

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



DEĞİŞİK YÜKLEMELERE MARUZ KOMPOZİT MİLLERİN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

Hayri YILDIRIM

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Haşim PIHTILI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ELAZIĞ-2016

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞİK YÜKLEMELERE MARUZ KOMPOZİT MİLLERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

Hayri YILDIRIM

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 15.07.2016 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oy birliği/ oy
çokluğu ile başarılı/ başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışmanı: Doç. Dr. Haşim PIHTILI

Üye : Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Üye : Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

Üye : Doç. Dr. Cihan ÖZEL

Üye : Doç. Dr. Erol KILIŞKAP

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim kurulu'nun/...../..... ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın oluşmasında her türlü yardımı gösteren, çalışmaya büyük katkı sağlayan ve bana çalışmalarında yol gösteren Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Haşim PIHTILI Hocam' a sonsuz teşekkür eder saygılar sunarım.

Engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve her türlü konuda büyük desteğini gördüğüm Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU Hocam' a teşekkür eder ve saygılar sunarım.

Laboratuar ve Teknik donanımlardan dolayı ve ayrıca her türlü konuda büyük desteğini gördüğüm Batman Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Öğretim üyeleri Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ Hocam'a, Doç. Dr. Hamit ADİN Hocam'a, deneylerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. M. Emin Deniz Hocam'a ve Araştırma görevlisi Edip ÇETKİN'e, Tolga TOPKAYA'ya teşekkür eder ve saygılar sunarım.

Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Başkanı Sayın Doç. Dr. Kadir TURAN Hocam'a teşekkür eder ve saygılar sunarım.

Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve üretilmesini sağlayan FÜBAP' a ve İzoreel A.Ş.' nin sahiplerinden Rahmi AKIN Bey'e teşekkür ederim.

Hayri YILDIRIM

Makine Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XX
SİMGELER LİSTESİ	XXI
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	13
3.1. Kompozitten İmal Edilen Malzemelerin Kullanım Alanları	13
3.1.1. Havacılık ve Uzay Sektörü Alanı	13
3.1.2. Otomotiv Sanayi	17
3.1.3. Spor Endüstrisi	18
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	20
3.2.1. Elyafli Kompozitler.....	20
3.2.2. Parçacıklı Kompozitler	21
3.2.3. Tabakalı Kompozitler	21
3.2.4. Karma (hibrid) Kompozitler	21
3.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	22
3.3.2. Elle yatırma yöntemi.....	23
3.3.3. Püskürtme yöntemi	24
3.3.4. Reçine transferiyle kalıplama (RTM) yöntemi.....	26
3.3.4.1. Vakum destekli reçine transferi (infüzyonu) ile kalıplama işlemleri	26
3.3.5. Profil çekme (Pultrusion) yöntemi.....	27
3.3.6. Hazır Kalıplama Pestili (SMC) Yöntemi.....	29
3.4. Kompozit Millerin İmalatında Kullanılan Yöntemler	30
3.4.1. Filaman Sarma Yöntemi	30
3.4.2. Santrifüj Kalıplama Metodu	32
3.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları	33

4.	MİLLER VE HESABI	35
4.1.	Düz Millerin Hesabı	37
4.2.	Millerde eğilme deformasyonu	37
4.3.	Millerde eğilme mukavemet hesabı	38
4.3.1.	Toplam gerilmeler " δ_{Top} "	38
4.3.2.	Toplam normal gerilmeler " σ "	39
4.4.	Millerde burulma deformasyonu	40
4.4.1.	Toplam kayma gerilmeleri " τ_{Top} "	40
4.5.	Millerde Titreşim kontrolü	42
4.5.1.	Burulma titreşimleri	43
4.5.2.	Eğilme titreşimleri	44
5.	DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ	46
5.1.	Çekme Deneyleri	47
5.1.1.	Fiber takviye doğrultusunda çekme deneyi	47
5.1.2.	Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekme deneyi	49
5.2.	Kayma Deneyi	50
5.3.	İçi Boş Dairesel Kompozit Millerin Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Tespit Edilmesi	52
5.3.1.	Deney Numunelerinin Hazırlanması	52
5.3.2.	Deneyde Kullanılan Materyal ve Yöntem	52
5.3.3.	Üretim Yöntemi	53
5.4.	Üç Nokta Eğme Testleri	54
5.4.1.	Üç nokta Eğme deneyleri sonucunda elde edilen gerilmelerin grafiklere aktarılması	56
5.4.3.	Mil boyunun Eğilme Gerilmesi Üzerine Etkisinin incelenmesi	71
5.4.4.	Üç nokta eğme ANSYS çözümleri	78
5.5.	Burulma Testleri	83
5.5.1.	Burulma deneyleri sonucunda elde edilen burulma kırılma modül değerlerinin grafiklere aktarılması	85
5.5.2.	Et Kalınlığının Burulma Gerilmesi Üzerine Etkileri	92
5.5.3.	Mil boyunun burulma Gerilmesi Üzerine Etkisinin incelenmesi	101

5.5.4.	Burulma deneylerinin ANSYS çözümleri	107
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	113
7.	KAYNAKLAR.....	116
	ÖZGEÇMİŞ.....	124



ÖZET

Değişik yüklemelere maruz kompozit millerin mekanik davranışları deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Kompozit malzemelerden imal edilen içi boş dairesel millerin eğilme ve burulma gerilmeleri farklı oryantasyon açılarında incelendi. İçi boş dairesel kompozit miller için fiber malzemesi olarak Cam, Karbon ve Kevlar lifi, matris malzemesi olarak ta Epoksi reçine kullanıldı. 80mm, 200mm, 250mm uzunluklarında ve farklı iç çaplara sahip $D_{iç} = 12\text{mm}-13\text{mm}$ ve $D_{dış} = 17\text{mm}$ dış çapa sahip içi boş dairesel kompozit kompozit miller kullanılmıştır. İçi boş kompozit miller filaman sarma metoduyla; $\theta = 45^\circ$, 60° , 75° , 80° , 88° oryantasyon açılarında imal edildi. İçi boş dairesel kompozit millerin mekanik olarak, eğilme ve burulma testleri her bir numune için ayrı ayrı tekrarlandı. Sayısal çalışma, üç boyutlu sonlu eleman tipi (Solid 186) seçilerek ANSYS programı kullanılarak yapılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda içi boş dairesel kompozit millerin mekanik davranışlarının fiber takviye malzemelerine, oryantasyon açısına, et kalınlığına ve uzunluklarına bağlı olarak değiştiği gözlemlendi. Elde edilen deneysel ve sayısal çalışma sonuçları grafikler ile verilerek gerekli irdelemeler yapıldı. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının birbirleri ile yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kompozit miller, Filaman sarma, Oryantasyon açısı, Burulma testi, Eğilme testi

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE BEHAVIORS OF COMPOSITE SHAFTS EXPOSED TO DIFFERENT LOADINGS

This study experimentally and numerically investigates the mechanic behaviors of composite shafts exposed to different loadings. The bending and torsional stresses of hollow circular shafts made of the composite materials are examined at different orientation angles. As fiber materials for the hollow circular composite shafts are used glass, carbon and kevlar fiber; and epoxy resin was used as the matrix material. Hollow circular composite shafts 80mm, 200mm, 250mm in length and having outer diameter $D_{outer}=17\text{mm}$, different inner diameters $D_{inner}= 12\text{mm}-13\text{mm}$ were utilized in the study. Hollow composite shafts were produced at orientation angles $\theta=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 88^\circ$ using the filament winding method. Mechanical bending and torsion tests for hollow circular composite shafts were repeated separately for each specimen. numerical study was carried out by selecting three-dimensional finite element type (Solid 186) in ANSYS software. As a result of numerical and experimental analyses, it was observed that the mechanical behaviors of hollow circular composite shafts vary depending on the fiber reinforcement material, orientation angle, wall thickness and length. The obtained results of experimental and numerical analyses were presented in graphs and the necessary considerations were made. The experimental and numerical analysis results were found to be close to each other.

Key Words: Composite shafts, Filament winding, Orientation angle, Torsion test, Bending test

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Askeri uçakta kompozit malzeme kullanımı.....	14
Şekil 3.2. Uçak motorunda kullanılan kompozit malzemeler	14
Şekil 3.3. Uydu sistemlerinde kullanılan kompozit malzemeler.....	15
Şekil 3.4. Boeing 787 uçağındaki kompozit parçalar.....	15
Şekil 3.5. Hayalet uçak.....	15
Şekil 3.6. Rutan Voyager uçağı.....	15
Şekil 3.7. Havacılık sanayiinde kompozit malzeme kullanılarak üretilen araçlar	16
Şekil 3.8. Kompozit gelişim süreci	16
Şekil 3.9. Kompozit malzeme türlerinin ağırlıkça ve fiyatça kullanım oranları	16
Şekil 3.10. Ülkelerdeki kompozit malzeme tüketim miktarı (Milyon Ton).....	17
Şekil 3.11. F1 yarış arabasının arka kanat kısmında kullanılan kompozit malzeme.....	17
Şekil 3.12. F1 yarış arabasının burun kısmında kullanılan kompozit malzeme.....	17
Şekil 3.13. elektrikli araçta kompozit malzeme kullanımı.....	18
Şekil 3.14. Bir bota ya da tekneye etkiyen kuvvetler güçlendirilmiş karbon.....	18
Şekil 3.15. İskeleti epoksi ile fiberden yapılmış bir bisiklet	18
Şekil 3.16. Karbon elyaf kullanılan 29 metrelik gemi direğı	19
Şekil 3.17. Gövdesi kompozit malzemeden üretilen yat teknesi.....	19
Şekil 3.18. Bir sörf tahtasının birçok farklı özellikli kompozit ve polimer malzemenin katlandırılmasından oluşan A-A kesitli şekli.....	19
Şekil 3.19. Kompozit malzemeden üretilen dalgıç paleti.....	20
Şekil 3.20. Kompozit malzemeden üretilen kasket	20
Şekil 3.21. Kompozit malzemelerin gruplandırılması.....	20
Şekil 3.22. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri şeması.	22
Şekil 3 23. PAN ve Zift prosesleri ile karbon fiber üretimi	23
Şekil 3 24. El yatırma yönteminin şematik gösterimleri	24
Şekil 3.25. El yatırma yöntemi.....	24
Şekil 3.26. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.27. Reçine transferiyle kalıplama yönteminin şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.28. Pultruzyon sistemi.....	28
Şekil 3.29. Hazır kalıplama pestili (SMC) şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.30. Flaman sarma sistemi.....	31

Şekil 3.31. Flaman sarma sistemi ile üretilen borular	31
Şekil 3.32. Santrifüj kalıplama ile üretim şeması.....	33
Şekil 4.1. Milin dış yüzeyinde en büyük kayma gerilmelerinin oluşması	36
Şekil 4.2 Kavramalı milde kuvvet ve moment dağılımı.....	37
Şekil 4.3. Milde eğilme deformasyonu	37
Şekil 4.4. Milde meydana gelen eğilme gerilmeleri.....	38
Şekil 4.5. Burulmaya tabi tutulan mil	41
Şekil 4.6. Burulma deformasyonu	42
Şekil 4.7. Burulma titreşimi yapan mil	44
Şekil 4.8. Dengelenmemiş kütle ve titreşimleri	44
Şekil 5.1. Fiber takviye doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip cam/epoksi numunesi	47
Şekil 5.2. Fiber takviye doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip karbon/epoksi numunesi.....	48
Şekil 5.3. Fiber takviye doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip kevlar/epoksi numunesi.....	48
Şekil 5.4. Fiber takviye dik doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip cam/epoksi numunesi.....	49
Şekil 5.5. Fiber takviye dik doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip karbon/epoksi numunesi	49
Şekil 5.6. Fiber takviye dik doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip kevlar/epoksi numunesi	49
Şekil 5.7. $[0^\circ]_3$ tabakalı kompozit levhadan üretilmiş olan kayma deneyi numunesi boyutları	50
Şekil 5.8. $[0^\circ]_3$ tabakalı kompozit levhadan üretilmiş olan kayma deneyi numunesi: a) cam/epoksi, b) Karbon/epoksi, c) kevlar/epoksi.....	50
Şekil 5.9. Filaman sarma yöntemi ile cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş daireesel kompozit millerin imal edilmesi.....	53
Şekil 5.10. Test numuneleri; a) Cam/Epoksi b) Karbon/Epoksi c) Kevlar/Epoksi.....	54
Şekil 5.11. 3 nokta eğme test düzeneği	54
Şekil 5.12. Üç nokta eğme altındaki numune şekli ve boyutları.....	55
Şekil 5.13. Cam/epoksi numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları; a) deney öncesi b) deney sonrası	55

Şekil 5.14. Kevlar/epoksi numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları; a) deney öncesi b) deney sonrası	55
Şekil 5.15. Karbon/epoksi numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları; a) deney öncesi b) deney sonrası	56
Şekil 5.16. Numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları: a) cam/epoksi, b) kevlar/epoksi, c) karbon/epoksi	56
Şekil 5.17. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi.....	57
Şekil 5.18. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi.....	57
Şekil 5.19. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi.....	58
Şekil 5.20. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi	58
Şekil 5.21. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi	59
Şekil 5.22. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi	59
Şekil 5.23. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	59
Şekil 5.24. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	60
Şekil 5.25. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	60
Şekil 5.26. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	60
Şekil 5.27. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	61
Şekil 5.28. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	61
Şekil 5.29. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	61

Şekil 5.30. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	62
Şekil 5.31. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi.....	62
Şekil 5.32. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açısında eğilme gerilmenin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	63
Şekil 5.33. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 75° oryantasyon açısında eğilme gerilmenin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	64
Şekil 5.34. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	64
Şekil 5.35. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	64
Şekil 5.36. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre eğilme gerilmenin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	65
Şekil 5.37. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre eğilme gerilmenin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	65
Şekil 5.38. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	66
Şekil 5.39. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	66
Şekil 5.40. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	66
Şekil 5.41. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	67
Şekil 5.42. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	67

Şekil 5.43. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarındaki et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	67
Şekil 5.44. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarındaki et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	68
Şekil 5.45. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarındaki et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	68
Şekil 5.46. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarındaki et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	68
Şekil 5.47. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	69
Şekil 5.48. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	69
Şekil 5.49. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	69
Şekil 5.50. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	70
Şekil 5.51. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	70
Şekil 5.52. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	70
Şekil 5.53. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açısında eğilme gerilmenin boyaya göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	72
Şekil 5.54. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açısında eğilme gerilmenin boyaya göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi.....	72
Şekil 5.55. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında boyaya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	73
Şekil 5.56. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında boyaya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması	73

Şekil 5.57. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.58. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	74
Şekil 5.59. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	74
Şekil 5.60. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	74
Şekil 5.61. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.62. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.63. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi ...	75
Şekil 5.64. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi ...	76
Şekil 5.65. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi ...	76
Şekil 5.66. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi ...	76
Şekil 5.67. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi ...	77
Şekil 5.68. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi ...	77
Şekil 5.69. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu.....	78
Şekil 5.70. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	79
Şekil 5.71. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	79
Şekil 5.72. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	79

Şekil 5.73. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	80
Şekil 5.74. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	80
Şekil 5.75. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	80
Şekil 5.76. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu.....	81
Şekil 5.77. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	81
Şekil 5.78. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	81
Şekil 5.79. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	82
Şekil 5.80. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	82
Şekil 5.81. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	82
Şekil 5.82. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü	83
Şekil 5.83. Burulma test düzeneği.....	83
Şekil 5.84. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi numunelerin şekli ve boyutları....	84
Şekil 5.85. 250mm uzunluktaki camepoksi numuneleri; a) burulma öncesi, b) burulma sonrası	84
Şekil 5.86. 250mm uzunluktaki karbon/epoksi numuneleri; a) burulma öncesi, b) burulma sonrası	84
Şekil 5.87. 250mm uzunluktaki kevlar/epoksi numuneleri; a) burulma öncesi, b) burulma sonrası	85
Şekil 5.88. $L=80\text{mm}$ boyundaki numunelerin burulma test düzeneğine bağlanması: a) cam/epoksi b) kevlar/epoksi c) karbon/epoksi.....	85
Şekil 5.89. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi.....	86

Şekil 5.90. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi	86
Şekil 5.91. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi	87
Şekil 5.92. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi.....	87
Şekil 5.93. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi.....	87
Şekil 5.94. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi.....	88
Şekil 5.95. Cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	88
Şekil 5.96. Cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	88
Şekil 5.97. Cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	89
Şekil 5.98. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	89
Şekil 5.99. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	89
Şekil 5.100. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	90
Şekil 5.101. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	90
Şekil 5.102. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	90
Şekil 5.103. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	91
Şekil 5.104. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	92

Şekil 5.105. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	93
Şekil 5.106. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında R_T değerlerinin et kalınlığına göre deneysel ansys karşılaştırılması	93
Şekil 5.107. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında R_T değerlerinin et kalınlığına göre deneysel ansys karşılaştırılması	93
Şekil 5.108. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	94
Şekil 5.109. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	94
Şekil 5.110. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	95
Şekil 5.111. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	95
Şekil 5.112. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	95
Şekil 5.113. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	96
Şekil 5.114. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	96
Şekil 5.115. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	96
Şekil 5.116. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	97

Şekil 5.117. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	97
Şekil 5.118. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarındaki et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	97
Şekil 5.119. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	98
Şekil 5.120. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	98
Şekil 5.121. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	98
Şekil 5.122. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.123. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.124. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.125. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boya göre R_T gerilmelerinin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	101
Şekil 5.126. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T gerilmelerinin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi	101
Şekil 5.127. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel - ansys karşılaştırılması.....	102
Şekil 5.128. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması	102
Şekil 5.129. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	102

Şekil 5.130. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	103
Şekil 5.131. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	103
Şekil 5.132. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	103
Şekil 5.133. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	104
Şekil 5.134. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	104
Şekil 5.135. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	104
Şekil 5.136. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	105
Şekil 5.137. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	105
Şekil 5.138. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	105
Şekil 5.139. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması.....	106
Şekil 5.140. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu.....	107
Şekil 5.141. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	107
Şekil 5.142. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	108
Şekil 5.143. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	108
Şekil 5.144. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	109
Şekil 5.145. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	109

Şekil 5.146. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	110
Şekil 5.147. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu.....	110
Şekil 5.148. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	110
Şekil 5.149. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	111
Şekil 5.150. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	111
Şekil 5.151. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	112
Şekil 5.152. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	112
Şekil 5.153. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü.....	112

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1. Mühendislik malzemelerinin tipik özellikleri	34
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş cam fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu	51
Tablo 5.2. Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş karbon fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu	51
Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş kevlar fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu	52



SİMGELER LİSTESİ

[C_{ij}]	: Elastiklik matrisi	
E₁₁	: Fibere paralel doğrultuda elastisite modülü	[MPa]
E₂₂	: Fibere dik doğrultuda elastisite modülü	[MPa]
G₁₂	: Kayma modülü	[MPa]
L	: Mil boyu	[mm]
N_x	: x yönünde normal kuvvet bileşenleri	[N]
M_x	: x-y düzleminde eğilme momenti bileşenleri	[N.mm]
σ	: Eğilme Gerilmesi	[MPa]
ν	: Poisson oranı	[-]
X_ç	: Fibere paralel doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
Y_ç	: Fibere dik doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
T	: Tabaka kalınlığı	[mm]
u, v, w	: x, y, z kartezyen koordinatlarındaki yer değiştirmeler	[mm]
V_f	: Fiber hacim oranı	[%]
b	: Tabaka genişliği	[mm]
θ	: Fiber Takviye açısı	[°]
D_i	: İç çap	[mm]
D_d	: Dış çap	[mm]
R_T	: Burulma kırılma modülü	[MPa]
F_N	: Normal Kuvvet	[N]
I	: Atalet (eylemsizlik momenti)	[mm ⁴]
I_{eş}	: Eşdeğer eylemsizlik momenti	[N.s ² .mm]
I_p	: Polar eylemsizlik momenti	[mm ⁴]
I_m	: Kütleli eylemsizlik momenti	[N.s ² .mm]
K_b	: Çap düzeltme katsayısı	[-]
M_b	: Burulma momenti	[N.mm]
M_d	: Döndürme momenti	[N.mm]
M_e	: Eğilme momenti	[N.mm]
W_e	: Kesit eğilme mukavemet momenti	[mm ³]
W_b	: Kesit burulma mukavemet momenti	[mm ³]
e	: Eksantrisite, Elastik enerji	[mm, Nmm]

g	: yerçekimi ivmesi	$[m/s^2]$
n	: Devir sayısı	$[d/dk]$
γ	: Özgül ağırlık,i kayma açısı	$[N/mm^3]$
δ	: Sehim	$[mm]$
θ	: Burulma açısı	$[^\circ]$
σ_b	: Basma gerilmesi	$[N/mm^2]$
$\sigma_{\check{c}}$	: Çekme gerilmesi	$[N/mm^2]$
$\sigma_{eğ}$	: Eğme gerilmesi	$[N/mm^2]$
σ_{em}	: Emniyet gerilmesi	$[N/mm^2]$
$\sigma_{eş}$	: Üst gerilme	$[N/mm^2]$
ω	: Açısal hız, burulma faktörg	$[r/s, -]$
ω_{kr}	: Kritik açısal hız	$[r/s]$
φ	: burulma açısı	$[^\circ]$
α_0	: Zorlanma katsayısı,	$[1]$
τ_x	: Toplam kayma gerilmeleri	$[Mpa]$
$M_{eğ}$	: Eğilme momenti,	$[Nmm]$
τ_{Top}	: Toplam kayma gerilmesi,	$[MPa]$
τ_t	: Burulma gerilmesi,	$[MPa]$
τ_k	: Kesme gerilmesi,	$[MPa]$
W_t	: Eğilmeye karşı koyma momenti	$[mm^3]$

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinin gelişmesi ile birlikte kullanılacak malzeme de sürekli yenilenmekte ve gelişmektedir. Özellikle metal yerine, metal dışı malzemelerinin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bunlardan biri de kompozit malzemelerdir. Birden fazla sayıdaki farklı malzemelerin makro düzeyde bir araya getirilmesi ile oluşan yeni malzemeye karma malzeme diğer bir deyişle kompozit malzeme adı verilmektedir.

Kompozit malzeme (karma malzeme) tasarımıındaki amaç, farklı özelliğe sahip malzemelerin mekanik, mukavemet, akustik ve farklı kimyasal özellikteki herhangi birinin veya birkaçının geliştirilmesidir. Kompozit malzemeler günümüz teknolojisinin her alanında kullanılmaktadır. Bilhassa teknolojik ürünlerde, spor ekipmanlarında, uzay ve havacılık sanayinde, savunma sanayinde, otomotiv sanayinde ve sağlık sektörü gibi daha birçok alanlarda rahatlıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, otomotiv sanayinin en önemli güç aktarma organlarından biri olan kompozit malzemedan üretilen şaftlar üzerinde araştırma yapılmıştır.

Otomotiv sanayiinde miller (şaft) en önemli güç iletim elemanlardan biridir. Miller çalışma özelliğinden dolayı burulma ve eğilmeye maruz kalmaktadır. Kompozit malzemelerin yorulma davranışları, metaller ve polimerler gibi izotrop malzemelerden tamamen farklıdır. Bu durum göz önüne alındığında kompozit malzemelerde mikro çatlaklar yükleme başladığı andan itibaren artar ancak kompozitler hasarın meydana geldiği maksimum yüke kadar dayanabilir.

Miller, kullanım amacına göre içi boş ve dolu olarak üretilmektedirler. İçinin boş olması milin ağırlığının azalmasını ve buda konstrüksiyonun hafif olmasını sağlar. Miller, üzerine takılı dişli çark, kasnak, kavrama vb. gibi elemanları taşıyan ve bu elemanlardan aldığı dönme momentini diğer elemanlara ileten, boyu çapına göre uzun olan dairesel kesitli elemanlardır.

Millerin hesaplanması ve boyutlandırılmasında; milin taşıyacağı yüke, dayanabileceği mukavemete, deformasyona ve uygun bir titreşime sahip olması istenir. İmalatta kullanılacak büyük boyutlu miller çelik fabrikalarında dövölüp tavlandıktan ve kaba işlemlerden sonra hazır hale getirilir. Millerin üretiminde kullanılan malzemeler genellikle Fe50, Fe60 ve Fe70 çelikleridir. Çok büyük yüklerde, moment iletiminde ve yüzeyin sertleştirilmesi gereken yerlerde ise C35, 40Mn4, 34Cr4 gibi ıslah çelikleri kullanılmaktadır. Taşıtlarda kullanılan miller ise 16MnCr5 semantasyon çelikleridir.

Kompozit malzemeden imal edilmiş birçok makine elemanları günümüzde çok çeşitli konstrüksiyonlarda ve tekniğin her alanında rahatlıkla kullanılmaktadır. Bilhassa, eğilmeye ve burulmaya maruz kalan ve buna benzer mühendislik uygulamalarında farklı mekanik özellik gösteren basit makinelerde, taşıtlarda, tarım makinelerinde, türbinlerde ve transmisyon millerinde vb yerlerde kullanılması gün geçtikçe artmaktadır.

Bu çalışmada, farklı oryantasyon açılarında, farklı et kalınlığında ve farklı kompozit malzemeden imal edilen içi boş dairesel kompozit millerin mekanik davranışları teorik ve deneysel olarak incelendi ve pratikteki kullanılabilirliği araştırıldı. Üretim yöntemi olarak filaman sarma yöntemi (elyaf sarma yöntemi) kullanıldı. Bu yöntem ile farklı oryantasyon açılarında ve farklı kompozit malzemelerden içi boş dairesel miller imal edildi. İmal edilen bu millerin eğilme ve burulma gerilmeleri deneysel ve sayısal olarak incelendi.

Çalışma analitik ve nümerik olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Analitik kısımda farklı oryantasyon açılarında cam, karbon ve kevlar lifleri kullanılarak farklı çap ve boylarda içi boş dairesel kompozit miller imal edildi. Nümerik kısımda ise geometrisi ve özellikleri belirlenmiş olan içi boş dairesel kompozit miller bir sonlu elemanlar modeli ANSYS ortamında modellendi. Bu sayede deneylere başlanmadan önce ideal malzemeyi elde edebilmek için analitik yöntemlerle bulunmuş olan sonuçlardan bir seçme şansı ortaya çıkarılmış olacaktır. Ansys programıyla, tasarımı yapılan değişik miller için sonuçlar elde edildi. Yapılan deneysel çalışma sonuçları sayısal modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldı.

Deneysel kısım ise ASTM standartlarına uygun olarak üretilmiş olan kompozit numuneler, üç nokta eğme ve burulma gibi testlerine tabi tutuldu.

Bu çalışmanın ana amacı, literatürde yer alan çalışmalara bağlı kalmak kaydı ile literatürde eksik olarak görülen farklı kompozit malzemelerin, daha küçük boyutlarda, farklı fiber takviye açısı, tabaka dizilimi için eğilme ve burulma miktarlarının karşılaştırılması yapılarak kompozit malzemeler arasındaki değişimleri tespit etmektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüz teknolojisinin her alanında kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. İçi boş dairesel kompozit millerle ilgili çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan birisi de dolu ve içi boş miller üzerinde çalışmalar yapılmakla birlikte, daha ziyade basınçlı tüp üzerinde yoğunlaşmıştır. İçi boş millerin burulma açısı ve maksimum gerilme için bulunan değerler dolu millerle karşılaştırıldığında bu değerlerin %6 kadar artmasına karşılık malzemenin ağırlığı %25 kadar azalmaktadır. Bu nedenle içi boş miller özellikle otomotiv sanayi ile uzay ve havacılık sanayinde çok fazla kullanılmaktadır [1].

Y. A. Khalid ve diğerleri, hareketli hibrit alüminyum/kompozit milin eğme yorulma analizini incelediler. Çalışmada filaman sarma tekniği ile imal edilen hibrit millerde cam fiber, epoksi reçine kullanıldı. İlk önce, farklı ardışık dağılımlı, farklı oryantasyon açılarda ve farklı kompozit tabakalardan oluşan alüminyum tüp kullanıldı. Makroskobik seviye testlerinde, darbelerin elyafların serbest bölgelerinde veya reçinenin dış tarafında başlaması, numune dayanıklılığının azalmasına kadar devir sayısının arttığı görüldü. Ayrıca eğme yorulma testinin dönüşümünden hiçbir elyafın kırılmadığı tespit edildi. Bu çalışma sonucunda, tabaka sayısının artması alüminyum tüpün yorulma kuvvetini %40'a kadar artırdığı görüldü [2].

Bang ve diğeri, yüksek hızlı hava taşıt milleri için karbon fiber kompozit millerin tasarımını incelediler. Açık yığılmasını, yapıştırıcının ve kompozit milin kalınlığını, çelik flanşların boyutlarını titreşim analizi için belirlediler. Yüksek hızlı hava taşıtı karbon kompozit milinin dinamik ve statik karakteristikleri sonlu elemanlar analizi ile incelediler. Karbon kompozit milin kalınlığı, yüksek hızlı milin radyal sertliğini geliştirmek için doğal eğilme frekansı göz önünde bulundurularak belirlendi. Karbon kompozit milin eğilme rijitliği önemli ölçüde geliştirildi. Sonuçta, tasarlanan karbon kompozit milin emniyeti, merkezkaç kuvveti, eğilme yükü ve ısısal kuvvetleri göz önünde bulunduruldu [3].

Üç nokta eğme testinin amacı eğilme akma mukavemetini, maksimum eğilme gerilmesini elde etmektir. Eğilme mukavemeti, numunenin çekme gerilimlerinin en yüksek olduğu alt yüzeyde numunenin tolere edebildiği maksimum yüke karşılık gelir. Bu gerilme, numunenin çekme gerilimlerinin destekler arasındaki orta noktanın alt yüzeyinde ölçülür [4-8].

Azalan eğilme direncine tüplerin vereceği tepki D/t oranına bağlıdır. D/t oranları için, eğilme sırasında kısa dalgalanmaların ortaya çıktığı görüldü. Artan eğilme açılarında borular bazı yerlerde çökmeler meydana geldi ve bir dizi kristal şekiller oluştu. Artan et kalınlığının (daha küçük D/t oranları) daha yüksek eğrilikler meydana getirdiği görüldü ve yerel çökme modu karakterize edildi. Hatta daha kalın kabuklar için, ilk olarak yük limiti kararsızlıkları kaydedildi [9-15].

Köpük malzemesinin katılaşma değişimi mikro ve makro yapının kontrol edilmesinde ayrı bir strateji olduğu görüldü. Örneğin, yüksek soğutma oranı, gerilim konsantrasyonunu arttıran ve böylece kırılma başlangıcı için olumsuz etkileri olan, hücre duvarlarındaki mikro gözenekleri ve tane boyutunu azalttığı belirlendi. Son zamanlarda, ince cidarlı borulara (ex situ FFTs olarak da isimlendirilen) eklenen sertleştirici eleman olarak integral-cilt köpüklerinin potansiyel kullanımı değerlendirilmeye alındı [16].

Duarte, I. ve diğeri, Ex situ FFTs'lerin deformasyon modu, borunun dış yüzeyinde görülebilen bir ana çatlağın yayılması nedeniyle ortaya çıkan hata ile karakterize edilen bireysel bileşenleri arasındaki bir kombinasyon olduğunu belirlediler. Bu plastik mafsala izin vermeyen köpüğün zoraki deformasyonu nedeniyle iyi bilinen bir durumdur. Bu nedenle, düşük esnekliğe sahip malzemeler kullanıldığı durumlarda, boru hatasına kolaylıkla ulaşılacağı görüldü [17].

Yu ve diğeri, sandviç kirişlerin darbe davranışı ve hata mekanizmasını araştırdılar, Gibson modelini optimize ettiler ve önerdiler. Farklı sıcaklıklarda yarı statik üç nokta eğme testleri, sandviç kirişler için alüminyum kaplama levha ve kapalı hücreli alüminyum köpük çekirdeği kullanılarak araştırma yapıldı [18-20].

Qin ve Wang çekirdek kuvvet etkisini de içeren yeni bir akma durumu türettirler ve eksenel sınırlamalar veya tamamen sabitlenmiş ve enine yüklenmiş ince uzun sandviç kirişin sonlu sapma yanıtını araştırdılar. Alüminyum köpük çekirdeklerinin ve yüzey plakalarının elastik özelliklerinin arıza modları üzerindeki etkileri dikkate alınmadı [21].

Steeves ve Fleck'in de işaret ettiği gibi, bu yaklaşımın zayıf yüzey levhaları ile sandviç kirişlere uygun olduğunu fakat güçlü yüzeyler için uygun olmadığını belirlediler [22].

Mujika ve diğeri tek yönlü kompozit materyallerin düzlem içi kesme özelliklerini belirlemek için üç nokta eğme testini dikkate aldılar, normal kesme gerilmelerinin, lif oryantasyon açısı ve numune geometrisine bağlı olarak, numunede noktadan noktaya değişiklik gösterdiğini belirttiler [23].

El-Hassal Khashaba faz-içi bileşik burulma/eğme yük altında tek yönlü cam elyaf takviyeli polyester (CETP) kompozitlerin yorulma davranışını araştırdı; burulma yorulma dayanıklılığı anlamlı biçimde saf eğilme dayanıklılığından daha düşük olduğu ve bileşik burulma/eğilme yorulma dayanıklılık sınırının saf eğilme yorulma dayanımının yaklaşık yarısı kadar olduğu görüldü [24].

Meijer ve diğerleri belirli bir yükleme koşulları için en iyi konfigürasyonu elde etmek için optimum sarma (oryantasyon) açısını, istifleme dizisini, çapı, kalınlığı ve diğer değişkenleri araştırdılar [25].

Bert ve Kim, hareketli kompozit millerin burulma değerini hesaplamak için analitik çözüm gerçekleştirdiler. Eksensiz sertlik ve eğilme momenti etkisini de dikkate alarak, çeşitli ardışık istiflemelerle hareketli kompozit millerin burulma yükü tam olarak hesaplandı. Teorilerine bağlı olarak saf burulma ve bileşik burulma ve eğilme altındaki hareketli kompozit millerin burulma değeri tahmin edilebildi [26].

Chen ve Peng, bileşik yükleme durumunda kompozit millerin stabilitesini incelemek için sonlu elemanlar metodu kullanarak sayısal simülasyon gerçekleştirdiler. Dönderilen ince cidarlı hareketli kompozit milin kritik eksenel yükü tahmin edildi [27].

Kim ve diğerleri paslanmaz çelik yüzey ve kompozit çekirdeğe sahip hibrit mil imal ettiler. Çelik borulara tabakalı karbon/epoksi yerleştirildi. Araştırmalarında, hibrit milin hibrit olmayan çelik mille karşılaştırıldığında, daha az eğim açısına ve daha yüksek doğal frekansa sahip olduğu tespit edildi [28].

Kim ve Lee, altıgen elips biçimindeki kıvrımların ve yapıştırılarak birleştirilen dairesel bağlantıların performansını araştırdılar. Yapıştırıcı olarak karbon fiber epoksi ve çelik miller kullanıldı. İncelenen üç bağlantı arasında, altıgen bağlantının en iyi momenti ilettiği görüldü. Çift bağlantı, tekli bağlantıdan daha iyi performans gösterdiği tespit edildi. Altıgen tekli bağlantı ve dairesel çift bağlantı hemen hemen aynı performansı gösterdiği görüldü [29].

Kim ve diğerleri yapıştırma bağlantılı kompozit millerin davranışını tahmin etmede hem deneysel hem de sayısal çalışma yaptılar. Karbon ve cam kompozit borular yapışkanla birbirine birleştirdikten sonra farklı bağlama uzunlukları araştırıldı. 16 mm ve daha büyük bağlantı uzunluğunun 3.500 Nm tork kapasitesi için yeterli olduğu bulundu. Bağ kalınlığı, mil çapı ve yapıştırıcı kalınlığı sırasıyla, 4,8 mm, 90 mm ve 0,2 mm olarak ele alındı [30].

Hahn ve Erikson, ince cidarlı burulma test numunesinde yük transferi yapmak için pim ve yapıştırıcıyı birlikte kullandılar. Kompozit boruların burulma davranışı ile ilgili

alışmalar oldukça sınırlıdır. Çalışmada genellikle birkaç ayrı burulma test sonucu kaydedildi. Ancak, anlamlı sonuçların sadece yeterli sayıda testler yapılarak elde edilebileceği görüldü. Bu nedenle, kolay kavrama yöntemlerinin kompozit boruların burulma testlerinde gerekli olduğu tespit edildi [31].

Soden ve diğerleri çeşitli elyaf sarma açılarındaki E-cam/epoksi boruların dayanıklılığını ve hasarını belirlemek için bir dizi deney yaptılar. Laminasyon teorisi ve örme analizi kullanılarak teorik hasar elde edildi, ilk ve son hasar yükleri tatmin edici düzeyde tahmin edilebildi [32].

Mistry ve diğerleri sonlu elemanlar analizini kullanarak, sarma (oryantasyon) açısının GRP borularının dayanıklılığına etkisini araştırdılar; ilk tabaka hasar yüklerini ve optimum açığı, iç basınç yükleme için başka bir yerde örgüleme analizi ile rapor edildiği gibi, 55° yerine 80°'ye yakın açı tahmin edilebildi [33,34].

Caroll ve diğerleri, $\pm 55^\circ$ elyaf sarılmış cam / epoksi boruların çift eksenli yükleme altında değere bağımlı davranışını sundular [35].

Swanson ve diğerleri, çift eksenli gerilmeye maruz kalan, elle yatırılan yarı izotropik karbon/epoksi tabakaların hasarını araştırdılar. Maksimum elyaf gerilme hasar kriterinde, tabaka katılık değişimlerini içeren ilerlemeli hasar modeli ve matris kayma yanıtı için doğrusal olmayan bir model önerildi. Hasar testleri, tek yönlü yuvarlak sarılmış silindirlerin eksenel çekme veya basma ile bileşik burulma kaymasını kapsayan çok eksenli gerilme şartlarında matris hasarını incelemek amacıyla yapıldı [36, 37].

Fujii ve diğerleri, çift eksenli yükleme altında, ıslak sargı tekniği kullanarak imal edilen düz sarılmış cam elyaf tabakaların dayanıklılığını ve doğrusal olmayan gerilme tepkisini araştırdılar; ayrıca Tsai-Wu ve Tsai-Hill kriteri ve ikinci Piola-Kirchhoff gerilimi kullanılarak kuvvet tahmin edildi [38, 39].

Ferry ve diğerleri, hem eğilme hem burulma yüklemelerinin tek yönlü cam elyaf/epoksi kompozit çubuklar üzerindeki yorulma hasarını araştırdılar. Lif yetmezliği, katmanlarına ayrılma ve matris çatlaması yoluyla meydana gelen hasar süreçleri gözlemlendi. Hasarların hem eğilme ve burulma gerilmeleri arasındaki orana hem de minimum ve maksimum gerilmeler arasındaki orana bağlı olarak bazı karmaşık süreçler tarafından meydana geldiği sonucuna varıldı [40].

El-Assal ve Khashaba, bileşik burulma/eğilme yükleri altında tek yönlü cam elyaf takviyeli polyester (CETP) kompozitlerin yorulma davranışını araştırdılar ve burulma yorulma mukavemetinin saf eğilme yorulma mukavemetinden anlamlı biçimde daha düşük

olduğu ve bileşik burulma/eğilme yorulma mukavemetinin dayanıklılık sınırının saf eğilme yorulma mukavemetinin yaklaşık yarısı kadar olduğu sonucuna varıldı [41].

Fawaz ve Ellyin, ömür tahmini için, gerçek yük oranı ve çok eksenli yükleme koşullarını da açıklayabilmek amacıyla referans yorulma eğrisinin modifikasyonuna dayalı çok eksenli bir model önerdiler [42, 43].

Quaresimin ve diğerleri, Fawaz ve Ellyin yöntemiyle ve bir polinom fonksiyon ölçütü ile ömür tahminin doğruluğunu test etmek için, literatürdeki çok eksenli yorulma ile ilgili bazı verileri yeniden analiz ettiler [44].

Quaresimin ve Carraro, borunun eksenine göre 90° yönlendirilmiş elyafa sahip cam/epoksi tabakalardan üretilen borular kullanarak tek yönlü kompozitlerin çift eksenli yorulma davranışını araştırmış ve kombine çekme-burulma yükleri altında test ettiler [45]. Aynı yazarlar tarafından bileşik çekme-burulma yükleri altında test edilen üç farklı sarıma ($[90_n]$, $[0_f/90_{u,3}]$ ve $[0_f/90_{u,3}/0_f]$) sahip boru şeklindeki numuneler kullandıkları geniş bir araştırma da rapor edildi. Kayma geriliminin varlığının, belli bir enine kesme gerilimi değeri için, enine çatlak oluşumu geçen süreyi anlamlı biçimde azalttığını ve $[0_f/90_{u,3}/0_f]$ boruların çatlak çekirdeklenme direncinin $[90_{u,4}]$ borularından daha yüksek olduğu görüldü [46].

Quaresimin ve diğerleri, tabakalardaki yorulma hasar evrimini çekme-burulma yükleme koşulları altında test edilen borular üzerinde ölçülen hasarla karşılaştırdılar. Çok eksenli yüklemeye maruz kalan borulardaki ile karşılaştırılabilecek çok eksenli yerel gerilme durumunu tanıtmak için tasarlanmış tabaka kullanarak, tek eksenli periyodik yükleme altında test edilen çok yönlü tabakalardaki yorulma hasarı evrimi ile çok eksenli yüklemeye maruz kalan borulardaki hasarın temelde aynı olduğu sonucuna varıldı [47].

Schmidt ve diğerleri, çift eksenli yorulma yüklemesi sırasında cam elyaf sarma numunelerindeki hasar gelişimini tahribatsız muayene yöntemleri kullanarak analiz etmiş ve numunelerdeki son hasar başlangıcının elyaf pürüzlülüğünden kaynaklandığı görüldü [48].

El-kadı ve Ellyin, çekme-çekme yüklemede belirli bir maksimum gerilme için, gerilme oranı arttıkça yorulma ömrünün artış gösterdiğini gözlemlediler [49].

Mahmood M. Shokrieh ve diğerleri, burulmaya maruz hareketli kompozit milin kayma burkulmasını nümerik ve deneysel olarak incelediler. Kompozit malzemeler uzun millerin imalatında uygun bir seçim olarak göz önünde bulunduruldu. Bu tür hareketli millerin uygulamalarının otomotiv ve havacılık sanayi üretimlerinde gelişmeler gösterdiği

görüldü. Çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırıldı.

Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edildi;

- Milin sınır değerlerinin burulma momenti üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığı,
- Kompozit milin elyaf oryantasyonunun burkulma torkunu kesinlikle etkilediğini,
- Kompozit mildeki tabakaların düzenli ve sıralı halde dizilişinin burkulma torkunu etkilediğini,
- Burkulma torkunu tahmin edebilmek için sonlu elemanlar model analizi yapıldı,
- Mile uygulanan torkun artmasıyla doğal frekansın karesinin doğrusal bir şekilde azaldığı,
- Belli bir torkun altındaki burulmanın frekansı, burkulma torkununun sıfıra geldiği zaman olduğu görüldü [50].

Roy, A. ve diğeri, kalın kompozit silindirler için basit ve verimli bir dizayn metodu sundular. Gerilme analizi, genelleştirilmiş düzlem şekil değiştirme durumundaki silindirleri göz önünde bulundurarak 3 boyutlu elastisiteye dayandırıldı. İç ve dış basınç ve eksenel yüke maruz kalan, her iki ucu açık silindirler (borular) ve kapalı silindirler (basınçlı kaplar) için analiz yöntemi verildi. Silindirlerin hasarı, 3 boyutlu bir kuadratik hasar kriteri kullanılarak önceden belirlendi. Hem ince hem de kalın silindirler için, patlama basınçlarını hesaplamak amacıyla indirgenmiş bir model kullanıldı ve hesaplanan patlama basınçlarının, elde edilen deneysel sonuçlar ile çok iyi uyum gösterdiği görüldü. Optimum durumdaki çok tabakalı silindirlerde, 3 boyutlu kuadratik kriterin, en uygun tabaka sıralamasını çok kolay bir şekilde elde etmeye bir imkan tanındığı tespit edildi. Tabaka sıralamasının, özellikle kalın silindirlerde, çok kritik olduğu görüldü. Buna ilave olarak, aynı zamanda içten basınca maruz çok tabakalı kapalı silindirlerin dizayn parametreleri ve verimli bir şekilde kullanılabileceği malzeme üzerinde çalışıldı [51].

Hak Sung Kim ve diğeri, sıkıştırılarak uygun hale getirilen hibrit alüminyum hareketli kompozit milin optimum tasarımını incelediler. Bu çalışmada hibrit hareketli alüminyum ve karbon/epoksi kompozitten meydana gelen mil otomobilin arka tekerleği için oluşturuldu. Alüminyum elyaflar, maliyeti düşürmek ve emniyeti artırmak için küçük dişlere sahip çelik halka kullanılarak bileşenleri sıkıştırılarak uygun duruma getirilen hibrit mil için birleştirildi. Sıkıştırılarak elde edilen parçadan fazla güç elde etmek için, çelik dişlilerin şekli ve sayısına bağlı olarak tasarlanan dişliler için en uygun tasarım metodu

geliştirildi. Uygun tasarım metodunu geliştirmek için sıkıştırılarak elde edilen bileşenin hata modu ve sabit dönme momenti tahmin edildi. Daha sonra otomotiv hareketli hibrit alüminyum kompozit milin bir parçasının prototipi test edilerek üretildi. Otomotiv hareketli hibrit alüminyum kompozit milde %50 kütle azalmasına izin verilen parça, konvansiyonel hareketli çelik milin iki parçasıyla karşılaştırıldı. Sıkıştırılmış bileşenin geliştirilmesi ile hibrit tüp ile çelik halka arasında yapışkan maddeninkinin hemen hemen 3-5 kez daha yüksek 75 Mpa ortalama kesme kuvveti elde edildi. Konvansiyonel iki parçalı hareketli milin %50'sine denk gelen hibrit alüminyum kompozit milin kütlesi 6.3 kg dır. Sabit dönme moment kapasitesi ve esas doğal frekans gibi tüm imalat alanlarında hareketli hibrit milin gelişiminde artış gözlemlendi [52].

H. B. H. Gubran, hibrit millerin dinamiğini inceledi. Metallerden oluşan hibrit kompozit millerin (CFRP), çelik ve alüminyum metallerden meydana gelen millerin kesit deformasyonu ve dinamik performansı çalışıldı. Sonlu tabaka çapraz kesme deformasyonu ve dinamik davranışı ile taneli element kullanıldı. Sonuçlardan hibrit millerinin kesme deformasyonunun azalmasının ve dinamik performansın geliştirilmesinin mümkün olduğu tespit edildi. Eğilme ve kesit deformasyonu, metaller ve kompozit malzemelerden üretilen hibrit millerin kullanılmasıyla azaldığı görüldü. Metalik parçaların birleştirilmeleri (mil yatağı, vites kolu, kayışlar gibi), hibrit millerde kolaylaştığı görüldü [53].

Dai Gil Lee ve diğerleri, hareketli otomotiv hibrit alüminyum/kompozit milin tasarımını ve üretimini incelediler. Kompozit malzemeler kendilerine özgü yüksek güç ve sertlikten dolayı konvansiyonel metalik yapılara göre bir çok avantaja sahiptir. Bu çalışmada bir parçası yeni üretim metodu ile geliştirilen hareketli otomotiv hibrit alüminyum/kompozit mil, nemin absorpsiyonunu ve dış etkilerin zarar görmesini önlemek için dış tarafında sargı yüzeyinden ziyade alüminyum tüpün iç yüzeyinde karbon elyaf epoksiden oluşan kompozit tabaka iyileştirildi. Kompozit tabakanın optimum ardışık sıralanması sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplandı. Uygun basma metodu, emniyeti artırmak ve maliyeti azaltmak için tasarlandı, kompozit tüp ve çelik fiberlerin birleştirilme metotları, diğer yapışkan, perçinli, kaynatma parçaları gibi birleştirme metotları ile karşılaştırıldı. Tasarlanan hareketli otomotiv hibrit alüminyum/kompozit milde %75 kütle azalmasına ve konvansiyonel iki parçalı hareketli çelik mil ile karşılaştırıldığında %160 dönme moment kapasitesinin artışına rastlandı [54].

Y. A. Khalid ve diğerleri, hareketli hibrit alüminyum/kompozit milin eğme yorulma analizini incelediler. Çalışmada filaman sarma tekniği ile imal edilen hibrit miller ve cam

fiber ile epoksi reçine ve sertleştirici madde matrisi gerekli dış kompozit yapılarında kullanıldı. İlk önce, farklı ardışık dağılımlı, elyaf oryantasyon açıları ve kompozit malzemelerin farklı tabakalarından oluşan alüminyum tüp kullanıldı. Tüm hibrit miller için hata modu tanımlandı. Makroskobik seviye testleri, elyafların serbest bölgelerinde veya reçinenin dış tarafında darbelerin başlaması, numunenin dayanıklılığının azalmasına kadar devir sayısının arttığı görüldü. Ayrıca eğme yorulma testinin dönüşümünden hiçbir elyafın kırılmadığı tespit edildi. Bu çalışmada sonuçlar tabaka sayısının artması alüminyum tüpün yorulma kuvvetinin %40 kadar arttığı görüldü [55].

Chih- Yung Chang ve diğerleri, rastgele yönelmiş takviye kuvvetlerini içeren dönen kompozit millerin titreşim analizini incelediler. Kompozit malzemelerde takviye kuvvetlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile etkileşimi hesaplamak amacıyla Mori Tanaka teorisi benimsendi. Kompozit malzemelerin kendilerine özgü oryantasyon açıları, fonksiyon biçiminde gerçek elastik modülü ifade edildi. Bu çalışmada sonlu elemanlar modeli, önceden hesaplanan gerçek elastik modülü içeren elyaf takviyeli dönen kompozit malzemeler için genişletildi. Bu modele dayanarak, sabit millerin doğal frekansı ve dönen millerin kritik hızları ile birlikte dönme hızları incelendi. Sonuçta takviye kuvvetlerinin oryantasyonu, kompozit millerin dinamik karakteristik özellikleri üzerinde büyük etkilerinin olduğu tespit edildi [56].

S.A. Mutasher, hareketli hibrit alüminyum/kompozit milin burulma kuvvetinin tahminini inceledi. Hibrit alüminyum/kompoziti, tabakalı kompozit malzemelerinin dışında oluşan hasarlı alüminyum tüpten oluşmuş kompozit malzemenin gelişmiştir. Bu kombinasyondan, daha az görültü ve titreşime, daha yüksek esas doğal frekans, daha yüksek dönme momenti taşıma kapasitesine sahip bir hibrit mil elde edildi. Dengeli ardışıklık ve tabaka sayısı, farklı sarım açısı için hibrit alüminyum/kompozit milin maksimum dönme moment kapasitesi incelendi. Ansys sonlu elemanlar modeli, sabit dönme momenti altındaki hibrit milin nümerik analizinde kullanıldı. Sonuçta, tabaka sayılarının artması ve sarım açısının değiştirilmesi ile sabit dönme moment kapasitesinin önemli bir biçimde etkilendiği görüldü. 45° sarma açısındaki 6 tabakalı karbon fiber/epoksi kompozitin dıştan hasarlı alüminyum tüpün maksimum dönme moment kapasitesi 295 Nm idi. Tahmin edilen sonlu elementler ile deneysel sonuçlar arasında sonuçların benzer olduğu görüldü. Sonlu elemanlar analizi hareketli hibrit alüminyum/kompozit milin burulma kuvvetinin tahmininde uygulandı. Tabaka sayısının arttırılması, hibrit milin hem karbon hem cam fiber kompozit malzemenin sabit dönme moment kapasitesini artırabileceği

görüldü [57].

Kyung Geun Bang ve diğeri, yüksek hızlı hava taşıtı milleri için karbon fiber kompozit millerin tasarımını incelediler. Yüksek esas doğal frekans ile birlikte millerin yüksek sönüm oranı ve düşük dönel eylemsizliği, yüksek hızlı hava taşıtı millerinin sabit uygulamaları için kaçınılmazdır. Konvansiyonel çelik millerinin, düşük sönüm oranı ve yüksek dönme eylemsizliklerinden dolayı yüksek hız gerektiren faaliyetlere uygun olmadıkları görüldü. Bu çalışmada yüksek hızlı hava taşıtı mili karbon fiber epoksi kompozitten ve 2 adet çelik flanştan oluşturuldu. Açı yığılması, yapıştırıcının ve kompozit milin kalınlığı, çelik flanşların boyutları titreşim analizinde seçildi. Yüksek hızlı hava taşıtı karbon kompozit milinin dinamik ve statik karakteristikleri sonlu elemanlar analizi ile incelendi. Karbon kompozit milin kalınlığı, yüksek hızlı milin radyal sertliğini geliştirmek için doğal eğilme frekansı göz önünde bulundurularak belirlendi. Karbon kompozit milin eğilme rijitliği önemli ölçüde geliştirildi. Sonuçta tasarlanan karbon kompozit milin emniyeti, merkezkaç kuvveti, eğilme yükü ve ısısal kuvvetler göz önünde bulundurularak değerlendirildi [58].

Min-Yung Chang ve diğeri, tabakalı kompozit mil modelinin basit burulmasını incelediler. Yataklarla desteklenen ve farklı izotropik rijit plaklar içeren kompozit mil, yay ve yapışkan kapaklar gibi modellendi. İlk olarak deforme olmayan çubuk teorisine dayanarak, milin gerilme enerjisi, milin kesiti için belirlenen hareketli dönel koordinat sistemlerinin kullanımı ile kinetik enerji sağlanırken, koordinatların dönüşümü yardımıyla malzemenin elde edilen 3 boyutlu ana bağıntısı bulundu. Düzenlenen denklemleri elde etmek için genişletilmiş Hamilton prensibi kullanıldı. Kompozit milin kritik hızları literatürdeki sistemlerle karşılaştırıldı. Koordinat sistemlerinin çoklu dönüştürmelerinin kullanılmasıyla burulan izotropik mil tasarlandı ve daha önce yapılan çalışmalara göre genişletildi. Sonuçların çalışılan mil modelinin literatürdeki teorilerle uygun olduğu görüldü. Hazırlanan model, tabakalı kompozit millerin burulmasının titreşim analizi için geçerli alternatif olarak işe yarayacağı tespit edildi [59].

L. W. Chen, ve diğeri, aksiyal sık yükler altındaki dönel kompozit millerin denge davranışını incelediler. Sonlu elemanlar modelini bu çalışmada kullandılar. Tabakalı kompozit mil basit çubuk teori denklemi uygulayarak Timoshenko mili modellendi. Nümerik sonuçların çubuk modelleri ile uyumluluk gösterdiği görüldü. İnce duvarlı kompozit milin kritik hızı, ardışık istife, uzunluk/çap oranına ve sınır koşullarına bağlı olduğu tespit edildi. Ayrıca levha yeri ve devirli hızların dönen denge milleri üstündeki

etkileri incelendi. İnce tabakalı kompozit milin kritik yükü, biçimlendirilmiş burulmadan yaklaşık olarak tayin edilebildi. Sonlu elemanlar literatürdeki sonuçlarla eşleştirilerek iyi sonuçlar elde edildi. Devir hızının ince tabakalı kritik mil yükü üzerinde az etkisinin olduğu, aynı burulma yükü gereksinimi karşılaştırırken kompozit mil çelik milden daha iyi dinamik performansa sahip olduğu ve levhaların hızlı dönen sistemler üzerinde açık etkilere sahip olduğu görüldü [60].

Robert S. Salzar, şekil hafızalı alaşım dönel hibrit kompozit milin yarı aktif kontrolünü inceledi. Dinamik denge analizlerinin tekniği, zamana bağlı aksiyal sıkma yük altında şekil hafızalı alaşım dönel hibrit milleri (SMA) aktifleştirmek ve geliştirilmiş konvansiyonel tabaka yapıları için sunuldu. Aktifleştirmenin etkileri dinamik denge alanlarında sıcaklık değişimleri için incelendi. Sıcaklık değişimi ile SMA elyafların Young modülü, milin genel denge parametrelerine girildi. Aktifleştirilen SMA hibrit mili çubuk yapıları gibi işlendi. Sonuçta, hem cam-epoksi/NiTi hem de grafit-epoksi/NiTi hibrit miller için genel aktivasyon, kritik aksiyal kuvvetin yükselmesine sebep olduğu tespit edildi [61].

Bu çalışmada, yapılan literatür incelemelerinde eksik olarak görülen ve bilime büyük katkılar sağlayacağını düşündüğümüz farklı takviye malzemelerinin daha küçük boyutlardaki, daha küçük dış ile iç çaptaki numunelerin eğilme ve burulma gerilmelerine tabi tutularak kendi aralarında karşılaştırmaları yapılmıştır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Birden fazla sayıdaki farklı malzemelerin makro düzeyde bir araya getirilmesi ile oluşan yeni malzemeye karma malzeme diğer bir deyişle kompozit malzeme adı verilmektedir. Kompozit malzeme (karma malzeme) tasarımındaki amaç, farklı özelliğe sahip malzemelerin mekanik, mukavemet, akustik ve farklı kimyasal özellikteki herhangi birinin veya birkaçının geliştirilmesidir. Kompozit malzemeler günümüz teknolojisinin her alanında kullanılmaktadır. Bilhassa teknolojik ürünlerde, spor ekipmanlarında, uzay ve havacılık sanayiinde, savunma sanayinde, otomotiv sanayinde ve sağlık sektörü gibi daha birçok alanlarda rahatlıkla kullanılmaktadır.

Kompozitten imal edilen malzemelerin diğer malzemelere nazaran önemli iki büyük faydası bulunmaktadır. Bunlar; malzemelerin ağırlığı bakımından kıyaslandığında, hafiflik, ve rijitliktir (dayanım). Genellikle kompozit malzemeler metal malzemelerle aynı mukavemet ve rijitlikte imal edildiğinde %60 daha hafif olur. Ayrıca, özel olarak geliştirilen bazı tip kompozitler ise uçaklarda temel malzeme olarak kullanılan alüminyum malzemelerden 3 kat daha dayanıklı ve % 50 ila % 60 oranlarında daha hafiftirler. Teknolojik alanlarda mukavemet/ağırlık, mukavemet/yoğunluk oranları gibi malzeme özellikleri önemli bir yer tutmaktadır.

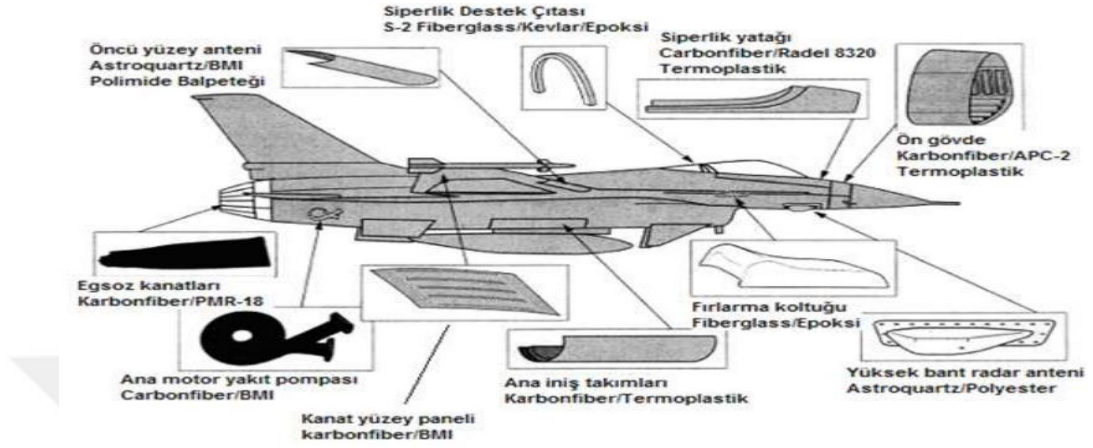
Ağırlığın önemli olduğu yerlerde kullanılan malzemelerde, mukavemet sınırlarının zorlanması, belirli kurallar içinde farklı malzemeler ile birleştirilerek özelliklerin iyileştirilmesi, önemli gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Tek bir malzeme kullanmak ve sınırlı mekanik özelliklerle yetinmek yerine, iki yada daha fazla sayıda değişik malzemeyi birleştirip kullanma düşüncesi kullanışlı ve başarılı olmuştur. Tüm bu avantajlar uçak ve uzay araçlarında kompozit malzemelerin her geçen gün artan oranlarda kullanılmasına olanak sağlamıştır.

3.1. Kompozitten İmal Edilen Malzemelerin Kullanım Alanları

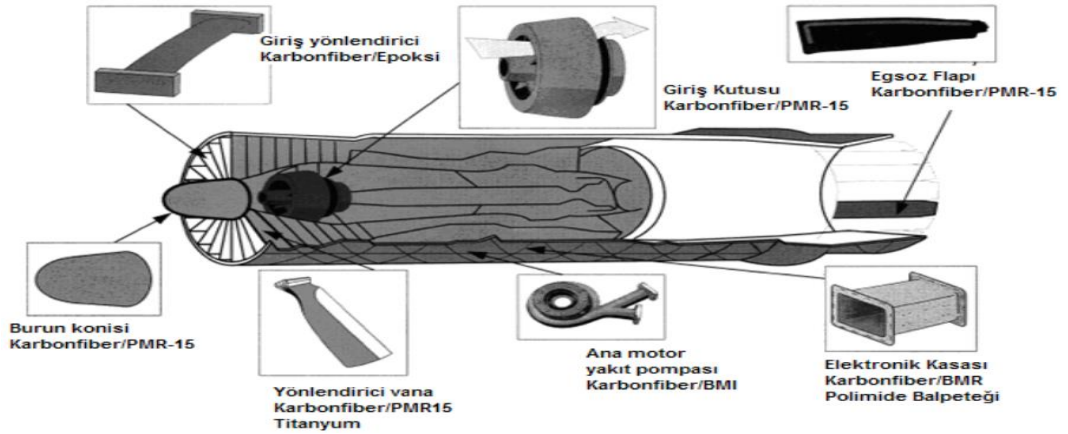
3.1.1. Havacılık ve Uzay Sektörü Alanı

Kompozitten imal edilen malzemelerin havacılık ve uzay sanayinde kullanılmasının asıl amacı hafif oluşlarıdır. Hava ve uzay araçlarında, fazladan bir kilogramı uzaya fırlatmanın maliyeti çok yüksektir. Bununla birlikte, güneş ışınları altında kullanılan malzemelerin çok çok düşük ısıl genleşmeye sahip olması zorunludur. Örneğin askeri

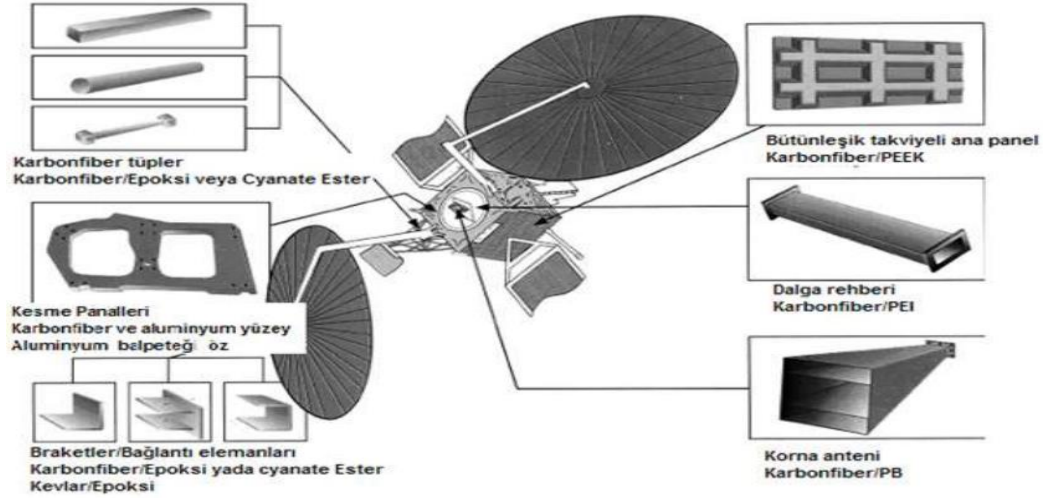
uçakta, uçak motorunda kompozit malzeme kullanılması ve Hubble uzay teleskopunda grafit epoksiden üretilmiş kafes sistem kullanılması aşağıda verilen şekillerde, 3.1, 3.2 ve 3.3'te görülmektedir [64, 66, 76].



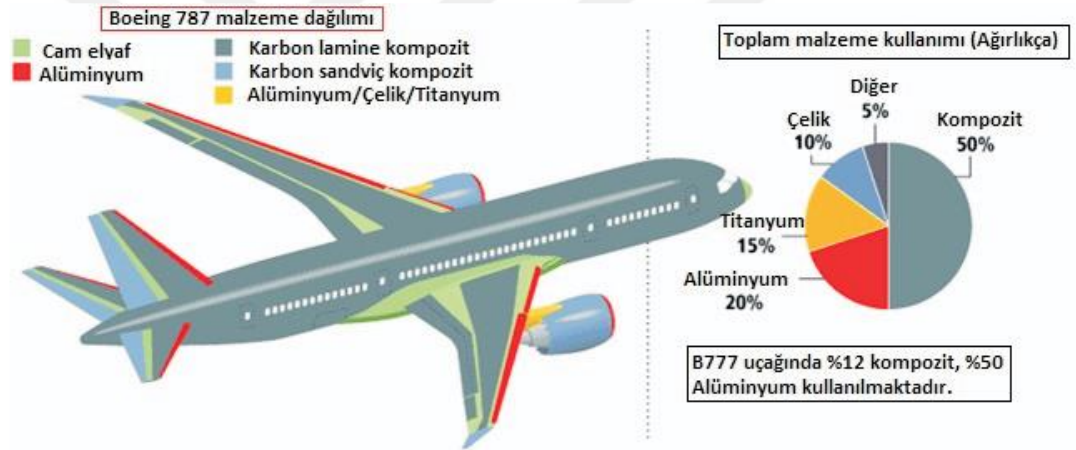
Şekil 3.1. Askeri uçakta kompozit malzeme kullanımı



Şekil 3.2. Uçak motorunda kullanılan kompozit malzemeler



Şekil 3.3. Uydu sistemlerinde kullanılan kompozit malzemeler



Şekil 3.4. Boeing 787 uçağındaki kompozit parçalar [76]



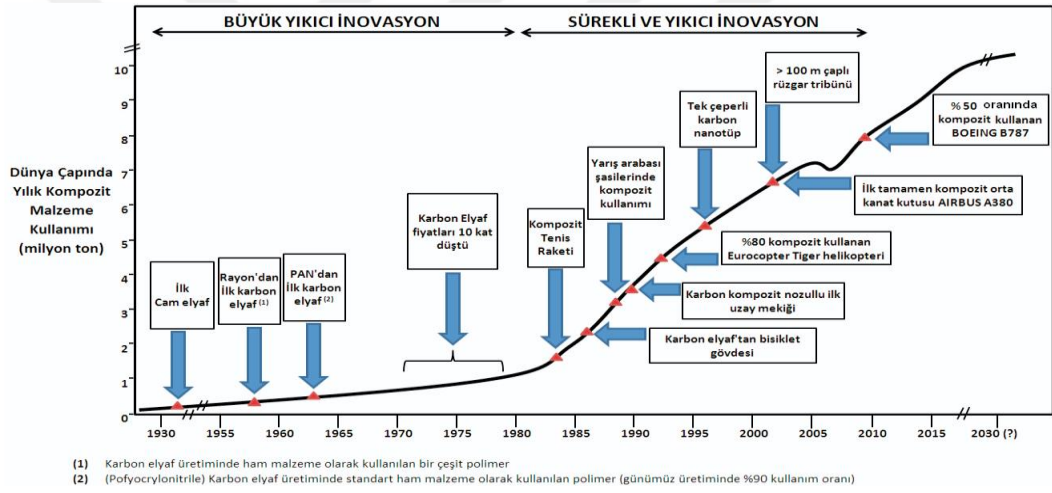
Şekil 3.5. Hayalet uçak [66]



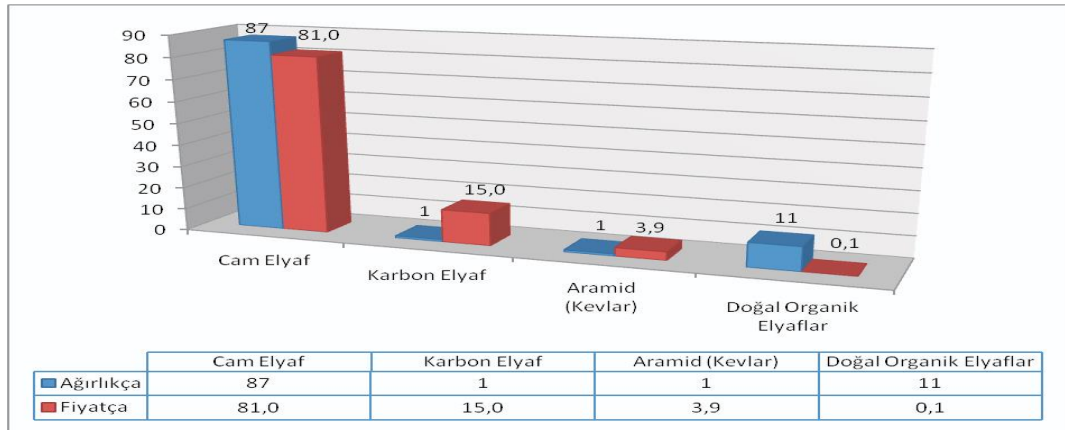
Şekil 3.6. Rutan Voyager uçağı [66]



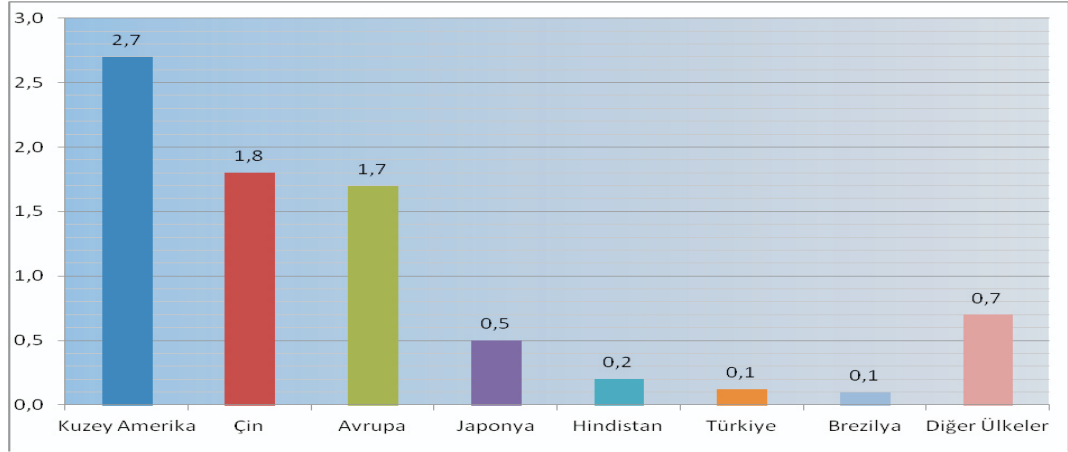
Şekil 3.7. Havacılık sanayiinde kompozit malzeme kullanılarak üretilen araçlar



Şekil 3.8. Kompozit gelişim süreci [76]



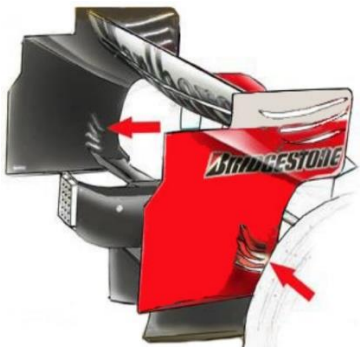
Şekil 3.9. Kompozit malzeme türlerinin ağırlıkça ve fiyatça kullanım oranları [76]



Şekil 3.10. Ülkelerdeki kompozit malzeme tüketim miktarı (Milyon Ton) [76]

3.1.2. Otomotiv Sanayi

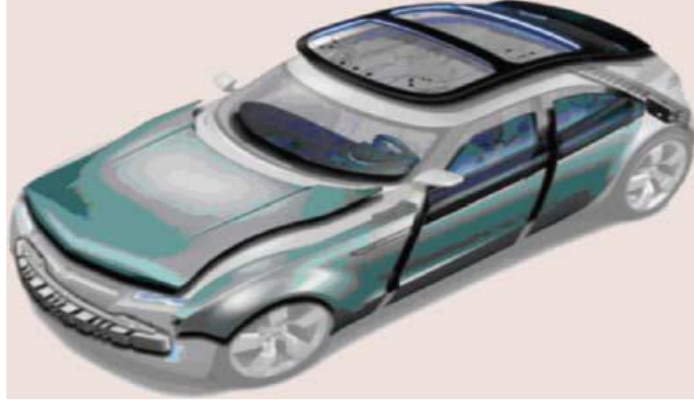
Otomotiv sanayinde kompozit malzemelerin kullanılmasının amacı, aracın daha hafif olmasını sağlamak, yakıt sarfıyatını düşürmek, güvenilirliğini ve performansını artırmaktır. Formula 1 aracın arka kanadı yol tutuş açısından hayati bir parçadır. Yapısında malzeme olarak kompozit malzeme kullanılır. Parça yere basma kuvveti yaratır (Şekil 3.11). Aynı şekilde F1 yarış arabalarının burun sistemleri de eskiden metalden üretilmek yerine, hafif ve dayanıklı bileşenler kullanmak adına kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 3.12). Ayrıca, parçaları metal civatalar gibi bağlantı parçaları ile birleştirmek yerine epoksi reçinesi ile birbirine bağlamak daha uygun olabilmektedir. Otomotiv sanayinde kompozit malzeme kullanımı aşağıda verilen şekillerde görülmektedir [76].



Şekil 3.11. F1 yarış arabasının arka kanat kısmında kullanılan kompozit malzeme



Şekil 3.12. F1 yarış arabasının burun kısmında kullanılan kompozit malzeme



Şekil 3.13. elektrikli araçta kompozit malzeme kullanımı

3.1.3. Spor Endüstrisi

Bu spor ve oyun ekipmanlarını gruplamamız gerekirse ;

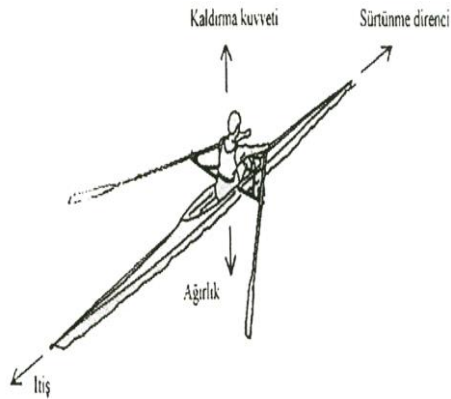
a) Raketler, balık oltaları, bisikletler, kayaklar, kriket sopası gibi sporcuların ya da oyuncuların üzerlerinde taşıdıkları, tuttukları yani organları ile bağlantılı ekipmanlar.

b) Toplar; badminton topu, golf topu, masa tenisi ve tenis topu gibi bağımsız harekete sahip ekipmanlar.

Yukarıdaki ekipman gruplarının istedikleri özellikler;

a grubu; yüksek sertlik, dayanım ve hafiflik özelliklerini optimum olarak karşılanması.

b grubu; yüksek esneklik ve elastikiyet, toplarda özellikle enerji transfer özelliğinin maksimuma çıkarılması.



Şekil 3.14. Bir bota ya da tekneye etkiyen kuvvetler güçlendirilmiş karbon



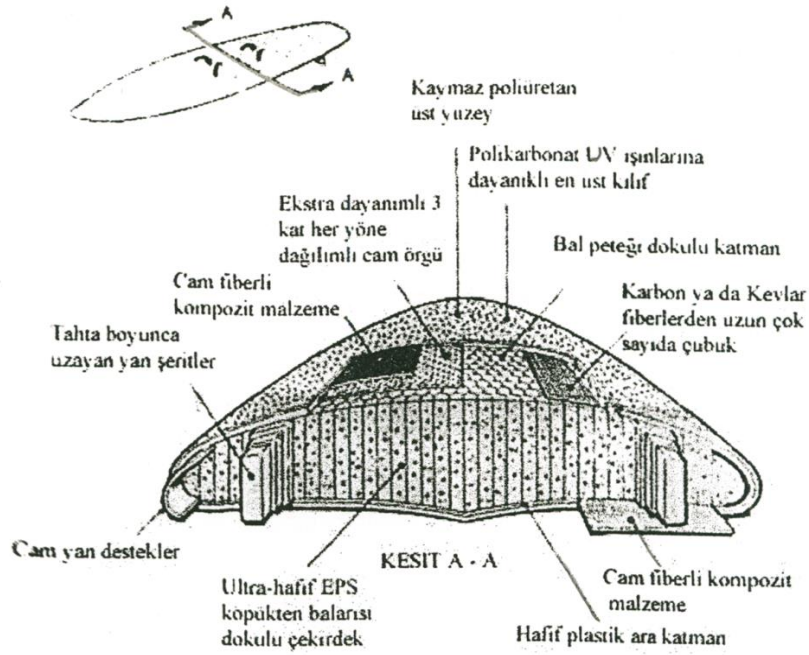
Şekil 3.15. İskeleti epoksi ile fiberden yapılmış bir bisiklet [26]



Şekil 3.16. Karbon elyaf kullanılan 29 metrelik gemi direği



Şekil 3.17. Gövdesi kompozit malzemeden üretilen yat teknesi



Şekil 3.18. Bir sörf tahtasının birçok farklı özellikli kompozit ve polimer malzemenin katlandırılmasından oluşan A-A kesitli şekli.



Şekil 3.19. Kompozit malzemeden üretilen dalgıç palet

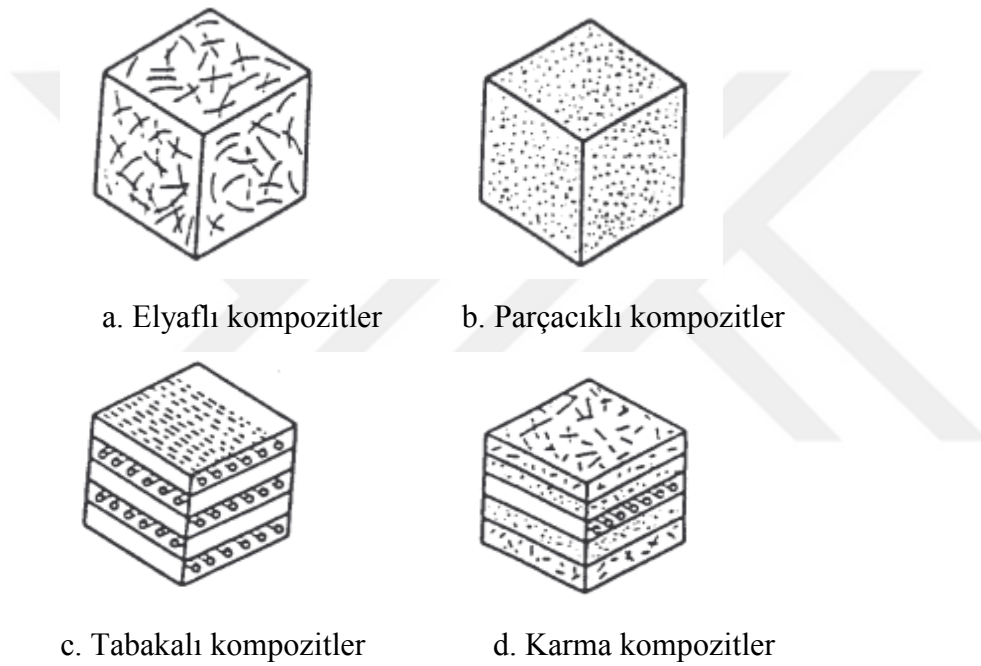


Şekil 3.20. Kompozit malzemeden üretilen kasket

Kompozitlerin diğer kullanım alanları olarak; inşaat sektörü, tarım sektörü, ev aletleri, elektronik sektörü, mobilya sektörü, taşımacılık sektörü, iş makineleri, motor sporları kaskları, kurşun geçirmez yelekler vb. gibi birçok alan sayılabilir.

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Bileşimlerinde birden fazla farklı malzeme kullanılabilen kompozitler dört grupta incelenir. Bu dört grup aşağıda Şekil 3.21’de görülmektedir,



Şekil 3.21. Kompozit malzemelerin gruplandırılması

3.2.1. Elyafli Kompozitler

Bu kompozit çeşidi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet, elyaflara dik doğrultuda ise daha az mukavemet oluşur.

Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca elyafların uzunluk/çap oranının yükselmesi halinde matris tarafından elyaflara

iletileen gerilme miktarı da yükselir. Elyafların yapısının eksiksiz olması, mukavemet bakımından büyük önem arz eder. Ayrıca elyaf ile matris malzemesi arasında bulunan bağın yapısı da önemlidir. Matris malzemede boşlukların olması elyaflarla olan teması azaltacaktır.

3.2.2. Parçacıklı Kompozitler

Bir matriks malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilir. Yapıları izotropdur. Meydana gelen yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. Plastik matris içinde yer alan metal parçacıklar yaygın çeşitlerindendir. Metal parçacıkların ısı ve elektrik iletkenlikleri yüksektir. Bu yöntemle uçakların motor parçaları üretilir.

3.2.3. Tabakalı Kompozitler

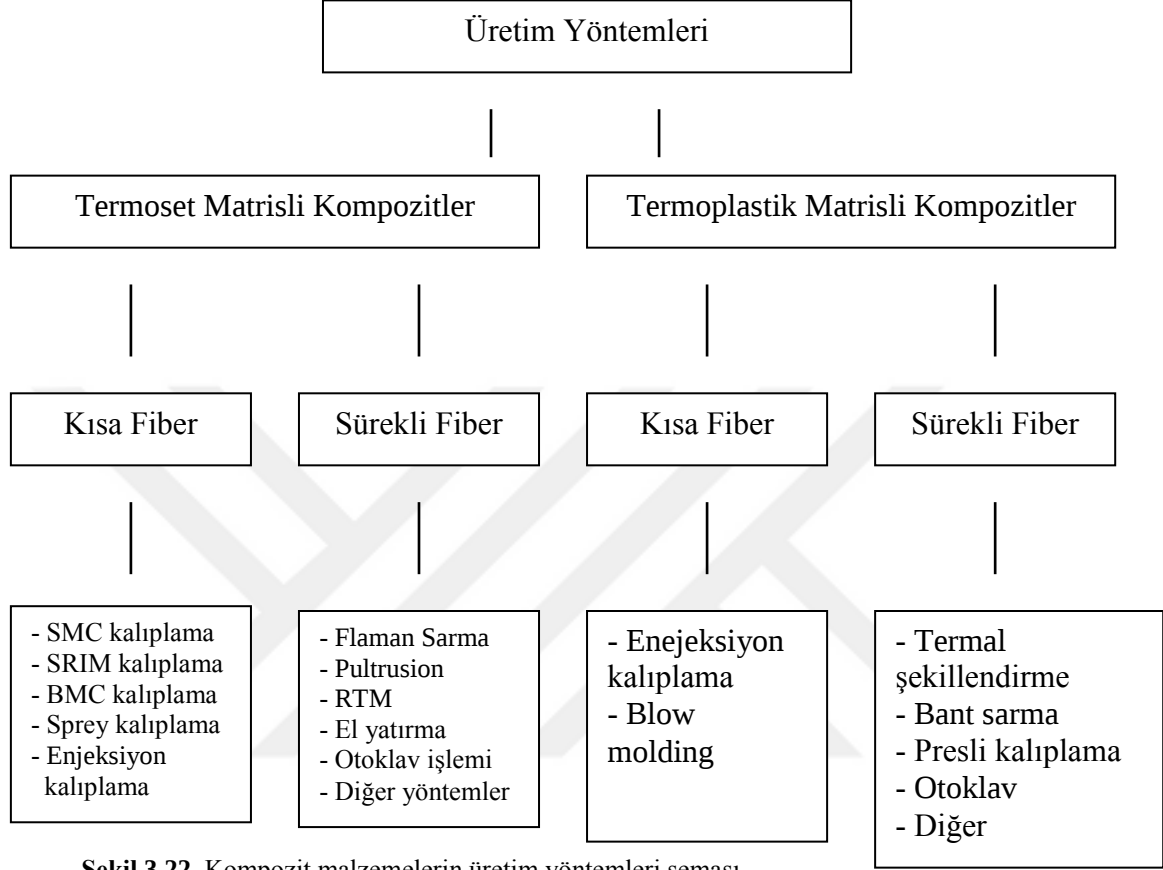
Kompozitlerde en fazla kullanım alanına sahip olan çeşit tabakalı olanlardır. Tabakalarda elyafların değişik yönlenmeleri ile mukavemet değerleri çok daha iyi duruma gelir. Bu tür kompozitlerin ısıya ve neme karşı dayanımı yüksektir. Ağırlık bakımından metallerden daha hafif ve mukavemet açısından daha sağlamdırlar. Uçakların kanat ve kuyruk kısımlarında yüzey kaplama malzemesi olarak tercih edilirler.

3.2.4. Karma (hibrid) Kompozitler

Karma (hibrid) kompozitlerin yapısında birden fazla elyaf türü mevcuttur. Kendisini meydan getiren kompozit malzemelerin istenilen özelliklerini de bünyesinde ihtiva eden olağanüstü kompozitlerdir. Örneğin, aramidin basma mukavemeti az olmasına rağmen tokluğu iyi maliyeti ise uygundur. Buna karşın grafitin ise basma mukavemeti yüksek, tokluğu az ve maliyeti yüksektir. Aramid ve grafit elyfaları kullanılarak elde edilen karma (hibrid) kompozitin tokluğu grafit elafinkinden daha iyi, maliyeti daha düşük, basma mukavemeti ise aramid elyafinkinden daha fazladır.

3.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri iki gruba ayrılır. Bunlar;



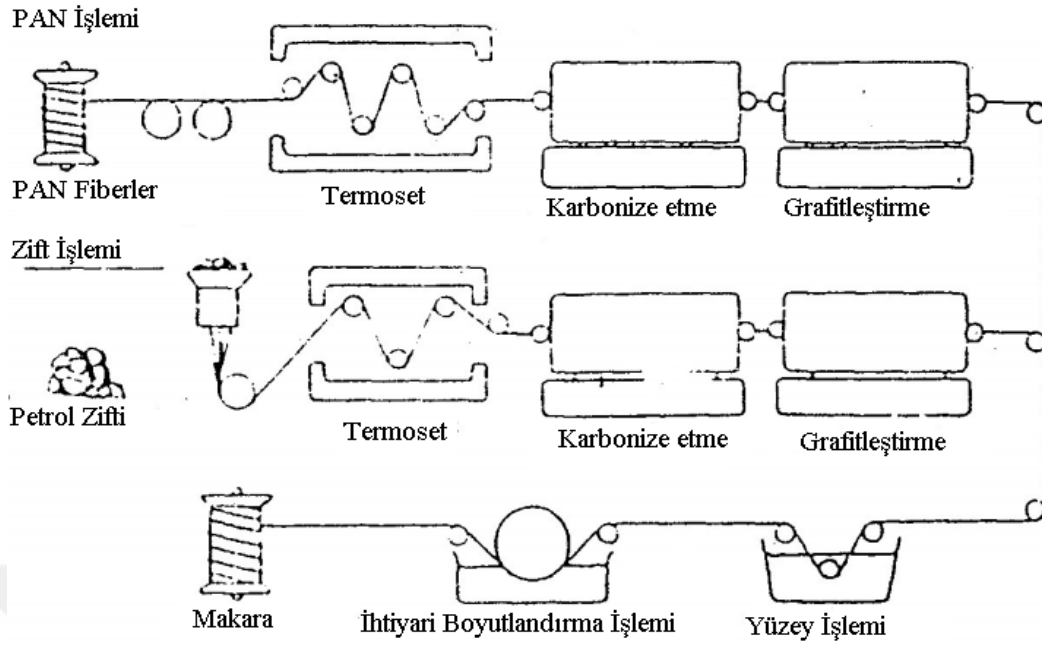
Şekil 3.22. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri şeması.

3.3.1. Karbon Fiber Üretimi

Karbon elyafların elektrik iletkenliğinin yüksek olması üretimlerine olan ilgiyi artırmıştır. Karbon elyafların epoksi reçine matrisi ile bütünleştirildiğinde çok yüksek sertlik ve mukavemete sahip olurlar. Karbon büyük çoğunlukta uçak sanayinde, spor ekipmanlarında, sağlık sektörü malzemelerinde kullanılırlar.

Günümüz teknolojisinde karbon elayfları üç malzemedan imal edilirler;

- Selüloz (Rayon),
- Poliakrilonitril (PAN)
- Petrol zifti.



Şekil 3.23. PAN ve Zift prosesleri ile karbon fiber üretimi

3.3.2. Elle yatırma yöntemi

İlk önce kalıbın iç yüzeyi temizlenir daha sonra kumaşı kalıptan rahat bir şekilde ayırmak için kalıba kalıp ayırıcı yani jelkot yapıştırılır. Kalıp içerisinde kumaşlar elle yatırıldıktan sonra kumaş üzerine rulo vasıtasıyla reçine elyafla bütünleştirilir. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. Daha sonra bu kumaşlar oda sıcaklığında ve atmosferik basınç altında bekletilir. Elle yatırma yöntemi, az sayıdaki malzemelerin imal edilmesinde çok yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yöntem, rüzgar türbin kanatları, plakalar, tekne üretimi, mimari amaçlı kalıplamalarda yaygın olarak kullanılır. Elle yatırma yöntemi aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Şekil 3.23 [80], Şekil 3.24).

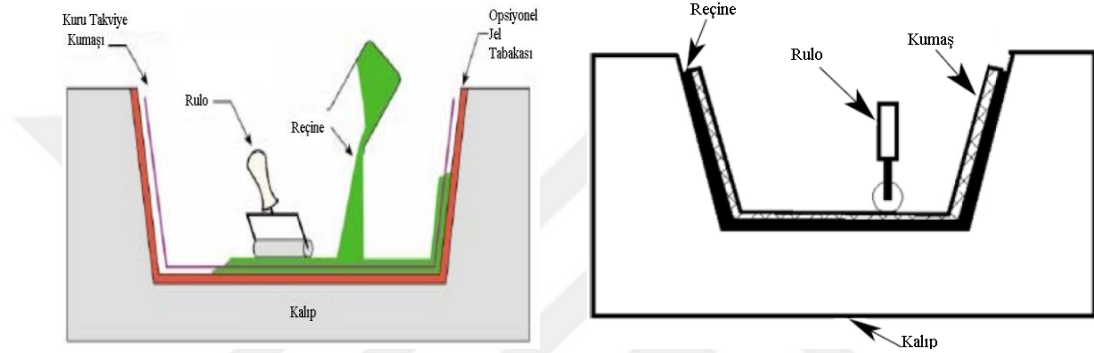
Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir;

Avantajları

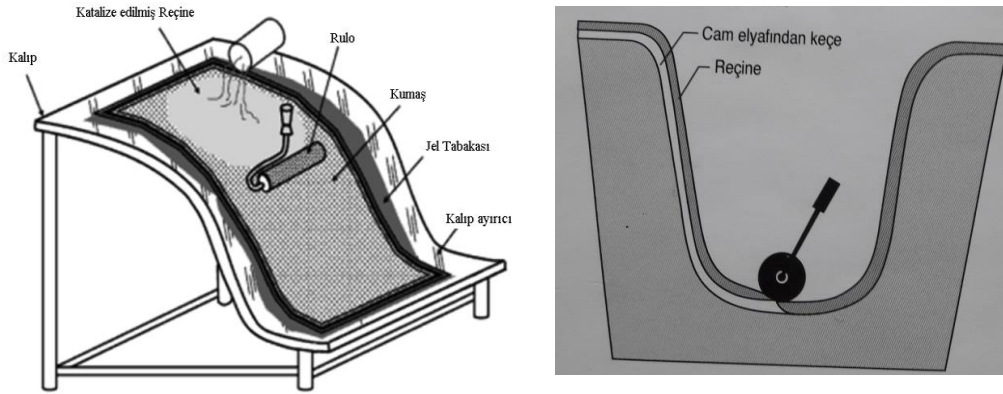
- Kolaylıkla uygulanan bir yöntemdir,
- Üretimin maliyeti daha azdır,
- Üretilen parçaya göre kolayca malzeme elde edilebilir,

Dezavantajlar

- Uzmanlaşmış işçilik gerektirir,
- Fiber hacimsel yoğunluğunun çok fazla olması istenir, buda zahmetlidir,
- Kalıp içerisindeki kumaşa hava boşluklarının ve reçine emdirilmemiş bölgelerin oranı fazla olabilir,
- İnsan sağlığına olumsuz etkileri mevcuttur,



Şekil 3.24. El yatırma yönteminin şematik gösterimleri



Şekil 3.25. El yatırma yöntemi

3.3.3. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin makineleşmiş şekli olarak kabul edilebilir. Kırpılmış cam elyafı ve atomize halde, hızlandıcısı ve sertleştiricisi katılmış reçinenin birlikte kalıp yüzeyine, hava basıncı ile çalışan bir makine aracılığı (tabanca) ile aktarılmasından ibarettir. Püskürtme tabancası üzerinde, reçine püskürtme memesi ve

bağımsız çalışan bir cam elyafı kırpıcısı bulunur. Kırpıcı, elyafın istenilen boyda kırılabilmesi için ayarlanabilmektedir. İşlem püskürtülen malzemenin rulolanması ile tamamlanır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur. Reçine olarak daha çok polyester kullanılır. Takviye malzemesi olarak demet halindeki lifler kullanılır. Uygulama Alanları; çeper türü basit yapılar, yük taşımanın esas olmadığı durumlar, banyo küvetleri vb. gibi. Püskürtme yöntemi şekil 3.25 [70] gösterildiği gibidir.

Bu yöntemin avantaj, dezavantajları şu şekilde özetlenebilir,

Avantajları

- Proses süresi kısadır,
- Maliyet azdır,
- Uygulanması kolay bir yöntemdir.

Dezavantajlar

- Ürünlerin ağırlığı reçine oranının fazla olmasından dolayı fazladır,
- Ürünlerin mekaniksel özellikleri elyaf liflerinin uzun olmamasından dolayı kısıtlıdır,
- Havayla temas eden yoğunluğunu standart limitlerde tutmak oldukça güçtür,
- Styrene yoğunluğunun fazlalığının insan sağlığına olumsuz etkileri vardır,

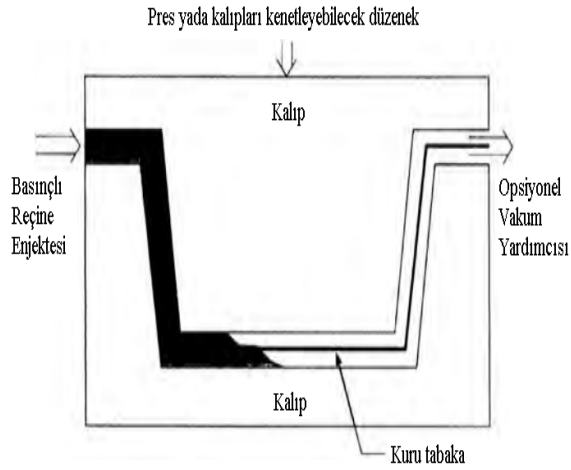


Şekil 3.26. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi

3.3.4. Reçine transferiyle kalıplama (RTM) yöntemi

Bu yöntemde iki parçalı kalıp kullanılır. Elle yatırma sistemlere nazaran daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki adet kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması çelik kalıba göre maliyetinin daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunlukla jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır (Şekil 3.26).

Takviye malzemesi olarak keçe, kumaş veya her ikisinin bileşiminden meydana gelir. Takviye malzemesi kalıp boşluğunu dolduracak şekilde kalıba yerleştirildikten sonra kalıbın kapanması sağlanır. Yüksek basınç altında reçine kalıp içerisine pompalanır. Vakum yardımıyla ve reçinenin elyafa iyice emdirilmesini sağlamada içerideki havanın dışarı atılmasında kullanılabilir. İşleme esnasında kalıbın kapalı olması oluşabilecek zararlı gazların oranını düşürür. Bu yöntemde karmaşık geometrik şekilli parçalar üretilbildiği gibi elde edilen üründe gözeneksiz bir yapı meydana gelebilir. Bu yöntem havacılık ve otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılır. Uygulama alanları; küçük tekne ve yatların gövdelerinde, tren ve kamyon gövdelerinde, rüzgâr türbin kanatları gibi yerlerde yaygın olarak tercih edilir.



Şekil 3.27. Reçine transferiyle kalıplama yönteminin şematik gösterimi

3.3.4.1. Vakum destekli reçine transferi (infüzyonu) ile kalıplama işlemleri

Bu yöntemin işlem adımları aşağıda belirtildiği gibidir;

- Kalıp boşluğu içerisine elyafların düzenlenmesi sağlanır,

- Düzenlenmiş elyafların, plastik bir vakum filmi ve çift taraflı sızdırmaz yapışkan macunları kullanılmasıyla, dış ortamdan ilişkisi kesilir,
- Vakum yardımı ile düzenlenmiş elyaflara reçine nüfuzu gerçekleştirilir.

Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir;

Avantajları

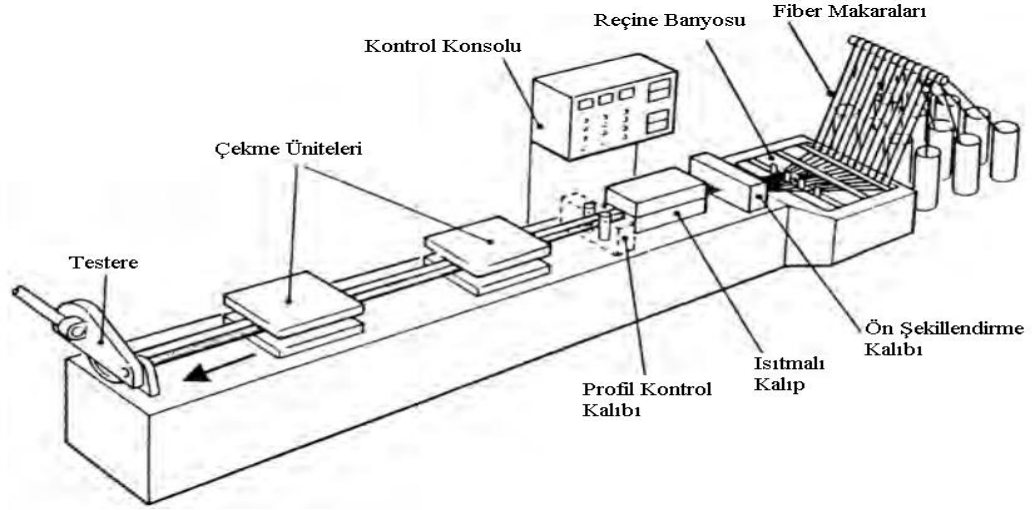
- RTM ye göre daha az kalıp ve üretim maliyetine sahiptir,
- Üretilen parça boyutları daha büyüktür,

Dezavantajlar:

- Bu yöntemde proses adımları karmaşıktır,
- Az miktardaki ve vizkozitesi düşük reçine kullanılması sonucunda elde edilecek ürünlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir,
- Dikkatli olunmaması halinde reçine ile temas etmemiş yerlerin oranı artabilir ve böylelikle işlem maliyeti yükselebilir.

3.3.5. Profil çekme (Pultrusion) yöntemi

Pultrusion (profil çekme), maliyeti düşük, büyük hacimde imalata olanak sağlayan, devamlı olan işlemdir. Bu yöntemde reçine emdirilmiş elyaflar bir kalıp boyunca çekildikten sonra profil çubuklar elde edilir. Pultrusion (profil çekme) ile sabit kesitli ve devamlı uzunluğa sahip ürünler elde edilebilir. Isıtılan bir kalıp içerisinde sabit bir hızla çekilen elyaflar dolayısıyla ürün kalıptan pişmiş olarak çıkar. Çıkarılan bu ürünlere ek bir yüzey işlemi gerekmez. Bu yöntemde matris malzemesi olarak epoksi, vinil ester ve polyester reçineler kullanılır. Çekirdek malzemelerin kullanımına elverişli değildir. Bu yöntemin şematik olarak gösterimi aşağıda şekil 3.27’de [81] gösterilmiştir. Bu yöntemin uygulama alanları köprüler, merdivenler, bina kafes sistemleri, balıkçı çubukları ve izolator boruları vb. olarak sayılabilir.



Şekil 3.28. Pultrüzyon sistemi

Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

Avantajları

- Yüksek mukavemet özelliklerine ve iyi korozyon direncine sahip ürünler elde edilir,
- yüksek yorulma dayanma sınırına sahip ürünler elde edilir,
- bu yöntemin işlenebilirliği kolay ve hızlıdır,
- az ısı iletkenliğe sahip ürünler elde edilir,
- ürünlerin elektrostatik olmama özellikleri iyi,
- ürünlerin darbe enerjisi sönümlene durumları iyi,
- ürünlerin ömrü fazla,

Dezavantajları

- sabit kesitli parça üretimi ile sınırlıdır,
- ısıtılmış kalıp kullanımı maliyetleri artırır,
- kesitte kalınlık değişimi fazla olduğunda imalat güçleşir,
- küçük ve karmaşık yapıdaki profillerin hassas ölçülerde üretimi güçtür,
- termoset matrislerin kırılma tokluğu azdır,
- montaj bağlama zorlukları mevcuttur.

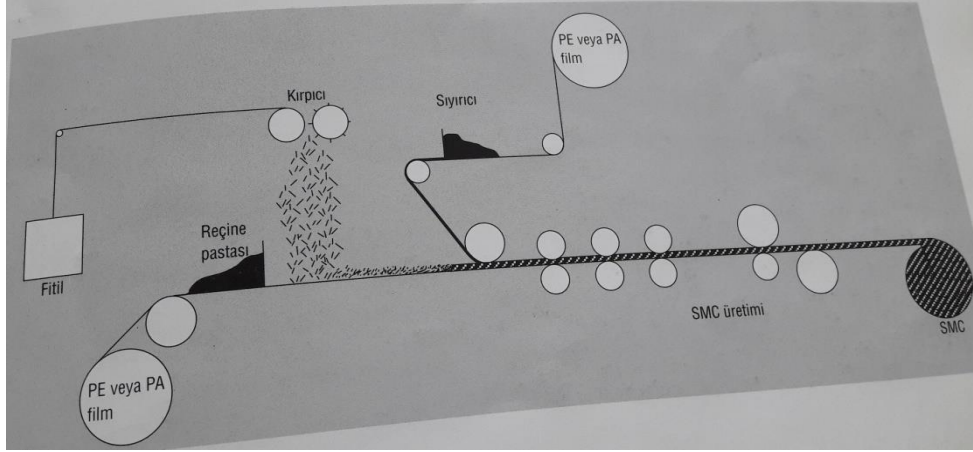
3.3.6. Hazır Kalıplama Pestili (SMC) Yöntemi

SMC takviye malzemesi olarak kırılmış fitil ve dolgu maddesi içeren bir polyester reçinenin, önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil halinde bir malzemedir. Kalıp içinde her yönde akma olanağı sayesinde, takviye kuşaklı ve farklı cidar kalınlıklı karmaşık şekillerin kalıplanabilmesine olanak sağlar.

Vinil ester, epoksi ve fenolik reçine ile yapılmış SMC pestilleri bulunmasına rağmen, ticari SMC formüllerinin çoğunda doymamış polyester reçine kullanılmaktadır. Reçine, katalizör, kalıp ayırıcı, dolgu, pigment ve istenilen hallerde kalıplama esnasında çekmeyi azaltıcı ve benzeri diğer katkılarla birlikte karıştırılır. Pasta adı verilen reçineye bu katkıların katılması sonucu vizkozitesi artar ve bileşenlerin homojen dağılımını sağlamak için güçlü karıştırıcılarla karıştırılır. Daha sonra, hareketli bir bant üzerine serilen bir filme Pasta tabakası kontrollü olarak dökülür ve bir sehpaye yerleştirilen cam fitil bobinleri çözülerek, bir kırpıcı ile 25 veya 50 mm uzunluğunda bu hareketli Pasta tabakası üzerine kırpılır.

İkinci bir film tabakası, karışım üzerine örtülür ve bir dizi merdaneden geçirilerek elyafın iyice ıslanması sağlanır. SMC pestil, daha sonra rulo halinde sarılarak iklimlendirilmiş ortamda olgunlaşması için beklenir.

Kalıplama esnasında, SMC pestili, kalıp yüzeyinden daha küçük parçalar halinde kesilir ve üstüste kalıp içine yerleştirilir. Pres kapatıldıktan sonra basınç ve sıcaklık etkisi ile malzeme akmaya ve kalıp boşluklarını doldurmaya başlar. Kalıbın sıcaklığı sayesinde polimerizasyon sağlanır ve kalıplama süresine göre malzeme şekillendirilerek sertleştirilir. Kalıplama basıncı, ürün yüzeyine göre 50-120 kg/cm² arasında; kalıplama sıcaklığı ise 150°C civarındadır.



Şekil 3.29. Hazır kalıplama pestili (SMC) şematik gösterimi

3.4. Kompozit Millerin İmalatında Kullanılan Yöntemler

3.4.1. Filaman Sarma Yöntemi

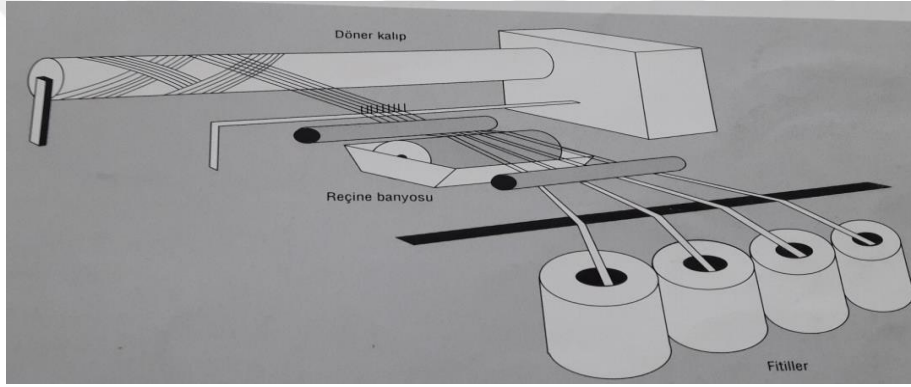
Bu yöntem, genellikle boru ve tank gibi içi boş parçaların üretiminde kullanılır. Devamlı cam, karbon ve kevlar elyafından fitiller, sıvı reçine ile ıslatıldıktan sonra, eksenini etrafında dönen mandrel üzerine, önceden belirlenmiş hatve aralığı ile sarılır. Üretim bir mandrel üzerine elyaf sarılması şeklinde olduğundan iç yüzeyi pürüzsüz ürünler imal edilir. Fitiller, kalıp yüzeyine değişik oryantasyon açılarda sarılabilmekte ve farklı mekanik özellikler sağlanabilmektedir. Bu yöntemle daha yüksek kalite ve mukavemette ürünler elde edilir.

Makinelerdeki gelişmeler sonucunda, günümüzde asimetrik parçalar da elyaf sarma yöntemi ile kalıplanabilmektedir. Elyaf sarma metodu;

- makineli bir üretim olması nedeniyle, hızlı bir CTP kalıplama yöntemidir,
- geniş bir makine çeşidi olanağı nedeniyle, nispeten düşük bir yatırım ile optimum ürün performans sağlar,
- takviye malzemesi olarak devamlı cam elyafı kullanılması sonucunda, göreceli olarak düşük malzeme maliyeti sağlar,
- %60-75 oranında cam elyafı takviye oranı elde edilmesi sonucunda, yüksek mekanik dayanım elde eder,
- Kalıplama sırasında, boyut doğruluğu ve tekrarlanabilirlik sağlanır.

Filaman sarma yöntemi ile üretilen ürünlerin kullanım yerler;

- a) **Endüstriyel alanda;** Proses tankları, depolama tankları, proses boruları, basıçlı borular, basınçlı tanklar, yer altı tankları, gaz yıkama kuleleri, bacalar, otomobil ve kamyon şaftları,
- b) **Askeri alanda ve Havacılıkta;** Roketatar gövdesi, roket gövdesi, roket muhafazaları, uçak ve planör gövdeleri, uçak kanatları, helikopter pervaneleri, uçak havalandırma kanalları,
- c) **Tarım alanında;** Sulama boruları, tahıl siloları, salamura tankları,
- d) **Çevre alanında;** Pissu boruları, arıtma havuzları ve tanklar, termal borular,
- e) **Spor alanında;** Hokey roketleri, golf sopaları,
- f) **Nakliye alanında;** Tren vagonları.



Şekil 3.30. Flaman sarma sistemi



Şekil 3.31. Flaman sarma sistemi ile üretilen borular

Bu yöntemin avantaj ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

Avantajları

- Malzeme sarımı hızlı ve ekonomik bir yöntemdir
- Reçine oranı el yatırma yöntemine göre daha iyi kontrol edilebilir
- Bobine sarılı lifler ikinci bir işlemde geçip kumaş haline getirilmediği için maliyet minimize edilmiş olur
- Her katmanda farklı yönlerde sarım yapma imkanı olacağı için değişik yüklemeler yapı tarafından karşılanabilir

Dezavantajları

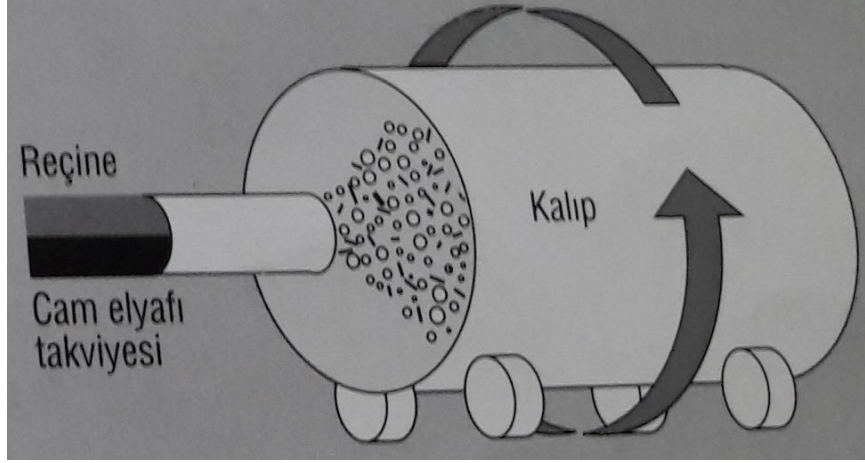
- Uygulama sahası konveks şekle sahip parçalar ile sınırlıdır,
- Büyük parçalar için sarımın yapılacağı mandreller pahalı olabilir,
- Düzgün bir dış yüzey elde etmek için parçanın pişme sonrası işlenmesi gerekebilir,
- Düşük viskoziteye sahip reçineler genellikle üretimde kullanılır. Bu da çeşitli sağlık sorunları ve mekanik özelliklerde düşüşü beraberinde getirir.

Uygulama Alanları; kimyasal depolama tankları, borular, gaz silindirleri, itfaiyecilerin kullandığı teneffüs tankları vb. gibi.

3.4.2. Santrifüj Kalıplama Metodu

Bu metot, genellikle her iki yüzeyi düzgün, rijit borusal parçaların üretiminde kullanılır. Elyaf takviyesi olarak, genellikle kalıplama sırasında kırılan bir fitil kullanılır, kırılmış elyaf ve reçine yüksek çevresel hız ile dönen kalıp içine dökülür. Santrifüj (Merkezkaç) kuvveti, reçine ile temas eden takviye liflerinin ıslatılmasını sağlar.

Santrifüj kalıplama metodu, boru, silo ve silindirik kapların imalatında kullanılır. Üretim, flaman sarma metodunda olduğu gibi dönen kalıp vasıtası ile yapılır.



Şekil 3.32. Santrifüj kalıplama ile üretim şeması

3.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları

1. Kompozit malzemelerin metallerle bütünleşme yeteneği iyidir.
2. Kompozitlerin rijitlik/yoğunluk oranı çok yüksektir.
3. Kompozit malzemelerin dayanıklılığı metallere göre çok daha iyidir ve metallerden çok daha hafiftir.
4. Kompozit malzemelerin dayanma sınırı yüksektir.
5. Kompozit malzemelerin korozyona karşı direnci yüksektir.
6. Kompozit malzemelerin tasarımında esneklik olanağı fazladır.
7. Kompozit malzemeler daha kısa proses süresine ve daha az maliyete sahiptir.
8. Kompozitlerin metallere göre performansı daha yüksek ve güvenilirliği daha fazladır.
9. Kompozitlerin montaj kabiliyeti yüksektir.
10. Kompozitlerin metallerle karşılaştırıldığında daha yüksek tokluğa sahiptir ve titreşimi, gürültüleri daha azdır. Bu özelliklerinden dolayı havacılık sanayindeki kullanılma miktarı çok fazladır.
11. Kompozitlerin metallere göre sıcaklık ve basınçtan etkilenmeleri daha azdır [64].

Tablo 3.1. Mühendislik malzemelerinin tipik özellikleri [64]

Malzeme	Yoğunluk (ρ) (g/cc)	Elastisite modülü (E) (GPa)	Çekme dayanımı (σ) (GPa)	Özel modül (E/ ρ)	Özel dayanım (σ/ρ)	Maksimum çalışma sıcaklığı (°C)
Metaller						
Dökme Demir	7.0	100	0.14	14.3	0.02	230-300
Çelik, AISI 1045	7.8	205	0.57	26.3	0.073	500-650
Alüminyum 2024-T4	2.7	73	0.45	27.0	0.17	150-250
Alüminyum 6061-T6	2.7	69	0.27	25.5	0.10	150-250
Plastikler						
Naylon 6/6	1.15	2.9	0.082	2.52	0.071	75-100
Polypropylene	0.9	1.4	0.033	1.55	0.037	50-80
Epoksi	1.25	3.5	0.069	2.8	0.055	80-215
Fenolik	1.35	3.0	0.006	2.22	0.004	70-120
Seramikler						
Alüminyum	3.8	350	0.17	92.1	0.045	1425-1540
MgO	3.6	205	0.06	56.9	0.017	900-100
Kısa lifli kompozitler						
Cam dolgulu epoksi (35%)	2.00	15.7	0.13	7.25	0.065	80-125
Cam dolgulu naylon (35%)	1.62	14.5	0.20	8.95	0.12	75-110
Cam dolgulu epoksi, (60%)	1.95	21.8	0.29	11.18	0.149	75-110
Tek yönlü kompozitler						
S-cam/epoksi (45%)	1.81	39.5	0.87	21.8	0.48	80-215
Karbon/epoksi (61%)	1.59	142	1.73	89.3	1.08	80-215
Kelvar/epoksi (53%)	1.35	63.6	1.1	47.1	0.81	80-215

4. MİLLER VE HESABI

Miller, üzerine takılı dişli çark, kasnak, kavrama vb. gibi elemanları taşıyan ve bu elemanlardan aldığı dönme momentini diğer elemanlara ileten, boyu çapına göre uzun olan dairesel kesitli elemanlardır.

Mil ve aks üretiminde kullanılan malzemeler genellikle çeliklerdir. Düşük karbonlu ve düşük mukavemetli imalat çeliklerinden yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklere kadar çeşitli çelikler mil yapımında kullanılır. Genel yapı çelikleri mil yapımında çok kullanılır. Bunlar Fe44, Fe50, Fe60, olup (St42, St50, St60 ve St70 çelikleri) karbon oranları (%C) ortalama 0.35 civarındadır. Bu mil malzemelerine Mo, W, V, gibi alaşım elemanları katılarak millere üstün özellikler kazandırılır.

Büyük yüklerde veya yüzey sertleşmesinin gerekli olduğu durumlarda ıslah çelikleri (C35, 40Mn4, 34Cr4 gibi) Sementasyon çelikleri (C15, Ck15, 16MnCr5, 25MoCr4 gibi) Cr-Ni'li sementasyon çelikleri (42CrMo4, 18CrNi8), CrNi'li ıslah çelikleri hem sıcaklığa hem de korozyona karşı dayanıklı oldukları için en çok kullanılan mil malzemeleridir. Bazı durumlarda paslanmaz çelikler (Gıda ve Kimya endüstrisinde) de tercih edilebilmektedir.

Miller, çevirme hareketlerini, kuvvetleri ve burulma momentlerini taşıdıkları ve kendilerine bağlanmış konstrüksiyon elemanlarıyla iletirler. Miller, bir makine elemanından diğer makine elemanına güç ilettiklerinden dolayı en tehlikeli gerilme olan burulma gerilmesine maruz kalırlar. Miller, üzerindeki elemanlardan dolayı eğilmeye, dönmeden dolayı da burulmaya maruz kaldıklarından hesaplamalar genellikle bileşik gerilmelere göre yapılır ve bu hesaplamalara göre de konstrüksiyonları ve şekillendirmeleri yapılır. Miller görünüşlerine ve eksenlerine göre sınıflandırılırlar. Uygulamada kullanılan belli başlı miller,

- Düz miller
- İçi boş miller
- Faturalı miller
- Dirsekli miller (krank milleri)
- Mafsallı miller
- Esnek miller

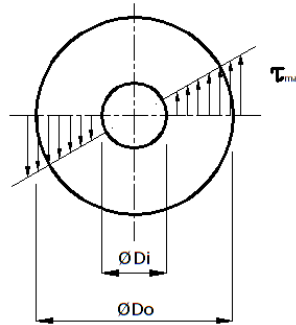
şeklinde olabilmektedir. Genel olarak bir milin yatak içinde kalan kısmına muylu denir. Eğer milin bütün muyluları aynı eksen üzerinde ise düz mil, birden çok eksen üzerinde ise

dirsekli mil veya krank mili adını alır. Sabit kesitli dolu mil, kademeli (faturalı) mil, içi boş mil düz miller grubundadırlar. Krank millerinde ana muylular ile biyel muyluları aynı ekseninde değildir. Bu miller motorlarda öteleme hareketini dönme hareketine dönüştürüp moment iletmeye yardımcı olur. Mil ve aksların boyutlandırılması ve şekillendirilmesinde prensipler aynıdır. Farklılık, üretim sonrası kullanımda beklenen fonksiyonlara göre ortaya çıkmaktadır. Miller genellikle dairesel kesitli yapılardır ve 150 mm çapa kadar yuvarlak çelikten tavlansak, tornalama veya soğukta çekilerek üretilirler. büyük çaplı miller, faturalı miller ve krank milleri dövülerek üretilir. Muylu ve fatura uçları istenen hassasiyete göre tesviye, hassas taşlama gibi işlemlere tabi tutulur.

İçi boş millerle malzemeden tasarruf edilerek daha hafif konstrüksiyon elde etmek mümkündür. Bu ekonomiklik, milin hazır borulardan işlenerek üretilmesi halinde daha da anlamlı olabilecektir. Dolu bir milden talaş kaldırarak içi boş mil imal etmek ekonomik olmayacaktır. Hatta uygun çap ve et kalınlığında borunun bulunmaması halinde delerek boş mil elde etmek de pahalı bir yöntem olacaktır. Bu nedenle içi boş miller özellikle otomotiv sanayi ile uzay ve havacılık sanayinde çok fazla kullanılmaktadır

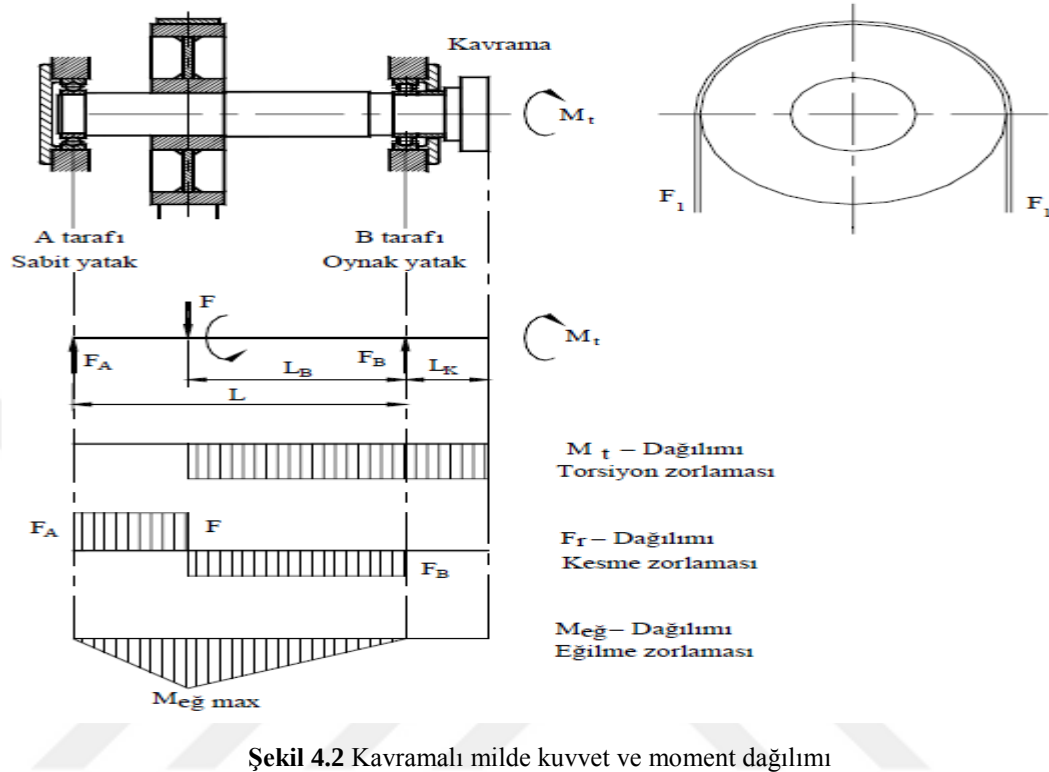
İnce uzun millerin üretiminde kullanılan çubuklar talaşlı imalat öncesinde eksen düzeltme veya doğrultma işlemine tabi tutulabilir. Farklı çaplarda bir çok bölümler taşıyan ve belirli bir sayının üzerinde imal edilecek millere sıcak dövme işlemi ile ön şekil verilerek malzeme ve talaşlı imalat maliyeti düşürülebilir. Genellikle mil ve aks imalatında tornalama, frezeleme ve taşlama işlemleri ana işlemlerdir. Bazı durumlarda özellikle küçük miller bütünüyle sertleştirme işlemine tabi tutulabilir. Diğer bazı millerde ise belirli bölümlerde yüzey sertleştirme uygulanabilir [82].

Kayma gerilmeleri milin merkezinde sıfır ve dış yüzeylerde de maksimum değere ulaşır. Burulmaya maruz bir milde en büyük gerilme milin dış yüzeyinde meydana gelir (şekil 4.1) [1].



Şekil 4.1. Milin dış yüzeyinde en büyük kayma gerilmelerinin oluşması

Miller en genel halde, Mukavemete Göre, Deformasyona Göre ve Titreşime göre hesaplanırlar.



Kuvvetler şu şekilde belirlenir:

$$\Sigma M_b = 0$$

$$\Sigma F_Y = 0$$

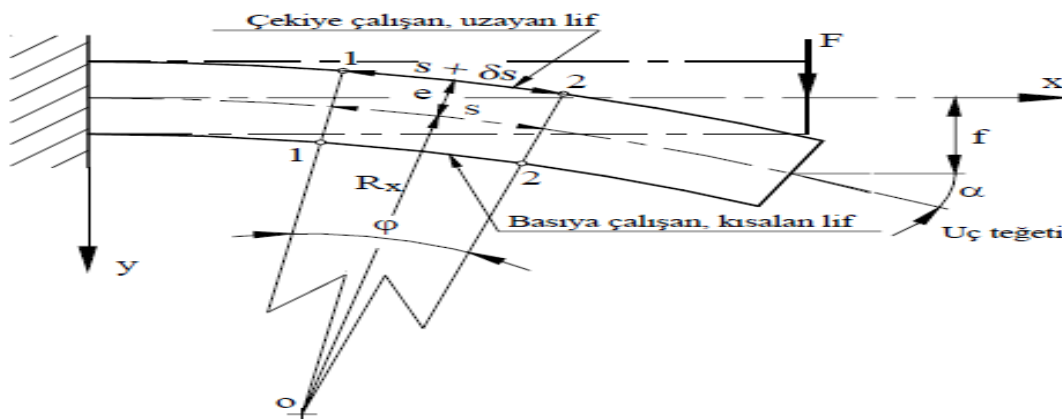
$$F \cdot L_b = F_A \cdot L = 0$$

$$F - F_A - F_B = 0 \quad [4.1]$$

$$F_A = \frac{F \cdot L_b}{L}$$

$$F_B = F - F_A \quad [4.2]$$

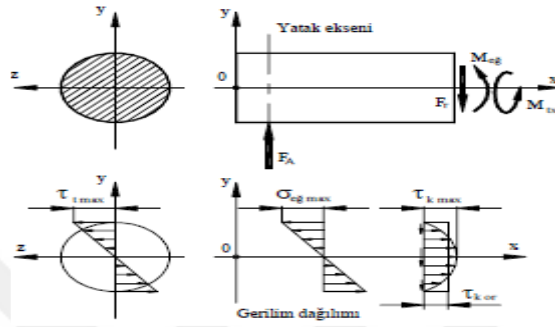
4.2. Millerde eğilme deformasyonu



Şekil 4.3. Milde eğilme deformasyonu

4.3. Millerde eğilme mukavemet hesabı

Millerde mukavemet hesapları seçilen hesaplama kesitindeki toplam maksimum gerilme ile o kesitin devamlı mukavemet değerinin kıyaslanması ile yapılır. Millerde de devamlı mukavemet değeri akslarda olduğu gibi " Biçim değiştirme Enerjisi Hipotezi" ile belirlenir.



Şekil 4.4. Milde meydana gelen eğilme gerilmeleri

4.3.1. Toplam gerilmeler " δ_{Top} "

Pratikte en çok rastlanan millerin zorlanması Şekil 4.4'te görülmektedir. Burada toplam hesaplanan gerilme, eğilme gerilmesi ile kayma gerilmelerinin toplamıdır. Elastik eğilme teorisine göre max eğilme gerilmesi (eğilen kesitte lineer eğilme gerilmesinin dağılımı) kesit kenarındadır. Diğer taraftan aynı yerde, kesit kenarında, kesme gerilmesi sıfır ($\tau_k = 0$, Şekil 6.4'te gösterilmiştir), fakat burulma gerilmesi de maksimumdur.

Hesabın yapıldığı kesitteki (burada "x" kesiti) BEH' ye (Biçim değiştirme enerjisi hipotezi) göre, toplam gerilme teorik olarak şu formülle hesaplanır:

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_x^2 + 3.(\alpha_0 \cdot \tau_x)^2} \quad [4.3]$$

Bileşke gerilmeler,	σ_B	(MPa)
Toplam normal gerilmeler,	σ_x	(MPa)
Zorlanma katsayısı,	α_0	(1)
Toplam kayma gerilmeleri	τ_x	(MPa)

4.3.2. Toplam normal gerilmeler " σ "

Hesaplanan x-x kesitindeki toplam normal gerilmeler " σ " şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} \text{Normal gerilmeler:} & \sigma_{\text{Top}} = \sigma_{\text{eğ}} + \sigma_{\text{ç,b}} & [4.4] \\ \text{Toplam normal gerilme, } \sigma_{\text{Top}} & (\text{MPa}) \\ \text{Eğilme gerilmesi, } \sigma_{\text{eğ}} & (\text{MPa}) \\ \text{Çeki veya bası gerilmesi, } \sigma_{\text{ç,b}} & (\text{MPa}) \end{aligned}$$

Eğilme gerilmesi " $\sigma_{\text{eğ}}$ "

Elastik eğilme teorisine göre bir kesitte max eğilme momenti, lineer gerilme dağılımı ile, o kesitin kenarında etkili olur ve şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_{\text{eğ}} = \frac{M_{\text{eğ}}}{W_{\text{eğ}}} \quad [4.5]$$

$$\begin{aligned} \text{Eğilme gerilmesi, } \sigma_{\text{eğ}} & (\text{MPa}) \\ \text{Eğilme momenti, } M_{\text{eğ}} & (\text{Nmm}) \\ \text{Eğilme karşı koyma momenti, } W_{\text{eğ}} & (\text{mm}^3) \end{aligned}$$

Eğilme momenti (örnek A tarafı):

$$M_{\text{eğ}} = F_A \cdot L_A \quad [4.6]$$

Hesaplanan kesitteki eğilme karşı koyma momenti "Steiner teoremi" ile hesaplanır veya hesaplanmış değer literatürdeki tablolardan alınır.

Dolu dairesel kesit;

$$W_{\text{eğ}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad [4.7]$$

İçi boş dairesel kesit;

$$W_{\text{eğ}} = \frac{\pi(D_d^3 - D_i^3)}{32} \quad [4.8]$$

Çeki veya bası gerilmesi " $\sigma_{\text{ç, b}}$ "

Çeki veya bası gerilmesi şu şekilde hesaplanır:

$$\sigma_{\text{ç,b}} = \frac{F_n}{A} \quad [4.9]$$

Hesaplanan kesitteki normal kuvvet, F_n (N)

Hesaplanan kesitin alanı, A (mm^2)

Dolu dairesel kesit,

İçi boş dairesel kesit;

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad [4.10]$$

$$A = \frac{\pi(D_d^2 - D_i^2)}{4} \quad [4.11]$$

4.4. Millerde burulma deformasyonu

4.4.1. Toplam kayma gerilmeleri " τ_{Top} "

Hesaplanan x-x kesitindeki toplam kayma gerilmeleri " τ " şu şekilde hesaplanır:

$$\tau = \tau_t + \tau_k \quad [4.12]$$

Toplam kayma gerilmesi, τ_{Top} (MPa)

Burulma gerilmesi, τ_t (MPa)

Kesme gerilmesi, τ_k (MPa)

Burulma gerilmesi " τ_t "

İçi boş dairesel bir mil burulmaya tabi tutulduğunda belli bir miktarda burulma yükü ortaya çıkar. Bu yüzden burulma hareketli millerin imalatında önemlidir. Hatta bu parametre kompozit millerin sıklıkla uzun üretilmelerinden kompozit millerin imalatında kritik bir değere sahiptir. Pratikte kullanılan mil kesitleri ya dolu yuvarlak veya içi boş (boru kesiti) olarak görülür.

Burulma gerilmesinde eğilme gerilmesi gibi lineer gerilme dağılımı ile, o kesitin kenarında maksimum etkili olur. Maksimum burulma gerilmesi şu şekilde hesaplanır:

$$\tau_{t \max} = \frac{M_t}{W_t} \quad [4.13]$$

Burulma gerilmesi, $\tau_{t \max}$ (MPa)

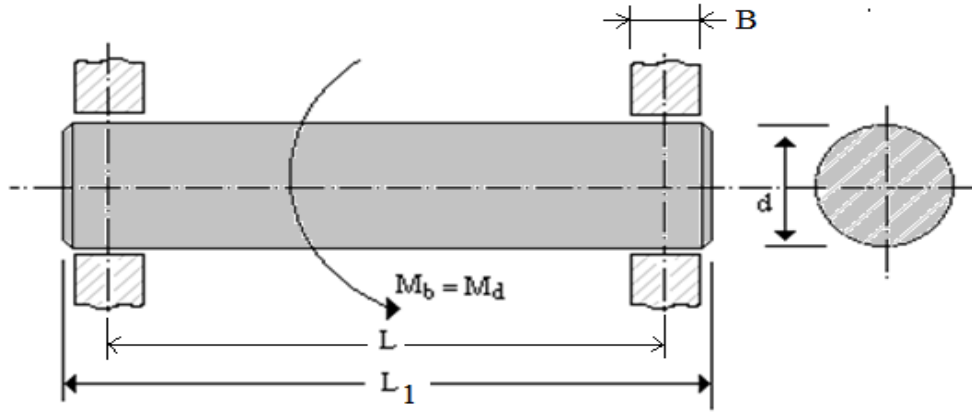
Burulma momenti, M_t (Nmm)

Eğilme karşı koyma momenti, W_t (mm³)

Aynı kesit alanına sahip kesiti yuvarlak olmayan millerde gerilmeler yuvarlak kesitli millerden daha büyüktür.

Burulma momenti " M_t "

Hesaplanan kesitteki burulma momenti ya $M_t = \text{Kuvvet} \times \text{Kuvvet kolu (mesafe)}$ olarak veya mildeki güç ve devir sayısına göre hesaplanır. Burulma momenti güç ve devir sayısına göre şu şekilde hesaplanır:



Şekil 4.5. Burulmaya tabi tutulan mil

$$M_t = \frac{P}{\omega} = \frac{30P}{\pi \cdot n} \quad [4.14]$$

Burulma momenti, M_t (Nmm)

Güç, P (W)

Açısal hız, ω (s^{-1})

$$M_t = 9,55 \cdot 10^6 \cdot \frac{P}{n} \quad [4.15]$$

Burulma momenti, M_t (Nmm)

Hesaplanan mildeki güç, P (kW)

Hesaplanan milin devir sayısı, n (d/dak)

Hesaplanan kesitteki burulma karşı koyma momenti " W_t " ya hesaplanır veya hesaplanmış değer literatürdeki tablolardan alınır.

Dolu dairesel kesit,

$$W_t = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad [4.16]$$

İçi boş dairesel kesit;

$$W_t = \frac{\pi(D_d^3 - D_i^3)}{16} \quad [4.17]$$

Kesme gerilmesi " τ_k "

Millerde kesme gerilmesi akslarda olduğu gibi hesaplanır, Kesme gerilmesi

$$\tau_k = k_\tau \cdot \frac{F}{A} \quad [4.18]$$

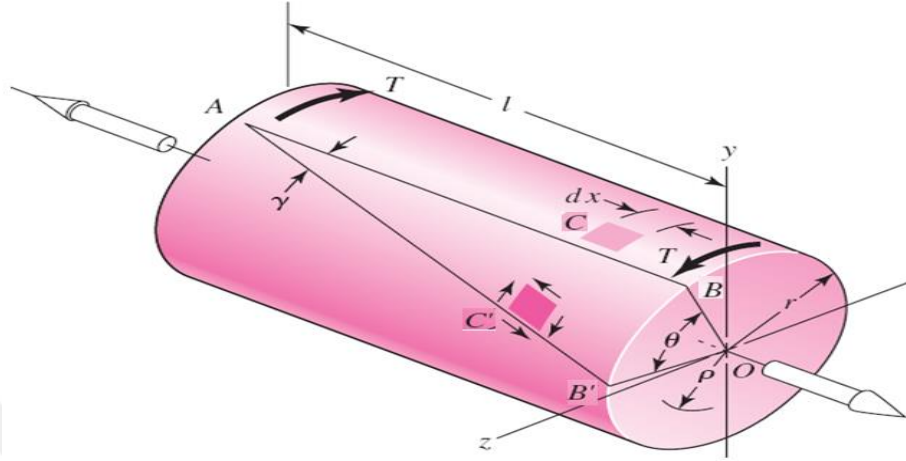
Kesme gerilmesi, τ_k (MPa)

Kesme faktörü, k_τ (11)

Kuvvet, F (N)

Alan, A (mm^2)

Döndürme momenti ileten bir milde açısal dönme veya burulma açısı mil uzunluğu L ve burulma momenti M_b ile doğru orantılı, kesit kayma modülü ve polar atalet momentıyla ters orantılıdır. Buna göre Şekil 4.6'da gösterilen θ burulma açısı,



Şekil 4.6. Burulma deformasyonu

$$\theta = \frac{M_b L}{G I_p} \leq \theta_{em} \quad [4.19] \text{ şeklinde olmalıdır.}$$

G: Kayma modülü

$$I_p = \frac{\pi(D_d^4 - D_i^4)}{32} \quad [4.20]$$

$$\text{Bu eşitlik } \tau \text{ kayma gerilmesi cinsinden } I_p = W_p \frac{D_d - D_i}{2} \quad [4.21] \text{ ve } \tau = \frac{M_b}{W_b} \quad [4.22]$$

kullanılarak,

$$\theta = \frac{2 \cdot \tau \cdot L}{G(D_d - D_i)} \leq \theta_{em} \quad [4.23]$$

4.5. Millerde Titreşim kontrolü

Miller taşıdıkları elemanlara göre nispeten esnek elemanlardır. Millerde, hem kendi ağırlıkları hem de taşıdıkları dişli çark, kavrama gövdesi, kasnak vb elemanların ağırlıkları veya kütleleri elastik deformasyona neden olabilmektedir. Çok hızlı dönen millerde de dengeleme ve titreşim problemleri ortaya çıkmaktadır. Milin yay, taşınan diğer elemanların da kütle olarak değerlendirilmesinde dönen sistem bir yay-kütle sistemi ortaya çıkartır ve

belirli bir dönme hızında bu yay-kütle sistemi nispeten büyük genlikli titreşimler doğurur. Mil sistemindeki küçük bir dengesizlik büyük merkezkaç kuvvetlerinin doğmasına yol açabilir ve mil titreşimi kritik bir hal alabilir. Miller hem burulma hem de eğilme titreşimleri için belirli doğal frekanslara sahiptir ve uygun bir zorlanma frekansında bu titreşimleri yapar [82].

4.5.1. Burulma titreşimleri

Mil ve taşıdığı elemanlarda ortaya çıkan bir diğer titreşim şekli burulma titreşimleridir. Mil üzerindeki döndürme momentinde periyodik değişim oluyorsa mil burulma titreşimleriyle karşı karşıya kalır. Şekil 4.7'deki sistem burulma titreşimleri için esas alınır, döndürme momenti diski ϕ kadar döndürüldüğünde mil bir yay gibi direnç gösterecektir [82]. Milin yay katsayısı k_θ ise burulma momenti,

$$M_b = -I_m \frac{d^2 \phi}{dt^2} = k_\theta \phi \quad [4.24]$$

şeklinde yazılabilir. Böyle bir sistemin burulma kritik açısal hızı,

$$\omega_{bkr} = \sqrt{\frac{k_\theta}{I_m}} \quad [4.25]$$

ve kritik devir sayısı,

$$n_{bkr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{k_\theta}{I_m}} \quad [4.26]$$

elde edilir. Burada I_m diskin kütsel atalet (eylemsizlik) momentidir. Milin L uzunluğu ve I_p kutupsal (polar) atalet momenti cinsinden kritik hızlar sırasıyla,

$$\omega_{bkr} = \sqrt{\frac{GI_p}{I_m L}} \quad [4.27]$$

ve

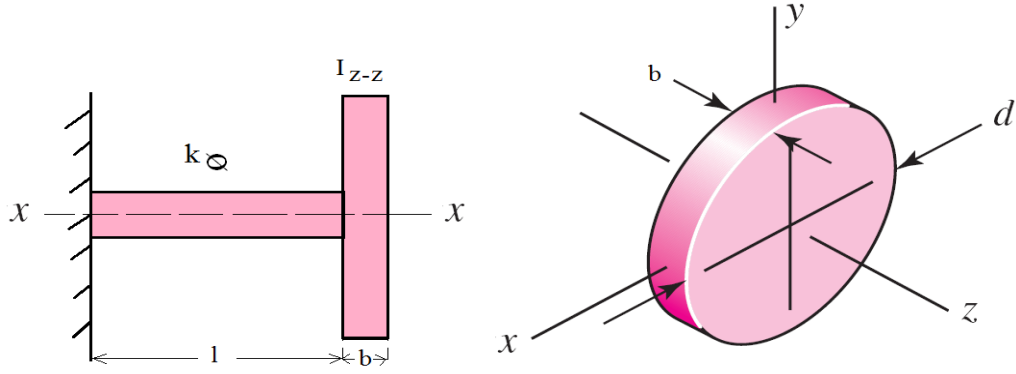
$$n_{bkr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{GI_p}{I_m L}} \quad [4.28]$$

şeklinde elde edilir. Burada $I_p = \frac{\pi(D_d^4 - D_i^4)}{32}$ [4.29], milin polar atalet momenti,

I_m silindirik elemanın (diskin) kütsel atalet momentidir. İçi boş bir disk için kütsel atalet momenti,

$$I_m = m \frac{D_d^2 - D_i^2}{2} \quad [4.30] \text{ ve k\u00fctle,}$$

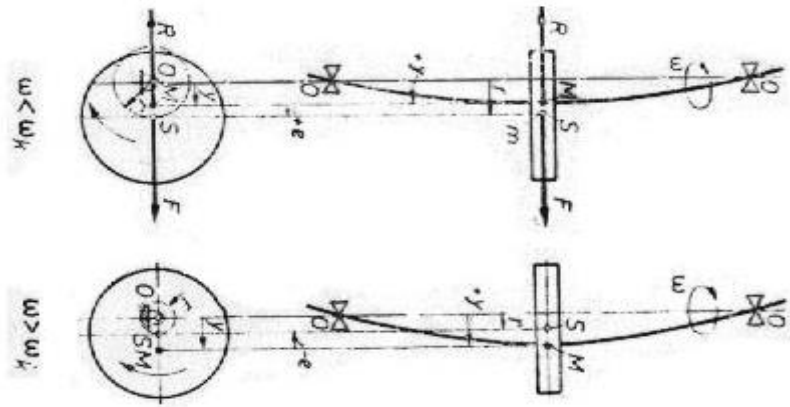
$$m = \frac{\gamma}{g} b \pi (D_d^2 - D_i^2) \text{ elde edilir.} \quad [4.31]$$



Şekil 4.7. Burulma titreşimi yapan mil

4.5.2. Eğilme titreşimleri

Hassas dengelenmiş bir sistemde bile imalat montaj hatalarından dolayı dengelenmemiş bir kütle bulunabilir. tam olarak merkezlenememiş bir disk, kasnak, dişli vb dönen elemanların ağırlık merkezleri mil merkezi ile çakışmaz, aralarında bir eksantrisite (e) bulunabilir (Şekil 4.9). Şekildeki gibi simetrik bir disk iki noktadan yataklanmış bir mile e eksantrikliğiyle monte edilmiş olsun. Problemi basitleştirmek için milin kütlesi ihmal edilip diskin kütlesinin merkezde toplandığı varsayılmaktadır. Milin bir k rijitliğine sahip olduğu kabul edilerek m kütleli elemanın dönmesi sırasında dengelenmemiş merkezkaç kuvveti etkisinde milin eğildiği görülecektir [82].



Şekil 4.7. Dengelenmemiş kütle ve titreşimleri

Mil ω açısal hızıyla dönerken ortaya çıkan merkezkaç kuvvet başlangıçta e 'den dolayı,

$$F_z = m \omega^2 e \quad [4.32]$$

şeklinde olacaktır. Bu kuvvet mili eğilmeye zorlayacağından bir y sehimi veya çökme daha doğacaktır. Bu çökme dengesizliği büyütürken yeni durumda $(y+e)$ eksen kaçıklığından dolayı,

$$F_z = m \omega^2 (e+y) \quad [4.33]$$

merkezkaç kuvveti doğar ve sehimin artmasına neden olur. Bu merkezkaç kuvvetine milin rijitliğinden doğan karşı kuvvet (elastik kuvvet),

$$F_R = k y \quad [4.34]$$

direnç gösterecektir. Bu elastik kuvvet merkezkaç kuvveti dengeliyorsa ($F_z = F_R$)

$$m \omega^2 (e+y) = k y \quad [4.35]$$

olacaktır. Merkezkaç kuvveti ile milin çökmesi,

$$y = \frac{m \omega^2}{k - m \omega^2} e \quad [4.36]$$

bulunur. Bu eşitlikten, $k - m \omega^2 = 0$ için sehimin sonsuza (∞) gittiği görülecektir. Bu şartı sağlayan ω açısal hızı sistemi rezonansa sokar ve sehimi sonsuza gider. ω 'nın bu değerine kritik açısal hız (ω_{kr}) denir ve,

$$\omega = \omega_{kr} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [4.37]$$

şeklinde elde edilir. Bu kritik hız özgül hız olarak bilinir. Kritik devir sayısı ise ,

$$n_{kr} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [4.38]$$

ifadesi ile elde edilir.

5. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

Deneylerde kullanılmak üzere üretilmiş olan tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri malzeme davranışlarının anlaşılması ve elde edilen verilerin sayısal çalışmada kullanılması amacı ile tespit edilmiştir. Mühendislik problemlerinde, teorik hesaplamaların karmaşık yapıdaki modellere uygulanmasının zorluğundan dolayı, inceleme (kabul gören tolerans sınırları içindeki hassasiyete) modelin belirli sayıdaki elemanlara bölünmesi ile yapılır. FEM (Finite Elements Method) programlarından ANSYS'in kullanılarak modelin tasarlanması ve belli geometrideki parçaların, değişik yükleme durumunda mukavemet analizleri, değişik sıcaklıklarda termodinamik davranışları ve çalışma esnasındaki titreşim özellikleri incelenerek konstrüksiyon yönlendirilebilir. Bu sayede çeşitli yükleme ve ortam şartlarında emniyetli bir biçimde çalışabilecek malzemeler minimum maliyetle üretilebilirler.

Ansysis ile:

- Yapısal analiz
- Termal analiz
- Elektromagnetik analiz
- Akışkan analizi gibi analizler yapılabilir.

Mekanik özelliklerin tespit edildiği deneyler Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespitinde başlıca iki test metodu kullanılmıştır:

a) Malzemenin fiber doğrultusundaki ve fibere dik doğrultudaki elastisite modüllerini, poisson oranlarını tespit etmek için statik çekme deneyleri.

b) Kayma modülünün tespiti için düzlem kayma deneyi.

Sayısal çalışmanın başarılı bir şekilde sonuçlandırılabilmesi ve deneyler sonucunda elde edilen değerlerin tutarlılığı malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilmiş olmasına bağlıdır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen unsurlardan biri de malzemenin üretim yöntemidir. Bu nedenle mekanik özelliklerin tespit edildiği deneylerde birden fazla numune kullanılarak elde edilmiş olan sonuçların ortalama değerleri alındı.

Kompozit plakaların üretiminde kullanılan tek yönlü cam, karbon ve kevlar fiberler İzoreel Firmasından FÜBAP tarafından desteklenen MF 14.03 numaralı proje kapsamında

temin edildi. Kompozit malzemeler tekyönlü cam, karbon ve kevlar fiber takviye ve epoksi reçine matriks kullanılarak üretildi. Tabakaları oluşturacak olan fiberler her bir katına reçine emdirilerek üç kat üst üste konularak tablaya yerleştirildi. Soğuma işleminin sonucunda levhaların kenarları kesilerek temizlendi.

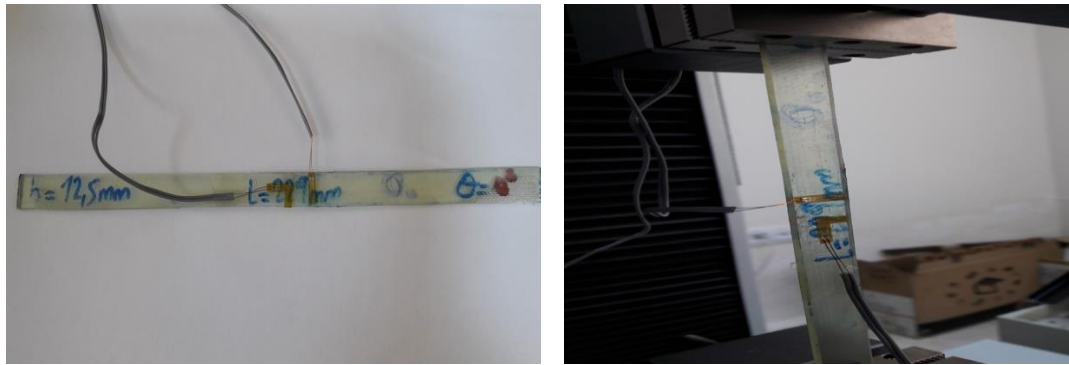
5.1. Çekme Deneyleri

Mekanik özelliklerin tespit edildiği deneylerde belirli standartlarda hazırlanmış olan numunelerin çekme cihazı yardımı ile fiziksel deneyleri yapıldı. Çekme testleri ASTM D3039-76 standardına göre yapıldı. Tez çalışmasında seçilmiş olan tekyönde takviye edilmiş cam, karbon ve kevlar takviyeli malzemelerin deneylerinde fiber takviye doğrultusunda ve fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda hazırlanmış olan deney numuneleri kullanıldı. Bu nedenle iki farklı çekme deneyi vardır

5.1.1. Fiber takviye doğrultusunda çekme deneyi

Fiber doğrultusundaki mekanik özellikleri tespit etmek için tek yönde takviye edilmiş $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi'den oluşan kompozit levhalar kullanıldı. Şekil 5.1, 5.2, 5.3'te boyutları görülen ($L=229\text{mm}$, $b=12.5\text{mm}$) numuneler üzerinde deneyler yapıldı.

Deneylerde fiber takviye doğrultusunda elastisite modülü E_1 , boyca uzama oranı ε_1 ve enine daralma oranı ε_2 tespit edildi. Deneylerde sonuçları elde etmek için Strain – gauge pullar kullanıldı. Strain – gauge pullar numunelere belirli noktalarda dik ve yatay pozisyonda bağlanarak çekme deneyleri gerçekleştirildi (Şekil 5.1, 5.2, 5.3).



Şekil 5.1. Fiber takviye doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip cam/epoksi numunesi



Şekil 5.2. Fiber takviye doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip karbon/epoksi numunesi



Şekil 5.3. Fiber takviye doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanılan $[0^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip kevlar/epoksi numunesi

Deneylemler sonucunda elde edilen yük değlerlerinden fiber takviye doğrultusundaki elastisite modülü E_{11} , poisson oranı ν_{12} aşğıdaki bağıntılar kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad [\text{MPa}] ; \quad E_{11} = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \quad [\text{MPa}] ; \quad \nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad [5.1]$$

Burada A $[\text{mm}^2]$, numunenin kesit alanıdır, P $[\text{N}]$ numuneye uygulanan yük değleridir ve en büyük yükün değeri $P_{\max}$ ile gösterilmektedir. Şekil 5.1, 5.2, 5.3'te görülen numuneler çekme cihazına bağlanarak sabitlendikten sonra çekme hızı 1 mm/dk olacak şekilde yük uygulandı. Deneylemlerde kullanılan çekme cihazında elde edilen yükler ve uzama değlerleri verileri bilgisayara sürekli olarak kaydedilmiştir.

5.1.2. Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekme deneyi

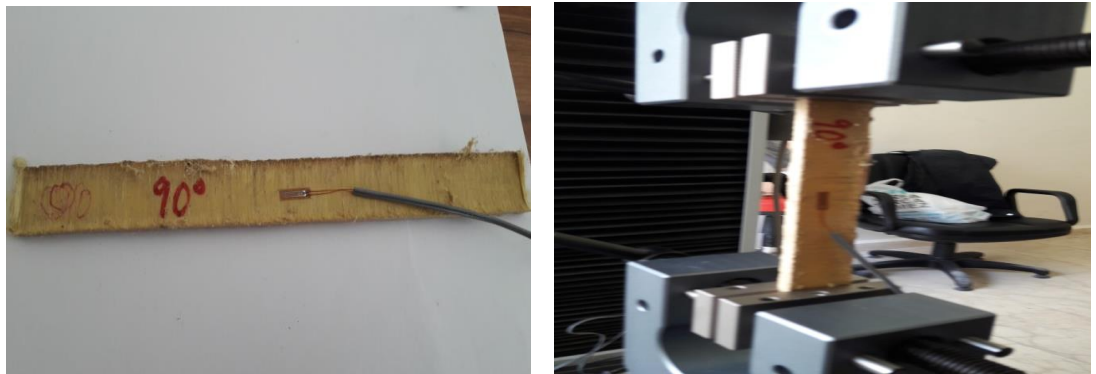
Fiber doğrultusuna dik doğrultuda mekanik özellikleri tespit etmek için tek yönde takviye edilmiş $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip levhalar kullanılmıştır. Şekil 5.4, 5.5, 5.6’da boyutları verilen numuneler üzerinde çekme deneyleri yapıldı. Deneylerde fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda elastisite modülü E_{22} testi yapıldı.



Şekil 5.4. Fiber takviye dik doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanan $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip cam/epoksi numunesi



Şekil 5.5. Fiber takviye dik doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanan $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip karbon/epoksi numunesi



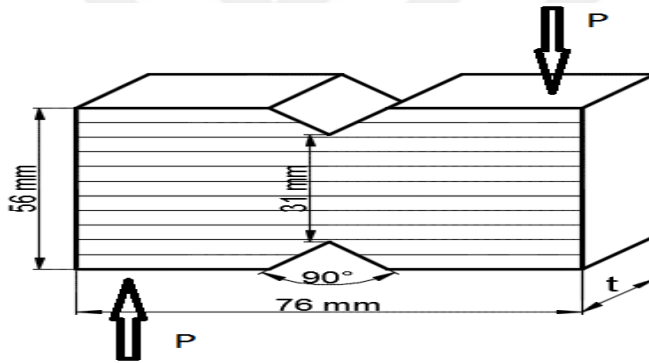
Şekil 5.6. Fiber takviye dik doğrultusunda çekme test düzeneğine bağlanan $[90^\circ]_3$ tabaka dizilimine sahip kevlar/epoksi numunesi

Deneylerin sonucunda elde edilen yük değerlerinden fiber takviye dik doğrultusundaki elastisite modülü E_{22} aşağıdaki bağıntılar kullanılarak tespit edildi [5.2].

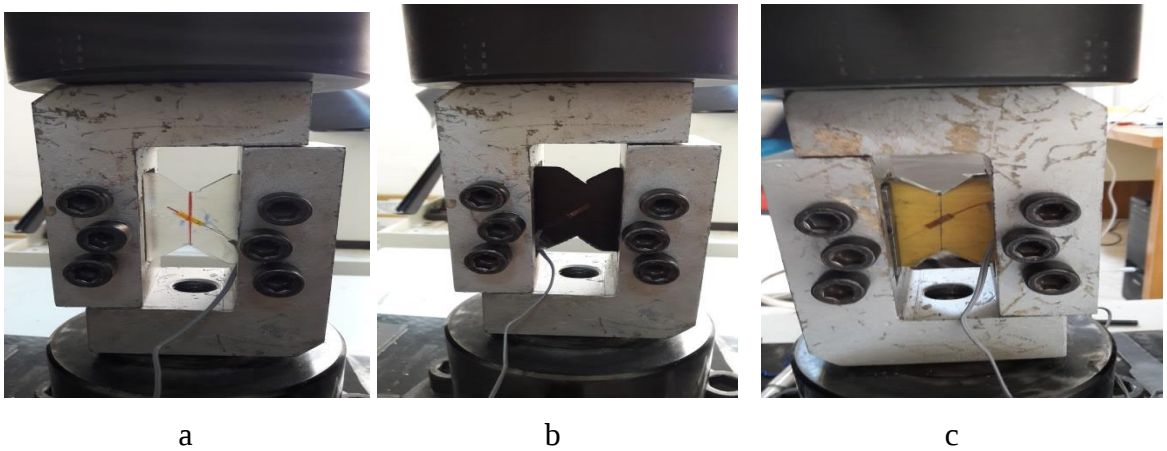
$$\sigma_2 = \frac{P}{A} \quad [\text{MPa}] ; E_{22} = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \quad [\text{MPa}] \quad [5.2]$$

5.2. Kayma Deneyi

Kayma modülünün bulunması için düzlem kayma testleri yapıldı. Bu deneyler için gerekli olan numuneler, $[0^\circ]_3$ tabakalı kompozit malzemeden üretilen ve üzerlerine “v” çentik açılmış olan plakalardır (Şekil 5.7, 5.8). Kayma modülünü G_{12} değerini bulabilmek için Şekil 5.7’de görüldüğü gibi numune üzerine 45° lik doğrultuda strain gauge pul yapıştırılarak deney değerlerini [5.3] denklemlerinde kullanarak kayma modülü tespit edildi.



Şekil 5.7. $[0^\circ]_3$ tabakalı kompozit levhadan üretilmiş olan kayma deneyi numunesi boyutları



Şekil 5.8. $[0^\circ]_3$ tabakalı kompozit levhadan üretilmiş olan kayma deneyi numunesi: a) cam/epoksi, b) Karbon/epoksi, c) kevlar/epoksi

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad \tau = G_{12} \cdot \gamma, \quad G_{12} = \frac{\tau_{ort}}{\gamma_{ort}}, \quad \gamma_{12} = 2 \cdot \varepsilon_{12} \quad [5.3]$$

Mekanik özelliklerin tespit edilebilmesi için yapılmış olan deneylerde tez çalışmasında kullanılacak olan tek yönde takviye edilmiş cam, karbon ve kevlar fiber takviyeli epoksi reçine matriksli 3 tabakalı kompozit malzeme için elde edilen sonuçlar Tablo 5.1, 5.2, 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş cam fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu

Parametre adı	Simgesel ifade	Büyüklüğü
Fiber takviye doğrultusunda Elastisite Modülü	E_1 (MPa)	55727
Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda Elastisite Modülü	E_2 (MPa)	19068
Kayma Modülü	G_{12} (MPa)	7100
Poisson Oranı	ν_{12}	0,3
Fiber hacim oranı	V_f (%)	45

Tablo 5.2. Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş karbon fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu

Parametre adı	Simgesel ifade	Büyüklüğü
Fiber takviye doğrultusunda Elastisite Modülü	E_1 (MPa)	35812
Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda Elastisite Modülü	E_2 (MPa)	18475
Kayma Modülü	G_{12} (MPa)	4760
Poisson Oranı	ν_{12}	0,27
Fiber hacim oranı	V_f (%)	67

Tablo 5.3. Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş kevlar fiberli epoksi reçine matrisli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu

Parametre adı	Simgesel ifade	Büyüklüğü
Fiber takviye doğrultusunda Elastisite Modülü	E_1 (MPa)	36034
Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda Elastisite Modülü	E_2 (MPa)	16752
Kayma Modülü	G_{12} (MPa)	3580
Poisson Oranı	ν_{12}	0,23
Fiber hacim oranı	V_f (%)	86

5.3. İçi Boş Dairesel Kompozit Millerin Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Tespit Edilmesi

Bu bölümde mekanik özellikleri ve üretim teknikleri önceki bölümde tanımlanmış olan cam, karbon ve kevlar fiberler ile takviye edilmiş içi boş dairesele kompozit millerin mekanik davranışlarının belirlenmesi için yapılmış olan deneysel çalışmalar incelenecektir. Deneysel çalışmada içi boş dairesele kompozit millerin üç nokta eğme ve burulma deneyleri yapılmıştır.

5.3.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışma yapmak üzere üretilmiş olan içi boş dairesele kompozit malzemeler literatürde incelenmiş olan çalışmalar göz önüne alınarak üç nokta eğme ve burulma deneyleri yapıldı. Literatür çalışmaları incelendiği zaman geometrik parametreler: takviye malzemeleri, oryantasyon açısı, et kalınlığı ve takviye kompozit malzeme uzunlukları olarak göz önünde bulunduruldu. Bütün numuneler İzoreel fabrikasında hazırlandı.

5.3.2. Deneyde Kullanılan Materyal ve Yöntem

Bu çalışma kapsamında, üç nokta eğme ve burulma deneylerine tabi tutulmak üzere içi boş dairesele kompozit miller için fiber malzemesi olarak; Cam (600 gr/m^2), Karbon

(800 gr/m²) ve Kevlar (316 gr/m²) lifi kullanıldı. Matris malzemesi olarak ta Epoksi reçine tercih edildi. Geometrik olarak, farklı uzunluklarda L=80mm, 200mm, 250mm, dış çap $D_a=17\text{mm}$, iç çaplar ise $D_i=12\text{mm}$ ve 13mm olacak şekilde içi boş dairesel kompozit miller kullanıldı.

5.3.3. Üretim Yöntemi

Bu çalışmada üretim yöntemi olarak, literatürde en çok kullanılan elyaf sarma yöntemi (Filament Winding) olarak adlandırılan yöntem kullanıldı (Şekil 5.9). Aynı ayrı rulolar halinde bulunan cam, karbon ve kevlar lifleri üretim için hazırlandı. Şekil 5.9'da görülen elyaf sarma tezgahında imal edilecek her bir içi boş kompozit millerin çapına göre mandrenler hazır hale getirildi. Bu mandrenlerin dış çapı aynı zamanda içi boş kompozit millerin iç çaplarına eşittir. Elyaf sarma tezgahına bağlanan mandren üzerine, ayrı ayrı olmak üzere cam, karbon, kevlar lifleri sarılarak içi boş dairesel kompozit millerin imalatı gerçekleştirildi. Elyaf sarma yöntemi; ıslak ve kuru olmak üzere iki çeşittir. Bu çalışmada, içi boş dairesel kompozit miller, ıslak yöntem ile imal edildiler. Bu yöntemde, epoksi reçine bulunan havuza cam, karbon ve kevlar liflerinin daldırıldıktan sonra mandren üzerine istenilen oryantasyon açılarında sarılmasından ibarettir. Cam, karbon ve kevlar lifleri, mandren üzerine $\theta=45^\circ$, 60° , 75° , 80° , 88° oryantasyon açılarında ve üç tabaka olarak sarıldı. Üretimi yapılan dairesel içi boş kompozit miller belirlenen uzunluklarda ASTM standartlarına göre boyutlandırıldı ve yine ASTM standartlarına göre üç nokta eğme ve burulma testlerine hazır duruma getirildi (Şekil 5.10).



Şekil 5.9. Filaman sarma yöntemi ile cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin imal edilmesi

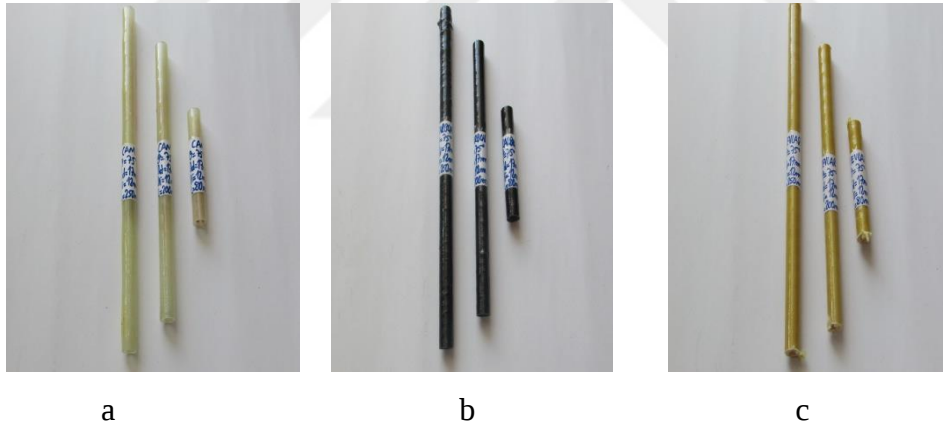
5.4. Üç Nokta Eğme Testleri

80mm, 200mm ve 250mm uzunluklarında, 17mm dış çapa ve 12mm ile 13mm iç çapına sahip üç tabakadan oluşan Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş dairesel kompozit miller üç nokta eğme deneylerine tabi tutuldu. 250 kN yük hücresine ve 1- 4 mm/dak hızına sahip yer tipi Shimadzu AG-X universal cihazı ile üç nokta eğme testleri oda sıcaklığında ve 1mm/dak test hızında yapıldı (Şekil 5.11).

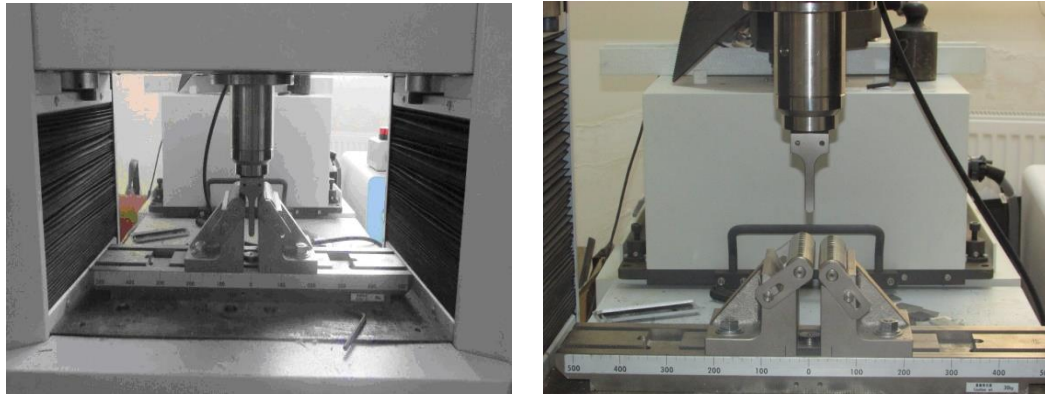
ASTM 790-00 standartına göre bütün numunelere, iki destek arasına yerleştirilen ve millerin tam ortalarına, eğme kuvveti uygulanarak maksimum eğme değerleri elde edildi (Şekil 5.13, 5.14, 5.15, 5.16).

250mm uzunluğundaki numunelerde standartlara göre iki destek arası boşluk 200mm, 200mm uzunluğundaki numunelerde iki destek arası boşluk 160mm ve 80mm uzunluğundaki numunelerde iki destek arası boşluk 60mm bırakıldı.

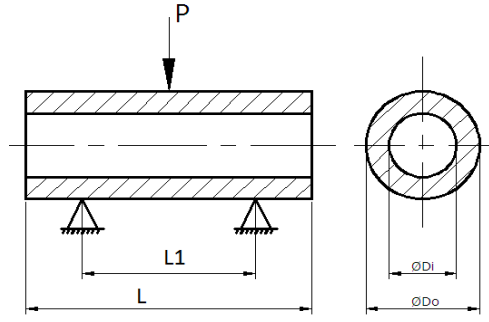
Farklı boyutlardaki numunelerin şematik resimleri şekil 5.10’da görülmektedir.



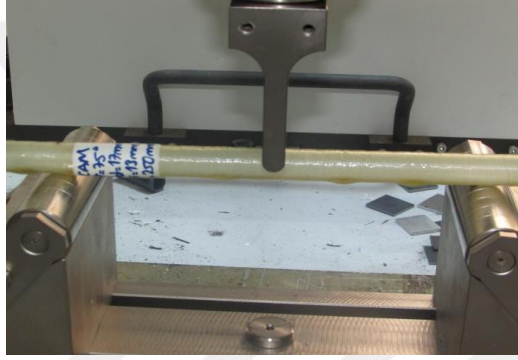
Şekil 5.10. Test numuneleri; a) Cam/Epoksi b) Karbon/Epoksi c) Kevlar/Epoksi



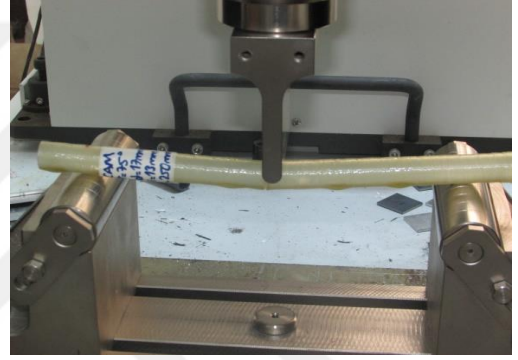
Şekil 5.11. 3 nokta eğme test düzeneği



Şekil 5.12. Üç nokta eğme altındaki numune şekli ve boyutları



a



b

Şekil 5.13. Cam/epoksi numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları; a) deney öncesi b) deney sonrası

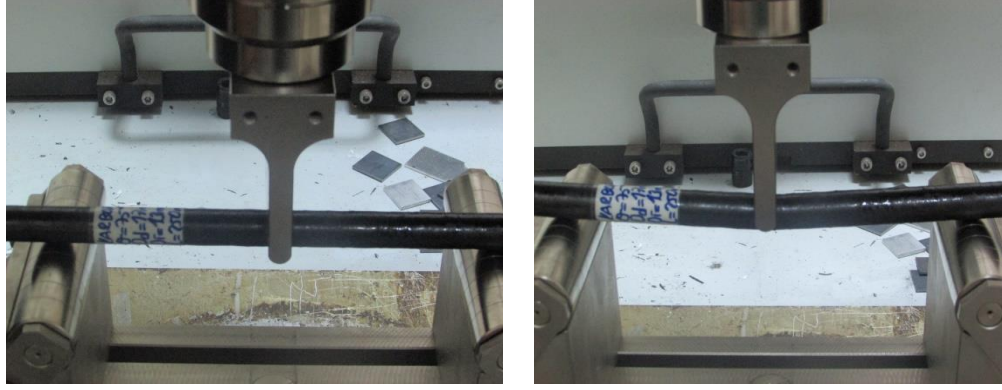


a



b

Şekil 5.14. Kevlar/epoksi numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları; a) deney öncesi b) deney sonrası



a

b

Şekil 5.15. Karbon/epoksi numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları; a) deney öncesi b) deney sonrası



a

b

c

Şekil 5.16. Numunelerin 3 nokta eğme yükü altındaki durumları: a) cam/epoksi, b) kevlar/epoksi, c) karbon/epoksi

5.4.1. Üç nokta Eğme deneyleri sonucunda elde edilen gerilmelerin grafiklere aktarılması

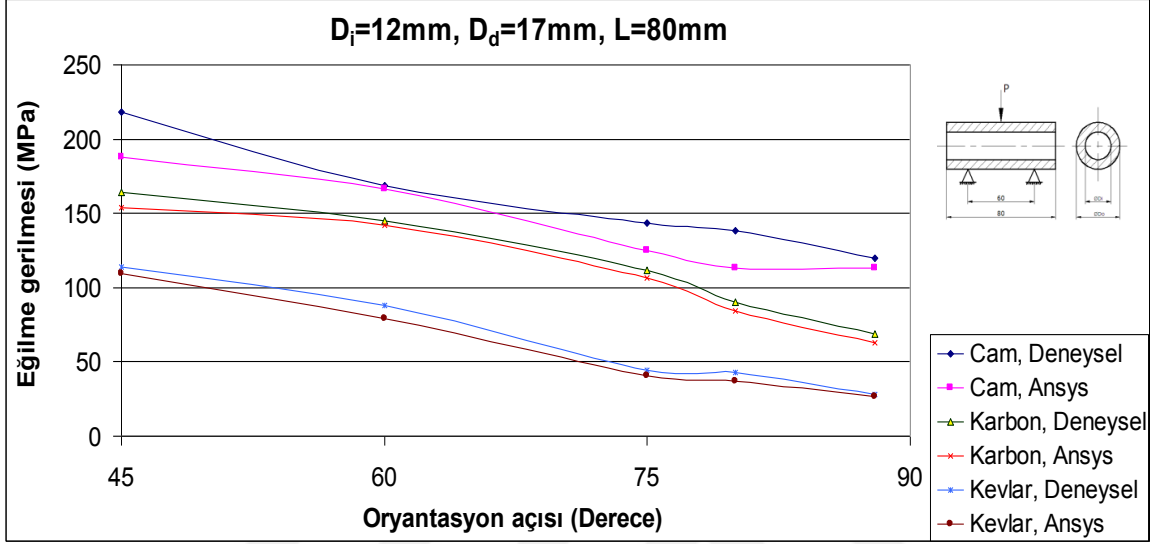
Üç nokta eğme testine tabi tutulan üç farklı takviye malzeme numunelerinin eğilme gerilme değerleri aşağıdaki denklemlere göre hesaplandı,

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_e} \quad (\text{MPa}) \quad [5.1]$$

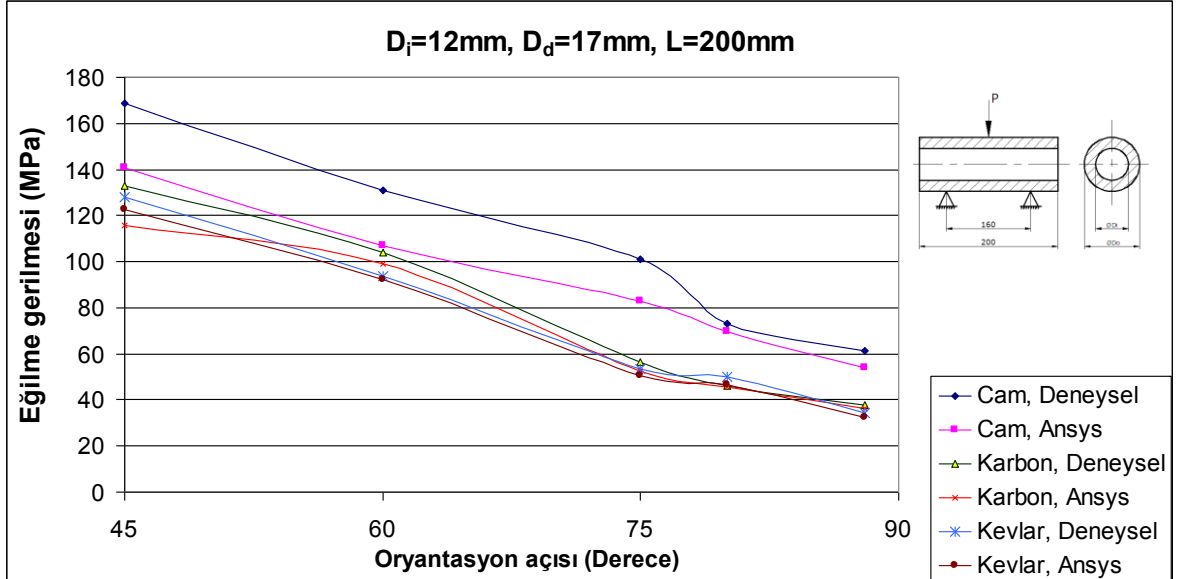
$$M_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot L}{4} \quad (\text{MPa}) \quad [5.2] \quad P_{\max}: \text{Deneylerde elde edilen maksimum kuvvet (N)}$$

$$W_{\text{eg}} = \frac{\pi(D_d^4 - D_i^4)}{32 \cdot D_d} \quad (\text{mm}^3) \quad [5.3]$$

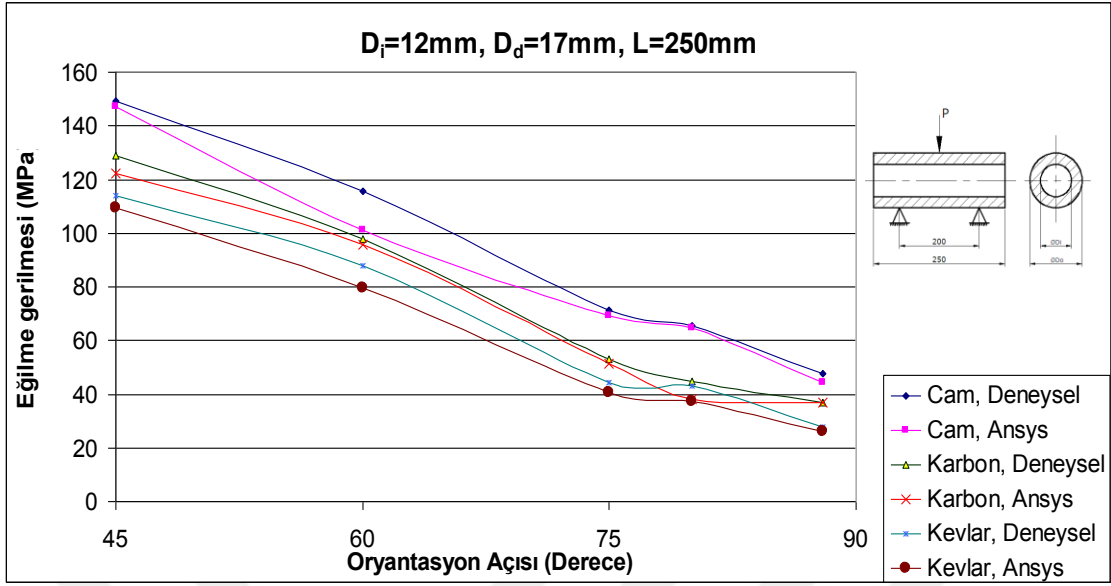
Üç farklı takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi) oryantasyon açısına göre deneysel ve ANSYS'te elde edilen eğilme değerleri aşağıda görüldüğü üzere grafiklere aktarıldı ve kendi aralarında karşılaştırma yapılarak yorumlandı.



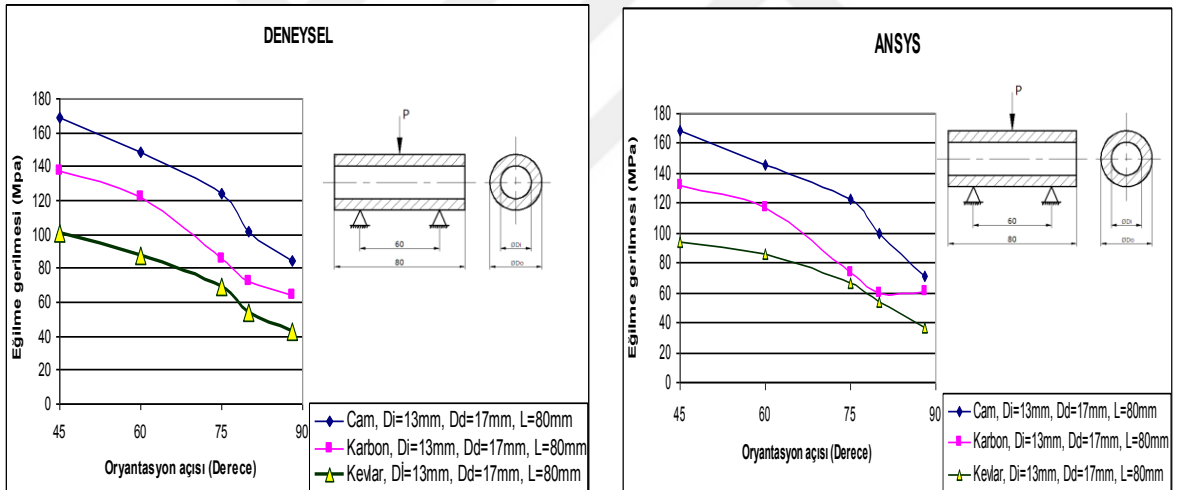
Şekil 5.17. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi



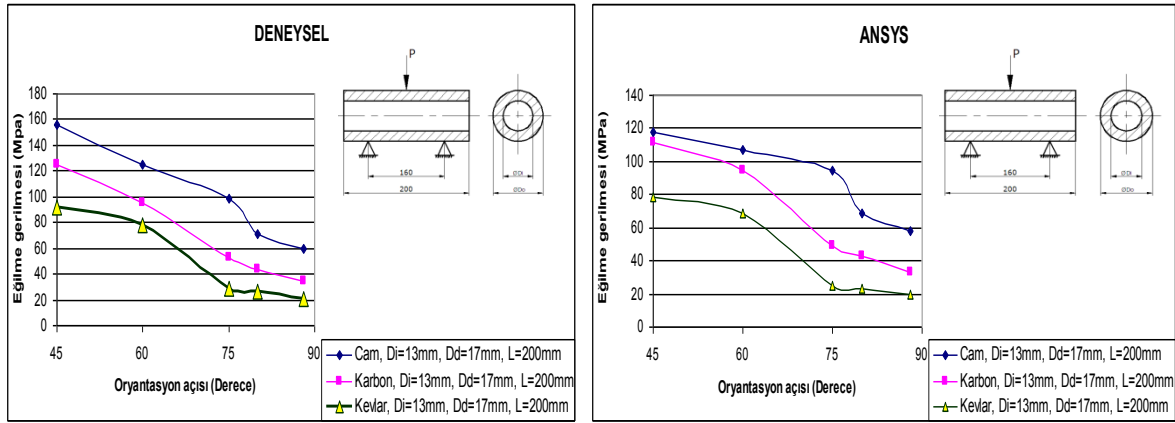
Şekil 5.18. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi



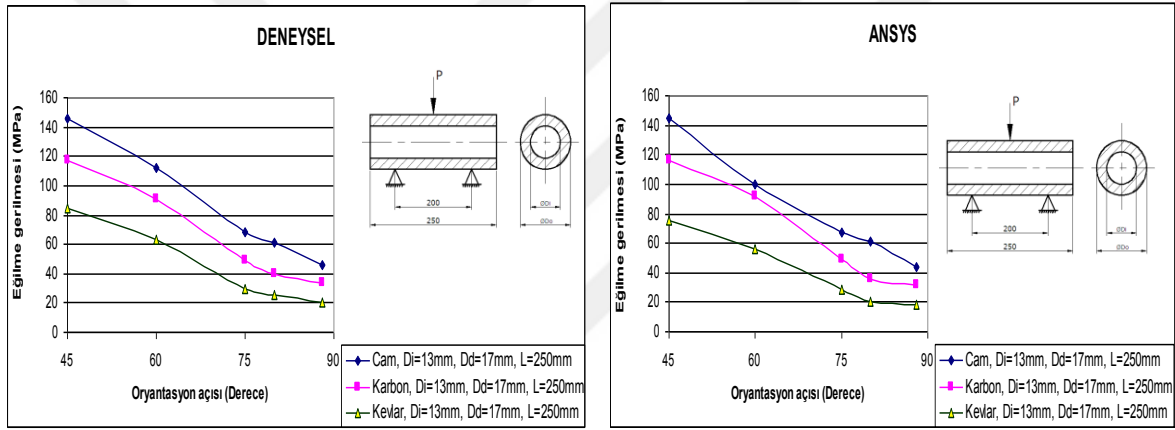
Şekil 5.19. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi



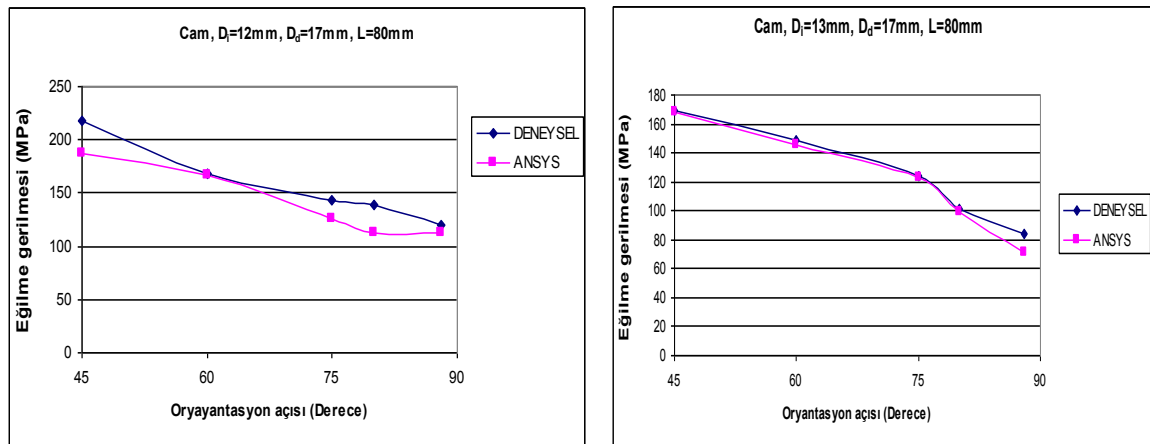
Şekil 5.20. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi



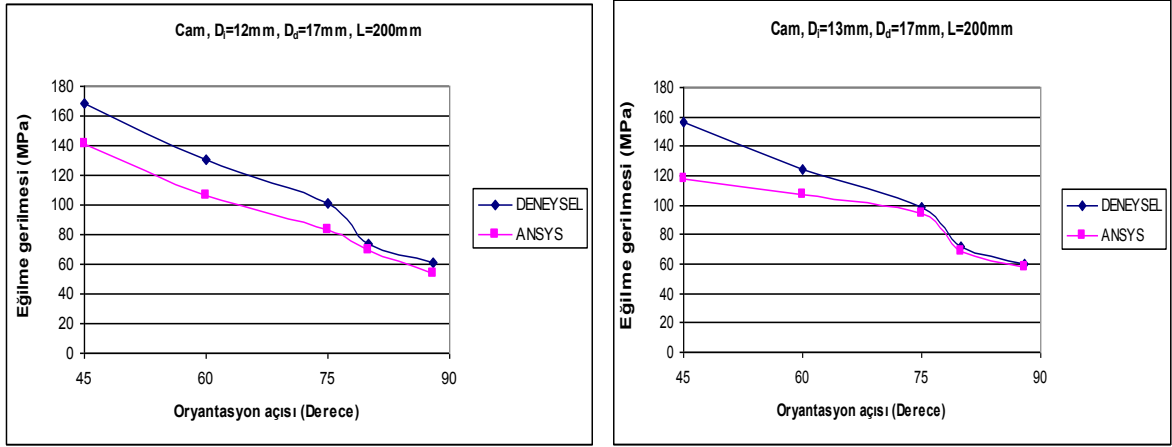
Şekil 5.21. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi



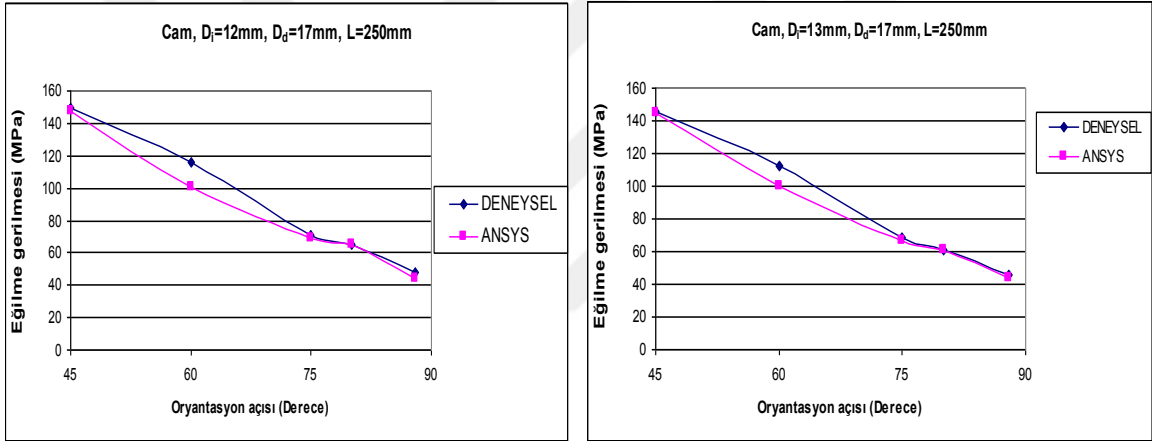
Şekil 5.22. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme-oryantasyon açısı değişimi



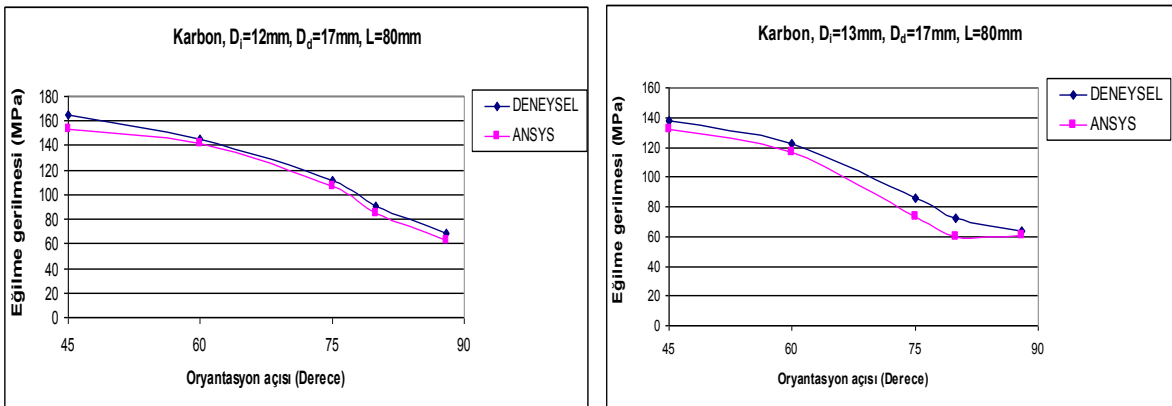
Şekil 5.23. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



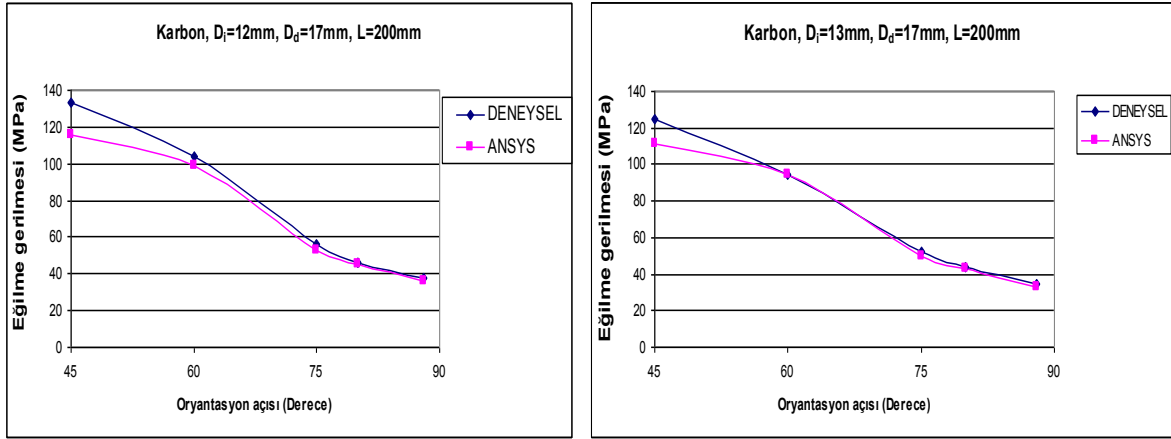
Şekil 5.24. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



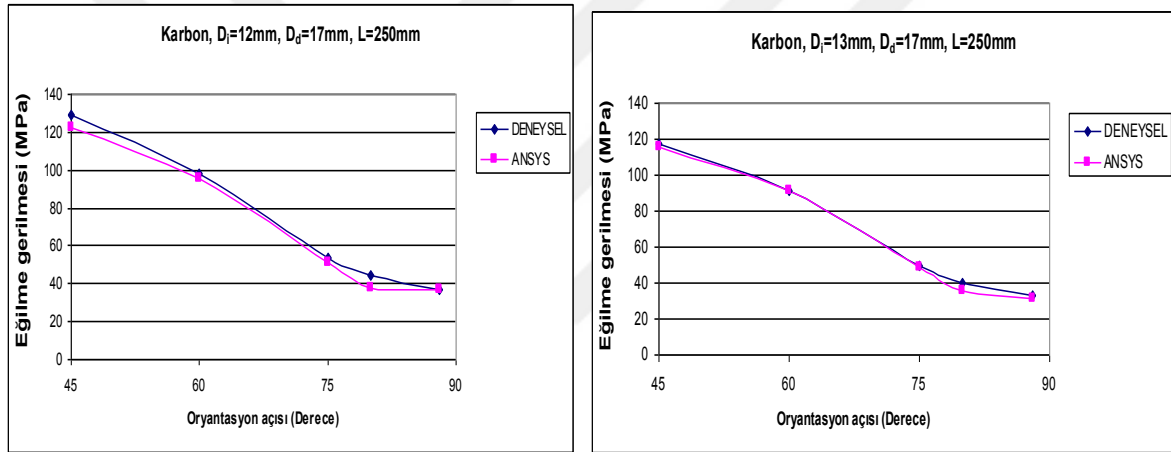
Şekil 5.25. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



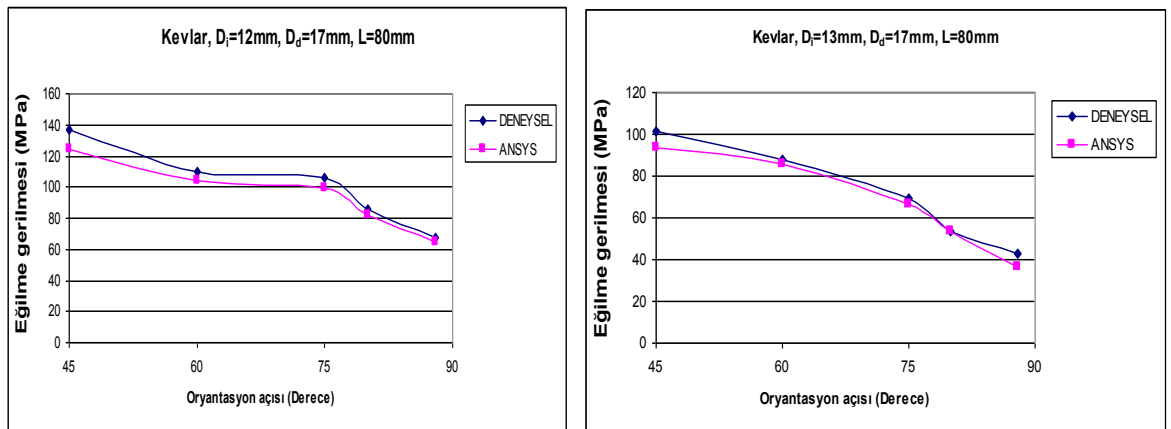
Şekil 5.26. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



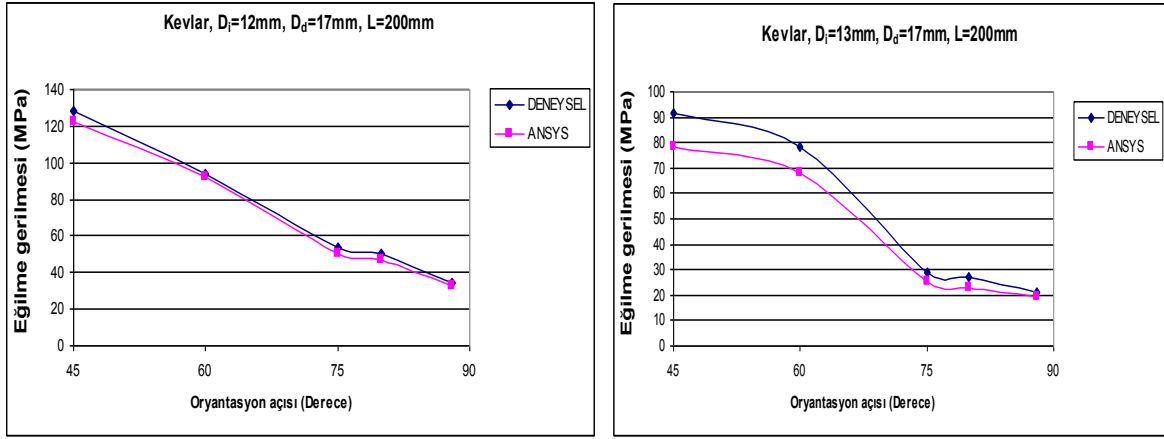
Şekil 5.27. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



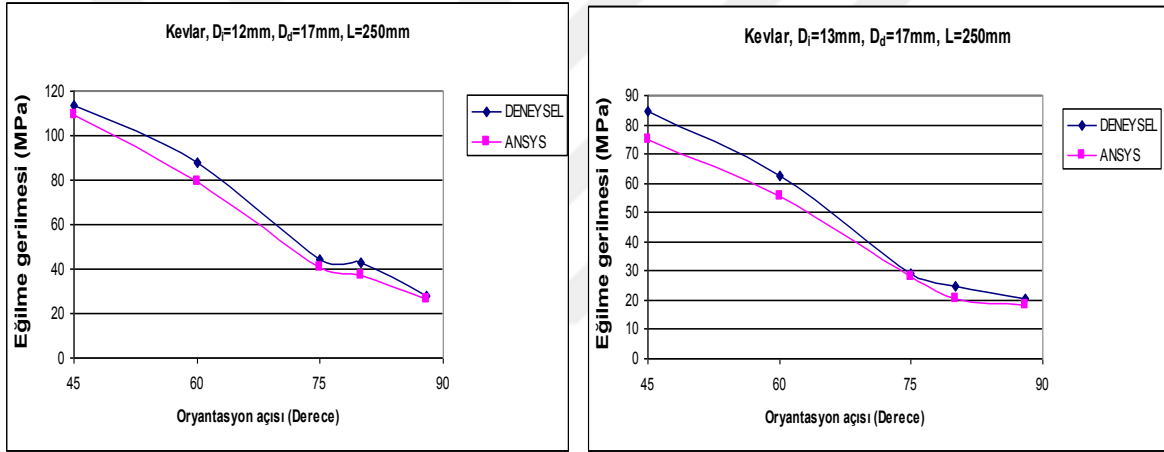
Şekil 5.28. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



Şekil 5.29. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



Şekil 5.30. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi



Şekil 5.31. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilme oryantasyon açısı değişimi

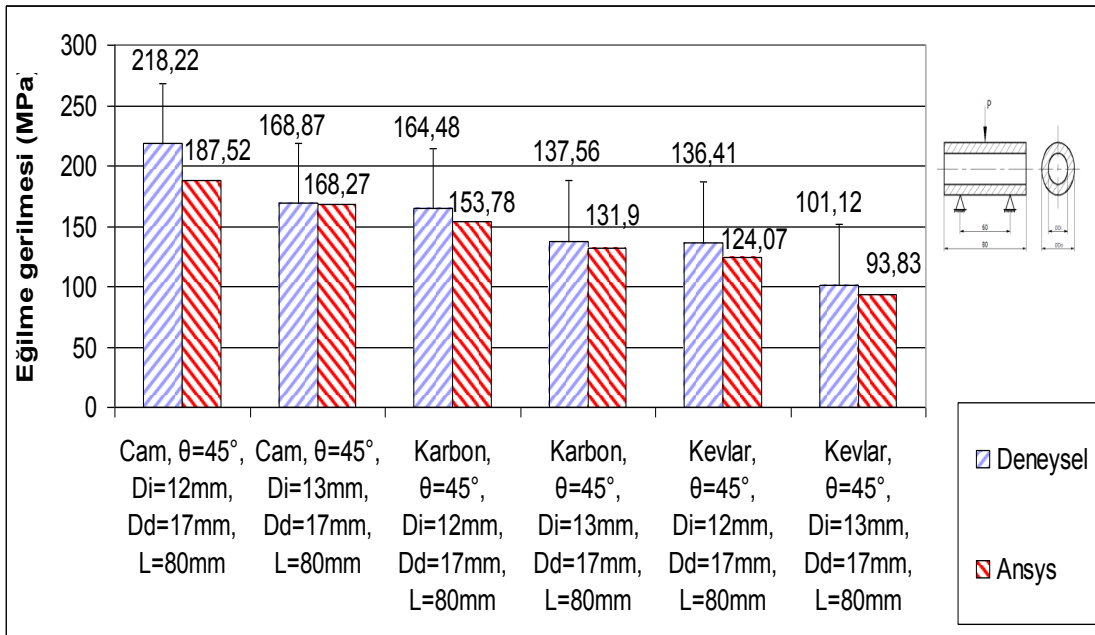
Üç nokta Eğme Deneylerinde, Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş kompozit millerin eğilme değerleri takviye malzemelerine ve oryantasyon açısına bağlı olarak incelendiğinde,

- Grafiklerden de görüleceği üzere fiber oryantasyon açısı arttıkça, cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin eğilme gerilme değerlerinin de azaldığı görüldü (Şekil 5.17-5.31).
- Boyutsal olarak incelendiğinde içi boş dairesel kompozit millerin uzunluğu arttıkça, cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin eğilme gerilme değerlerinin de azaldığı görüldü (Şekil 5.17-5.31).

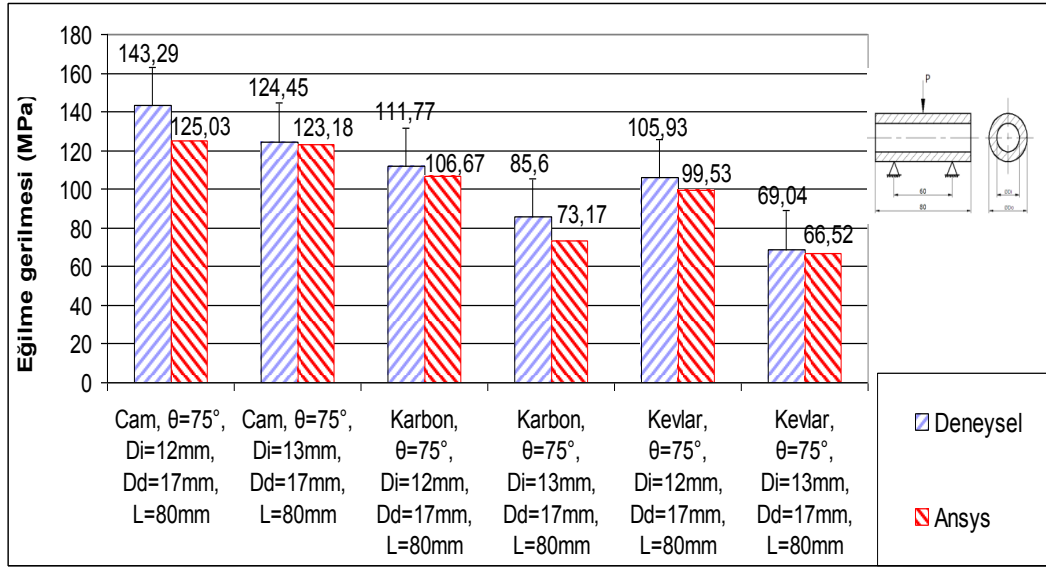
- Üç farklı uzunluğa sahip cam/epoksi kompozit millerinin, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit millere göre daha fazla eğilme gerilmelerine maruz kaldığı görüldü (Şekil 5.17-5.31).
- Kevlar/epoksi kompozit miller bütün uzunluklarda da en düşük eğilme gerilmelerine maruz kaldığı görüldü (Şekil 5.17-5.31).
- cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit miller de en yüksek eğilme gerilmelerinin, 45° oryantasyon açısında iken maksimum değere ulaştığı görüldü (Şekil 5.17-5.31). Bilineceği üzere malzemenin boyu arttıkça kuvvet ile deplasman (yer değiştirme) arasında doğru orantı olduğundan deplasman da artar.
- Deneysel tüm sonuçların, Ansys sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görüldü (Şekil 5.69-5.82).

5.4.2. Et Kalınlığının Eğilme Gerilme Üzerine Etkileri

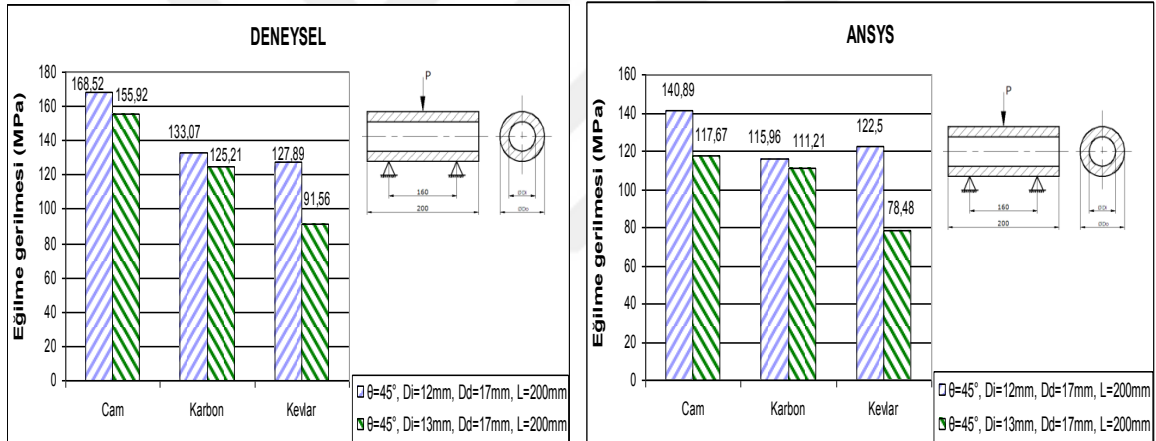
Üç farklı takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi) et kalınlığına göre deneysel ve ANSYS'te elde edilen eğilme değerleri aşağıda görüldüğü üzere grafiklere aktarıldı ve kendi aralarında karşılaştırma yapılarak yorumlandı.



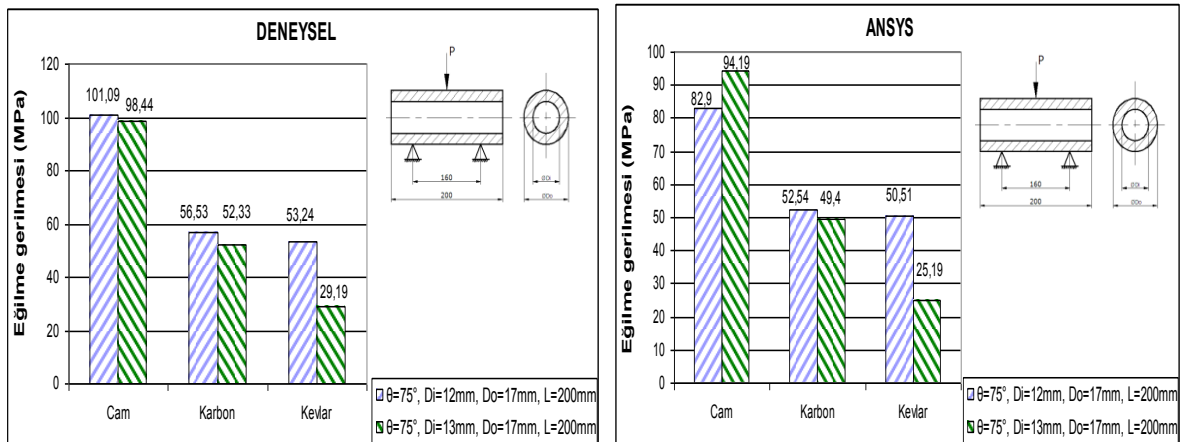
Şekil 5.32. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açısında eğilme gerilmenin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



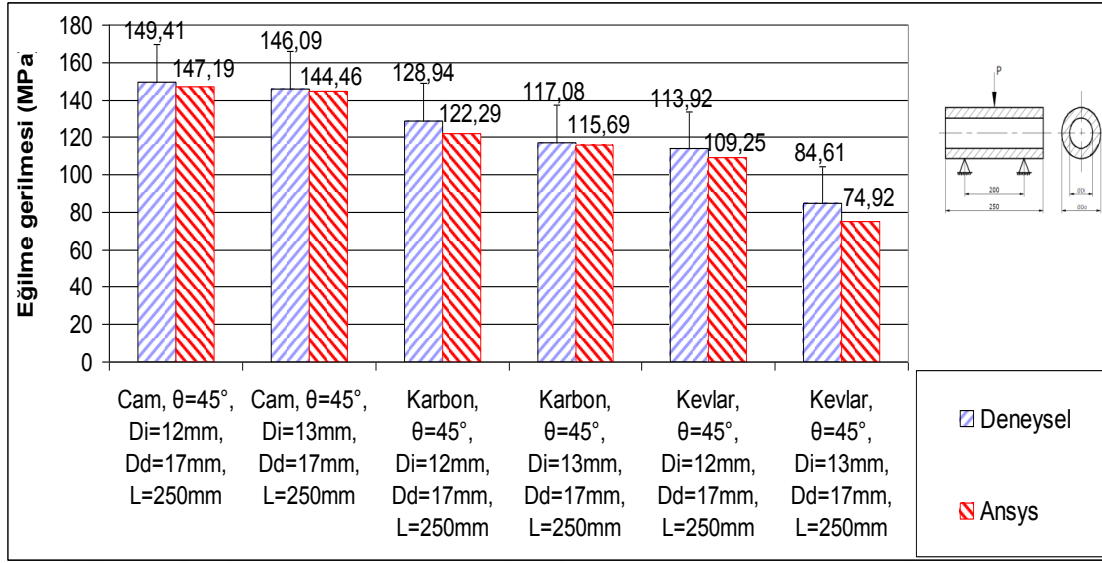
Şekil 5.33. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 75° oryantasyon açısında eğilme gerilmenin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



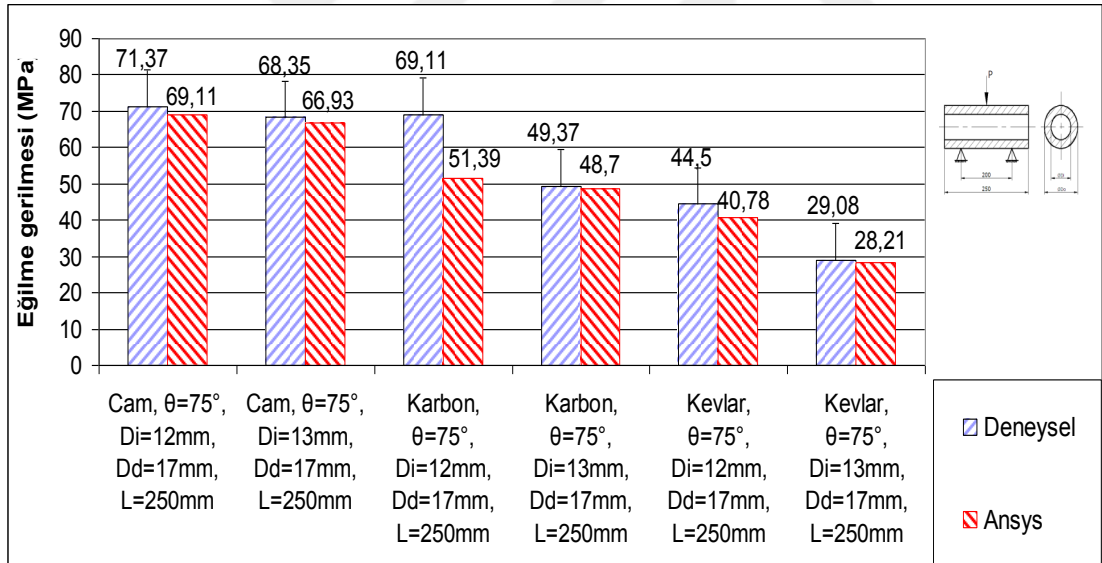
Şekil 5.34. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



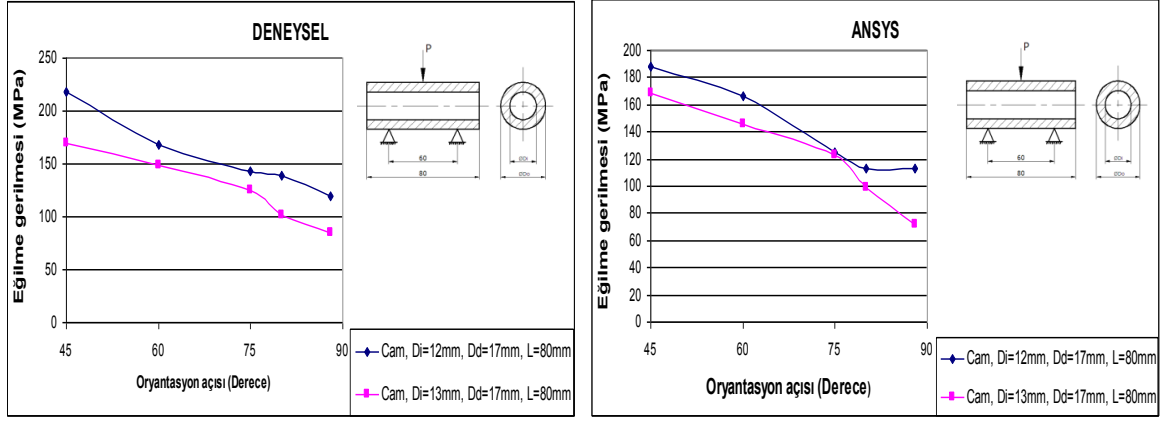
Şekil 5.35. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



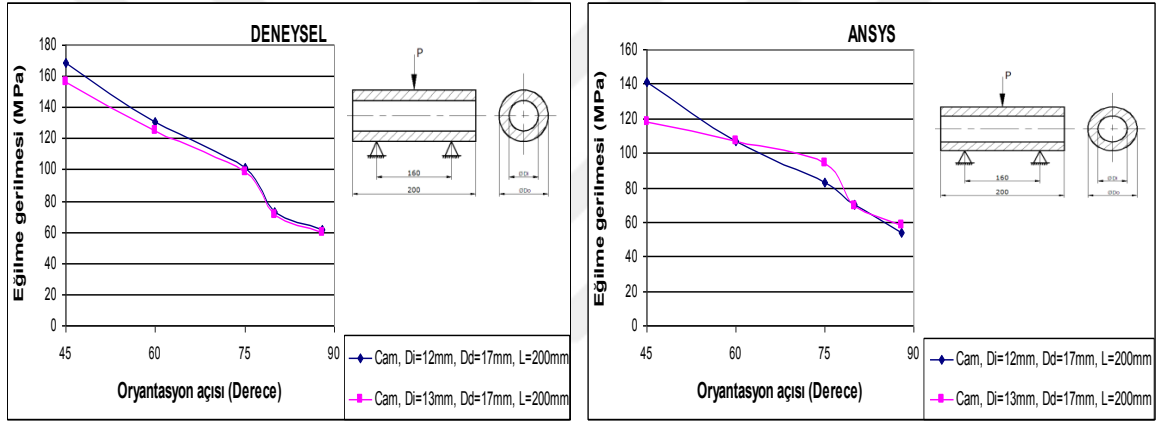
Şekil 5.36. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açında et kalınlığına göre eğilme gerilmenin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



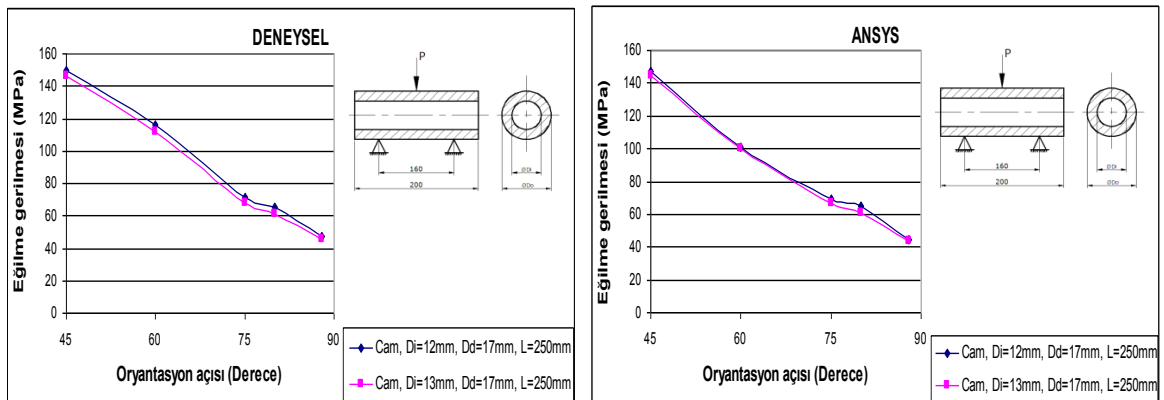
Şekil 5.37. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 75° oryantasyon açında et kalınlığına göre eğilme gerilmenin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



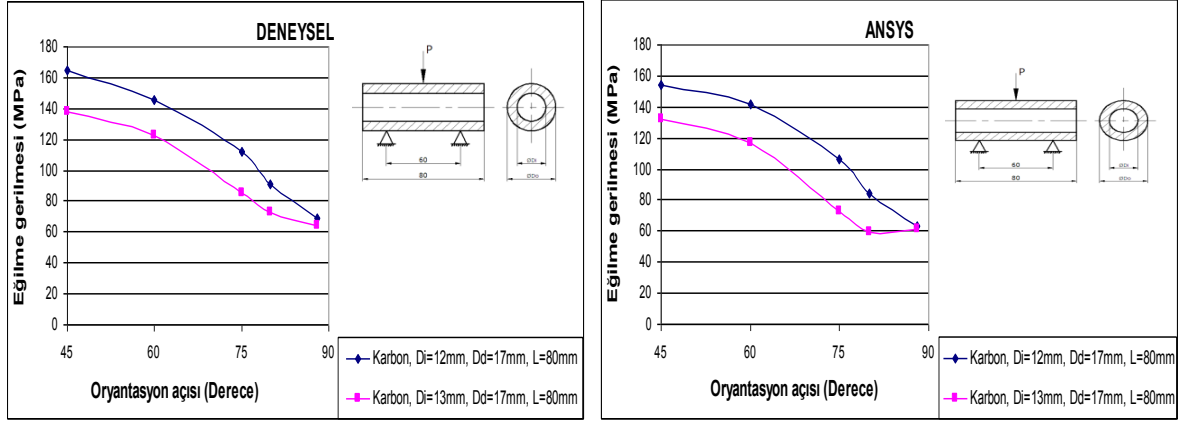
Şekil 5.38. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



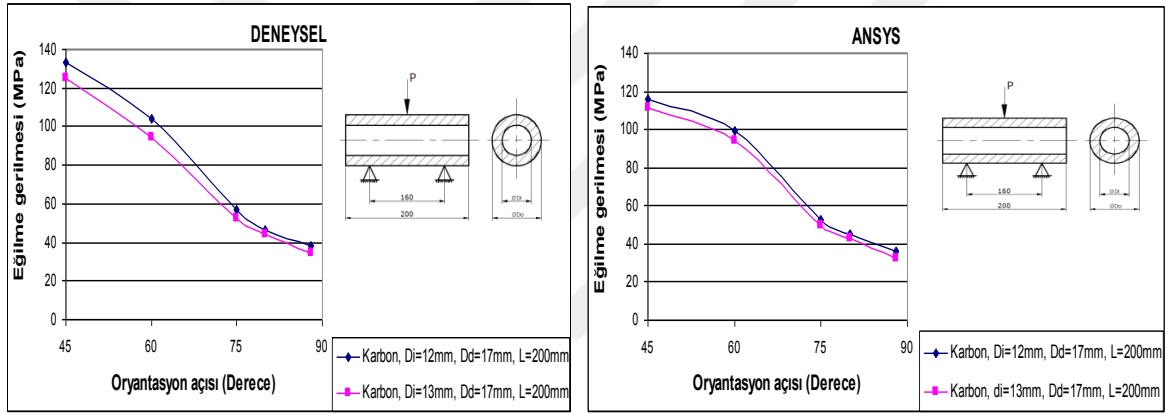
Şekil 5.39. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



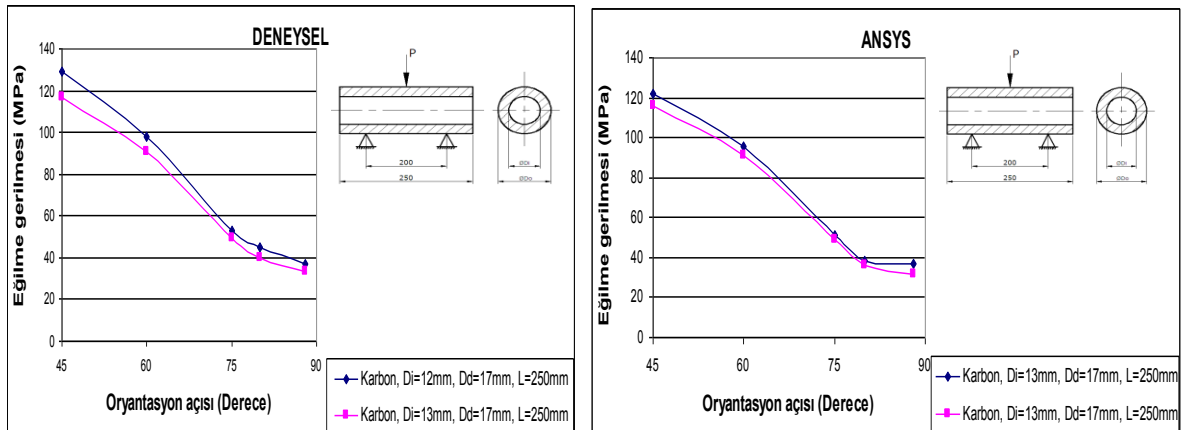
Şekil 5.40. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



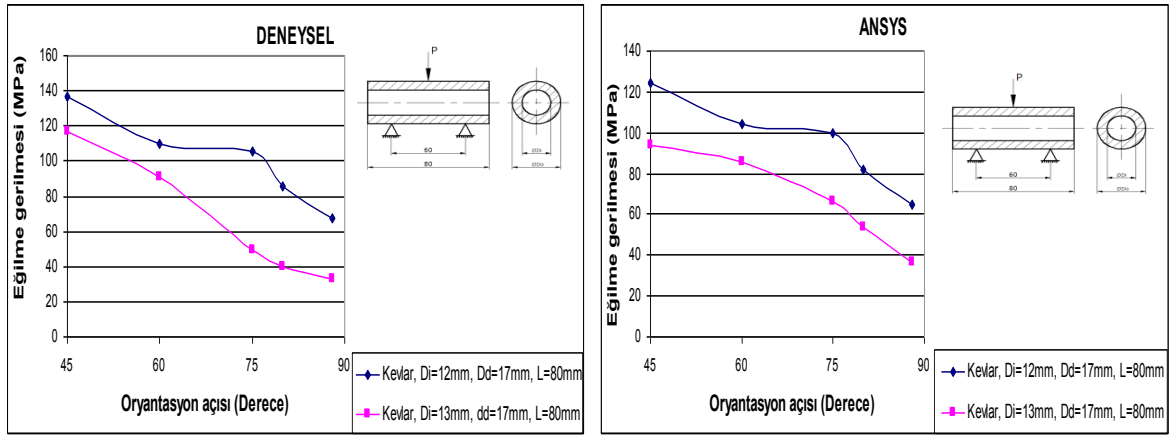
Şekil 5.41. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



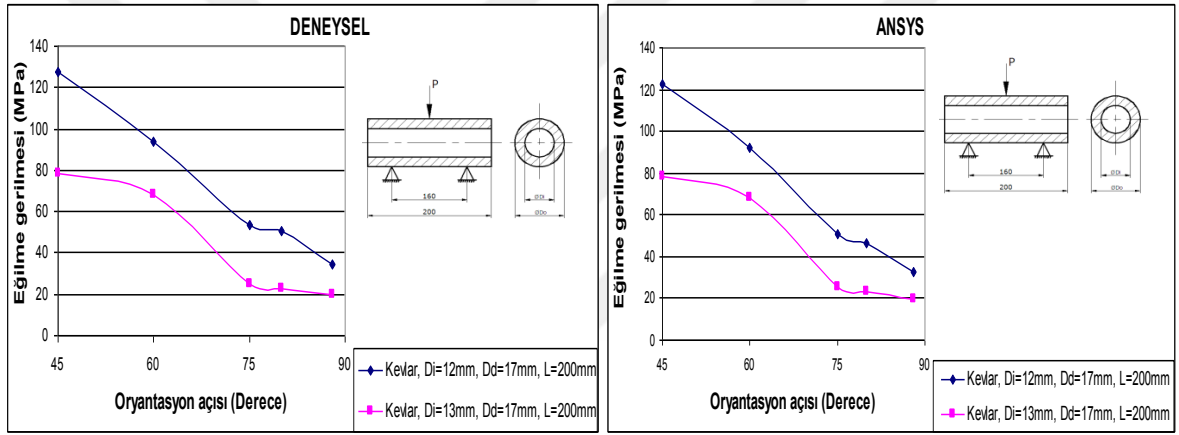
Şekil 5.42. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



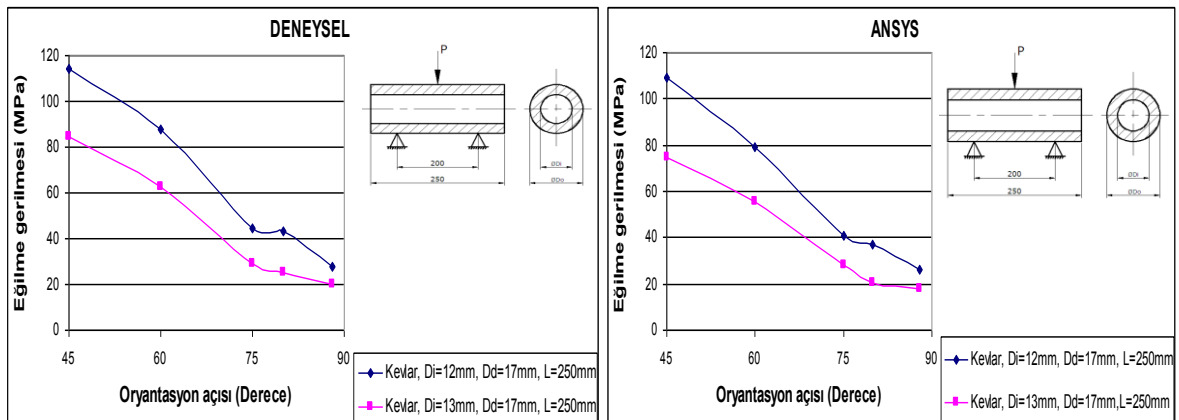
Şekil 5.43. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



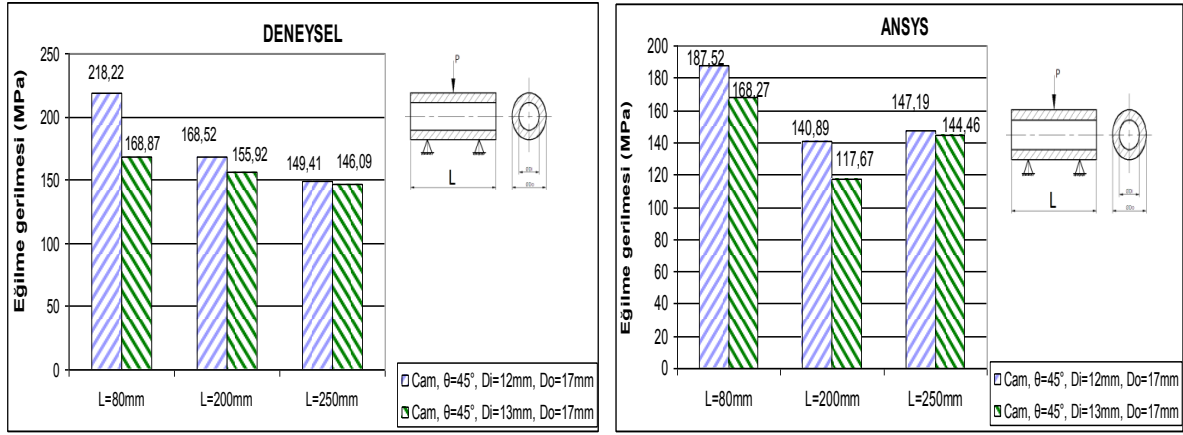
Şekil 5.44. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



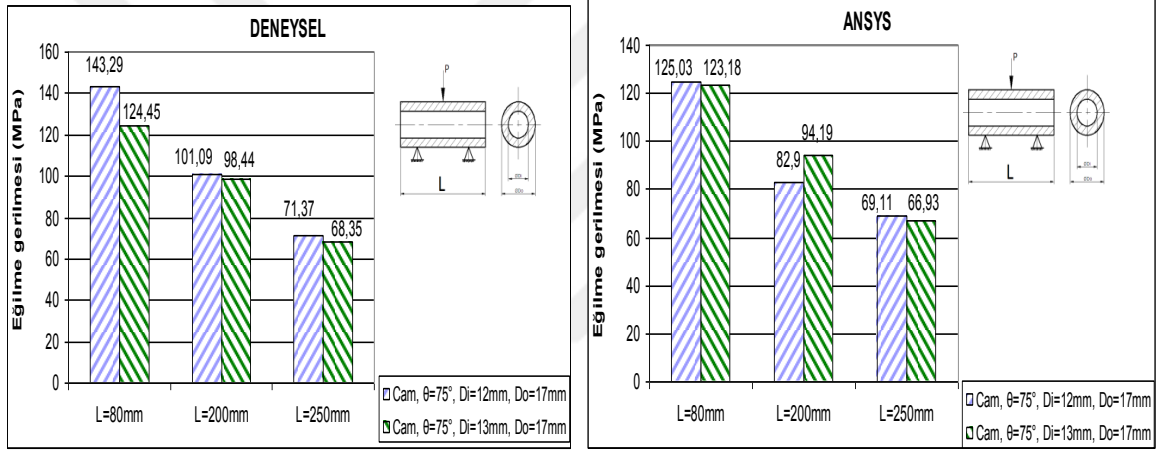
Şekil 5.45. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



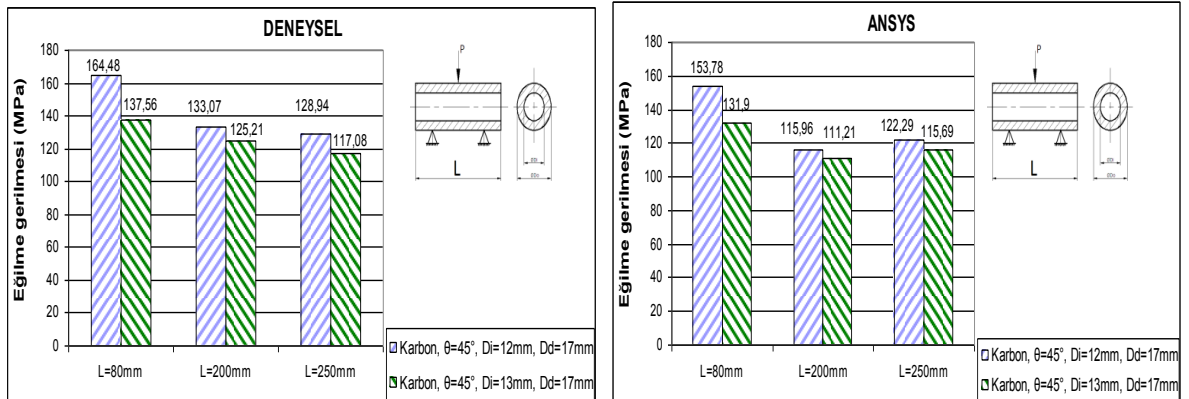
Şekil 5.46. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



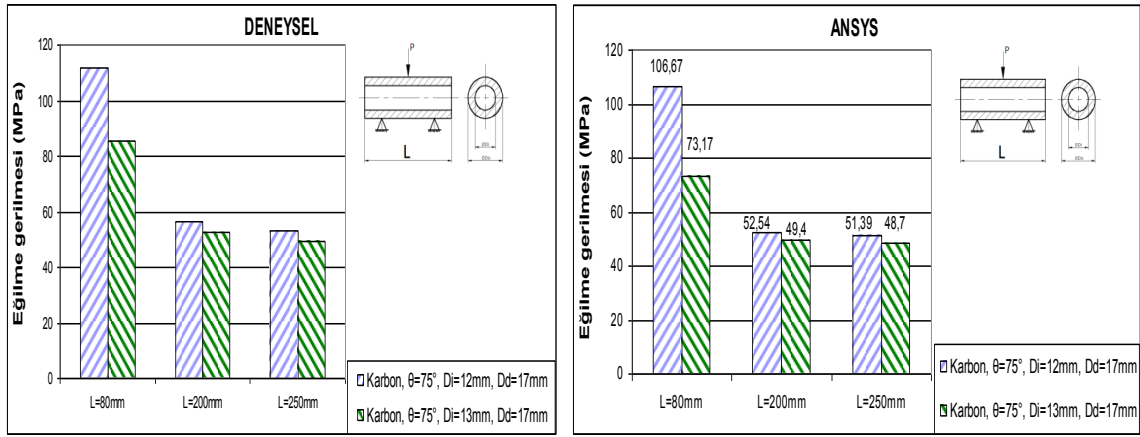
Şekil 5.47. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



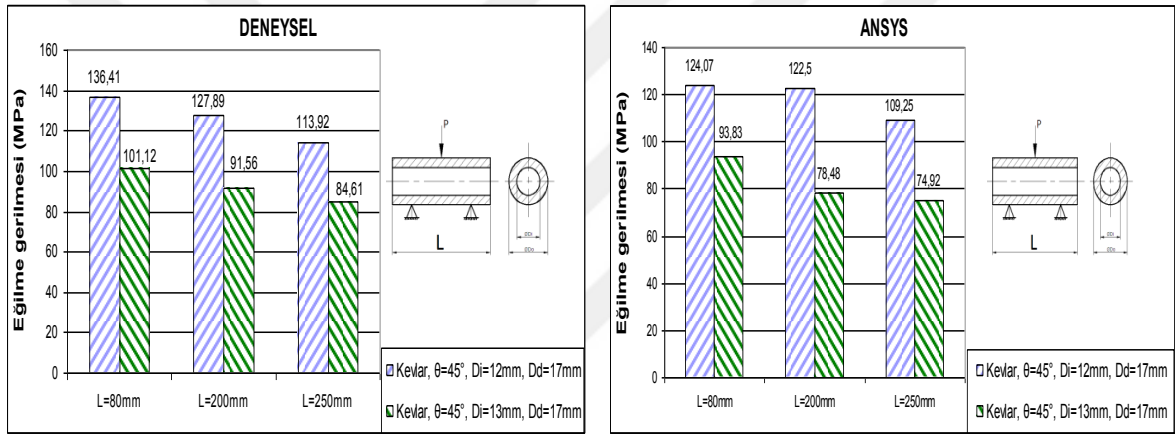
Şekil 5.48. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



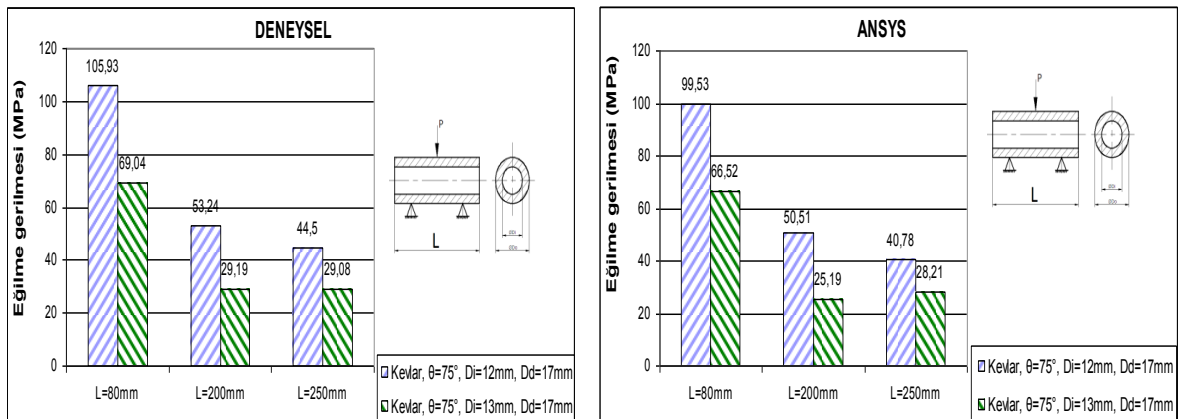
Şekil 5.49. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



Şekil 5.50. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



Şekil 5.51. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



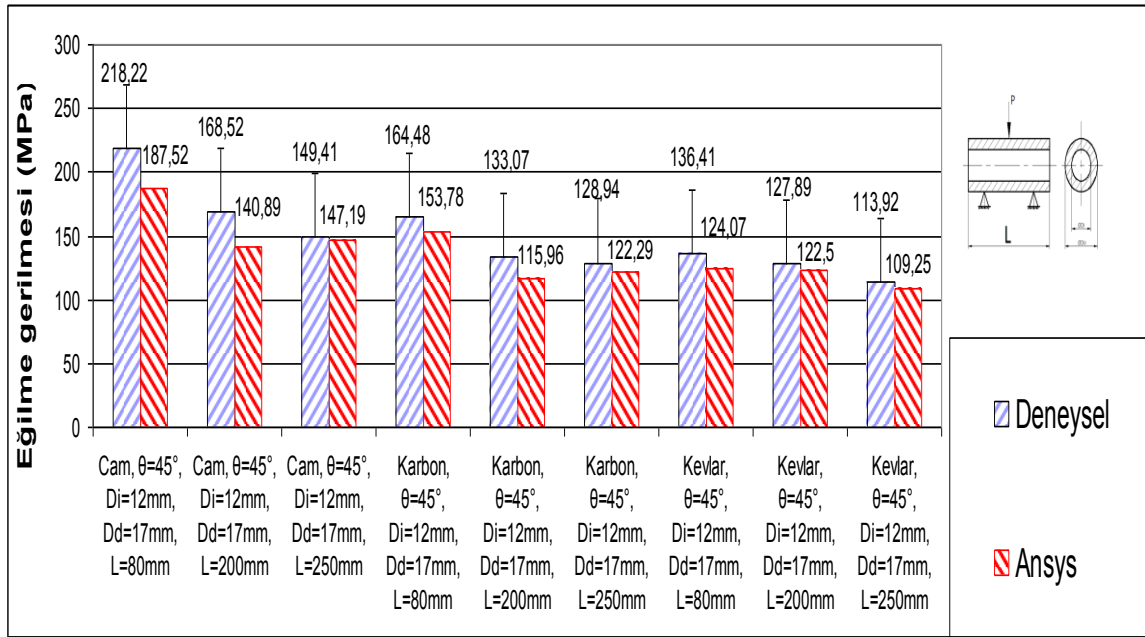
Şekil 5.52. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre deneysel ve ansys karşılaştırılması

Üç nokta Eğme Deneylerinde, Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş dairesel kompozit millerin eğilme gerilmeleri et kalınlığına bağılı olarak incelendiğinde,

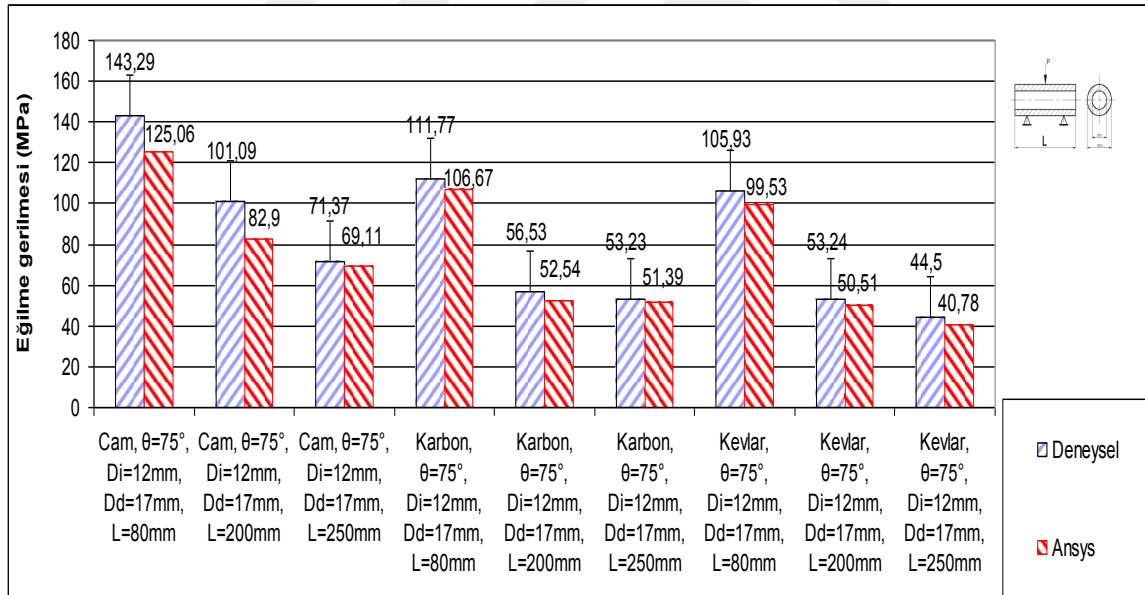
- Üç farklı uzunlukta ve $\theta=75^\circ$ oryantasyon açısında, $D_i=12\text{mm}$ iç çapına sahip cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin eğilme gerilme değerleri $D_i=13\text{mm}$ iç çapına sahip eğilme değerlerinden daha yüksek olduğu görüldü (Şekil 5.32-5.52).
- Üç farklı uzunlukta ve $\theta=75^\circ$ oryantasyon açısında, $D_i=12\text{mm}$ ile $D_i=13\text{mm}$ iç çaptaki cam/epoksi kompozit millerin eğilme gerilem değerlerinin en yüksek, kevlar/epoksi kompozit millerin eğilme gerilem değerlerinin ise en düşük olduğu görüldü (Şekil 5.32-5.52).
- $L=80\text{mm}$ uzunluğunda, $\theta=75^\circ$ oryantasyon açısında ve $D_i=12\text{mm}$ iç çapına sahip cam/epoksi kompozit millerin eğilme gerilme değerinin en yüksek olduğu ve $L=250\text{mm}$, $D_i=13\text{mm}$ iç çapına sahip kevlar/epoksi kompozit millerin eğilme gerilme değerinin en düşük olduğu görüldü (Şekil 5.32-5.52).
- İki farklı et kalınlığına ve üç ayrı uzunluğa sahip millerde cam/epoksi kompozit millerin eğilme değerlerinin en yüksek, kevlar/epoksi kompozit millerinin de eğilme değerlerinin en düşük olduğu tespit edildi (Şekil 5.32-5.52).
- Et kalınlığının artmasıyla içi boş dairesel kompozit millerin eğilme değerlerinin arttığı tespit edildi (Şekil 5.32-5.52). Bunun sebebi de dış çap ile iç çap arasındaki oranın azalmasından dolayı yani et kalınlığının azalması sonucunda mukavemetin de azaldığı aşıkardır.
- Deneysel tüm sonuçlar, Ansys sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görüldü (Şekil 5.69-5.82).

5.4.3. Mil boyunun Eğilme Gerilmesi Üzerine Etkisinin incelenmesi

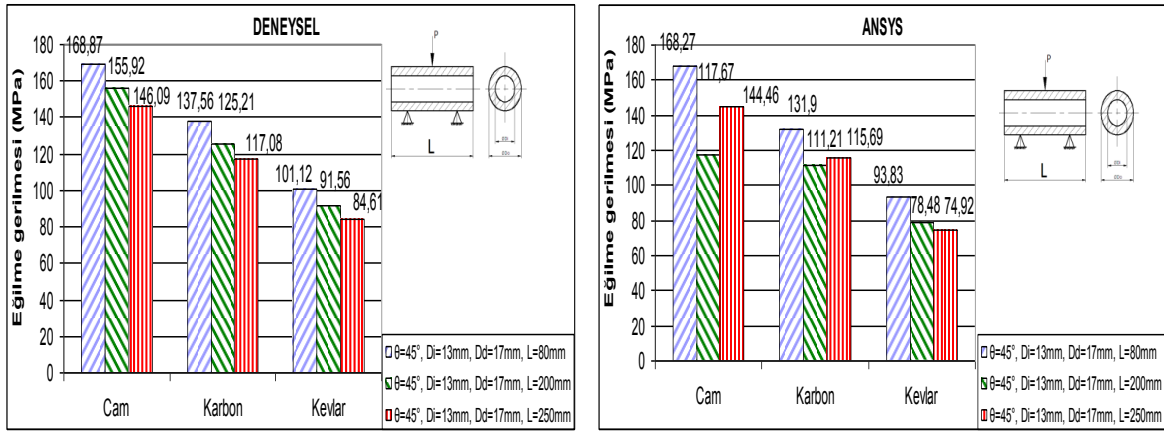
Üç farklı takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi) boya göre deneysel ve ANSYS'te elde edilen eğilme değerleri aşağıda görüldüğü üzere grafiklere aktarıldı ve kendi aralarında karşılaştırma yapılarak yorumlandı.



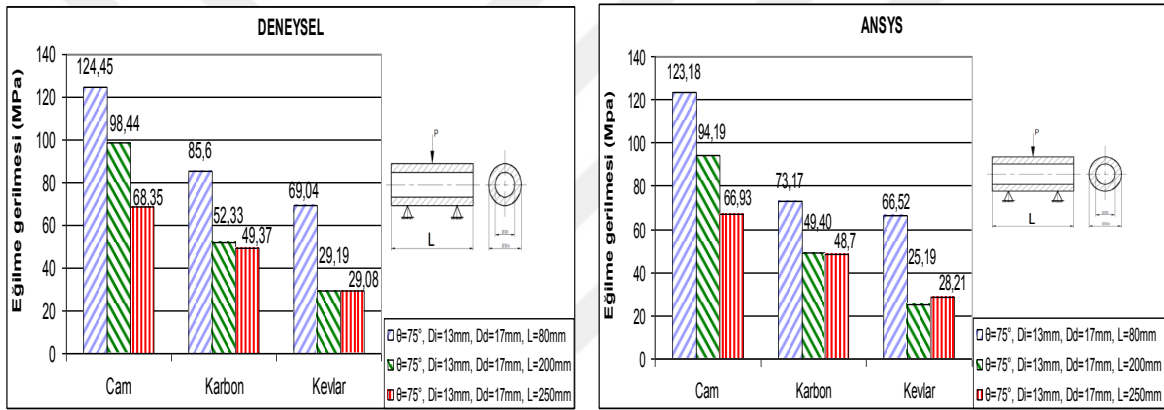
Şekil 5.53. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 45° oryantasyon açında eğilme gerilmenin boya göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



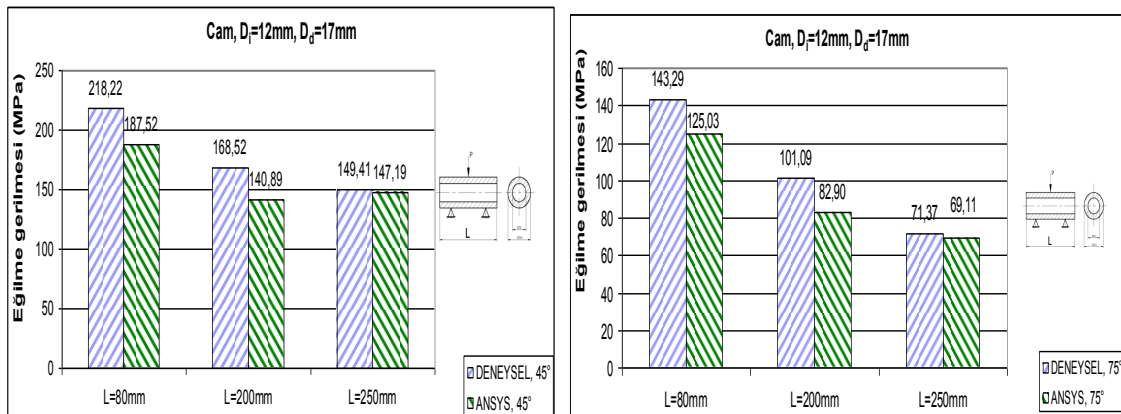
Şekil 5.54. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altında 75° oryantasyon açında eğilme gerilmenin boya göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



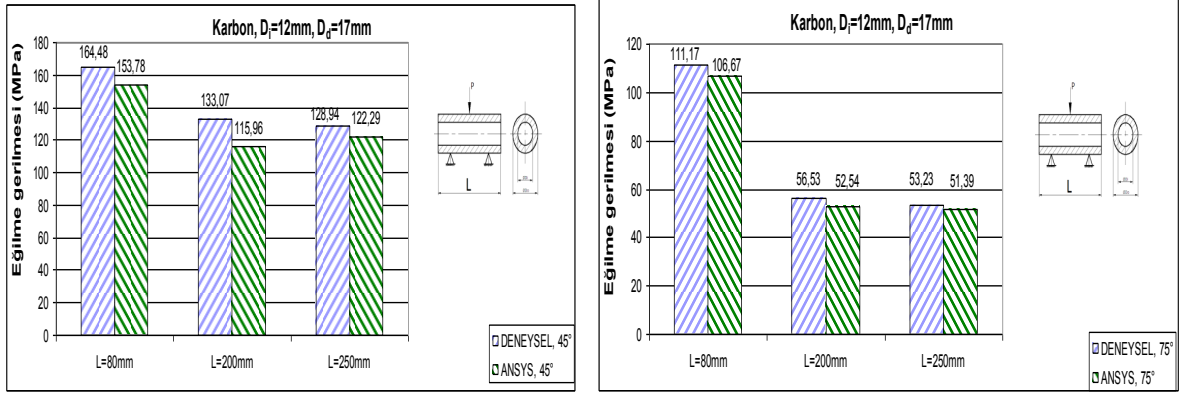
Şekil 5.55. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



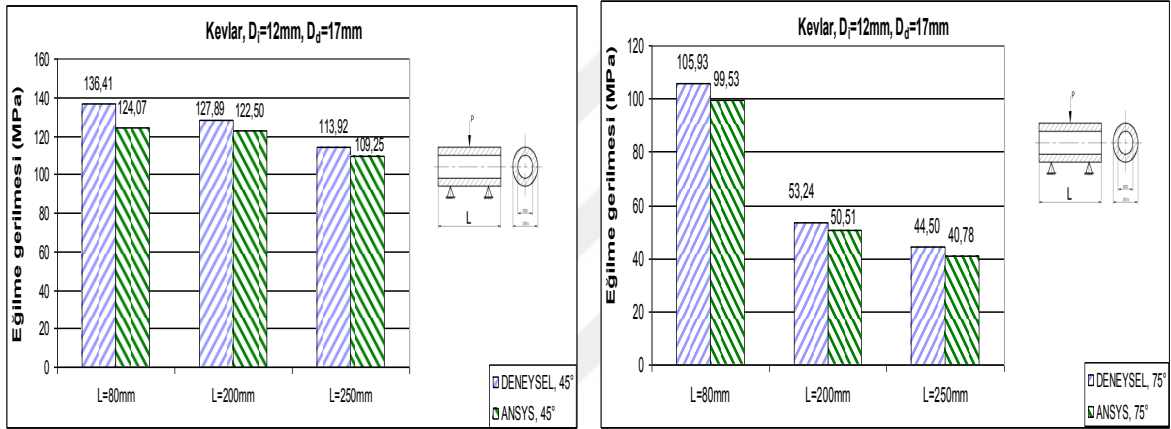
Şekil 5.56. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



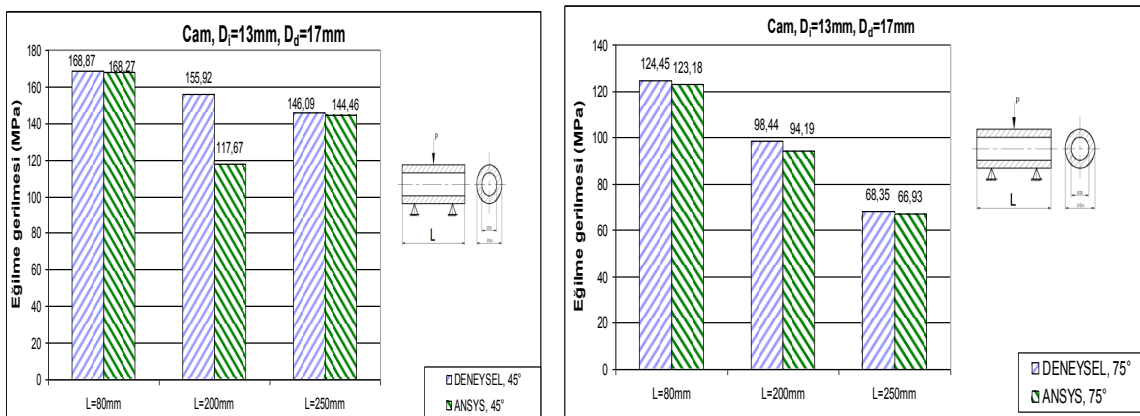
Şekil 5.57. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



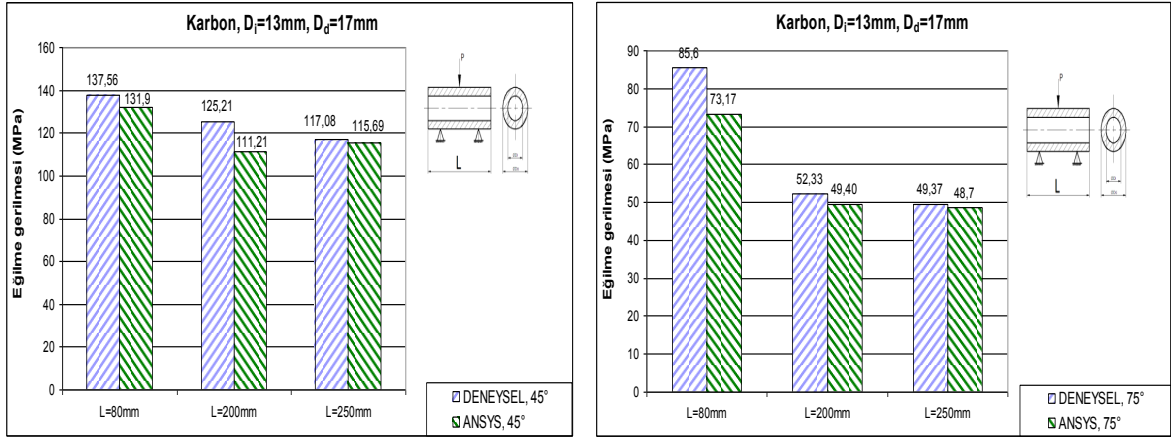
Şekil 5.58. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



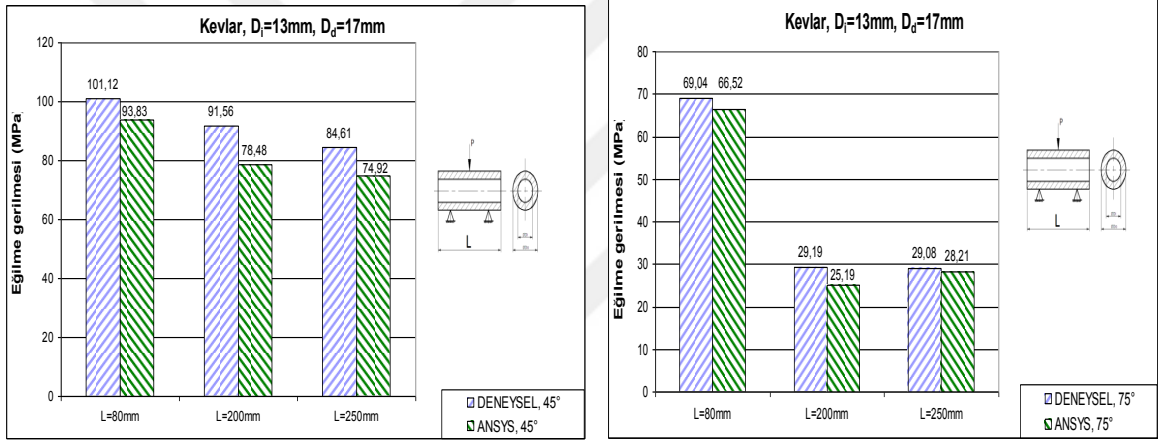
Şekil 5.59. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



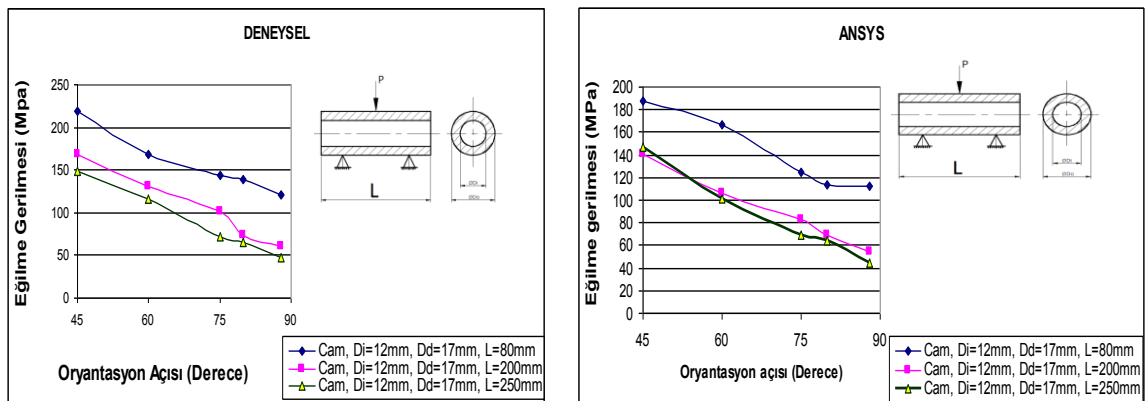
Şekil 5.60. cam/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



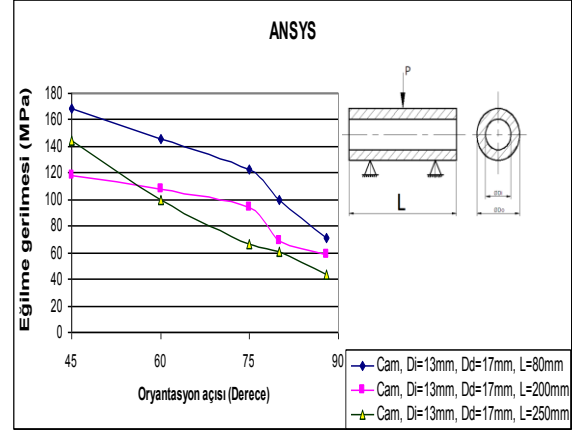
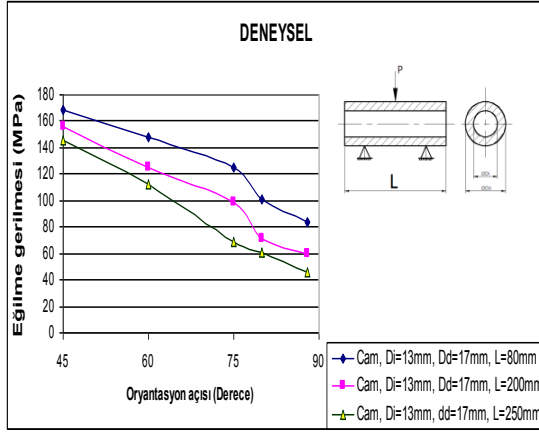
Şekil 5.61. karbon/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



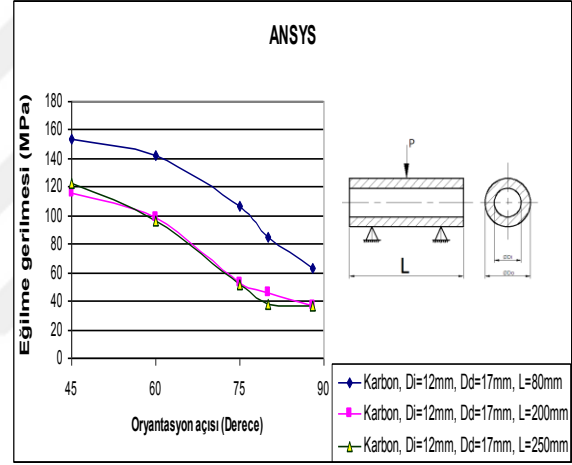
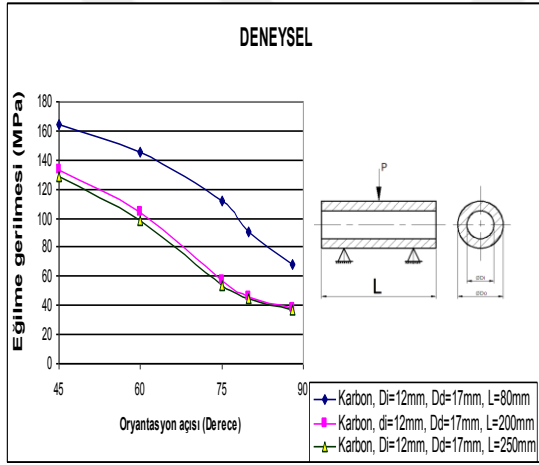
Şekil 5.62. kevlar/epoksi numunelerinin eğilme gerilme değerinin 45° ve 75° oryantasyon açısında boya göre deneysel ve ansys karşılaştırılması



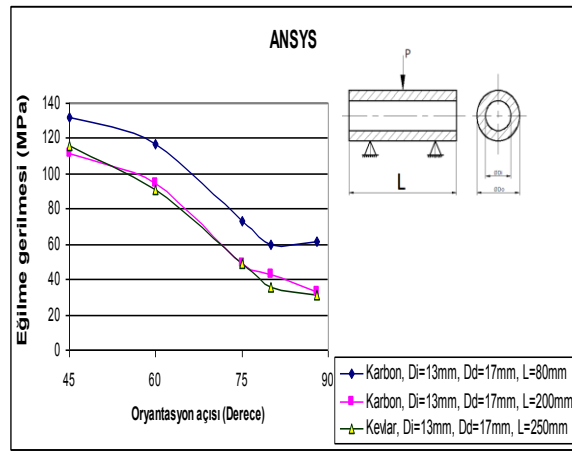
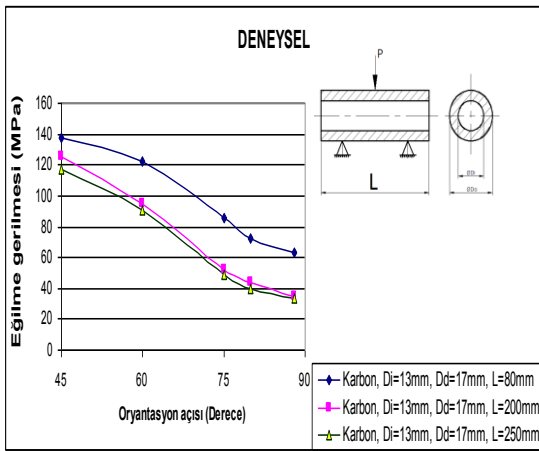
Şekil 5.63. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi



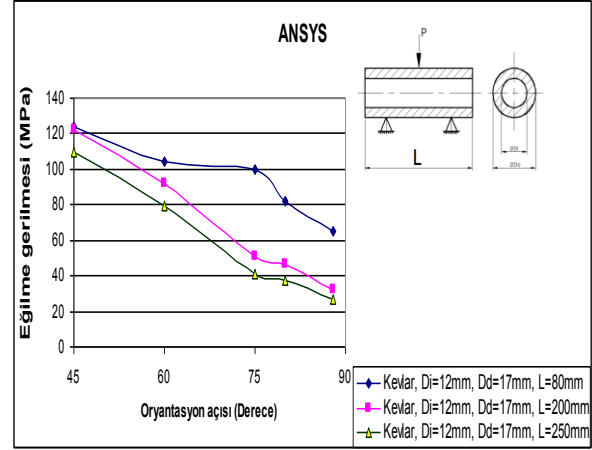
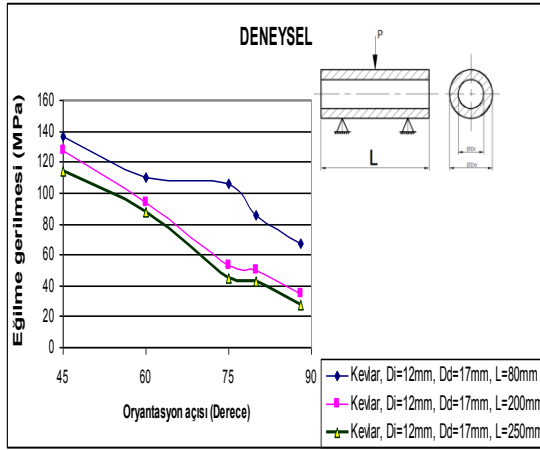
Şekil 5.64. Cam/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi



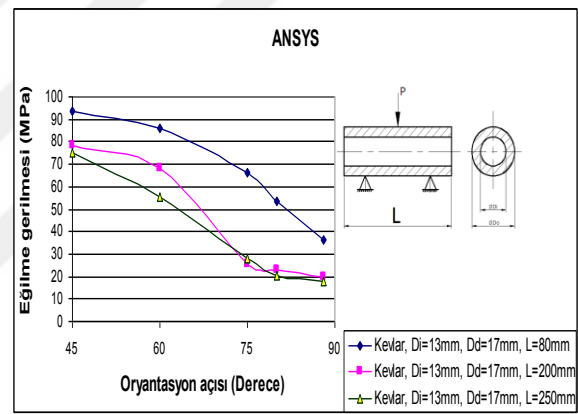
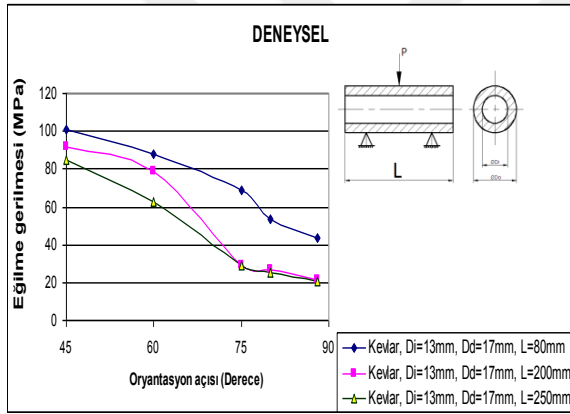
Şekil 5.65. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi



Şekil 5.66. Karbon/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarında boya göre deneysel-ansys değişimi



Şekil 5.67. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarındaki boyaya göre deneysel-ansys değişimi



Şekil 5.68. Kevlar/epoksi numunelerinin 3 nokta eğme yükü altındaki eğilme gerilmesinin tüm oryantasyon açılarındaki boyaya göre deneysel-ansys değişimi

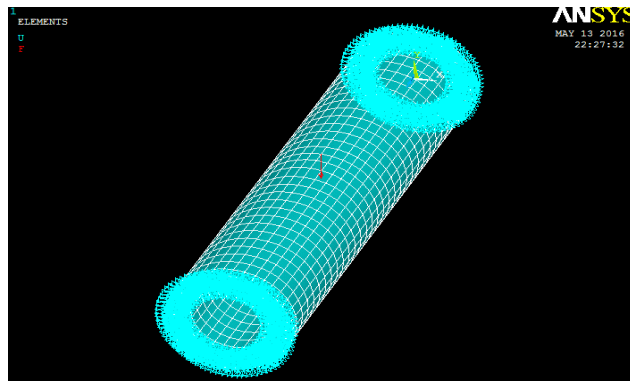
Üç nokta Eğme Deneylerinde, Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş dairesel kompozit millerin eğilme gerilmeleri takviye malzeme uzunluklarına bağlı olarak incelendiğinde,

- İç çap $D_i=12\text{mm}$, $D_i=13\text{mm}$ ve oryantasyon açısı $\theta=75^\circ$ 'de, uzunluk arttıkça, cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit millerin eğilme değerlerinin azaldığı görüldü (Şekil 5.53-5.68).
- İç çap $D_i=12\text{mm}$ ve oryantasyon açısı $\theta=75^\circ$ 'de, $L=80\text{mm}$ uzunluğunda cam/epoksi kompozit milin en yüksek eğilme değerine ulaştığı ve bunu sırasıyla karbon/epoksi, kevlar/epoksi kompozit millerinin izlediği görüldü (Şekil 5.53-5.68).

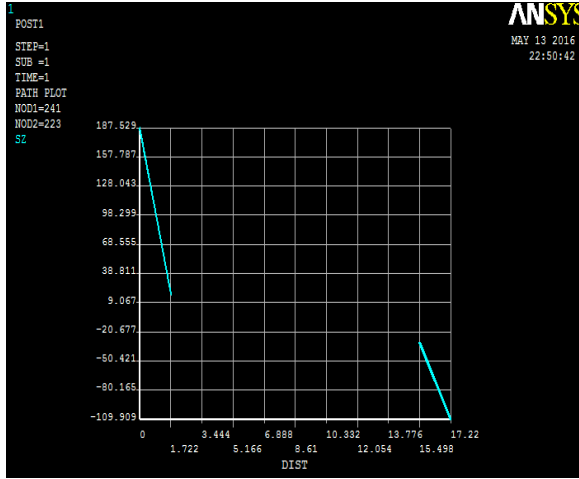
- İç çap $D_i=13\text{mm}$ ve oryantasyon açısı $\theta=75^\circ$ 'de, $L=250\text{mm}$ uzunluğunda kevlar/epoksi kompozit milin en düşük eğilme değerine ulaştığı tespit edildi (Şekil 5.53-5.68).
- İç çap $D_i=12\text{mm}$ ve oryantasyon açısı $\theta=75^\circ$ 'de, $L=80\text{mm}$ uzunluğunda cam/epoksi kompozit milin en yüksek eğilme değerine ulaştığı görüldü (Şekil 5.53-5.68)
- Hem $D_i=12\text{mm}$ hem de $D_i=13\text{mm}$ iç çapına ve $L=80\text{mm}$, 200mm , 250mm uzunluklarına sahip millerin en yüksek eğilme değerleri cam/epoksi, en düşük eğilme değerlerinin ise kevlar/epoksi kompozit millerde görüldüğü tespit edildi (Şekil 5.53-5.68).
- Ayrıca $D_i=12\text{mm}$ ve $D_i=13\text{mm}$ iç çapındaki, $L=80\text{mm}$, 200mm , 250mm uzunluklarına sahip karbon/epoksi millerin eğilme değerlerinin kevlar/epoksi kompozit millerin eğilme değerlerinden daha yüksek olduğu görüldü (Şekil 5.53-5.68).
- Genelde boy arttıkça tüm içi boş dairesel kompozit millerin eğilme gerilme değerlerinin azaldığı tespit edildi (Şekil 5.53-5.68).
- Deneysel tüm sonuçlar, Ansys sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görüldü (Şekil 5.69-5.82).

Yukarıda belirtilen sonuçları şu şekilde açıklamak mümkündür; genelde tüm malzemenin boyu arttıkça malzemedeki yer değiştirme oranı da artacaktır. Boyun uzamasıyla sehim artacağından, aynı kuvvet altında gerilme oranı da düşecektir.

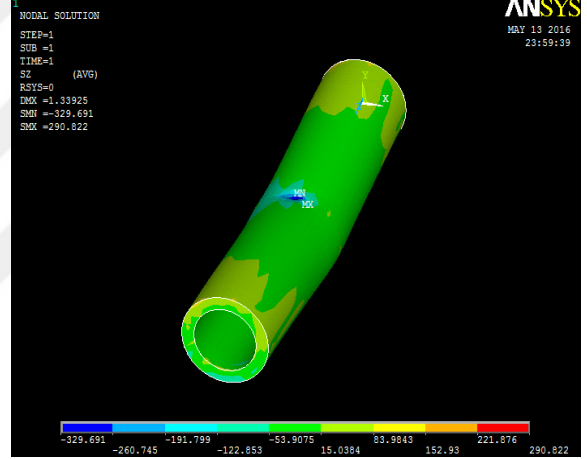
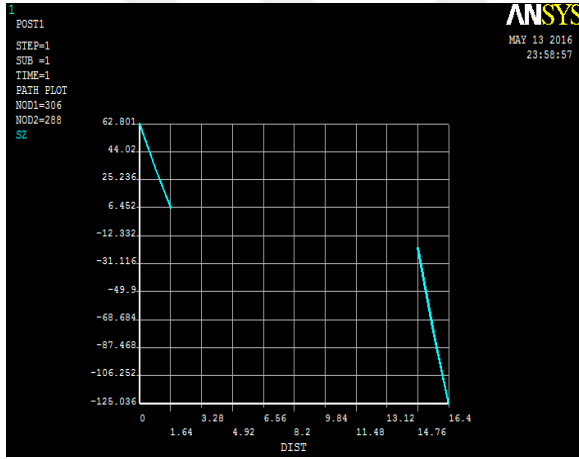
5.4.4. Üç nokta eğme ANSYS çözümleri



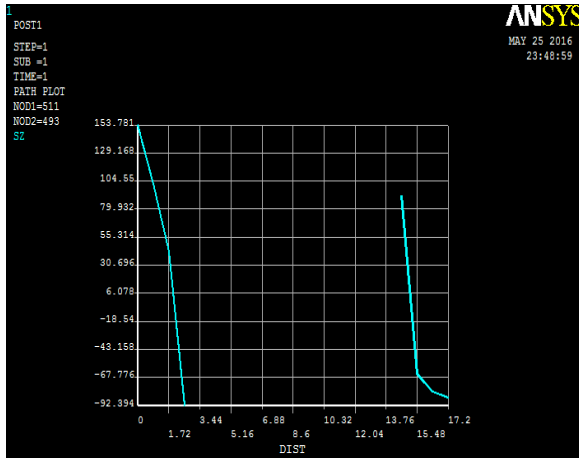
Şekil 5.69. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu



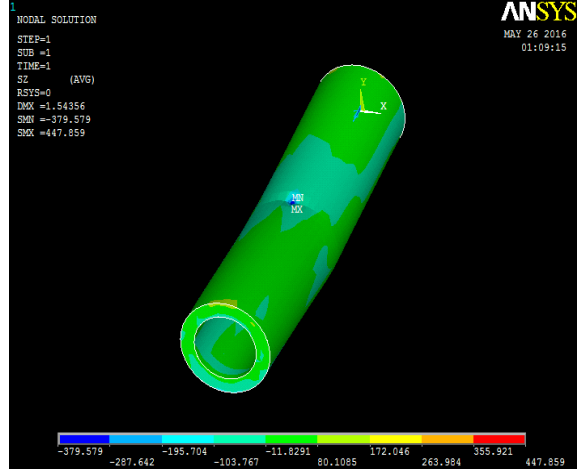
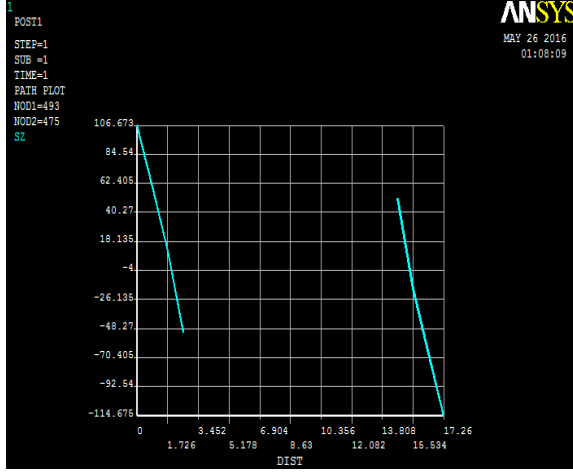
Şekil 5.70. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



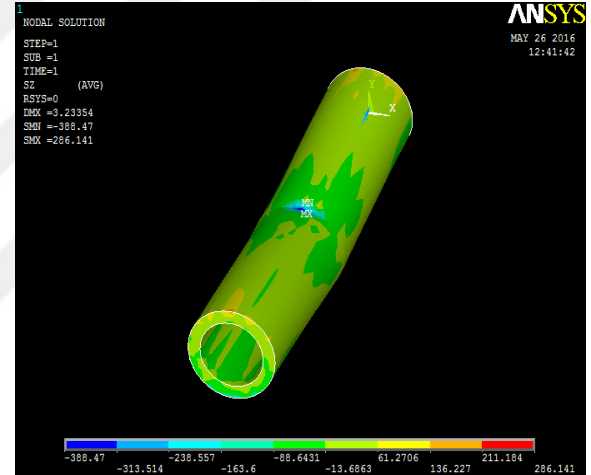
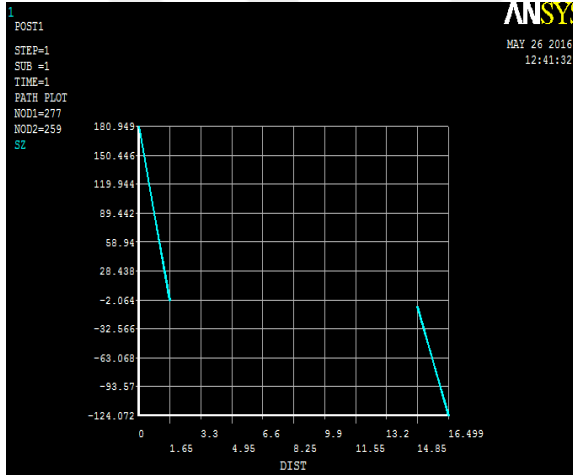
Şekil 5.71. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



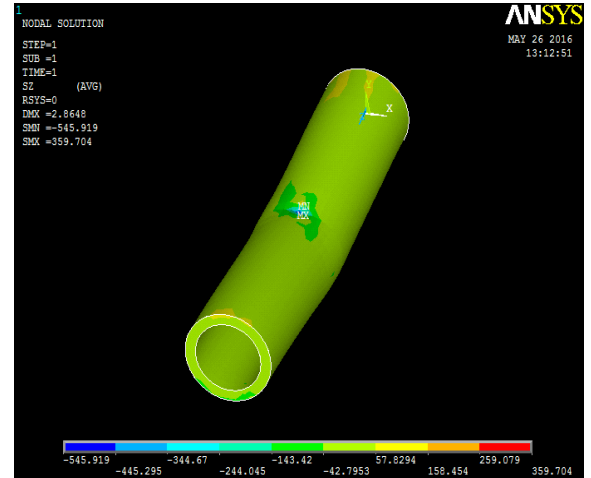
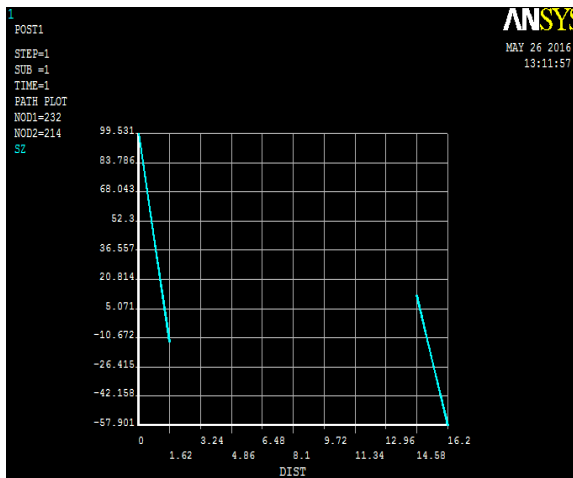
Şekil 5.72. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



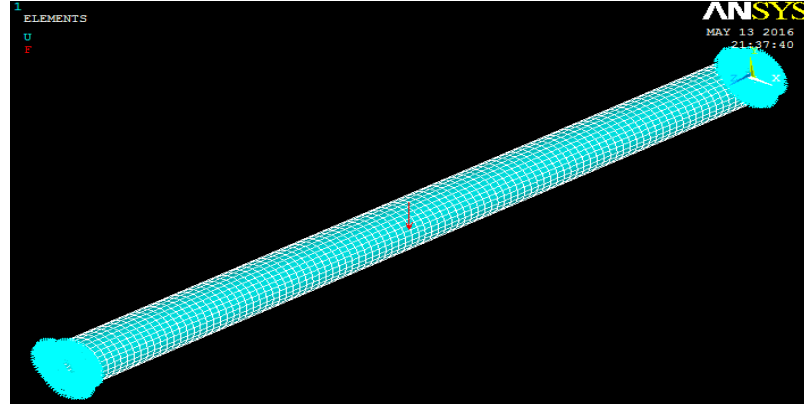
Şekil 5.73. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_a=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



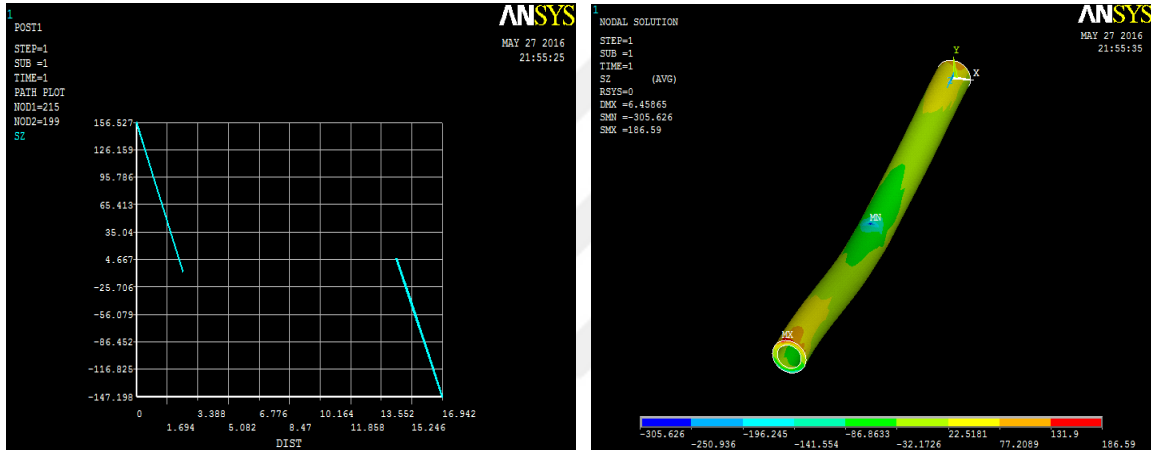
Şekil 5.74. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_a=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



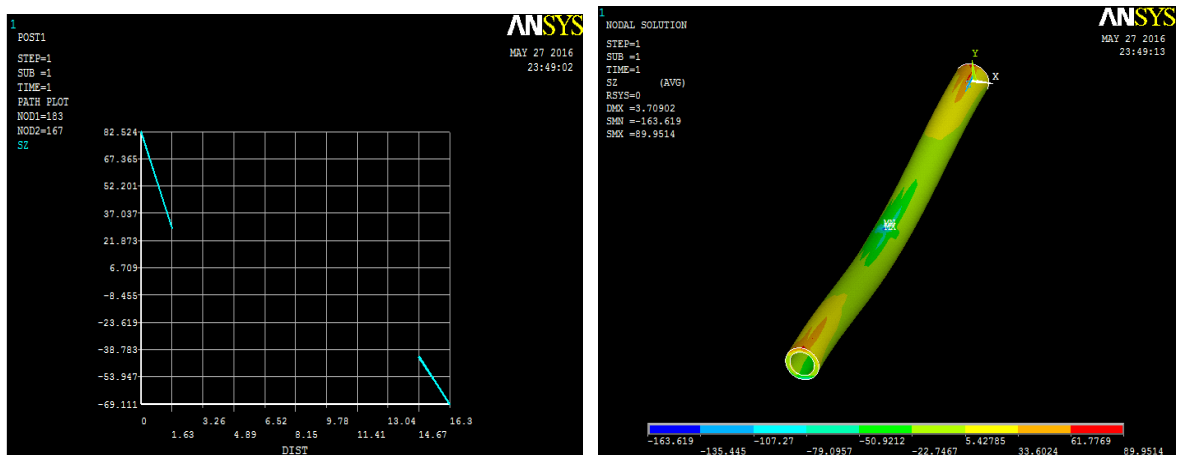
Şekil 5.75. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_a=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



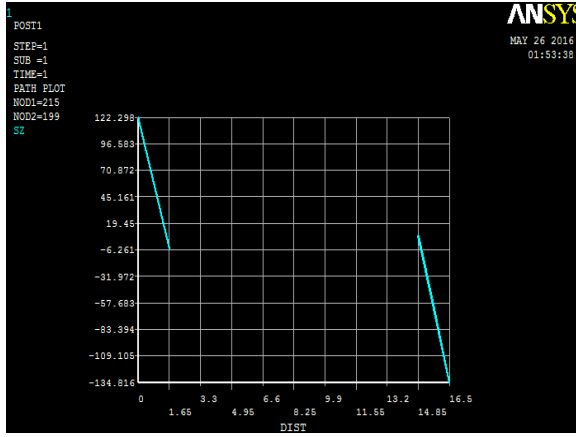
Şekil 5.76. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu



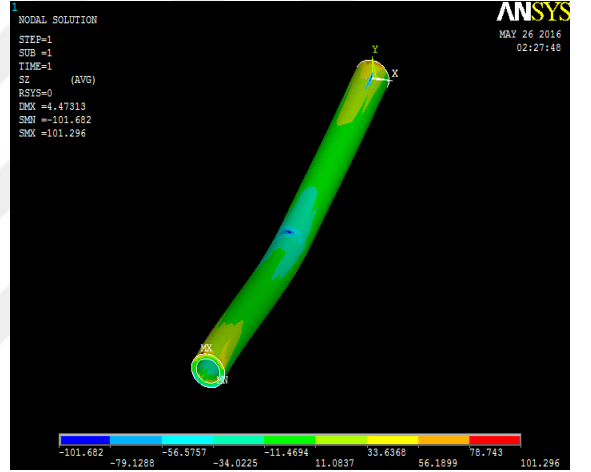
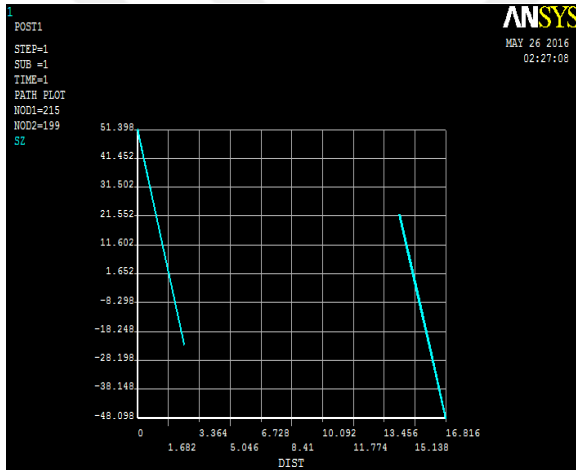
Şekil 5.77. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



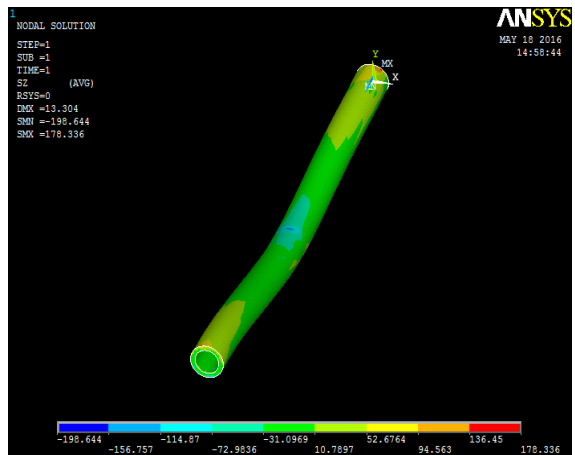
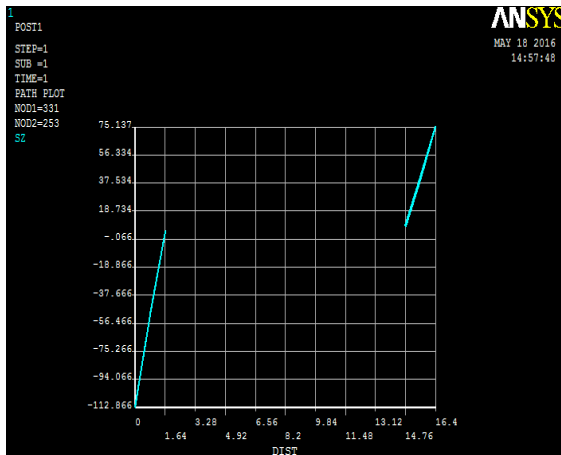
Şekil 5.78. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Cam/epoksi'nin ANSYS'te uç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



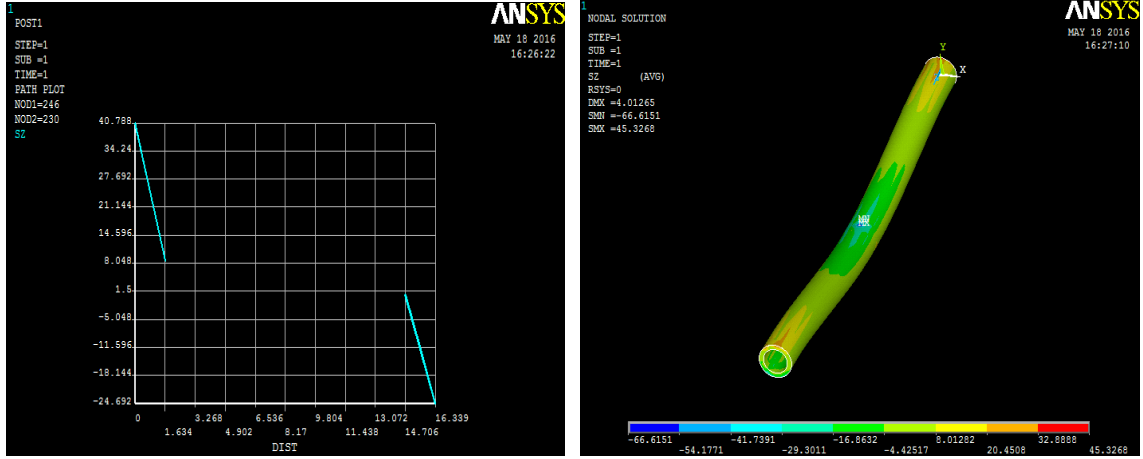
Şekil 5.79. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.80. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Karbon/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.81. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.82. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_o=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyutundaki Kevlar/epoksi'nin ANSYS'te üç nokta eğme gerilmesi altındaki çözümü

5.5. Burulma Testleri

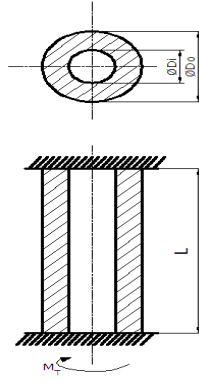
80mm, 200mm ve 250mm uzunluklarında, 17mm dış çapa ve 12mm ile 13mm iç çapına sahip üç tabakadan oluşan cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit miller, ayrı ayrı burulma deneylerine tabi tutuldu. Burulma testleri, 250 kN yük hücreğine sahip yer tipi Shimadzu AG-X universal cihazı ile oda sıcaklığında yapıldı. Burulma test cihazı $1^\circ - 360^\circ$ derece/dakika aralığında çalışmaktadır (Şekil 5.83).

Genel olarak literatürlerde burulma deneylerinin $15^\circ - 20^\circ$ derece/dakika aralığında yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada burulma deneyleri, her bir numune için 20° derece/dakika test hızlarında gerçekleştirildi.

ASTM standartına göre bütün numuneler düşey konumda olacak şekilde iki çene arasına yerleştirildi. Üst çenenin sabit, alt çenenin dönmesi neticesinde numunelere burulma torku uygulanarak maksimum burulma kırılma modül değerleri (R_T) elde edildi (Şekil 5.84). Böylece, her bir numune için elde edilen veriler grafiklere aktarıldı.



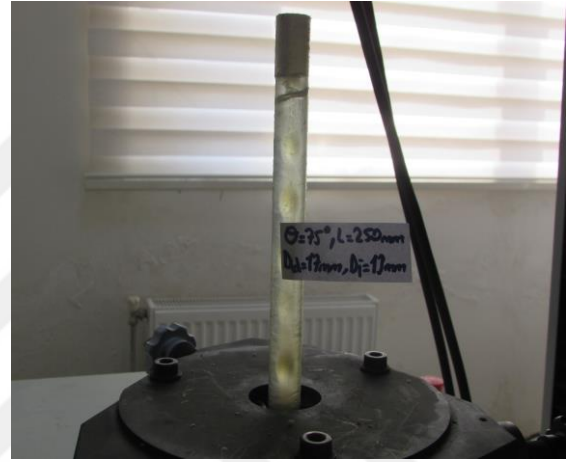
Şekil 5.83. Burulma test düzeneği



Şekil 5.84. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi numunelerin şekli ve boyutları



a



b

Şekil 5.85. 250mm uzunluktaki camepoksi numuneleri; a) burulma öncesi, b) burulma sonrası



a



b

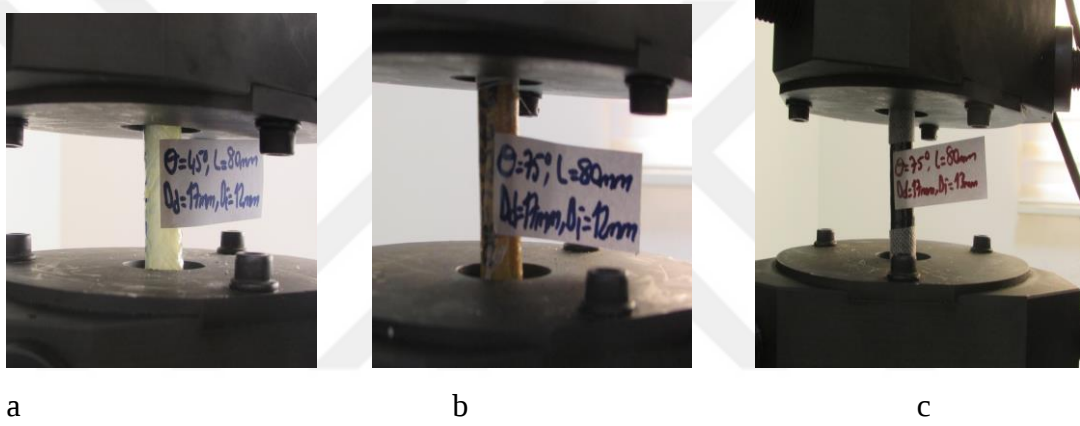
Şekil 5.86. 250mm uzunluktaki karbon/epoksi numuneleri; a) burulma öncesi, b) burulma sonrası



a

b

Şekil 5.87. 250mm uzunluktaki kevlar/epoksi numuneleri; a) burulma öncesi, b) burulma sonrası



a

b

c

Şekil 5.88. L=80mm boyundaki numunelerin burulma test düzeneğine bağlanması: a) cam/epoksi b) kevlar/epoksi c) karbon/epoksi

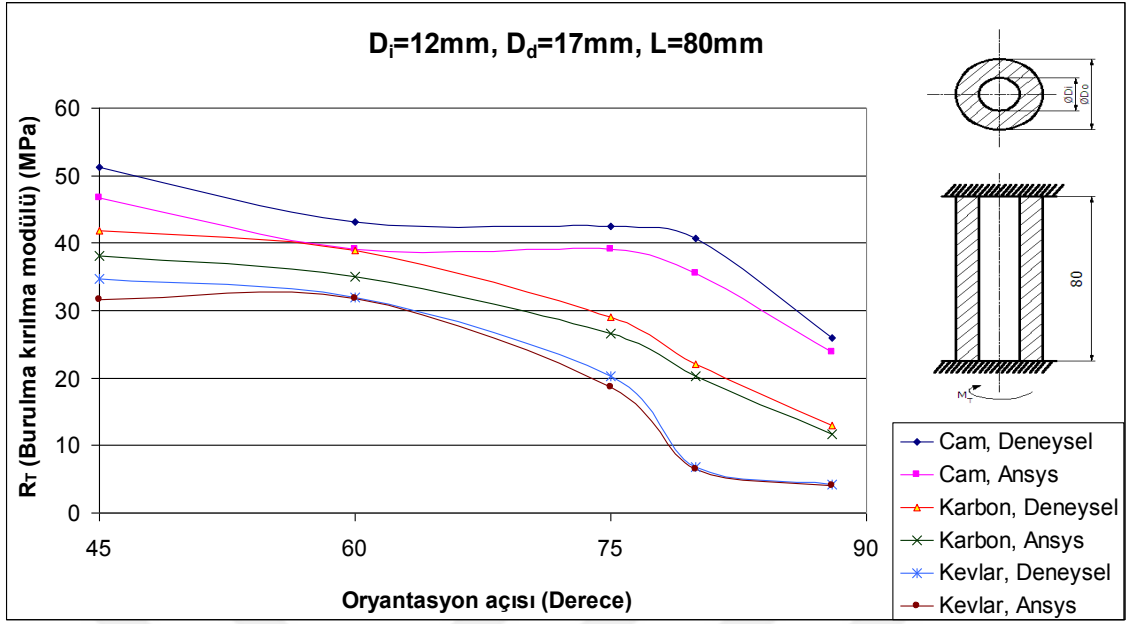
5.5.1. Burulma deneyleri sonucunda elde edilen burulma kırılma modül değerlerinin grafiklere aktarılması

Burulma testine tabi tutulan üç farklı takviye malzeme numunelerinin burulma kırılma modül değerleri (R_T) aşağıdaki denklemlere göre hesaplandı,

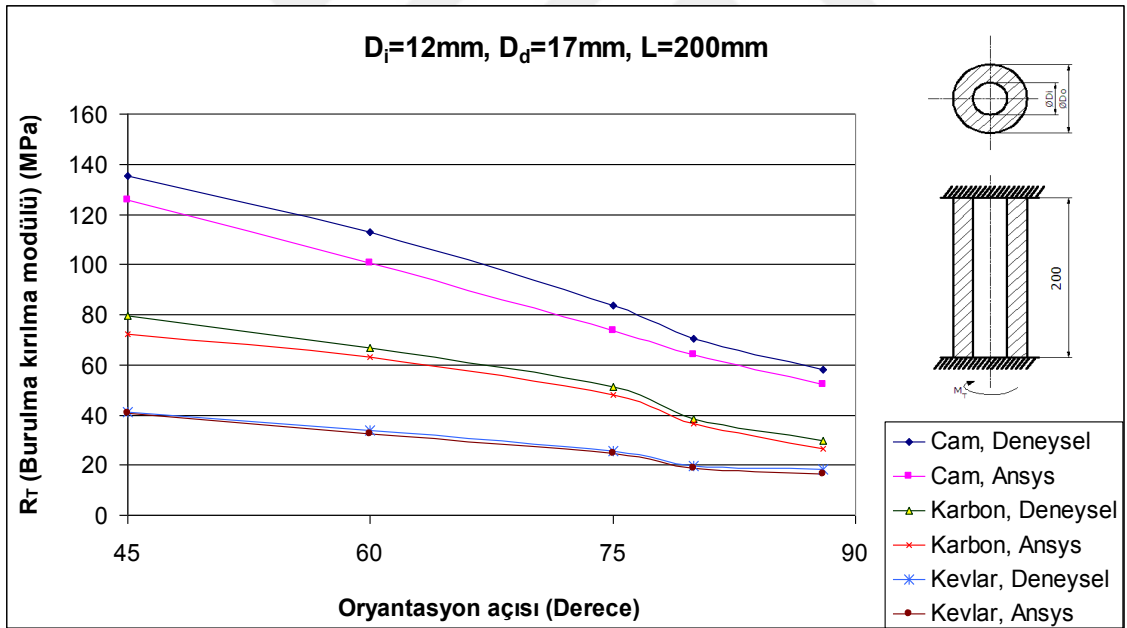
$$R_T = \frac{M_t}{W_t} \quad (\text{MPa}) \quad [5.4], M_t \text{ Deneylerde elde edilen maksimum tork (Nmm)}$$

$$W_t = \frac{\pi(D_d^4 - D_i^4)}{16.D_d} \quad (\text{mm}^3) \quad [5.5]$$

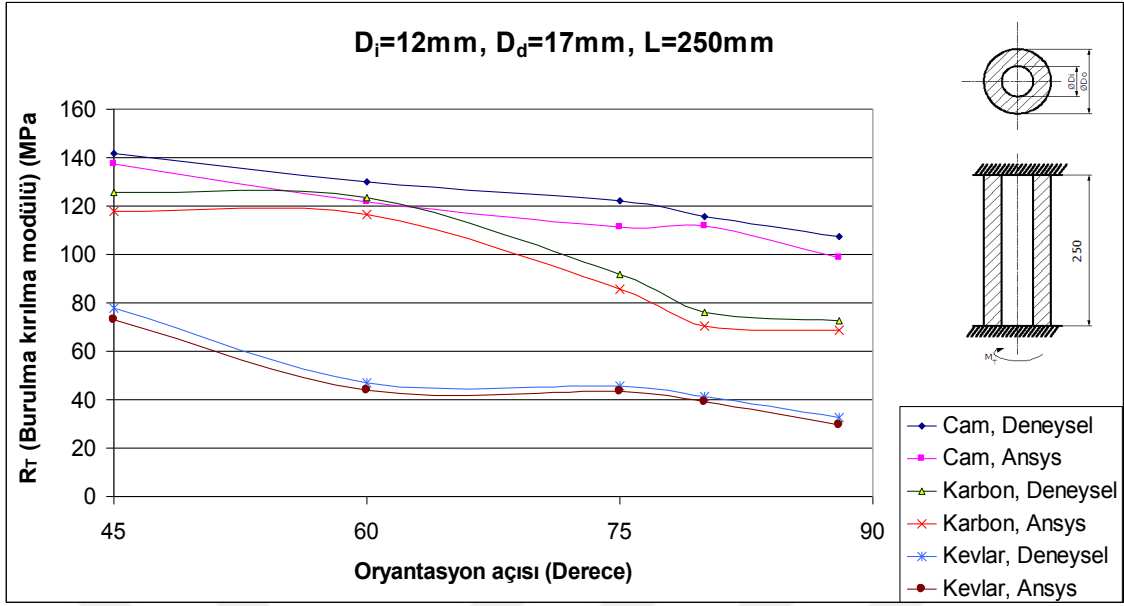
Üç farklı takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi) oryantasyon açısına göre deneysel ve ANSYS'te elde edilen burulma kırılma modül (R_T) değerleri aşağıda görüldüğü üzere grafiklere aktarıldı ve kendi aralarında karşılaştırma yapılarak yorumlandı.



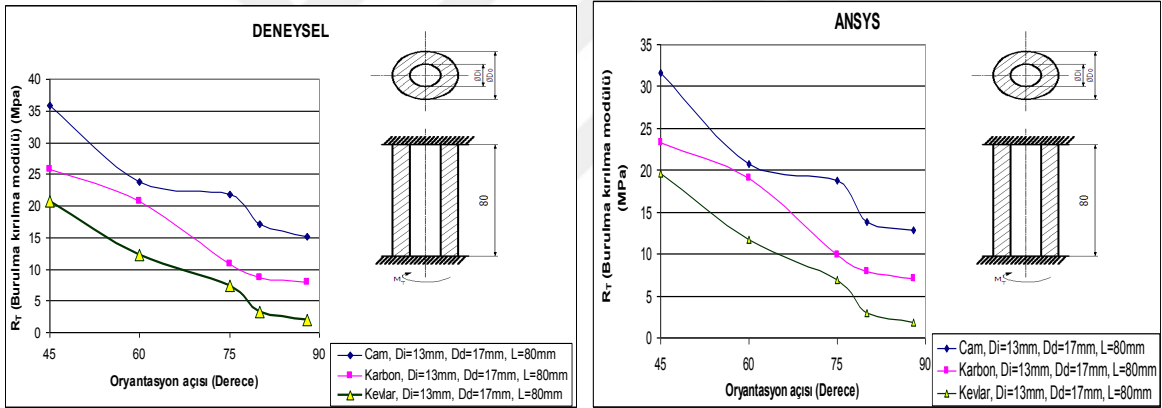
Şekil 5.89. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi



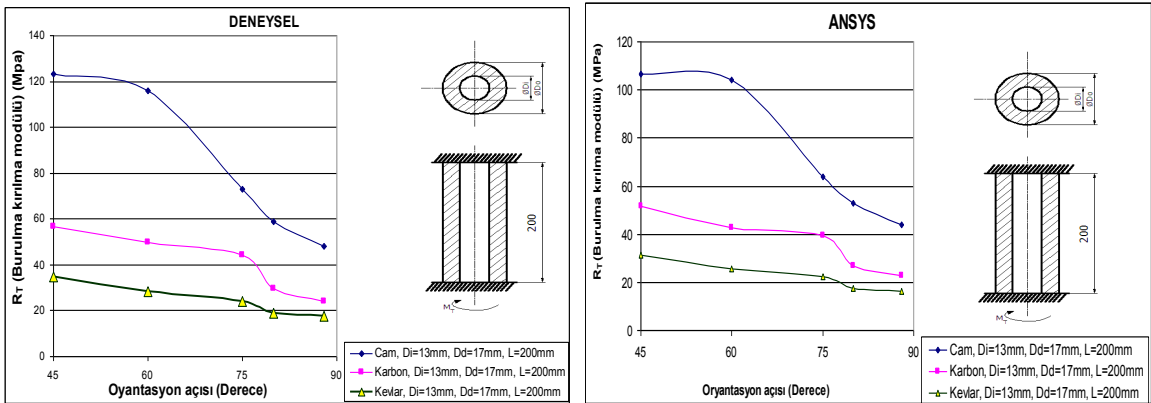
Şekil 5.90. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi



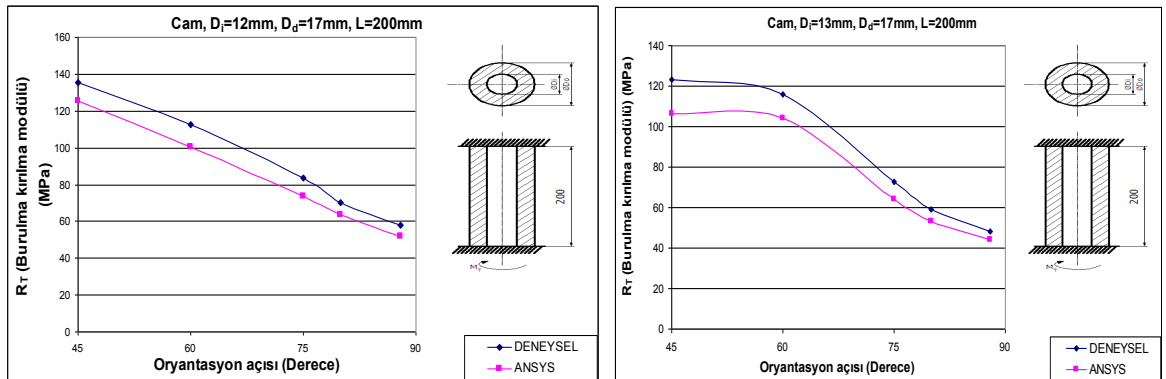
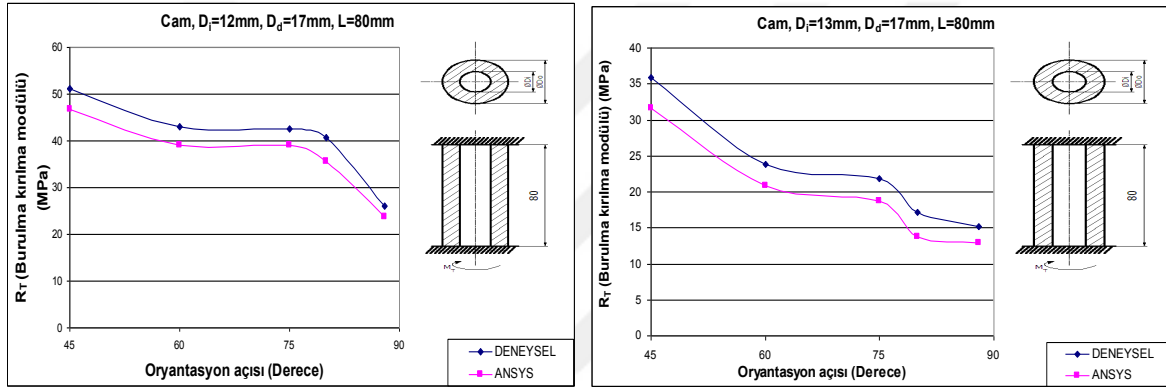
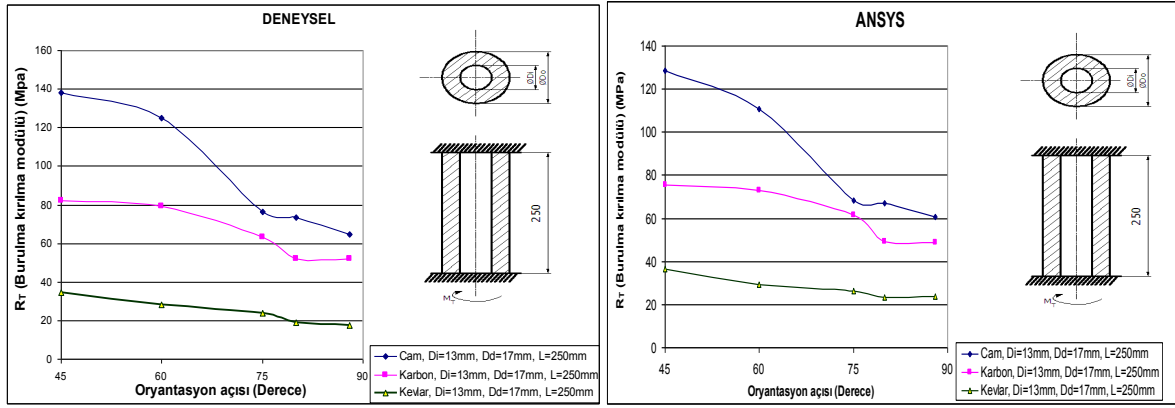
Şekil 5.91. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi toplu gösterimi

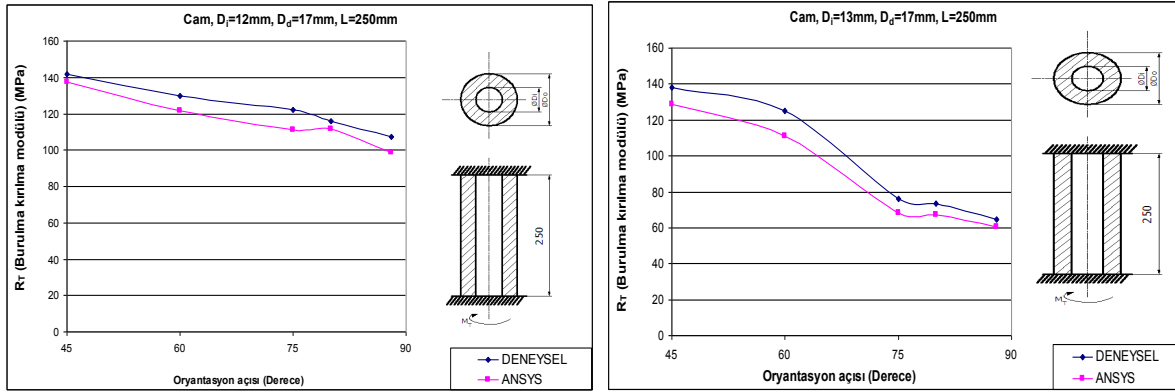


Şekil 5.92. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi

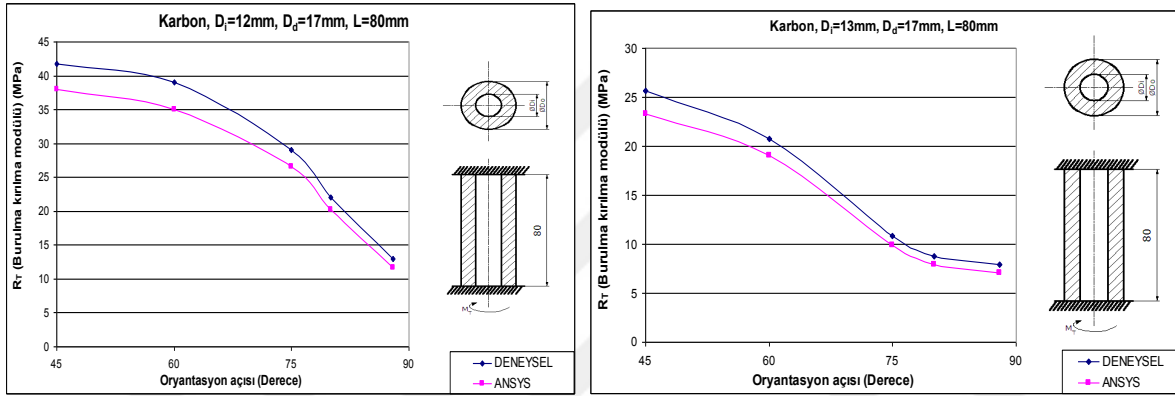


Şekil 5.93. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında R_T -oryantasyon açısı değişimi

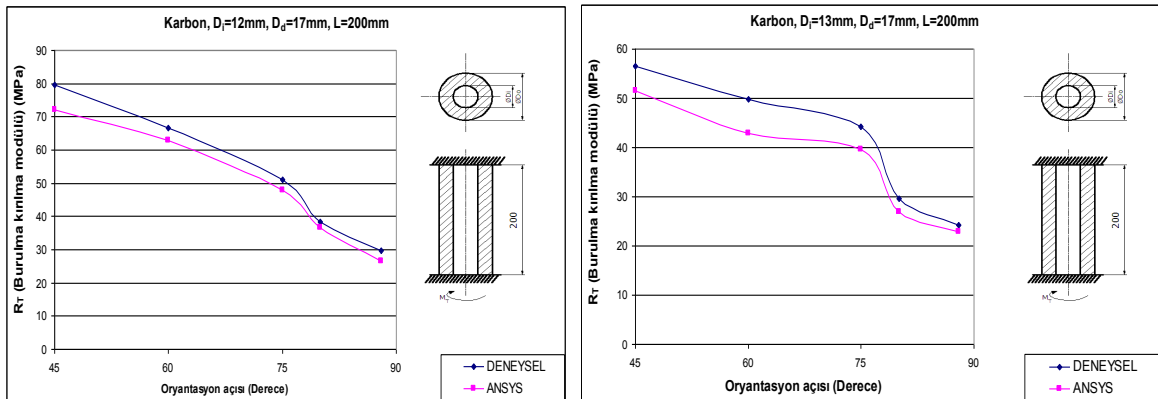




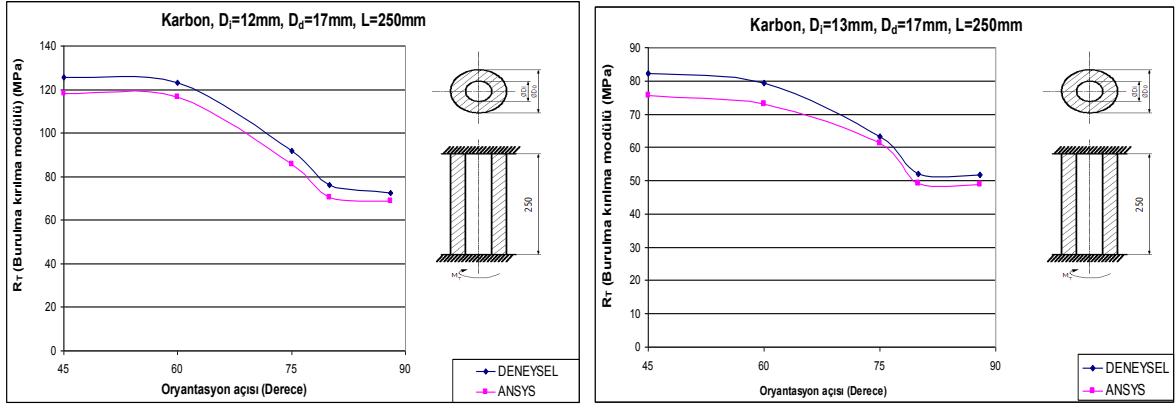
Şekil 5.97. Cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



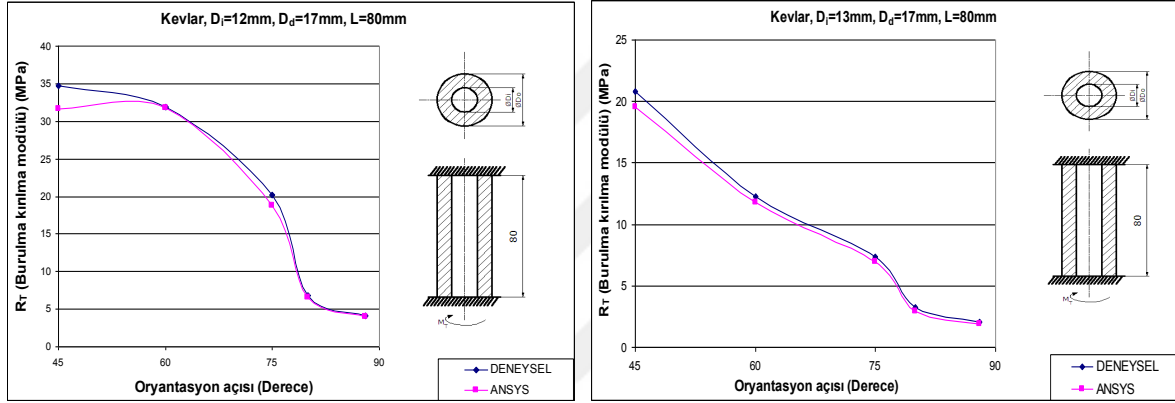
Şekil 5.98. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



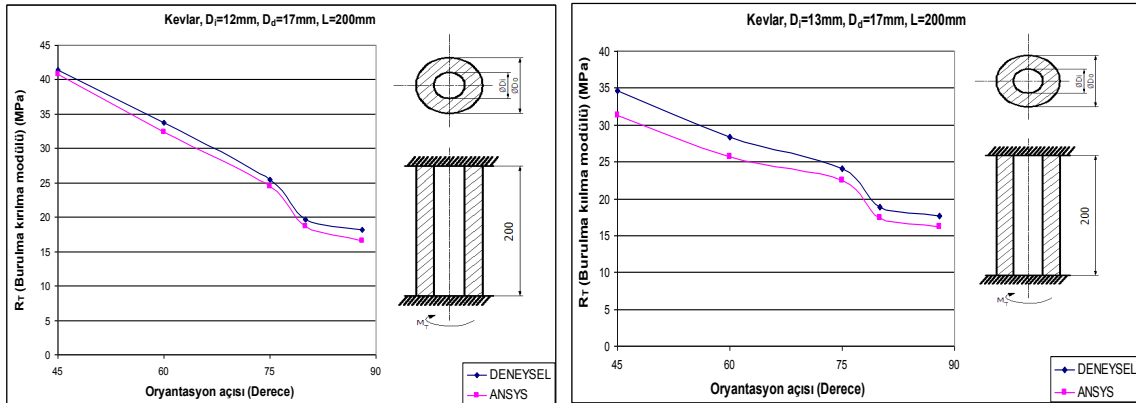
Şekil 5.99. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



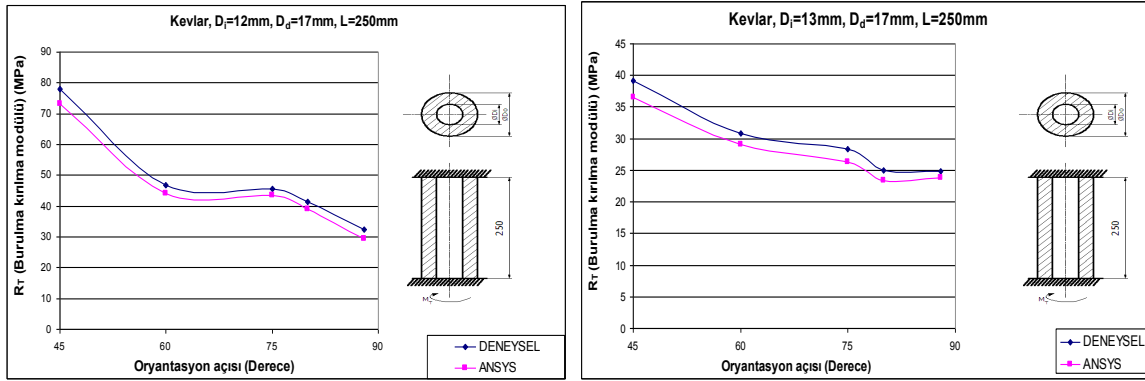
Şekil 5.100. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.101. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.102. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.103. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması

Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerleri takviye malzemelerine ve oryantasyon açısına bağlı olarak incelendiğinde,

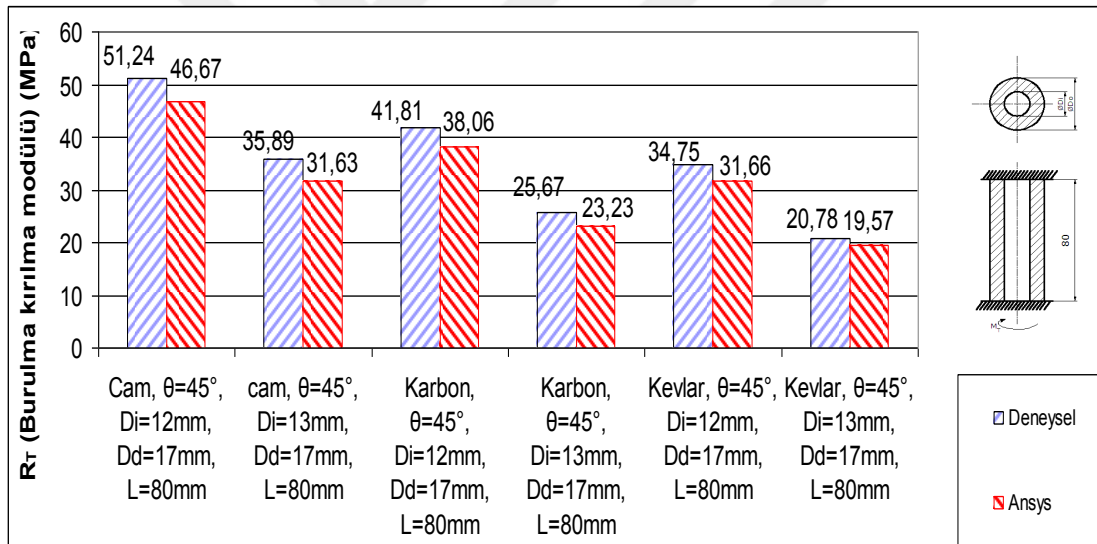
- Grafiklerden de görüleceği üzere fiber oryantasyon açısı arttıkça cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin azaldığı görüldü (Şekil 5.89-5.103).
- Üç ayrı takviye malzemesinde, burulma kırılma modül değerinin 45° oryantasyon açısında iken maksimum değere ulaştığı görüldü (Şekil 5.89-5.103). Ayrıca, oryantasyon açısının artmasıyla lifler arasındaki yer değiştirme miktarı artacağından dolayı burulma kırılma modül gerilme değerleri de azalmaktadır.
- Boyutsal olarak incelendiğinde içi boş dairesel kompozit millerin uzunluğu arttıkça, cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerinin de arttığı görüldü (Şekil 5.89-5.103).
- Üç farklı uzunlukta cam/epoksi takviyeli kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlendi ve bunu sırasıyla karbon/epoksi ve kevlar/epoksi takviyeli kompozit millerinin izlediği görüldü (Şekil 5.89-5.103). Bununla birlikte imalat esnasındaki gr/m^2 ağırlıklarının birbirinden farklı olması sonuçlarda farklılıklar meydana getirmiştir. Yani gr/m^2 ağırlığının azalmasıyla takviye malzemesinin gerilme değerleri, dayanımı gibi mekanik özellikleri de artmaktadır.
- Kevlar/epoksi kompozit millerinin, bütün uzunluklarda en düşük burulma gerilmelerine maruz kaldıkları görüldü (5.89-5.103).
- Tüm içi boş dairesel kompozit millerde uzunluk bakımından deney sonuçları incelendiğinde, cam takviyeli millerin burulma kırılma modül değerlerinin diğer

numunelere göre daha yüksek çıktığı görüldü. Yani uzunluk arttıkça malzemelerin kayma gerilmesi değerleri de artmaktadır. Bunun nedeni, burulma açısının uzunlukla doğru orantılı olduğu gerçeğidir.

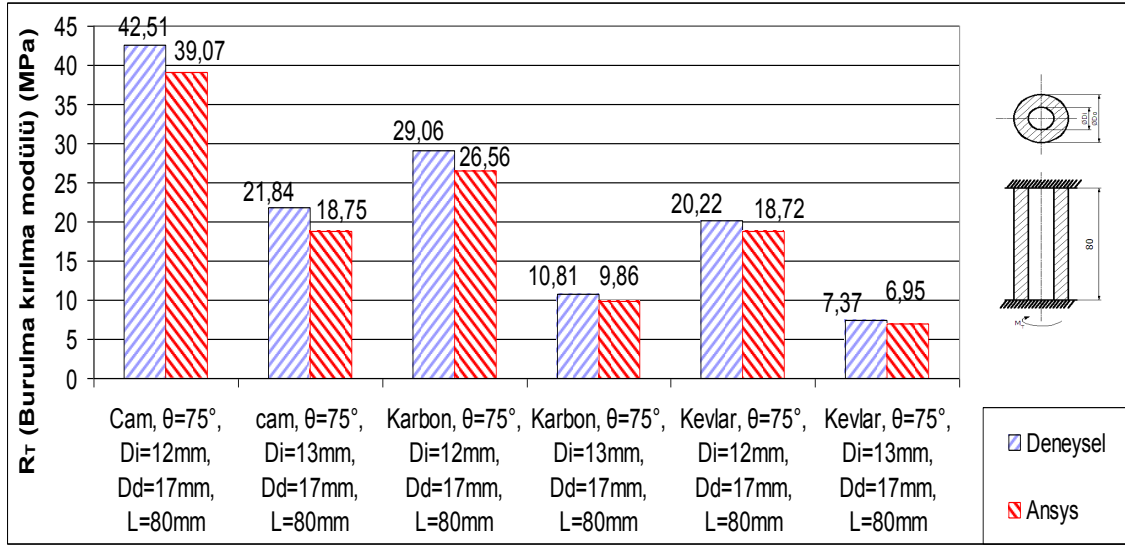
- Deneysel tüm sonuçlar, Ansys sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görüldü (Şekil 9.140-9.153).

5.5.2. Et Kalınlığının Burulma Gerilmesi Üzerine Etkileri

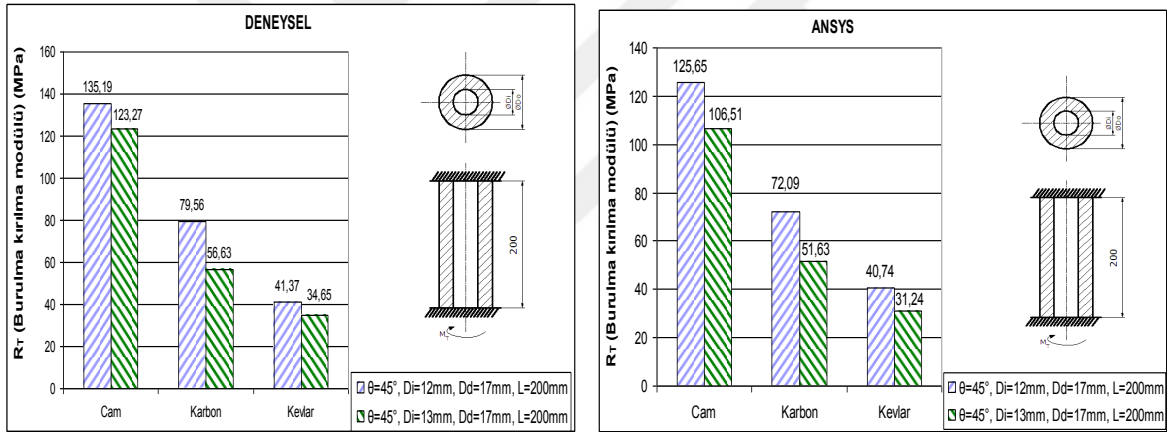
Üç farklı takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi) et kalınlığına göre deneysel ve ANSYS'te elde edilen burulma kırılma modül (R_T) değerleri aşağıda görüldüğü üzere grafiklere aktarıldı ve kendi aralarında karşılaştırma yapılarak yorumlandı.



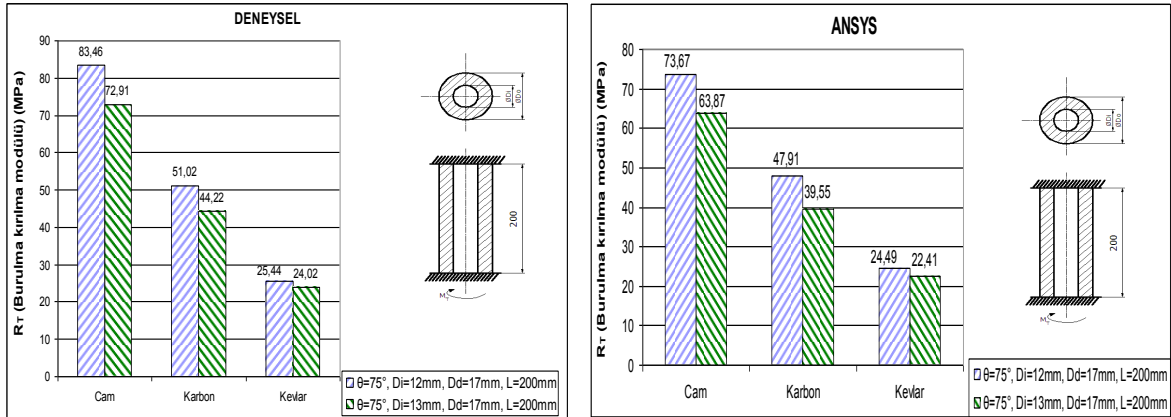
Şekil 5.104. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



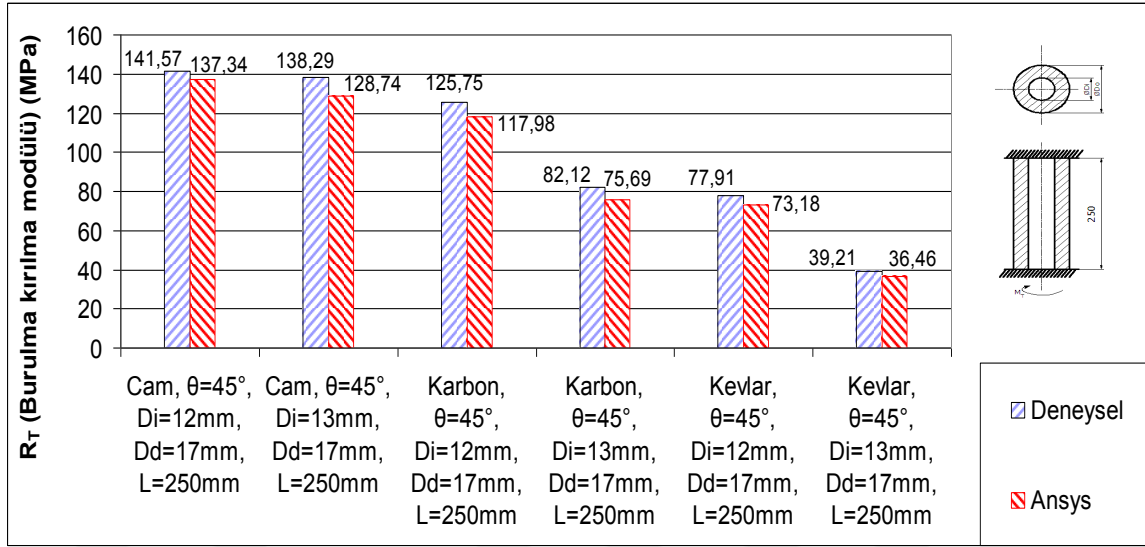
Şekil 5.105. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



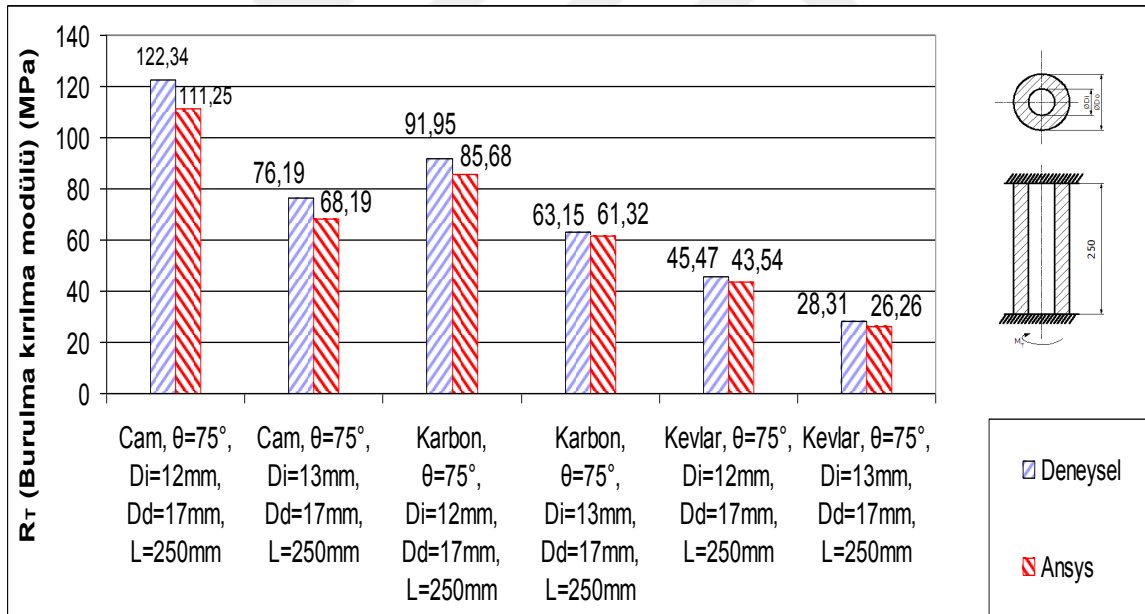
Şekil 5.106. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında R_T değerlerinin et kalınlığına göre deneysel ansys karşılaştırılması



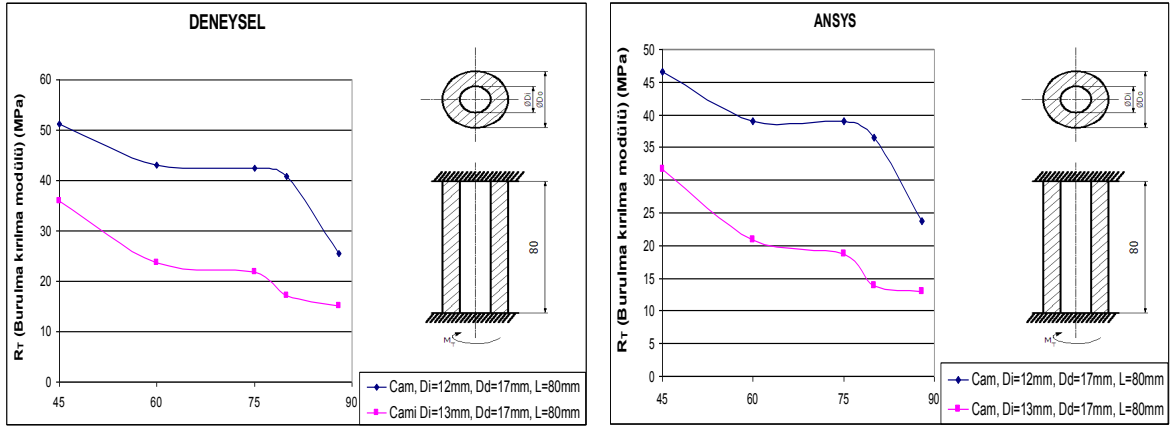
Şekil 5.107. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında R_T değerlerinin et kalınlığına göre deneysel ansys karşılaştırılması



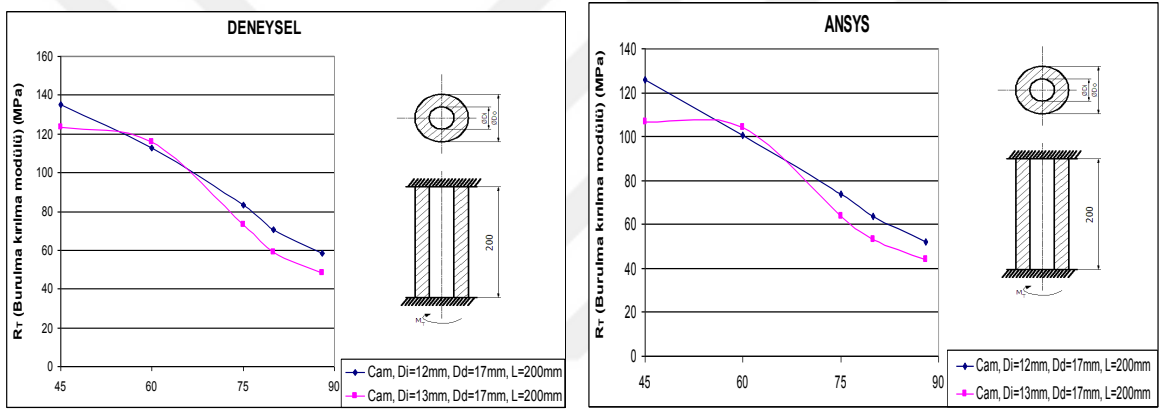
Şekil 5.108. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



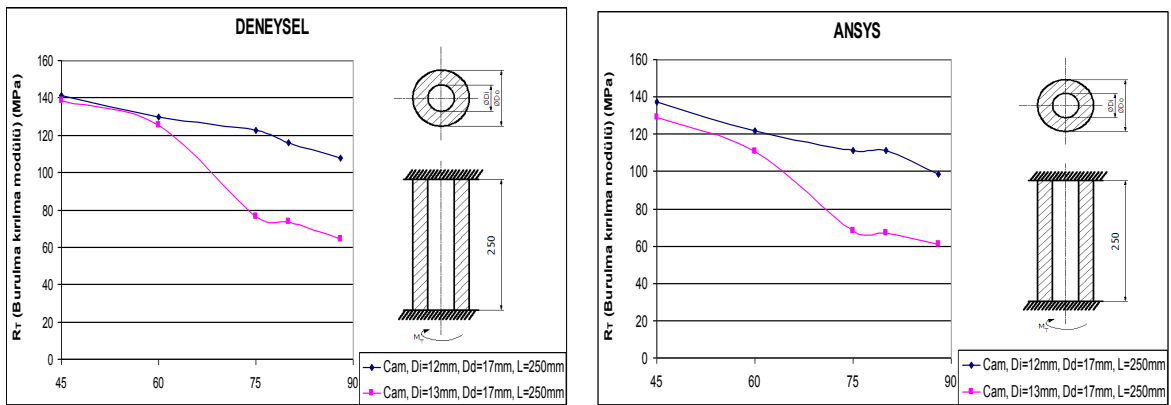
Şekil 5.109. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açında R_T gerilmelerinin et kalınlığına göre deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



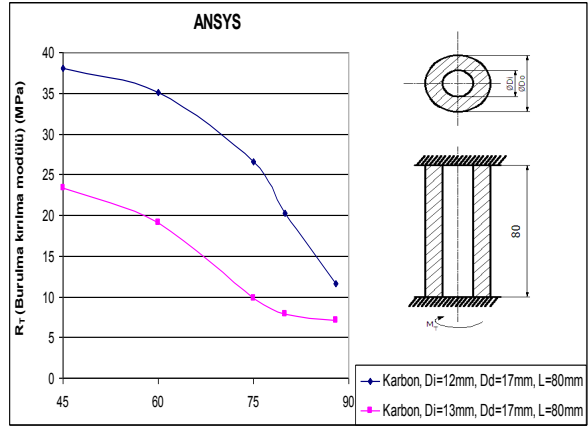
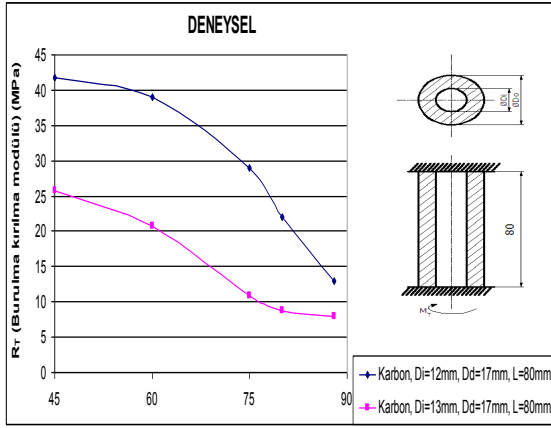
Şekil 5.110. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



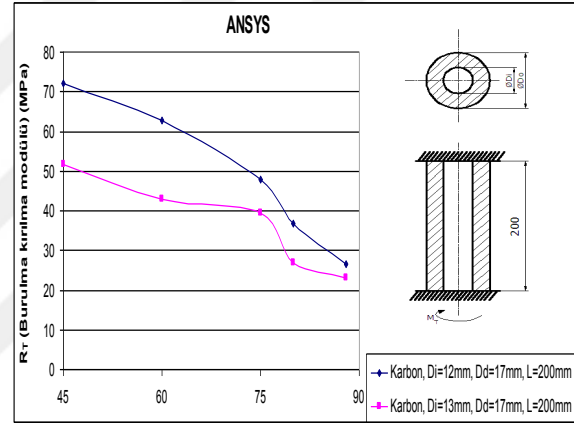
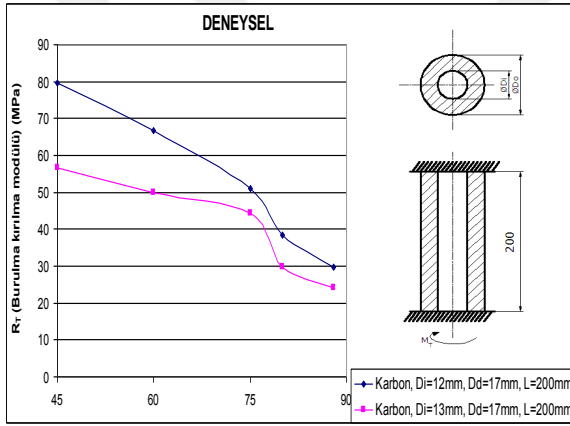
Şekil 5.111. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



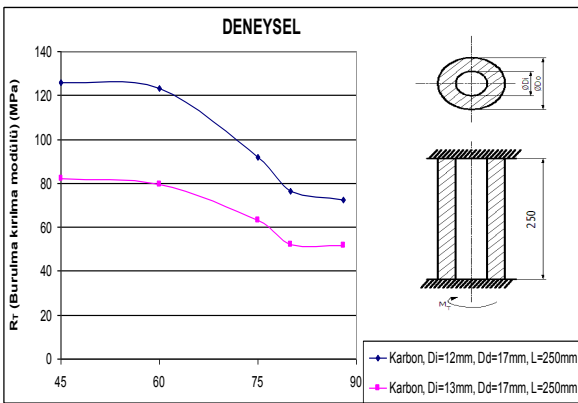
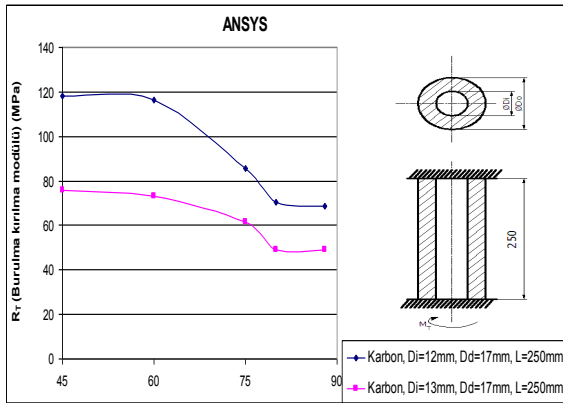
Şekil 5.112. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



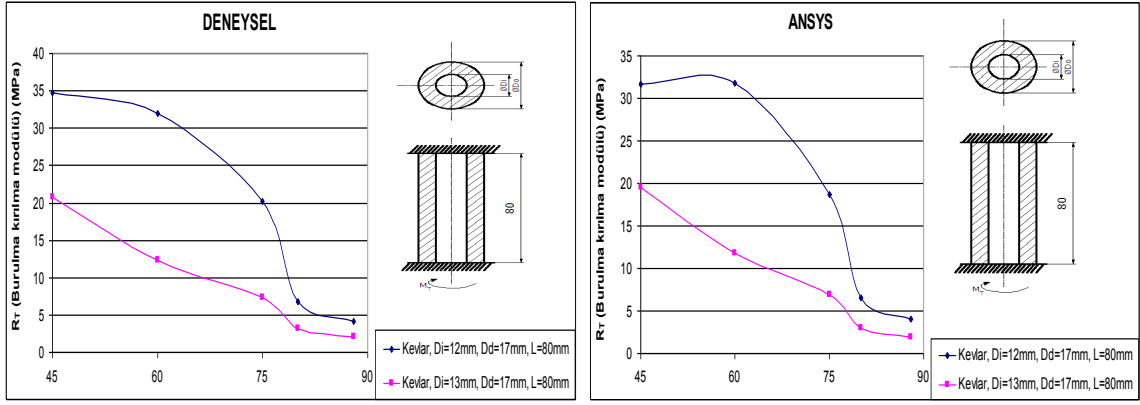
Şekil 5.113. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



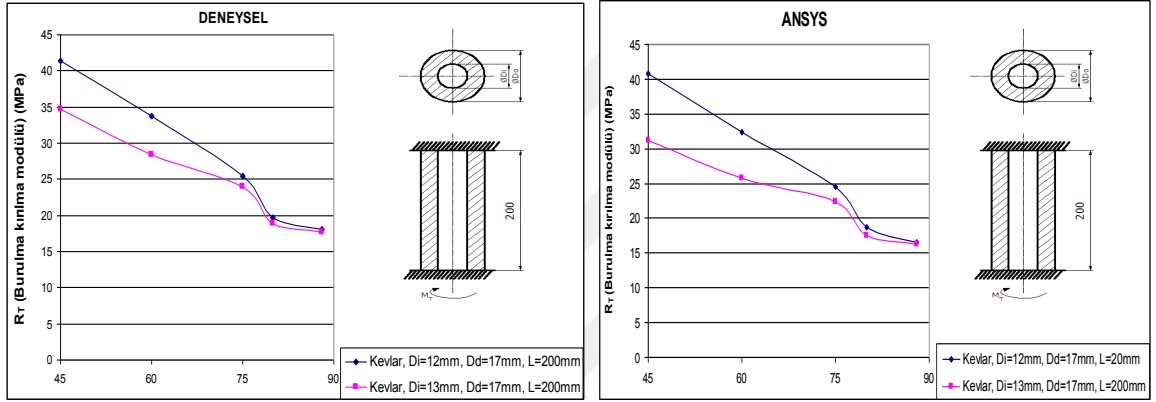
Şekil 5.114. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



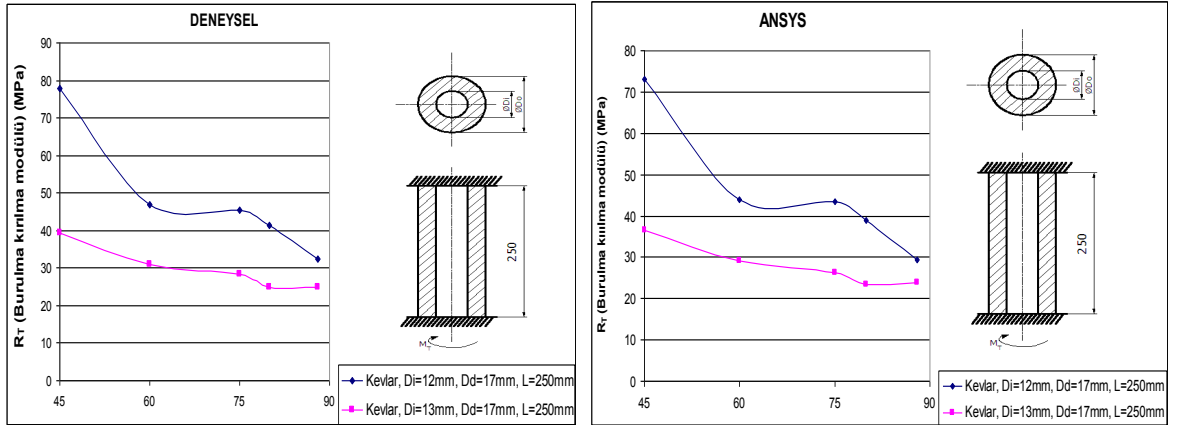
Şekil 5.115. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



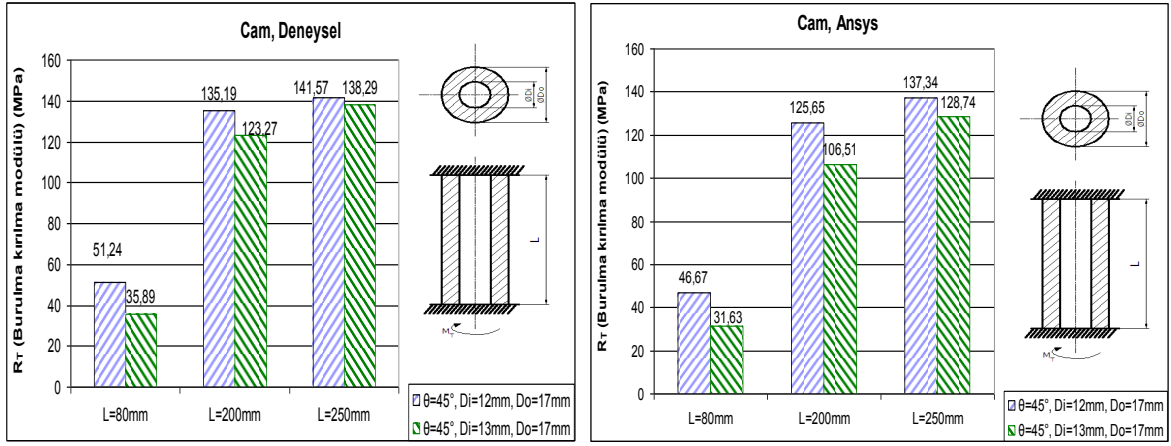
Şekil 5.116. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



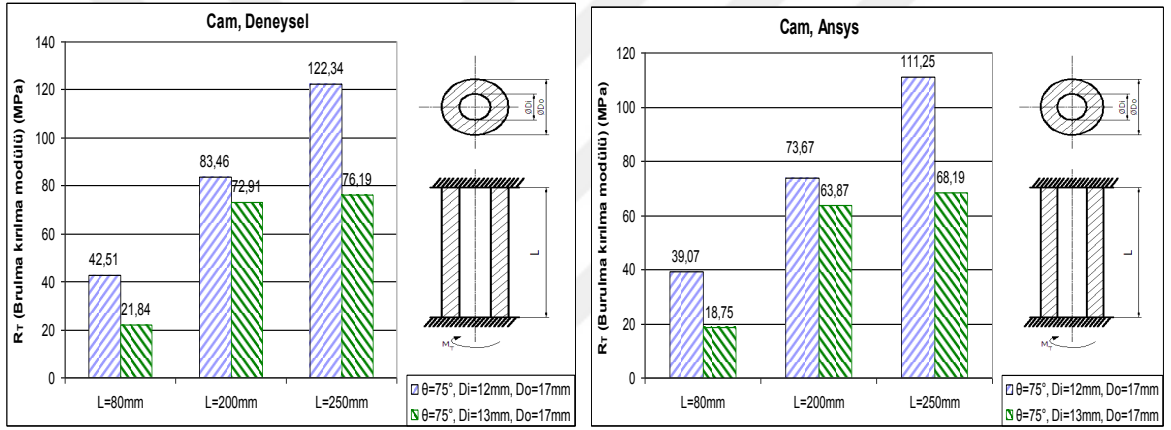
Şekil 5.117. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



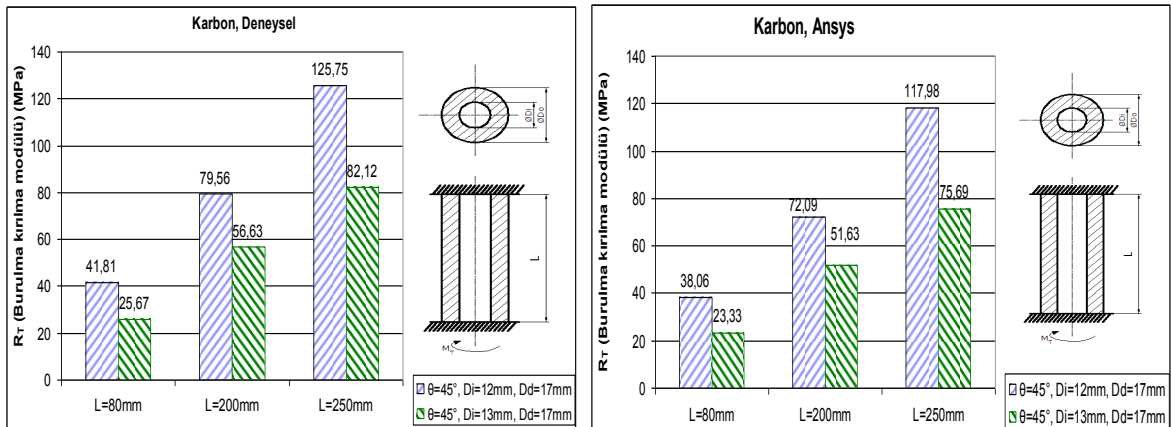
Şekil 5.118. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açılarında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



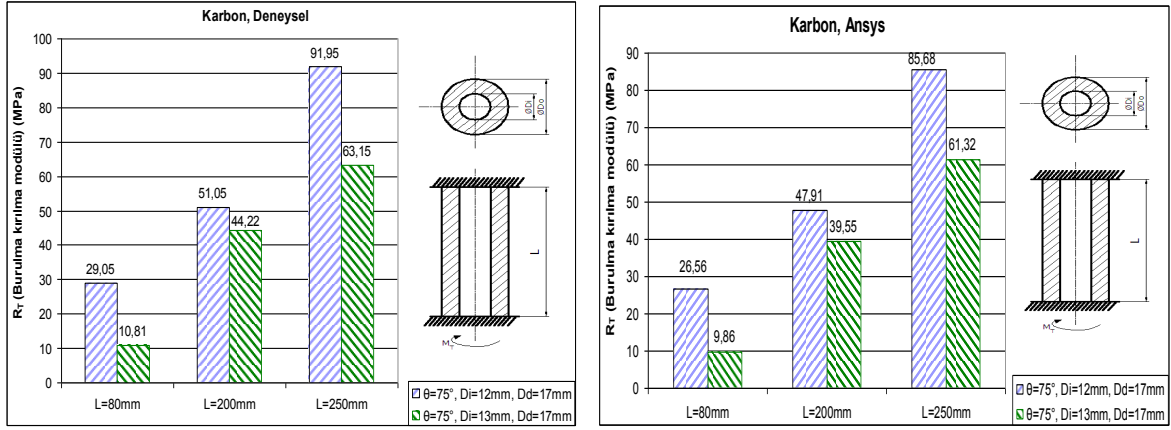
Şekil 5.119. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneyssel ansys karşılaştırılması



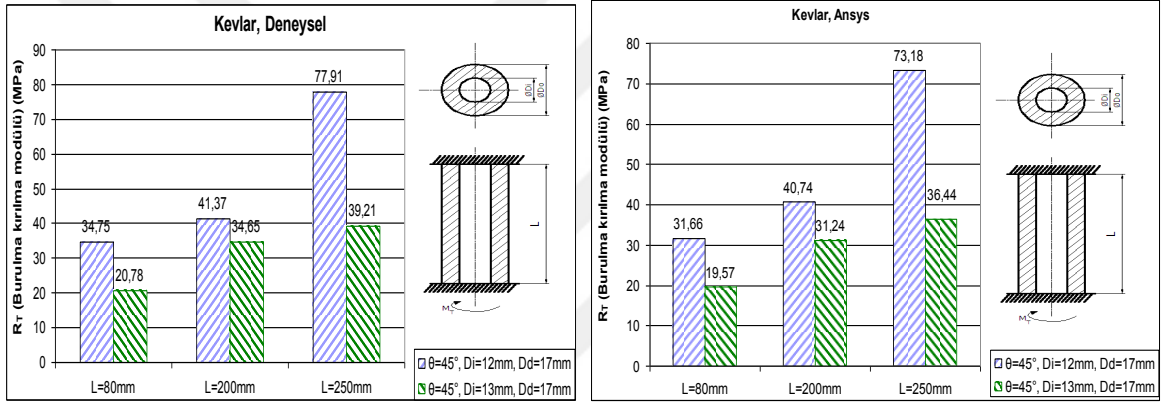
Şekil 5.120. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneyssel ansys karşılaştırılması



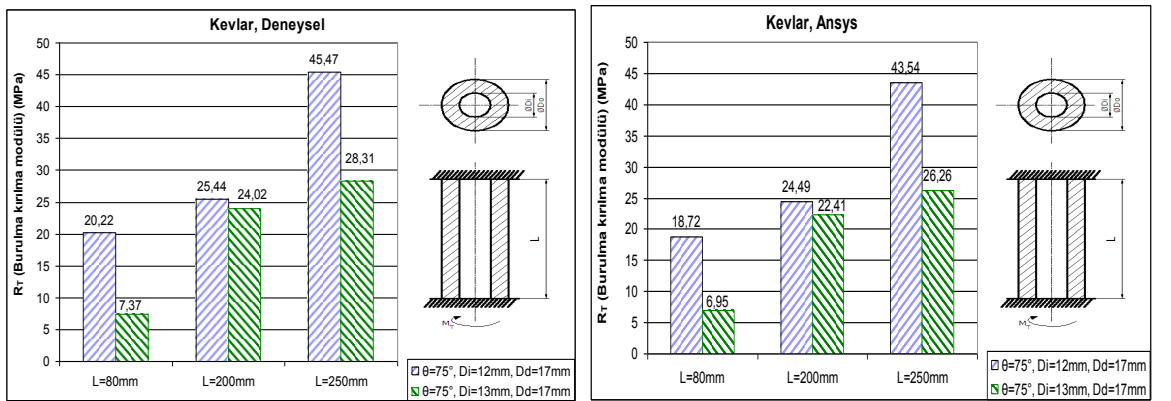
Şekil 5.121. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneyssel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.122. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.123. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



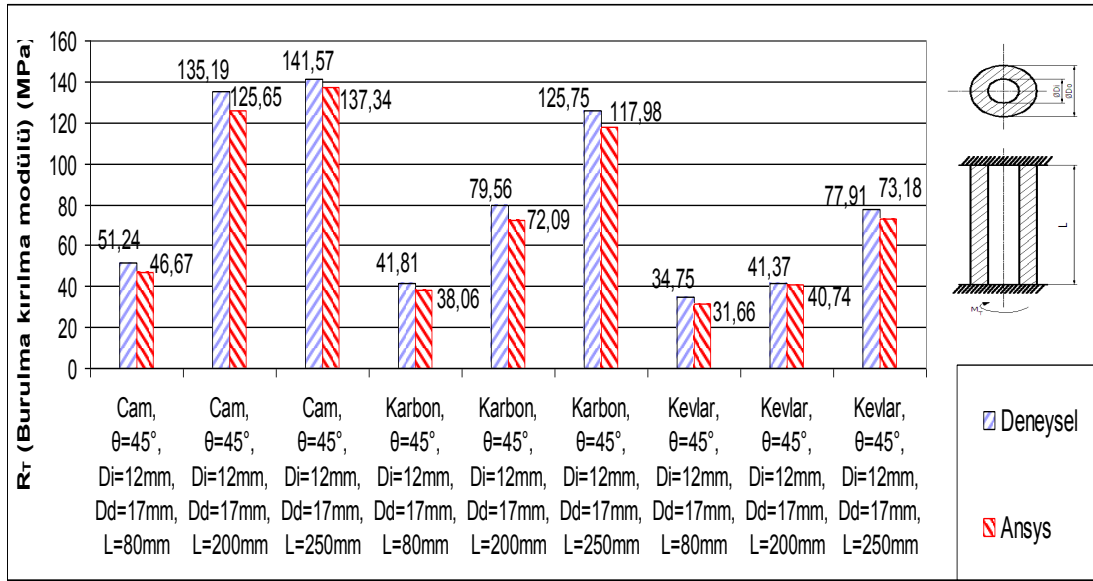
Şekil 5.124. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında et kalınlığına göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması

Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerleri et kalınlığına bağlı olarak incelendiğinde;

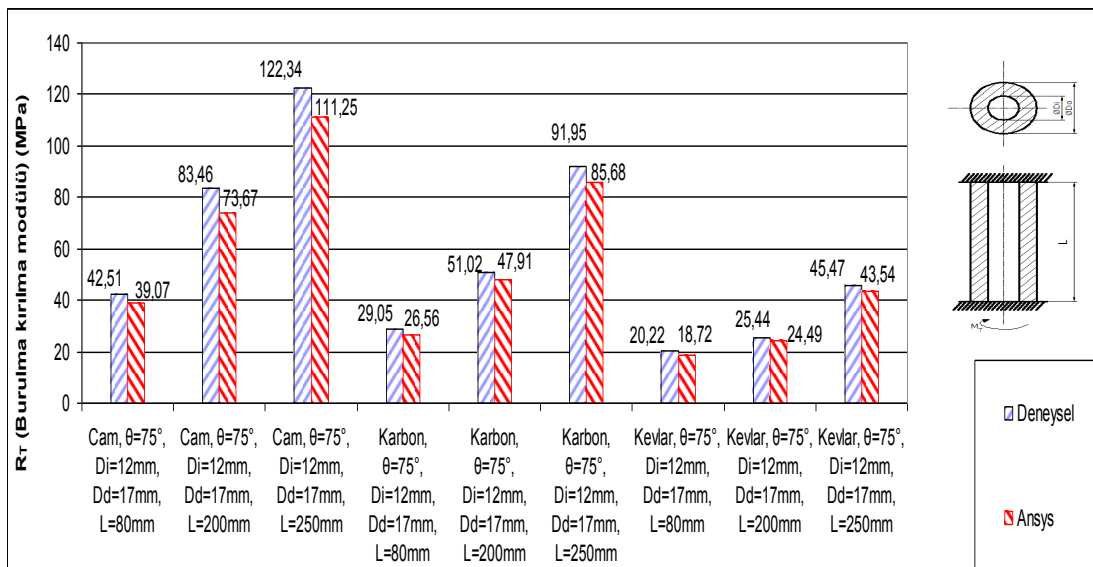
- Üç farklı uzunlukta ve $\theta=75^\circ$ oryantasyon açısında, $D_i=12\text{mm}$ iç çapına sahip Cam/Epoksi, Karbon/Epoksi ve Kevlar/Epoksi içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerleri $D_i=13\text{mm}$ iç çapına sahip burulma kırılma modül değerlerinden daha yüksek olduğu görüldü (Şekil 5.104-5.124).
- Üç farklı uzunlukta ve $\theta=75^\circ$ oryantasyon açısında, $D_i=12\text{mm}$ ile $D_i=13\text{mm}$ iç çaptaki Cam/Epoksi kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin en yüksek, Kevlar/Epoksi kompozit millerin burulma kayma modül değerlerinin ise en düşük olduğu görüldü (Şekil 5.104-5.124).
- 250mm uzunluğunda, $\theta=75^\circ$ oryantasyon açısında ve $D_i=12\text{mm}$ iç çapına sahip Cam/Epoksi kompozit millerin burulma kırılma modül değerinin en yüksek (Şekil 9.108-9.132) ve $L=80\text{mm}$, $D_i=13\text{mm}$ iç çapına sahip Kevlar/epoksi kompozit millerin burulma kırılma modül değerinin en düşük olduğu görüldü (Şekil 5.104-5.124).
- İki farklı et kalınlığına ve üç ayrı uzunluğa sahip millerde cam/epoksi kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin en yüksek, kevlar/epoksi kompozit millerinin de burulma kırılma modül değerlerinin en düşük olduğu tespit edildi (Şekil 5.104-5.124).
- Et kalınlığının artmasıyla içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin arttığı tespit edildi (Şekil 5.104-5.124). Bunun sebebi de dış çap ile iç çap arasındaki oranın azalmasından dolayı yani et kalınlığının azalması ile mukavemet değerleri de düşmektedir. Dolayısıyla, içi boş dairesel kompozit millerde et kalınlığı azaldıkça tüm gerilmeler bakımından tehlike arz edeceği grafiklerden de görülmektedir. Tüm dolu dairesel kompozit millerde kayma gerilmeleri, millerin merkezinden yüzeyine doğru doğrusal olarak artar yani kayma gerilmeleri millerin merkezinde sıfır ve dış yüzeye doğru da maksimum değeri alır. Bununla birlikte, içi boş dairesel kompozit millerde ise minimum kayma gerilmesi iç çap değerinden başlayarak dış çapa doğru maksimum değer alır.
- Deneysel tüm sonuçlar, Ansys sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görüldü (Şekil 9.140-9.153).

5.5.3. Mil boyunun burulma Gerilmesi Üzerine Etkisinin incelenmesi

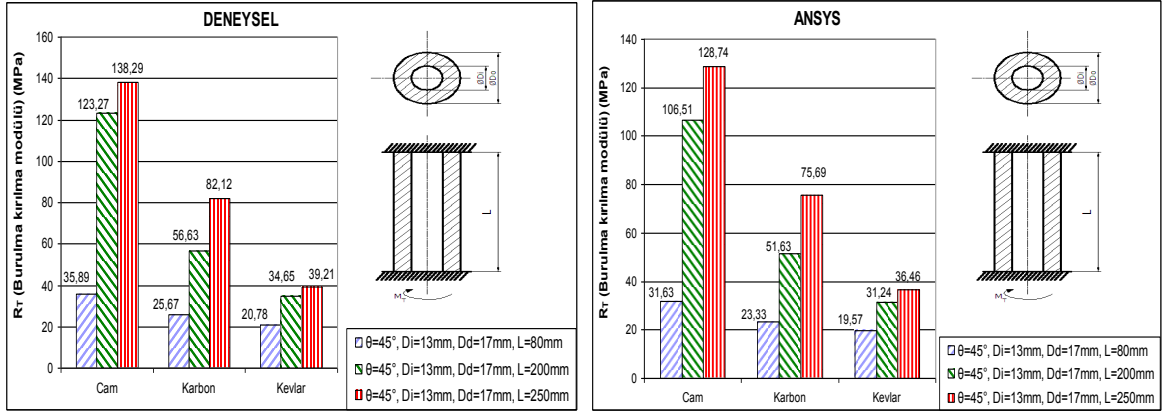
Üç farklı takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi) boylarına göre deneysel ve ANSYS'te elde edilen burulma kırılma modül (R_T) değerleri aşağıda görüldüğü üzere grafiklere aktarıldı ve kendi aralarında karşılaştırma yapılarak yorumlandı.



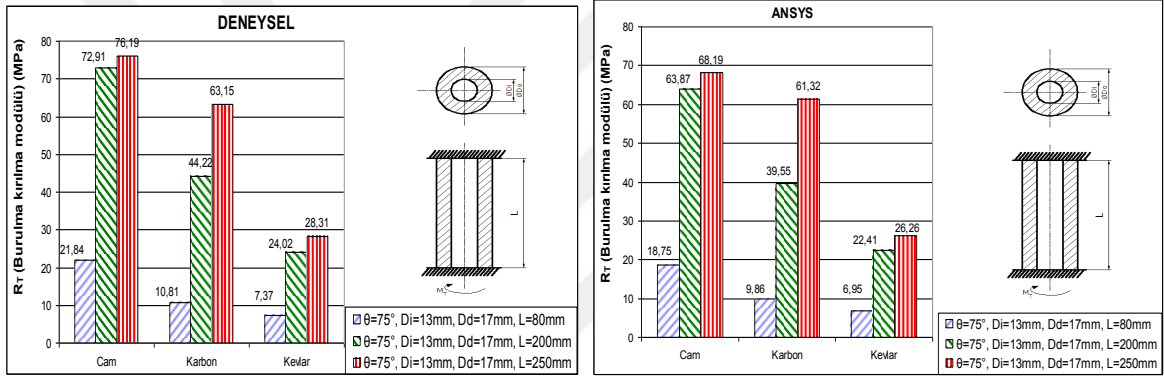
Şekil 5.125. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açında boya göre R_T gerilmelerinin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



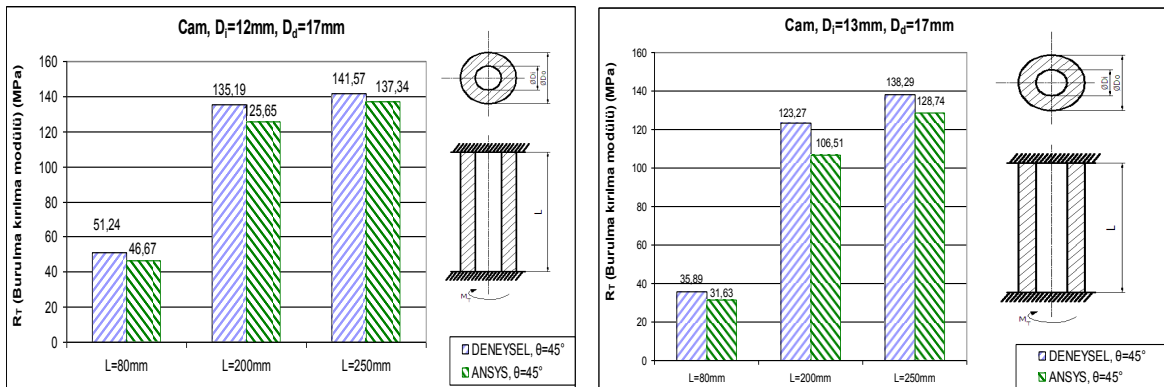
Şekil 5.126. Cam/epoksi, Karbon/epoksi ve Kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açında boya göre R_T gerilmelerinin deneysel-ansys değişimi toplu gösterimi



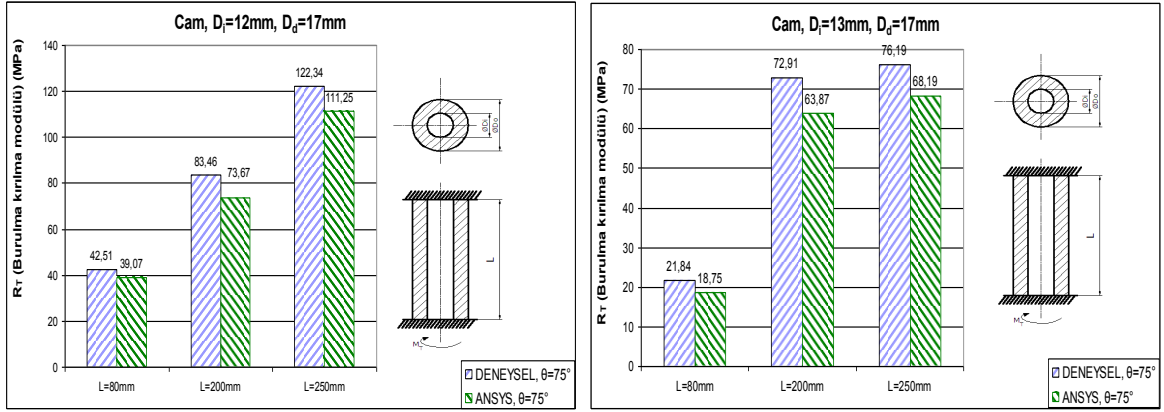
Şekil 5.127. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boyaya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



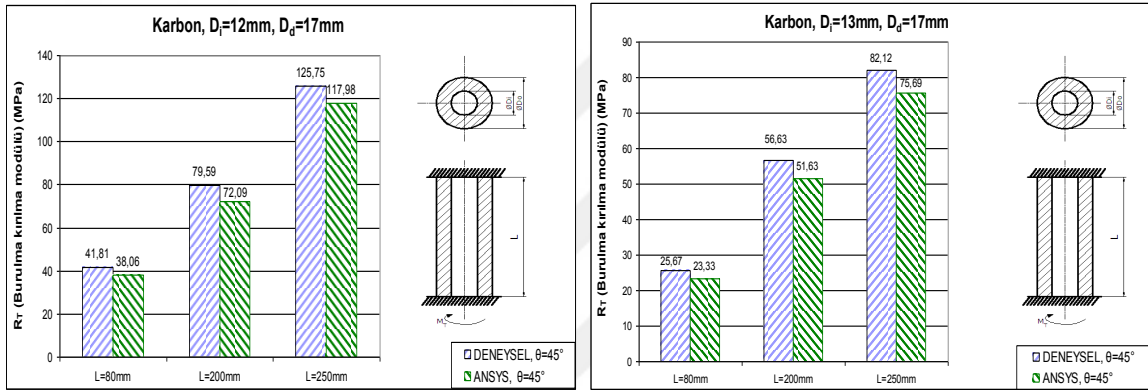
Şekil 5.128. cam/epoksi, karbon/epoksi, kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boyaya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



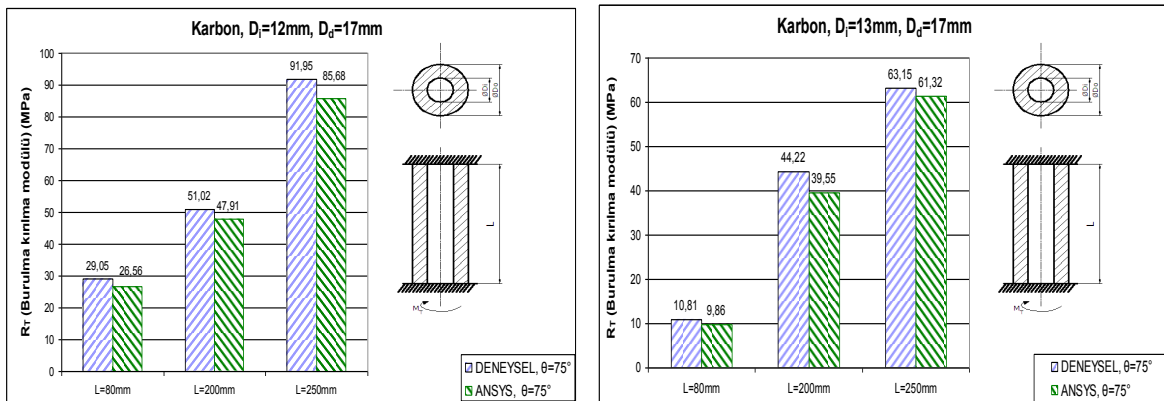
Şekil 5.129. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boyaya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



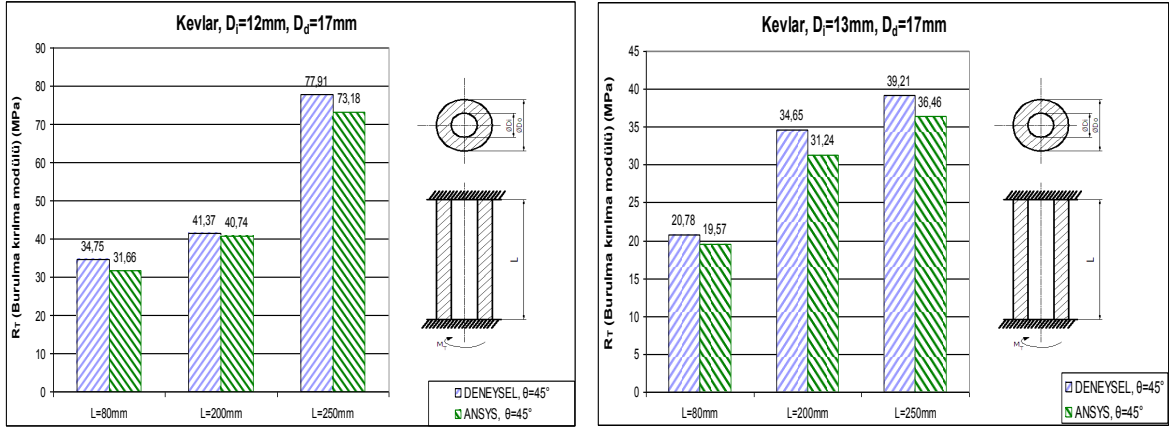
Şekil 5.130. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



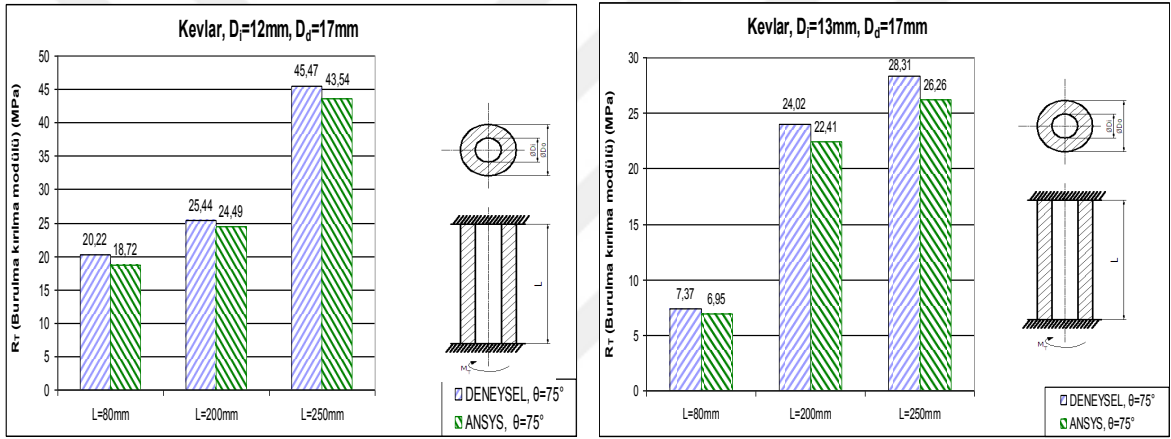
Şekil 5.131. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



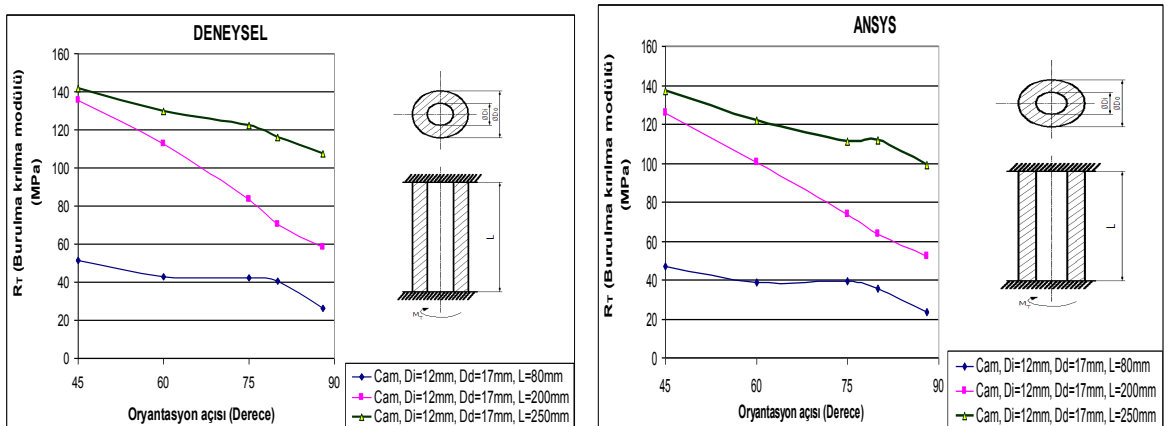
Şekil 5.132. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



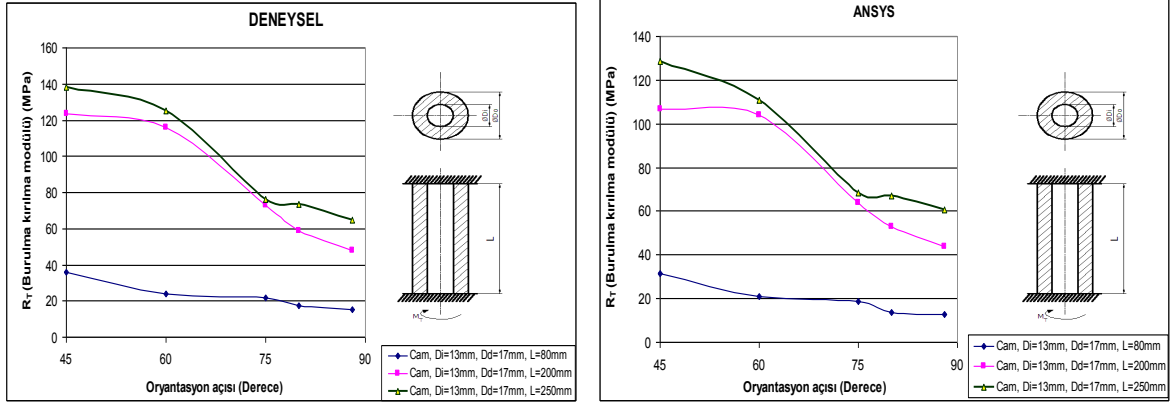
Şekil 5.133. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 45° oryantasyon açısında boyaya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



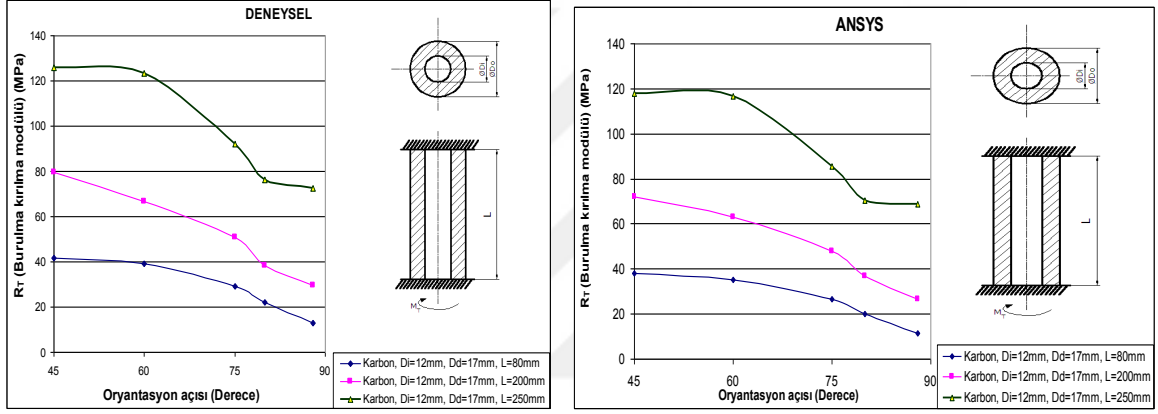
Şekil 5.134. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında 75° oryantasyon açısında boyaya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



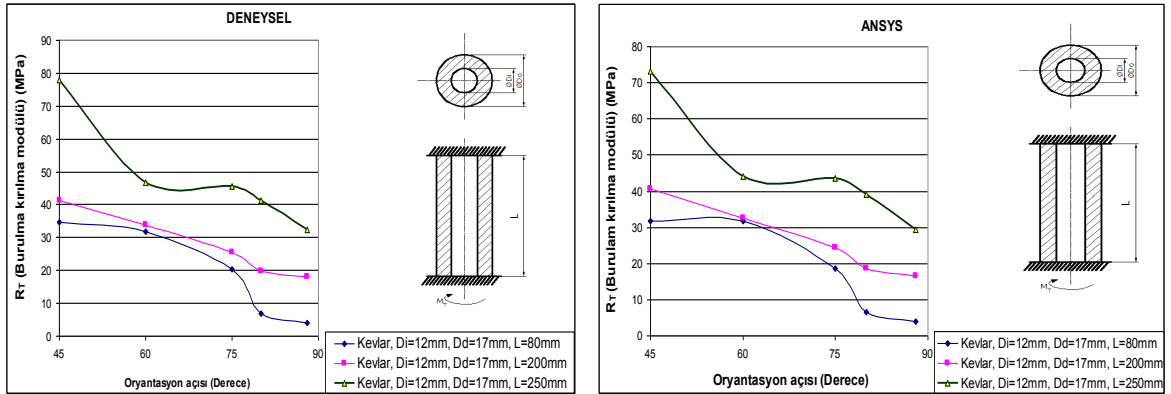
Şekil 5.135. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boyaya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



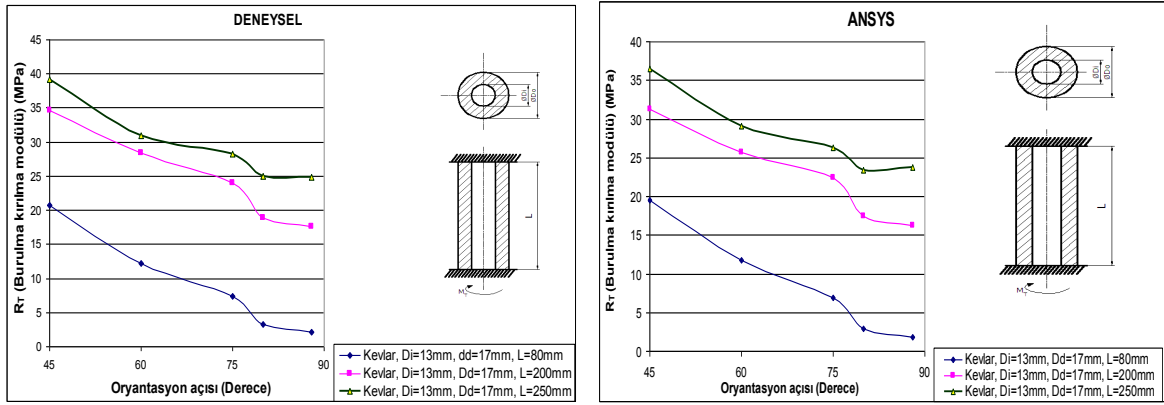
Şekil 5.136. cam/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.137. karbon/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması



Şekil 5.138. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması

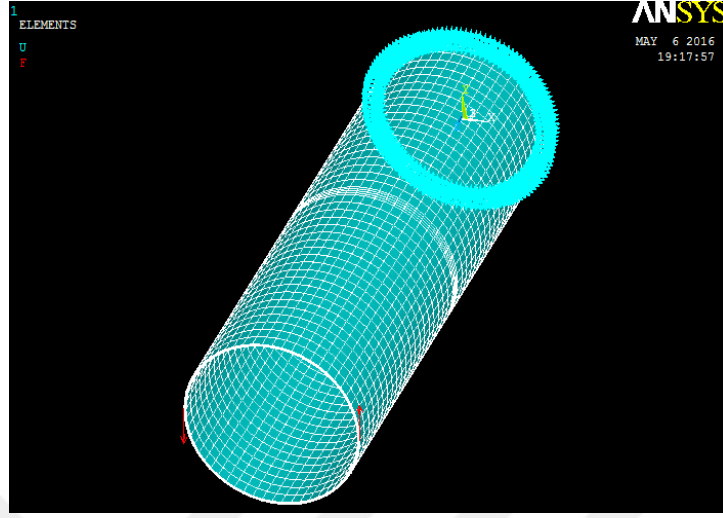


Şekil 5.139. kevlar/epoksi numunelerinin burulma torku altında tüm oryantasyon açısında boya göre R_T değerlerinin deneysel ansys karşılaştırılması

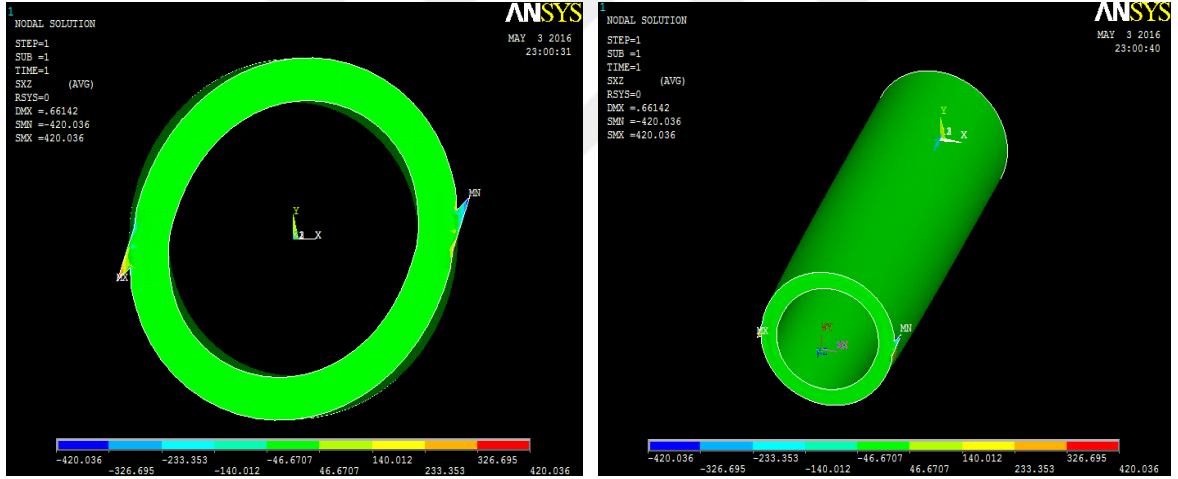
Burulma Deneylerinde, cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerleri takviye malzeme uzunluklarına bağlı olarak incelendiğinde;

- Tüm içi boş dairesel kompozit millerin uzunluğu arttıkça burulma kırılma modül değerlerinin de arttığı görüldü (Şekil 5.125-5.139). İçi boş dairesel kompozit millerin boyu arttıkça dönme açısı miktarı da artar. Böylece mil boyunun artmasıyla mukavemet değerleri de artmaktadır.
- İç çap $D_i=12\text{mm}$ ve oryantasyon açısı $\theta=75^\circ$ 'de, $L=250\text{mm}$ uzunluğunda Cam/Epoksi kompozit milin en yüksek burulma kırılma modül değerine ulaştığı bunu sırasıyla karbon/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit millerinin izlediği görüldü (Şekil 5.125-5.139).
- En düşük burulma kırılma modül değeri, İç çap $D_i=13\text{mm}$ ve oryantasyon açısı $\theta=75^\circ$, $L=80\text{mm}$ uzunluğunda Kevlar/Epoksi kompozit millerinde tespit edildi (Şekil 5.125-5.139).
- Hem $D_i=12\text{mm}$ hem de $D_i=13\text{mm}$ iç çaplarda ve $L=80\text{mm}$, 200mm , 250mm uzunluklarda burulma kırılma modül değerleri cam/epoksi kompozit millerde en yüksek, kevlar/epoksi kompozit millerde ise en düşük olduğu tespit edildi (Şekil 5.125-5.139).
- Boy arttıkça malzemelerin kayma gerilmesi değerleri de artmaktadır.
- Deneysel tüm sonuçlar, Ansys sonuçları ile karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine yakın olduğu görüldü (Şekil 9.140-9.153).

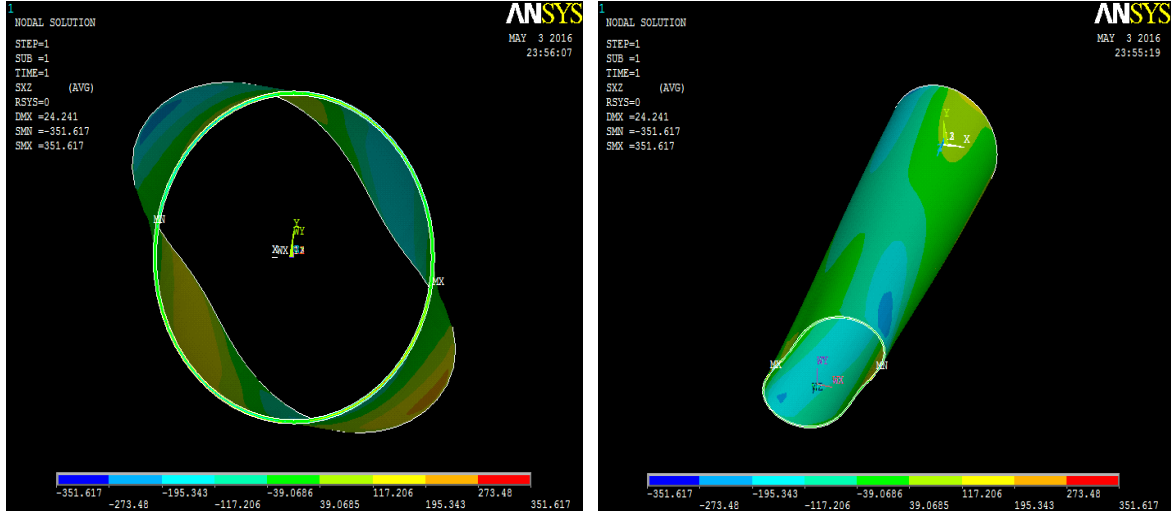
5.5.4. Burulma deneylerinin ANSYS çözümleri



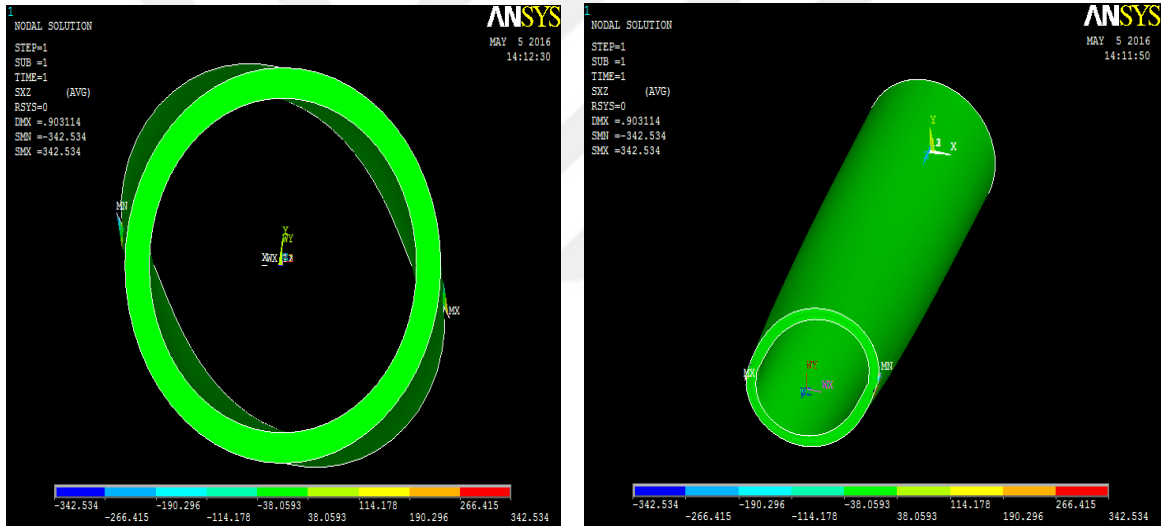
Şekil 5.140. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu



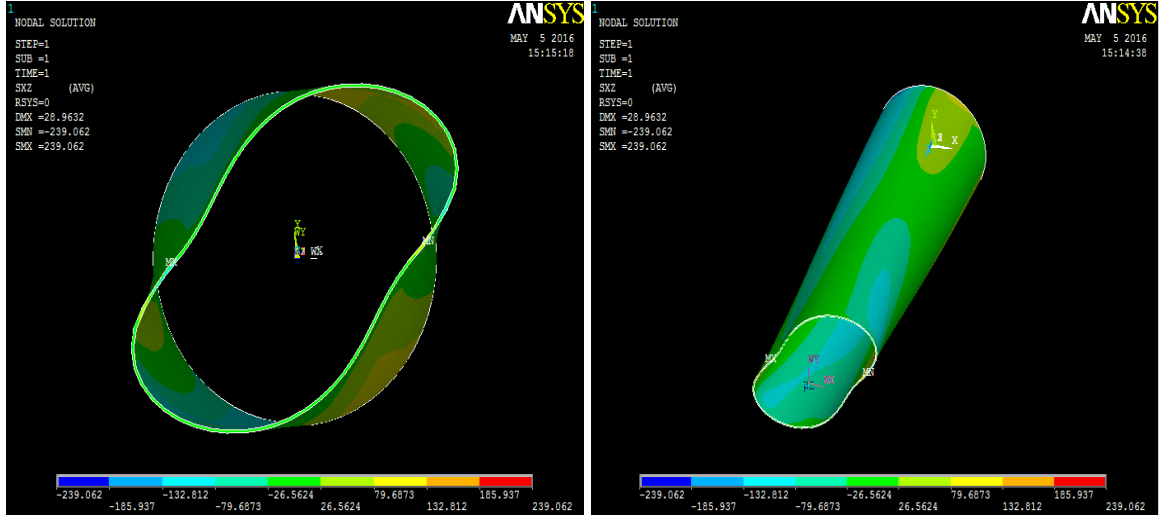
Şekil 5.141. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



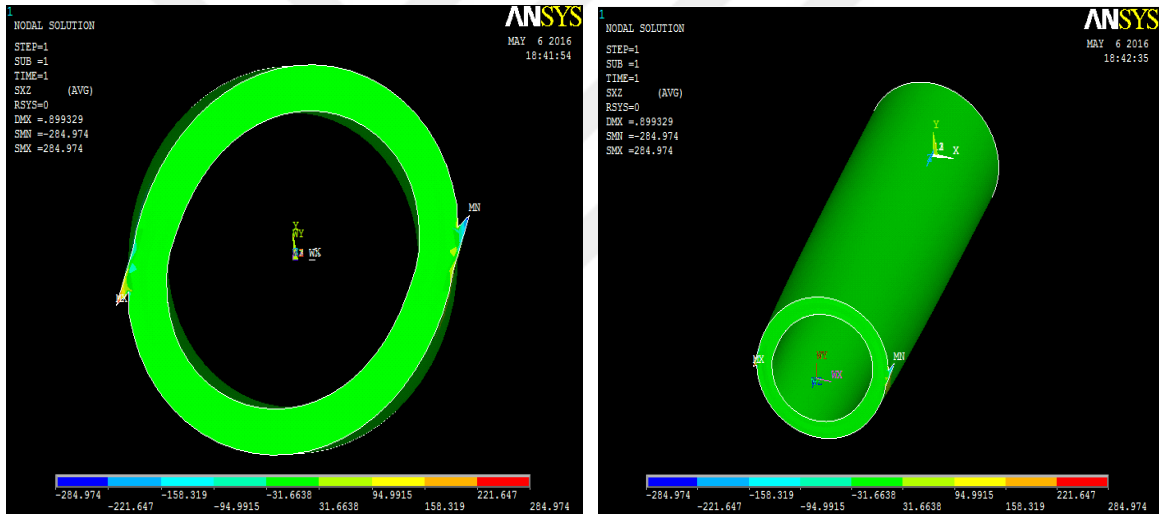
Şekil 5.142. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



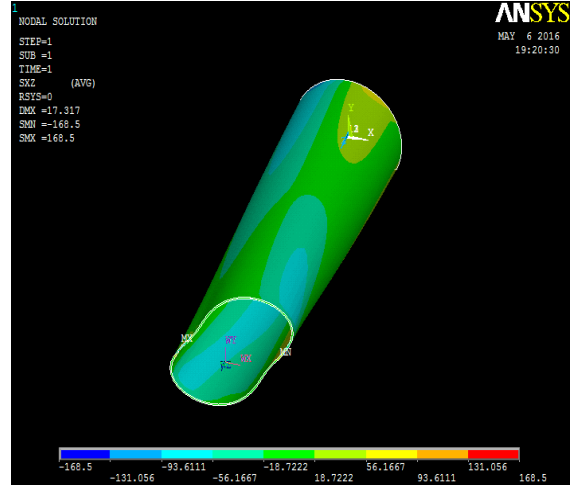
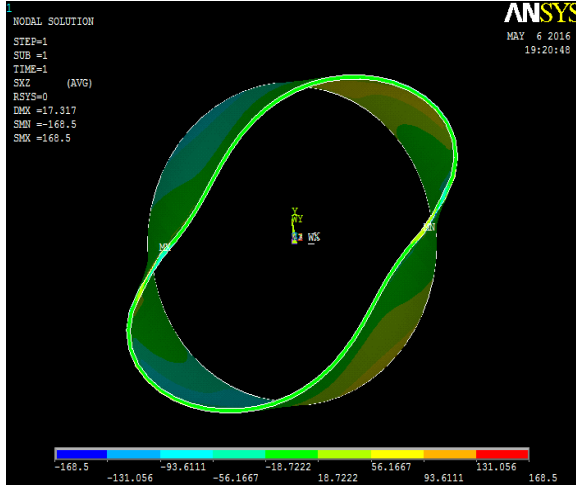
Şekil 5.143. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



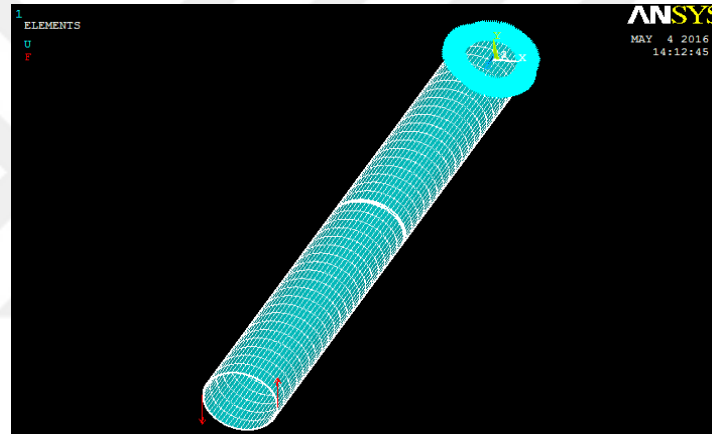
Şekil 5.144. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



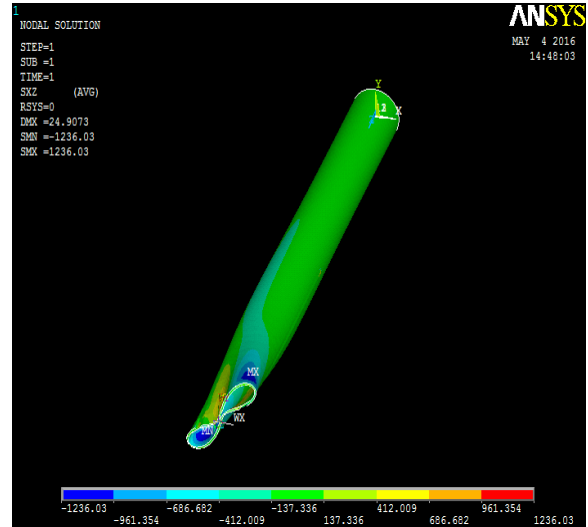
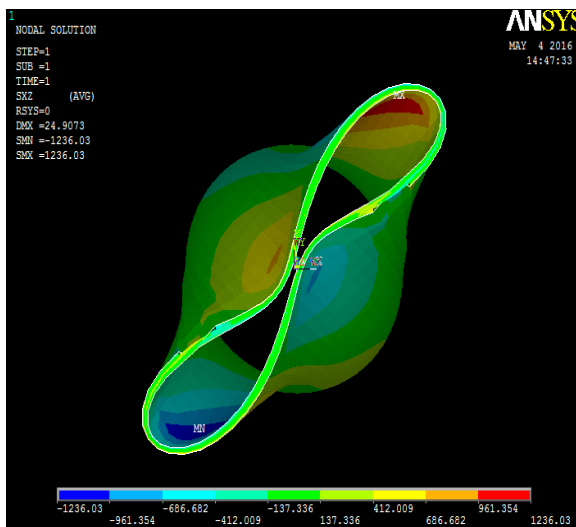
Şekil 5.145. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.146. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=80\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü

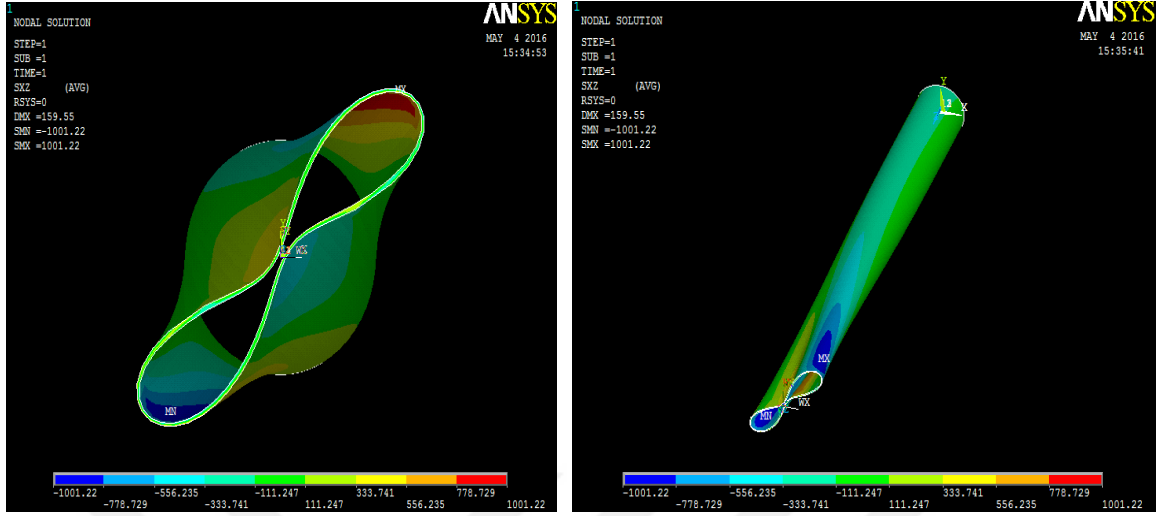


Şekil 5.147. Cam/epoksi, Karbon/epoksi, Kevlar/epoksi millerine $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ 'de sınır şartı uygulanmış durumu

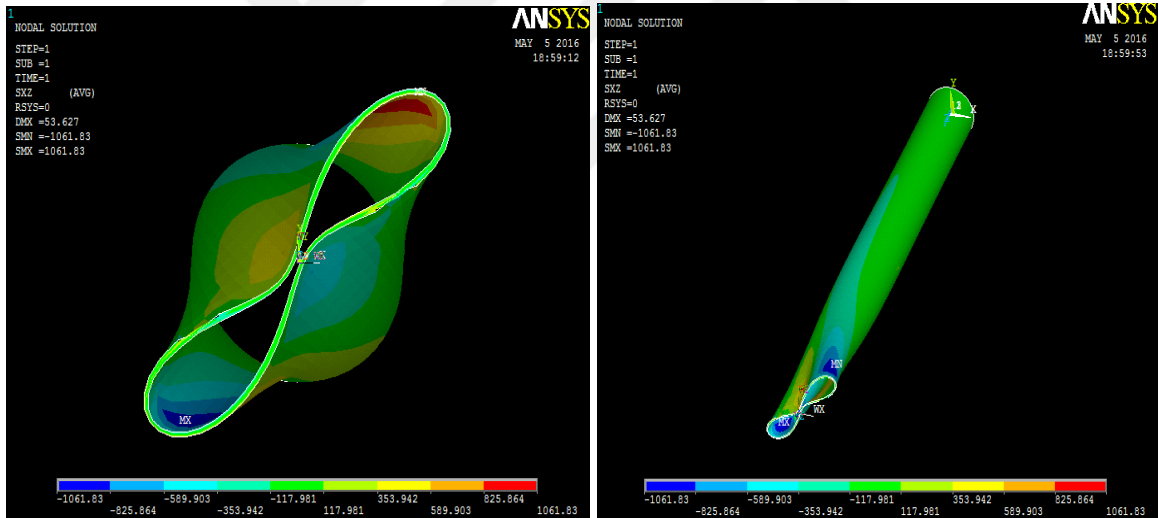


Şekil 5.148. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin

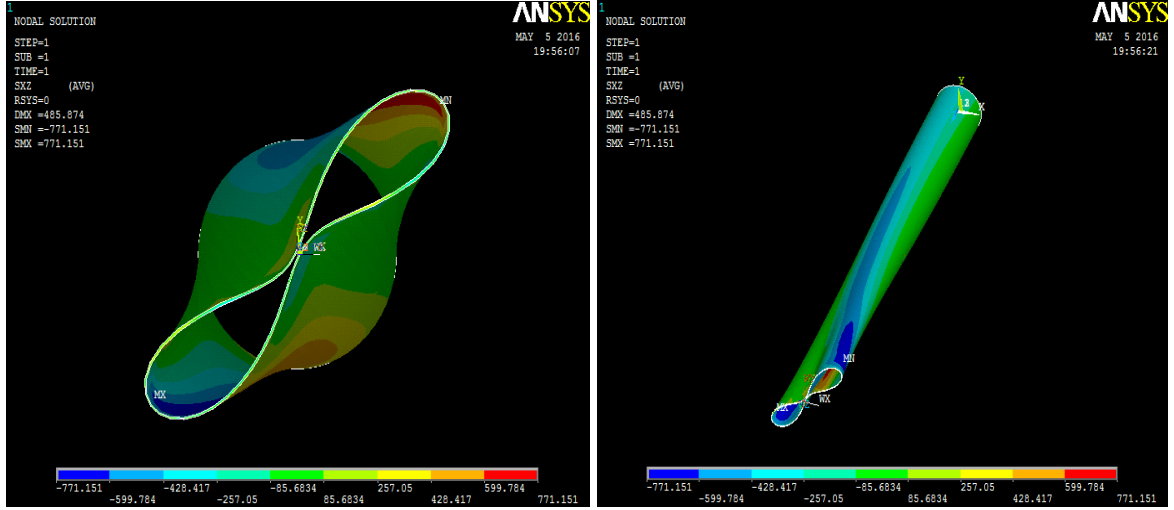
ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



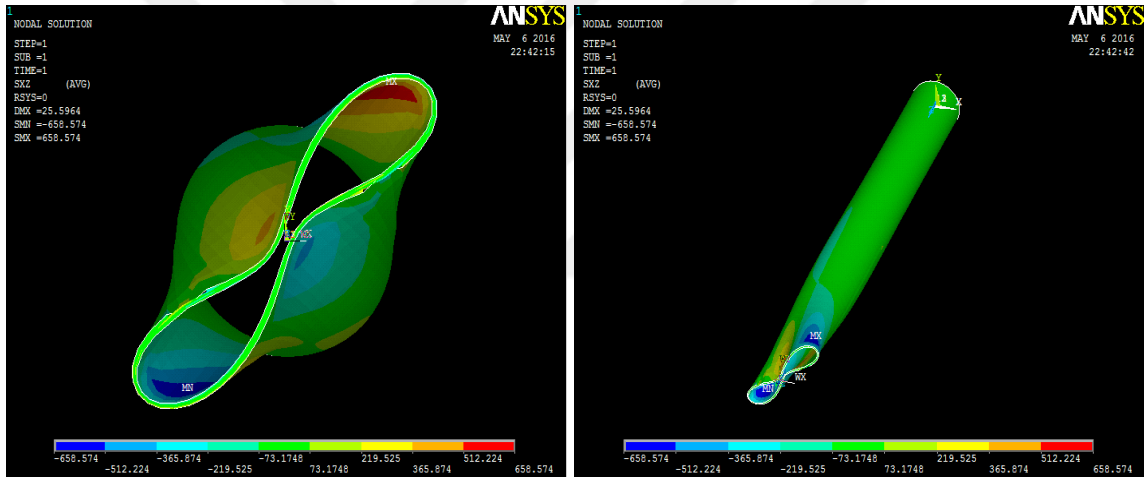
Şekil 5.149. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki cam/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



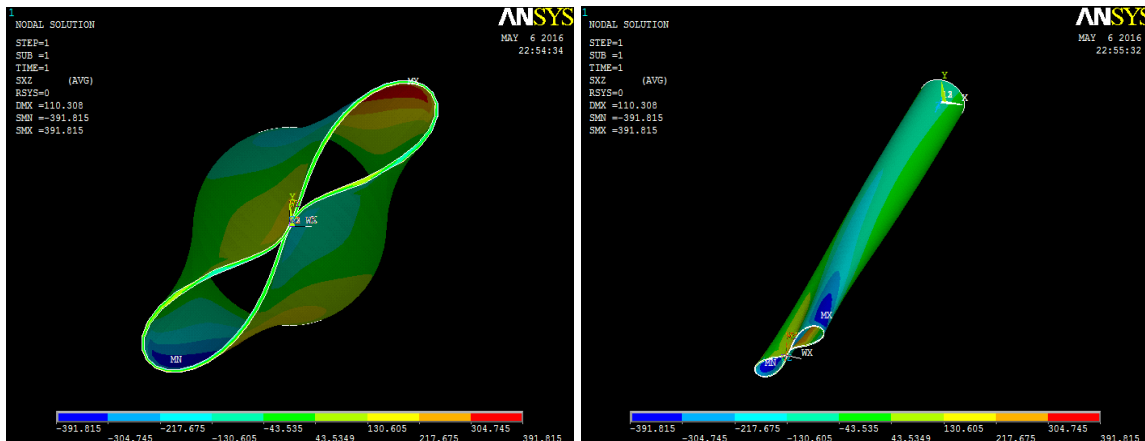
Şekil 5.150. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.151. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki karbon/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.152. $\theta=45^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü



Şekil 5.153. $\theta=75^\circ$, $D_i=12\text{mm}$, $D_d=17\text{mm}$, $L=250\text{mm}$ boyundaki kevlar/epoksi numunesinin ANSYS'te burulma gerilmesi altındaki çözümü

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit malzemelerden imal edilen içi boş dairesel millerin eğilme ve burulma gerilmeleri farklı oryantasyon açılarında incelendi. Farklı uzunluklara (80mm, 200mm, 250mm), 17mm dış çapa ve farklı iç çaplara (12mm, 13mm) sahip kompozit miller kullanıldı. İçi boş kompozit miller filaman sarma metodu ile mandrenlere; $\theta=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 88^\circ$ oryantasyon açılarında sarılarak imal edildi. İmal edilen her bir içi boş dairesel kompozit miller üç nokta eğme ve burulma testlerine tabi tutularak aşağıdaki önemli sonuçlar elde edildi,

Üç nokta eğme deneylerinde, cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş kompozit millerin eğilme değerleri takviye malzemelerine, oryantasyon açısına, numune et kalınlıklarına ve numune boylarına bağlı olarak incelendiğinde,

- Tüm grafiklerden de görüleceği üzere fiber oryantasyon açısı arttıkça eğilme gerilme değerlerinin de azaldığı görüldü,
- Boyutsal olarak incelendiğinde içi boş dairesel kompozit millerin uzunluğu arttıkça eğilme gerilme değerlerinin de azaldığı görüldü,
- Üç farklı uzunluğa sahip olan cam/epoksi kompozit millerinin daha fazla eğilme gerilmelerine maruz kaldığı ve bunu sırasıyla karbon/epoksi, kevlar/epoksi kompozit millerinin izlediği görüldü,
- Tüm içi boş dairesel kompozit miller de en yüksek eğilme gerilmelerinin, 45° oryantasyon açısında iken maksimum değere ulaştığı görüldü. Bilineceği üzere malzemenin boyu arttıkça kuvvet ile deplasman (yer değiştirme) arasında doğru orantı olduğundan deplasman da artar.
- Et kalınlığının artmasıyla içi boş dairesel kompozit millerin eğilme değerlerinin arttığı tespit edildi. Bunun sebebi de dış çap ile iç çap arasındaki oranın azalmasından dolayı yani et kalınlığının azalması sonucunda mukavemetin de azaldığı aşıkardır.
- Genelde tüm içi boş dairesel kompozit millerin uzunluğu arttıkça eğilme değerlerinin azaldığı tespit edildi, bu durumu şu şekilde açıklamak mümkündür; genelde tüm malzemenin boyu arttıkça malzemedeki yer değiştirme oranı da artar, boyun uzamasıyla sehim artacağından, aynı kuvvet altında gerilme oranı da düşecektir.

- Deneysel çalışmalardan elde edilen içi boş tüm kompozit millere ait eğilme değerlerinin, ANSYS'te elde edilen eğilme değerlerine yakın olduğu tespit edildi.

Cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi içi boş kompozit millerin burulma kırılma modül değerleri takviye malzemelerine, oryantasyon açısına, numune et kalınlığına ve numune boylarına bağlı olarak incelendiğinde;

- Grafiklerden de görüleceği üzere fiber oryantasyon açısı arttıkça her üç takviye malzemesinin de burulma kırılma modül değerlerinin azaldığı görüldü,
- Her üç ayrı takviye malzemesinde, burulma kırılma modül değerinin 45° oryantasyon açısında iken maksimum değere ulaştığı görüldü. Bunun nedeni, oryantasyon açısının artmasıyla lifler arasındaki yer değiştirme miktarı artacağından dolayı burulma kırılma modül değerleri de azalmaktadır.
- Üç farklı uzunlukta cam/epoksi takviyeli kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlendi ve bunu sırasıyla karbon/epoksi ve kevlar/epoksi takviyeli kompozit millerinin izlediği görüldü. Bununla birlikte imalat esnasındaki gr/m^2 ağırlıklarının birbirinden farklı olması sonuçlarda farklılıklar meydana getirmiştir. Yani gr/m^2 ağırlığının azalmasıyla takviye malzemesinin gerilme değerleri, dayanımı gibi mekanik özellikleri de artmaktadır.
- Tüm içi boş dairesel kompozit millerde uzunluk arttıkça malzemelerin kayma gerilmesi değerlerinin de arttığı görüldü. Bunun nedeni, burulma açısının uzunlukla doğru orantılı olduğu gerçeğidir yani kompozit millerin boyu arttıkça dönme açısı miktarı da artar. Böylece mil boyunun artmasıyla mukavemet değerleri de artar.
- Et kalınlığının artmasıyla içi boş dairesel kompozit millerin burulma kırılma modül değerlerinin arttığı tespit edildi. Bunun sebebi de dış çap ile iç çap arasındaki oranı azalır yani et kalınlığının azalması ile mukavemet değerleri de düşmektedir. Dolayısıyla, içi boş dairesel kompozit millerde et kalınlığı azaldıkça tüm gerilmeler bakımından tehlike arz edeceği grafiklerden de görülmektedir. Tüm dolu dairesel kompozit millerde kayma gerilmeleri, millerin merkezinden yüzeyine doğru doğrusal olarak artar yani kayma gerilmeleri millerin merkezinde sıfır ve dış yüzeye doğru da maksimum değeri alır. Bununla

birlikte, içi boş dairesel kompozit millerde ise minimum kayma gerilmesi iç çap değerinden başlayarak dış çapa doğru maksimum değer alır.

- Deneysel çalışmalardan elde edilen içi boş tüm kompozit millere ait R_T (burulma kırılma modülü) değerlerinin, ANSYS'te elde edilen R_T değerlerine yakın olduğu tespit edildi.

Tüm takviye malzemelerinin (cam/epoksi, karbon/epoksi ve kevlar/epoksi), hem üç nokta eğme hem de burulma deneylerinden elde edilen değerleri göz önünde bulundurulduğunda, en iyi değerlerinin 45° - 60° oryantasyon açısı aralığında iken sahip oldukları görüldü. Ayrıca tüm aşamalarda, cam/epoksi kompozit millerin mukavemet değerlerinin en yüksek bunu sırasıyla karbon/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit millerinin izlediği görüldü. Bu çalışma aşağıda belirtilen öneriler dikkate alınarak bilime daha fazla katkı sağlanabilir,

- Daha farklı çap, boyut ve malzeme ile çalışma yapılabilir,
- Testler farklı sıcaklıklarda yapılabilir,
- Numunelerin değişken akışkan ortamlarda bekletildikten sonra testleri yapılabilir,
- Hibrit malzemelerden imal edilebilen numunelerin testleri yapılabilir,
- Numune yüzeylerinin daha da iyileştirilme çalışmaları yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] **Sayman O, Aksoy S, Erim S, Akbulut H.**, 1999. Mukavemet I, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:244, İzmir
- [2] **Khalid Y.A., Mutasher S.A., Sahari B.B.**, 2007. A.M.S. Hamouda Materials and Design, Volume 28, Issue 1, Pages 21-32
- [3] **Kyung G.B., Lee D.**, 2002. Composite structures, Volume 55, Issue 1, Pages 247-259
- [4] **Guermazi N, Haddar N, Elleuch K, Ayedi HF.**, 2014. Investigation on the fabrication and the characterization of glass/epoxy, carbon/epoxy and hybrid composites used in the reinforcement and the repair of aeronautic structures. Mater Des;56:714-24.
- [5] **Zhang J, Chaisombat K, Shuai H., Wang C.H.**, 2012. Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. Mater Des;36:75-80.
- [6] **Chensong D., Davies I.J.**, 2012. Optimal design for the flexural behaviour of glass and carbon fiber reinforced polymer hybrid composites. Mater Des;37:450-7.
- [7] **Wisnom M.R., Khan B., Hallet S.R.**, 2008. Size effects in the unnotched tensile strength of unidirectional and quasi-isotropic carbon/epoxy laminates. Compos Struct ;84:21-8.
- [8] **Soutis C, Curtis PT.**, 2000. A method for predicting the fracture toughness of CFRP laminates failing by fibre microbuckling. Composites Part A: Appl Sci Manuf ;31:733-40.
- [9] **Elchalakani M., Zhao X.L., Grzebieta R.H.**, 2002. Plastic mechanism analysis of circular tubes under pure bending. Int j Mech Sci;44:1117-43.
- [10] **Ju G., Kyriakides S.**, 1992. Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending-ii. Predictions. Int J splids struct;29:1143-71.
- [11] **Karamanos S.A., Andreadakis K.P.**, 2006. Denting of internally pressurized tubes under lateral loads. Int J Mech Sci;48:1080-94.
- [12] **Kyriakides S., GT J.**, 1992. Bifurcation and localization instabilities in cylindrical shells under bending-i. Experiment. Int j Solids Struct;29:1117-42.
- [13] **Mamalis A., Manolakos D., Baldoukas A., Viegelaahn G.**, 1989. Deformation characteristics of crashworthy thin-walled steel tubes subjected to bending. Proc Inst Mech Eng Part C Sci;203:411-7.

- [14] **Poonaya S., Teeboonma U., Thingvongpituk C.,** 2009. Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending. *Thin-walled Struct*;47:637-45.
- [15] **Wierzbicki T., Suh M.,** 1988. Identification of tubes under combined loading. *Int J Mech Sci* ;30:229-48.
- [16] **Duarte I., Vesenjak M., Krstulović-Opara L.,** 2014. Dynamic and quasi-static bending behaviour of thin-walled aluminium tubes filled with aluminium foam. *Compos Struct*;109:48-56.
- [17] **Shojaeifard M.H., Zarei H.R., Talebitooti R., Mehdikhanlo M.,** 2012. Bending behaviour of empty and foam-filled aluminium tubes with different cross-sections. *Acta Mech Solida Sinica*;25:616-26.
- [18] **Yu J.L., Wng X., Wei Z.G., Wang E.H.,** 2003. Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminium-foam core. *Int J Impact Eng*;28:331-47.
- [19] **Yu J.L., Wang E.H., Li J.R., Zheng Z.J.,** 2008. Static and low-velocity impact behaviour of sandwich beams with closed-cell aluminium-foam core in three-point bending. *Int J Impact Eng*;35:885-94.
- [20] **Li Z.B., Zheng Z.J., Yu J.L., Qian C.Q., Lu F.Y.,** 2014. Deformation and failure mechanisms of sandwich beams under three-point bending at elevated temperatures. *Compos Struct*;111:285-90.
- [21] **Qin Q.H., Wang T.J.,** 2012. Plastic analysis of metal foam core sandwich beam transversely loaded by a flat punch: combined local denting and overall deformation. *J Appl Mech*;79:041010.
- [22] **Steeves C.A., Fleck N.A.,** 2004. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design. *Int J Mech Sci*;45:561-83.
- [23] **Vargas G., Mujika F.,** 2010. Determination of in-plane shear strength of unidirectional composite materials using the off-axis three-point flexure and off-axis tensile tests, *J. Compos. Mater.* 44, 2487-2507.
- [24] **El-Assal A., Khashaba U.A.,** 2007. Fatigue analysis of unidirectional GFRP composites under combined bending and torsional loads. *Compos Struct*;79:599-605.
- [25] **Meijer G., Ellyin F.,** 2008. A failure envelope for $\pm 60^\circ$ filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars. *Composites: Part A*;39:555-64.

- [26] **Bert C.W., Kim C.D.**, 1995. Analysis buckling hollow laminated composite drive shafts. *Compos Sci Technol*;53:343-51.
- [27] **Chen L.W., Kung P.W.**, 1998. The stability behaviour of rotating composite shafts under axial compressive loads. *Compos Struct*;41:253-63.
- [28] **Kim H.S., Kim B.C., Lim T.S., Lee D.G.**, 2004. Foreign objects impact damage characteristics of aluminum/composite hybrid drive shaft. *Compos Struct*;66(1-4):377-89.
- [29] **Kim W.T., Lee D.G.**, 1995. Torque transmission capabilities of adhesively bonded tubular lap joints for composite drive shafts. *Compos Struct*;30(2):229-40.
- [30] **Kim J.K., Lee D.G., Cho D.G.**, 2001. Investigation of adhesively bonded joints for composite propeller shafts. *J Compos Matter*;35:999-1021.
- [31] **Hahn H.T., Erikson J.**, 1977.Characterization of composite laminates using tubular specimens. AFML-TR-77-144; Aug
- [32] **Soden P.D., Kitching R., Tse P.C., Tsavalas Y., Hinton M.J.**, Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads. *Compos Sci Technol* 1993;46:363-78.
- [33] **Mistry J.**, 1992. Theoretical investigation into the effect of the winding angle of the fibres on the strength of filament wound GRP pipes subjected to combined external pressure and axial compression. *Compos Struct*;20:83-90.
- [34] **Mistry J., Gibson A.G., Wu Y.S.**, 1992. Failure of composite cylinders under combined external pressure and axial loading. *Compos Struct*;22:193-200.
- [35] **Carroll M., Ellyin F., Kujawski D., Chiu A.S.**, 1995. The rate-dependent behaviour $\pm 55^\circ$ filament wound glass/epoxy tubes under biaxial loading. *Compos Sci Technol*;55:391-403.
- [36] **Swanson S.R., Christoforou A.P.**, 1986. Response of quasi-isotropic carbon/epoxy laminates to biaxial stress. *J Comp Maater*;20:457-71.
- [37] **Swanson S.R., Messick M.J., Tian Z.**, 1987. Failure of carbon/epoxy laminates under combined stress. *J Comp Maater*;21:619-30.
- [38] **Amijima S., Fujii T., Hamaguchi M.**, 1991. Static and fatigue tests of a woven glass fabric composite under biaxial tension-torsion loading. *J Comp Maater*;22:281-9.

- [39] **Fujii T., Amijima S., Lin F.**, 1992. Study on strength and nonlinear stress-strain response of plain woven glass fiber laminates under biaxial loading. *J Comp Mater*;26:2493-510.
- [40] **Ferry L., Perreux D., Varchona D., Sicot N.**, 1999. Fatigue behaviour of composite bars subjected to bending and torsion. *Compos Sci Technol*;59:575-82.
- [41] **El-Assal A., Khashaba U.A.**, 2007. Fatigue analysis of unidirectional GFRP composites under combined bending and torsional loads. *Compos Struct*;79:599-605.
- [42] **Fawaz Z., Neale K.W.**, 1990. A parametric criterion for biaxial fatigue failure of fibre reinforced composite laminate. *Trans Can Soc Mech Eng*;14(4):93-9.
- [43] **Fawaz Z., Ellyin F.**, 1994. Fatigue failure model for fibre-reinforced materials under general loading conditions. *J Compos Mater*;28(15):1432-51.
- [44] **Quaresimin M., Susmel L., Talreja R.**, 2010. Fatigue behaviour and life assessment of composite laminates under multiaxial loadings. *Int J Fatigue*;32:2-6
- [45] **Quaresimin M., Carraro P.A.**, 2013. On the investigation of the biaxial fatigue behaviour of unidirectional composites. *Compos B*;54:200-8
- [46] **Quaresimin M., Carraro P.A.**, 2014. Damage initiation and evolution in glass/epoxy tubes subjected to combined tension-torsion fatigue loading. *Int J Fatigue*;63:25-35.
- [47] **Quaresimin M., Carraro P.A., Mikkelsen L.P., Lucato N., Vivian L., Bronsted P., Sorensen B.F., Varna J., Talreja R.**, 2014. Damage evolution under cyclic multiaxial stress state: a comparative analysis between glass/epoxy laminates and tubes. *Compos B*;61:282-90.
- [48] **Schmidt F., Rheinfurth M., Horst P., Busse G.**, 2012. Effects of local fibre waviness on damage mechanisms and fatigue behaviour of biaxially loaded tube specimens. *Compos Sci Technol*;72:1075-82.
- [49] **El-Kadi H., Ellyin F.**, 1994. Effect of stress ratio on the fatigue of unidirectional glass fibre/epoxy composite laminates. *Composites*;25(10):917-24
- [50] **Mahmood M.S., Akbar H., Larry B.**, 2004. *Lessard Composite structures*, Volume 64, Issue 1, April, Pages 63-69
- [51] **Roy A.K., and Tsai S.W.**, 1988. Design of Thick Composite Cylinders, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 110, 255-62,
- [52] **Hak S.K., Lee D. G.**, 2005. *Composite structures*, Volume 70, Issue 1, Pages 33-47

- [53] **Gubran H.B.H.**, Mechanics., 2005. Volume 32, Issue 1, Pages 368-374
- [54] **Lee D.G., Hak S.K., Jong W.K., Jin K.K.**, 2004. Composite structures, Volume 63, Issue 1, Pages 87-99
- [55] **Khalid Y.A., Mutasher S.A., Sahari B.B., HamoudA.M.S. a.** 2007. Materials and Design, Volume 28, Issue 1, Pages 21-32
- [56] **Chih Y.C., Min Y.C., Jin H.H.,** 2004. Composite structures, Volume 63, Issue 1, Pages 87-99
- [57] **Mutasher S.A.**, 2009. Materials and Design, Volume 30, Issue 1, Pages 215-220
- [58] **Kyung G.B., Lee D.G..** 2002. Composite structures, Volume 55, Issue 1, Pages 247-259
- [59] **Min-Yung C., Jeng-Keag C., Chih-Yung C.**, 2004. Solids and structures, Volume 41, Issue 1, Pages 637-662,
- [60] **Lien-Wen C., Wen-Kung P.**,1998. Composite structures, Volume 41, Issue 1, Pages 253-263
- [61] **Robert S.S.**, 1999. Composites science and technology, Volume 59, Issue 1, Pages 883-896
- [62] **Shackelford J.F.**, 2004. Introduction To Material Science For Engineers
- [63] **Robert M.J.**, 1999. Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Taylor and Francis
- [64] **Sanjay K.M.**, 2002. Composites Manufacturing Materials: Product, and Process Engineering, CRC Press Boca Raton London New York Washington, D.C.
- [65] **Banks S.L., Hershkovitz I., Wawrzynek P.A., Ellasi R., Ingraffea A.R.**, 2005. Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic materials: Part I $z = 0$ is a symmetric plane
- [66] **Mallick P.K.**, 2007. Fiber-Reinforced Composites, Materials Manufacturing and Design, CRC Pres
- [67] **Hoa S.**, 2009. Principals of the Manufacturing of Composite Materials, Destech Pubns Inc
- [68] **Dash P.K.**, 2004. Chatterjee, A. K., Effects of Environment on Fracture Toughness of Woven Carbon/Epoxy Composite
- [69] **Khashaba U.A.**, 2003. Fracture Behavior of Woven Composites Containing Cracks Geometry, Sage Publications

- [70] **Mackerle J.**, 2002. Finite Elements in the Analysis of Pressure Vessels and Piping, an Addendum: a Bibliography (1998-2001), International Journal of Pressure Vessels and Piping, 79, 1-26
- [71] **Xia M., Takayanagi H., and Kemmochi K.**, 2001. Analysis of Multi-Layered Filament-Wound Composite Pipes under Internal Pressure, Composite Structures, 53, 483-91
- [72] **Xia M., Takayanagi H., and Kemmochi K.**, 2001. Analysis of Transverse Loading for Laminated Cylindrical Pipes, Composite Structures, 53, 279-85
- [73] **Wild P.M., and Vickers G.W.**, 1997. Analysis of Filament-Wound Cylindrical Shells under Combined Centrifugal, Pressure and Axial Loading, Composites: Part A, 28A, 47-55
- [74] **Xia M., Takayanagi H., and Kemmochi K.**, 2005. Bending Behavior of Filament-Wound Fiber-Reinforced Sandwich Pipes, Composite Structures, 56, 201-10, (2002).
- [75] **Morgan P.**, Carbon Fibers and their Composites, CRC Pres,
- [76] **Strategic Study**, 2010. The Worldwide Composite Industry, JEG Composites,
- [77] **Parnas L., and Katirci N.**, 2002. Design of Fiber-Reinforced Composite Pressure Vessels under Various Loading Conditions, Composite Structures, 58, 83-95
- [78] **Kabir M.Z.**, 2000. Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner, Composite Structures, 49, 247-55
- [79] **Spencer B., McGee J.**, 1985. Design methodology for a composite drive shaft. Advanced composite material, Lincon, NE, USA;. p. 69–82.
- [80] **Şahin, İ.**, 1996. “Sonlu elemanlar metodu ile millerdeki kritik hızların elde edilmesi” , Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 1-3
- [81] **Soden P.D., Kitching R., Tse P.C.**, 1993. Hinton, M.J. and Tsavalas, Y., Influence of Winding Angle on the Strength and Deformation of Filament- Wound Composite Tubes Subjected to Uniaxial and Biaxial Loads, Composites Science and Technology, 46(4), 363-78
- [82] **Koç E.**, Makine Elemanları Cilt-I 5. Baskı, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
- [83] **Papangelis J.P., Trahar N.S., and Hancock G.L.**, 1998. “Elastic flexural-Torsional buckling of structures by computer. Computer and structures” , 68(1-3), 125-137

- [84] **Mao R., Lu G.,** 2002. A study of elastic-plastic buckling of cylindrical shells under torsion, *Thin-Walled Structures*, 40, 1051-1071
- [85] **Chen W., Tomasz W., Ottmar B., Kare K.,** 2001. Torsional crushing of foam-filled thin-walled square columns, 43, 2297-2317
- [86] **Tong G., and Zhang L.,** 2003. A General Theory for the Flexural-Torsional Buckling of Thin-Walled Members I: Fictitious Load Method. *Advances in Structural Engineering*, 6(4), 299-308, (b)
- [87] **Walker M., Reis T., and Adalı S.,** 1997. “Multiobjective Design of Laminated Cylindrical Shells for Maximum Torsional and Axial Buckling Loads”, *Computers & Structures*, 62, 237-242
- [88] **Shokrieh M.M., Hasani A. and Lessard L.B.,** 2004. “Shear Buckling of a Composite Drive Shaft Under Torsion” *Composite Structures*, 64, pp. 63–69
- [89] **Sofiyev A.H.,** 2003. “Torsional Buckling of Cross-Ply Laminated Orthotropic Composite Cylindrical Shells Subject to Dynamic Loading”, *European J. of Mech. A/Solids.*, 22, 943-951
- [90] **Esen İ.,** 1994. ‘‘Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar yardımıyla millerin analizi ve tasarımı’’ , Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-2, 34-36
- [91] **Hwang T.K., Hong C.S., Kim C.G.,** 2003. Size Effect on the Fiber Strength of Composite Pressure Vessels, *Composite Structures*, 59, 489-98
- [92] **Vasiliev V.V., Krikano, A.A., Razin A.F.,** 2003. New Generation of Filament–Wound Composite Pressure Vessels for Commercial Applications, *Composite Structures*, 62, 449-59
- [93] **Chang R.R.,** 2000. Experimental and Theoretical Analyses of First-Ply Failure of Laminated Composite Pressure Vessels, *Composite Structures*, 49, 237-43
- [94] **Karamanos S.A.,** 2002. Bending instabilities of elastic tubular columns. *Int J Solids Struct* ;39:2059-85
- [95] **Parnas L. and Katirci N.,** 2002. Design of Fiber-Reinforced Composite Pressure Vessels under various Loading Conditions, *Composite Structures*, 58, 83-95
- [96] **Kabir M.Z.,** 2000. Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner, *Composite Structures*, 49, 247-55
- [97] **Spencer B., McGee J.,** 1985. Design methodology for a composite drive shaft. *Advanced composite material*, Lincon, NE, USA;. p. 69–82.

- [98] **Öner G., Temiz S., Akbulut H., Özel A.,** 2007. ‘‘İnce Cidarlı, Çapraz Takviyeli, Tabakalı Kompozit Tüplerde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Burulmalı Burkulma Analizi’’, Deü Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi Ocak Sayfa 35-44
- [99] **Ekmekçi N.,** 1999. ‘‘Kademeli millerde burulma analizi’’, Yüksek lisans tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 23-29, 71-73



ÖZGEÇMİŞ

Hayri YILDIRIM

hyildirim@dicle.edu.tr

1982’de Diyarbakır’da doğdu. İlköğrenim, orta ve lise eğitimini Diyarbakır’da tamamladı. 2000-2004 yılları arasında Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi aldı. Lisanstan mezun olduktan sonra, özel sektörde beş yıl çalıştı. 2009 yılında DÜ Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Programında Öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen Dicle Üniversitesi personeli olarak çalışmaya devam etmektedir. 2005-2008 yılları arasında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim dalında yüksek lisansını yaptı. 2009 yılında Fırat üniversitesi Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim dalında doktora eğitimine başladı.