BEKGÖZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymers (FRPs) are widely used in aerospace, automotive, and other industries due to their high specific strength and corrosion resistance. In-situ condition monitoring is critical to maintaining the structural integrity of FRP composites under service conditions. The Electrical Resistance Change (ERC) method is a promising approach for in-situ damage detection. In this study, the effects of fiber orientations on the ERC properties of multi-walled carbon nanotube (MWCNT)-filled unidirectional glass fiber-reinforced epoxy composites were investigated through three-point bending and tensile tests. In line with the conducted studies, 0,3 wt. % MWCNT was used to ensure electrical conductivity within the composites. The composites were manufactured using the vacuum bagging method, with unidirectional glass fibers of 300 g/m² areal density oriented at 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, and 90°, and woven glass fibers with areal densities of 200 g/m² and 300 g/m². The electrical resistance of the samples was carefully measured during the tests using a multimeter. The results showed that the ERC properties of the composites were significantly influenced by the orientation of the reinforcement elements in the glass fiber composites. According to the experimental results, it was observed that as the fiber orientation increased from 0° to 90°, the overall change in resistance generally decreased.

Science Code : 91417

Key Words : Fibre reinforced polymers, self sensing, MWCNT, structural health monitoring, ERC

Page Number : 134

Supervisor : Prof. Dr. Nimeti KALAYCI

Co-Supervisor : Asst. Prof. Dr. Fatih TURAN

TEŞEKKÜR

Bu uzun ve zahmetli süreçte yüksek lisans tezimi tamamlamamda gösterdikleri sabır, anlayış ve katkılarla yanımda olan kıymetli danışmanlarım Sayın Prof. Dr. Nimeti KALAYCI hocama ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih TURAN hocama en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Tezimin her aşamasında, fikirleriyle beni yönlendiren, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak bu süreci en verimli şekilde yönetmeme olanak tanıyan hocalarıma, bilimsel düşünce yeteneğimi geliştirmem için beni teşvik ettikleri, her daim cesaretlendirdikleri ve sabırla destekledikleri için minnettarım.

Ayrıca tez konumu belirleme aşamasında fikirleriyle bana yol gösteren ve çalışmamın temelini sağlam bir şekilde atmamda önemli katkılarda bulunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih TURAN hocama da özel olarak teşekkür etmek isterim. Bu süreçte emek veren tüm değerli akademisyenler ve arkadaşlarıma da yardımları ve destekleri için şükranlarımı sunuyorum.

Bu tez çalışması 23ADP226 numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında (102-Araştırma Destek Projesi) Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından desteklenmiştir. İlgili kurum ve kuruluşlara maddi desteklerinden ötürü teşekkür ederiz

Tüm eğitim ve öğrenim hayatım boyunca bana her daim destek olan ve varlıklarıyla güç veren sevgili aileme en içten duygularıyla ve tüm samimiyetimle teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xx
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. KOMPOZİT MALZEMELER VE UYGULAMA ALANLARI	11
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
3.1.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler	13
3.1.2. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....	14
3.1.3. Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozit malzemeler.....	14
3.1.4. Parçacıklarla takviyeli kompozit malzemeler	14
3.1.5. Dispersiyonla mukavemetlendirilmiş kompozit malzemeler.....	15
3.1.6. Tabakalı kompozit malzemeler	15
3.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları	16
3.2.1. Cam elyaf	17
3.3. Cam Fiber Kumaş Türleri	19
3.4. Kompozit Malzemelerde Matris Malzemeleri	19
3.4.1. Termoplastik malzemeler	21
3.4.2. Termoset malzemeler	22

Sayfa

3.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları	23
3.5.1. Plastik matrisli kompozitlerin üretimi.....	24
3.5.2. Elle yatırma yöntemi.....	25
3.6. Kompozit Malzemelerin Hasar Mekanizmaları.....	26
3.6.1. Matris çatlaması	26
3.6.2. Fiber kırılması	26
3.6.3. Bağ kopması.....	27
3.6.4. Delaminasyon.....	27
3.6.5. Fiber çıkması.....	27
3.6.6. Mikro burkulma	27
3.6.7. Bükülme bantları.....	27
3.7. Yapısal Sağlık İzleme.....	27
3.7.1. Elektrik direnç ölçümü.....	28
3.7.2. Kızılötesi termografi	30
3.8. Karbon Nanotüp.....	31
3.8.1. KNT uygulama alanları.....	32
3.8.2. KNT dağıtımı (Ultrasonikasyon)	33
3.9. Polimer Kompozit Malzemelerde Mekanik Testler	34
3.9.1. Plastik kompozit malzemelerde 3 nokta eğme testi	34
3.9.2. Plastik kompozit malzemelerde çekme testi	36
3.10. Weibull Analizi	36
3.11. Ortotropik Tabaka	36

	Sayfa
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	45
4.1. Malzeme Seçimi.....	45
4.2. Numune Üretim Teknikleri	46
4.3. Numune Hazırlama	51
4.4. Deney Düzenekleri.....	52
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
5.1. Eğme Testi Sonuçları	55
5.2. Eğme Testi Hasar Görsel Analizi	68
5.3. Çekme Testi Sonuçları	77
5.4. Çekme Testi Görsel Hasar ve Termal Kamera Analizi.....	92
5.5. Eğme ve Çekme Test Simülasyonlarının ANSYS ile Modellenmesi.....	104
5.5.1 Eğme test simülasyonlarının ansys ile modellenmesi.....	106
5.5.2 Çekme test simülasyonlarının ansys ile modellenmesi.....	114
5.6. Eğme ve Çekme Numunelerinin Weibull Analizi	121
5.6.1. Eğme numunelerinin weibull analizi	122
5.6.2. Çekme numunelerinin weibull analizi	124
6. SONUÇLAR.....	129
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ.....	134

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3. 1. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri	17
Çizelge 3. 2. Cam fiberlerin karakteristikleri ve bileşenleri	18
Çizelge 3. 3. Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	22
Çizelge 3. 4. Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	23

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. a) Eş yönlü sürekli elyaflar, b) Kesikli elyaflar, c) Ortogonal elyaflar, d) Parçacık şekilli elyaflar, e) Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş elyaflar....	13
Şekil 3.2. Parçacık takviyeli ve dispersiyonla üretilmiş kompozit malzeme. (a) Büyük parçacık takviyeli kompozit malzeme, (b) Küçük parçacık takviyeli kompozit malzeme.....	14
Şekil 3.3. a) Eş yönlü kompozit malzeme, b) Çapraz tabakalı kompozit malzeme.....	16
Şekil 3.4. Cam fiber kumaş türleri	19
Şekil 3.5. Matrislerin sıcaklık ve yoğunluk özellikleri	20
Şekil 3.6. Elle yatırma metodu üretim yöntemi	25
Şekil 3.7. SWCNT ve MWCNT partiküllerinin yapıları	31
Şekil 3.8. Bir grafit altıgen levhasının karbon nanotüp oluşturacak şekilde nasıl rulo haline getirildiğini gösteren şematik diyagram.....	32
Şekil 3.9. Farklı kiraliteye sahip KNT örnekleri a) armchair (metalik), b) zigzag (metalik ya da yarı iletken), c) chiral (metalik ya da yarı iletken).....	32
Şekil 3.10. a) Uçağın dış yapısında yıldırım iletcek düşük dirençli yol, b) Yıldırım çarpmasının etkisi.....	33
Şekil 3.11. Eğme testi yükleme burnu ve destek yarıçapı konumları	35
Şekil 3.12. Eş yönlü cam fiber kompozit malzeme deformasyon grafiği.....	38
Şekil 3.13. Açılı eş yönlü cam fiber kompozit malzemede deformasyon görseli	39
Şekil 3.14. Açılı eş yönlü cam fiber kompozit malzemede genel üç boyutlu gerilme görseli.....	39
Şekil 3.15. Yük altında numunede oluşan normal şekil değişimi görseli	40
Şekil 3.16. Yük altında numunede oluşan kesme şekil değişimi görseli	40
Şekil 3.17. Genelleştirilmiş hooke kanunu	41
Şekil 3.18. Ortotropik kompozit malzemeler için gerilmeler	41
Şekil 4.1. a) Eş yönlü cam elyaf, b) Dokuma tipi cam elyaf	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. Eğme numunesinin SolidWorks modelinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve boyutları.....	46
Şekil 4.3. a) Cam fiber serimi yapılmadan önce, b) Cam fiber serim işlemi tamamlandıktan sonra	48
Şekil 4.4. Eğme testi numuneleri için ultrasonik dispersiyon işleminin yapıldığı cihaz	49
Şekil 4.5. Çekme testi numuneleri için ultrasonik dispersiyon işleminin yapıldığı cihaz	50
Şekil 4.6. Çekme numunesinin SolidWorks modelinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve boyutları.....	50
Şekil 4.7. Çekme numunelerinin sıkıştırma plakası ile yapıştırılması.....	51
Şekil 4.8. 150x200 mm ölçülerinde üretilen hibrit kompozit plaka	52
Şekil 4.9. Eğme testlerinin yapıldığı mekanik test cihazı	53
Şekil 4.10. Çekme testlerinin yapıldığı mekanik test cihazı	53
Şekil 4.11. Çekme testi boyunca kullanılan termal kamera	54
Şekil 5.1. a) Eş yönlü örgü tipindeki cam fiber kompozit malzemelerin ilk direnç değerleri, b) Dokuma tipindeki cam fiber kompozit malzemelerin ilk direnç değerleri	55
Şekil 5.2. Eş yönlü cam fiber yönelimlerine göre eğme yükü ve uzama grafiği	57
Şekil 5.3. a) 200 gr/m ² dokuma tipi cam fiber numunenin eğme yükü ve uzama grafiği, b) 300 gr/m ² dokuma tipi cam fiber numunenin eğme yükü ve uzama grafiği	57
Şekil 5.4. 0° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	58
Şekil 5.5. 15° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	59
Şekil 5.6. 30° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	59
Şekil 5.7. 45° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	60

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. 60° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	60
Şekil 5.9. 75° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	61
Şekil 5.10. 90° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği.....	61
Şekil 5.11. GFRPC eğme numunelerinin ortalama direnç değişim karşılaştırması.....	62
Şekil 5.12. 0° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Üst yüzey direnç değişim grafiği.....	63
Şekil 5.13. 0° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Alt yüzey direnç değişim grafiği.....	64
Şekil 5.14. 45° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Üst yüzey direnç değişim grafiği.....	64
Şekil 5.15. 45° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Alt yüzey direnç değişim grafiği.....	65
Şekil 5.16. 90° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Üst yüzey direnç değişim grafiği.....	65
Şekil 5.17. 90° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Alt yüzey direnç değişim grafiği.....	66
Şekil 5.18. GFRPC numunelerin eğilme mukavemetlerinin karşılaştırması	66
Şekil 5.19. Farklı fiber yönelimli GFRPC numunelerin eğilme elastisite modülü kıyaslaması.....	67
Şekil 5.20. 0° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	68
Şekil 5.21. 15° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	68
Şekil 5.22. 30° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	69
Şekil 5.23. 45° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	69
Şekil 5.24. 60° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	70
Şekil 5.25. 75° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	70
Şekil 5.26. 90° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi.....	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.27. 200 gr/m ² alansal yoğunluklu dokuma tipi kumaşla üretilmiş kompozit numunenin kırılma tipi.....	71
Şekil 5.28. 300 gr/m ² alansal yoğunluklu dokuma tipi kumaşla üretilmiş GFRPC numunenin kırılma tipi.....	72
Şekil 5.29. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	72
Şekil 5.30. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü.....	73
Şekil 5.31. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	73
Şekil 5.32. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü.....	74
Şekil 5.33. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	74
Şekil 5.34. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü.....	75
Şekil 5.35. 15° yönelimli eğme numunesinde oluşan delaminasyonun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü.....	75
Şekil 5.36. Eğme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	76
Şekil 5.37. a) Eş yönlü ve dokuma tipindeki cam fiber kompozit malzemelerin ilk direnç değerleri	77
Şekil 5.38. 0° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	78
Şekil 5.39. 15° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	78
Şekil 5.40. 30° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	79
Şekil 5.41. 45° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	79
Şekil 5.42. 60° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	80
Şekil 5.43. 75° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	80
Şekil 5.44. 90° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği.....	81
Şekil 5.45. 200 gr/m ² dokuma tipi GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği	81

Şekil	Sayfa
Şekil 5.46. 300 gr/m ² dokuma tipi GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği	82
Şekil 5.47. Açısal yönlenmeye ve malzeme türüne bağlı olarak numunelerin yük altında uzama grafiği.....	82
Şekil 5.48. Açısal yönlenmeye ve malzeme türüne bağlı olarak numunelerin yük taşıma kapasiteleri.....	83
Şekil 5.49. Çekme deneyinde elde edilen direnç değişiminin karşılaştırması.....	83
Şekil 5.50. Çekme numunelerinin mukavemet karşılaştırması.....	84
Şekil 5.51. a) Çekme deneyinde elde edilen yakınlaştırılmış Uzama/Yük kıyaslama grafiği, b) Çekme deneyinde elde edilen Uzama/Yük kıyaslama grafiği	84
Şekil 5.52. Çekme deneyinde elde edilen 0° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	86
Şekil 5.53. Çekme deneyinde elde edilen 15° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	87
Şekil 5.54. Çekme deneyinde elde edilen 30° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	87
Şekil 5.55. Çekme deneyinde elde edilen 45° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	88
Şekil 5.56. Çekme deneyinde elde edilen 60° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	88
Şekil 5.57. Çekme deneyinde elde edilen 75° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	89
Şekil 5.58. Çekme deneyinde elde edilen 90° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı.....	89
Şekil 5.59. Çekme deneyinde elde edilen 200 gr/m ² dokuma tipi numunenin direnç değişim davranışı	90
Şekil 5.60. Çekme deneyinde elde edilen 300 gr/m ² dokuma tipi numunenin direnç değişim davranışı	90
Şekil 5.61. Farklı fiber yönelimli GFRPC numunelerin çekme elastisite modülü kıyaslaması.....	91
Şekil 5.62. 0° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	92
Şekil 5.63. 15° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	92

Şekil	Sayfa
Şekil 5.64. 30° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	93
Şekil 5.65. 45° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	93
Şekil 5.66. 60° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	94
Şekil 5.67. 75° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	94
Şekil 5.68. 90° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı	95
Şekil 5.69. 200gr/m ² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı.....	95
Şekil 5.70. 300gr/m ² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı.....	96
Şekil 5.71. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü.....	96
Şekil 5.72. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü	97
Şekil 5.73. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü.....	97
Şekil 5.74. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü	98
Şekil 5.75. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü.....	98
Şekil 5.76. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü	99
Şekil 5.77. Çekme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	99
Şekil 5.78. Çekme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	100
Şekil 5.79. Çekme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü	100
Şekil 5.80. 0° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	101
Şekil 5.81. 15° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	101

Şekil	Sayfa
Şekil 5.82. 30° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	101
Şekil 5.83. 45° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	102
Şekil 5.84. 60° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	102
Şekil 5.85. 75° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	102
Şekil 5.86. 90° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	103
Şekil 5.87. 200gr/m ² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	103
Şekil 5.88. 300gr/m ² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü	103
Şekil 5.89. ANSYS-Pre simülasyon programında oluşturulan eğme test numunesi.	105
Şekil 5.90. ANSYS-Pre simülasyon programında oluşturulan çekme test numunesi. ..	105
Şekil 5.91. ANSYS Static Structural eğme testi 0° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	106
Şekil 5.92. ANSYS Static Structural eğme testi 15° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	107
Şekil 5.93. ANSYS Static Structural eğme testi 30° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	108
Şekil 5.94. ANSYS Static Structural eğme testi 45° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	109
Şekil 5.95. ANSYS Static Structural eğme testi 60° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	110
Şekil 5.96. ANSYS Static Structural eğme testi 75° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	111
Şekil 5.97. ANSYS Static Structural eğme testi 90° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri.....	112
Şekil 5.98. ANSYS Static Structural eğme testi lif yönlenmesi maksimum asal gerilme grafiği	113

Şekil	Sayfa
Şekil 5.99. ANSYS Static Structural çekme testi 0° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri.....	114
Şekil 5.100. ANSYS Static Structural çekme testi 15° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri	115
Şekil 5.101. ANSYS Static Structural çekme testi 30° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri	116
Şekil 5.102. ANSYS Static Structural çekme testi 45° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri	117
Şekil 5.103. ANSYS Static Structural çekme testi 60° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri.....	118
Şekil 5.104. ANSYS Static Structural çekme testi 75° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri	119
Şekil 5.105. ANSYS Static Structural çekme testi 90° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönelindeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme analizi.....	120
Şekil 5.106. ANSYS Static Structural çekme testi lif yönelenmesi maksimum asal gerilme grafiğı	121
Şekil 5.107. Eğme numunesinin farklı lif yönelimlerinde logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı	122
Şekil 5.108. Eğme numunesinin farklı yoğunluklarının logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı	123
Şekil 5.109. Lif yönelimlerine bağıli elektrikselle direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi.....	123

Şekil	Sayfa
Şekil 5.110. Lif alansal yoğunluklarına bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi.....	124
Şekil 5.111. Eğme numunelerinin farklı lif yönelimlerinde elektriksel direnç değişimi ve güven aralıkları	124
Şekil 5.112. Çekme numunesinin farklı lif yönlenmelerinin logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı	125
Şekil 5.113. Çekme numunesinin farklı alansal yoğunluklarının logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı	125
Şekil 5.114. Lif yönelimine bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi	126
Şekil 5.115. Dokuma tipi lifin alansal yoğunluklarına bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi	126
Şekil 5.116. Farklı lif yönelimlerinde elektriksel direnç değişimi ve güven aralıkları..	127

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

A	Alan (mm ²)
R	Direnç (kohm)
gr	Gram
m²	Metrekare
m/s	Metre/Saniye (Hız)
mm	Milimetre
nm	Nanometre
d	Numunenin genişliği (mm)
t	Numunenin kalınlığı (mm)
ρ	Özdirenç (kohm.mm)
L	Uzunluk
wt	Weight

Kısaltmalar

CFRPC	Carbon Fibre Reinforced Polymer Composites
CNT	Carbon Nanotube
ERC	Electrical Resistance Change
FRP	Fibre Reinforced Polymer
GFRPC	Glass Fibre Reinforced Polymer Composites
KNT	Karbon Nanotüp
MWCNT	Multi Walled Carbon Nano Tube
SHM	Structural Health Monitoring
SWCNT	Single Walled Carbon Nanotube

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojileri hafif, güçlü, düşük maliyetli ve bunlar gibi daha birçok özelliği bir arada barındıran malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple kompozit malzemeler gün geçtikçe ilgi odağı olmaktadır. Bu odağın bir diğer sebebi ise kompozit malzemelerin geliştirilmeye açık ve oldukça yüksek potansiyele sahip olmasıdır. Ayrıca endüstride oldukça yaygın ve geniş uygulama alanları mevcuttur. Birçok özellikleri ise yeni çalışmalarla açığa çıkartılmıştır ve açığa çıkartılmayı bekleyen özellikleri mevcuttur. Bu durum teknoloji ilerledikçe araştırmacıların bu alana daha fazla eğilmesine ve araştırmacılar tarafından vakit harcanmasına neden olmaktadır. Bu malzemelerin temel amacı farklı iki malzemenin birleştirilerek daha güçlü bir yapı oluşturulmasıdır. Kompozit malzeme oluşturulurken farklı oranlarda matris ve fiber karıştırılabilir. Bu oranların değişimi oluşturulan kompozit malzemenin mekanik, elektriksel ve termal özelliklerini etkileyen faktörlerin arasındadır.

Birçok araştırmacı polimer matrisli kompozitlerin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri üzerine araştırma yapmıştır. Bu araştırmalar sonucunda lif yöneliminin GFRP kompozitlerinin özelliklerini önemli derecede etkilediği ortaya konulmuştur. Çalışmamızda matris malzemesine iletkenlik sağlaması için karbon nanotüp ilavesi kullandık. Karbon nanotüpler kendi içinde Single Wall CNT, Double Wall CNT ve Multi Wall CNT olarak çeşitlenmektedir. Bu malzemeler kullandıkları duvar sayısına göre çeşitlenmiştir. Hepsi termoset malzemelerle kompozit malzeme üretiminde kullanılabilir fakat çok duvarlı yapısından dolayı matris malzeme ile MWCNT ile daha iyi bağ kuracağı için MWCNT ile üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri daha iyi olacaktır [1]. Karbon nanotüp ilave edildiği malzemenin mekanik, elektriksel ve termal özellikleri gibi özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir [2,3]. Yapılan bu ilave oluşturulan kompozit malzemenin çok farklı alanlarda farklı işlevlerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Karbon nanotüplerin geometrik yapısı incelendiğinde içi boş tüp şeklindeki yapısından dolayı fiberlere kıyasla daha düşük yoğunluk ve oldukça yüksek elektrik iletkenlik sunmaktadır. Bütün bu özelliklere ek olarak karbon nanotüplerin üretim yöntemleri, KNT türleri, matris içinde oryantasyonları ve matris/KNT bağları üretilen kompozit malzemenin özelliklerine önemli derecede etki ettiği araştırmacılar tarafından keşfedilmiştir. Bu sebeple elektrik alan gibi bazı yöntemler kullanılarak karbon nanotüplerin matris içinde oryante edilmesi ve bağ özelliklerinin kuvvetlendirilerek malzemenin özelliklerinin geliştirilmesi mümkündür.

Ancak karbon nanotüp kullanılmasının bazı zorlukları mevcuttur. Karbon nanotüplerin yapı içinde hasar almadan homojen bir şekilde dağıtılması gerekiyor ki üretilen malzemenin hedeflenen özelliklere ulaşılabilmesi sağlansın [4,5].

Çalışma kapsamında üretilen numunelerde kullanılan karbon nanotüplerin farklı özelliklerinin bir kısmına yukarıda değindik. Bunlara ek olarak çalışmamızda asıl olarak üzerinde durduğumuz bir kullanım alanı mevcuttur. İlave edilen karbon nanotüp çalışmamızda gömülü sensör görevi görmektedir. Normal şartlar altında bir malzeme içine sensör gömdüğünüzde o sensör malzemenin özelliklerine olumsuz etki edecektir ancak karbon nanotüplerin belirtilen üstün özelliklerini kullanarak hem malzemenin özelliklerinin güçlenmesini sağlandı hem de yapımızda sensör olarak kullanıp aktif çalışma anında yapımızın sağlık durumunun incelenmesinde kullandık.

Yapısal sağlık kontrolü sayesinde malzemede erken hasar tespiti yapılarak olası bir durumda güvenlik artışı sağlanabilir, planlı bakım yapıp maliyet tasarrufu sağlanabilir ve erken hasar tespiti sayesinde malzemedeki hasarlar giderilerek düşük maliyetle malzemenin kullanım ömrü arttırılabilir. Bu işlemi yapabilmek için farklı uygulamalar mevcuttur. Çalışmamıza bu uygulamalar arasında karbon nanotüplerin elektrik iletkenliğinden yararlanarak elektriksel direnç değişimini kullandık. Üretilen numunelere yük uygulanmadan önce ve yük esnasında malzeme kırılıncaya kadar elektriksel direnç değerleri ölçülüp değişim canlı bir şekilde gözlenmiştir [5,6].

Çalışmamızda amaç eş yönlü cam fiberden üretilen kompozit malzemenin lif yönlenmesinin elektriksel direnç değişim davranışına etkisini incelemek ve dokuma tipi kumaşın farklı alansal yoğunluklarının direnç değişim davranışını incelemektir. Bu durumu gözlemlemek için 300 gr/m² alansal yoğunluğa sahip eş yönlü kumaşlar kullanılarak y eksenine ile 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°'lik açılar üretim esnasında serme işlemi yapılırken verilerek lif yönlenmesinin, 200 gr/m² ve 300 gr/m² alansal yoğunluğa sahip dokuma tipi cam fiber kumaş tipi kullanılarak alansal yoğunluğun direnç değişim davranışına etkisi incelenmiştir. Kompozit numuneler elle yatırma üretim yöntemi ile üretilmiştir. Üretim sonrası numunelere eğme ve çekme yükleri uygulanıp direnç değişim değerleri multimetre vasıtası ile ölçülmüştür. Bu verilerin ışında cam fiber lif yönlenmesinin ve dokuma sıklığının direnç değişim değerlerini önemli derecede etkilediği gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yapıda kullanılan malzemenin lif yönlenmesine ve alansal yoğunluğuna bağlı olarak

malzemenin güvenilirlik durumu incelenebilip yapıda hasar ve olumsuz sonuçlar yaşanmadan önce onarım işlemi yapılabilir ya da tasarlanacak yapı bu veriler ışığında daha yüksek güvenilirlikli ve verimli olarak tasarlanabilir.

Tezin kapsamında giriş bölümünde çalışmanın genel çerçevesi sunulmuştur. Literatür taraması bölümünde lif yöneliminin numunenin mekanik özelliklerini ve elektriksel direnç değişimlerini nasıl etkilediğinin sonuçları paylaşılmıştır. Sonraki bölümde kompozit malzemelerin ne olduğu, çeşitlerinin ve nasıl çeşitlendiğinin, polimer matris malzemelerin ve türlerinin, kompozit malzemelerde hasar mekanizmalarının, tahribatsız muayene yöntemlerinin, KNT ve mekanik testler gibi tezin kapsamında olan konuların incelemesi üzerine durulmuş olup, tezin daha iyi anlaşılabilmesi için genel teorik bilgiler sunulmuştur. Sonrasında ise deneysel çalışma ve nümerik çalışmaların süreçleri işlenmiştir. Deneylerden ve analizlerden elde edilen sonuçlar ise sonuçlar ve öneriler bölümünde detaylıca analiz edilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Kumar, Shailesh, Babu ve Puli'nin (2017) çalışmasına göre, kompozit malzeme iki ya da daha fazla malzemenin makroskopik ölçüde birleşmesiyle oluşan yapısal malzemelerdir. Takviye malzemesi matris malzemelerinin mekanik özelliklerini geliştiriyorken, matris malzemesinin görevi takviye fazını arzulan şekillerde tutmaktır. Tasarlanan malzeme uygun bir şekilde tasarlanır ve üretilirse yeni malzeme bileşenlerinden daha iyi özellikler sergilerler. Bu çalışmada da bu durumu kanıtlamak için takviye malzemesi olarak cam fiber, matris malzemesi olarak ise epoksi reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Üretilen numuneler yavaş çekme testine ve diğer özelliklerinin tayini için üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre GFRPC/Epoksi kompoziti oda sıcaklıklarında gelişmiş mekanik özellikler sergilemektedir [7].

Soni, Thomas, Thomas, Tile ve Sakharwade'nin (2023) çalışmasına göre, KNT'ler polimer matrisli kompozitlerin özelliklerini önemli derecede etkiler. KNT'lerin boyutları, matris malzemesindeki homojenize dağılım durumları, yönelimleri ve takviye yüzdesi gibi faktörler oluşturdukları malzemenin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini önemli derecede etkiler. Bu nanofillerlar malzemeye eklendiğinde malzemenin elektrik ve termal iletkenliği artmaktadır. Çok sayıda yayında KNT'lerin fiziksel ve kimyasal yollarla işlevselleştirilmesinin malzemenin yük transfer kapasitesini, mekanik, elektrik ve termal özelliklerini etkileyecektir. Bu üstün özellikler KNT takviyeli kompozit malzemelerin uygulama alanlarını genişletmiştir. Otomotiv, savunma sanayii, geleneksel enerji üretimi, elektro manyetik koruma, sensör, spor malzemeleri, rüzgâr türbini, havacılık uygulamalarının kullanım alanları arasındadır [8].

Xie, Mai ve Zhou'nun (2005) çalışmasına göre, yapı içinde iyi disperse edilmiş KNT ve hizalanmış KNT 'ler yapının elektriksel, mekanik, termal, elektro kimyasal, optik özelliklerini ve uygulama alanlarını geliştirmektedir. KNT'lerin özelliklerini yüksek verimde kullanabilmek için KNT'ler yapı içerisinde kümeleşmeden homojen bir şekilde dağıtılması gereklidir [6].

Ali, Yaqoob, Yu ve D'Amore'a (2024) göre, ilerleyen teknoloji hafif, çok amaçlı kullanılabilen, esnek ve ucuz malzeme ihtiyacı oluşturmaktadır. Bu ağır talepleri ise

metallerin karşılayamayacağı açıktır. Plastikler doğada çokça bulunmakta ve hafiflik, korozyon dayanımı, kolay kalıplanması, akıllı optik özellikler, yalıtım gibi güçlü özelliklere sahiptirler ancak amorf yapısından dolayı da düşük mekanik, termal ve elektrik özellikleri mevcuttur. Bu sebeple araştırmacılar yoğun çalışmalar ile polimer kompozit malzemeler üreterek plastik malzemelerin dezavantajlı özelliklerini ortadan kaldırıp daha güçlü bir malzeme grubu ürettirler. Bu kompozit malzemelerin üretiminde KNT'ler eşsiz özelliklerinden dolayı oldukça göze çarpmaktadırlar. KNT'ler güçlü sp^2 bağlarından dolayı yüksek mekanik, elektrik ve termal özelliklere sahiptirler ve ilave edildikleri malzemenin özelliklerini de bu doğrultuda geliştirmektedir. Ancak bu ilave işlemi her zaman istenildiği gibi artmayacaktır. Optimum orandan sonra ilave edilen KNT malzemenin topaklanmasına ve özelliklerin zayıflamasına neden olmaktadır. Ayrıca KNT'lerin malzeme içine iyi disperse edilmemesi malzemenin özelliklerini zayıflatmaya neden olacaktır. Örneğin 0.1, 0.5, and 1.0 wt. % KNT oranlarla ayrı ayrı üretilen GFRP/Epoksi/KNT hibrit kompozitlerinde 0.5 wt.% orana sahip kompozit 0.1 wt.% orana sahip kompozite kıyasla daha iyi mekanik ve elektrik özellikler sergilerken bu oran arttıkça topaklanmanın arttığı ve malzemenin mekanik, elektrik ve termal özelliklerinin düştüğü belirtilmiştir. Yani KNT en/boy oranı, boyutu, homojen dağıtımı, matris malzeme ile yüzey yapışma özellikleri malzeme özelliklerini çok önemli derecede etkilerken en uygun malzeme üretimi için bu parametreleri ilave malzemenin limitlerinden dolayı en uygun şekilde sağlamak oldukça zorlayıcıdır [9].

Noman, Shohel, Riyad ve Gupta'nın (2023) çalışmasına göre, fiber yönlendirilmesi mekanik özellikleri önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışmada karbon fiber/epoksi kompozit malzemesi kullanılmıştır ve her karbon fiber/epoksi katmanı 0,5mm kalınlığındadır ve numunede 12 katman kullanılarak 6 mm kalınlığında 25*300mm ebatlarında numuneler ANSYS-ACP (ANSYS Composite PrepPost) modülünde oluşturularak çekme ve dinamik tepki analizine maruz bırakılarak açısal yönlendirilmenin mekanik ve dinamik özellikleri nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu deneyde karbon fiberler 0° , 30° , 45° , 70° , 90° açıları oluşturacak şekilde serim yapılmıştır. ANSYS üzerinden yapılan deneyin nümerik sonuçlarına göre, 0° açı ile oluşturulan karbon fiber/epoksi kompozit malzeme diğer açısal varyasyonlara göre daha iyi mekanik özellikleri mevcuttur ve daha yüksek modal frekansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu açıda daha az deformasyon, gerilim oluşturma olduğu için bu malzemeler daha uzun kullanım ömrüne sahiptirler. Elde edilen verilere göre lif yönelim açısı arttıkça mekanik özelliklerinin zayıflayabileceği gibi bir genelleme yapılabilir [10].

Han, Huang, Sun ve Gu'nun (2021) çalışmasına göre, 3 boyutlu karbon fiber/epoksi örgülü kompozitlerin kısa kırış kesme yükü altında beş farklı oryantasyonda (0° , 30° , 45° , 60° ve 90°) elektrik direnç değişimleri ve mekanik özellikleri fiber yönlenmesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Eksen açılarındaki fiber yönlenmesine sahip olan kompozit malzemeler kırılırken sünek davranış göstermektedirler ve 0° yönlenmeye sahip olan kompozit malzeme ise en yüksek yük taşıma kapasitesine ve yüksek mukavemete sahiptir. Numunelere belli bir yük yüklenip kaldırıldıktan sonra numune eski haline dönemeyeceği plastik deformasyon olarak adlandırılan durum ortaya çıkmaktadır. Plastik deformasyon sonrası elektrik akımı gitmek için kendisine yeni bir yol aramaktadır ve sonucunda numunenin elektrik direnç değişimi gerçekleşmektedir. Bu tip kompozit malzemelerde yük altında fiber kırılması elektrik iletkenliği azaltacak olup doğrudan direncin artmasına neden olacaktır. Bu çalışmada 45° ve 60° fiber yönlenmesine sahip olan kompozit malzeme bu hasarlara karşı daha hassas tepki verdiği görülmüştür. Bu çalışmayla elektrik direnç ölçümü metodunun hassasiyeti ve güvenilirliği kanıtlanmış oldu [11].

Cordin, Bechtold ve Pham'ın (2018) çalışmasına göre, kompozit malzemeyi oluşturan takviye fazının üretim yapılırken fiberlerinin yönlendirilmesi üretimi yapılan kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etki etmektedir. Bu durumun incelenmesi için polipropilen malzeme matris malzemesi olarak lyocell ise takviye fazı olarak kullanılmıştır ve üretim aşamasında fiberlere hibrit yarn olarak farklı açılar (0° - 22.5° - 45° - 67.5° - 90°) verilmiştir. Üretimleri yapılan numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Bu verilerin ışığında fiber yönlenmesinin mekanik özelliklere etki ettiği söylenilebilir. Ayrıca malzeme kırılmadan önceki son uzamasında elde edilen veriler kıyaslandığında sadece pp malzemenin uzaması diğer tüm açılarının uzama miktarlarından fazlayken fiber sonrasında en fazla uzaman miktarı $\pm 45^\circ$ açılı üretimde görülmektedir. Teorikte malzeme ne kadar sertse uzama miktarı o kadar az olacaktır. Bu da demek oluyor ki malzemenin elastisite modülü yükseldikçe sertleşecektir ve uzama miktarı azalacaktır. Tam tersini düşündüğümüzde ise elastisite modülü düştükçe malzeme sertliği düşecek ve kuvvet uygulandığında uzama miktarı artacak bu da malzemeyi yumuşak bir malzeme yapacaktır. Bu deney sonuçlarına göre denebilir ki $\pm 45^\circ$ üstü açılara sahip numuneler daha sert ve $\pm 45^\circ$ altı açılara sahip numuneler daha yumuşaktır [12].

Kwon ve diğerlerinin (2016) çalışmalarına göre, elektriksel direnç ölçümündeki değişim ile yapıya zarar vermeden hasar analizi yapmak mümkündür. Bu ölçüm yöntemiyle iletken bir yapıda bir gerilme olduğunda ya da bir hasar aldığında hasar değerlendirmesi yapılabilir. Bunu test etmek için karbon fiber prepregler ile 10cm uzunluğunda kısa silindirik numuneler hazırlanıp üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deney sonuçlarına göre malzemeye eğme yükü uygulandığında boyuna çatlak oluşuncaya kadar malzemenin direnç değeri ve gerilme stresinde yükseliş meydana gelmiştir çatlak oluştuğunda anda ise eğilme geriliminde ve direnç değişiminde hafif düşüş yaşanmıştır. Ancak eğilme testinin devam etmesi eğme uzamasının artması enine çatlakların oluşmasına sebebiyet vermiştir. Enine çatlamanın oluşması eğme gerilmesinin düşmesine neden olmuştur ve ani çok büyük oranda elektriksel direncin artmasına neden olmuştur. Yani bu neyin sonuçlarına göre elektriksel direnç değişiminin malzemeye zarar vermeden iletken malzemelerde yapısal hasar durumu hakkında kullanılabilecek bir yöntem olduğunu tekrar kanıtlamış ve aynı yöntemin farklı şekillerde de kullanılabileceğini göstermiştir [13].

Shindo, Kuronuma, Takeda, Narita ve Fu'nun (2012) çalışmasına göre, çentikli MWNT (çok duvarlı karbon nanotüp) / polikarbonat kompozitlerin elektriksel ve mekanik tepkileri teorik ve deneysel yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Elektriksel direnç yöntemi, nanokompozitlerdeki çatlak davranışının izlenmesinde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Elektriksel direnç ile çatlak uzunluğu arasında güçlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Çatlak ilerlemesinden kaynaklanan direnç değişimini tahmin etmek için CNT (karbon nanotüp) bazlı kompozitlerin iletkenlik mekanizmasına dayanan analitik bir model geliştirilmiş ve modelin öngörülleri deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Bu basit analitik model, CNT ağlarının nanokompozitlerde çatlakla nasıl etkileşime geçtiğine dair temel bir anlayış sağlamaktadır. CNT bazlı kompozitlerin oda sıcaklığında ve 77 K'de çatlak algılama yeteneği, bu malzemelerin kompozitlerin ve mühendislik yapılarının sağlık izleme uygulamaları için potansiyelini artırmaktadır. Yani bu sonuca göre malzemede alınan hasar yine malzemenin yapıdaki iletkenler vasıtası ile kurulan iletken yolu hasar büyüdükçe daha çok tahrip edeceği için elektriksel direnç değişimi malzemede hasar tespit yöntemlerinden biri olarak kullanılabileceğini göstermektedir [13].

Thostenson ve Chou'a göre (2006), KNT yapıda hasar incelemek amaçlı sensörler olarak kullanılabilir. Bu çalışmada KNT yapıya elektriksel iletkenlik sağladığı için hasar anında elektriksel direnç değişimi ölçümü yapılarak yapısal sağlık izlemesinin yapılması

mümkündür. Bu durumun incelenmesi amacıyla epoksi polimer içine KNT ilave edilerek nanokompozit malzemeye çekme testi uygulanmıştır. Bu testin sonucuna göre deformasyon ve elektriksel direnç arasında lineer bir bağlantı olduğu söylenebilir. Yine elektriksel direnç değişimini kompozit malzemelerde incelemek için MWCNT kullanılarak cam fiber ve epoksi malzemesiyle beş katlı eş eksenli cam fiberler vasıtası ile 0° ve 0° - 90° açılı numuneler üretilmiştir ve çekme testi yapılmıştır. Bu testin sonucuna göre malzemeye yük uyguladıkça direnç değeri artmış ve malzemede oluşan delaminasyon direnç değişiminin artmasına neden olmuştur. Bu süreçten sonra artan yük malzemenin direnç değerini arttırmaya devam ettirmiştir [14].

Wen, Xia ve Choy'un (2010) çalışmasına göre elektrik direnç değişimi yapıda hasar tespiti yapmak için kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanması için yapının elektrik iletken olması gereklidir. Bu durumun sağlanması içinde karbon fiberler takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Matris fazını ise epoksi malzeme oluşturmaktadır. Yapıdaki elektriksel direnç değişimi incelenerek yapısal durum hakkında yorumlar yapılmıştır. Bu durumu incelemek için karbon fiber ile eş eksenli, çapraz katmanlı, 2D dokuma ve 3D dik açılı dokuma takviye tipli karbon fiber polimer kompozit malzemeler üretilmiştir. Yapıda bulunan karbon fiberler oldukça iletken bir malzeme oldukları için yapıya uygulanan yük fiberlerin kopmasına sebep olmuştur bu da malzemenin direnç değerlerini önemli derecede arttırmıştır. Eş eksenli kompozit malzeme boyuna ve enine farklı elektriksel iletken özellikler sunmaktadır. Çapraz katmanlı kompozitte enine ve boyuna elektriksel iletkenlik birbirine yakınsa kalınlıktaki elektriksel direnç diğer yönlerden çok daha fazladır. Çekme testinde numune çekmeye başladığı andan itibaren uzama arttıkça fiber kırılınca direnç değişimi lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir [15].

3. KOMPOZİT MALZEMELER VE UYGULAMA ALANLARI

En az iki farklı malzemenin en iyi niteliklerini farklı bir malzemede oluşturmak amacıyla oluşturulan malzemelerdir. Oluşturulan yeni yapı heterojen yapıya sahiptir. Cam elyafli epoksiler, karbon elyafli epoksi kompozitler bu malzemelere örnek olarak verilebilir. Bu örneklerden de anlaşılacağı gibi cam-karbon elyaf farklı bir malzemedir ve epoksi farklı bir malzemedir. Oluşturulan kompozite epoksi ve elyaflar farklı özellikler katarak oluşturulan yeni malzemenin daha özellikli ve kullanılabilir olması sağlanmıştır. Oluşturulan kompozitte epoksi malzemesi matris fazı, elyaflar ise takviye fazı olarak nitelendirilmektedir. Takviye elemanı sadece elyaflardan oluşmak zorunda değildir. Nanopartikül, whiskerlar, seramikler vb. malzemeler takviye elemanı olarak istenilen özelliklerde kompozit malzeme üretebilmek için kullanılabilir. Kompozit malzemede matris fazına ve takviye fazlarına farklı görevler düşmektedir. Takviye fazı matris fazının ilettiği yükü taşıyıp matris fazını güçlendirmek, matris fazı ise kendisine uygulanan yükü elyaflara iletme ve takviye fazını korumak görevini üstlenir. Oluşturulan bu kompozit malzemeler ürettikleri malzemelere göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Plastik matrisli kompozitler,
- Metal matrisli kompozitler,
- Seramik matrisli kompozitler.

Kompozit malzemeler olduğu malzemelerde genel olarak bulunmayan üstün özelliklere matris fazı ve takviye fazının uyumlu birleşmesi sonucunda ulaşabilir. Bu nedenle kompozit malzeme üretimi tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin oluşturulmasıyla elde edilen özellikler aşağıdaki gibidir:

- Yüksek mukavemet,
- Sertlik,
- Yüksek aşınma direnci,
- Yüksek termal iletkenlik,
- Yüksek elektriksel iletkenlik,
- İyi Korozyon direnci,
- Düşük ağırlık,
- Yüksek modül,
- Yüksek yorulma dayanımı.

Bu özelliklerin hepsini bir malzemede oluşturmak mümkün değildir. Bunun yerine hangi uygulamalarda kullanılacağına bağlı olarak üretilecek olan kompozit malzemeye bu ve bunlar gibi yüksek özellikler kazandırılabilir. Kompozit malzemelerde istenilen özellikleri elde etmek için de elde edilmesi istenen özelliklere uygun matris ve takviye fazı seçilmesi uygun olacaktır ve bu fazların birbiriyle uyumu ve ara yüzey etkileşiminin özellikleri kompozit malzemenin kalitesini önemli derecede etkiler. Şimdiye kadar kompozit malzemelerin avantajlarından bahsedildi ancak kompozit malzemelerin dezavantajları da mevcuttur. Bu zorlukları şöyle sıralayabiliriz:

- Üretimin güçlüğü,
- Pahalı olması,
- Geri dönüştürülemez,
- Düşük yüzey kalitesi,
- Kırılma uzamasının az oluşu.

Plastik matrisli kompozitler hafif olmaları, kolay şekillendirilebilir olmaları, takviye ilavesiyle yüksek sertliklere çıkabilmeleri, korozyona karşı dirençli olmaları nedeniyle kompozit malzeme yapımında tercih edilirler. Bu pozitif özelliklerinin yanı sıra plastik malzemeler düşük mukavemete sahiptirler ve çevreye zarar verirler.

Metal matrisli kompozitler ise bu klasmanda yüksek dayanımından ve üzerine uygulanan yükü bütün malzemeye dağıtmasından ötürü başlıca sebeplerden dolayı uygulamalarda en fazla kullanılan kompozit malzemelerdir. Seramik malzemeler ise yüksek sıcaklıklara dayanabilen, gevrek, kırılğan, düşük yoğunluklu, dayanıklı ama bir o kadar da işlenmesi zor ve yüksek ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerdir. Bu malzemeler kimyasal etkilere karşı direnç sahibidirler. Farklı özelliklere bakarak bu malzemelere kıyas yapılabilir. Örneğin metaller seramiklere ve plastiklere nazaran daha ağırdır. Bu grubun en hafif malzemeleri ise plastiklerdir. Seramik malzemelerin ergime sıcaklıkları genelde metal malzemelerden yüksektir. Plastik malzemelerin ergime noktası ise en düşük olandır.

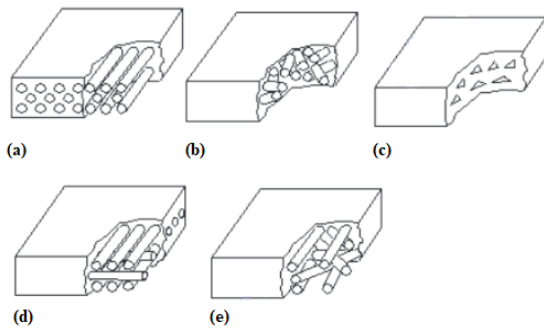
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, çeşitli kriterlere göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Takviye elemanına göre sınıflandıracak olursa şu şekilde sınıflandırabiliriz:

- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
Sürekli elyaf takviyeli kompozitler malzemeler,
Parça elyaf takviyeli kompozitler malzemeler,
Rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozitler malzemeler.
- Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
Büyük parçacıklarla dayanımı arttırılmış kompozit malzemeler,
Dispersiyonla dayanımı arttırılmış kompozit malzemeler,
- Tabakalı kompozit malzemeler.

3.1.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Takviye fazına göre yumuşak olan matris fazına sert ve yüksek mukavemetli bir elyaf takviye edildiği zaman oluşacak kompozit malzemenin çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım gibi özellikleri gelişecektir. Oluşturulan bu kompozitlerde matris malzemesi üzerine uygulanan yükü elyafa iletmekte görevliken elyaf malzemesi malzemeye uygulanan yükü taşımakta görevlidir. Sürekli elyaf takviye işlemi yapılmasının amacı malzemeye anizotropik özellik kazandırmaktır. Bu tarz malzemelerin takviye hacim oranı %80'lere kadar çıkabilmektedir ve üretimlerde kullanılan elyaf çapları ise 10-20 μm ile 100-200 μm çaplarında üretilebilirler. Sürekli elyaflar yapısından kaynaklı anizotropik özellik taşırlar. Tek yönde çekme uygulanması durumunda sürekli elyaflar en iyi performansı gösterirler fakat elyaf eksenine dik olan yüklemelerde düşük mukavemet özellikleri gösterirler çünkü elyaf anizotropik bir davranış sergiler ve taşınması gereken yük matris fazına aktarılır.



Şekil 3.1. a) Eş yönlü sürekli elyaflar, b) Kesikli elyaflar, c) Ortogonal elyaflar, d) Parçacık şekilli elyaflar, e) Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş elyaflar [16]

Kompozit malzemeyi oluşturan elyaflar yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi farklı şekillerde ve yönelimlerde olabilmektedir.

3.1.2. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler

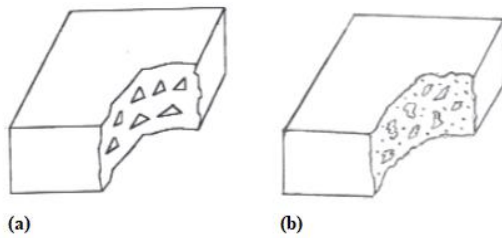
Kısa elyaf olarak adlandırılan elyaflar yaklaşık 3-5 μm çapında ve 0,5-6 μm uzunluğunda üretilirler. Bu elyaf ile takviyelendirilen kompozitler, takviye elemanının ergiyik içinde malzeme ile birleştirilmesi için sıkıştırılmalı döküm yöntemi ile preformlara basınçlı olarak ergiyik emdirilir.

3.1.3. Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozit malzemeler

Bu kompozitlerde kısa elyaflardan oluşur fakat elyaflar matriks içinde Şekil 3.1’de gösterildiği gibi rastgele iki boyutlu olarak yönlendirilmektedir.

3.1.4. Parçacıklarla takviyeli kompozit malzemeler

Bu tip kompozitler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matriks ile oluşturdıkları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 μm ’den büyük ve elyaf hacim oranı %25’ten fazla kullanılamamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC ‘den oluşan seramiklerdir. Burada yük elyaf ve matris tarafından beraber taşınır ve özellikler yine izotropiktir.



Şekil 3.2. Parçacık takviyeli ve dispersiyonla üretilmiş kompozit malzeme. a) Büyük parçacık takviyeli kompozit malzeme, b) Küçük parçacık takviyeli kompozit malzeme [16]

Döküm yoluyla üretilen bu tür kompozitlerde pratikte karşılaşılan pratikte karşılaşılan bir problemler de parçacık ilave edildiğinde tozların karıştırılma zorluğu ve eriyik vizkozitenin düşmesi veya sıvı metalin seramik parçaları ıslatamamasıdır. Islatılabilirliği geliştirebilmek amacıyla;

- Katı yüzey enerjisinin arttırılması
- Sıvı metal yüzey geriliminin azaltılması
- Katı ve Sıvı ara yüzey enerjisinin azaltılması gibi parametreler üzerinde durulması gereklidir.

Bu nedenle de parçacık yüzeyine kaplama yapılması ve ısıl işlem uygulanması veya matris bileşiminin ayarlanması gibi metotlar uygulanmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde ıslatılabilirliği arttırmak için genellikle magnezyum elementi kullanılmaktadır. Bu şekilde bir kompozitin dayanımı;

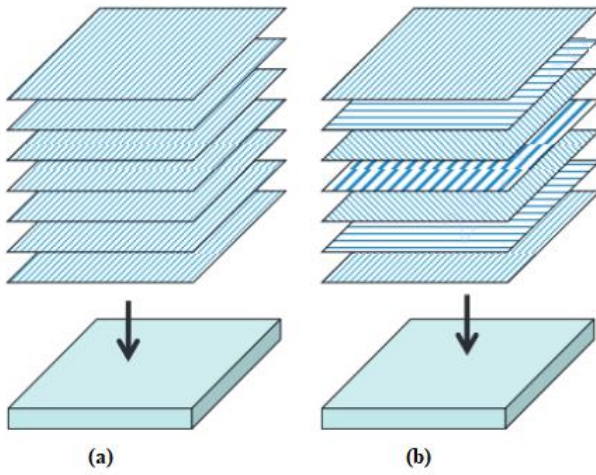
- Parçacıkların büyüklüğüne,
- Parçacıklar arası mesafe ve homojen dağılıma,
- Matrisin özelliklerine,
- Parçacıkların özelliklerine bağlı olarak değişir.

3.1.5. Dispersiyonla mukavemetlendirilmiş kompozit malzemeler

Bu tür kompozitlerde yüksek ısıl kararlılığa sahip mikrondan daha küçük çökeltiler veya parçacıkların metalik matriks içinde homojen dağıtılması ile elde edilir. Bu parçacıkların çapı 0,01 ve 0,1 μm ve uzunluğu 50-200 μm arasında kullanılan parçacıkların hacim oranı %1-15 arasında değişir. Bu küçük parçacıklar metal malzemede dislokasyon hareketini engellediği için dayanımı artırır ve matris kuvvetleri taşır.

3.1.6. Tabakalı kompozit malzemeler

Katmanlı kompozit malzemeler olarak belirtilebilen katmanlı kompozit malzemeler, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste istiflenerek bir araya getirilmesi ile katmanlı kompozit malzemelerin üretilmesi olasıdır. Katmanlar, matris içerisine rastgele yönlendirilmiş elyaflar, eş yönlü elyaflar veya farklı takviyeli tabakadan oluşabilir.



Şekil 3.3. a) Eş yönlü kompozit malzeme, b) Çapraz tabakalı kompozit malzeme [16]

3.2. Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanları

Kompozit malzemeler seçilen matris malzemesine göre metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler olarak adlandırılabilir. Takviye elemanı olarak değişik malzemeler kullanılmaktadır. Takviye fazı kompozit malzemeyi oluşturan temel bir fazdır ve yapıda parçacıklı, kısa elyaf, uzun elyaf, kılcal kristalli gibi farklı boyutlarda bulunabilirler.

Kompozit malzemedeki takviye fazının görevi oluşturulan malzemenin rijitliğini ve dayanımını artırmaktır. Takviye fazı kompozit malzemeye uygulanan kuvveti ve yükü taşıyan fazdır. Bu malzemelerin yüksek dayanım ve düşük yoğunlukta olması beklenir. Ayrıca malzemenin bağ yapılarının güçlü olması beklenir ki kullandığı kompoziti güçlü yapsın. Takviye fazı olarak cam, karbon, bor ve silisyum karbürle alüminyum oksit gibi bileşikler kullanılabilir. Mühendislik aktif olarak elyaf malzemeler yoğun olarak takviye fazı olarak kullanılırlar ve böylece çok daha dayanıklı ve sert malzemelerin oluşmasına neden olurlar. Elyaf malzemeler kütle halindeki özelliklerine kıyasla elli katlara varan yüksek dayanım gösterirler. Elyaf takviye malzemelerin çapları genellikle 5-20 μm 'dir. Kompozit malzemelerin performansına önemli derecede etki ederler. Kullanılan elyaf malzemelerin şekli, boyu, yönlenmeleri kompozitin mekanik özelliklerini belirler.

Kompozit malzeme üretiminde kullanılacak olan takviye fazı seçimi, nasıl üretildiği ve matris ve elyaf malzeme arasındaki uyum yani ıslatılabilirlik davranışları ve elyafların özellikleri kompozitlerin mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Bu

sebeple takviye elemanı seçimi yapılırken özelliklerine dikkat edilmelidir. Takviye fazından beklenen özellikler;

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek elastik modül,
- Yüksek dayanım,
- Kimyasal uyumluluk,
- Üretim kolaylığı,
- Yüksek ısı direnç takviye malzemelerinin seçiminde göz önünde bulundurulacak kriterlerdir.

3.2.1. Cam elyaf

Camın fiber olarak üretilip kullanımı 17. yüzyılın başlarında elbise olarak kullanılması ile başlar ancak ticari olarak kullanımı ise 20.yüzyılın ilk yarısında gerçekleşmiştir. Ancak bu sektör günümüze kadar oldukça büyümüştür. Cam fiberler sürekli fiber, stapel ve kesikli fiberler olarak elde edilebilir [17].

Cam elyaf silis-kum (SiO_2) 'dan oluşmakla beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzeme üretiminde çokça kullanılır ve oldukça düşük maliyetlidirler. Silis atomları üç boyutlu rastgele bağlanmış polihedra ağını oluşturmak için oksijen atomlarına kovalent bağ ile bağlanırlar. Değişik valansın katyonları oksijen atomlarına bazıları ile iyonik olarak bağlanır. Bu nedenle dengeyi daha küçük birimlere ayırırlar [16].

Çizelge 3.1. Kompozitlerde kullanılan bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri [16]

Malzeme cinsi	Yoğunluk (kg/m^3)	Elyaf çapı (μm)	Elastik modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)
E-camı	2500	12	70	1,5-2,0
S-camı	2600	10	90	4,6
Karbon (PAN)	1800	7-10	400	2,0-2,8
Karbon (YD)	1700	7-10	200	3,0-3,5
Karbon (Mesa-faz)	1900	7-10	220	3,2
Boron	2600	140-160	400	3,4
Al_2O_3 (FP)	3950	20	380	1,4-2,1
Al_2O_3	3300	3	300	2,0

Plastik esaslı kompozit malzemelerde kullanılan genel tipi E-camı alkali olmayan boron silikat olup iyi elektrik yalıtım özellikleri ile geliştirilen S-camı daha pahalı fakat daha yüksek modüle sahip magnezyum ve alüminyum silikat ihtiva ederler.

Çizelge 3.2. Cam fiberlerin karakteristikleri ve bileşenleri [18]

Gösteriliş	Karakteristik	Bileşim ^a (ağ. %)								
		SiO ₂	(Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂
A-camı	Normal	72	<1	10		14				
AR-camı	Alkali dirençli	61	<1	5	<1	14	3		7	10
C-camı	Kimyasal korozyon dirençli	65	4	13	3	8	2	5		
E-camı	Elektriksel bileşim	54	15	17	5	<1	<1	8		
S-camı	Yüksek dayanım ve modül	65	25		10					

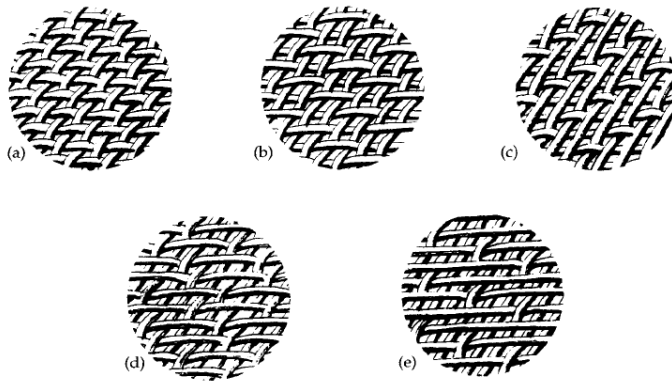
Cam elyaflar camların elektrik fırınından yaklaşık 1200 °C-1500 °C ergitilmesi ve ergiyen camların bir platin alaşımlı olan potanın tabanındaki binlerce delikten hızlı bir şekilde aşağı doğru demetler halinde çekilerek ve soğutma bölgesinden geçirilerek üretilir. Daha sonra kaplama uygulaması ve demetler halinde makaralara sarılarak yaklaşık 3kg'lık halinde depolara gönderilir. Kaplama işlemi karışıktır fakat elyafları hasarlardan korur. Kaplama maddesi genellikle silan ihtiva ederler.

Cam elyaflar karbon elyaflar kadar hafif ve rijit olmamasına değildir ve onlardan oldukça ucuzdur. Cam fiber takviye malzemelerinin diğer özelliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Yüksek çekme mukavemeti; Cam fiber takviye malzemeleri genellikle diğer tekstil malzemelerine nispeten yüksek çekme mukavemetleri mevcuttur.
- Isı ve yangına dayanıklılık; İnorganik malzemeler olduğu için ısıya ve yanmaya karşı dirençlidirler.
- Kimyasal dayanıklılık; Birçok kimyasal malzemeye karşı dayanıklıdır.
- Neme karşı dayanıklılık; Fiberglaslar suyu emmez, şişmez ve esnemez. Bu malzemeler nemli ortamlara dayanıklı olduğu için kolayca çürümezler.
- Termal özellikler; Termal genleşme katsayısı düşük olduğu için yüksek sıcaklık ortamlarında yüksek performans gösterirler.
- Elektriksel özellikler; İletken olmadıkları için elektrik yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirler [17].

3.3. Cam Fiber Kumaş Türleri

Kompozit malzemenin özelliklerini etkileyen bir diğer önemli etken ise kompozit malzemenin dokuma türüdür. Farklı çeşitlerde dokuma yapılarak farklı özelliklerde kompozit malzeme üretmek mümkündür [17]. Aşağıdaki görselde farklı dokuma türlerini temsil eden görseller mevcuttur. Tezin kapsamında üretilen kumaşlarımız eş yönlü kumaşlardan oluşup bu dokuma yönteminin açılarını değiştirerek farklı özelliklere sahip kompozit numuneler üretilmiştir.



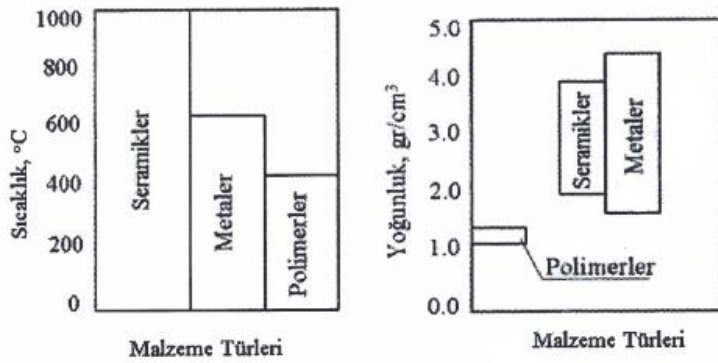
Şekil 3.4. Cam fiber kumaş türleri [17]

- Plain weave (Düz örgü)
- Basket weave (Sepet örgü)
- Twill weave (Sepet örgü)
- Crowfoot satin weave (Kaz ayağı saten örgüsü)
- Eight-harness satin weave (Sekiz koşumlu saten dokuma)
- Unidirectional fabrics: Eş yönlü kumaşlar
- Non-woven (Dokunmamış)

3.4. Kompozit Malzemelerde Matris Malzemeleri

Kompozit malzemeler üretilirken malzemenin özelliklerini ve performansını etkileyen önemli bir etmen matris malzemesinin seçimi ve seçilen matris malzemesinin kompozit malzemede takviye fazına emdirilmesi ve böylece matris ve takviye fazı arasında sağlam bağ oluşturulması ve düşük ortam sıcaklıklarında ve basınçlarda kürlenebilmesidir.

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde ve elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matris malzemenin görevleri farklılık oluşturmaktadır. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde matris elemanı partikülleri bir arada tutmakla görevlidir ancak elyaf takviyeli kompozitlerde asıl görevi kendisine uygulanan kuvveti ya da yükü elyaf malzemesine iletmektir. Bu özellik çekme, basma yükleri için önemlidir. Elyafların etrafını sararak onları çevresel etkilerden korumak ve oluşan çatlakların ilerlemesini önlemektedir. Üretilen kompozitte kullanılan elyaf yüksek dayanım ve yüksek elastik modülüne sahiptir. Olası bir elyafın kırılması durumunda matris malzemesi kırılma gerçekleşinceye kadar yük taşıyıp malzemede oluşan herhangi bir çatlağın kompozit malzemenin aniden işlevini yitirmesini engeller. Bu sebepten dolayı matris ve takviye elemanı arasındaki bağların kuvveti oldukça önem arz etmektedir. Bu özelliklerin kazanılmasını sağlayan matris malzemeleri hafif metaller, hafif metal alaşımları ve termoset plastiklerdir.



Şekil 3. 5. Matrislerin sıcaklık ve yoğunluk özellikleri [16]

Matris malzemesi olarak alüminyum, magnezyum, çinko, titanyum gibi metaller ve alaşımları kompozit malzemedan istenilen özellikleri elde etmek amacıyla kullanılabilir. Plastik malzemelerden ise termoplastik malzemeler ve elastomerler kullanılabileceği gibi daha çok termoset malzemeler kullanılmaktadır. Biz çalışmamızda matris malzemesi olarak plastik malzeme kullandık. Plastik malzemeler monomerlerden oluşan zincir şeklinde yapıya sahip sentetik ürünlerdir. Bu malzemeler amorf yapıdadırlar. Kristal yapı oluşturmaları oldukça zordur. Ama bu amorf yapının içinde kristal yapılar oluşabilir de ve bunlara kristalitler denir. Bu kristalitler soğuma hızı yavaş olursa artar hızlı olursa azalır. Plastik malzemenin mekanik özellikleri kristalleşmeye yani düzensiz yapıdan düzenli yapıya geçmesine bağlı olarak artabilmektedir. Bu malzemeler kolay işlenebilir, hafif ve kompozit oluşturularak mekanik özellikleri geliştirilebilir. Karışık geometriye sahip kompleks

parçalarda bu malzemelerle üretilebilir. Plastik malzemelerin ticari olarak çok kullanılmasında farklı nedenler vardır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Karmaşık parçalar üretilebilir,
- Düşük yoğunluk nedeniyle yüksek özgül modül,
- Düşük maliyet,
- Kompozit malzeme üretiminde yoğunlukla kullanılması,
- Bazı plastiklerin saydam olması ve ışığı yansıtması,
- Genelde polimerleri üretmek için daha az enerji tüketilmesi,
- Yüksek korozyon direnci,
- Düşük ısı ve elektriksel iletkenlik.

Kompozit malzemelerin kullanımında avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Metal ve seramiklere kıyasla düşük mukavemet,
- Çalışma sıcaklıklarının düşük olması,
- Düşük elastik modül,
- Sınırlı yükleme şartlarına sahip olması.

3.4.1. Termoplastik malzemeler

Termoplastik malzemeler oda sıcaklığında katı olarak bulunup çizgisel molekül zincirleri halinde birbirine Van der Waals denilen zayıf bağlar ile bağlıdırlar. Bu sebeple çalışma sıcaklıkları düşüktür. Düşük mukavemete sahiptirler. Isıtıldıklarında yumuşar ve soğutulduklarında sertleşirler. Bu özelliklerinden dolayı geri dönüştürülebilirler. Molekülleri arasında lineer bağlantı vardır. Ekonomik malzemelerdir ve kolay bir şekilde şekil alırlar. İyi şekil aldıkları içinde ticari olarak fazlaca tercih edilirler. Bu malzemeler kristalin ya da amorf olabilirler kristalin yapıdaki malzemeler büyük uzaklıklarda oldukça düzenlidir amorf yapıda olanlarda ise zincirler iç içe geçtiği için yüksek sıcaklıklarda daha rijit özellik kazanırlar.

Termoplastik malzemeler genel olarak:

- Düşük çekme dayanımı,
- Düşük rijitlik,

- Yüksek süneklik,
- Kuvvet altında oda sıcaklığında sünme,
- Yalıtkanlık,
- Termal iletkenlikleri metallerden 3 kat düşük,
- Metal ve seramiklere nispeten daha düşük yoğunluk,
- Yüksek termal uzama katsayıları
- Düşük ergime sıcaklıkları,

Özelliklerine sahiptir. Bu malzemelerde kendi içinde farklı özelliklere ayrışabilmektedir. Termoplastik malzemeleri şöyle sıralayabiliriz; ABS, PTFE, Poliamids (PA), Polyester (PET), Akrilik, Polietilen (PE), Polivinilchlorür (PVC), Polipropilen (PP).

Çizelge 3.3. Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [16]

Malzeme Özellikleri	Polietilen	Politetratken	PA 6.6	Polipropilen
Yoğunluk (g/cm ³)	0,95	0,92	1,14	0,90
Elastik Modülü (MPa)	1000	22	700	1400
Çekme dayanımı (MPa)	30	14-34	70	35
Kopma uzaması (%)	10-1200	100-650	300	10-500
Termal iletkenlik	0,48	0,33	0,25	0,12
Isıl genleşme katsayısı	60-110	100-220	70-120	80-100
Ergime sıcaklığı (°C)	-	-	260	175

3.4.2. Termoset malzemeler

Termoplastiklerin aksine ısıtılarak yumuşatılmazlar. Bu malzemeler ısıtılarak kürlenirler. Polyester ve epoksi en çok tercih edilen termoset malzemelerdir. Matris malzemesi olarak polyester elyafı iyi ıslatır ve takviye fazı ile güçlü bir bağ kurar. Fakat yüksek büzülme oranına sahiptir. Bu sebeple kürlenme esnasında elyaf lar üzerinde baskı oluşturarak burkulmalarına neden olur. Termoset malzemelerin dayanımları termoplastik malzemelere göre yüksektir. Bunun sebebi termoset malzemelerin termal olarak kararlı olması, çapraz bağlarının olması ve moleküler içinde yapıların kovalent bağ olması nedeniyledir. Ancak termoset malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük ısı ve elektrik iletkenliğe, düşük mekanik özelliklere ve kullanım ömrüne sahiptirler. Epoksi, fenolik, polyester, amino reçineler ve silikonlar bu grubun malzemeleri arasında sayılabilir.

Bu malzemelerin moleküler ağırlığını ve çapraz bağını artırabilmek için ısıtma işlemi uygulanmalıdır. Isıtma işlemi görmüş epoksiler yüksek dayanım ve iyi ısı ve kimyasal direnç gösterirler. Epoksilerin yalıtım özelliklerinden dolayı farklı elektronik ortamlarda kullanılmalarını sağlar. Çeşitli olarak oldukça fazla bulunmalarına rağmen bunlardan sadece birkaç tanesi kullanıma uygundur.

Çizelge 3.4. Bazı termoset malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [16]

Malzeme cinsi	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastik modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	42	1,5-2,0
Isıl iletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme katsayısı (1/°C)	45-65	55-100	68

3.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Metotları

Kompozit malzemelerin takviye fazının üstün özelliklerini kullanarak geleneksel üretim yöntemlerine nispeten yüksek mekanik özellikleri sergilemesi nedeniyle kompozit malzemelerin üretim yöntemleri üzerine araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur. Genellikle metal matris kompozit malzemelerin üretiminde Al, Mg, Ni, Cu ve Zn gibi matris olarak kullanılırken silisyum karbür, boron, grafit, alüminyum oksit, alüminyum oksit, tungsten, molibden ve grafit gibi farklı malzemelerde takviye fazı olarak kullanılabilir. Üretilen kompozitten beklenen özelliklere göre malzeme seçiminin yanı sıra üretim tekniğidir önemlidir.

Üretimi yapılacak olan kompozitte kullanılacak elyaf, matris malzemesine, parçanın geometrisine ve fiziksel özelliklerine göre üretim metodu seçimi yapılmaktadır. Bu üretim metotlarını sıvı hal üretim metotları ve katı hal üretim metotları olmak üzere genel olarak sınıflandırabiliriz.

Elyaf takviyeli kompozit malzeme üretirken elyaf ve matris malzemenin uygun özelliklerini tek bir malzemede toplamak amaçlanır. Bunun için belli şartların sağlanması amaçlanır.

- Elyafın eşit aralıklı dağılım göstermeli,
- Elyafın homojen bir dağılım göstermeli,

- Yüksek dayanımlı elyaflar mekanik etkilere duyarlı olduğu için takviyenin kırılmasının önlenmesi,
- Matris ve takviye fazı arasında kuvvetli bir bağlantı oluşturmak.

Elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan üretim yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Sıvı metal infiltrasyonu
- Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği
- Basınçlı infiltrasyon
- Sıvı metal karıştırması
- Yarı katı karıştırma
- Plazma püskürtme
- Toz metalürjisi tekniği
- Mekanik alaşımlama
- Spark Plazma Sinterleme
- Toz Enjeksiyon Kalıplama
- Difüzyon bağlama ve vakumda presleme
- Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme

3.5.1. Plastik matrisli kompozitlerin üretimi

Plastik matrisli kompozit malzemelerin farklı üretim metotları mevcuttur. Üretim metotları kullanılan matriks malzemesine göre ya termoset ya da termoplastik matrisli olarak üretilebilmektedir. Termoset matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Elle yatırma yöntemi (Vakumda torbalama),
- Püskürtme metodu,
- Reçine transfer kalıplama,
- İnfüzyon,
- Vakum yardımı ile reçine transfer kalıplama,
- Tabakalı birleştirme ve torba kalıplama yöntemi,
- Helisel sarma yöntemi,

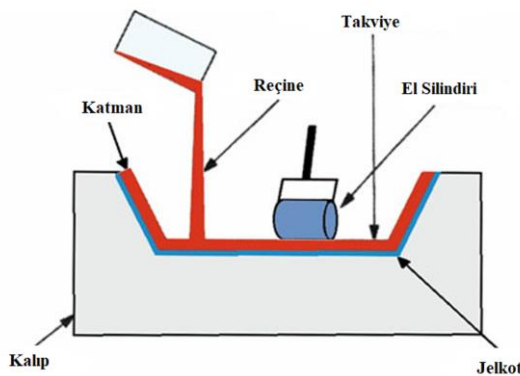
- Enjeksiyon kalıplama,
- Profil çekme yöntemi.

3.5.2. Elle yatırma yöntemi

Bu üretim yöntemi az-orta hacimli üretim malzemeleri için kullanılabilen bir yöntemdir. Büyük boyutta yapısal ürünlerin üretilmesinde ve küçük boyutlu parçalarında üretiminde kullanılabilir. Bu üretim yöntemi yaygın olarak kullanılır ve üretim yöntemi diğerlerine göre daha basittir. Bu üretim yönteminde farklı elyaflar seçilebilir. Keçe, karbon elyaf, cam elyaf gibi elyaflar bu yöntemde kompozit malzeme üretiminde kullanılabilir.

Kalıp üretimi yapılacak malzeme kalıba serilmeden önce üretimi tamamlanan parçanın kalıptan ayrılmasını kolaylaştırmak için polivinil alkol, silikon sürülür. Sonra matris malzemesi kalıp içine yatırılır. Matris malzemesinin üzerine kullanılacak olan elyaf istenen açıda yatırılarak üretim özelleştirilebilir. İstenilen kalınlıkta üretim yapmak mümkündür. Ancak işlem sırasında malzemede kabarcıklar oluşabilir. Bu durum malzemenin özelliklerini etkileyeceği için rulolar ile kabarcıklar alınır.

Bu üretim yönteminde oda sıcaklığında sertleşebilen polyesterler ve epoksi malzemeler kullanılabilir. Eğer fırınlar kullanılırsa kürlenme süresi kısaltılabilir. Bu üretim metodu en basit kompozit üretim metodudur. Üretimin yapılışı aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Bu üretim yönteminde bitmiş yüzeyin kalitesini arttırmak için vakum torbalama veya basınçlı torbalama işlemi yapılabilir.



Şekil 3.6. Elle yatırma metot üretim yöntemi [19]

Üretim yapılırken kullanılan elyaf malzemenin düzensizlik oluşturduğu bölgelerde reçine emiliminde farklı olacaktır. Bu sebeple üretilen malzemede bölgesel kalınlık farkları oluşacaktır. Yani bu üretim yönteminde düşük kalitede parça üretimi olasıdır. Kullanılan elyaf hacim oranı da sınırlı olup %30 civarındadır. Ancak prepreg kullanılarak bu oran arttırılabilir. Bu durum malzeme özelliklerinin çok önemli olduğu yerlerde görülebilir

3.6. Kompozit Malzemelerin Hasar Mekanizmaları

Kompozit malzemeler, yük uygulandığında çeşitli hasar mekanizmalarına maruz kalabilirler. Bu hasar, malzemenin yapısal özelliklerine, uygulanan yükün türüne ve çevresel faktörlere bağlı olarak farklı şekillerde oluşur. Lif yönelimi ve yapısı, matris malzemesi, yük türü ve büyüklüğü, çevresel faktörler ve üretim süreci kompozit malzemenin hasar mekanizmalarını etkileyen faktörlerdir [3,20,21].

3.6.1. Matris çatlaması

Birinci hasar türü matris çatlaması, kompozit malzemelerin ömrü boyunca karşılaştıkları ilk hasardır ve lifler arasındaki bağın zayıflaması sonucu ortaya çıkar. Sıcaklık değişimleri gibi çevresel faktörler veya uygulanan yükler bu çatlakların oluşumunu hızlandırabilir. Matris çatlaması, daha ciddi hasarlara yol açan ve böylece kompozitin genel performansını olumsuz etkileyen bir durumdur. Bundan dolayı matris çatlaması, tasarım ve üretim aşamalarında özellikle kritik sektörlerdeki havacılık ve uzaydaki kompozit malzemelerin bulunduğu yerlere daha derinden bakılması gereken bir konudur [5].

3.6.2. Fiber kırılması

Kompozit malzemelerde lif kırılması, bu malzemelerin hem sertliğini hem de dayanımını azaltan önemli bir hasar mekanizmasıdır. Yapılan araştırmalar, lif kırılmasının başlangıcının, malzemenin bükülme yükü üzerindeki etkisiyle, sertliğindeki azalmadan daha büyük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, lif kırılmalarının malzemenin dayanımı üzerindeki etkisi, sertlik üzerindeki etkisine göre çok daha belirgindir. Bu nedenle, bir laminatta kırılma gözlemlendiğinde taşıma kapasitesinin derhal incelenmesi gerekmektedir [5].

3.6.3. Bağ kopması

Kompozit malzemelerde ayrılma, genellikle çatlakların varlığıyla ilişkili yüksek ara yüzey gerilmesi bölgelerinde meydana gelir. Darbe yüküne maruz kaldığında, yapışma başarısız olduğunda lifin büyük bir kısmı koparılabılır [5].

3.6.4. Delaminasyon

Kompozit malzemelerde delaminasyon, esas olarak yabancı cisimlerden kaynaklanan darbeler nedeniyle oluşur. Delaminasyon oranı arttıkça kompozit katmanları arasındaki yapışma azaldığı için, kompozit malzemelerde en kritik hasar modlarından biridir [5].

3.6.5. Fiber çıkması

Kompozit malzemelerde fiber çıkmasının nedeni laminatlar arası zayıf bağ olarak kabul edilir [5].

3.6.6. Mikro burkulma

Kompozit malzemelerde mikro bükülme, liflerin bükülmesi nedeniyle oluşan yerel hasar ve matris çatlaklarına yol açar. Bu da kompozit laminatların mekanik özelliklerini ve matrisini etkiler [5].

3.6.7. Bükülme bantları

Kink bantları, kompozit laminatlarda sıkıştırma yükleri altında liflerin yer değiştirmesi veya plastik mikro bükülme sonucu oluşan, orijinal lif yönünden sapma gösteren belirgin bir bükülme deformasyonudur. Bu deformasyon, kompozit malzemenin basınç dayanımını önemli ölçüde düşürür ve sabit bir yayılma gerilmesi altında sürekli olarak büyür [5].

3.7. Yapısal Sağlık İzleme

Yapısal Sağlık İzleme (SHM), yapıların sağlık durumunu ve ömrünü belirlemek amacıyla veri toplama, yorumlama ve analiz etme sürecidir. Kompozit malzemeler, son yıllarda

yapıların ağırlığını azaltırken mekanik özelliklerini artırmak için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, kompozit malzemeler düşük ila orta şiddetteki etkiler (1 – 10 m/s ve 11 – 30 m/s) altında hasar riski taşır. Bu sebeple, kompozit malzemelerde hasarı erken aşamada tespit etmek için SHM tekniklerinin kullanımı oldukça önemlidir. Mevcut SHM yöntemlerinden bazıları kompozit yapılar üzerindeki hasarı tespit edebilse de hiçbir yöntem tüm durumlar için ideal bir çözüm sunmamaktadır [3]. Bu yöntemlerin her birinin kendilerine göre dezavantajları ve kısıtları mevcuttur. SHM yöntemlerden bazılarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Titreşim temelli ölçüm

Modal kuvvet enerjisi (Modal strain energy)

Frekans yöntemleri (Frequency method)

Vibrasyon iletimi (Transmissibility)

Sönümlleme (Damping)

Lamb dalgaları (Lamb waves)

- Akustik temelli ölçüm

Akustik emisyon

Ultrasonik

Akusto-Ultrasonik

Vibro-Akustik

- Cihaz temelli ölçüm

Sensör ağları (Sensor networks)

Eddy akımları (Eddy currents)

Elektrik direnç ölçümü (Electrical resistance)

Kızılötesi termografi (Infrared thermograph)

- Yapay sinir ağları (Artificial Neural Network)

3.7.1. Elektrik direnç ölçümü

Karbon nanotüpler yüksek elektrik iletkenliği olan malzemelerdir. Bu özellik karbon nanotüplerin yapıda yapısal hasar incelemek için kullanılmasına neden olmaktadır. Karbon nanotüpler adeta yapıda sensör görevi görürler. Karbon nanotüpler kullanıldıkları malzemede bulundukları konumlarda ağ kurarak elektriği iletirler ancak malzemeye yük ya

da kuvvet uygulandığında bu ağlar etkilenir ve malzemede elektriksel direnç değişimi gözlemlenir. Bu durum yapısal hasar durumu hakkında yorum yapamıza neden olur. Elektrik direnç ölçümünde çeşitli multimetreler kullanılarak ölçüm yapılması istenen malzemelere iki elektrot ya da dört elektrot bağlanarak malzemenin bir ucundan gönderilen akımın elektriksel direnç nedeniyle düşüşü ölçülüp direnç ölçümü yapılır. Bu ölçüm yöntemi direnç değişimindeki ufak değişikliklere karşı hassastır, uygun maliyetlidir. Hassasiyeti, fiber hacmi ve elektrotların konumuna bağlı olması ise sistemin kısıtlarındandır. Fiber kırılması, fiber çıkması, delaminasyon, ayrışma (debonding) ve çatlakların izlenmesinde kullanılabilen bir yöntemdir [3].

Kompozit malzemeler farklı türde malzemelerden türetildiği için herhangi bir elektriksel iletkenlik değerleri yoktur. Üretiminde birden fazla metal kullanılan kompozit malzemeler iletken, üretiminde birden fazla yalıtkan malzeme kullanılan kompozit malzemeler ise yalıtkan olmaktadır. Ancak kompozit malzeme üretiminde iletken ve yalıtkan malzemeler beraber kullanılırsa oluşturulan yapıdaki iletken ve yalıtkan malzemenin geometrik dağılımına bağlı olarak malzemenin iletkenliği değişebilir [18].

Üretimini gerçekleştirdiğimiz numunenin matris malzemesi normal şartlar altında elektrik iletkenliği olmadığı için yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan cam fiberlerde elektrik iletkenliği olmayan malzemelerdir. Ancak üretimi yapılan kompozit malzememize hibrit özelliği kazandıran karbon nanotüpler ileri derecede elektrik ve termal iletken özellik sahibidir. Bu da kompozit malzemeye elektrik iletkenlik kazandırmaktadır. Üretilen kompozit malzemelerin açısal yönlenmelerinin elektriksel direnç üzerindeki etkisini incelemek üzere malzemedeki ufak boyutsal farklılıkları ortadan kaldırmak amaçlı numunelerin öz dirençleri hesaplanmıştır.

Bir numunenin elektriksel dirençleri multimetre, avometre ve ohmmetre gibi cihazlarla iki problu ya da daha hassas ölçüm yapabilmek için dört problu olarak ölçüm gerçekleştirilebilmektedir. Bu cihazlar vasıtası ile elde edilen direnç değerleri aşağıdaki formülasyonda kullanılarak öz direnç değeri elde edilmektedir.

$$P = \frac{RA}{L} = \frac{Rdt}{\Delta L} \quad (3.1)$$

ρ = Özdirenç (kohm.mm)

R = Direnç (kohm-k Ω)

A = Alan (mm²)

d = Numunenin genişliği (mm)

t = Numunenin kalınlığı (mm)

L = Direnç ölçümünün yapıldığı karbon fiberler arası mesafe (mm)

Çalışmamızda kullanılan numunelerin matris fazı olarak epoksi malzemesi kullanılmıştı. Normal şartlar altında bu malzeme yalıtkan bir malzemedir. Yani elektrik akımını iletmez. Bu numunelerde elektrik direnç değişimi ile tahribatsız muayene yapılabilmesi için numunenin iletken olması gerekmektedir. Bu amaçla matris malzemesine oldukça iletken olan KNT ilave edilmiştir. Böylelikle numunelere eğme ve çekme gibi testler vasıtası ile yük uygulandığında elektrik değişimini cihaz vasıtası ile ölçülerek hasar tespiti yapılabilmesi sağlanmıştır. Elektrik direnç değişimi denklem (4)'teki eşitlik kullanılarak elde edilmektedir.

$$\Delta R(\%) = ((R_i - R_0)/R_0)100 \quad (3.2)$$

$\Delta R(\%)$ =Yüzdesel direnç değişimi

R_i = Kopma anındaki direnç değeri (Mohm)

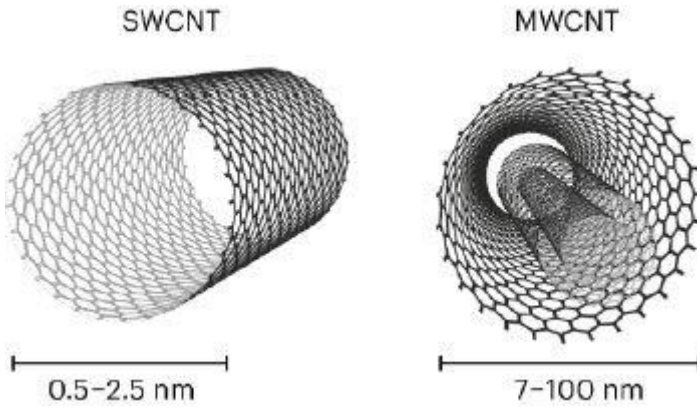
R_0 =Başlangıçtaki direnç değeri (Mohm)

3.7.2. Kızılötesi termografi

Bir yapı sağlıklı olmadığı durumlarda normalin dışında farklı sıcaklıklara sahip olabilir. Bu sebeple kızılötesi teknoloji ile sıcaklık farklılıkları termal kamera ile online olarak ölçülüp yapısal sağlık durumu incelenebilir. Bu sayede yapıdaki olası arızalar erkenden tespit edilip önlemlerin alınmasını sağlayarak daha büyük sorunların oluşması engellenebilir. Bu yıkıcı olmayan test metodu, mutlak sıcaklığı 0 K'den yüksek olan her cismin kızılötesi radyasyon yayma ilkesine dayanarak gerçekleştirilir [22].

3.8. Karbon Nanotüp

Karbon nanotüpler tüp şeklinde ve ölçüleri nano boyutta olan nano malzemelerdir. Duvar sayısına göre kendi aralarında çeşitlenmektedir. Single walled carbon nanotüp (SWCNT), double walled carbon nanotüp (DWCNT) ve multi walled carbon nanotüp (MWCNT) karbon nanotüp çeşitlerindendir.

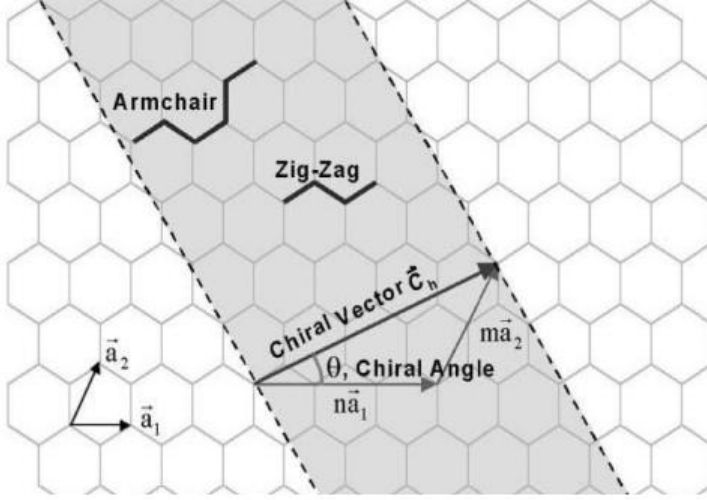


Şekil 3.7. SWCNT ve MWCNT partiküllerinin yapıları [23]

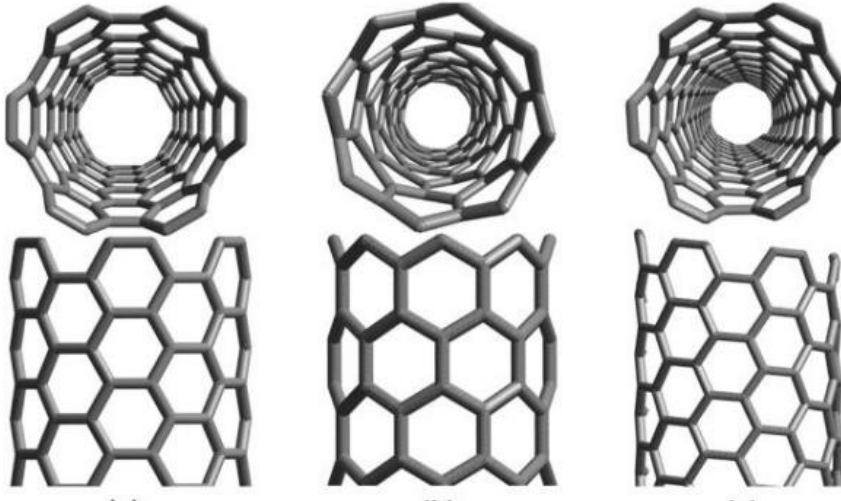
Karbon nanotüpler kevlar ve çeliklere kıyasla yüksek çekme dayanımı mevcuttur. Ayrıca bu malzemeler yüksek elastik modülüne sahiptirler. Yani bu malzemelere yük uygulandığında nanotüp şekil değiştirebilir ve yük kaldırılınca eski şekline geri döner. Tabi ki de bu şekil değişikliğini kalıcı olarak sağlayabilecek yüklerde mevcuttur. Bu malzemelerin dayanımı karbon nanotüplerin yapısındaki hasarlar yüzünden düşebilmektedir. Bu malzemeler yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahiptirler ve yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilecek güce sahiptirler. Bakır tellere göre de dakikada on beş kat daha iyi watt iletirler. Bu seçkin özelliklerinden dolayı da oldukça geniş alanda ve farklı uygulamalarda tercih sebebi olurlar. Elektronik ve tekstil sektöründe su geçirmez ve yırtılmaz malzeme olarak kullanılabilirler.

Karbon nanotüpler bulundukları yapıda şekillerinden dolayı oksijen gaz sensörü olarak ve elektrik direnç değişiminden etkilendikleri için direnç ölçümünde sensör olarak kullanılmaktadır [24]. Çalışmamızda da üretilen numunelere uygulanan yükler karbon nanotüplerin oluşturduğu ağları zayıflatıp yıkacağı için elektriksel direnç değerlerinde değişmelere neden olmaktadır. Yani bu malzemenin yapıda sensör olarak kullanılabileceğinin kanıtıdır.

Karbon nanotüplerin kiralitesi (n, m) indeksleri ve kıvrılma açısı (α) ile tanımlanır. Bu özellik, Karbon nanotüplerin bant yapısını ve dolayısıyla elektriksel özelliklerini belirler. Bu özelliklerde yapılan değişiklikler bu malzemelerin iletkenliklerine olumlu ya da olumsuz etki yapacaktır [10].



Şekil 3.8. Bir grafit altıgen levhasının karbon nanotüp oluşturacak şekilde nasıl rulo haline getirildiğini gösteren şematik diyagram [3]



Şekil 3.9. Farklı kiraliteye sahip KNT örnekleri a) armchair (metalik), b) zigzag (metalik ya da yarı iletken), c) chiral (metalik ya da yarı iletken) [25]

3.8.1. KNT uygulama alanları

- Nano aygıt ve transistörlerden bütünleşik devreler,
- Kalıcı bilgisayar belleği ve laptop,

- Kurşun geçirmez kumaşlar,
- Nano tekstil denilen leke ve bakteri tutmayan kumaşlar,
- Ortamda bulunan zehirli gazları algılamak için gaz dedektörü,
- Hidrojen depolama ve yakıt hücresi,
- Yüksek yoğunluklu bilgi depolayan küçük ölçekli sabit disk,
- Nano mıknatıs,
- Hava taşıtlarında yıldırımsavar,
- Deformasyon ölçümlerinde kullanılan elektrik iletken madde [16].

Ayrıca karbon nanotüpler nanokompozit olarak gömülü sensör, polimerik, nanokompozitler, veri depolama sistemleri için manyetik nanokompozitler, akıllı tekstil ürünleri, yakıt hücreleri otomotiv, cam ve beyaz eşyalar için nano kaplamalar olarak kullanılabilir [26].



Şekil 3.10. a) Uçağın dış yapısında yıldırımını iletecek düşük dirençli yol, b) Yıldırım çarpmasının etkisi [9]

3.8.2. KNT dağıtımı (Ultra sonikasyon)

Karbon nanotüplerde bulunan van der Waals bağları nedeniyle KNT'ler birbirini çekerler ve agregasyon diye bilinen toplanma işlemi yaparlar. Bu durum KNT'lerin matris içinde homojen dağılımını engeller [9]. Bu durumun engellenmesi için fiziksel ve kimyasal olarak çeşitli dağıtım yöntemleri kullanılabilir. Fiziksel olarak eriyik karıştırma, ultrasonik titreşim ve süperkritik akışkan, kimyasal olarak ise asit oksidasyon ve serbest radikal reaksiyonu ile dispersiyon işlemi yapılabilir [3].

Bütün bu işlemlerin kendine göre avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Biz çalışmamızda karbon nanotüplerin matris malzemesi içinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için ultrasonik parmak titreşim cihazını kullandık. Bu işlemle KNT aglomerasyonları ultrasonik

titreşimler sayesinde birbirinden ayrılmaktadır. Araştırmacılara göre bu yöntem diğer üretim yöntemlerine göre daha verimlidir ve vizkozitesi yüksek akışkanlarda da işlevselliğini korumaktadır [13].

Ultrasonik titreşim ile dispersiyon yapma işlemi en çok tercih edilen dağıtım yöntemi olmasına rağmen bazı kusurları mevcuttur. Bu işlem sırasında titreşim polimerik zincire ve nanopartikül yapısına zarar verebilmektedir [8]. Bu kompozit malzemelerde kullanılan karbon nanotüp malzemesinin yapısı da malzemenin mekanik, elektrik ve termal özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Bu sebeple dispersiyon yapılırken malzemelere hasar vermeden daha iyi homojen dağılım sağlayan yöntemler tercih edilebilir.

3.9. Polimer Kompozit Malzemelerde Mekanik Testler

Kompozit malzemeler, özellikle hafif kompozit yapılar, havacılık, inşaat, kara taşımacılığı ve çevre dostu enerji sistemleri gibi giderek artan çeşitli ürün ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alanlar, kompozit malzemelerin bileşen ve yapılarının kullanılmadan önce mekanik ve fiziksel testlerden geçirilmesini büyük ölçüde gerektirmektedir [27]. Bu amaçla üretilen yapıyı tanımak için kompozit malzemeler farklı tür testlere tabi tutulmaktadır ve her birinin farklı standartları mevcuttur.

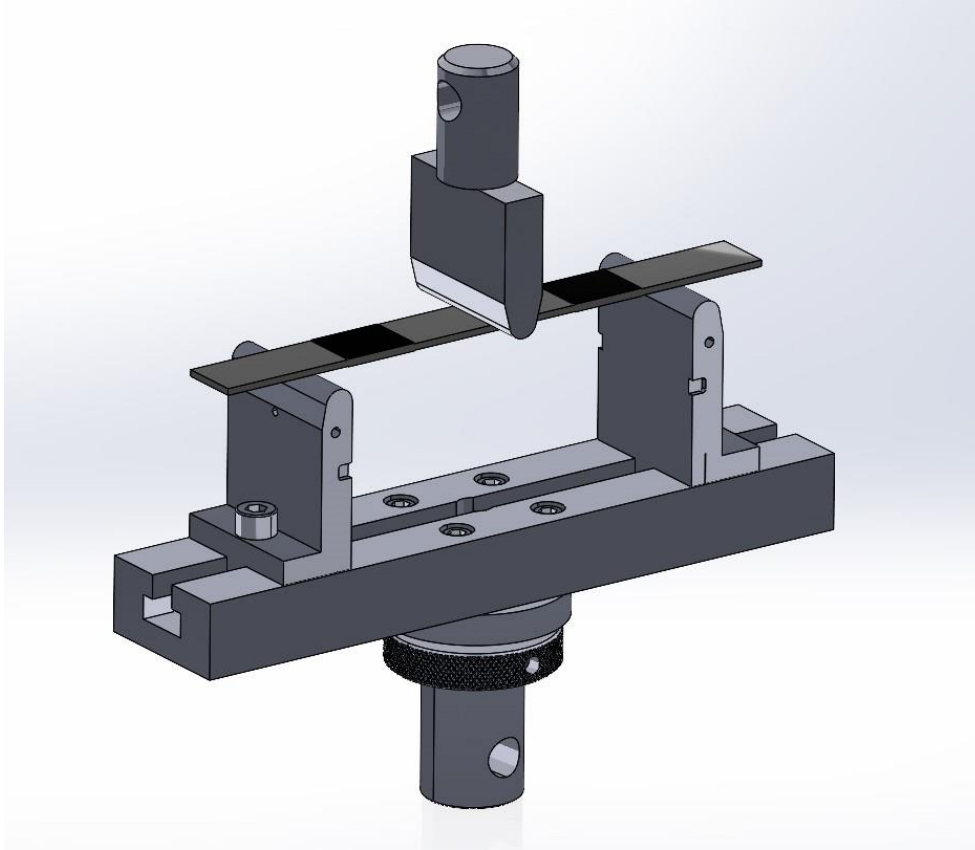
Polimerlerin ve kompozitlerinin mekanik ve fiziksel testleri, malzeme özelliklerini belirlemek için ürünün tasarım ve analizinde, kalite kontrolünde, uygulama performans gereksinimlerinde ve üretim sürecinde hayati öneme sahiptir [27].

Plastik matrisli kompozit malzemeler için kullanılan en yaygın mekanik test metotları; çekme, basma, eğme, darbe, kesme, katmanlar arası kesme, yorulma ve Kriyojenik testleridir [27]. Çalışmamızda üç nokta eğme ve çekme testleri yapılmıştır.

3.9.1. Plastik kompozit malzemelerde 3 nokta eğme testi

Eğme testi malzemenin mekanik özelliklerini tanımlamak için yapılır. Bu testte numuneye orta noktasından yük uygulanarak malzemenin eğilmesine neden olabilecek yükün bulunmasını sağlar [27]. Dikdörtgen kesitli numune iki destek üzerine yerleştirilir. Yerleştirilen numune aşağıdaki görselden de görüldüğü gibi iki destek üzerine ortalanır ve

numunenin tam orta noktasından malzemeye yük uygulanarak deney gerçekleştirilir [28]. Bu deney ASTM ve ISO standartlarına uygun olarak yapılabilir. ASTM standartlarına göre numunede %5'lik bir uzama olduğunda ya da 5%'lik uzamaya gelirken kırılincaya kadar test sürdürülür ancak ISO standartlarına göre numune kırılana kadar test devam ettirilir. Çalışmamızda yapılan deneyde numuneler kırılincaya kadar eğme yüküne maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.11. Eğme testi yükleme burnu ve destek yarıçapı konumları

$$\sigma_{eğme} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.3)$$

$\sigma_{eğme}$ = Eğme Stresi (MPa)

F = Uygulanan yük (N)

L = Destekler arası mesafe (mm)

b = Numunenin genişliği (mm)

d = Numunenin kalınlığı (mm)

Eğme yükünde mukavemet değerini hesaplamak için numunenin taşıyabileceği en fazla yük değeri kullanılır.

3.9.2. Plastik kompozit malzemelerde çekme testi

Çekme testi bir numuneyi kırmak için uygulanması gereken kuvvetin ölçülmesini sağlayan testtir [27]. Dikdörtgen kesitli numune çekme cihazına yerleştirilir. Numunenin her iki ucu çekme cihazının çeneleri tarafından yük uygulandığında çıkmaması için sıkıştırılır. Malzeme kopana kadar hareketli çene tarafından malzemeye uygulanan çekme yükü artırılır. Malzeme koptuğundan gerilim/şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Bu eğri üzerinden malzemenin elastik modülü, poisson oranı ve önemli şekil değiştirme verileri elde edilir [28].

Polimer kompozit malzeme uygulamalarında lif yönlenmesinin ayarlanması çekme testi sonuçları için önemlidir. Çünkü bu tür malzemeler numunenin her tarafında aynı özellik göstermediği için lif yönlenmesinde önemli derecede etkilenmektedir. Kuvvet uygulanan yönde lif yönlenmesinin yapılması mukavemeti arttıracaktır ancak diğer açılarım mukavemetlerinde azalma görülecektir.

$$\sigma_{\text{çekme}} = \frac{F}{bd} \quad (3.4)$$

$\sigma_{\text{çekme}}$ = Çekme Stresi (MPa)

F = Uygulanan yük (N)

b = Numunenin genişliği (mm)

d = Numunenin kalınlığı (mm)

3.10. Weibull Analizi

Bu çalışma kapsamında, elektriksel direnç değişimine dayalı güvenilirlik analizi, hasar anında elde edilen veriler kullanılarak weibull analizi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda, istenen güvenilirlik seviyesine uygun olarak yorulma hasarını engelleyen elektriksel direnç değişim oranlarını belirlemek için güvenilirlik grafikleri oluşturulmuştur. Basitlik ve güvenilirlik bakımından bu çalışma kapsamında iki parametrelili dağılım fonksiyonu tercih edilmiştir. İlgili iki parametrelili dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 3.5'te tanımlanmaktadır.

$$(X) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (3.5)$$

Bu çalışmada, iki parametrelili dağılım fonksiyonu, basit ve güvenilir bir yaklaşım olduğu için tercih edilmiştir. İki parametrelili dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu Eş. 3.5 ile ifade edilmektedir. Burada α ölçek parametresi olarak karakteristik ömrü, β ise şekil parametresi olarak weibull eğimini temsil etmektedir. Bu parametrelerin her biri deneysel yöntemlerle belirlenmelidir.

Weibull kümülatif frekans fonksiyonu, Eş. 3.5'in her iki tarafının integralini alarak bulunabilir. Burada $F(x)$ arıza olasılığı ve x değişkenini temsil etmektedir. $R(x)$ hayatta kalma olasılığı daha sonra Eş. 3.7 ile hesaplanabilir. Eş. 3.6'da her iki tarafının logaritması alındığında Eş. 3.8 şekline lineer hale getirilebilir.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (3.6)$$

$$R(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (3.7)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(x)}\right)\right) = \beta \ln x - \beta \ln \alpha \quad (3.8)$$

Son duruma göre Eş. 3.8 $y = mx+c$ formunda doğrusal fonksiyon halini alır. $Y=\ln(\ln(1/(1-F(x))))$, $m=\beta$, $c=-\beta \ln(\alpha)$ olarak ifade edilebilir.

Weibull doğrusu oluşturmak için şekil parametresi (α) ve weibull eğimi (β) elde etmek için aşağıdaki prosedür izlenmelidir.

- (1) Her bir numune tipi için malzemenin kırıldığı ana denk gelen elektriksel direnç değişim oranları artan sırayla sıralanmıştır.
- (2) Bernard'ın Medyan Sırası Formülü, her bir değer için medyan ömrü (yüzde 50 arıza olasılığı) hesaplamak için Eş. 3.9 ile kullanılır. Burada i ve n , sırasıyla direnç değişim oranlarının seri numarasını ve toplam sayısını yüzde olarak temsil etmektedir.

$$MR_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (3.9)$$

(3) Weibull doğrusunda Y eksenindeki değerler $\ln(\ln(1/(1-MR_i)))$ formülüyle hesaplanır.

(4) Weibull doğrusunda X eksenindeki değerler $\ln(\Delta R_i)$ formülüyle hesaplanır.

(5) Weibull doğrusu çizilir ve weibull doğrusunun eğimi β ve c değerleri doğrusal regresyon ile elde edilir.

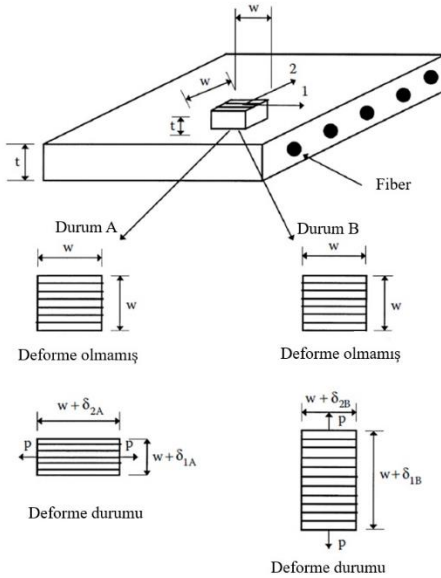
(6) α değerleri $c = -\beta \ln(\alpha)$ formülüyle elde edilir.

(7) Denklem (7) düzenlenerek, $R(x)$ ve ΔR hayatta kalma grafiği denklem (10) kullanılarak çizilebilir [29].

$$\Delta R = \alpha(-\ln R(x))^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.10)$$

3.11. Ortotropik Tabaka

Kompozit yapılar bükülme ve burulma gibi çeşitli yüklere maruz kalır. Güvenli kompozit yapılar tasarlamak için kompozit yapılardaki gerilmeleri ve deformasyonları anlamak gereklidir. Bir katmanın makro mekanik analizi katmanın homojen olduğu düşünülerek ortalama özellikler hesaba katılarak gerçekleştirilir. Bir katman matris malzemesinden ve takviye fazından oluşmaktadır. Yapıyı oluşturan katmanlar izotropik özellikler sergilememektedir. Çalışmamızda eş yönlü takviye fazı kullanılmıştır [30].



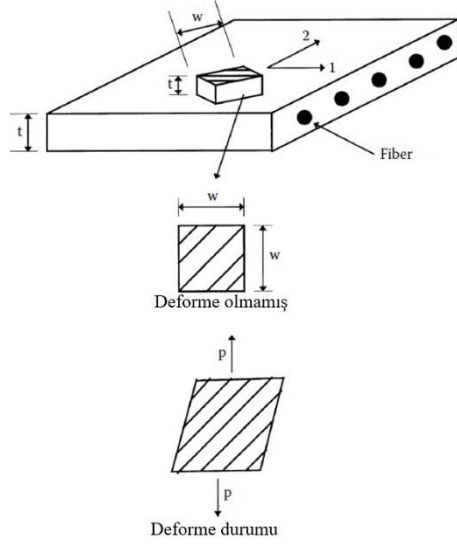
Şekil 3.12. Eş yönlü cam fiber kompozit malzeme deformasyon grafiği [30]

Tek yönlü tabakanın liflerin yönündeki rijitliği, liflere dik yöndeki rijitliğinden çok daha büyüktür.

$$E_1 > E_2 = E_3 \quad (3.11)$$

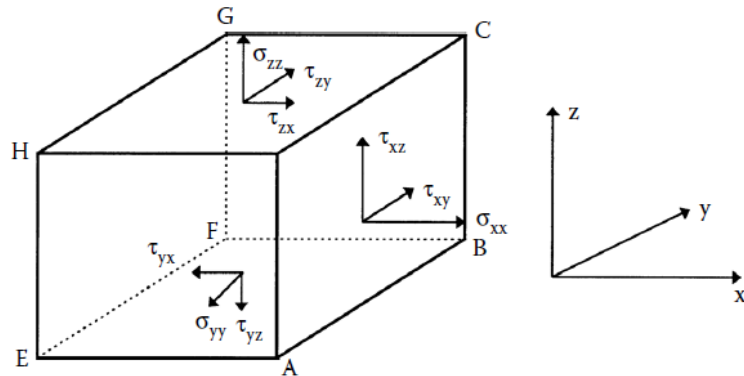
$$\delta = Pw/AE, \delta_1 = Pw/(AE_1), \delta_2 = Pw/(AE_2) \quad (3.12)$$

$$\delta_1 < \delta_2 \quad (3.13)$$



Şekil 3.13. Açılı eş yönlü cam fiber kompozit malzeme deformasyon görseli [30]

Eğer kare plakanın kenarlarına göre lifler bir açıyla yerleştirilirse, farklı açılar için deformasyonlar farklı olacaktır. Kare plaka yalnızca normal yönlerde deformasyonlar yaşamaz, aynı zamanda şekil bozulmasına da uğrar. Amaç, bir tabakanın mekanik karakterizasyonu için gereken minimum parametre sayısını bulmaktır. Malzeme üzerinde belirtilen rastgele bir noktada altı bağımsız gerilme mevcuttur [30].



Şekil 3.14. Açılı eş yönlü cam fiber kompozit malzemede genel üç boyutlu gerilme [30]

σ_x = x yönünde normal gerilme

σ_y = y yönünde normal gerilme

σ_z = z yönünde normal gerilme

τ_{xy} = xy düzleminde kesme gerilmesi

τ_{xz} = xz düzleminde kesme gerilmesi

τ_{yz} = yz düzleminde kesme gerilmesi

Normal gerinim cismin boyut ve şeklindeki göreceli değişim olarak adlandırılabilir. Bir yapıya kuvvet uygulanması üzerine:

Deformasyon gerçekleşir.

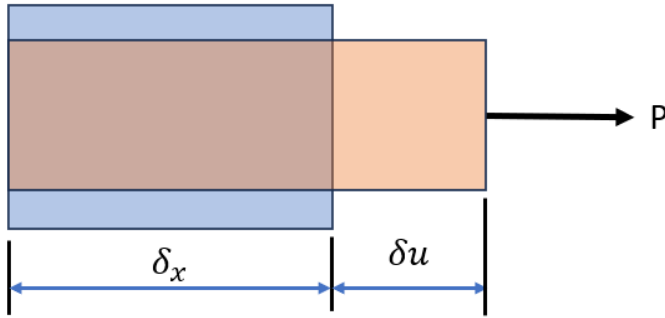
Güvenilir tasarım için deformasyon bilinmelidir.

Malzemede oluşan gerilmeleri bulmak için deformasyon bilinmelidir.

$u = u(x, y, z) = (x, y, z)$ noktasında x yönündeki şekil değişimi

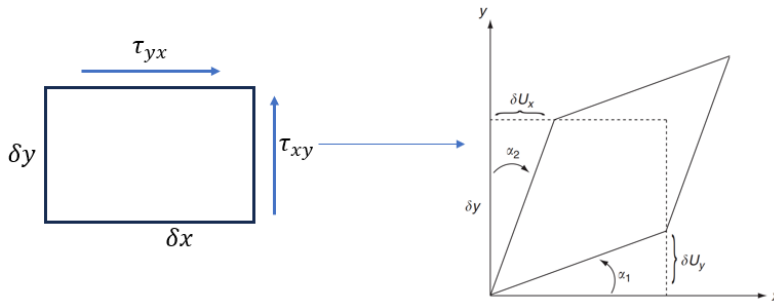
$v = v(x, y, z) = (x, y, z)$ noktasında y yönündeki şekil değişimi

$w = w(x, y, z) = (x, y, z)$ noktasında z yönündeki şekil değişimi



Şekil 3.15. Yük altında numunede oluşan normal şekil değişimi görseli

$$\epsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x}, \epsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y}, \epsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (3.14)$$



Şekil 3.16. Yük altında numunede oluşan kesme şekil değişimi görseli

Xy, xz ve yz ekseninde açısal deformasyon Eş. 3.15'te belirtilen formülasyondan hesaplanabilir. Ancak toplam deformasyon Eş. 3.16'da formülasyondan hesaplanabilir.

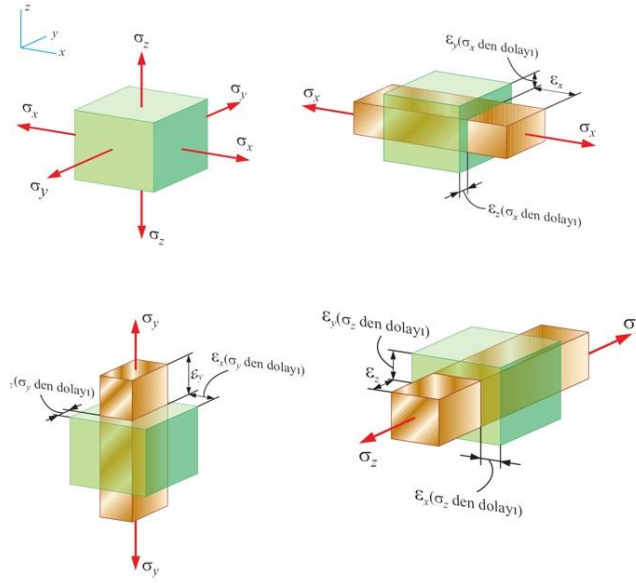
$$\alpha_1 = \frac{\delta v}{\delta x}, \alpha_2 = \frac{\delta u}{\delta y} \quad (3.15)$$

$$\gamma_{xy} = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.16)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \quad (3.17)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \quad (3.18)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \quad (3.19)$$

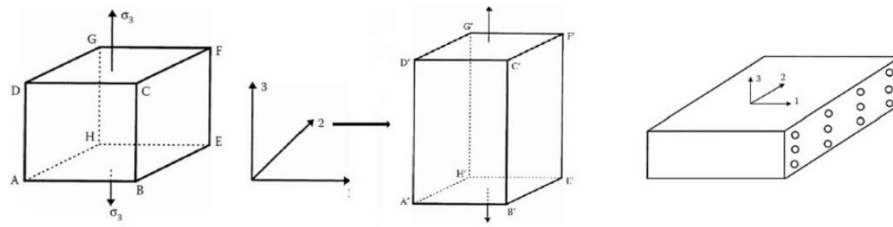


Şekil 3.17. Genelleştirilmiş hooke kanunu [30]

$$\epsilon_x = 1/E(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z) \quad (3.20)$$

$$\epsilon_y = 1/E(\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z) \quad (3.21)$$

$$\epsilon_z = 1/E(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y) \quad (3.22)$$



Şekil 3.18. Ortotropik kompozit malzemeler için gerilmeler [30]

Bir ortotropik malzeme için:

- $\tau_{13} = 0$ (1-3 düzleminde deformasyon yok)

- $\tau_{23} = 0$ (2-3 düzleminde deformasyon yok)
- $\tau_{12} = 0$ (1-2 düzleminde deformasyon yok)
- 1-2 düzlemi simetri düzlemidir.
- 2-3 düzlemi simetri düzlemidir.
- 3-1 düzlemi simetri düzlemidir.
- Tüm yönlerde normal deformasyonlar meydana gelir.
- 9 bağımsız elastik sabit vardır.

Ortotropik malzemeler için rijitlik matrisi aşağıdaki gibidir.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Ortotropik malzemeler için uygunluk matrisi aşağıdaki gibidir.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_1 = S_{11}\sigma_1 \quad \gamma_{23} = 0 \quad E \equiv \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{1}{S_{11}} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_2 = S_{12}\sigma_1 \quad \gamma_{31} = 0 \quad \nu_{12} \equiv -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{S_{12}}{S_{11}} \quad (3.26)$$

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 \quad \gamma_{12} = 0 \quad \nu_{13} \equiv -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = -\frac{S_{13}}{S_{11}} \quad (3.27)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1 - v_{23}v_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{v_{21} + v_{23}v_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{v_{31} + v_{21}v_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{21} + v_{23}v_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{1 - v_{13}v_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{v_{32} + v_{12}v_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{31} + v_{21}v_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{v_{32} + v_{12}v_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1 - v_{12}v_{21}}{E_1 E_2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{v_{12}}{E_1} & -\frac{v_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{v_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{31}}{E_3} & -\frac{v_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\Delta = (1 - v_{12}v_{21} - v_{23}v_{32} - v_{13}v_{31} - 2v_{21}v_{32}v_{13}) / (E_1 E_2 E_3) \quad (3.30)$$

$$\sigma_3 = 0, \tau_{23} = 0 \text{ ve } \tau_{31} = 0 \quad (3.31)$$

$$\varepsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 \quad (3.32)$$

$$\gamma_{23} = \gamma_{31} = 0 \quad (3.33)$$

Düzlem gerilim dağılım durumu incelendiğinde üç boyutta oluşan kısaltılmış rijitlik matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{12} = -\frac{v_{12}}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \quad (3.36)$$

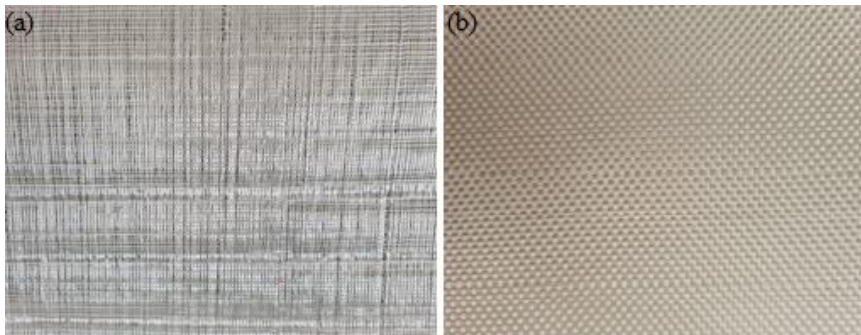
$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-v_{21}v_{12}}, Q_{12} = \frac{v_{12}E_2}{1-v_{21}v_{12}}, Q_{22} = \frac{E_2}{1-v_{21}v_{12}}, Q_{66} = G_{12} \quad (3.37)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma bilimsel anlamda bir veriyi test etmek, yeni bir bilgi öğrenmek, ortaya atılan tezi ispatlamak veya çürütmek için yapılan sistematik bilimsel bir çalışmadır. Bu çalışmalarda amaç deney sonuçlarından yola çıkarak bilgi öğrenmektir denilebilir. Çalışmamız kapsamında yükleme altında elektrik direnç değişimlerini ölçebilmek için eğme ve çekme deneyleri yapılmıştır. Eğme ve çekme testleri esnasında kompozit numunenin yapısal sağlık durumunun incelenmesi için multimetre ve çekme testi için ayrıca termal kamera kullanılmıştır.

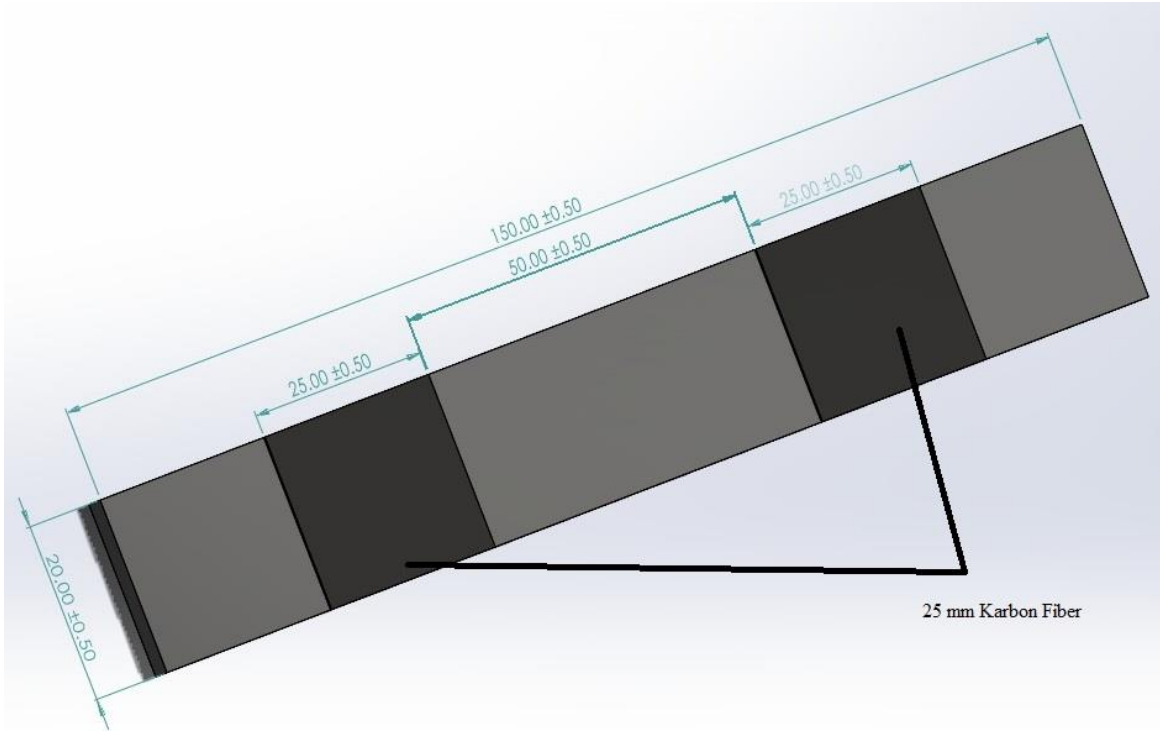
4.1. Malzeme Seçimi

Çalışmamızda lif yönlenmesinin, farklı tür cam fiber dokumasının ve yoğunluk farklarının elektriksel direnç değişimlerini üzerine etkisini incelemek üzere numunelerimizi karbon nanotüp katkılı, cam fiber takviyeli epoksi polimer hibrit kompozitler olarak ürettik. Matris malzemesi olarak yurtiçi firmalarından tedarik ettiğimiz epoksi termoset malzemesi kullanılmıştır. Kütleme sürecini başlatmak için yine aynı üretici firmadan tedarik ettiğimiz sertleştiriciler kullanılmıştır. Karbon nanotüp, malzemenin mekanik, elektrik ve termal özelliklerini geliştirmek için yapımızda gömülü sensör olarak kullanılmıştır. Bunun için diğer türlerine nazaran üretilen numunenin kullanıldığı uygulamalarda daha iyi mekanik özellikler elde edilmesini sağlayan çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanıldı. Hibrit kompozit malzemesi oluşturmak için takviye fazı olarak hafif, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özellikleri taşıyan eş yönlü ve alansal yoğunluğu 300gr/m^2 olan cam fiberler ve dokuma olarak üretilen alansal yoğunlukları ise 200gr/m^2 ve 300gr/m^2 olan cam fiberler farklı farklı numunelerin üretimi için kullanılmıştır.



Şekil 4.1. a) Eş yönlü cam elyaf, b) Dokuma tipi cam elyaf

Bütün bu malzemelere ek olarak elektriksel direnç değerlerini malzeme üzerinden ölçebilmek için şerit şeklinde bütün numunelerde alttan ve üstten çift taraflı olacak şekilde alttaki resimde görüldüğü gibi belirtilen boyutlarda geçen 25 mm genişliğinde karbon fiber ve daha doğru ölçüm yapabilmek için eğme testindeki numunelerde karbon fiberleri saran bakır şerit, çekme testindeki numunelerde ise gümüş bant kullanılmıştır. Üretim için seçilen bu malzemeler ilerleyen teknolojinin taleplerini karşılayabilmek için araştırmalarda yoğun olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. Eğme numunesinin Solidworks modelinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve boyutları

4.2. Numune Üretim Teknikleri

Üretimde kullanılacak malzemeler sipariş edildikten sonra üretime hazırlanmıştır. Eğme test numunelerimiz 150x200mm boyutlarındaki plakalardan beşer adet kesilecek şekilde her açısall yönelme ve alansal yoğunluk için birer plaka olacak şekilde dokuz farklı plaka hazırlanmıştır. Yani her bir eğme numunemizin ölçüsü 20x150mm boyutlarındadır. Numunelerin kalınlıkları ise kullanılan kumaşın dokuma tipine ve alansal yoğunluğuna göre değişmektedir. Aynı tür kumaşlarda da lokal olarak kalınlık farkları ya da serim yapılırken yapılan hatalardan, cam fiberin dağınıklığı gibi nedenlerden kaynaklı numuneden numuneye küçük kalınlık farkları olabilmektedir. Numune hazırlama sürecimizde elle yatırma yöntemi

kullanılacak olup ve bu yöntemde numunelerin porozitesini azaltıp malzemenin mekanik ve elektriksel özelliklerini arttırıp dolaylı yoldan elektriksel direnç değerinin düşmesini sağlamak için vakum torbalama yöntemi tercih edilmiştir. Yani malzemelerimiz elle yatırıldıktan sonra kompresör yardımıyla ortamdan gerekli sızdırmazlık ekipmanları vasıtasıyla hava ve nem uzaklaştırılmıştır. Bu işleme ilk önce 1000x1000mm boyutlarındaki cam, alkol ile temizlenerek başlandı. Cam temizlendikten sonra kalıp ayırıcı polivaks cam üzerine on beşer dakikalık aralıklar ile üç kat sürülmüştür. Polivaks sürülü bölgenin üzerine 80gr/m² alansal yoğunluğa sahip soyma kumaşı malzeme kürlendikten sonra cam üzerinden ayırmayı kolaylaştırmak ve temiz bir yüzey elde etmek amacıyla serilmiştir. Soyma kumaşı üzerine ilk kat olarak 25 mm genişliğindeki karbon fiber malzemeler her numunenin iki uç kısmından eşit uzaklıklarda olacak şekilde serim yapılmıştır ve üzerine epoksi/KNT/sertleştirici karışımı yedirilmiştir. Şöyle bir epoksi/KNT/sertleştirici karışımına değinecek olursak; her bir 150x200 mm'lik plakaya 50 gram epoksi ve epoksinin 0,3wt% oranında KNT kullanılmıştır. Bu oran karbon nanotüpün matris malzemesine fazla katılıp topaklanmasını önlemek için malzemenin mekanik, elektrik ve termal özelliklerini korumak ve az katılıp daha düşük özellikler sergilemesini önlemek için optimum değer olarak önceki çalışmalarımızdan elde edilmiştir [29,31]. Yani her 50 gramlık epoksiye 0,15gr KNT ilave edilmiştir. Sonrasında karbon nanotüp epoksi içinde tahta kaşık yardımıyla dağıtılmıştır. Ancak bu malzemeler nano boyutta malzemeler olduğu için bu karıştırma malzemenin istenilen özelliklere ulaşması için yeterli olmayacaktır. Karbon nanotüplerin matris malzemelerinde dağıtımı zorlayıcı bir görevdir ve kritik öneme sahiptir. Bu partiküllerin topaklanmasını önlemek ve lokal olarak farklı oranlarda karışımın önüne geçip homojen dispersiyonu sağlamak için ultra sonikasyon yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan cihaz yurtdışı menşeli ultrasonik titreşim üretebilen yüksek verimlilikli bir cihazdır. Oda sıcaklığında KNT/epoksi karışımını homojenize etmek için her numune yirmişer dk, bir sn titreşim ve bir saniye durma olacak şekilde ultrasonik olarak karıştırılmıştır. Elde edilen son karışım üretimde kullanılmak için epoksi üretici firmanın belirlediği oranlar ölçüsünde sertleştirici ile karıştırılarak serime hazır hale getirilmiştir. 50gr epoksi reçineye 25wt% oranına denk gelen 12,5gr sertleştirici ilave edilip karıştırılmıştır. Karbon fiberler epoksi karışımı ile ıslatıldıktan sonra cam fiber serilmiştir. Serilen cam fiberin üzerine epoksi karışımı serilmiştir ve cam fibere emdirilmesi sağlanmıştır. Bu işlem her bir plaka için beş kez yapılarak beş katmanlı lamine bir kompozit yapı elde edilmiştir. Bu süreçte önemli olan kısım cam fiber seriminde fibere aç verilmesidir çünkü çalışmamızın amacı fiber yönlenmesinin yük altında direnç değişimine etkisini incelemektir. Bu amaçla her bir plaka

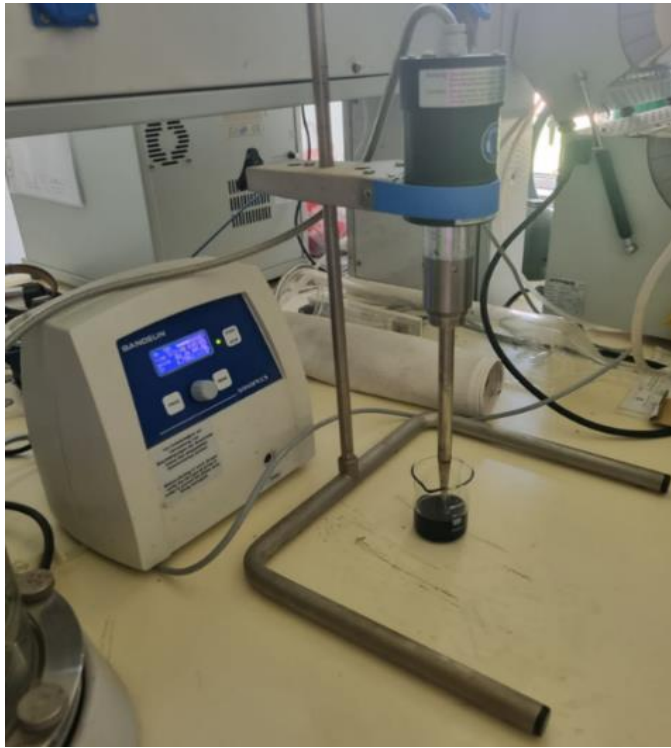
üretimi yapılırken y eksenine göre eş yönlü fiberler vasıtasıyla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° açılar oluşturulacak şekilde serim yapılmasıdır. Bu şekilde eş yönelimli cam fiber kumaştan farklı açılar için yedi farklı plaka ve dokuma kumaştan farklı iki alansal yoğunluk değeri için iki farklı plaka kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu cam fiberlerin serimi yapıldıktan sonra yine en alt tabakada olduğu gibi 25 mm genişliğindeki karbon fiber şerit en alttaki ile üst üste gelecek şekilde serim yapıp yine üstüne epoksi reçine/KNT/sertleştirici karışımı uygulanmıştır. Bu işlemlerin tamamlanması serim işlemlerin tamamlanması demektir. Bu işlemlerin ardından serim yapılan bölgenin kenarlarına sızdırmazlık macunu çekilmiştir. Sonrasında üzerine vakum torbası örtülmüştür. Vakum torbasının örtümü yapılırken sızdırmazlık macunu ile yapışması oldukça önemlidir aksi takdirde vakum yapılacak olan bölge hava alabilir. Vakum torbası örtülürken torba içinden havanın alınması için torba ile kompresör arasındaki geçişi sağlayan bağlantı ekipmanları kullanılmış olup bu ekipmanların sivri köşeleri torbaya zarar vermesini önlemek için sızdırmazlık macunu ile birleştirilmiştir. Bütün bu detaylı üretim koşulları sağlandıktan sonra yeterince güçlü kompresör yardımı ile ortam vakumlanmış ve vakum yapan borunun ucu kırılıp, bant ile yapıştırılıp içeri hava alması önlenmiştir.



Şekil 4.3. a) Cam fiber serimi yapılmadan önce, b) Cam fiber serim işlemi tamamlandıktan sonra

Bu süreçte bir diğer kritik konu ise sertleştirici epoksi/KNT ile karıştırıldıktan hemen sonra sertleştirici ile karıştırılmaması gerektiğidir. Aksi takdirde titreşim cihazında yeterince ısınan matris fazı, zaman içinde epoksi/KNT/sertleştirici karışımıyla tepkimeye girip yüksek sıcaklıklara çıkabilir, matris malzemesi serim yapılmadan kürlenebilir ve vizkozitesi artan karışımın elyaflara emdirilmesi oldukça zorlaşacaktır. Bu sebeple ultra sonikasyon sonrası ısınan matrise sertleştirici hemen ilave edilmemelidir. Ultra sonikasyon işlemi sonrası

epoksi/KNT karışımının uzun süre bekletilmesi de doğru olmamaktadır. Çünkü ultrasonik işlemde karbon nanotüpler arasındaki güçlü bağ kırılıp ayrışması sağlanır ve bu karışımın bekletilmesi bu bağların tekrardan oluşup nanotüplerin topaklanmasına neden olacaktır ve bu durum da üretimi yapılan malzemelerin birçok özelliklerini olumsuz etki edecektir. Yani üretim süreci birçok kısıtlaması olan hassas bir süreçtir ve bu detaylara riayet edilirse malzemede arzu edilen özellikler elde edilebilir. Vakumlama işlemi sonrası her bir plaka için numuneler oda sıcaklığında tam bir hafta kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenen plakalar bir hafta sonra torbadan çıkartılmıştır.

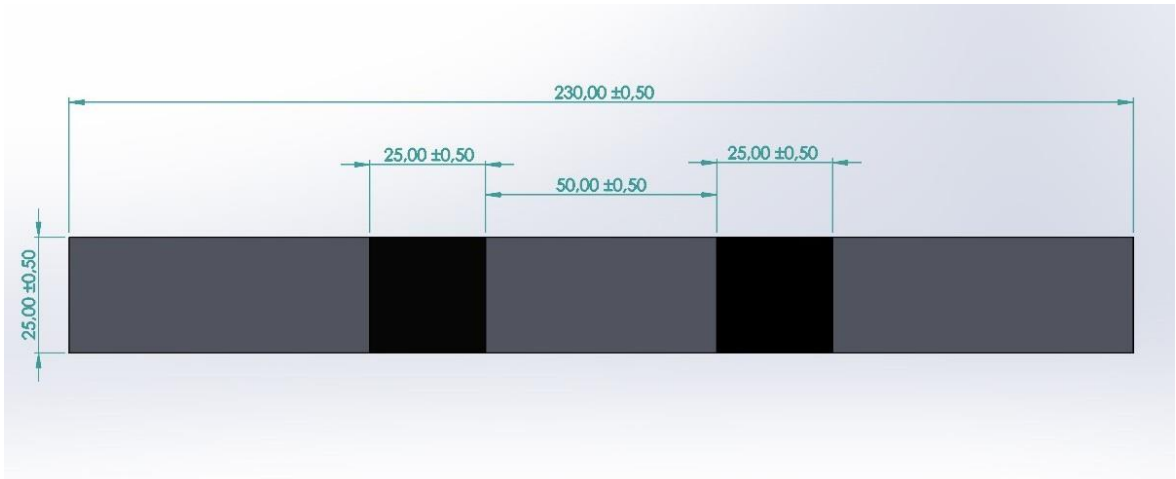


Şekil 4.4. Eğme testi numuneleri için ultrasonik dispersiyon işleminin yapıldığı cihaz

Aynı işlemler çekme numuneleri için tekrarlanmıştır. Çekme numuneleri için plakalar 180x250 mm boyutlarında üretilmiştir. Numunelerin boyutları büyüdüğü için numunelerin matris malzemelerinin gramajı da artmıştır. 75 gram epoksi aynı oranlarda sertleştirici ve KNT ilave edilerek çekme numunelerinin matris fazı hazırlanmıştır. Dispersiyon işlemi için kullanılan cihaz Şekil 8.5'teki gibidir. Her bir plakadan 25x230mm boyutlarından beşer numune üretilmiştir. Yine eğme numunelerinde olduğu gibi 25mm genişliğinde karbon fiberler aralarında 50 mm olacak şekilde alt katmana iki adet ve üst katmana iki adet olacak şekilde serilerek üretilmiştir.



Şekil 4.5. Çekme testi numuneleri için ultrasonik dispersiyon işleminin yapıldığı cihaz



Şekil 4.6. Çekme numunesinin Solidworks modelinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi ve boyutları

Çekme testleri için üretilen numunelere ayrıca eğme numunelerinden farklı olarak alt ve üst çene ile numune arasında yalıtım sağlamak için 500x500 mm boyutlarında sıkıştırma plakası üretildi. Bu plakanın üretiminde test numunelerini üretmek için kullanılan üretim yöntemi kullanıldı. Altı kat dokuma cam fiber ve epoksi karışımı hazırlanarak her bir cam fiber katının üzerine matris malzemesi emdirilmiştir. Bu işlem sonrası sızdırmazlık macunu ve kompresör ile ortam vakumlanıp üretilen malzemeler bir hafta kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenmiş plakalar çekme numunelerinin alt ve üst ucunun her iki tarafına gelecek şekilde kesilmiştir. Kesim sonrası sıkıştırma plakası numune ile yine epoksi/sertleştirici aracılığıyla birbirine yapıştırılmıştır. Yapıştırılan numuneler kısıkaç ile tutturularak bir hafta kürlenmeye

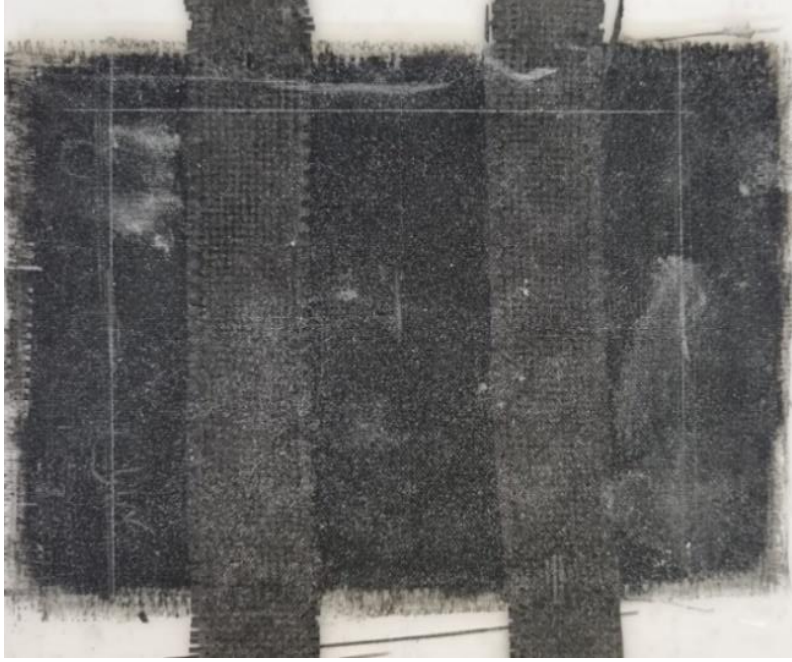
bırakılmıştır. Sıkıştırma plakasının numune ile yapışmasını sağlamak için kısıkaç ile tutturulan numuneler Şekil 4.7'deki gibidir.



Şekil 4.7. Çekme numunelerinin sıkıştırma plakası ile yapıştırılması

4.3. Numune Hazırlama

Eğme testi için 150x200 mm ve çekme testi için 180x250 mm boyutlarında ve numunenin kalınlığı kullanılan cam fiberin yoğunluğuna, dokuma tipine ve serim hatalarına göre değişen plakalar üretilmiştir. Bu plakaların her birinden 20x150 mm ebatlarında numuneler eğme testi için, 25x230mm ebatlarında numuneler çekme testi için hazırlanması gereklidir. Bunun için her bir plaka eşit boyutlarda belirtilen ölçülerde slalom hareketler yapan bir cihazla her biri tek tek kesilerek her plakadan beşer adet numune kesilmiştir. Bu kompozit malzemelerin elektrik direnç değerlerinin tam olarak ölçülebilmesi için zımpara kâğıdı ile zımpara makinesi kullanılmadan manuel olarak zımparalanmıştır. Sonrasında oluşan zımpara tozları numune üzerinden silinerek temizlenmiştir. Üretilen numunelere zımpara yapılarak elektrik direnç ölçümü için kullanılan iletim elemanları krokodil dişli kabloların malzeme üzerine tam yapışıp ekstra direnç oluşumunu önleyip doğru verilerin eldesini sağlamaktır. Bunu sağlamak için karbon fiber geçen bölgelere eğme numunelerinde bakır şeritler, çekme numunelerinde ise gümüş bant kullanılmıştır.



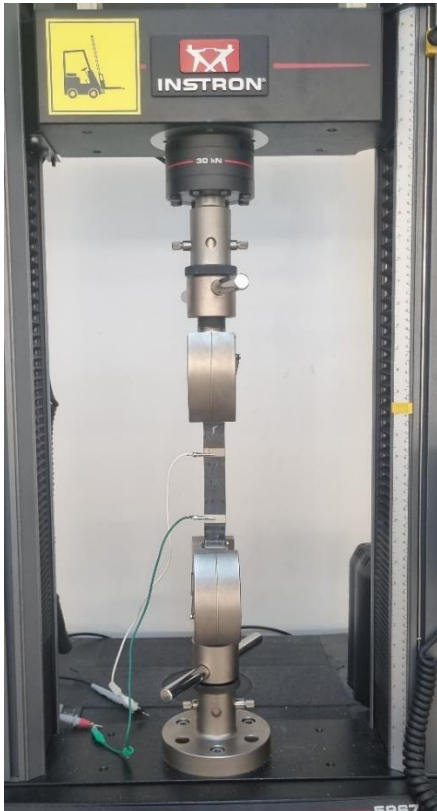
Şekil 4.8. 150x200 mm ölçülerinde üretilen hibrit kompozit plaka

4.4. Deney Düzenekleri

Üretilen numuneler üç nokta eğme ve çekme testine tabi tutularak mekanik özellikleri elde edilmiştir. Bu işlemler süresinde elektrik direnç özellikleri için canlı veri alabildiğimiz KEYSIGHT marka dijital multimetre vasıtası ile 2 elektrotlu ölçümler yapılmıştır. Çekme numuneleri ayrıca termal kamera vasıtası ile test süresince gözlemlenmiştir. Şekil 4.9'dan da görülebileceği gibi test esnasında 2 elektrotun uçları karbon fiberle temas sağlayarak elektrik direnç ölçüm işlemi yapılmıştır. Ölçülen direnç değerleri multimetreye kaydedilip sonrasında analiz edilmiştir. Eğme ve çekme testleri için her bir plakadan üretilen beşer numune ile denetler yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı üç nokta eğme test cihazı ve çekme test cihazı Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki gibidir. Her iki test içinde INSTRON marka 30kN test cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda fiktürler değiştirilerek eğme ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Eğme testinde kullanılan fiktürün alt destek noktaları arasındaki mesafe 110mm olarak ayarlanıp test işlemleri yapılmıştır. Ancak 200gr/m^2 ve 300gr/m^2 alansal yoğunluklu dokuma cam fiber malzemeden üretilen numuneler bu uzunlukta kırılmadığı için 70mm'de tekrar denenmiştir ve yine kırılmadığı için 50mm destek mesafesi uzunluğunda eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Eğme deneyinde dakikada 5mm ilerleme hızında numuneler kırılana kadar test yapılmıştır. Çekme deneyinde ise dakikada 1mm ilerleme verilerek malzemeler kopana kadar test yapılmıştır.



Şekil 4.9. Eğme testlerinin yapıldığı mekanik test cihazı



Şekil 4.10. Çekme testlerinin yapıldığı mekanik test cihazı

Çekme testinde test boyunca termal kamera ile tahribatsız muayene ölçümü yapan cihaz şekil 4.11'deki gibidir. Ölçüm boyunca numunenin hasar alınca gerçekleşen sıcaklık değişimleri incelenmiştir.



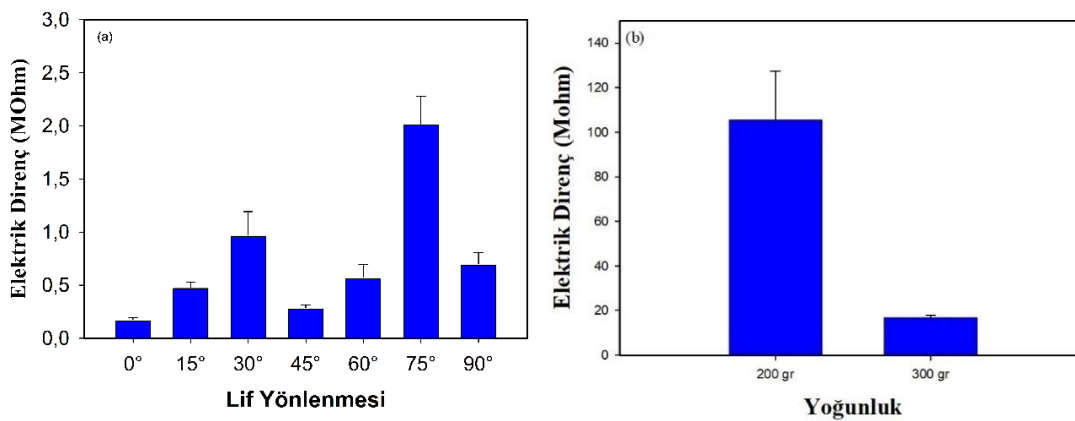
Şekil 4.11. Çekme testi boyunca kullanılan termal kamera

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın temel amacı, lif yöneliminin ve alansal yoğunluk farkının yük altında meydana gelen elektriksel direnç değişimi üzerindeki etkilerini araştırmak ve bu bağlamda literatüre yeni bir bakış açısı kazandırmaktır. Literatürde bu konuyla ilgili çeşitli çalışmalar bulunmakla birlikte, genellikle malzeme türü, üretim yöntemleri ve test süreçleri açısından sınırlı yaklaşımlar benimsenmiştir. Çalışmamız hem kullanılan yöntem hem deney tasarımı hem de malzeme açısından farklılıklar göstermektedir. Örneğin, matris malzemeye karbon nanotüp eklenerek iletkenlik kazandırılmış ve bu yenilik sayesinde, lif yönelimi ve yoğunluğunun elektriksel direnç değişimi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Bunun yanı sıra, test numunelerinin boyutları, üretim teknikleri, kütleme yöntemleri ve hasar izleme süreçlerinde yapılan farklılıklarla çalışmamız özgün bir nitelik taşımaktadır.

Çalışmamızda farklı tür yükler altında üretilen kompozit numuneler test edilmiştir. Test neticesinde lif yöneliminin ve alansal lif yoğunluğunun direnç değişim davranışını etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışmamız farklı tür yüklemelerde farklı oranlarda elektriksel direnç değişikliklerinin oluştuğunu vurgulamaktadır.

5.1. Eğme Testi Sonuçları



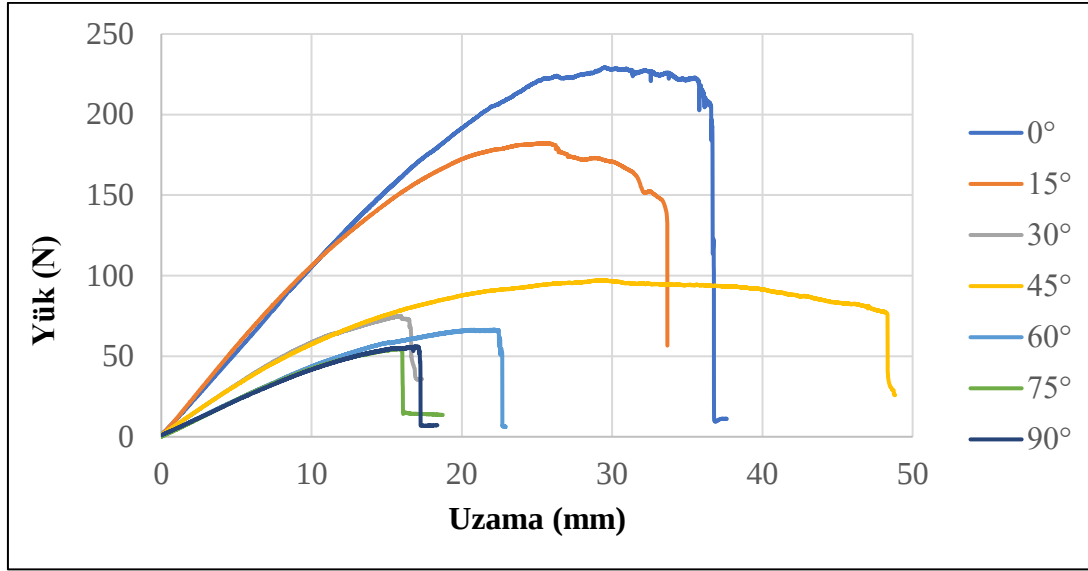
Şekil 5.1. a) Eş yönlü örgü tipindeki cam fiber kompozit malzemelerin ilk direnç değerleri, b) Dokuma tipindeki cam fiber kompozit malzemelerin ilk direnç değerleri

Şekil 5. 1’deki grafikten açık bir şekilde anlaşılabileceği gibi üretilen numunelerin herhangi bir yük veya kuvvete maruz kalmadan elde edilen ilk direnç verileri numuneleri üretirken vermiş olduğumuz açısall yönelimlerden ve alansal yoğunluk farklarından önemli derecede

etkilenmektedir. Bu durumda açısal yönlenmenin 0° olduğu numune de elektrik akımının gittiği yönde direnç değeri en düşük olarak ölçülmüş diğer değerler arasında en düşük değer olduğu görülmüştür. Numunenin cam fiberlerinin açısal olarak arttırılması bu değerleri değiştirmiştir. 75° diğer açılardan ortada bir açı olmasına rağmen eş yönlü fiber malzemeler arasında direnç değeri en yüksek olan malzeme olmuştur. Bunun nedeni bu açısal değerdeki numunenin diğer numunelerden ayrı olarak üretilmesi olabilir. Bu üretim süresince ortamdan atılması gereken hava tam atılamamış ve malzemede porozite oluşmasına neden olmuş olabilir. Bu durumda KNT partiküllerinin epoksi matris içinde oluşturduğu ağ bağının bozulmasına ve diğer numunelerden daha yüksek direnç sağlamasına neden olmuş olabilir. Ancak ilk direnç değerinin fiber yönlenmesine bağlı olarak açı değeri büyüdükçe kesin artacağını söylemek mümkün değildir. Çünkü ilgili durum üretim süreçlerine bağlıdır.

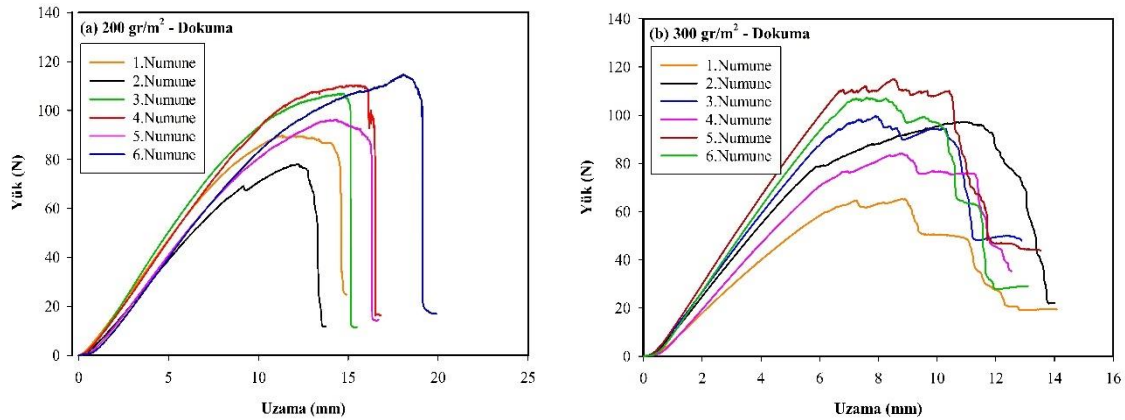
Dokuma örgü tipi kumaşta açısal yönlenmenin etkisinden çok alansal yoğunluğunun elektriksel direnç üzerindeki etkileri incelenmiştir. İnceleme amacıyla 200gr/m^2 ve 300gr/m^2 alansal yoğunluktaki kumaşlar kullanılmıştır. Bu iki numunede sadece alansal yoğunluk farklılıkları bulunmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda, direnç değerlerinin yoğunluğa bağlı olarak farklılık gösterdiği saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar, cam fiber yoğunluğundaki artışın başlangıç direnç değerlerini net bir şekilde azalttığını ortaya koymaktadır. Bunun temel nedeni, cam fiber yoğunluğunun artışıyla birlikte epoksi emiliminin ve matris içerisinde karbon nanotüp parçacıklarının miktarının artmasıyla daha iletken bir yol oluşması olarak değerlendirilebilir.

Dokuma cam fiberler ve eş yönlü cam fiberlerin direnç değişim değerlerini eğme testi için kıyaslamak doğru olmayacaktır. Dokuma numunelerinden 200gr/m^2 alansal yoğunluklu numuneler daha esnek olduğu için ilk denemede 110mm ve 70mm destek açıklığında kırılmadıkları için 50mm destek açıklığında test edilmişti. Bu nedenle ilgili malzemeleri karşılaştırmak için çekme testlerinin sonuçlarına bakmak daha uygun olacaktır.



Şekil 5.2. Eş yönlü cam fiber yönelimlerine göre eğme yükü ve uzama grafiği

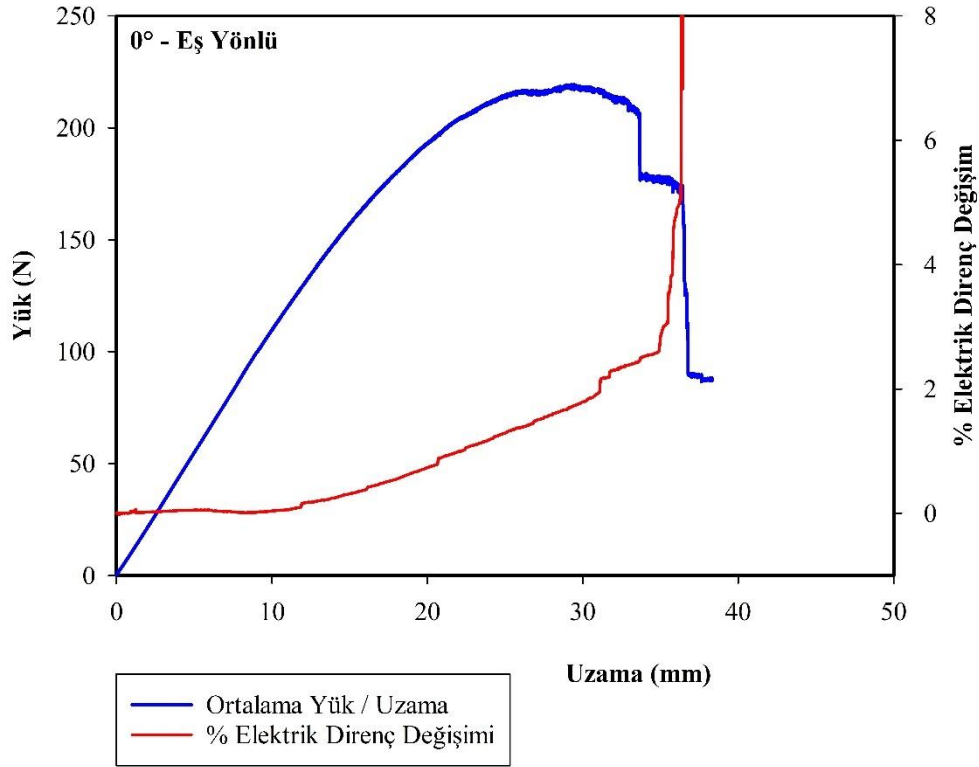
Şekil 5.2’te eğme yükü altında kompozit malzemede farklı açısal yönlenmelere göre yük/uzama miktarlarını vermektedir. Yapılan test sonuçlarına göre yönlenme açısı 0° olan numune daha fazla yük taşıyabilir. Açı arttıkça malzemelerin yük taşıma kapasitelerinin azaldığı söylenebilir. Bu sebeple tasarım esnasında yük taşıma kapasitesinin yüksek olması gerektiği durumlarda ilgili veri kullanılabilir.



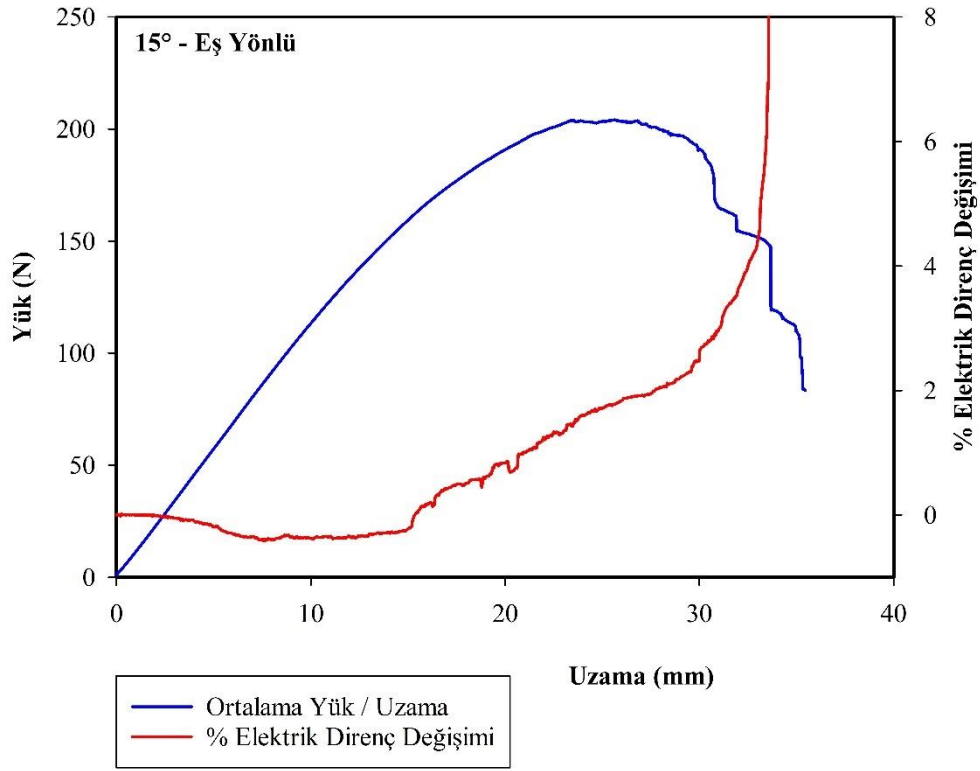
Şekil 5.3. a) 200 gr/m² dokuma tipi cam fiber numunenin eğme yükü ve uzama grafiği, b) 300 gr/m² dokuma tipi cam fiber numunenin eğme yükü ve uzama grafiği

Şekil 5.3 eğme yükü altında kompozit malzemede dokuma tipi cam elyafıta farklı alansal yoğunluklara göre yük-uzama grafiğini vermektedir. Bu numuneler test edilirken eğme alt desteklerinin arasındaki mesafe 110mm olarak ayarlanmıştır. Ancak dokuma tipi ve 200gr/m² alansal yoğunluklu numunelerde 110mm açıta numuneler esnek olduğu için

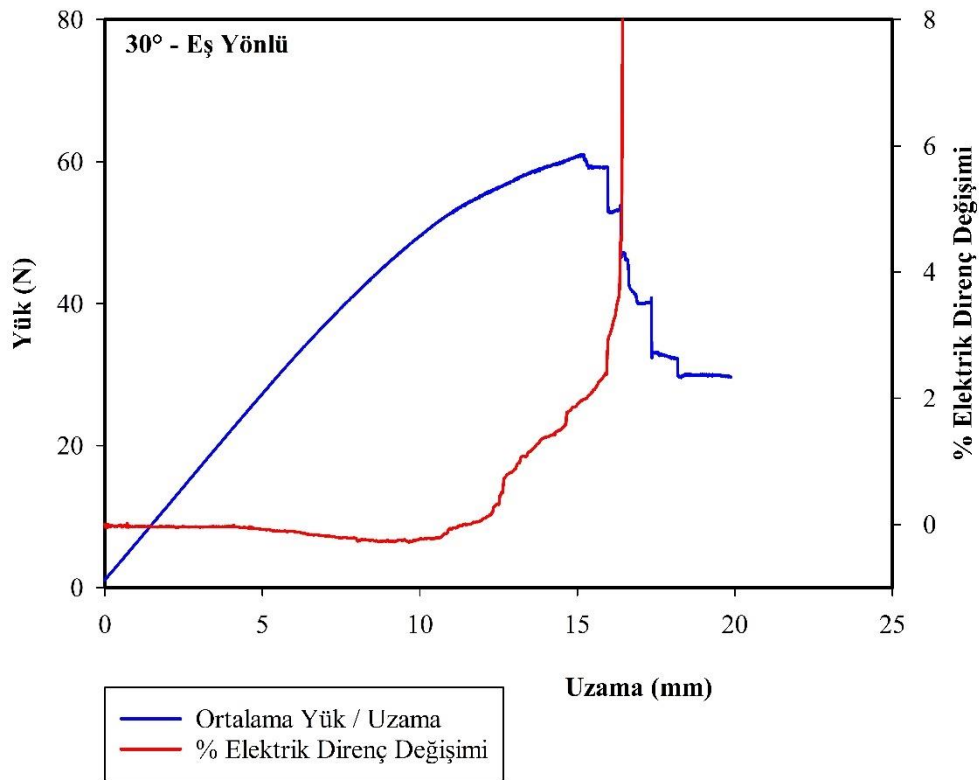
herhangi bir kırılma gerçekleşmedi ve numune iki destek arasında sadece elastik bir şekilde eğilme davranışı gösterdi. Numunenin deneyini 70mm eğme fiktüründe tekrar test ettik ancak yine aynı şekilde elastik bir eğilme davranışı göstermesi üzerine bu malzemenin testini eğme fiktürünün alt desteklerini 50mm olarak ayarladık. Bu sefer malzemelerde kopma davranışını gördük. Bu sebeple aynı yoğunluklar için üretim tekrarlanmıştır. Şekil 5.3'teki grafikleri inceleyecek olursak yoğunluğu yüksek olan numunenin daha az uzadığı ve daha çabuk kırıldığı görülmüştür. Ayrıca yük/uzama eğrisinin karakteristiğinde de önemli değişiklikler görülmüştür. Bu durumun temel sebebi olarak düşük alansal yoğunluklu cam fiber takviye malzemesi kompozit malzemenin dokuma sıklığının daha az olması nedeniyle daha esnek olduğu söylenebilir.



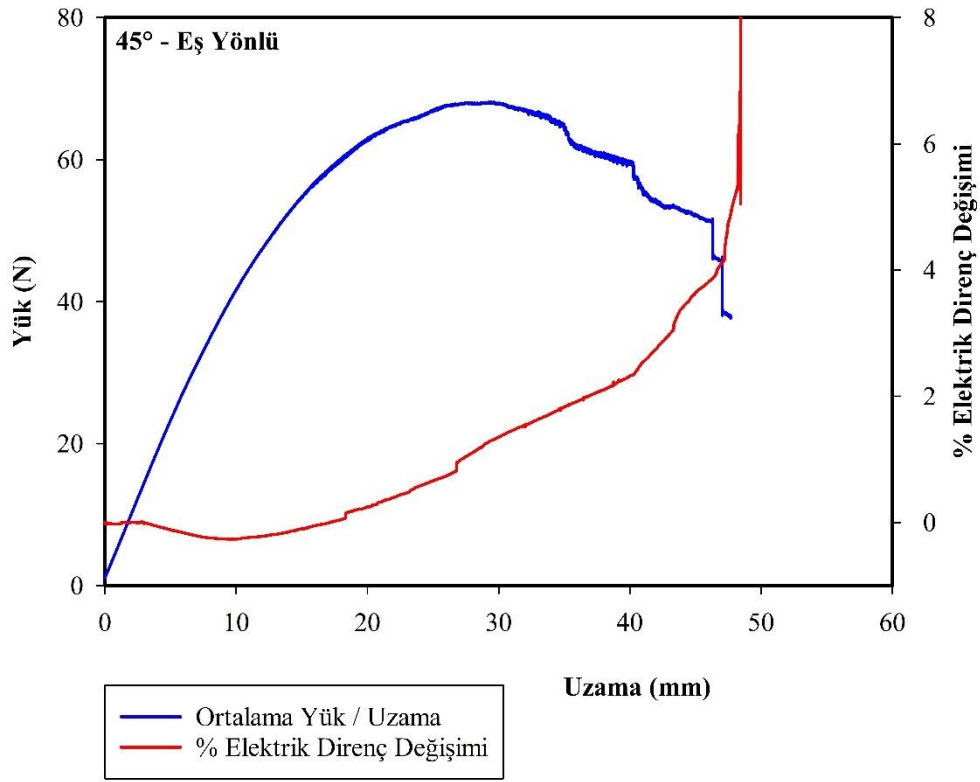
Şekil 5.4. 0° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği



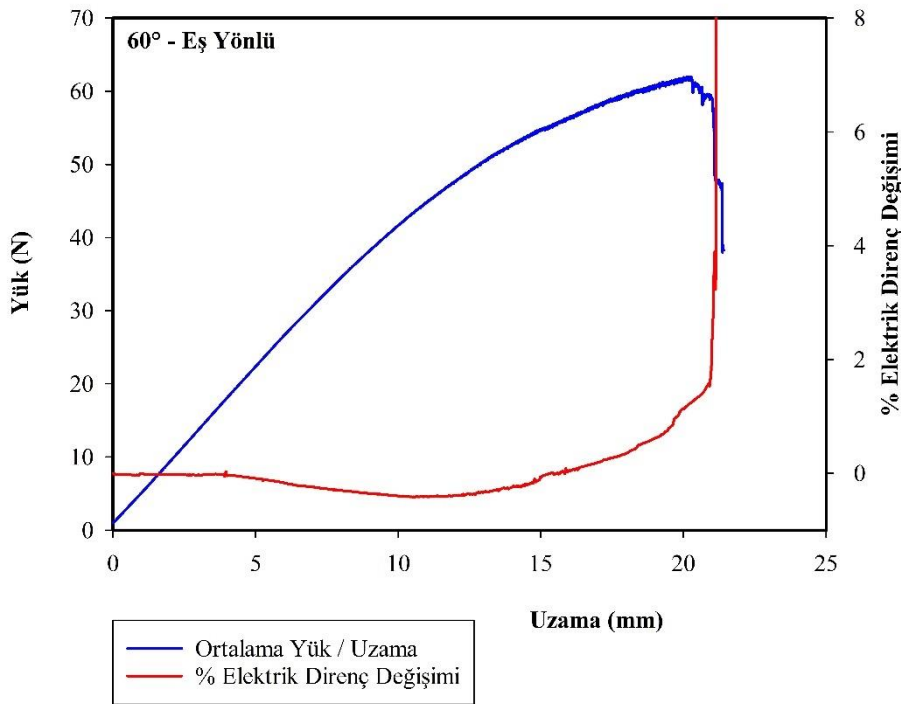
Şekil 5.5. 15° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği



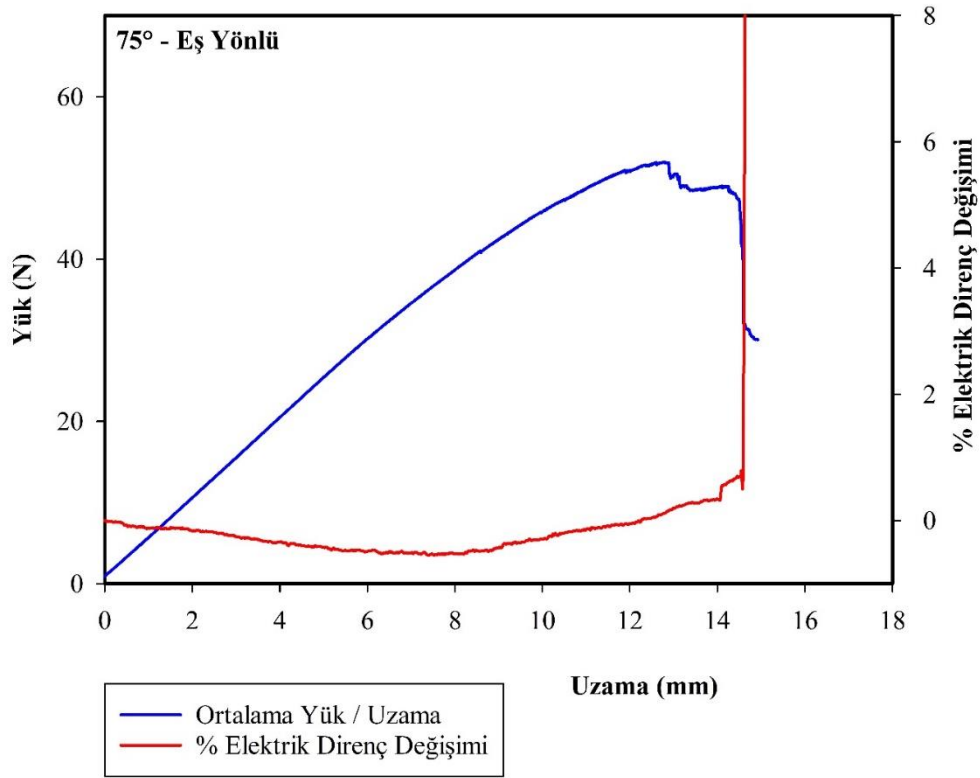
Şekil 5.6. 30° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği



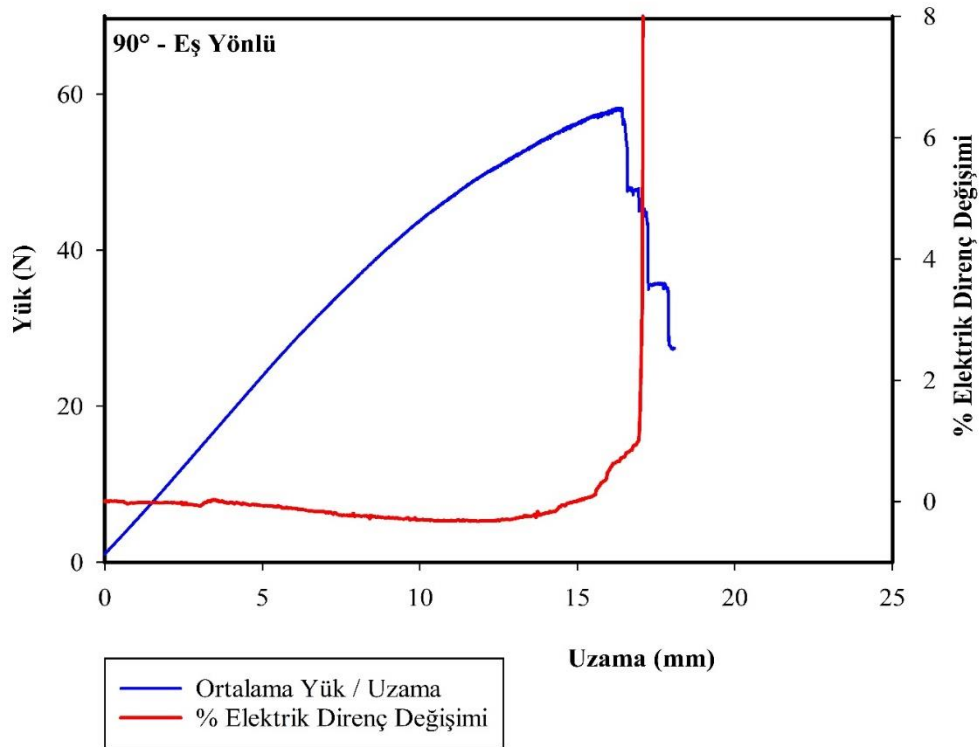
Şekil 5.7. 45° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği



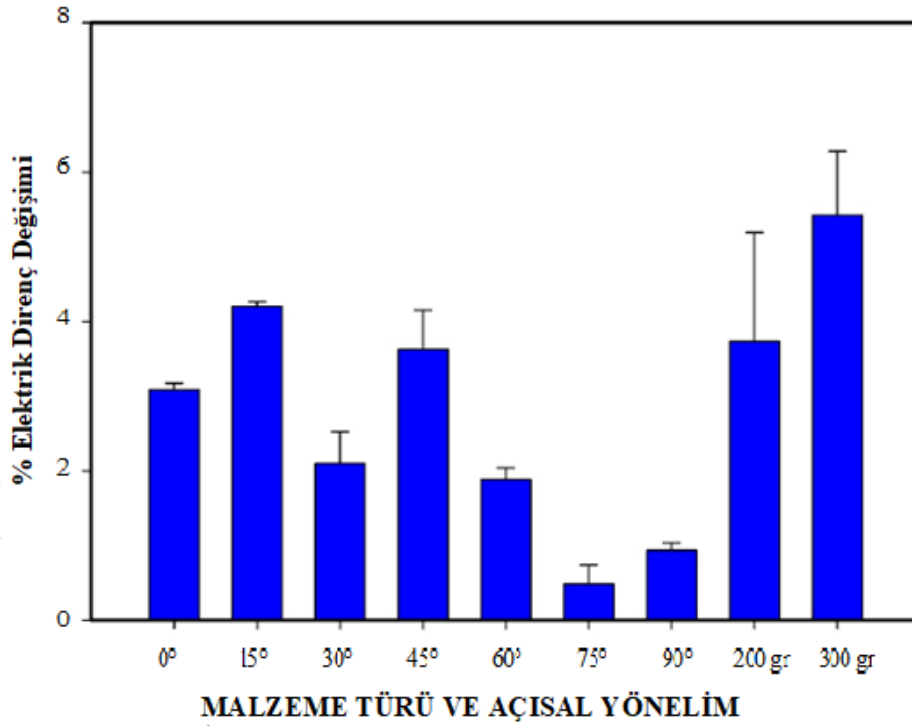
Şekil 5.8. 60° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği



Şekil 5.9. 75° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği



Şekil 5.10. 90° yönelimli GFRPC numunelerin ortalama Yük/Uzama/Direnç değişim grafiği

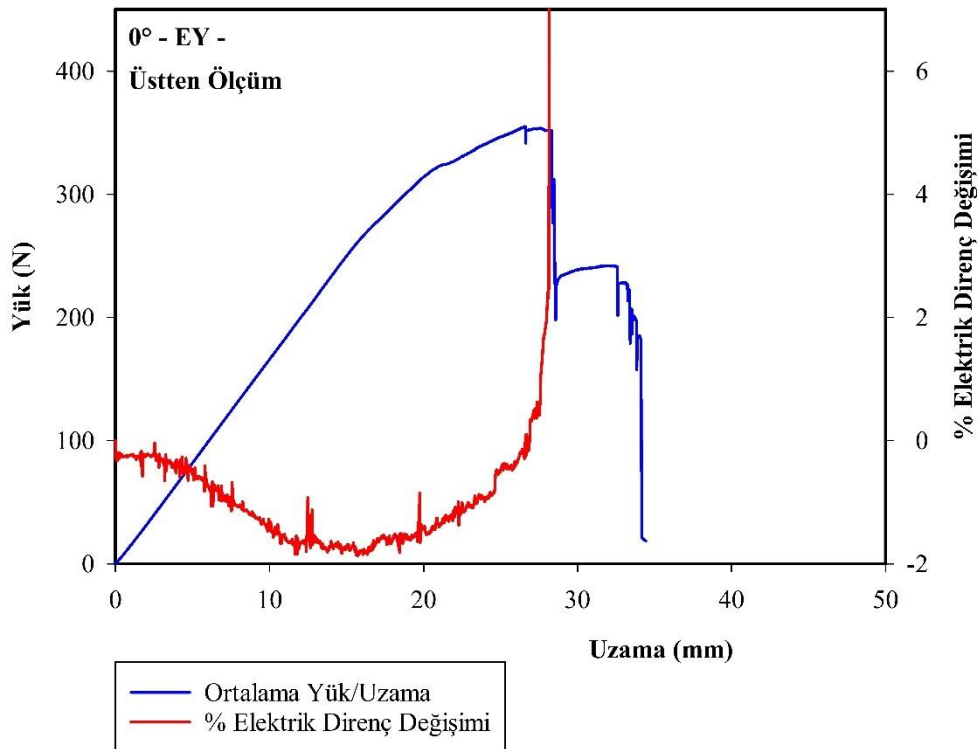


Şekil 5.11. GFRPC eğme numunelerinin ortalama direnç değişim karşılaştırması

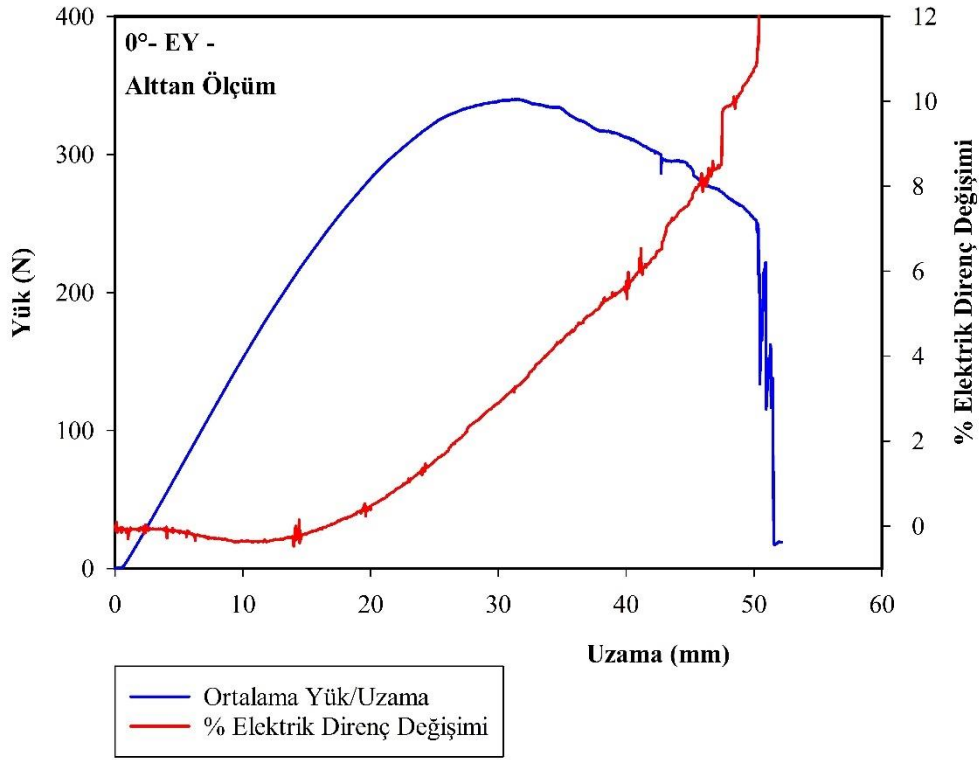
Şekil 5.1'den Şekil 5.11'e kadar olan şekiller 3 nokta eğme testinin sonuçlarını göstermektedir. Bu verilerin ışığında eğme testi sonuçlarına göre lif yöneliminin elektriksel direnç değişimini önemli derecede etkilediği görülmüştür. Lif yönelimi arttıkça, elektrik direnci değişiminde belirgin bir azalma eğilimi olduğu fark edilmiştir. 0° yöneliminde, direnç değişimi maksimum seviyesine ulaşarak yaklaşık %3,3 olarak kaydedilmiştir. Bu değer, 15° yöneliminde %4,2'ye yükselmektedir. Ancak, yönelim 30° ve 45°'ye kaydıka direnç değişimi azalmaya başlar. 60° yöneliminde, direnç değişimi yaklaşık %2'ye kadar düşerken, bu eğilim 90°'de devam etmekte ve değer %1'in altına inmektedir. Ayrıca lif yönlenmesinin direnç değişim karakteristiğini de önemli derecede etkilediği sonucuna ulaşılabilir. Bu doğrultuda lif yönelim açısı arttıkça direnç değişim davranışı numunenin kırılmasına yakın gerçekleştiğini görebiliriz. Ancak 0° ve yakın lif yönelimli açılarda bu değişim 90° 'deki gibi keskin değildir.

Eğme testlerinde direnç değişim değerleri numunenin alt ve üst tarafı krokodil kablo ile temas oluşturulup ölçülmüştür. Şekil 5.12'ten Şekil 5.10'a kadar olan direnç değişim grafiklerini incelediğimizde direnç değerlerinin önce azaldığını, yük uygulamaya devam

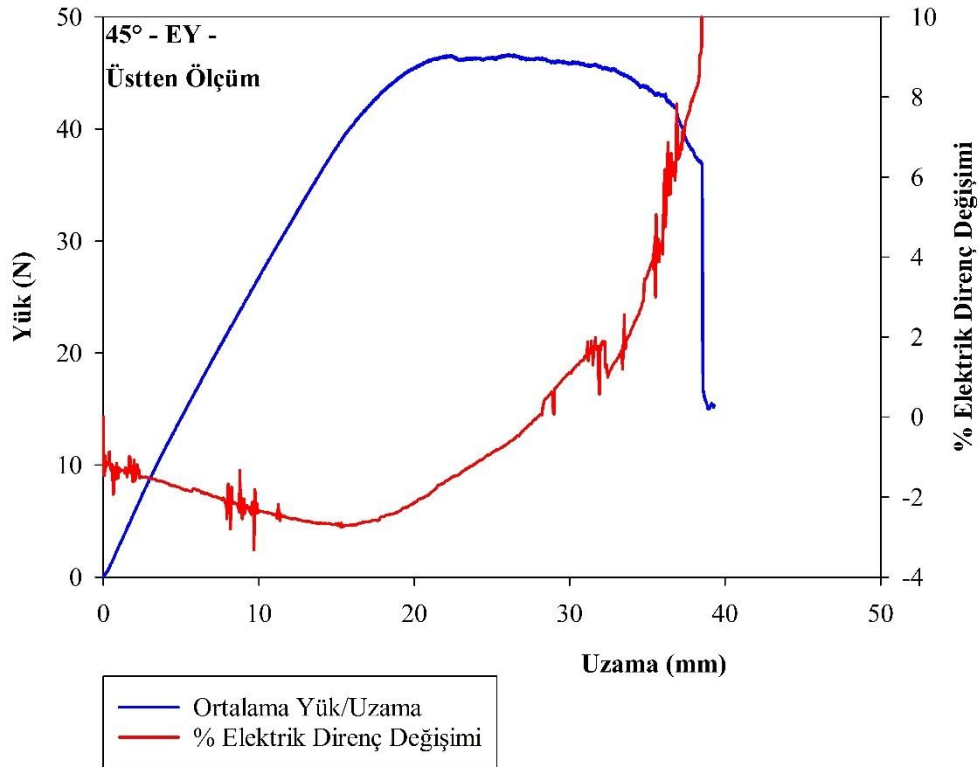
ettikten sonra artış gösterdiğini söyleyebiliriz. Ancak eğme testlerinde, malzemeye elektrik iletkenlik katmak amacıyla KNT kullanıldığı için numuneye yük uygulandığında numunenin üst yüzeyinde basma gerilmesi, alt yüzeyinde ise çekme gerilmesi oluşacağı için direnç ölçümlerini yüzeylerden ayrı ayrı yaparsak direnç değişim davranışlarının değişeceği düşünülmüştür. Bu durumu incelemek amacıyla eğme numuneleri tekrar üretilip alt ve üst yüzeylerden hasar anında direnç değişimleri davranışları incelenmiştir. Yapılan incelemeler bize bu durumun doğru olduğunu göstermektedir. Numuneye eğme yükü uygulandığında numunenin üst yüzeyinden alınan direnç değişimi önce azalma göstermektedir ve malzeme hasar almaya başlayınca artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bu durumun temel sebebi üst yüzeydeki KNT parçacıklarının basma kuvveti sonrası birbirine yaklaşması ve elektrik iletkenliğinin artmasıdır. Ancak numunenin alt yüzeyinde çekme kuvvetleri KNT parçacıklarını birbirinden ayırdığı için elektrik direnç değişiminde direkt artış gözlemlenmiştir. Bu durumu analiz eden grafikler Şekil 5.12'den, Şekil 5.17'e kadar olan grafiklerde görebiliriz.



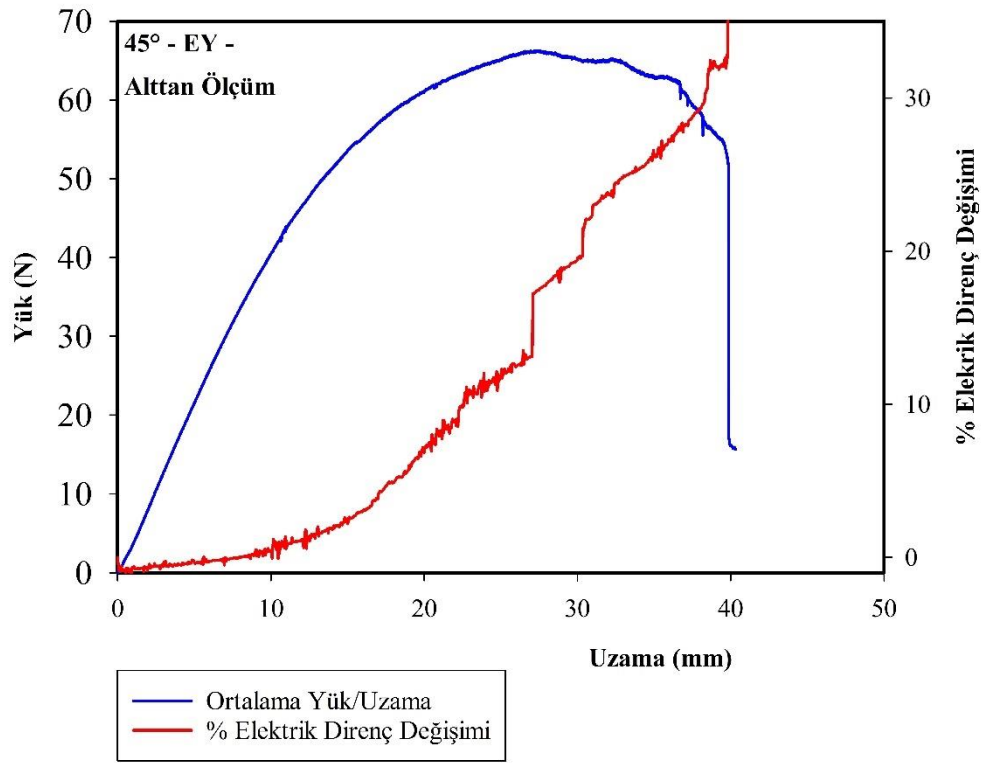
Şekil 5.12. 0° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Üst yüzey direnç değişim grafiği



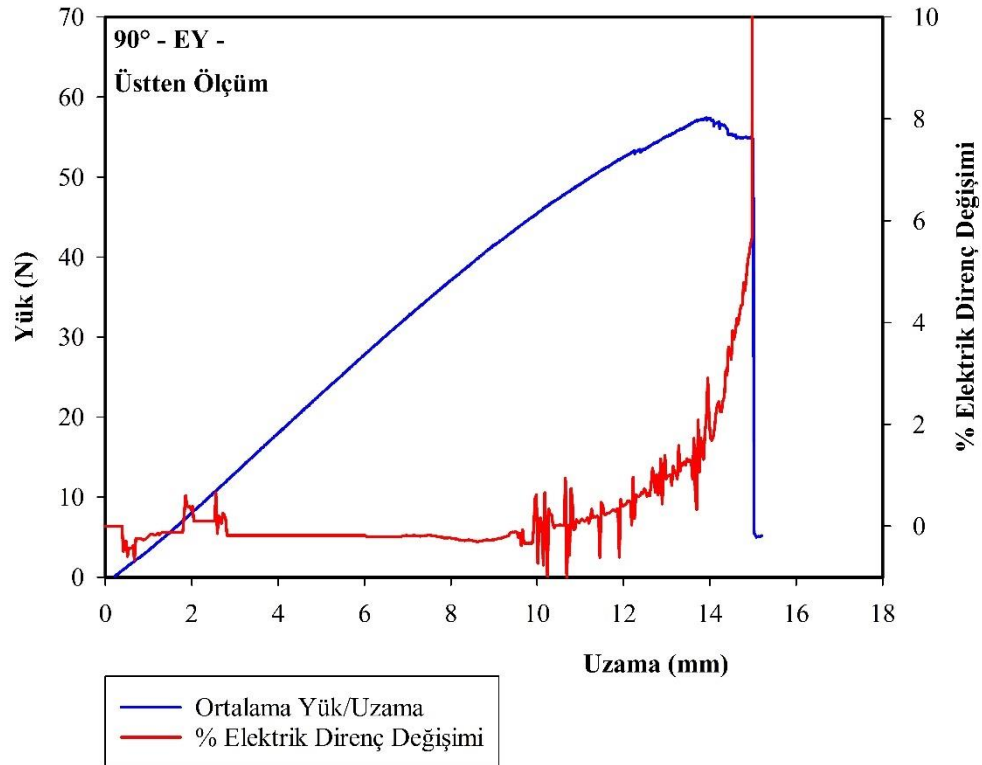
Şekil 5.13. 0° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Alt yüzey direnç değişim grafiği



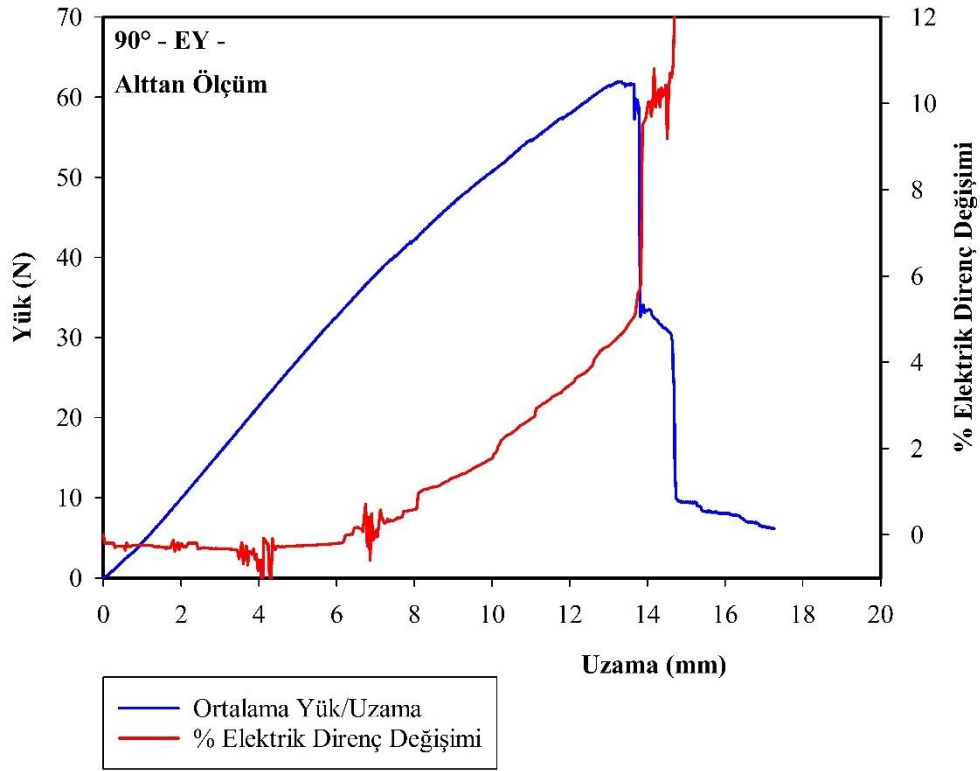
Şekil 5.14. 45° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Üst yüzey direnç değişim grafiği



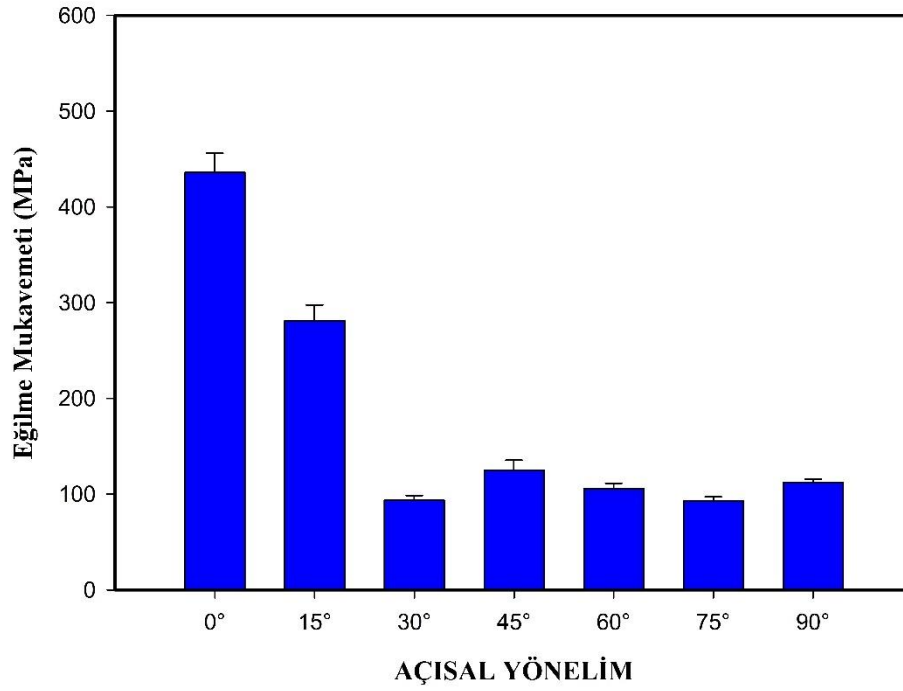
Şekil 5.15. 45° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Alt yüzey direnç değişim grafiği



Şekil 5.16. 90° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Üst yüzey direnç değişim grafiği

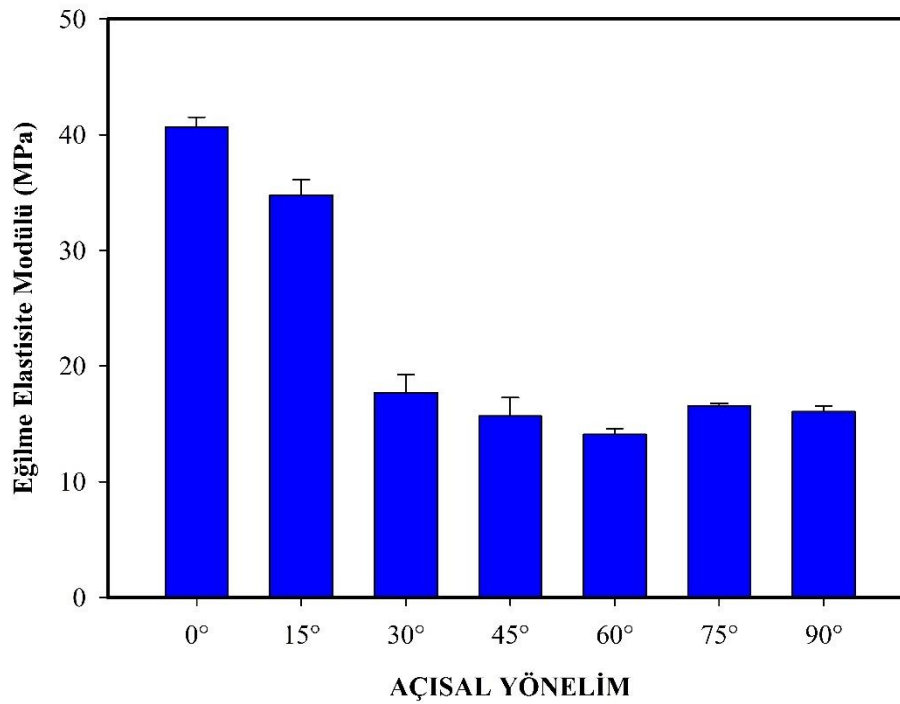


Şekil 5.17. 90° yönelimli GFRPC numunenin Yük/Uzama/Alt yüzey direnç değişim grafiği



Şekil 5.18. GFRPC numunelerin eğilme mukavemetlerinin karşılaştırması

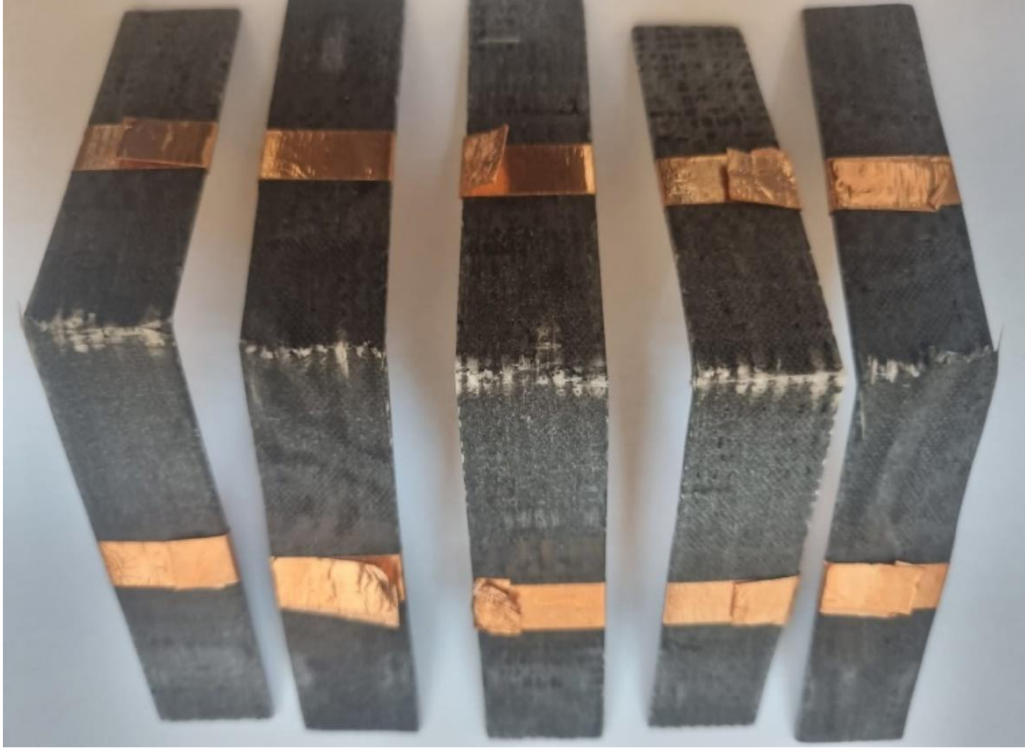
Şekil 5.18’de lif yönlenmesinin ve yoğunluğunun mukavemet değerleri kıyaslanmıştır. Bu verilere dayanarak eğme yükü altında eğme yüküne dik ve dike yakın lif yönelimi uygulamasının daha iyi mukavemet özellikleri gösterdiğini söyleyebiliriz. Ancak lif açısının arttıkça mukavemet değerlerinin düştüğü ve 15°’den sonra birbirine yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple yüksek mukavemet isteyen uygulamalarda eğme yüküne dik yönlenmelerin seçilmesi tercih sebebidir.



Şekil 5.19. Farklı fiber yönelimli GFRPC numunelerin eğilme elastisite modülü kıyaslaması

Liflerin 0°’de hizalanması malzemenin eğilme elastisite modülünü maksimum seviyeye taşımaktadır. Lif yönelim açısı arttıkça, özellikle 30°’den itibaren, elastisite modülünde keskin bir azalma görülmektedir. Bu durum, liflerin yük taşıma kapasitesinin yönelim açısına bağlı olarak azaldığını göstermektedir. Liflerin yük doğrultusuna paralel hizalanması durumunda, eğilme elastisite modülü minimum değerlere inmektedir. Bu sonuçlar lif yönlenmesinin malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebildiğini açık bir şekilde göstermiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar lif yöneliminin kritik bir parametre olduğunu vurgulamaktadır.

5.2. Eğme Testi Hasar Görsel Analizi



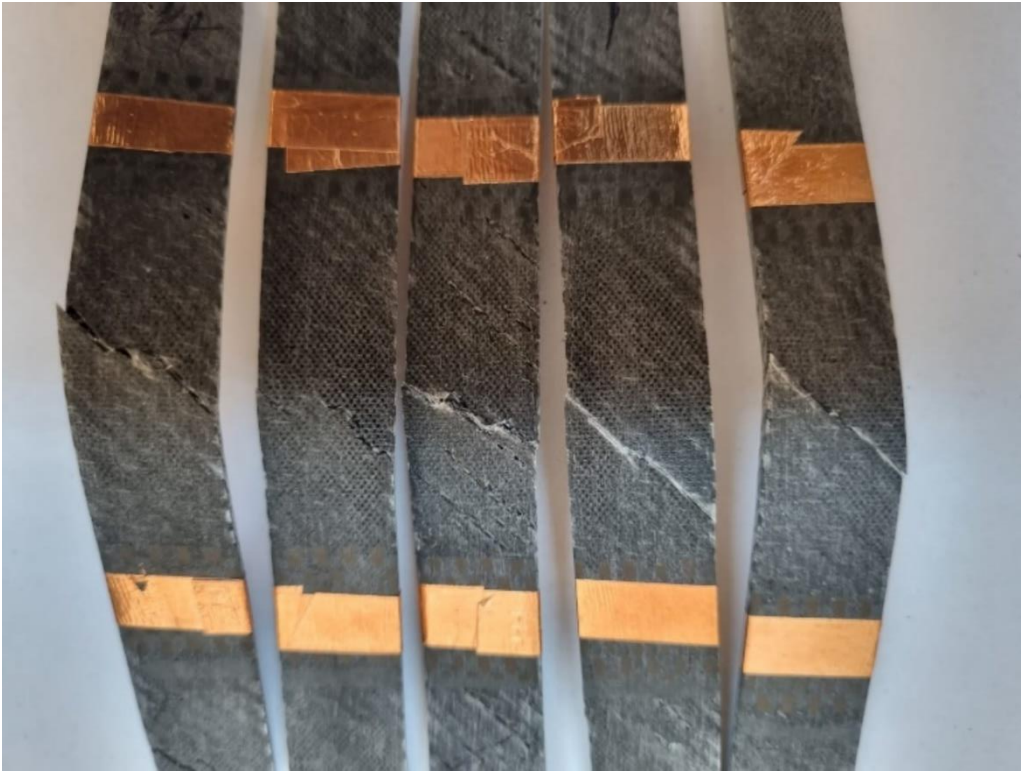
Şekil 5.20. 0° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



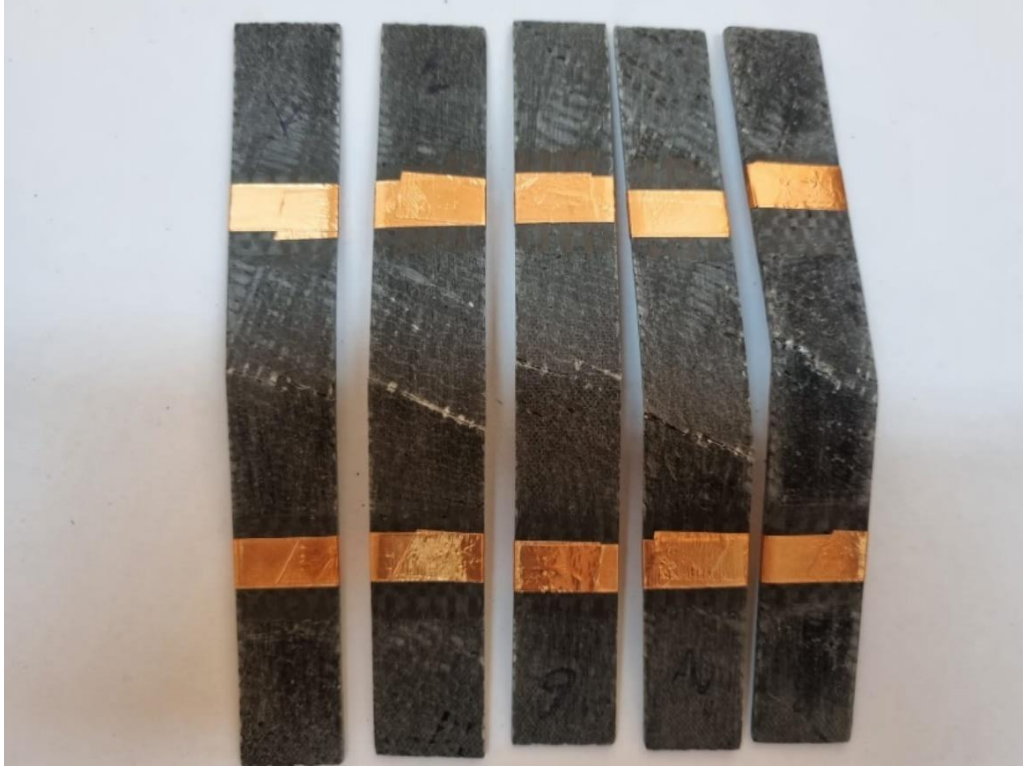
Şekil 5.21. 15° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



Şekil 5.22. 30° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



Şekil 5.23. 45° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



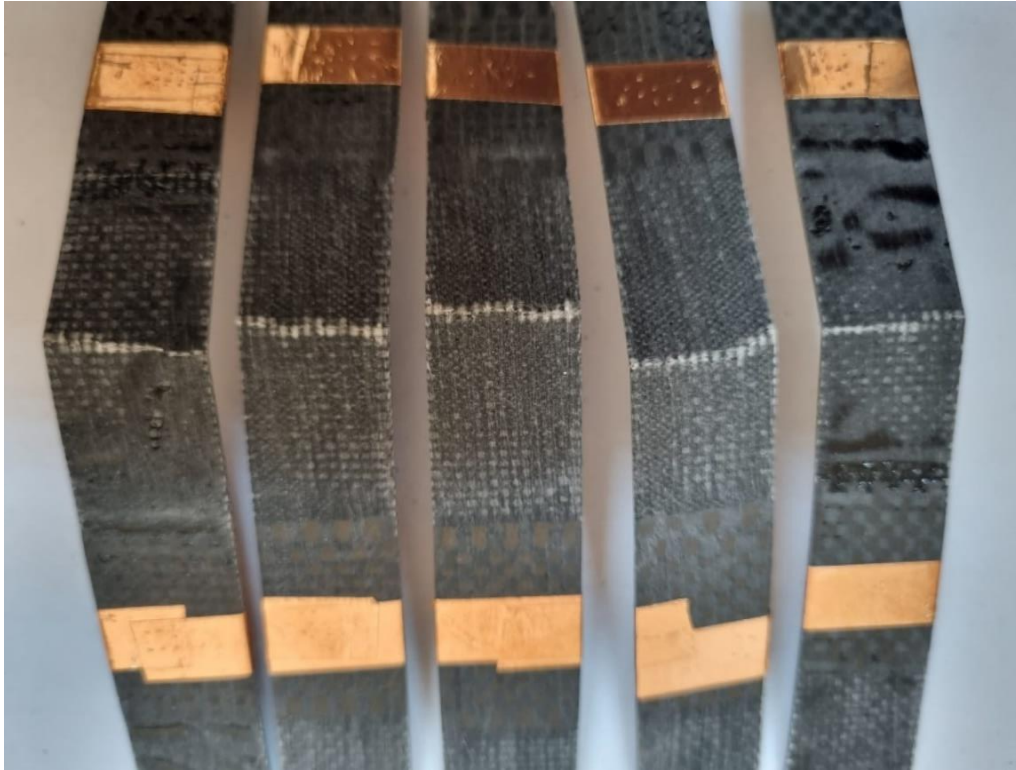
Şekil 5.24. 60° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



Şekil 5.25. 75° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



Şekil 5.26. 90° yönelimli GFRPC numunenin kırılma tipi



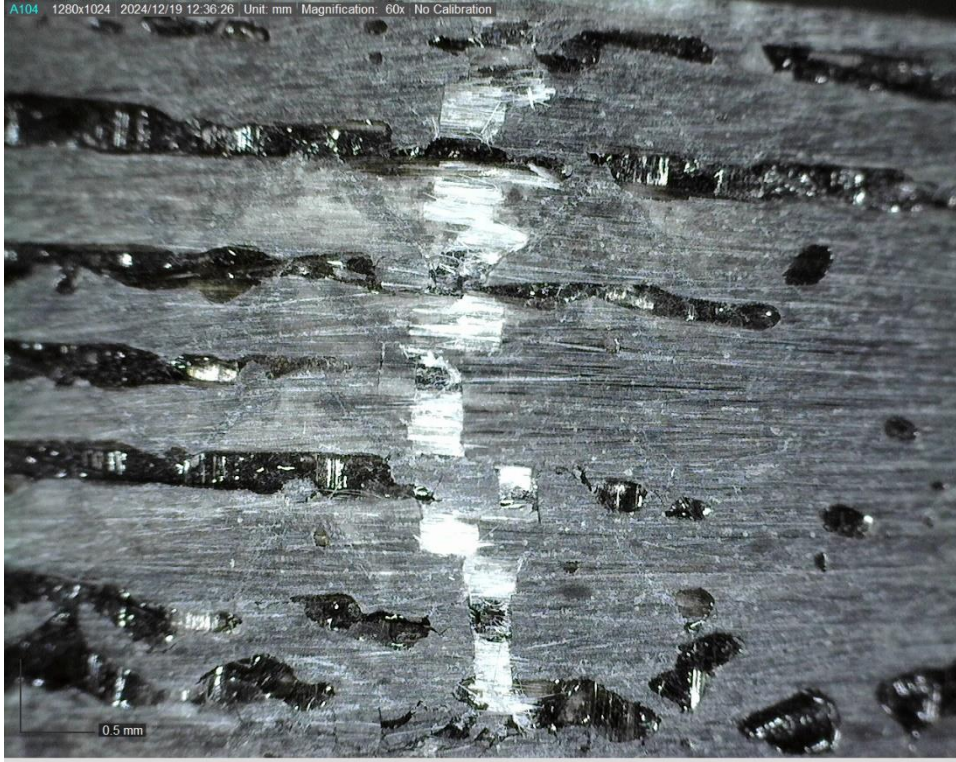
Şekil 5.27. 200gr/m² alansal yoğunluk dokuma tipi kumaşla üretilmiş kompozit numunenin kırılma tipi



Şekil 5.28. 300gr/m² alansal yoğunluklu dokuma tipi kumaşla üretilmiş GFRPC numunenin kırılma tipi



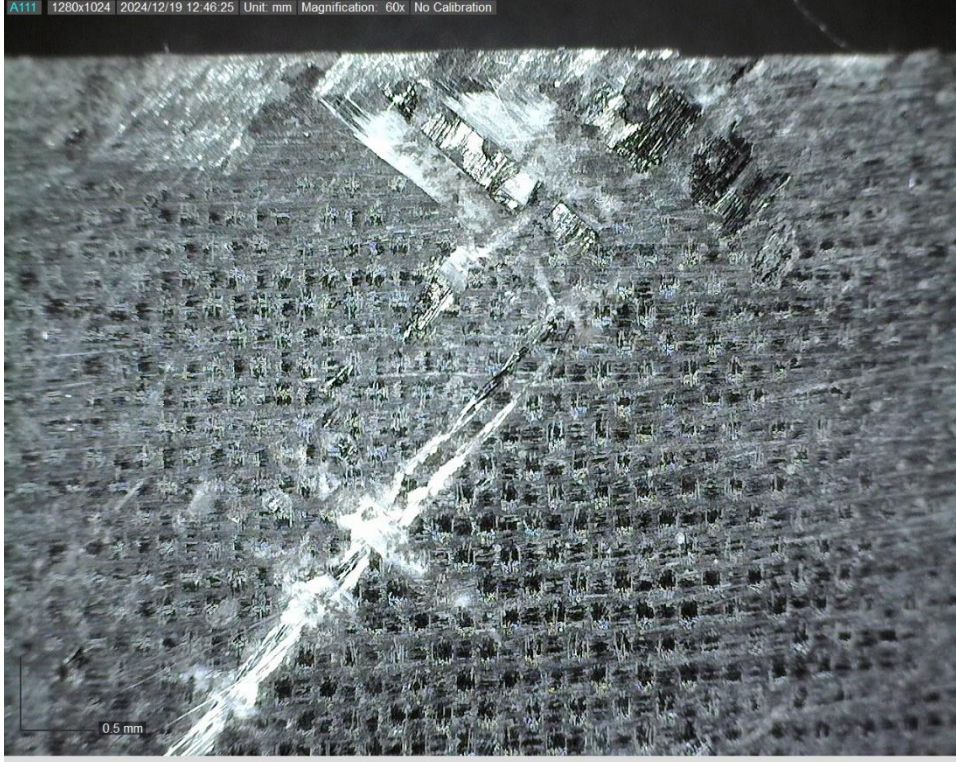
Şekil 5.29. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış kalınlık görüntüsü



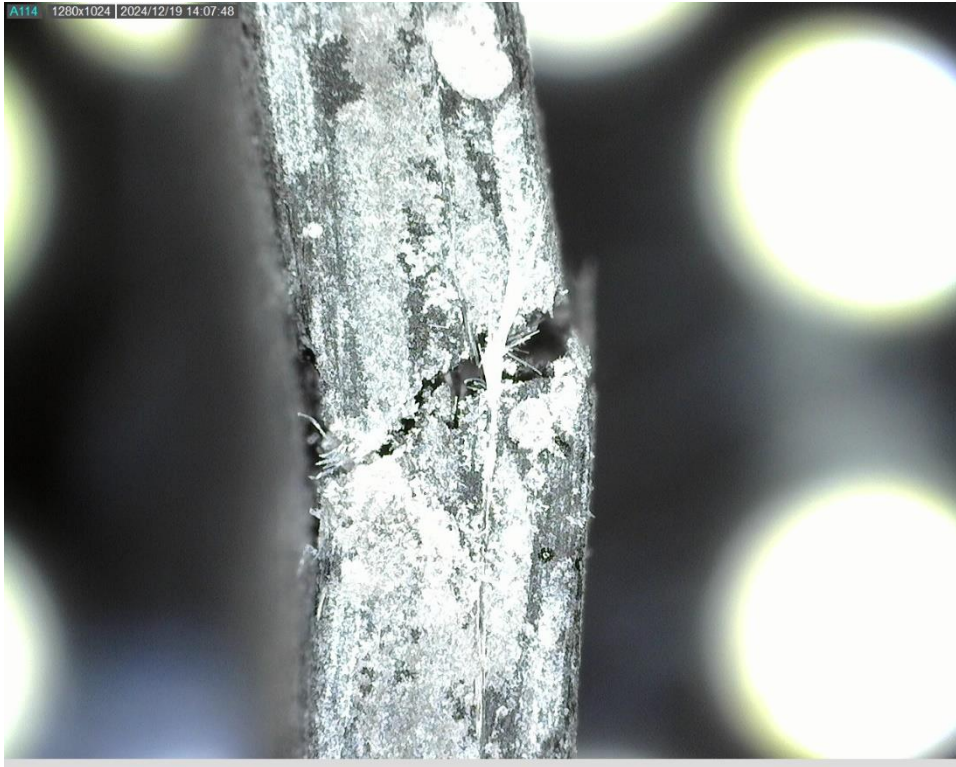
Şekil 5.30. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış genişlik görüntüsü



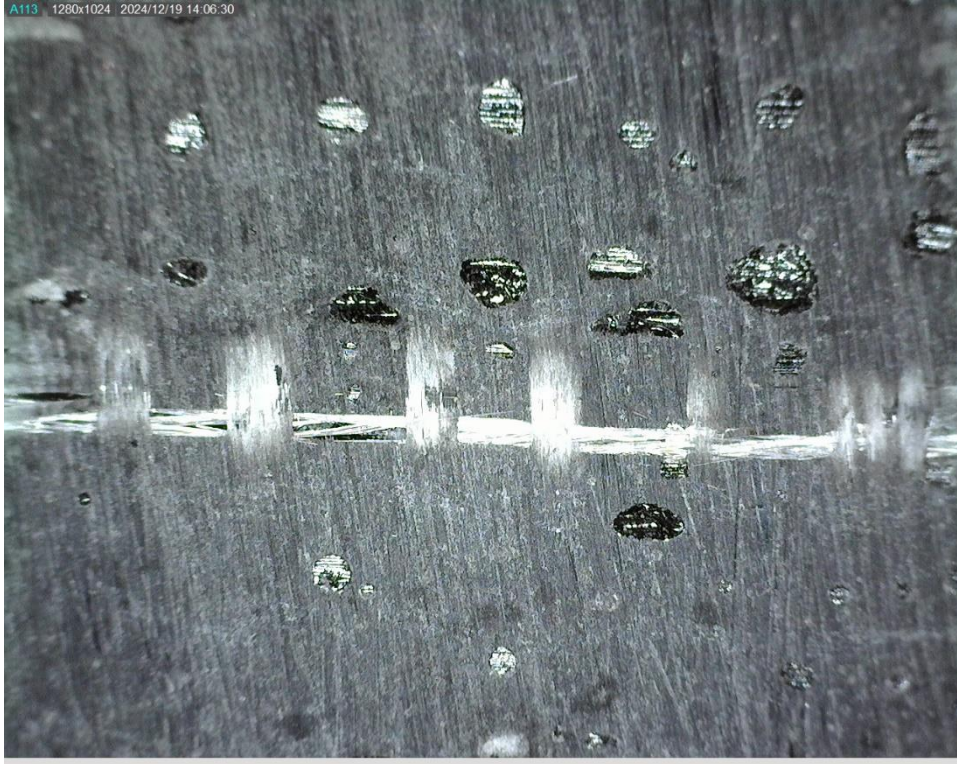
Şekil 5.31. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış kalınlık görüntüsü



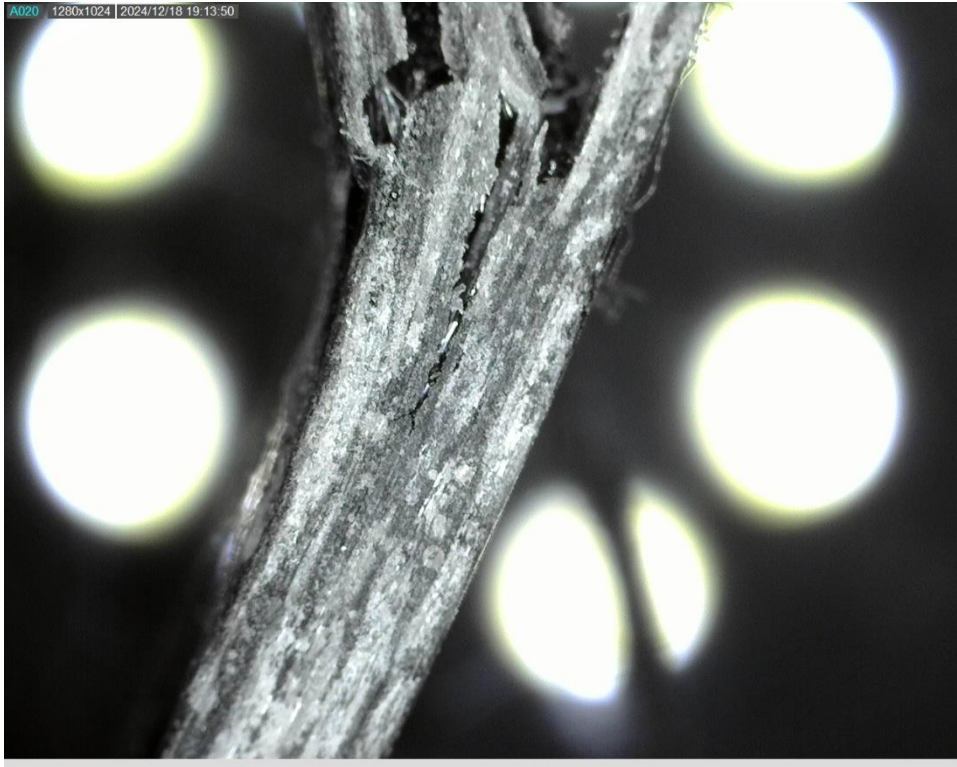
Şekil 5.32. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü



Şekil 5.33. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü



Şekil 5.34. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü



Şekil 5.35. 15° yönelimli eğme numunesinde oluşan delaminasyonun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü



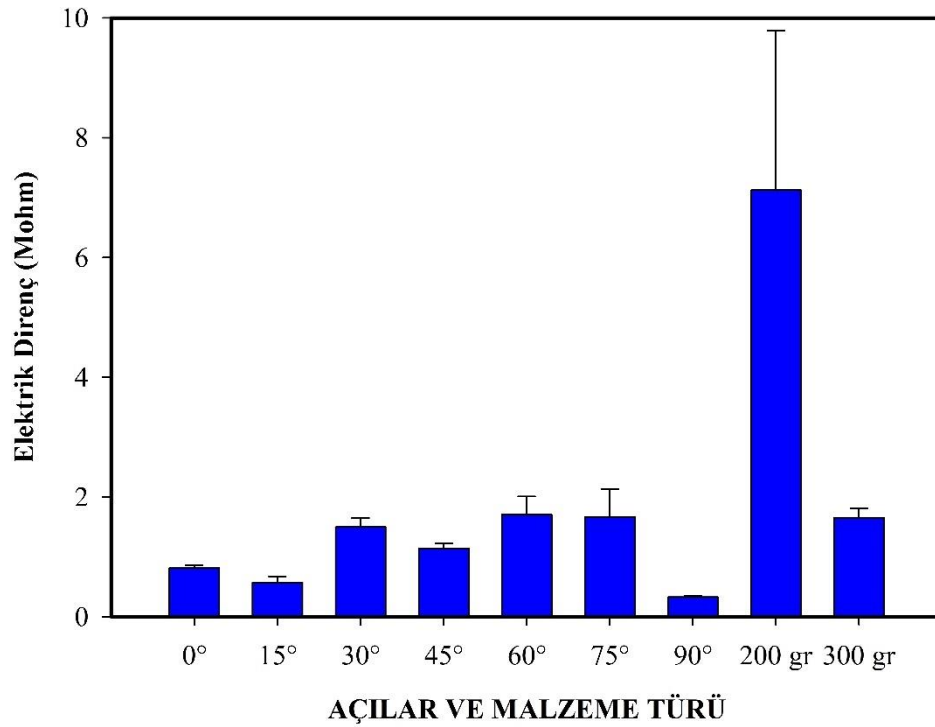
Şekil 5.36. Eğme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlştırılmış kalınlık görüntüsü

GFRPC numunelerinde lif yönlenmesi ve alansal yoğunluk farkları numunelerin hasar mekanizmasını doğrudan etkileyerek özellikle kırılma şekli ve hasar modu açısından numuneyi etkilemiştir. Açılı fiber yönlenmesi, farklı açılarda kırılmalara neden olarak hasar aldığı görülmektedir. Yukarıdaki şekillerde de görülebildiği gibi eş yönlü 30°, 45°, 60°, 75°, 90° açılı üretimlerde hasarlar tam olarak fiber yönlenmesi boyunca oluşmuştur. Bunun temel sebebi olarak kırılmanın fiberlerin arasındaki boşluklarda daha hızlı ilerlemesi söylenebilir. Daha detaylı açıklayacak olursak fiberler arasında küçükte olsa boşluklar bulunmaktadır ve bu boşlukları epoksi doldurmaktadır. Bu malzeme güç iletiminde görev yapar ancak fiberler kadar yüksek mukavemete sahip değildirler bu sebeple kırılım yaparken en zayıf bölgeden kırılım gerçekleşmektedir. 30°, 45°, 60°, 75°, 90° açılı üretimler ve eğme cihazının baskı yapan üst çenesine paralel ve daha yakın oldukları için fiber yönlenmesine göre kırılım göstermiştir. Ancak 0° ve 15° açılı numuneler eğme üst çenesine daha dik açılar olduğu için kırılım fiber yönlenmesi yönünden ziyade eğme üst çenesine paralel düzlemde gerçekleşmiştir. Dokuma tipi kompozit numuneyi incelediğimizde kırılım yönlenmesinin birbirine paralel olduğunu gözlemliyoruz. Ancak 300gr/m² alansal yoğunluktaki dokuma cam fiberden yapılan üretimin 200gr/m² alansal yoğunluktaki dokuma cam fiberden üretilen numuneye kıyasla kırılma bölgesi görselden de görülebileceği gibi daha geniştir. Eğme

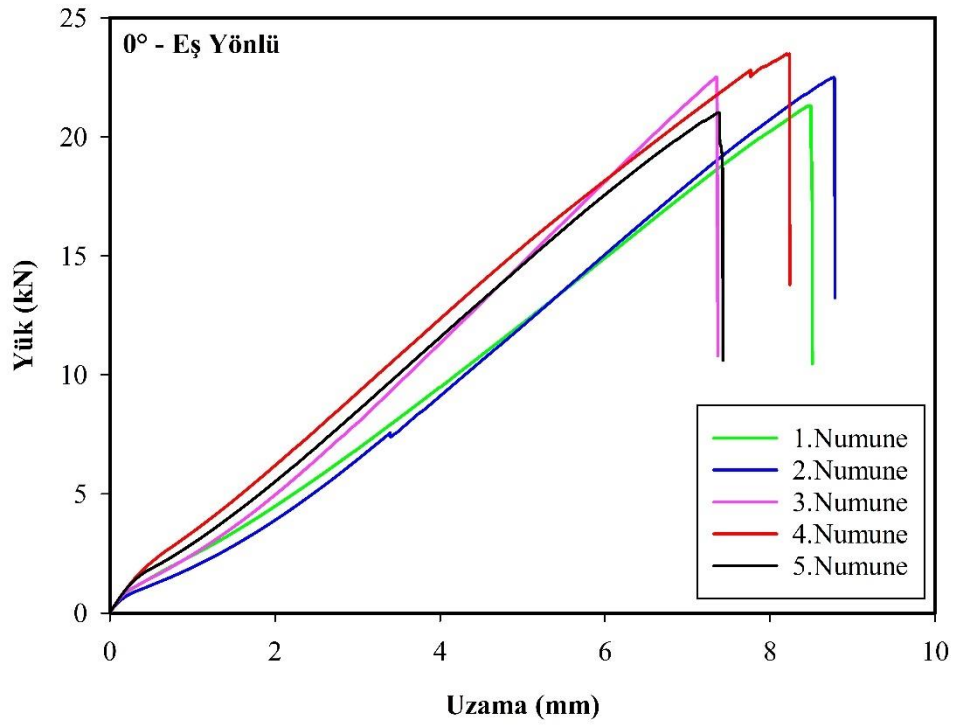
testinde hasar alan numunelerden açısıl yönelim 0° ve 15° olan numunelerin hasarlarında delaminasyonların daha yoğun olduğu mikroskop görüntülerinden söylenebilir. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre açısıl yönlenme arttıkça delaminasyon azalmaktadır ve fiber kırılması ve çıkması artmaktadır.

5.3. Çekme Testi Sonuçları

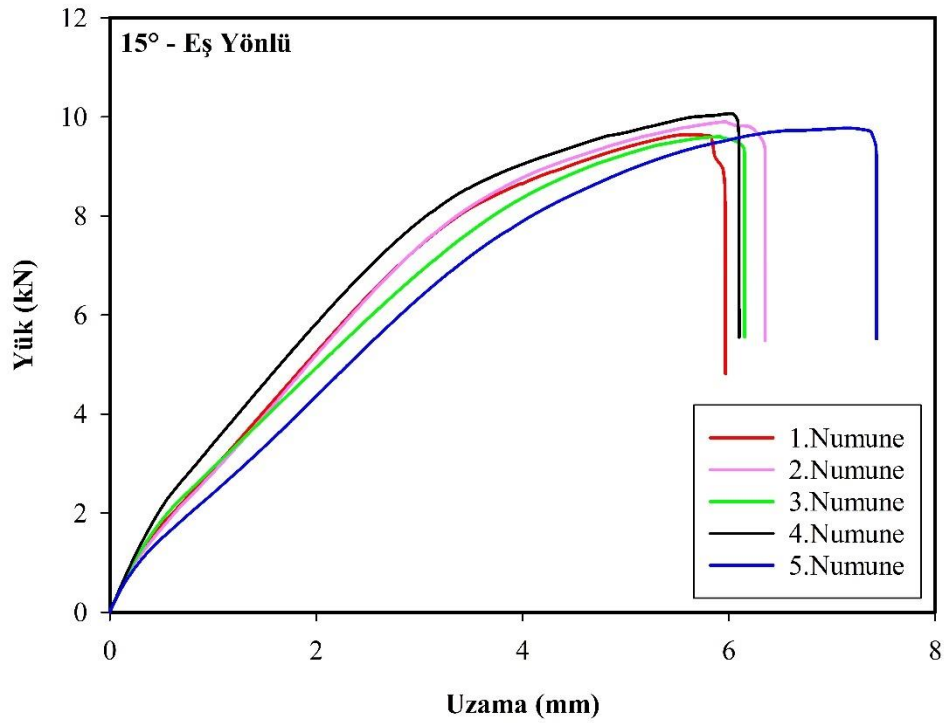
Aynı test cihazında fikstür değişikliği yapılarak çekme fikstürleri ile çekme testi gerçekleştirilmiştir.



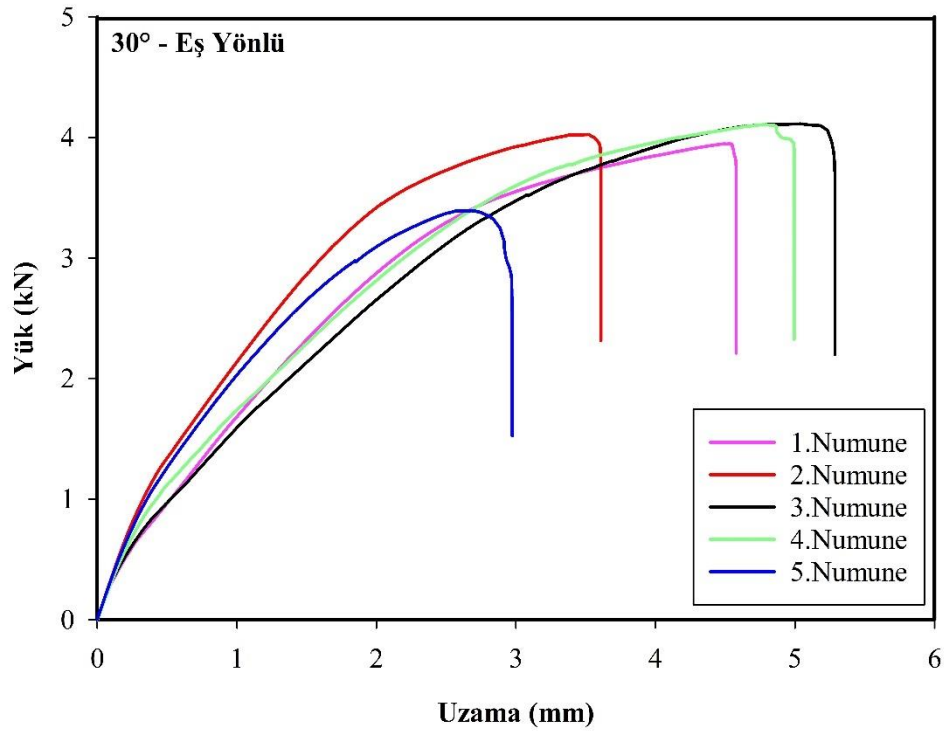
Şekil 5.37. a) Eş yönlü ve dokuma tipindeki cam fiber kompozit malzemelerin ilk direnç değerleri



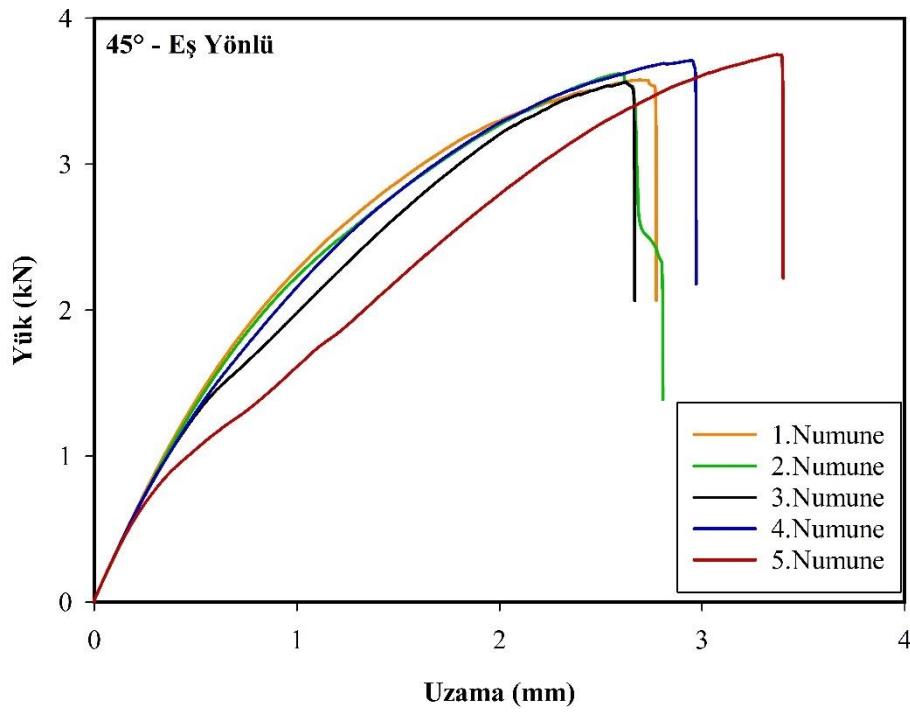
Şekil 5.38. 0° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



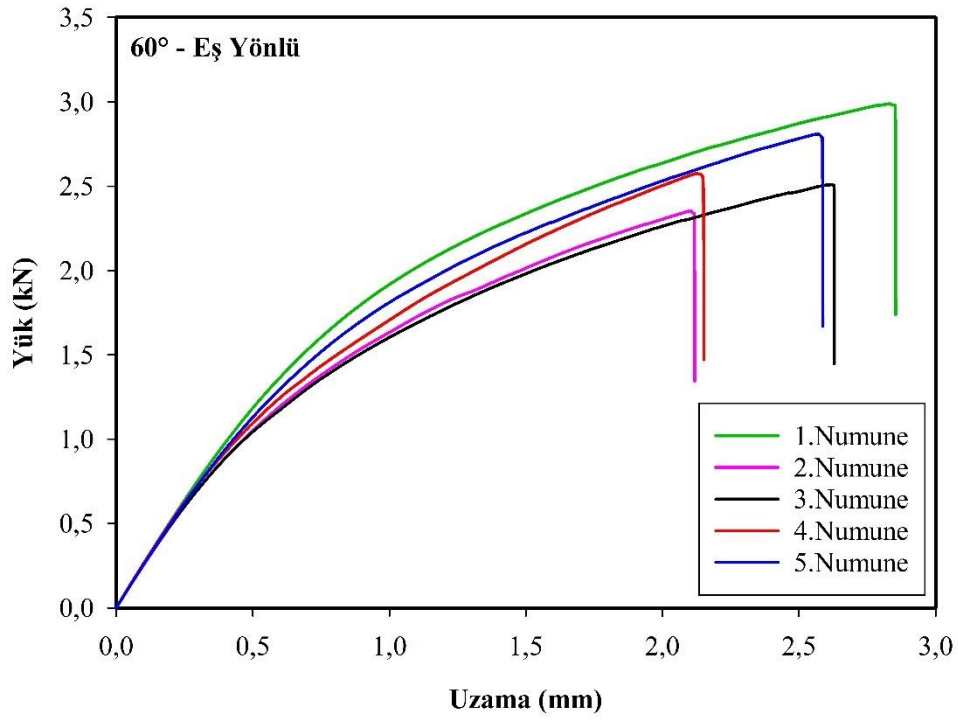
Şekil 5.39. 15° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



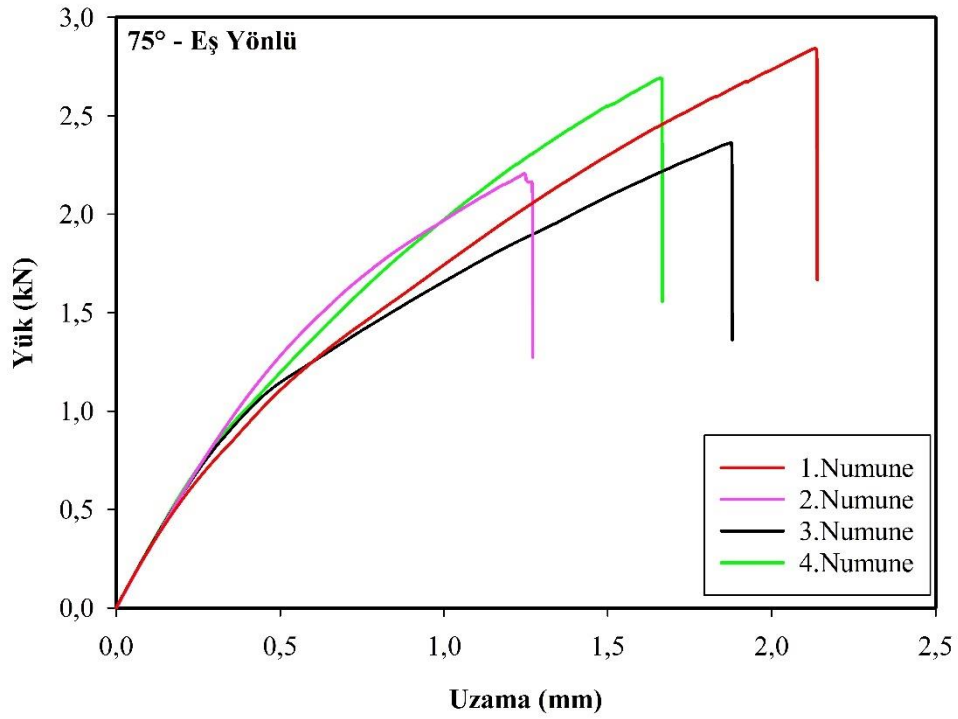
Şekil 5.40. 30° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



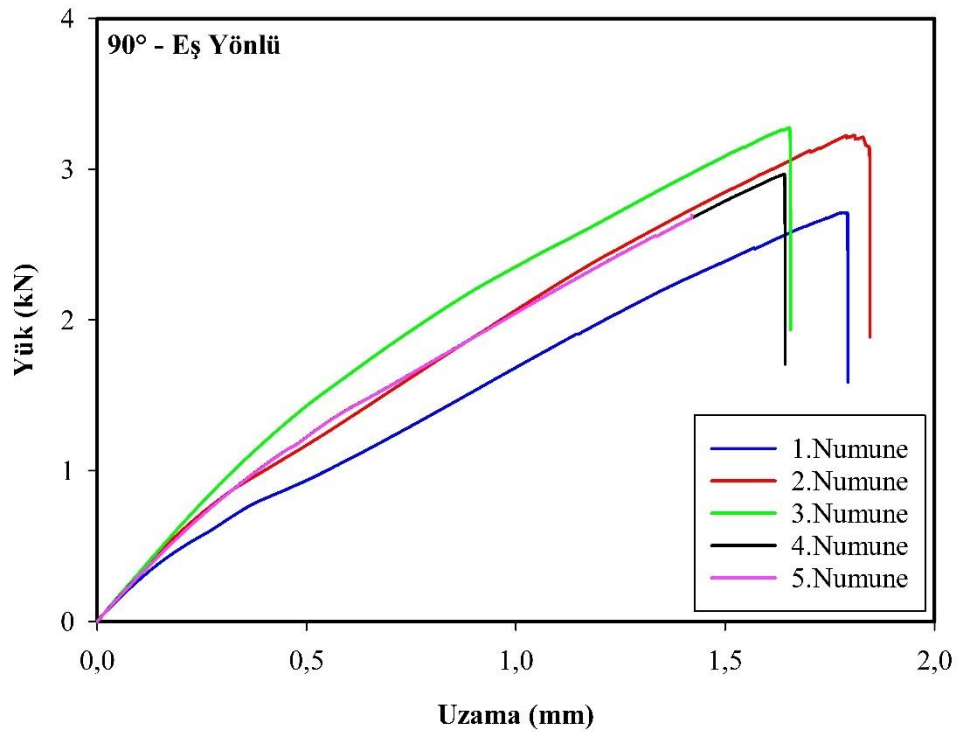
Şekil 5.41. 45° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



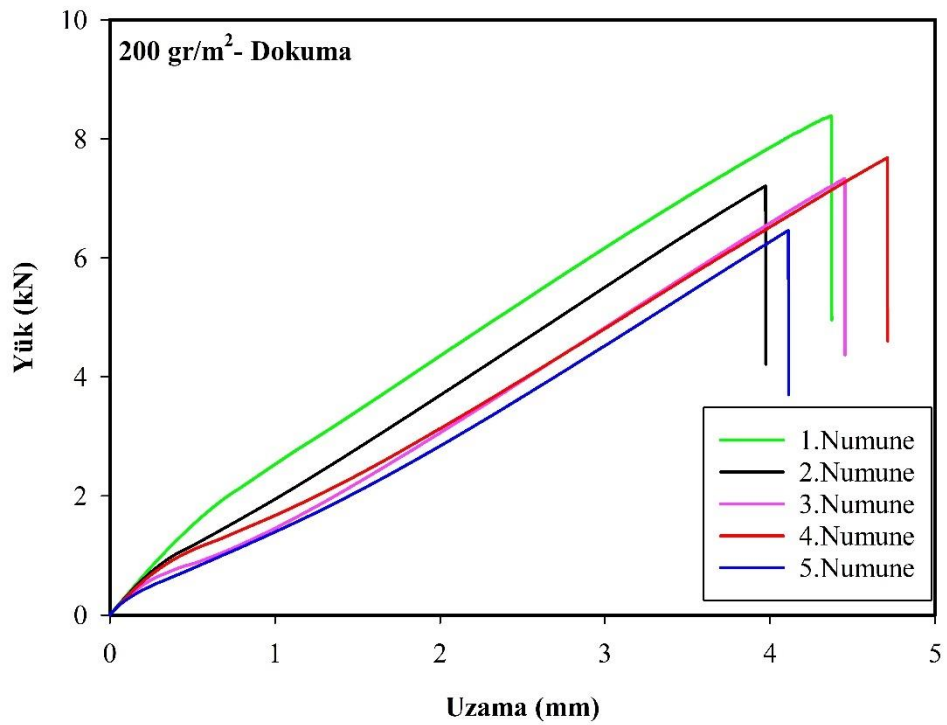
Şekil 5.42. 60° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



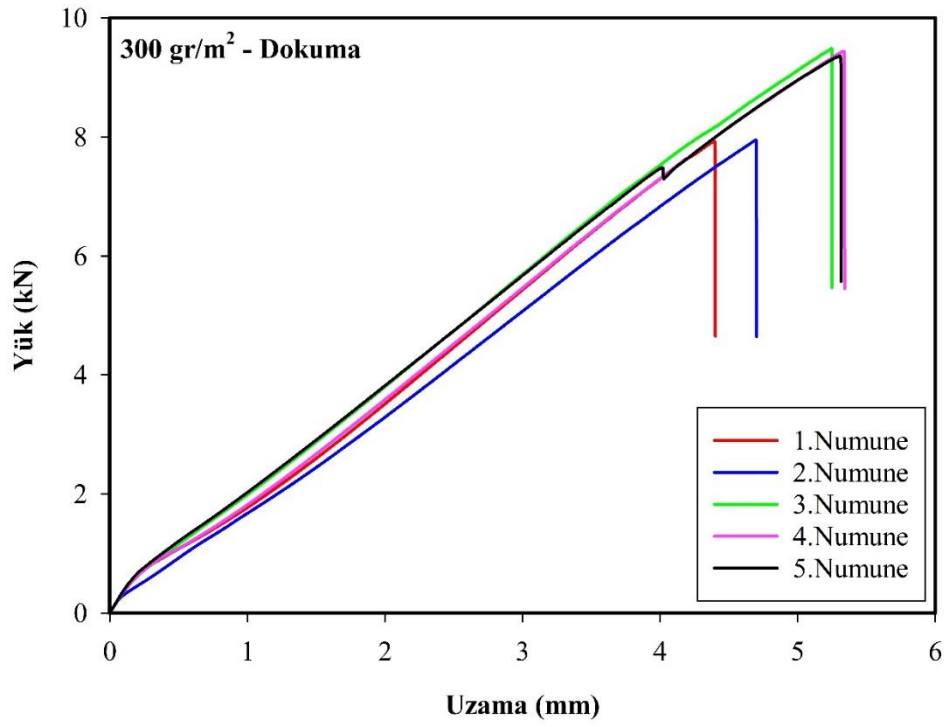
Şekil 5.43. 75° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



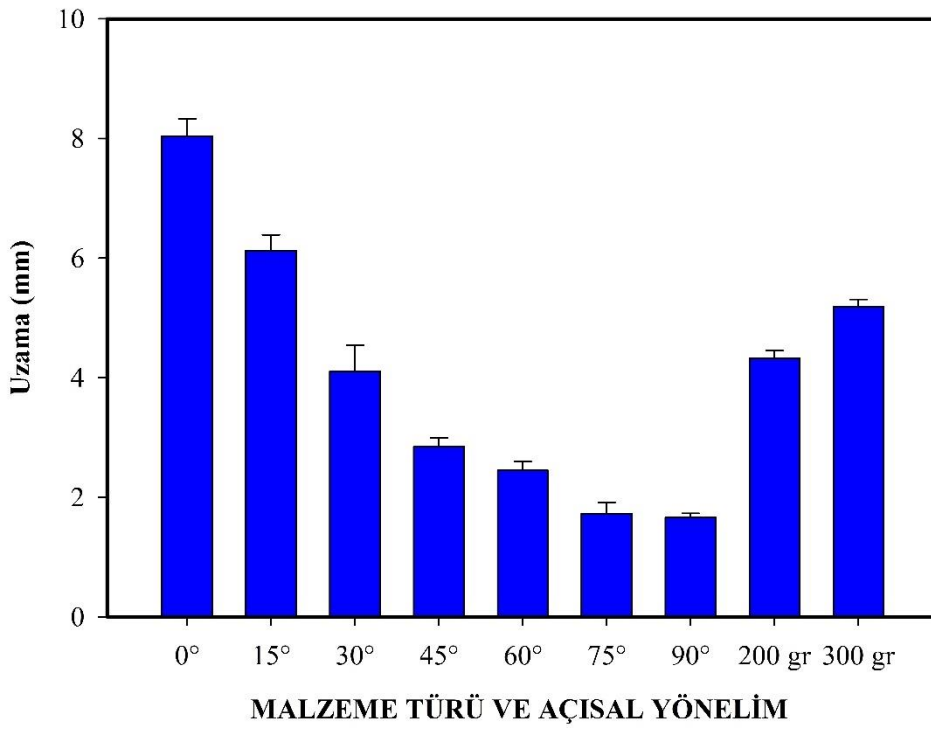
Şekil 5.44. 90° yönelimli GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



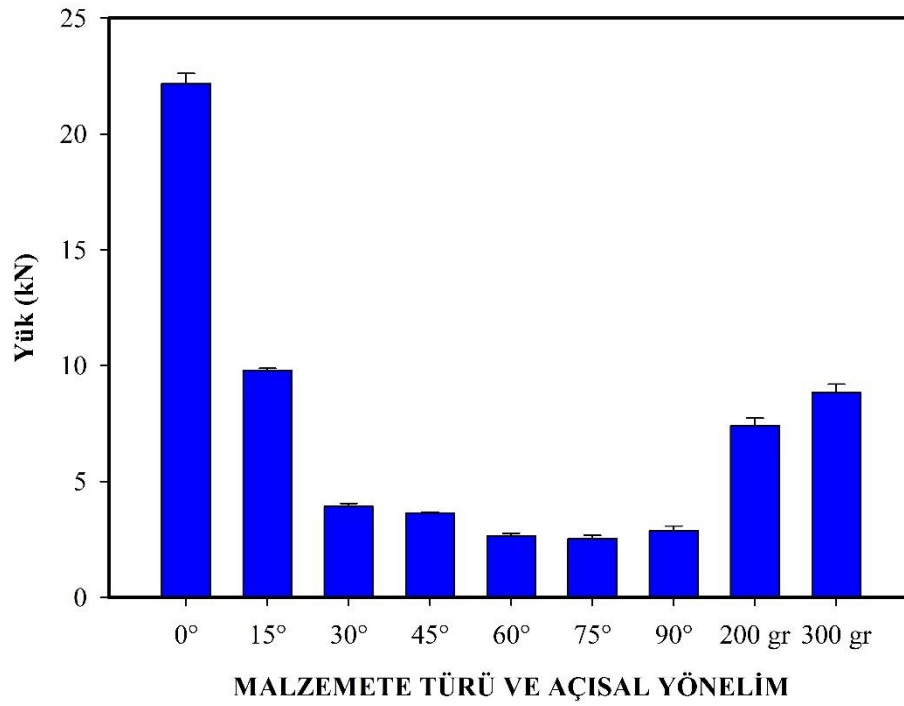
Şekil 5.45. 200 gr/m² dokuma tipi GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



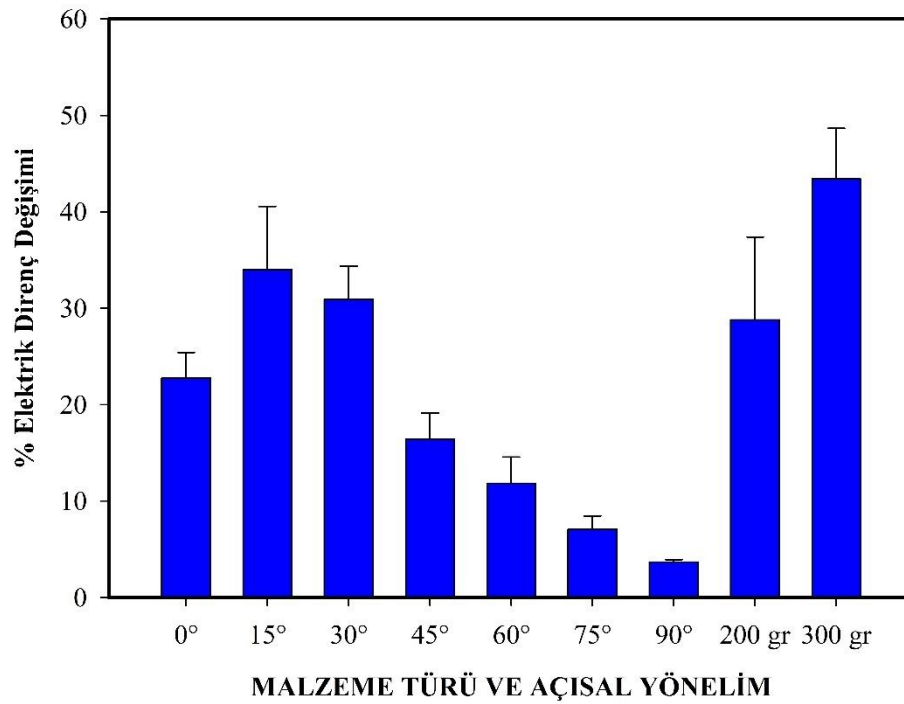
Şekil 5.46. 300 gr/m² dokuma tipi GFRPC numunelerin Yük / Uzama grafiği



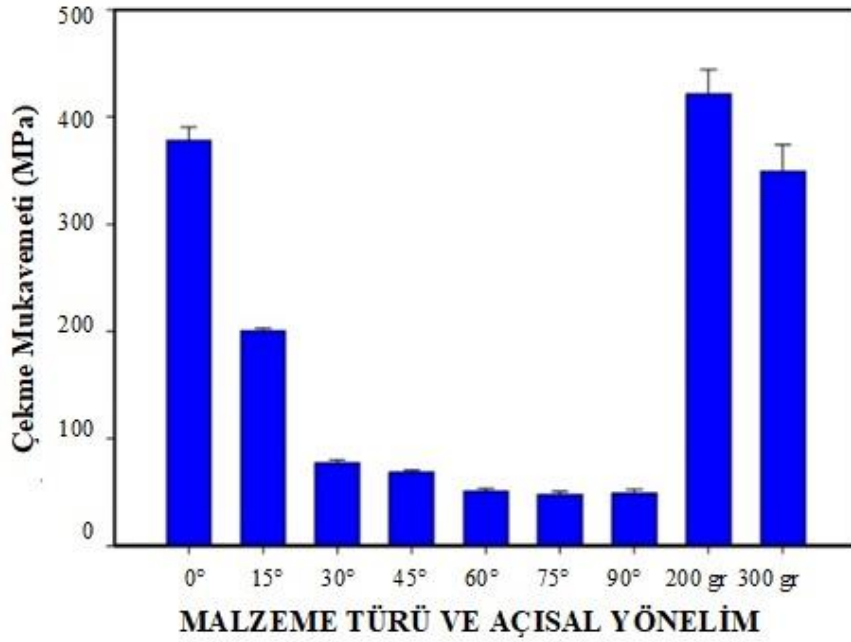
Şekil 5.47. Açısal yönlenmeye ve malzeme türüne bağlı olarak numunelerin yük altında uzama grafiği



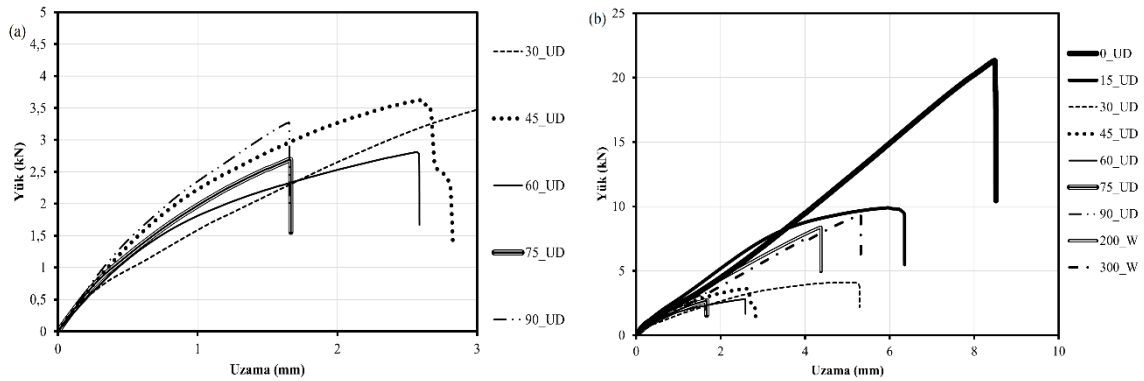
Şekil 5.48. Açısal yönlenmeye ve malzeme türüne bağlı olarak numunelerin yük taşıma kapasiteleri



Şekil 5.49. Çekme deneyinde elde edilen direnç değişiminin karşılaştırması



Şekil 5.50. Çekme numunelerinin mukavemet karşılaştırması



Şekil 5.51. a) Çekme deneyinde elde edilen yakınlaştırılmış Uzama/Yük kıyaslama grafiği, b) Çekme deneyinde elde edilen Uzama/Yük kıyaslama grafiği

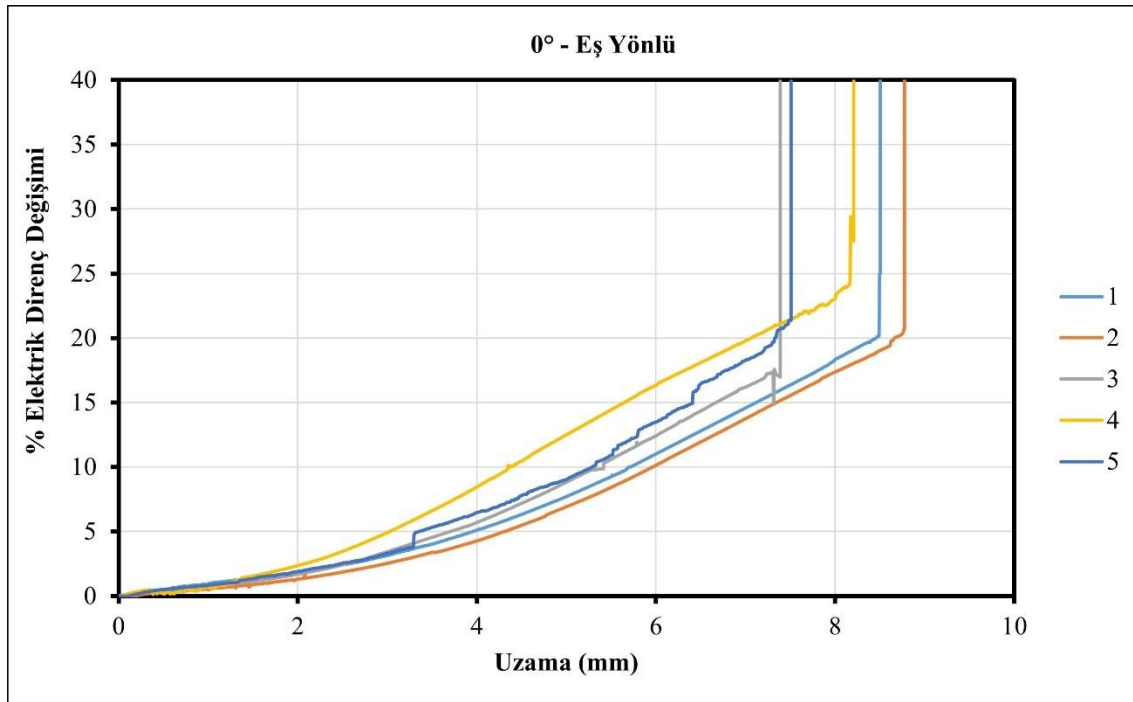
Çekme testinden elde edilen verilere göre kompozit malzemelerdeki lif yöneliminin elektriksel direnç değerlerini ve mekanik dayanımını önemli derecede etkilediği görülmektedir. Yapılan deney sonuçlarına göre Şekil 5.47'deki grafikten görüldüğü gibi yük taşıma kapasitesinin lif yöneliminden etkilendiği açıkça söylenebilir. Lif yönlenmesinin çekme yönüne paralel olduğu 0° açılı numunenin yük taşıma kapasitesi 20kN üzerindedir. Ancak lif yönlenme açısı büyüdükçe bu değer yüksek oranda düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı yorumu farklı alansal yoğunlukta kullanılan dokuma tipi cam fiber kompozit numuneler için yapacak olursak yoğunluğun artmasının yük taşıma kapasitesini arttırdığı

söylenbilir. Yük taşıma kapasitelerinin daha yüksek olduğu numunelerin kopmadan önce daha fazla uzadığı Şekil 5.47'deki grafikten görülmektedir. 200gr/m² ve 300gr/m² ağırlığındaki örneklerde uzama, 0° ve 15° açılara göre daha düşüktür ancak 75° ve 90° açılarına göre daha yüksektir. 300 gramlık dokuma numune, 200 gramlık dokuma numuneye göre daha fazla uzama göstermektedir ve daha fazla yük taşımaktadır. Bu durum alansal yoğunluğun artmasıyla uzama miktarının arttığına işaret etmektedir. Şekil 5.50'deki grafiği inceleyecek olursak mukavemet değerinin lif yöneliminden etkilendiğini söyleyebiliriz. Dokuma tipi kumaşın yük taşıma kapasitesi 0° dereceli numuneye göre düşük olmasına rağmen benzer mukavemet özelliği sergilediği görülmüştür. Bunun sebebi dokuma tipi kumaşın alanının eş yönlü kumaşa göre oldukça düşük olmasındandır. Dokuma tipi kumaştan elde edilen numuneler alansal yoğunluğa göre 0,7mm ve 1mm kalınlığında iken eş yönlü kumaştan elde edilen numuneler 2mm'den daha kalın olabilmektedir.

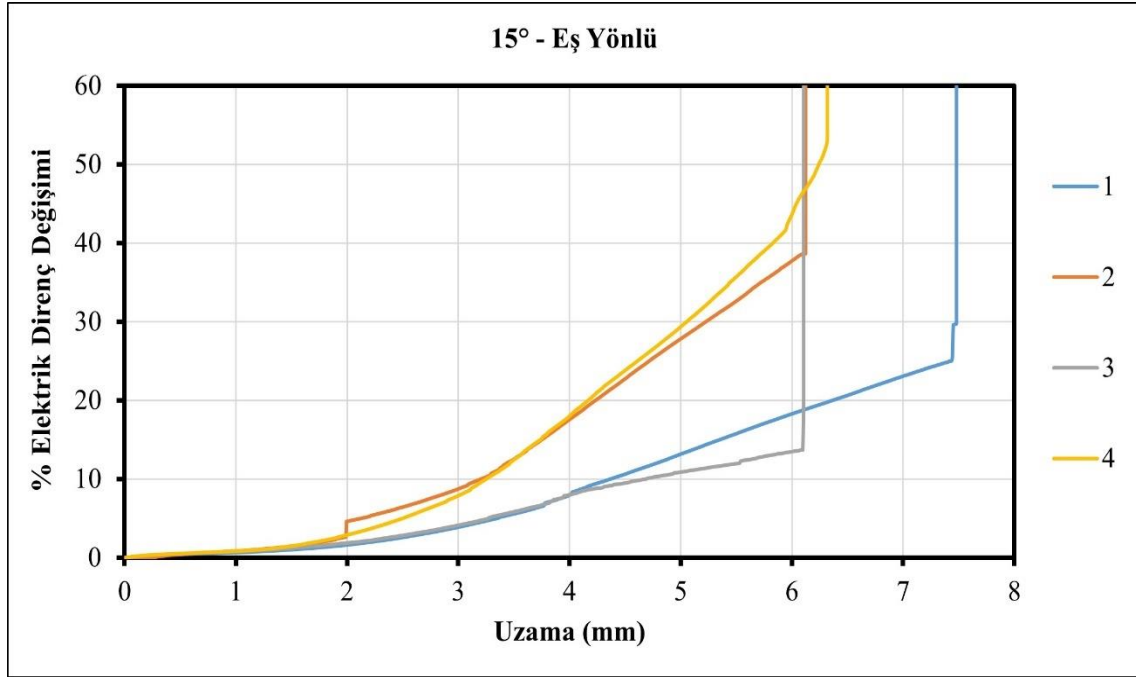
Elektrik direnç değişimini Şekil 5.49'daki grafikten incelediğimizde 0°, 15° ve 30° açılarında diğer yönelimlere göre nispeten yüksek değerlerde görülüyor. Özellikle 15° açıda direnç değişimi en yüksek seviyede (yaklaşık %40) olup 30° açısında da direnç değişimi yüksek bir seviyede (%30 civarında) olduğu gözleniyor, ancak 15° açısına göre biraz daha düşük direnç değişimleri olduğu gözlemlenmiştir. Bunun temel sebebi olarak bu açılarda hasar bölgesinin diğer numunelere göre oldukça geniş olduğu söylenebilir. Şekil 5.64'ten Şekil 5.67'ye olan şekiller numunelerin hasar bölgelerini göstermektedir. 45° açısında direnç değişimi %20 civarında gözlenirken, 60° ve 75° açılarında bu oran %10 civarına düşüyor. 90° açısında direnç değişimi oldukça düşük, neredeyse %5 seviyesine yakın. Bu durum, elektrik direnç değişiminin lif yönelimine bağlı olarak azalma gösterdiğini ve belirli açılarda daha yüksek olduğunu gösteriyor. Grafikte 200gr ve 300gr olarak gösterilen numuneler dokuma tipi kumaş kullanılarak alansal yoğunluğu değişen numunelerdir. Yoğunluğu düşük olan numunenin ilk direnç değerinin daha yüksek olduğunu ölçmüştük. Bu sebeple hasar anında yoğunluğu düşük olan numunede daha az direnç değişimi görmekteyiz. Yani bu sonuçlara göre elektriksel direnç değişimi fiber yönlenmesinden ve yoğunluğundan önemli derecede etkilendiği söylenebilir.

Eğme ve çekme numunelerini karşılaştıracak olursak; eğme numunelerinin yük altında ilk önce direnç değerlerinin azaldığını ancak yükleme işleminin devam etmesi ve yapıya kalıcı hasar verilmesi nedeniyle sonrasında direnç değerlerinde artışlar görülmüştür. Bu durumun

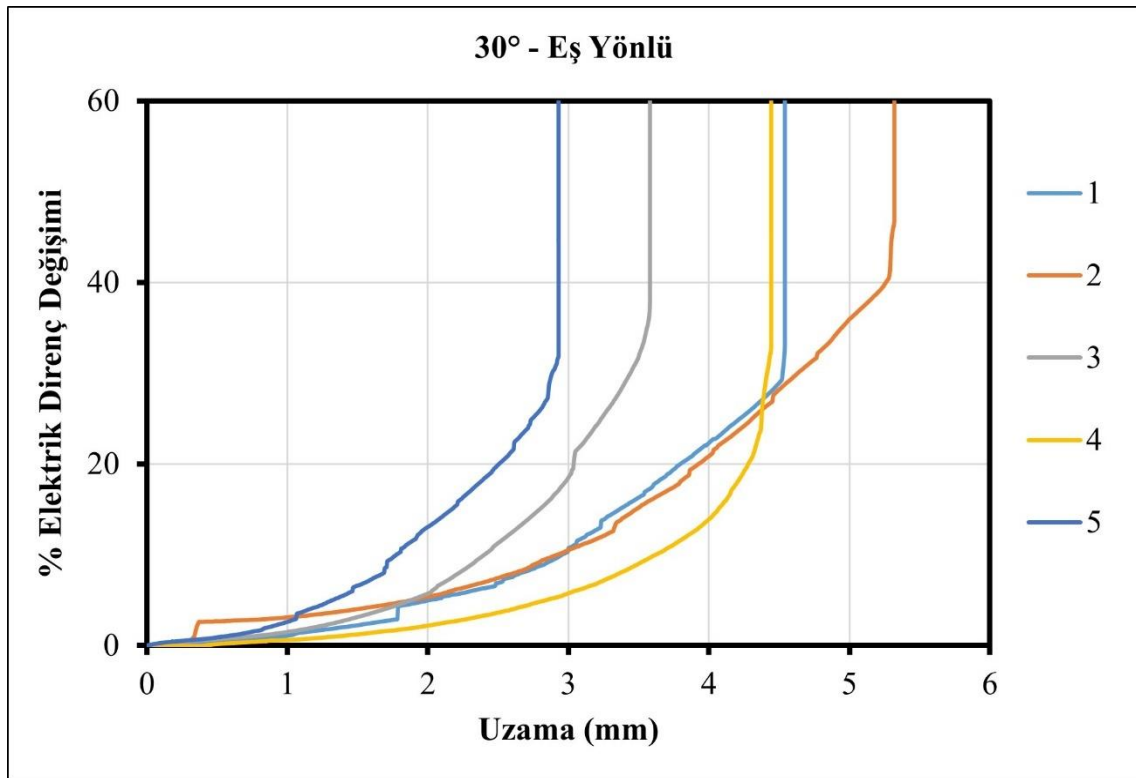
temel nedeni olarak kompozit yapıda iletken malzeme olarak kullanılan karbon nanotüplerin baskı altında ilk önce birbirine yaklaşması direnç değerini düşürmüş olup ve sonra oluşan plastik deformasyonun KNT bağlarını koparmasından ötürü direnç değerinde ani ve ciddi artışları oluşturmuştur. Çekme numunelerinde ise elektrik direnç değerleri boyuna ölçüldüğü için çekme kuvveti ile KNT bağları koparıldığı ve hasara uğratıldığı için kuvvet uygulanmaya başlayınca direnç değişiminde direkt olarak artışlar oluşmuştur. Ek olarak çekme numunelerinde oluşan direnç değişimleri eğme numunelerine göre oldukça yüksektir. Örneğin 0° eş yönlü cam fiberle üretilen numunenin eğilme direnç değişimi %3 iken, çekme direnç değişimi ise yaklaşık %20'dir. 300gr alansal yoğunluktaki dokuma tipi numunenin eğilme direnç değişimi %5 civarındayken çekme direnç değişimi ise %40-50 arasındadır. Bu durumun temel sebebi olarak numunelere uygulanan farklı tür kuvvetlerin farklı türlerde kırılma davranışına sebep olması söylenebilir. Çekme testinde elde edilen elektrik direnç değişim davranışları Şekil 5.52'den Şekil 5.60 arasındaki grafiklerden incelenebilir.



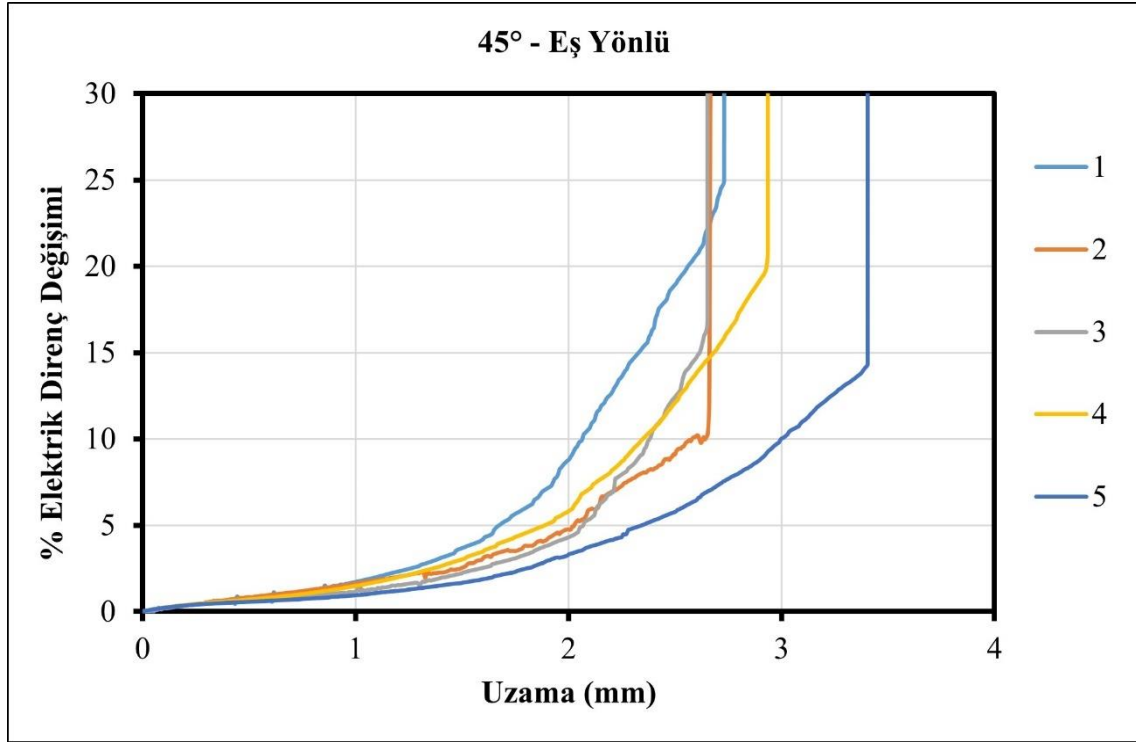
Şekil 5.52. Çekme deneyinde elde edilen 0° Eş yönlü numunenin direnç değişim davranışı



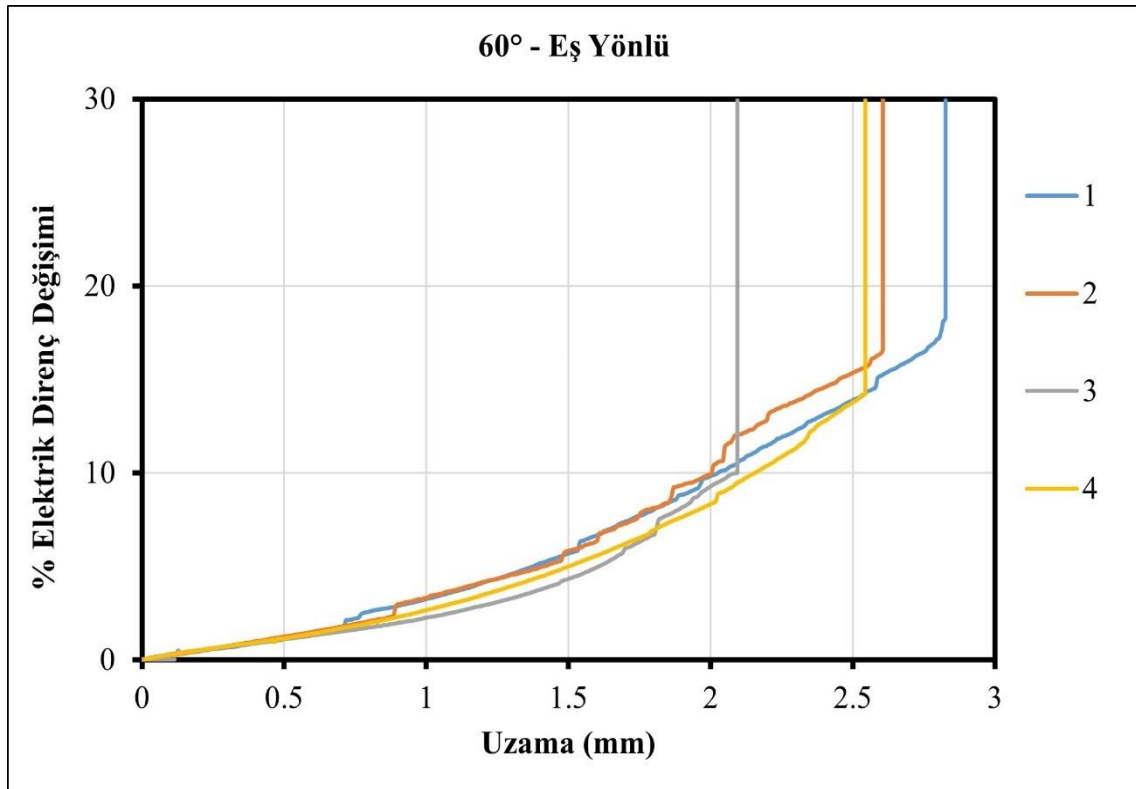
Şekil 5.53. Çekme deneyinde elde edilen 15°-UD numunenin direnç değişim davranışı



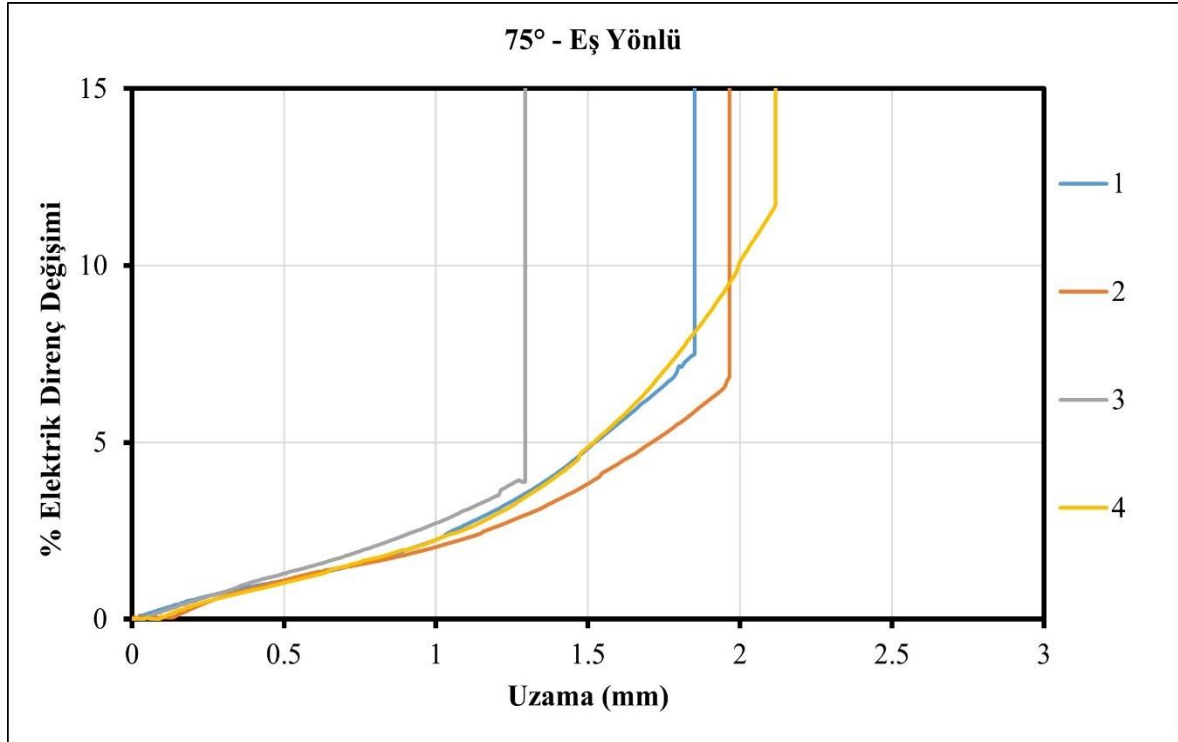
Şekil 5.54. Çekme deneyinde elde edilen 30°-UD numunenin direnç değişim davranışı



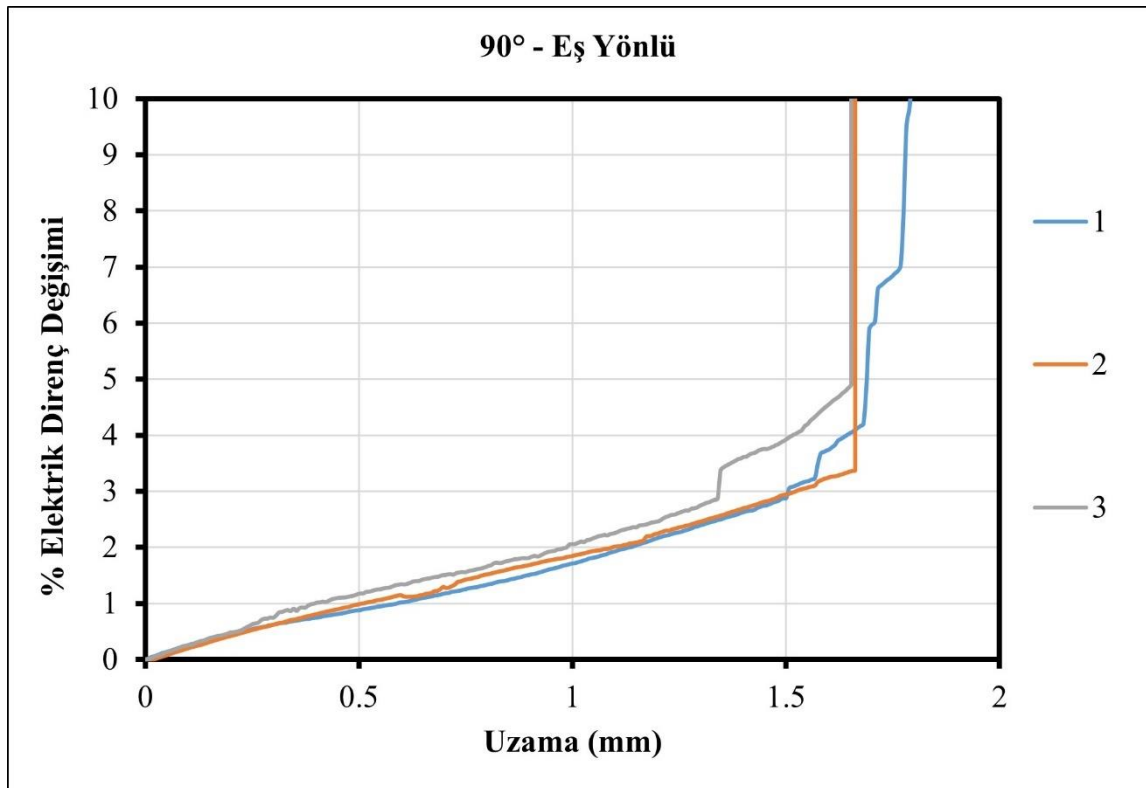
Şekil 5.55. Çekme deneyinde elde edilen 45°-UD numunenin direnç değişim davranışı



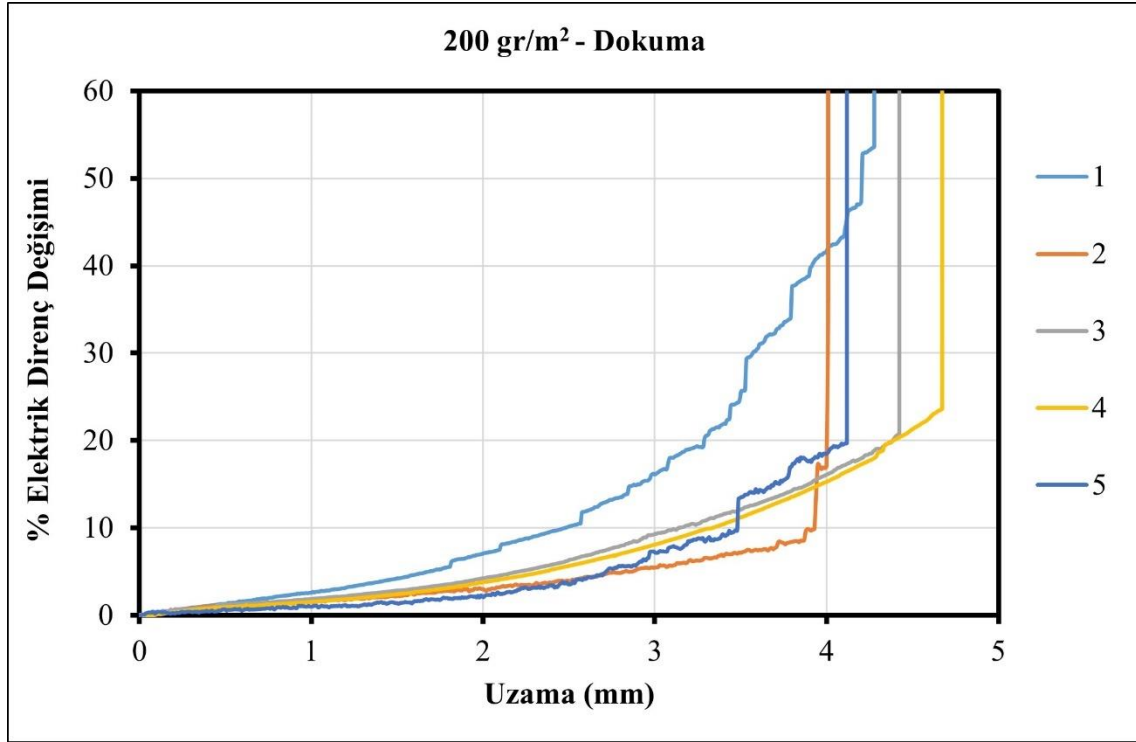
Şekil 5.56. Çekme deneyinde elde edilen 60°-UD numunenin direnç değişim davranışı



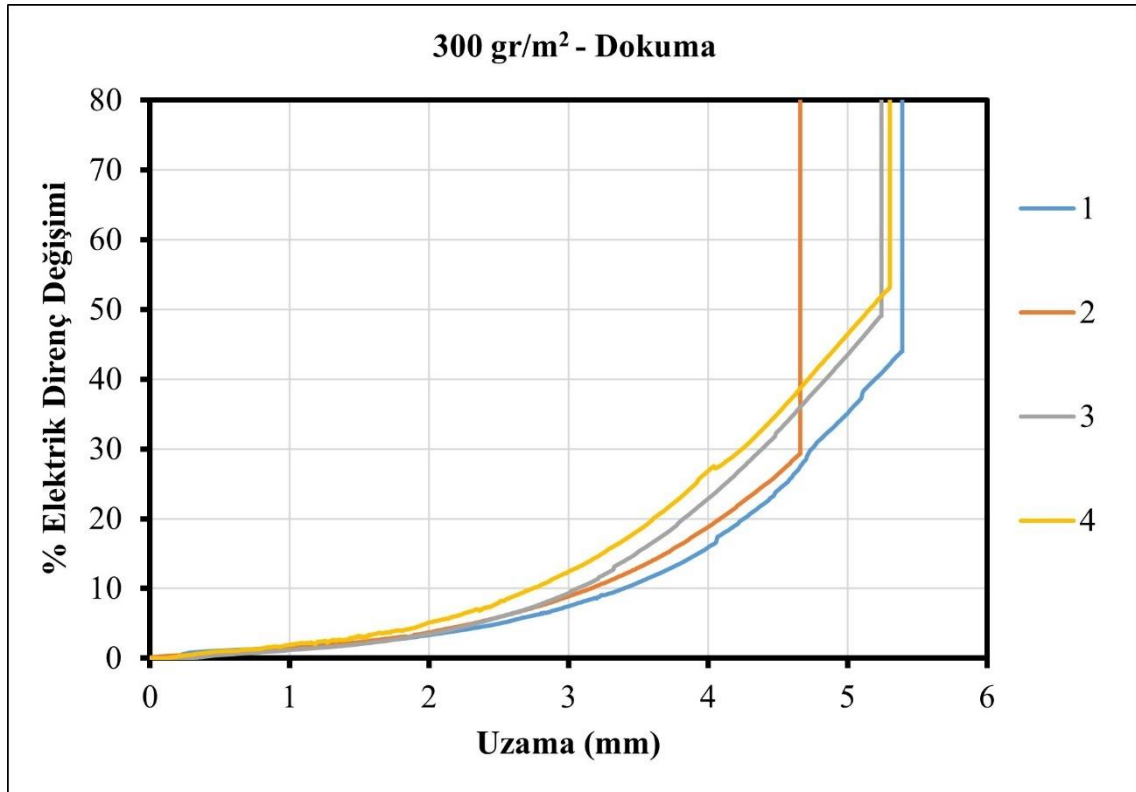
Şekil 5.57. Çekme deneyinde elde edilen 75°-UD numunenin direnç değişim davranışı



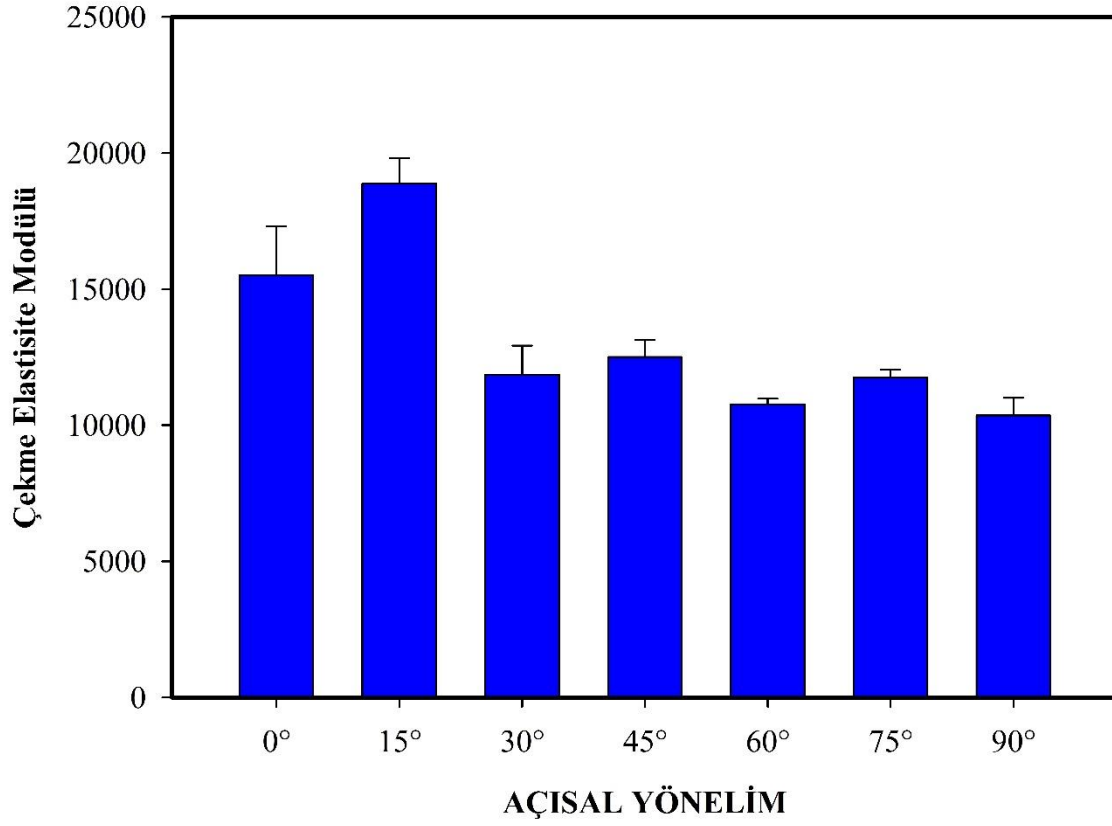
Şekil 5.58. Çekme deneyinde elde edilen 90°-UD numunenin direnç değişim davranışı



Şekil 5.59. Çekme deneyinde elde edilen 200 gr/m² dokuma tipi numunenin direnç değişim davranışı



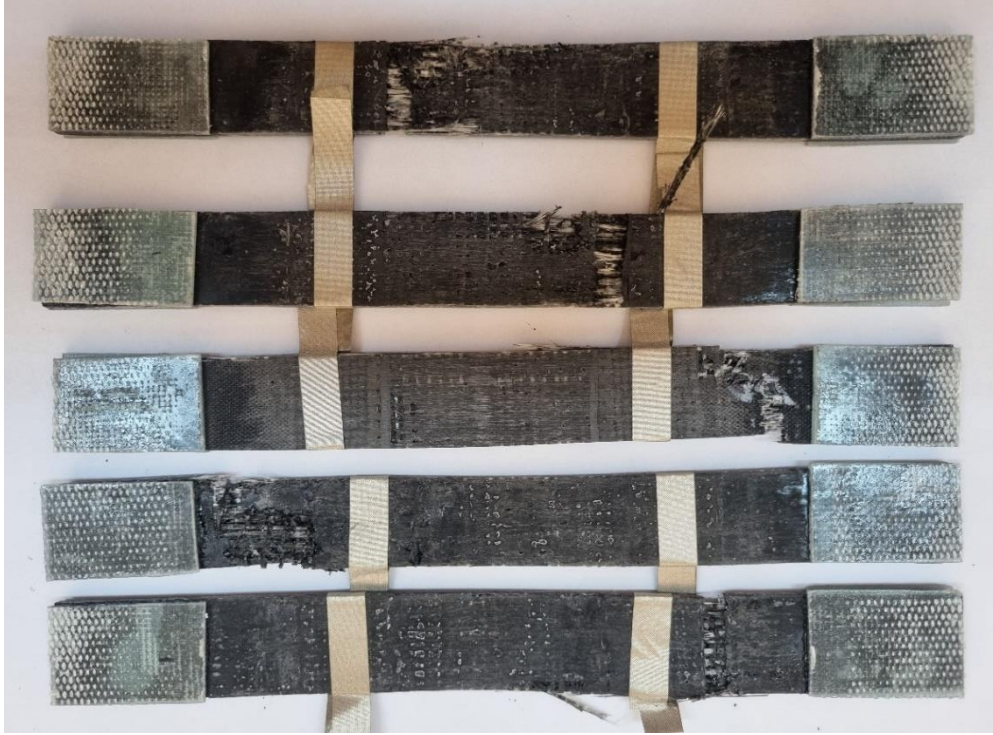
Şekil 5.60. Çekme deneyinde elde edilen 300 gr/m² dokuma tipi numunenin direnç değişim davranışı



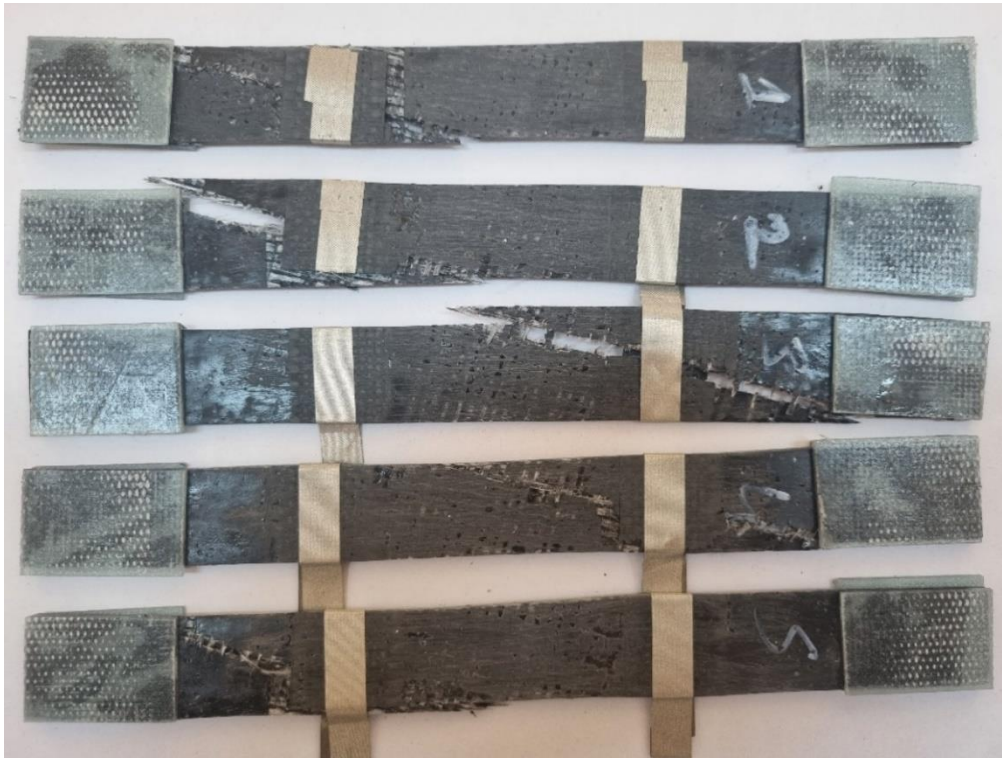
Şekil 5.61. Farklı fiber yönelimli GFRPC numunelerin çekme modülü kıyaslaması

15° açılı lif yönelimi en yüksek çekme elastisite modülünü sağlarken, 90° açılı lif yönelimi en düşük değeri vermektedir. Liflerin yönelimi çekme elastisite modülü üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Bu durum, fiber takviyeli kompozitlerde lif yöneliminin mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

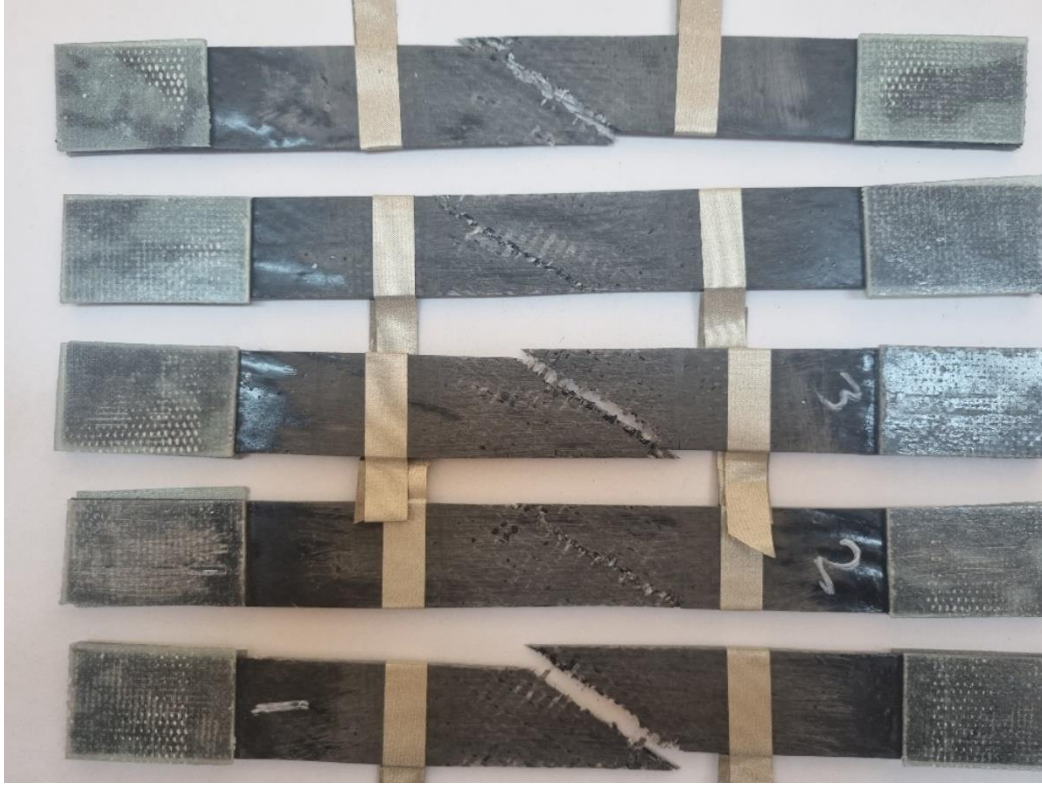
5.4. Çekme Testi Görsel Hasar ve Termal Kamera Analizi



Şekil 5.62. 0° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



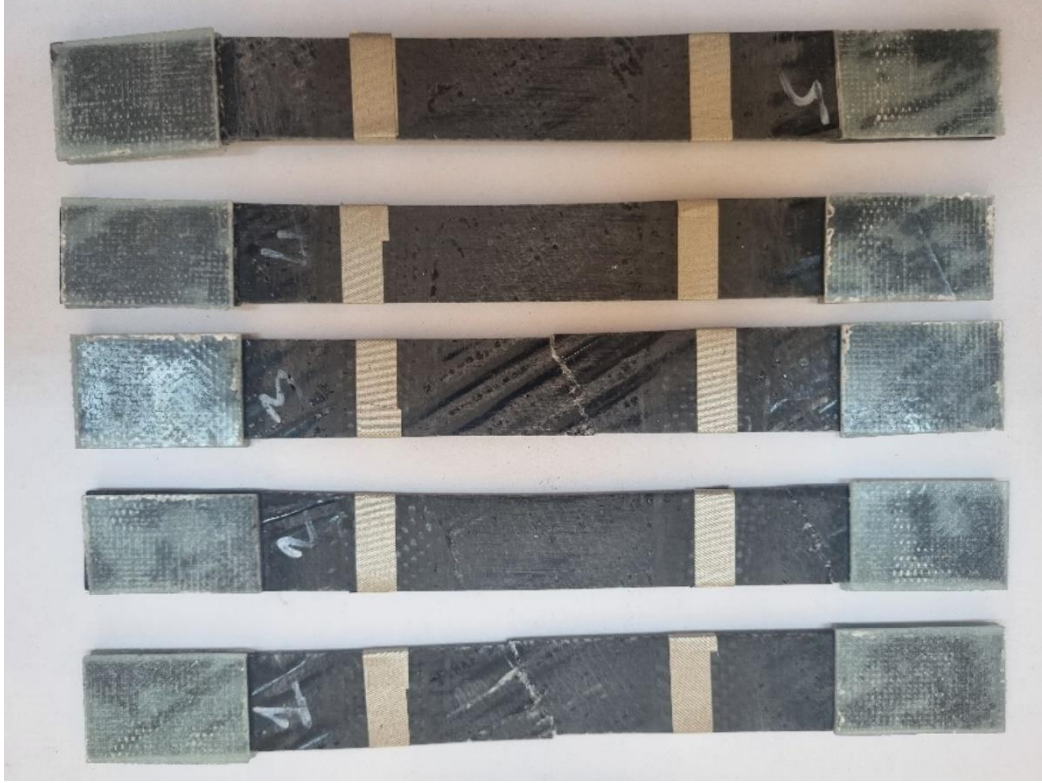
Şekil 5.63. 15° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



Şekil 5.64. 30° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



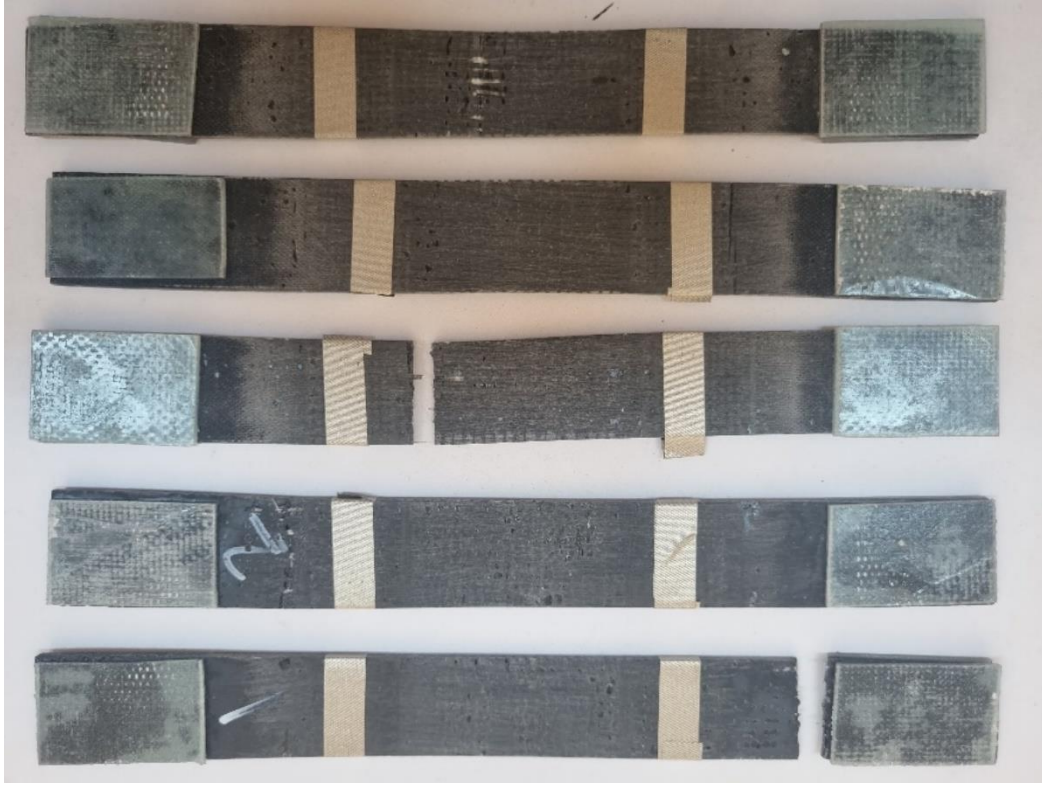
Şekil 5.65. 45° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



Şekil 5.66. 60° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



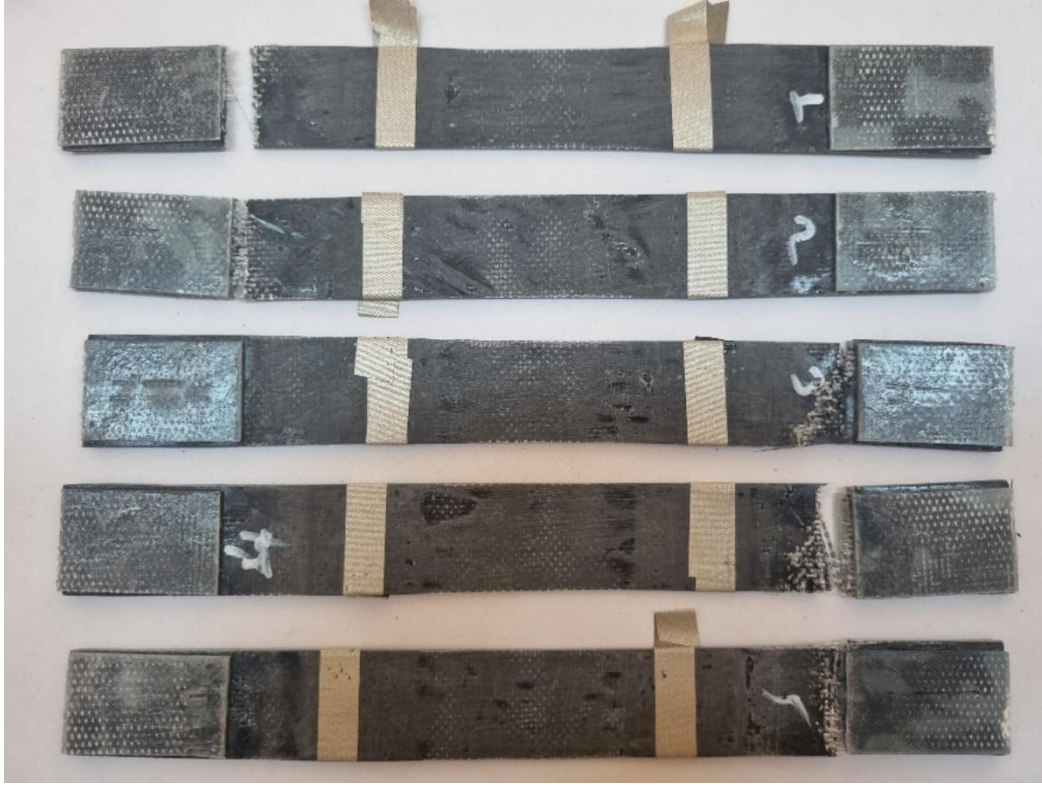
Şekil 5.67. 75° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



Şekil 5.68. 90° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



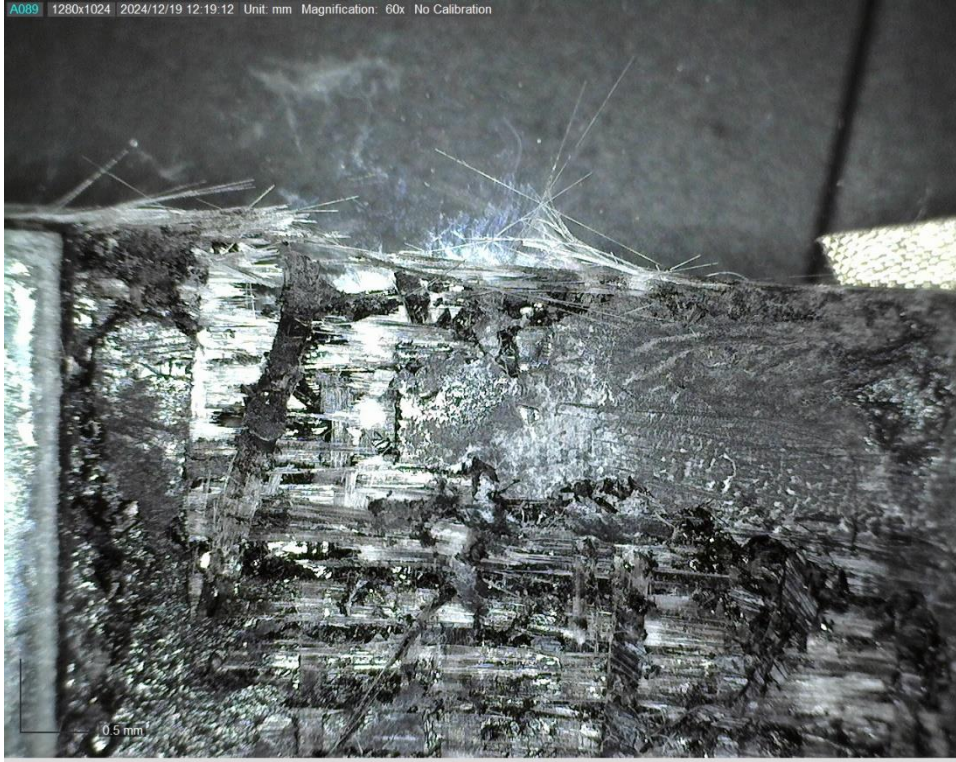
Şekil 5.69. 200gr/m² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



Şekil 5.70. 300gr/m² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma davranışı



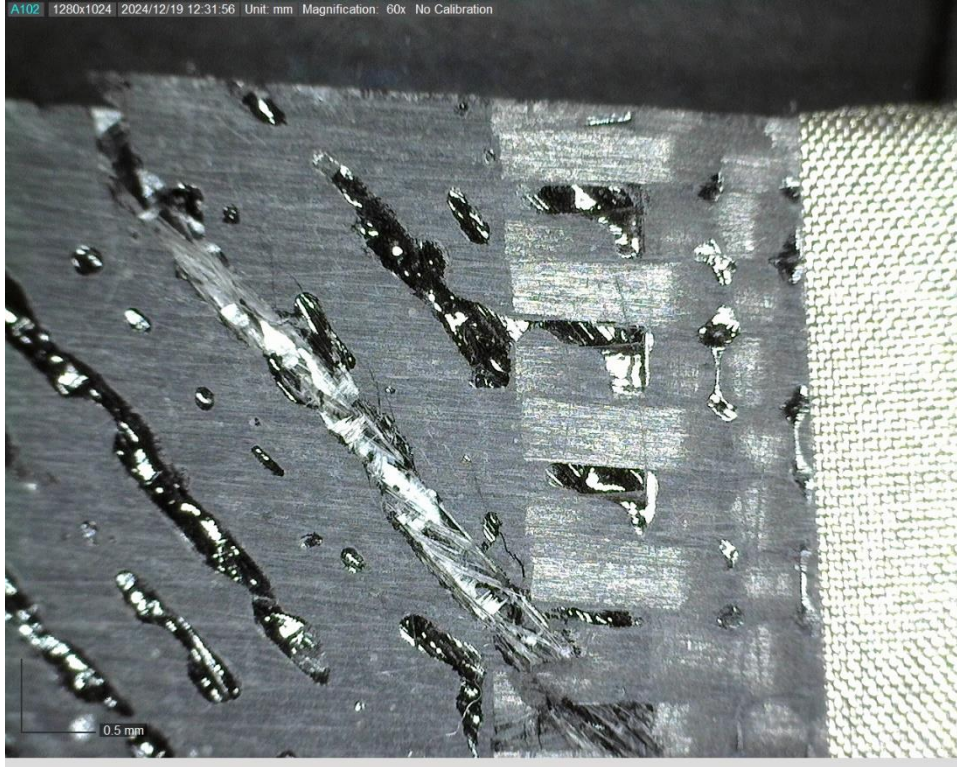
Şekil 5.71. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış kalınlık görüntüsü



Şekil 5.72. 0° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış genişlik görüntüsü



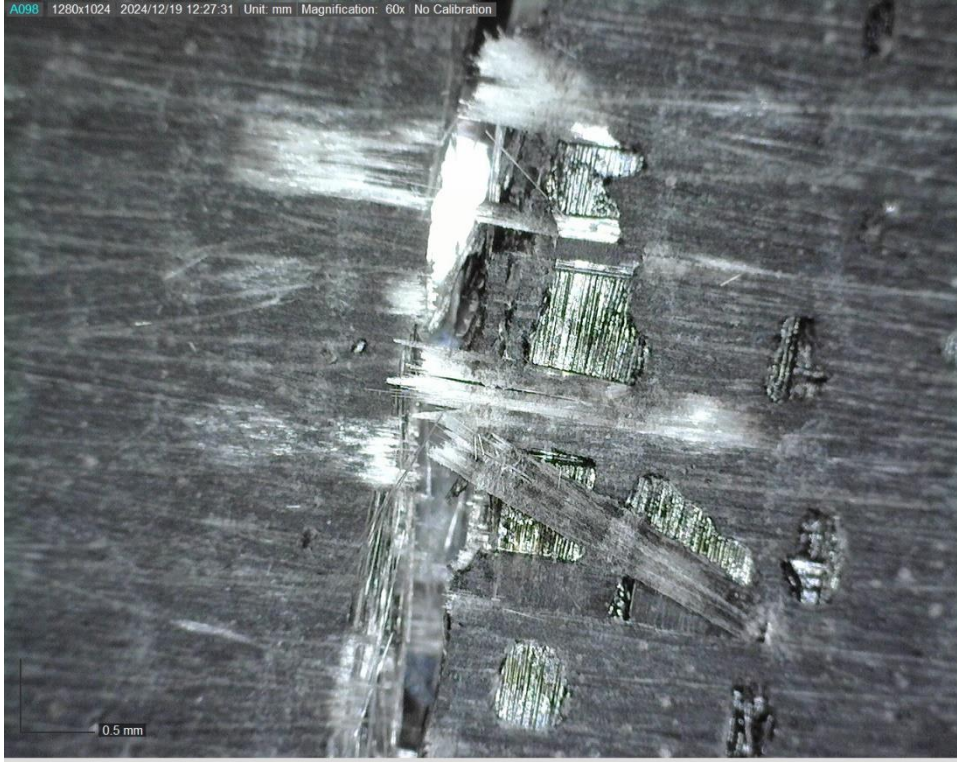
Şekil 5.73. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış kalınlık görüntüsü



Şekil 5.74. 45° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış genişlik görüntüsü



Şekil 5.75. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlştırılmış kalınlık görüntüsü



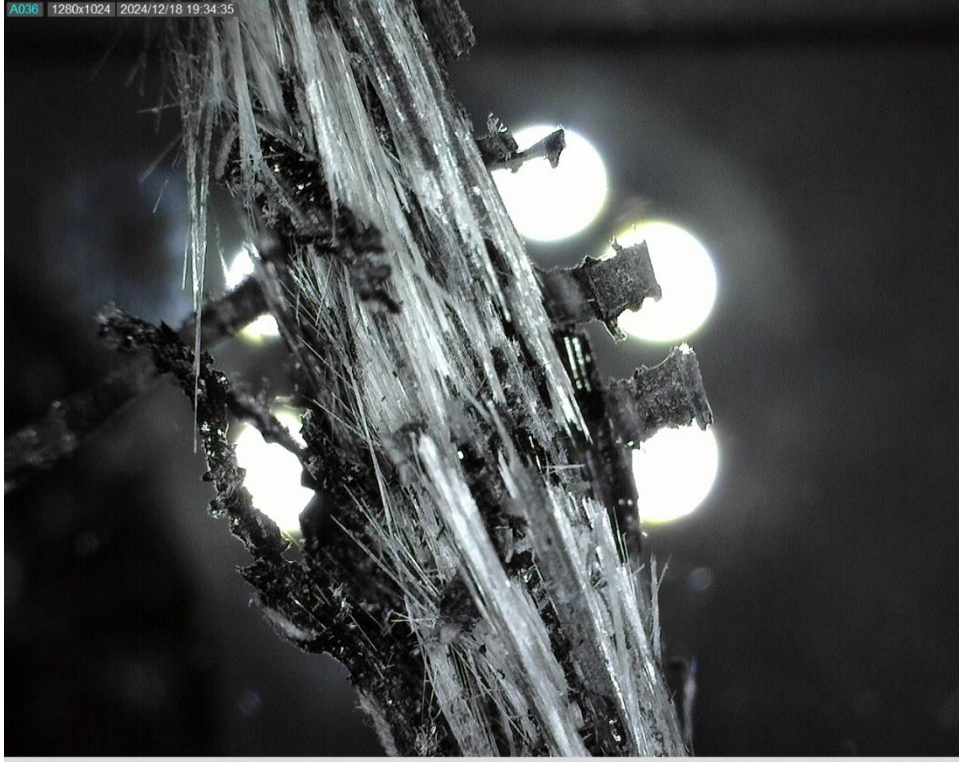
Şekil 5.76. 90° yönelimli GFRPC numunenin mikroskop altında yakınlaştırılmış genişlik görüntüsü



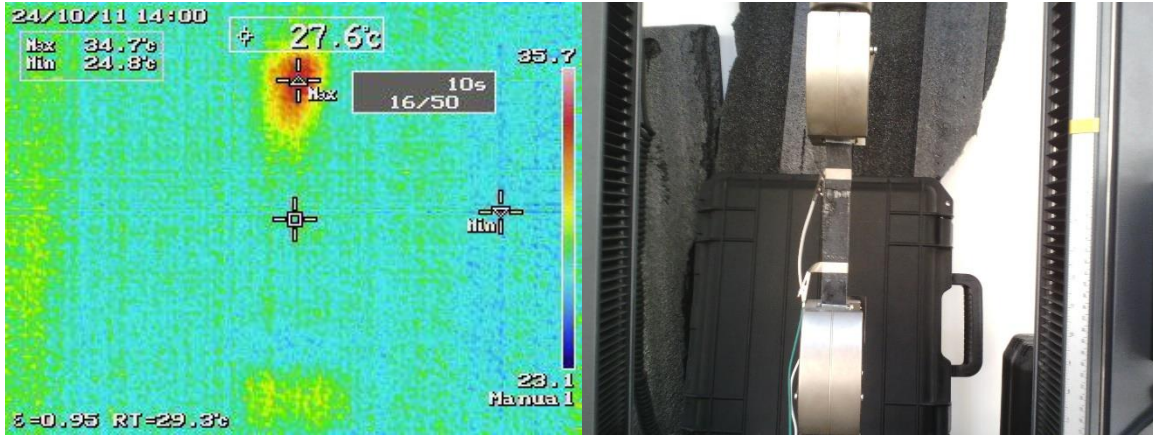
Şekil 5.77. Çekme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü



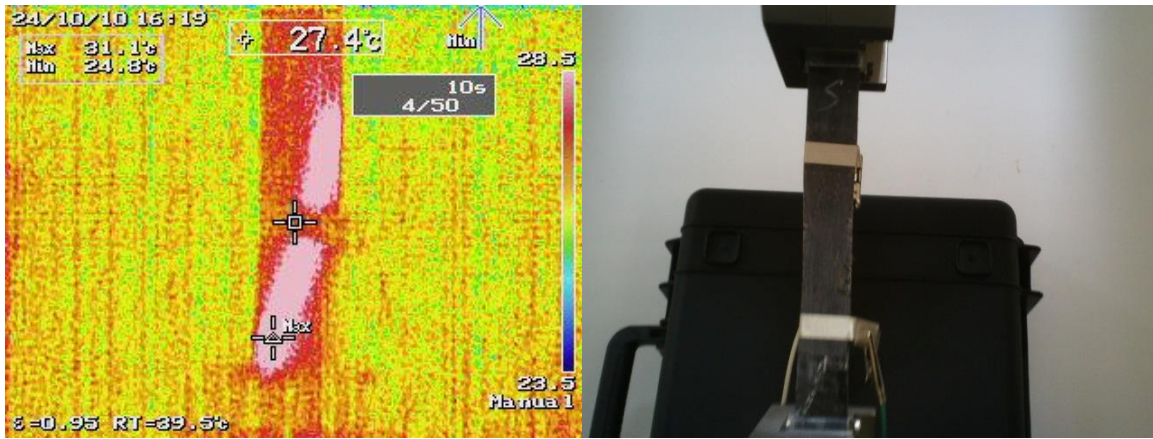
Şekil 5.78. Çekme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü



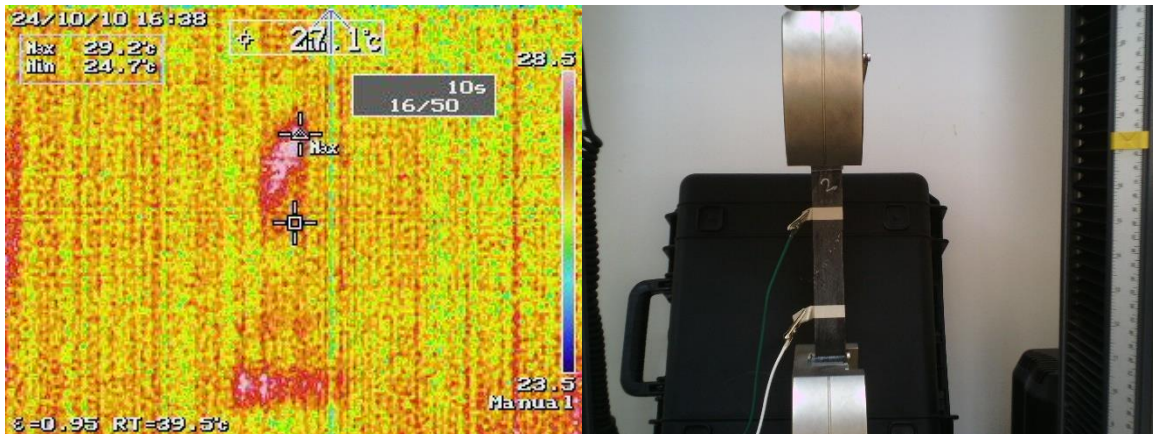
Şekil 5.79. Çekme numunesinde oluşan hasar modunun mikroskop altında yakınlaştırılmış kalınlık görüntüsü



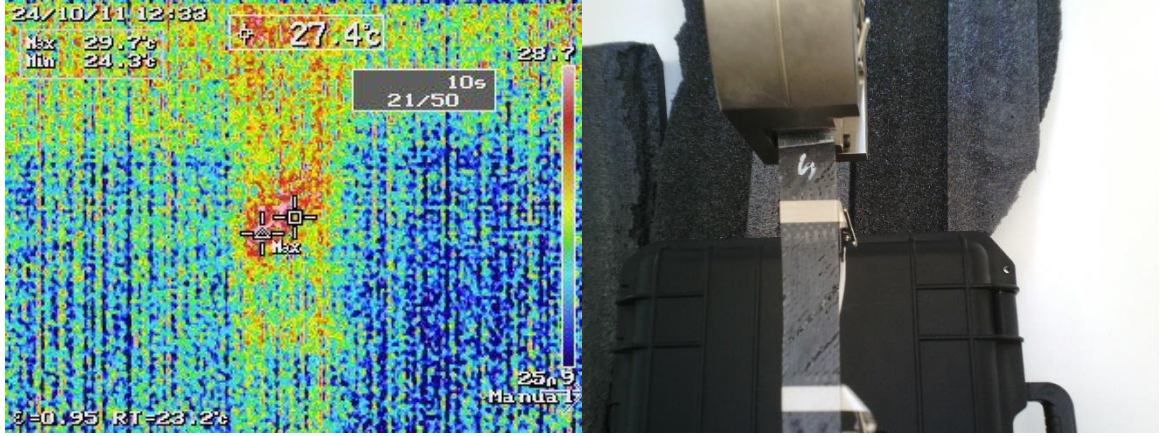
Şekil 5.80. 0° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



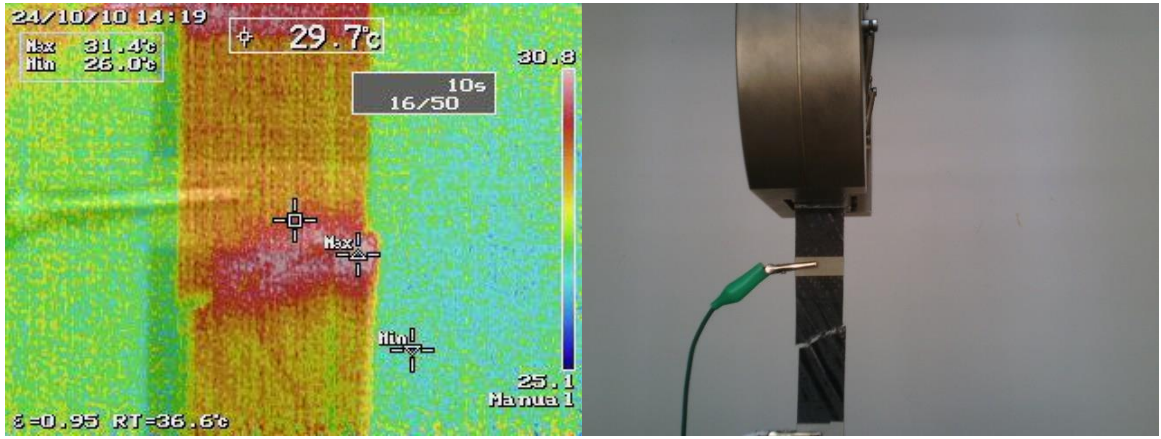
Şekil 5.81. 15° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



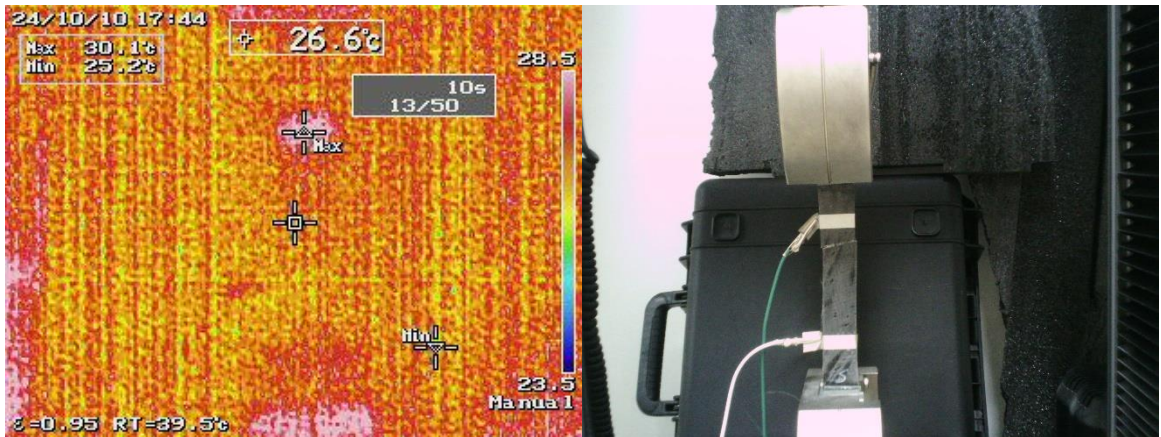
Şekil 5.82. 30° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



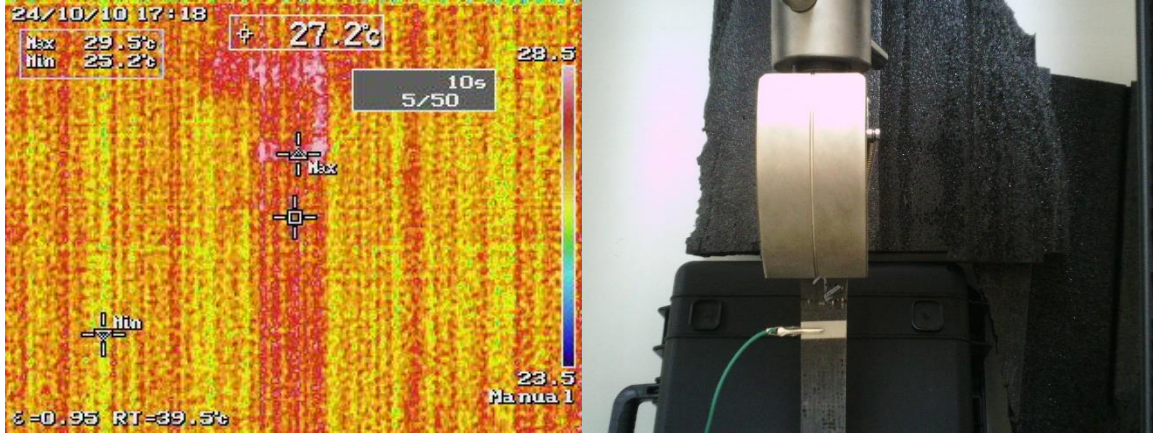
Şekil 5.83. 45° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



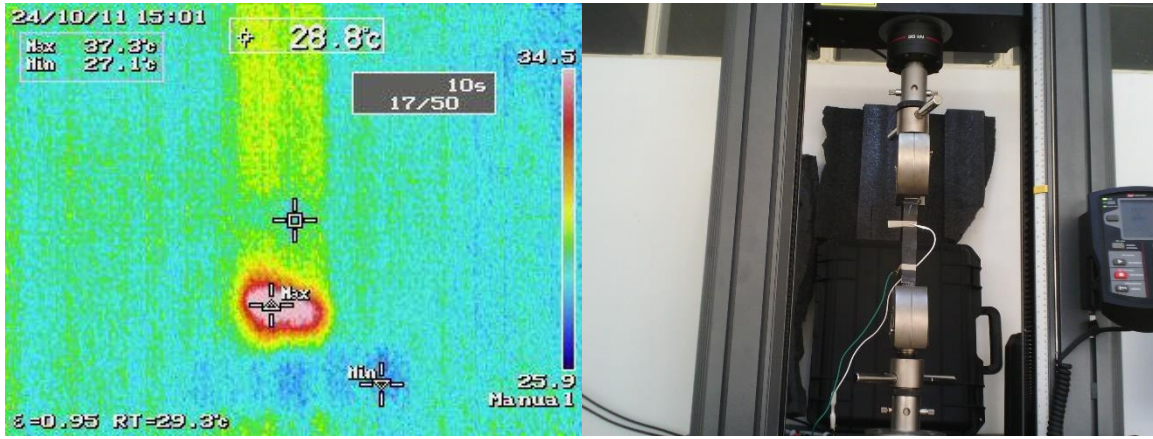
Şekil 5.84. 60° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



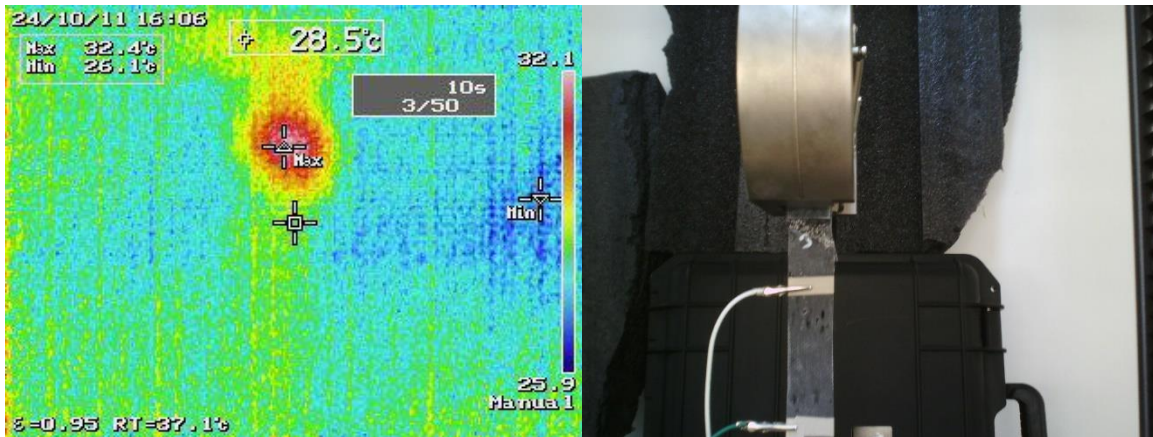
Şekil 5.85. 75° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



Şekil 5.86. 90° yönelimli GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



Şekil 5.87. 200gr/m² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü



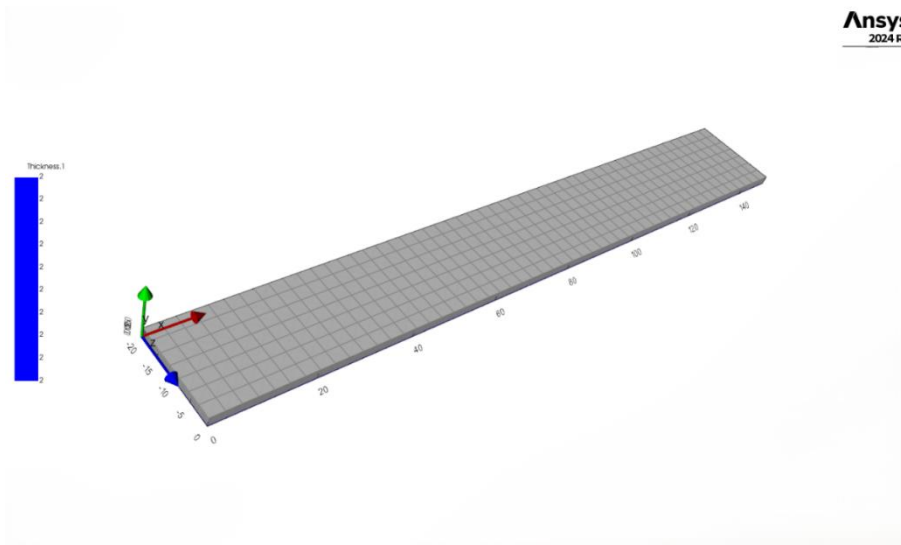
Şekil 5.88. 300gr/m² alansal yoğunluklu dokuma GFRPC numunenin çekme deneyinde kopma anındaki termal kamera görüntüsü

Şekil 5.80'den Şekil 5.88'e kadar olan şekiller numunelerin kopma anındaki termal kamerada oluşan görüntülerini ve çekme kuvveti sonucu kopmuş numunelerin hasar görselleridir. Bu görsellerden de görülebildiği gibi lif yönlenmesi ve yoğunluğunun numunenin hasar mekanizmasını etkilemektedir. Yani numunelerdeki kırılmalar eş yönlü cam fiberler için genelde lif yönlenmesine paralel olarak gerçekleşmiştir. 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° açılı üretimlerde numuneler lif yönünde kırılma göstermiştir. 0° açılı eş yönlü cam fiberde ise kırılma lif yönünde gerçekleşmiyor olmasına rağmen açıdan kaynaklı diğer numunelere nispeten oldukça geniş bir yüzeyde hasar meydana gelmiştir. Bunun temel sebebi ise çekme kuvvetinin uygulandığı yönün lif yönlenmesine paralel olmasıdır. Dokuma tipi cam fiber malzemelerden üretilen numunelere bakacak olursak alansal yoğunluğu yüksek olan numunenin hasar bölgesi alansal yoğunluğu düşük olan numuneye göre daha geniş olduğu söylenebilir. Yani özetle çalışmamızda lif yönlenmesi ve yoğunluğunun hasar mekanizmasına etki ettiği görülmektedir. Ayrıca termal kamera ile çekme testi boyunca numunenin gerilme sebebiyle sıcaklık değişimleri izlenmiştir. Termal kamera ile elde edilen hasar anındaki kopma görüntüleri gösteriyor ki malzemede oluşan gerilme, numunenin kopma gösteren bölgedeki sıcaklığını önemli derecede attırmaktadır. Çünkü bu bölgede en yüksek gerilimler oluşmakta ve bu gerilim numunenin sıcaklık değerini yükseltmektedir. Termal kamera sonuçlarına göre koparken gerilimi yüksek olan numunelerde sıcaklık artışının daha yüksek olduğu görülmüştür. Yani lif yöneliminin malzemedeki sıcaklık artışını da etkilediği sonucu çıkartılabilir. Sonuç olarak termal kamera vasıtası ile hasar tespit analizi yapılabileceği sonucu çıkartılmıştır.

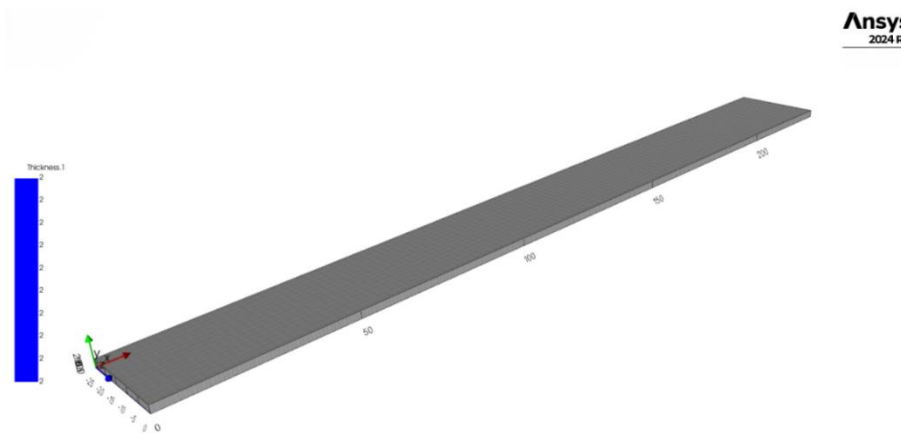
5.5. Eğme ve Çekme Test Simülasyonlarının ANSYS ile Modellenmesi

Bir önceki bölümde üretilen numunelere üç nokta eğme ve çekme testleri yapılmıştı. Amaç numunelerin eğme ve çekme yükleri altında elektriksel direnç değişim davranışlarını incelemektir. Bu bölümde eğme ve çekme numuneleri ANSYS ortamında deneysel boyutlarda, aynı lif yönlenmelerinde ve malzemeleri genel olarak değiştirilmeden oluşturulmuştur. Normal şartlar altında elektriksel iletkenliği sağlamak amacıyla deneysel numunelerde karbon nanotüp malzemesi epoksiye dağıtılıp kullanılmıştı. Ancak bu bölümde üretilen numunelerin eğme ve çekme yükleri altında lif yönlenmesinin numunede oluşan stres dağılımını incelemek ve kıyaslamak için yapılmıştır. Yani nümerik çalışmanın sonucu sayısal olarak bizim için bir anlam ifade etmemektedir. Ancak lif yönlenmesine göre oluşan gerilim kıyaslaması bize deneysel ve nümerik trendin karşılaştırmasına olanak sağlamıştır.

Bu amacı gerçekleştirmek için numuneler ANSYS yazılımının ANSYS ACP-Pre modülünde hazırlanmıştır. Her bir numune için malzemeler ANSYS kütüphanesinde bulunan epoksi reçine ve eş yönlü mukavemet cam fiberleri kullanılmıştır. Üretim için beş kat cam fiber ve her katın üzerine bir kat olacak şekilde epoksi reçine serilmiştir. Her bir numuneye bilgisayar ortamında lif yönlenmesi verilmiştir. Numuneler eğme testi için 20x150mm, çekme testi için 25x230mm boyutlarında ve ilk kata cam fiber gelecek şekilde 0.35mm kalınlığında cam fiber ve sonrasında 0.05mm kalınlığında epoksi olacak şekilde toplamda 2mm kalınlığında beş katlı lamine eğme ve çekme numuneleri oluşturulmuştur.



Şekil 5.89. ANSYS-Pre simülasyon programında oluşturulan eğme test numunesi.

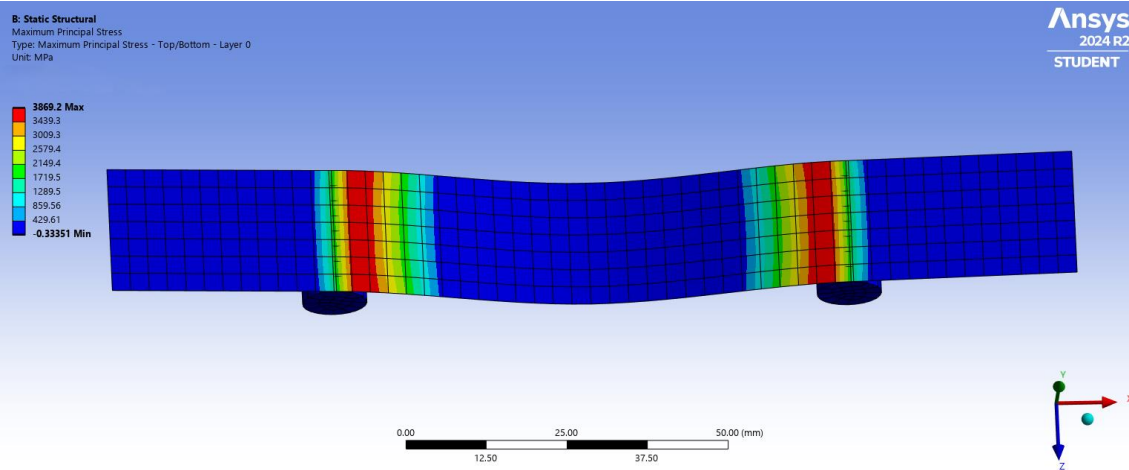
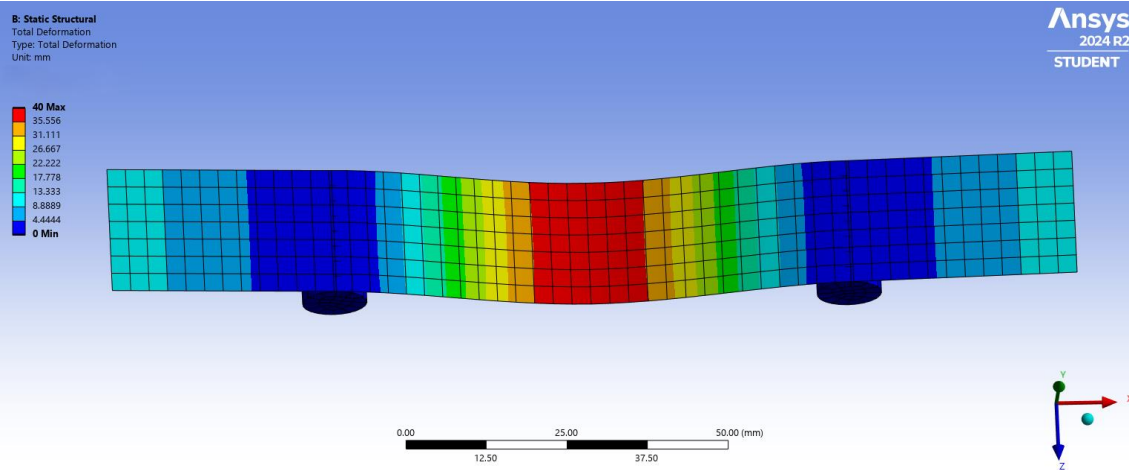
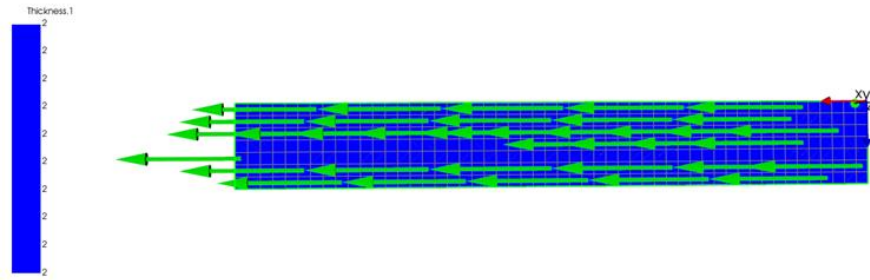


Şekil 5.90. ANSYS-Pre simülasyon programında oluşturulan çekme test numunesi.

5.5.1 Eğme test simülasyonlarının ansys ile modellenmesi

Thickness
Element-Wise
Unit: mm
Selection:
MP - ModelingHy5

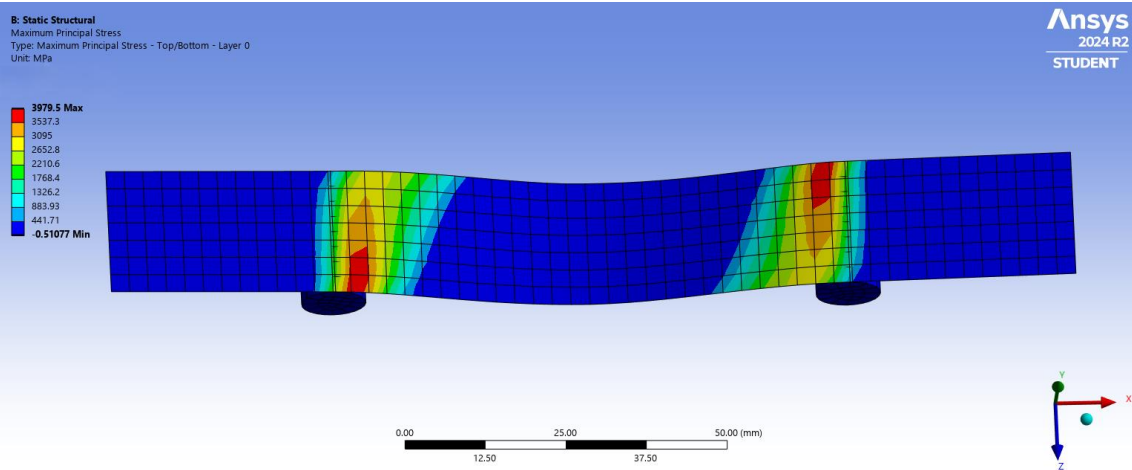
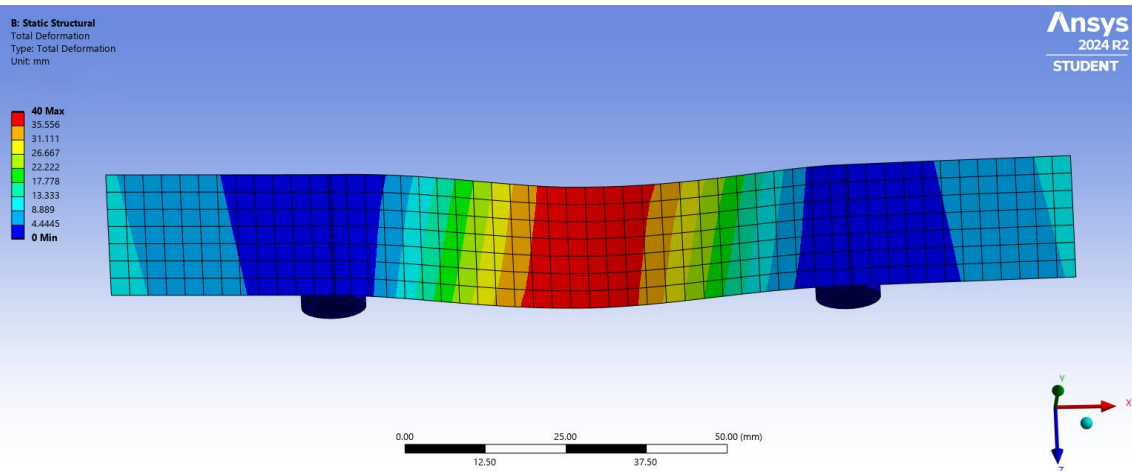
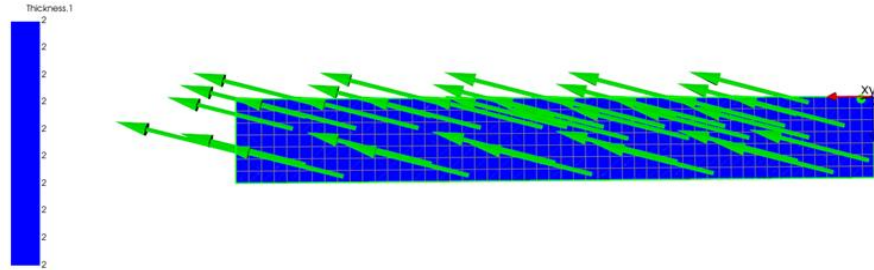
Ansys
2024 R2
TEACHING



Şekil 5.91. ANSYS Static Structural eğme test 0° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri

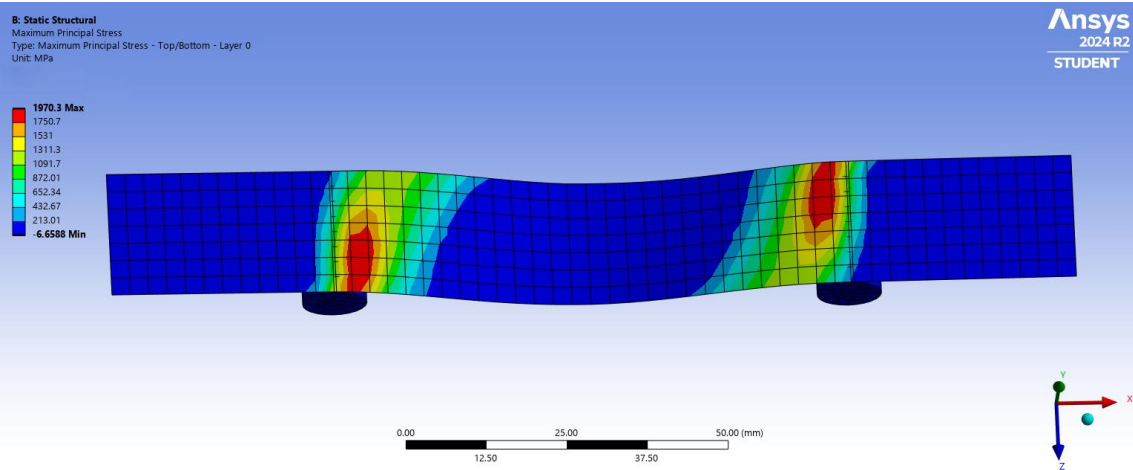
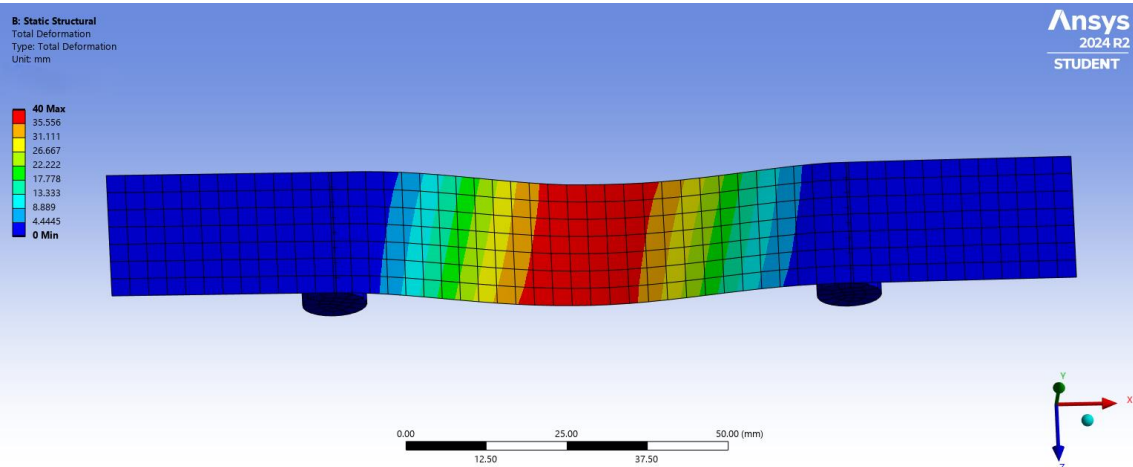
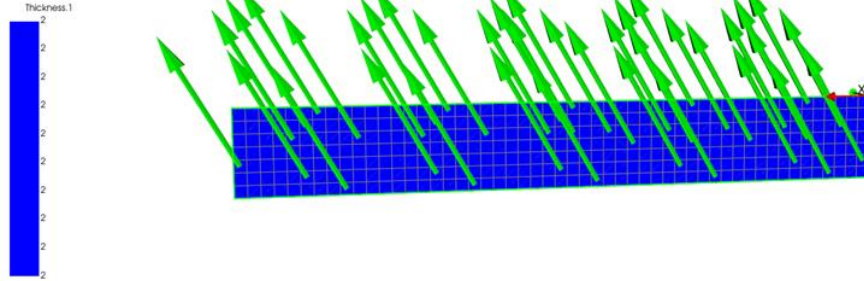
Thickness
Element-Wise
Unit: mm
Selection:
MP - ModelingHy5

Ansys
2024 R2
TEACHING

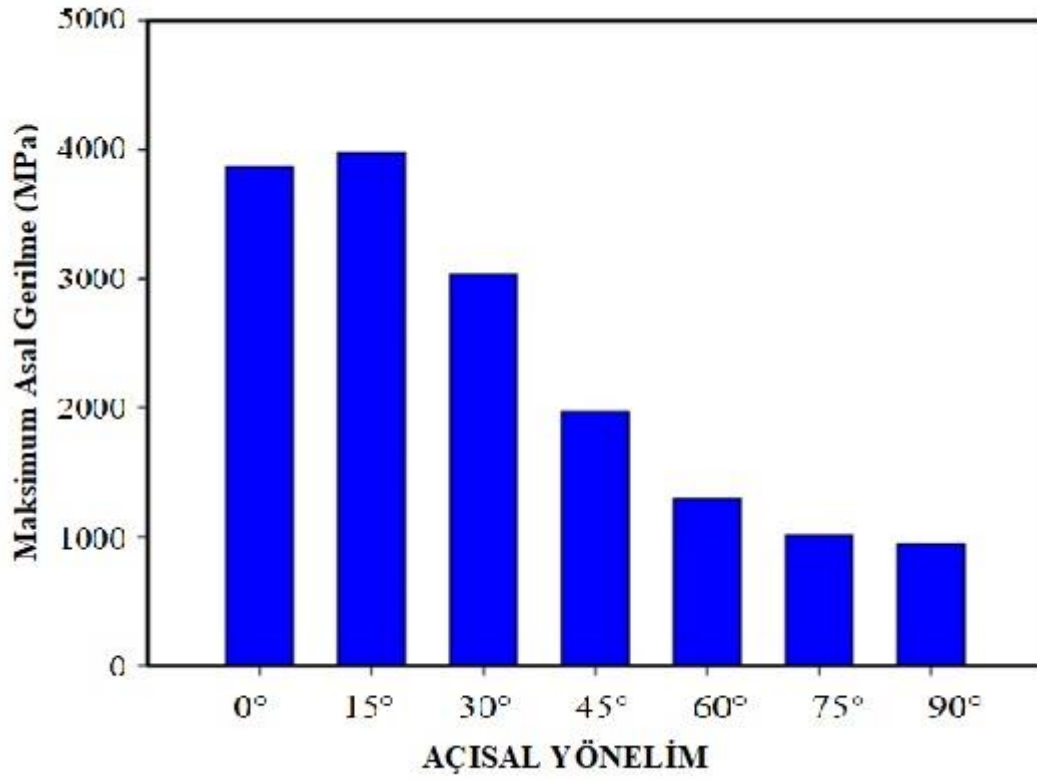


Şekil 5.92. ANSYS Static Structural eğme test 15° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri

Thickness
 Element-Wise
 Unit: mm
 Max: 2
 Min: 2
 Selection:
 MP - ModelingRy5



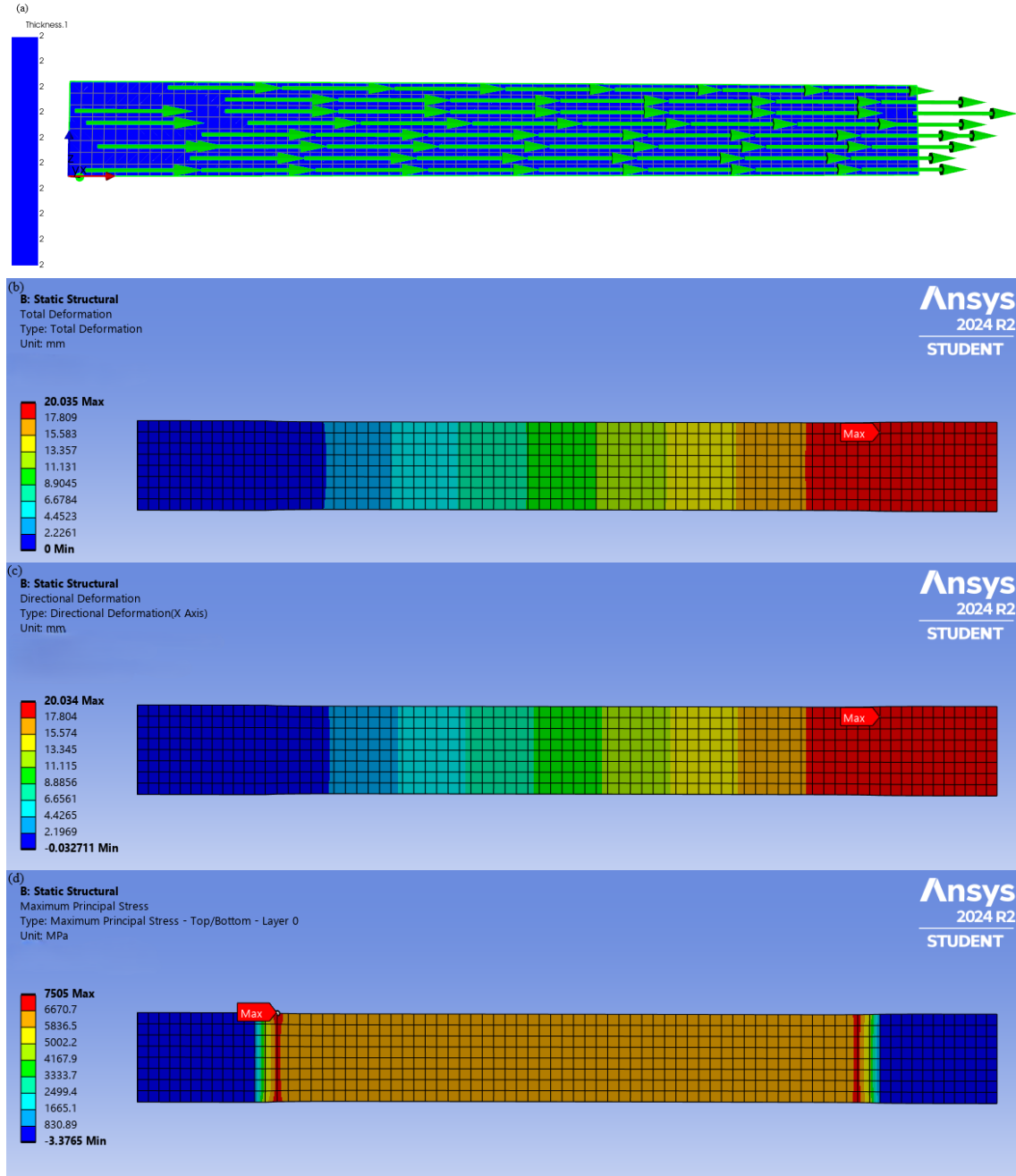
Şekil 5.94. ANSYS Static Structural eğme test 45° açısall yönelimli numunenin deformasyon ve maksimum asal gerilme verileri



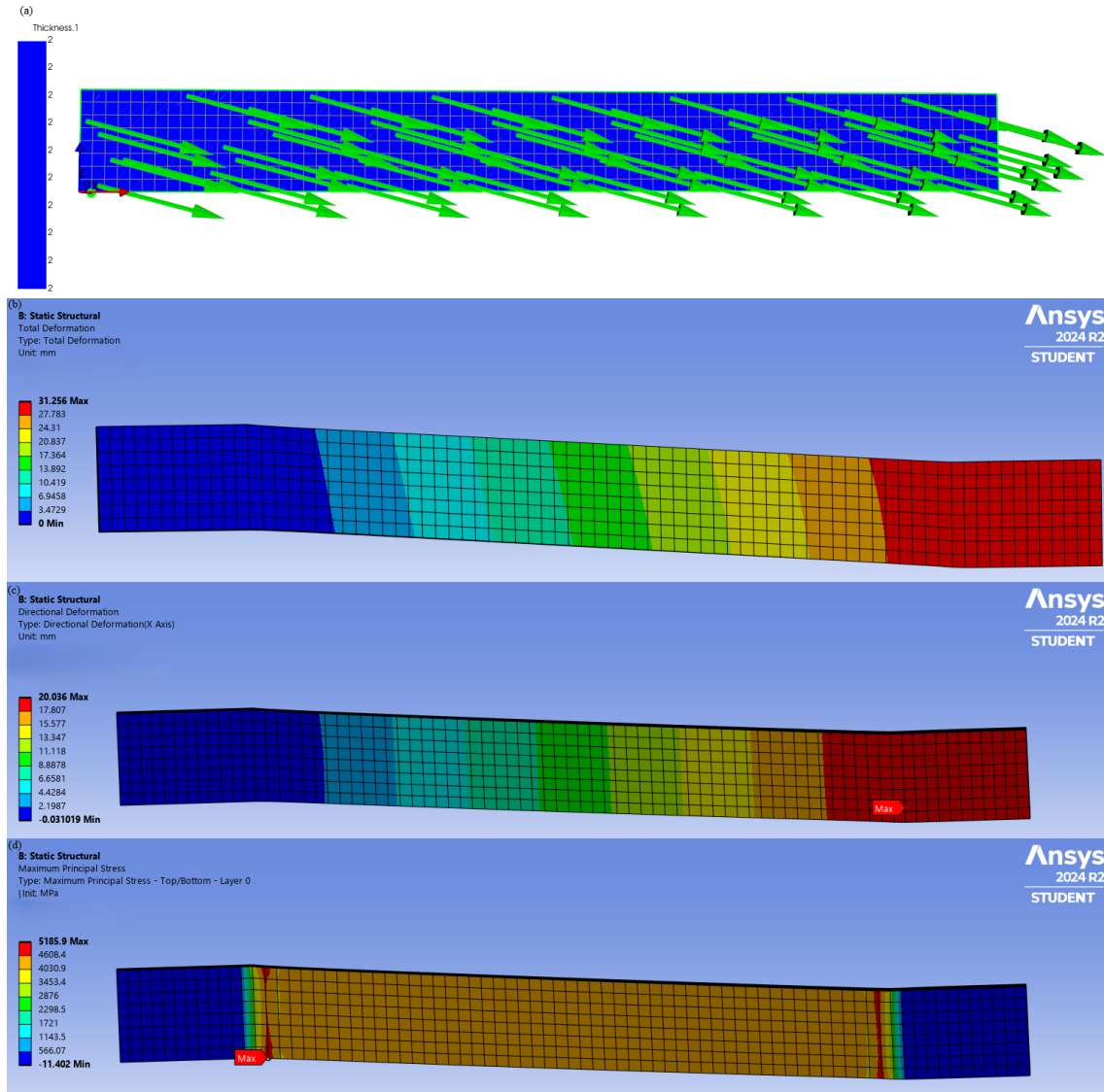
Şekil 5.98. ANSYS Static Structural eğme testi lif yönlenmesi maksimum asal gerilme grafiği

ANSYS eğme testi analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla kıyaslandığında numunelerde oluşan gerilme değerleri lif açısına bağlı olarak büyük ölçüde birbiriyle uyumlu ve paralel bir trend göstermektedir.

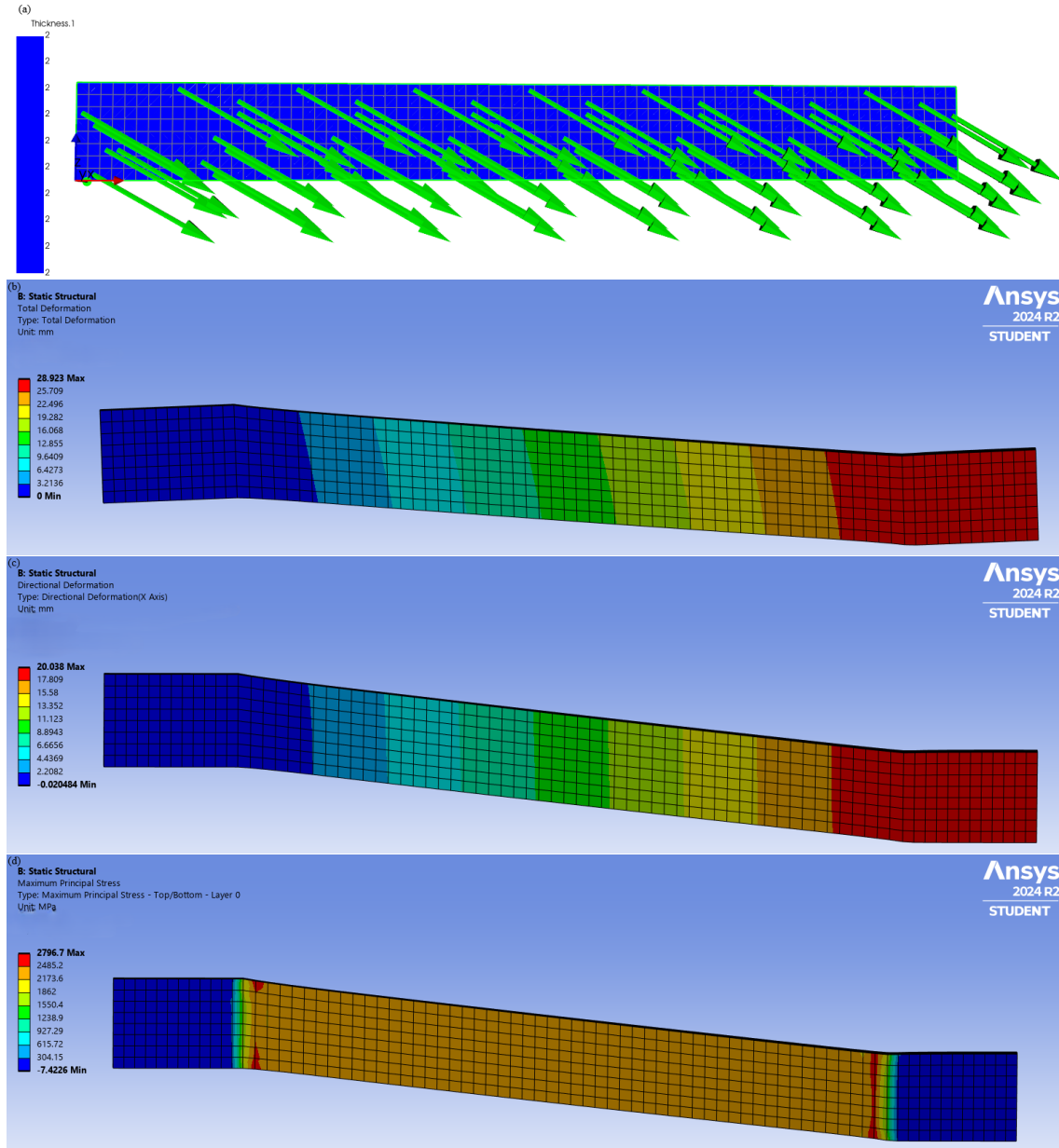
5.5.2 Çekme test simülasyonlarının ansys ile modellenmesi



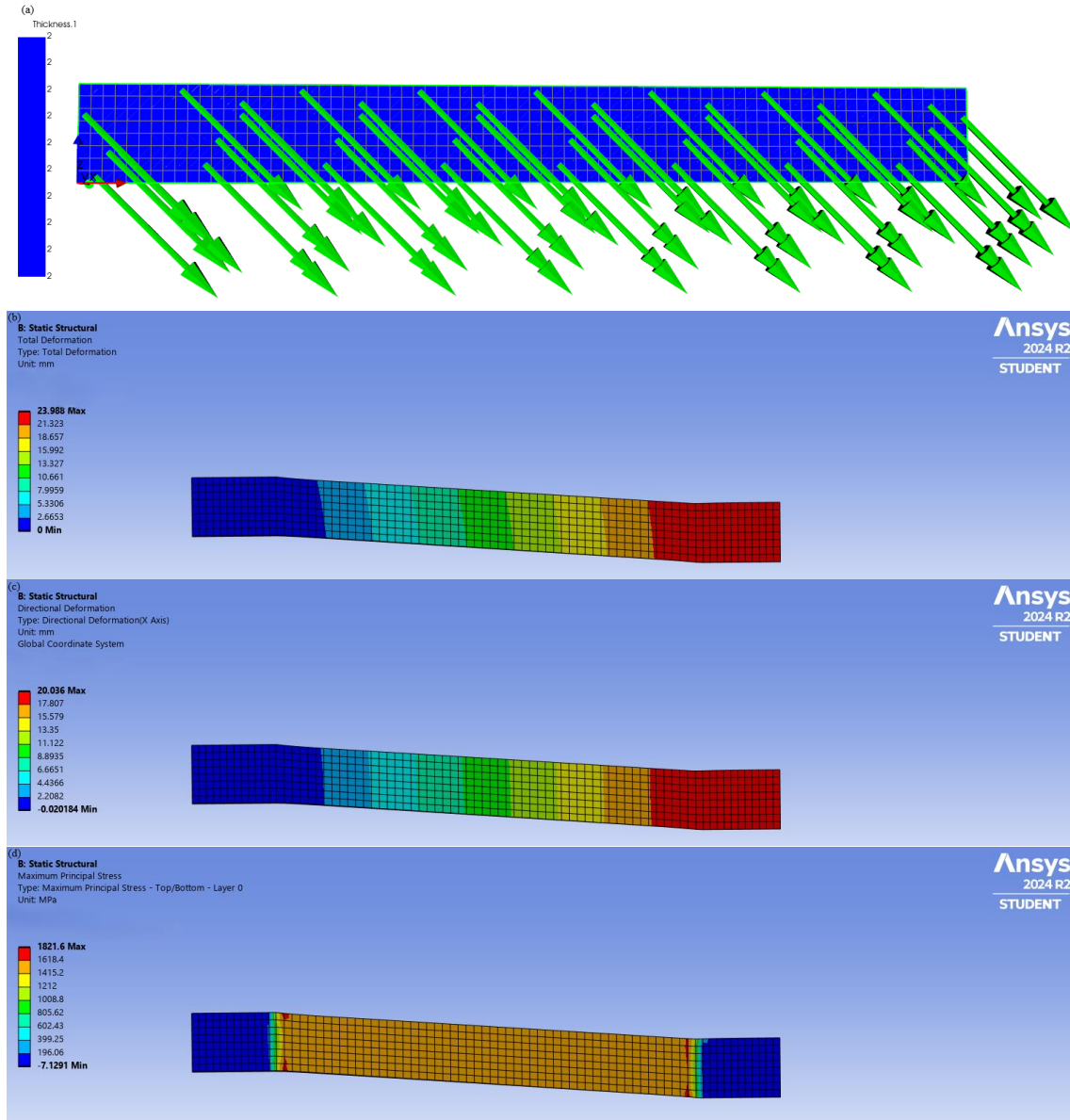
Şekil 5.99. ANSYS Static Structural çekme testi 0° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönlenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenini yönündeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri



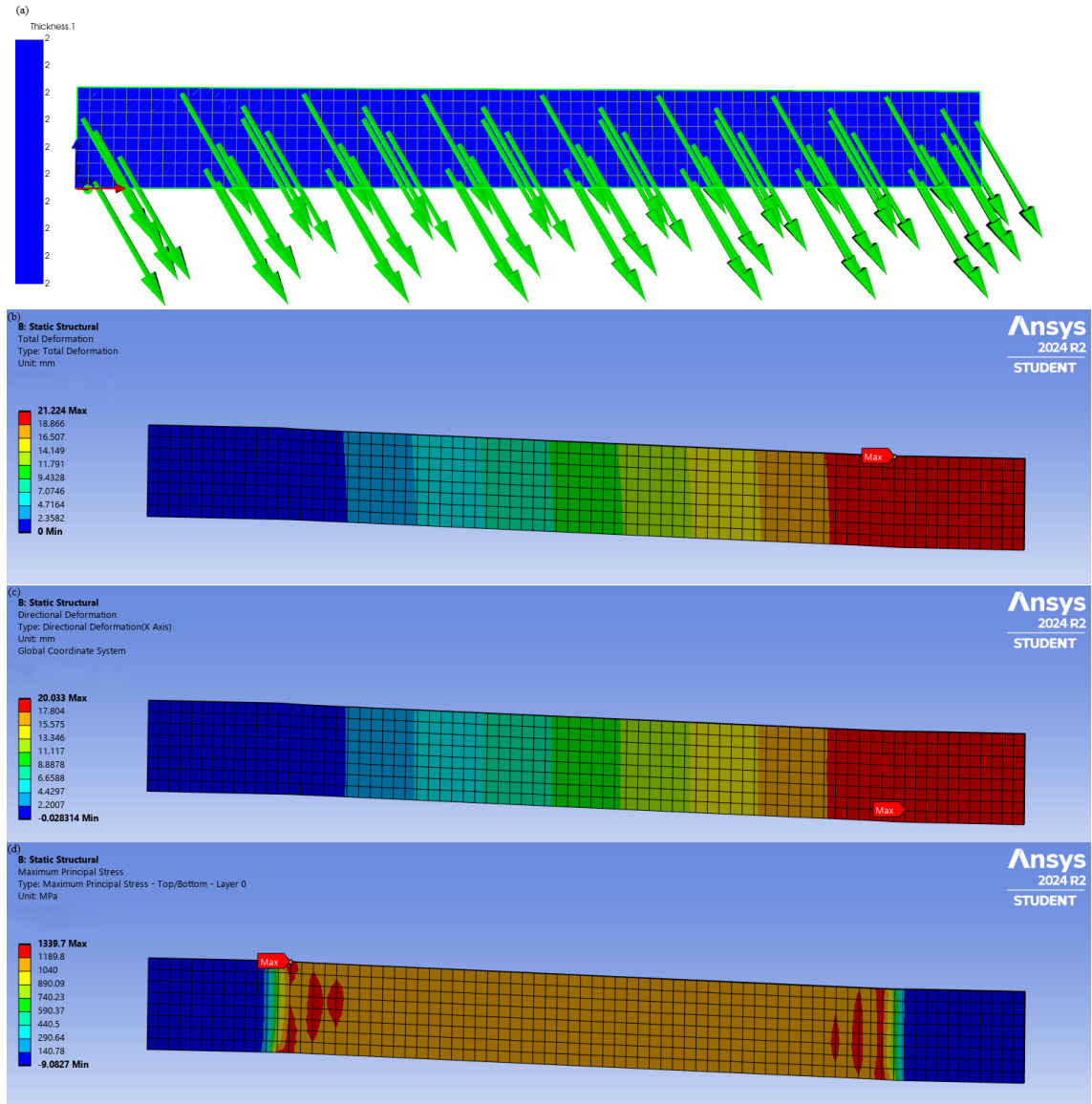
Şekil 5.100. ANSYS Static Structural çekme testi 15° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönlenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönündeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri



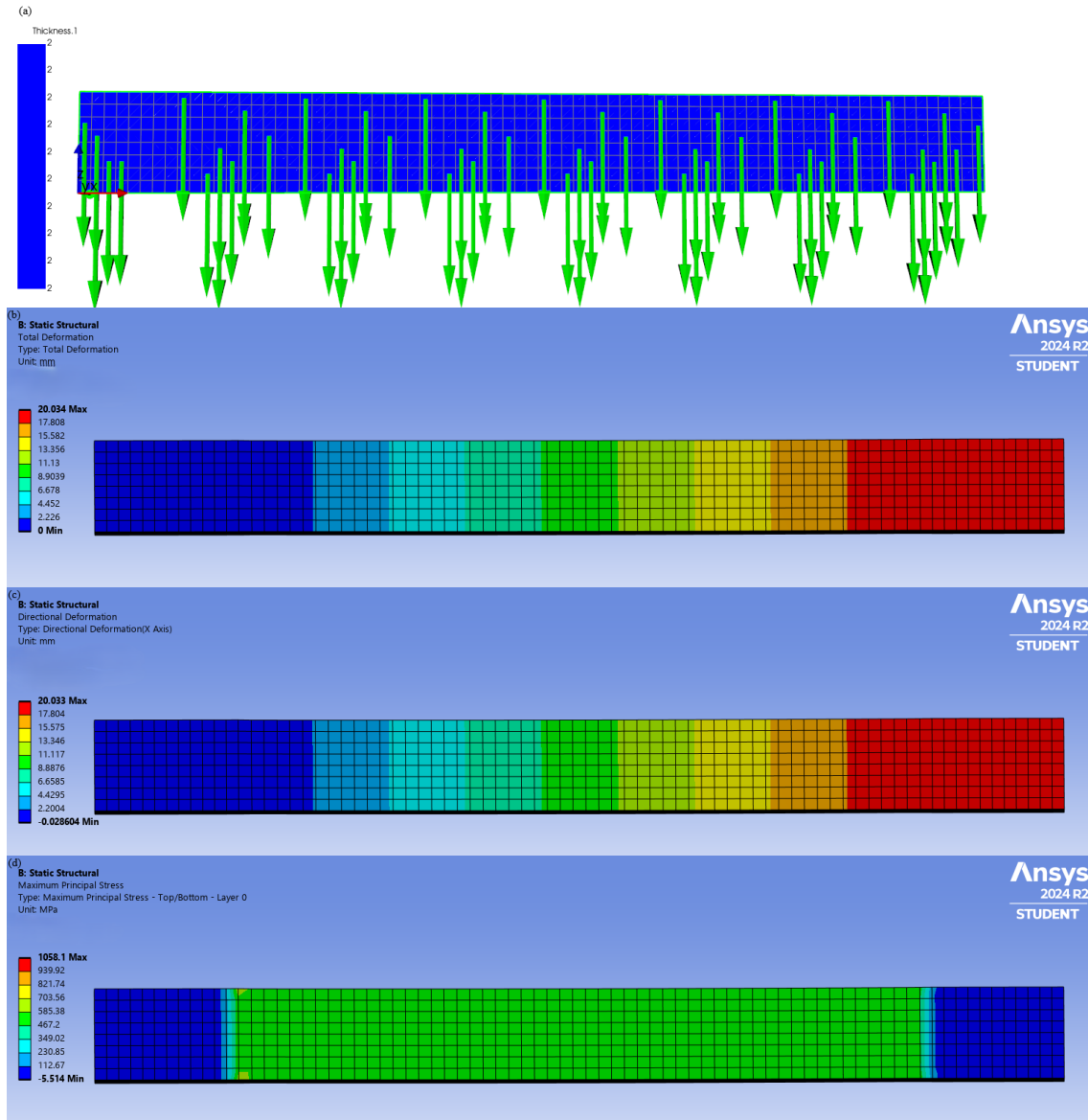
Şekil 5.101. ANSYS Static Structural çekme testi 30° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönlenmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönündeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri



Şekil 5.102. ANSYS Static Structural çekme testi 45° açısallı yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenı yönündeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri

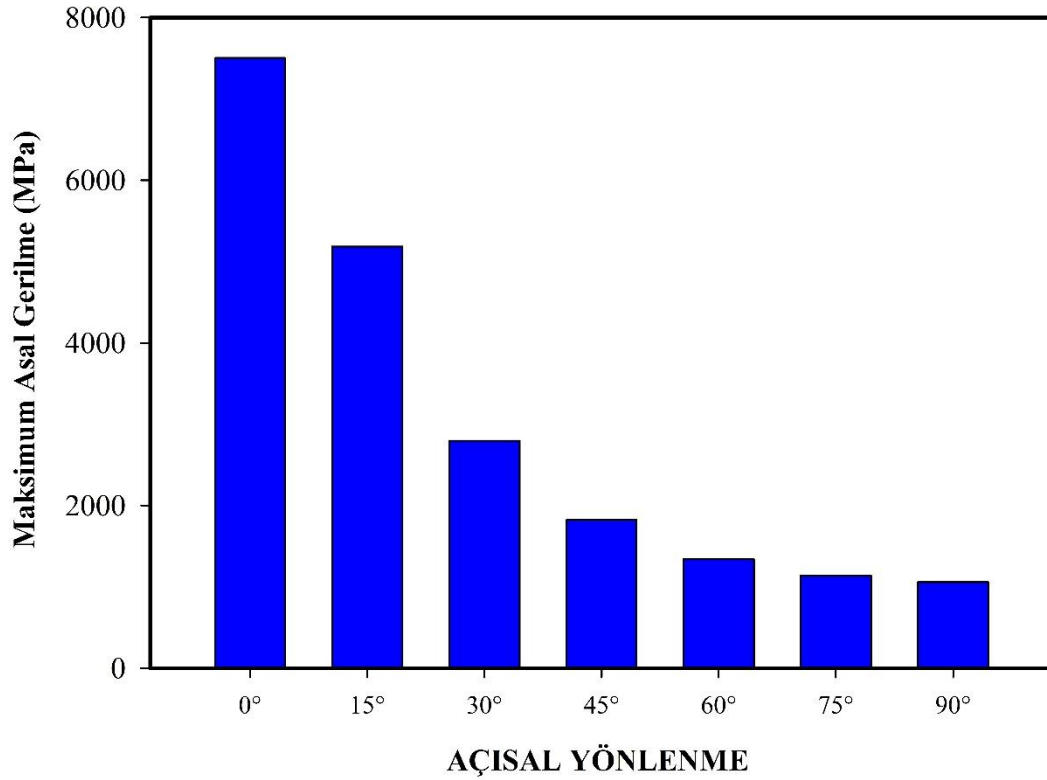


Şekil 5.103. ANSYS Static Structural çekme testi 60° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenii yönündeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme verileri



Şekil 5.105. ANSYS Static Structural çekme testi 90° açısall yönelimli numunenin simülasyon sonuçları. a) Numunenin lif yönelmesi, b) Numunenin total deformasyonu, c) Numunenin x eksenı yönündeki deformasyonu, d) Numunenin maksimum asal gerilme analizi

Ansyes çekme testlerinin sonuçlarını deneysel sonuçlarla kıyaslırsak lif yönelmesinin malzemenin mukavemet değęlerini etkilediğini ve toplam deformasyonun etkilendiğini görebiliriz. Lif yönelmesinin çekme eksenı yönünde olan numunelerin gerilme değęlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır. İlgili lif yönelmesi arttıkça bu gerilmenin azaldığı açıktır. Ayrıca lif yönelmesi aksenal açıların dışında olduğu numunelerde toplam deformasyonun farklılaştığı ve numunenin çekme eksenin dışında şekil değıştirme isteğinin olduğu görölmektedir.



Şekil 5.106. ANSYS Static Structural çekme testi lif yönlenmesi maksimum asal gerilme grafiği

ANSYS çekme testi sonuçları trend olarak deneysel sonuçlarla paralellik göstermektedir.

5.6. Eğme ve Çekme Numunelerinin Weibull Analizi

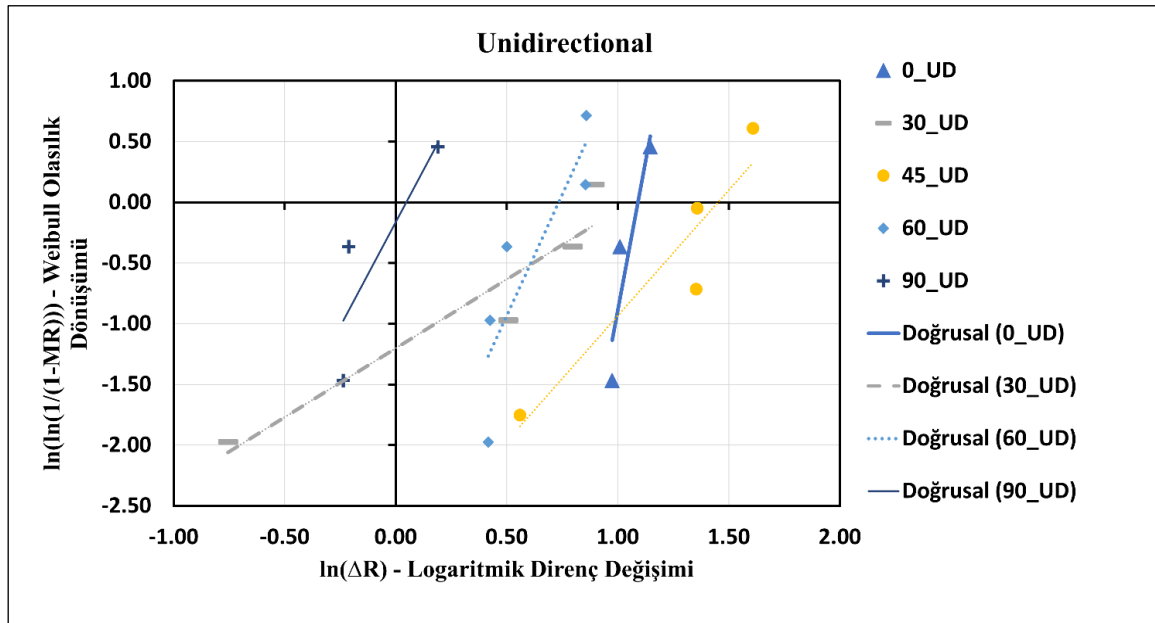
Üretilen kompozit malzemelerin elektriksel iletkenlik özelliği hasar tespiti ve güvenilirlik analizi gibi uygulamalarda kullanılmıştır. Elektriksel dirençteki değişiklikler, malzemenin mikro yapısındaki ve hasarlarında meydana gelen değişiklikleri takip etmeye yardımcı olur. Weibull analizi malzemenin güvenilirliğini tahmin etmek için oldukça önemlidir.

Çalışmamızda eş yönlü cam elyaf kompozitlerinin ve dokuma tipi cam elyaf kompozitlerinin elektriksel direnç değişimleri incelenmiş ve weibull dağılımı kullanılarak güvenilirlik analizi yapılmıştır. Çalışmamızda yük etkisiyle hasara bağlı elektriksel direnç değişimi yapısal hasar durumunu incelemek için parametre olarak kullanılmıştır. Bu parametre malzemedeki yapısal hasar durumu, lif yöneliminin ve lif yoğunluğunun etkilerini yansıtmaktadır.

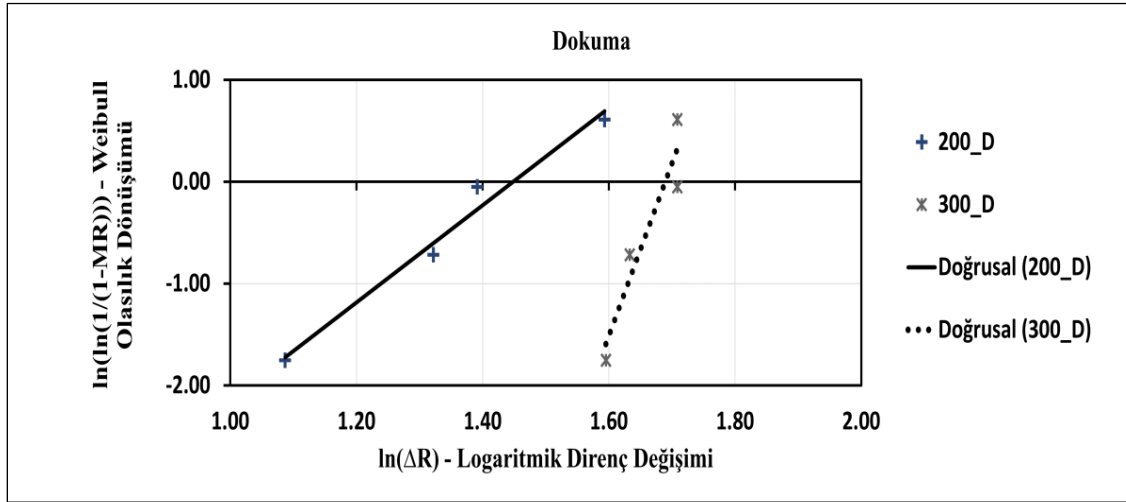
Aşağıda verilerin grafiklerde farklı fiber yönelimleri (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) için logaritmik elektriksel direnç değişiminin Weibull olasılık dönüşümü ile nasıl ilişkili olduğu gösterilmektedir. Bu ilişki, elektriksel dirençteki değişimlerin malzemenin güvenilirliğini nasıl etkilediğini anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Weibull analizini kullanarak bir malzemenin belirli bir hasar seviyesine ulaştığında güvenilirliğinin nasıl değişeceğini belirlerler. X ekseninde logaritmik direnç değişimi, Y ekseninde ise Weibull olasılık dönüşümü yer almaktadır. Bu yöntem, kompozit malzemelerin dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü tahmin etmek için etkin kullanılan bir yöntemdir.

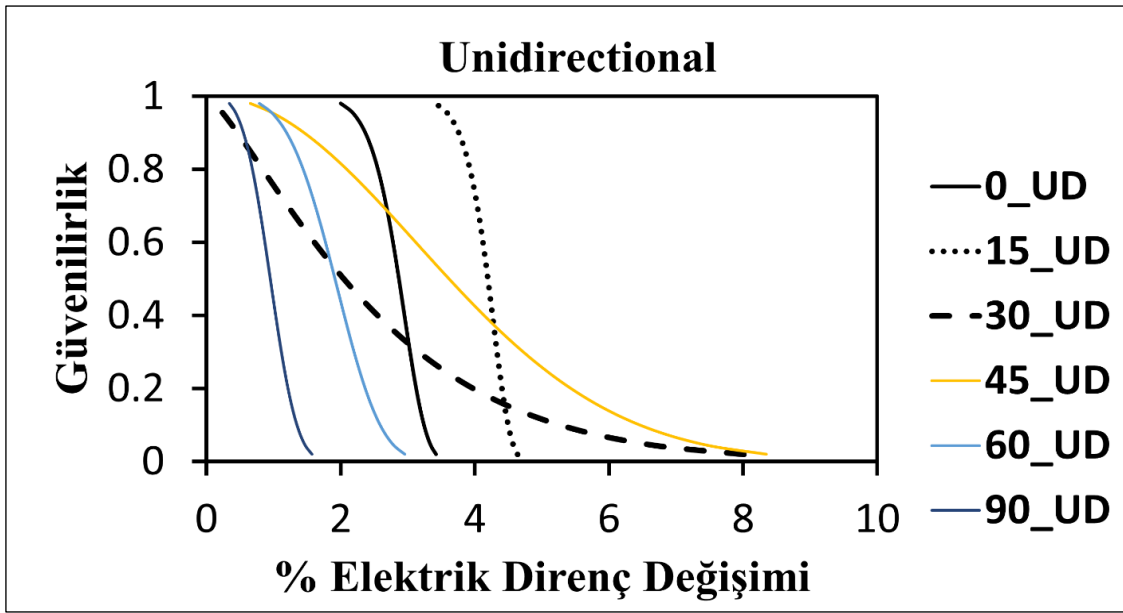
5.6.1. Eğme numunelerinin weibull analizi



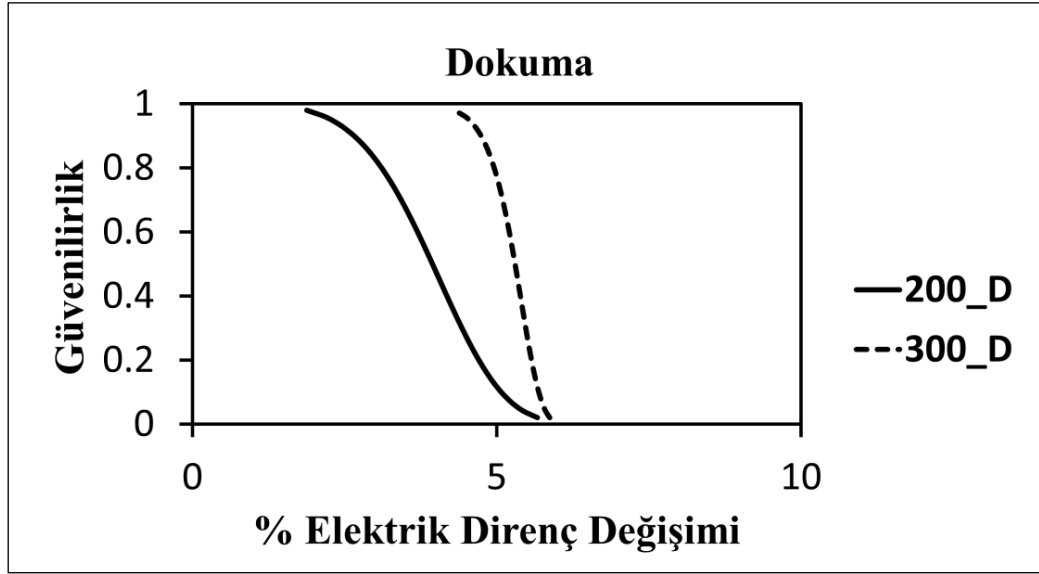
Şekil 5.107. Eğme numunesinin farklı lif yönelimlerinde logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı



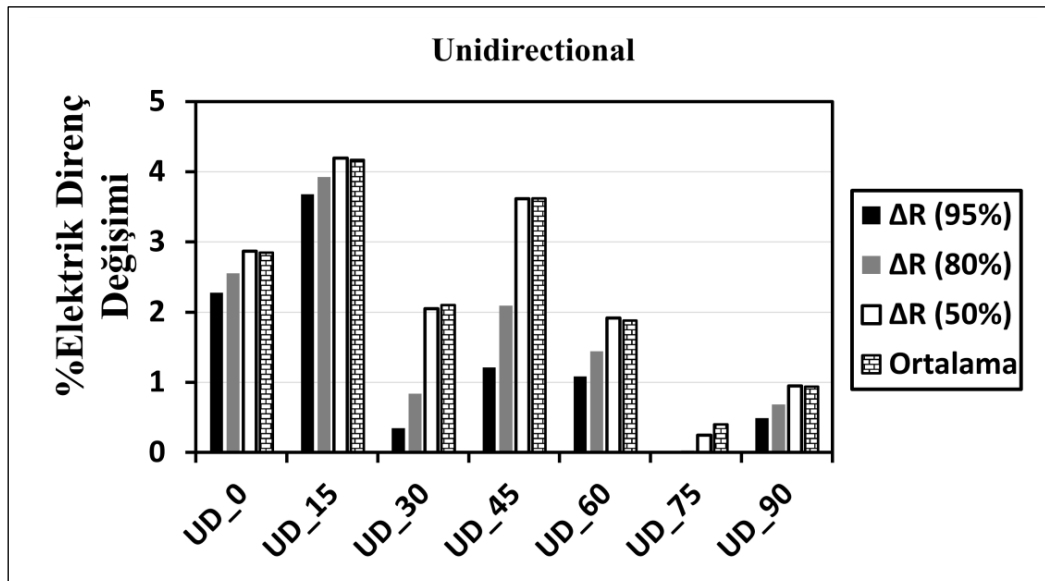
Şekil 5.108. Eğme numunesinin farklı alansal yoğunluklarının logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı



Şekil 5.109. Lif yönelimlerine bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi



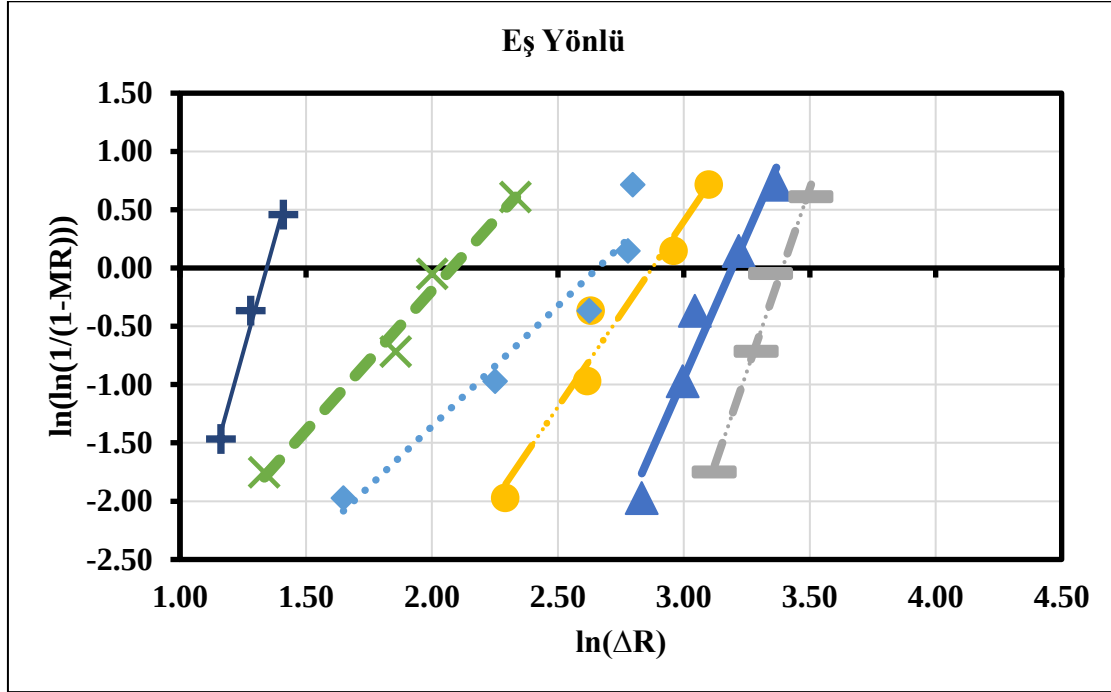
Şekil 5.110. Lif alansal yoğunluklarına bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi



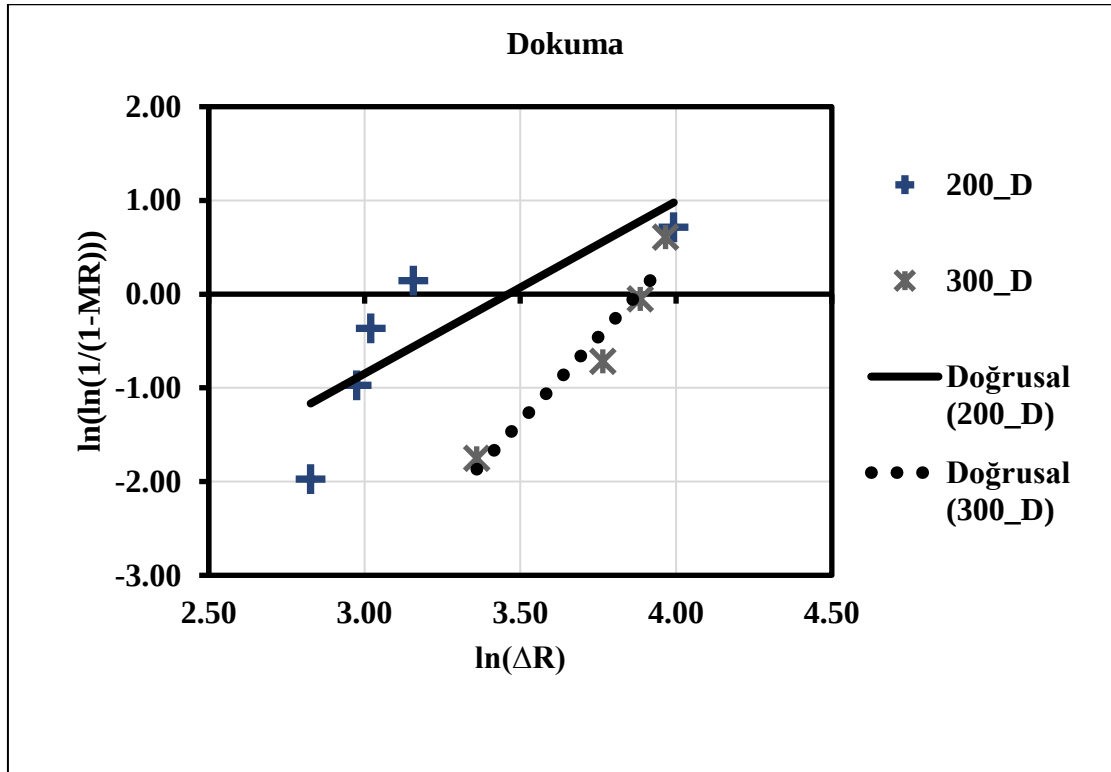
Şekil 5.111. Eğme numunelerinin farklı lif yönelimlerinde elektriksel direnç değişimi ve güven aralıkları

Eğme numunelerinin direnç değişimlerini incelediğimizde hasar anında direnç değişimi oranı daha az olan lif yönelimli numunenin darbe sonrası az direnç değişimi ölçüldüğünde güvenilirliğinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Hasar anında direnç değişim oranı yüksek olan numunenin ise güvenilirliğinin değişmesi için oransal anlamda daha büyük elektriksel direnç değişiminin olması gereklidir.

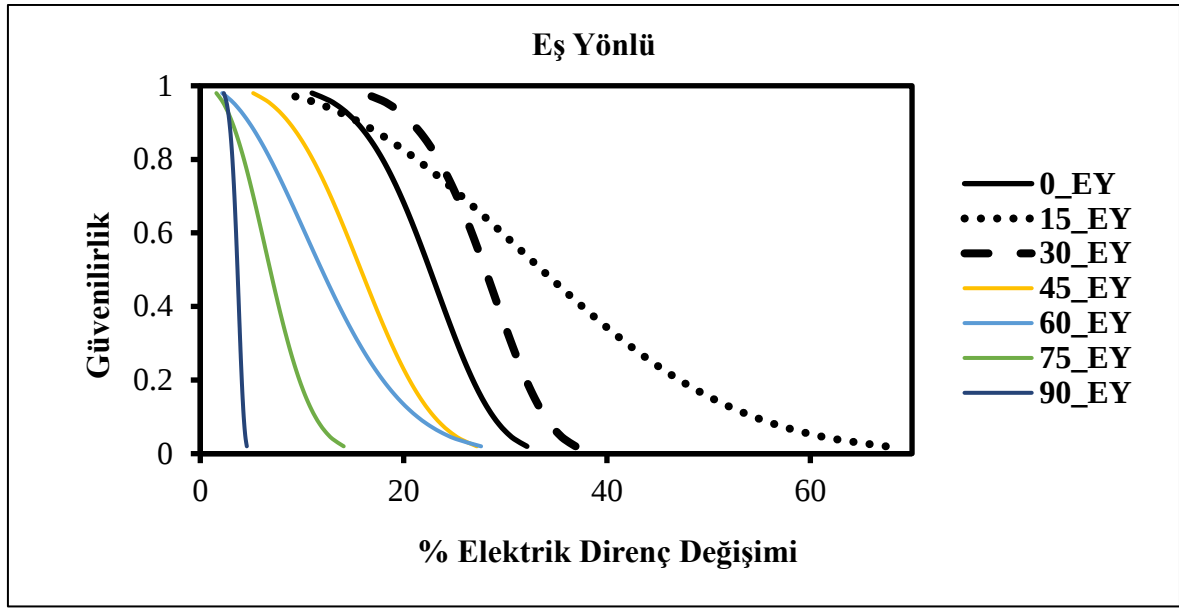
5.6.2. Çekme numunelerinin weibull analizi



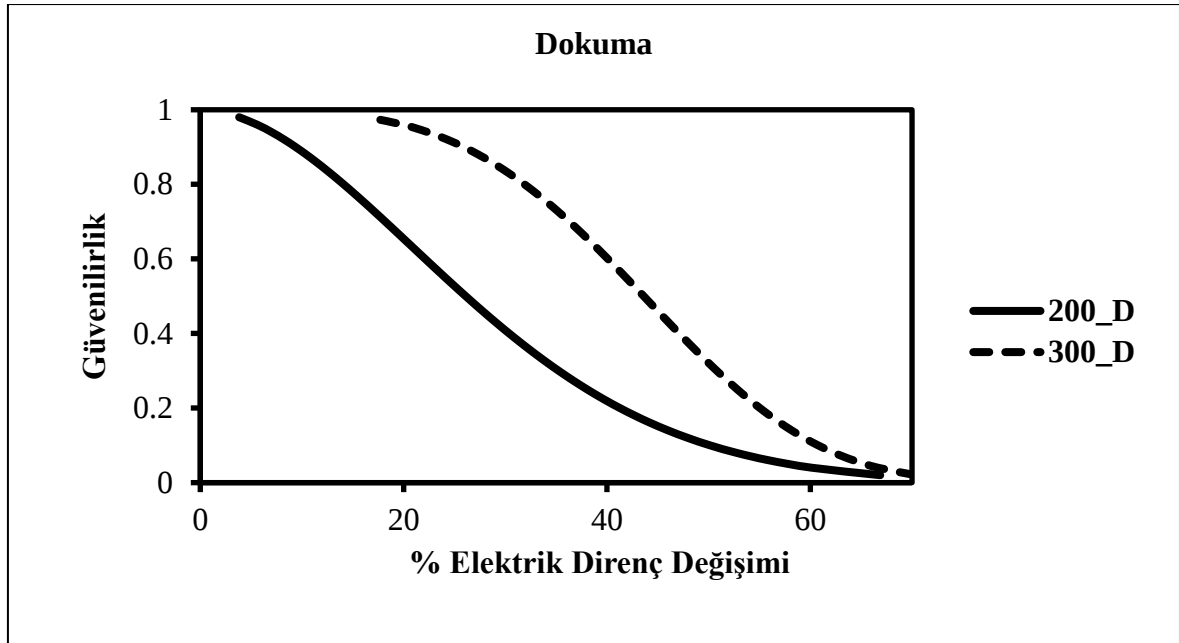
Şekil 5.112. Çekme numunesinin farklı lif yönlenmelerinin logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı



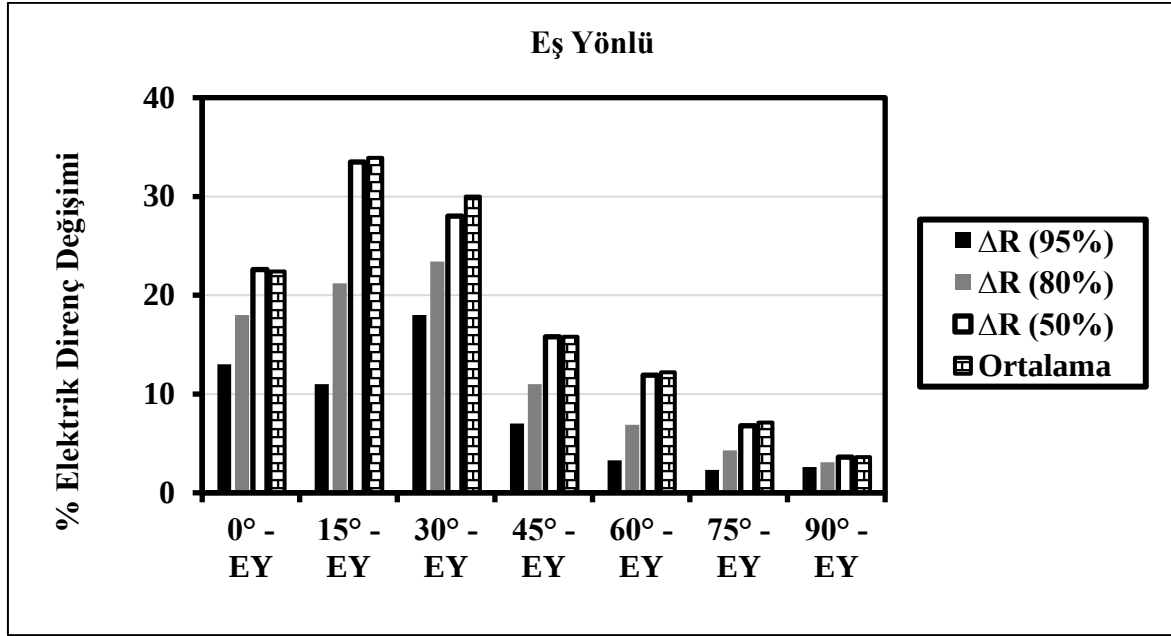
Şekil 5.113. Çekme numunesinin farklı alansal yoğunluklarının logaritmik elektrik direnç değişimi ve weibull dağılımı



Şekil 5.114. Lif yönelimine bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi



Şekil 5.115. Dokuma tipi lifin alansal yoğunluklarına bağlı elektriksel direnç değişim ve weibull güvenilirlik eğrisi



Şekil 5.116. Farklı lif yönelimlerinde elektriksel direnç değişimi ve güven aralıkları

Çekme numunelerinin direnç değişimlerini incelediğimizde hasar anında direnç değişimi oranı daha az olan lif yönelimli numunenin darbe sonrası az direnç değişimi ölçüldüğünde güvenilirliğinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür. Hasar anında direnç değişim oranı yüksek olan numunenin ise güvenilirliğinin değişmesi için oransal anlamda daha büyük elektriksel direnç değişiminin olması gereklidir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada cam fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerde üretim esnasında oluşturulan lif yöneliminin ve alansal yoğunluğun elektrik direnç değişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla eş yönlü cam fiber ve dokuma tipi cam fiber kumaş kullanılmıştır. Her bir lif yönelimi ve alansal yoğunluk için beşer adet numune üretilmiştir. Her bir numunenin hasar anında elektriksel direnç değişimlerinin gözlemlenebilmesi için matris malzemesi elektrik iletken olmalıdır. Bu sebeple matris malzemesine elektrik iletken olan ve eklendiği yapıya yüksek mukavemet özelliği kazandırmak amacı ile karbon nanotüp ilave edilmiştir. Numunelere üç nokta eğme testi ve çekme testleri ile hasarlar verilmiştir ve hasar anında elektriksel direnç değişimleri multimetre vasıtası ile canlı olarak kaydedilip numunelerin hasar anında direnç değişim oranlarının ve karakteristiklerinin analizleri yapılmıştır.

Yapılan analizler ve çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir:

- Eğme testinde yapılan incelemeler neticesinde lif yöneliminin ve lif alansal yoğunluğunun elektrik direnç değişimi üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Eğme testindeki numunelerin elektrik direnç değişimleri lif yönelimi arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca direnç değişim karakteristiğinin de önemli derecede değiştiği söylenebilir. Lif yönelimi arttıkça malzemede ani direnç değişimleri olduğu gözlemlenmiştir. Yani lif yönelmesi 90°'ye doğru arttıkça oluşan direnç değişimleri özellikle malzemenin kırılmasına yakın oluşmaktadır. Ayrıca lif alansal yoğunluğu da elektrik direnç değişimlerini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Yüksek alansal yoğunluklu cam fiber kompozit malzemenin direnç değişiminin daha yüksek olduğu söylenebilir. Bunun sebebi olarak malzemenin daha fazla matris malzemesi emmesi olarak belirtilebilir.
- Eğme testinde numunelerin elektrik direnç değişimleri alt ve üst yüzeyden ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu çalışmaya göre üst yüzeyden elde edilen direnç değişiminin alt yüzeyden elde edilen direnç değişiminden farklılaştığı söylenebilir. Numunenin üst yüzeyindeki iletken parçacıklar oluşan basma kuvvetinin etkisiyle birbirine yaklaşacağı için malzeme hasar alana kadar direnç değerinde azalma ve hasar sonrası artma gözlemlenmiştir. Alt yüzeyde ise malzemede çekme kuvveti etkin olduğundan direnç

değerinde azalma olmadan arttığı gözlemlenmiştir. Bu direnç değişimi lif yönelimi arttıkça da azalma göstermiştir.

- Çekme testinden elde edilen sonuçlara göre lif yönelmesinin ve alansal yoğunluğunun direnç değişimini etkilediği gözlemlenmiştir. Yüksek alansal yoğunlukta üretilen numunelerde daha büyük direnç değişimleri ve lif yönelmesi arttıkça da daha küçük direnç değişimleri gözlemlenmiştir. Özellikle 15° ve 30° 'de en yüksek direnç değişim değerleri ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak malzemenin yük altında daha geniş bölgeden hasar alması söylenebilir. Bu durum daha fazla iletken ağın yıkılmasına ve direnç değişiminin artmasına neden olur.
- Çekme testinden ve eğme testinden elde edilen direnç değişim oranları ise hasar mekanizmasından kaynaklı oldukça farklıdır. Trend olarak her ne kadar açı büyüdükçe benzer bir şekilde genel bir azalma gösterebilirler de oransal anlamda ciddi farklar mevcuttur. Eğme testinde malzeme hasar alsa da tam bir kopma işlemi olmadığı için en fazla yüzde beşe yaklaşan direnç değişimi gözlemlenmişken, çekme testinde ilgili değerler yüzde kırkları aşmaktadır.
- Eğme ve çekme numunelerinin hasar mekanizmalarının lif yönlenmesinden ve alansal yoğunluğundan etkilenmiştir. 0° ve 15° 'li açılarla üretilen eğme numunelerinde delaminasyonların daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu açı arttıkça delaminasyonların azaldığı söylenebilir. Eğme testinde delaminasyon tipi yoğunken çekme testinde ise lif kırılması, debonding ve lif çıkması yoğun olarak görülmüştür.
- Çalışmamızın sonucuna göre numunelerin lif yönlenmelerinin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilediği saptanmıştır. Malzemeler 0° 'de daha yüksek yük taşıdıkları ve yüksek mukavemet özellikleri sergilediği söylenebilir. Ayrıca elastisite modülünün de nispeten daha yüksek olduğu söylenebilir. Aynı durum ansys çalışması verileri ile trend olarak doğrulanmıştır. Bu çalışmaya göre kompozit yapıdan yüksek mukavemet özellikleri bekleniyorsa 0° yönlenmeli eş yönlü cam fiberler tercih edilebilir.
- Yine çalışmadan elektrik direnç değişimlerinden elde edilen verilere göre weibull olasılık dağılımı ile güvenilirlik analizleri yapılmıştır. Bu analizin sonucuna göre kompozit malzeme yüksek mukavemet gösterdiği açısal yönlenmelerde daha yüksek direnç değişimleri gösterdikleri için malzemelerin lif yönelimleri arttıkça direnç değişimleri güvenilirlik oranlarını ciddi şekilde azaltmaktadır. Yani açı değerinin büyümesi ile elde edilen benzeri direnç değişimi malzemede daha fazla hasar aldığını ve kullanılamaz durumda olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Panda, P., Rout, L. N., Pradhan, S. (2023). Influence of single and multi-walled CNT on the mechanical performance of glass fiber hybrid polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1-9.
2. Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G., Kim, J. K. (2010). Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(10), 1345-1367.
3. Thostenson, E. T., Renb, Z., Choua, T. W. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61(13), 1899–1912.
4. Zhou, Y., Pervin, F., Lewis, L. and Jeelani, S. (2007). Experimental study on the thermal properties of multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy. *Materials Science and Engineering: A*, 452(5), 657-664.
5. West, D. O. S, Amafabia, D. M., Haritos, G. and Montalvão, D. (2017). A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures. *Structural Durability & Health Monitoring*, 11(2), 91-147.
6. Xie, X. L., Mai, Y. W., Zhou, X. P. (2005). Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review, *Materials Science and Engineering: Reports*, 49(4), 89-112.
7. Kumar, K. V., Shailesh, P., Babu, J. A. R. and Puli, R. K. (2017). Preparation and Characterization of GFRPC Material. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3053-3061.
8. Soni, S. K., Thomas, B., Thomas, S. B., Tile, P. S. and Sakharwade, S. G. (2023). Carbon nanotubes as exceptional nanofillers in polymer and polymer/fiber nanocomposites: An extensive review. *Materials Today Communications*, 37(1), 107358.
9. Ali, Z., Yaqoob, S., Yu, J. and D'Amore, A. (2024). Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications. *Composites Part C: Open Access*, 13(4), 100434.
10. Noman, A. A., Shohel, S. M., Riyad, S. H. and Gupta, S. S. (2023). Investigate the mechanical strength of laminated composite carbon fiber with different fiber orientations by numerically using finite element analysis. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1-9.
11. Han, C., Huang, S., Sun, B. and Gu, B. (2021). Electrical resistance changes of 3D carbon fiber/epoxy woven composites under short beam shear loading along different orientations. *Composite Structures*, 276(12), 114549.
12. Cordin, M., Bechtold, T., Pham, T. (2018). Effect of fibre orientation on the mechanical properties of polypropylene–lyocell composites. *Cellulose*, 25, 7197-7210.

13. Kwon, D. J., Wang, Z. J., Choi, J. Y., Shin, P. S., Devries, K. L. and Park, J. M. (2016). Detection of damage in cylindrical parts of carbon fiber/epoxy composites using electrical resistance (ER) measurements. *Composites Part B: Engineering*, 99, 528-532.
14. Thostenson, E. T., Chou, T. W. (2006). Carbon nanotube networks: Sensing of distributed strain and damage for life prediction and self healing. *Advanced Materials*, 18(21), 2837-2841.
15. Wen, J., Xia, Z., Choy, F. (2011). Damage Detection of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites via Electrical Resistance Measurement. *Composites Part B: Engineering*, 42, 77-86.
16. Şahin, Y. (2022). *Kompozit Malzemelere Giriş*. (4. Baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi, 1-131.
17. Peters, S. T. (1998). *Handbook of Composites*. (2. Edition). London: Chapman and Hall, 131-155.
18. Shackelford, J. F. (2018). *Mühendisler için Malzeme Bilimine Giriş 8. Basımdan Çeviri*. (1. Baskı). (Çev. M. Baydoğan , Çev. B. Özkal, Çev. K. Kazmanlı , Çev. N. Solak). İstanbul: Literatür yayıncılık, 383-417.
19. Chawla, K. K. (1998). *Composite Materials Science and Engineering*. (2. Edition). New York, NY: Springer New York, 98-99.
20. Ojha, S., Bisaria, H., Mohanty, S. and Kanny, K. (2024). Fractographic analysis of fiber-reinforced polymer laminate composites for marine applications: A comprehensive review. *Polymer Composites*, 45(8), 6771-6787.
21. Omid, M. J., Shayanmehr, M. (2019). Improving the dispersion of SWNT in epoxy resin through a simple Multi-Stage method, *Journal of King Saud University-Science*, 31(2), 202-208.
22. Bagavathiappan, S., Lahiri, B.B., Saravanan, T., Philip, J. and Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring -A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 33-55.
23. İnternet: Filchakova, M. (2021). What are multi walled carbon nanotubes? MWCNT production, properties, and applications. Web: <https://tuball.com/articles/multi-walled-carbon-nanotube>, Son Erişim Tarihi: 20/12/2024.
24. Khanna, S., Islam, N. (2018). Carbon Nanotubes-Properties and Applications. *Organic and Medicinal Chemistry*, 7(1), 30-35.
25. Luhna, N., Islam, F. (2012, June 11-13). Carbon Nanotubes for Epoxy Nanocomposites: A Review on Recent Developments. *2nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications*, Wrexham, 1-9.

26. Li, C., Thostenson, E., Chou, T.W. (2008). Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: A review. *Composites Science and Technology*, 68, 1227-1249.
27. Saba, N., Jawaid, M., Sultan, M. T. H. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials, In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites*, 1-12.
28. Beşergil, B. (2022). Kompozitler: Temel İlkeler ve Test Metotları. (1. Baskı). Ankara: Gazi Yayınevi, 518-520.
29. Turan, F., Güçlü, M., Gürkan, K., Durmuş, A. and Taşkın, Y. (2022). The effect of carbon nanotubes loading and processing parameters on the electrical, mechanical, and viscoelastic properties of epoxy-based composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(3), 93.
30. Daniel, I. M., Ishai, O. (2006). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. (2. Edition). Oxford: Oxford University Press, 63-90.
31. Keskin, O., Turan, F. (2024). Non-destructive health monitoring of glass fibre epoxy composites under fatigue loading using electrical resistance change method. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 40(1), 403-425.



Gazili olmak ayrıcalıktır