T.C
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI ÇEVRESEL ŞARTLARA MARUZ KOMPOZİT MALZEMELERİN BURKULMASI

Mehmet Ali KURT

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA

2019

Prof. Dr. Murat KISA danışmanlığında, Mehmet Ali KURT'un hazırladığı **"Farklı Çevresel Şartlara Maruz Kompozit Malzemelerin Burkulması"** konulu bu çalışma 02.08.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Prof. Dr. Murat KISA ……

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÖZEN ……

Üye : Doç. Dr. Mehmet Emin DENİZ ……

Bu Tezin Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Bu Çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: 17233

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR vii
1.GİRİŞ 1
1.1 Tezin Önemi ve Amacı 1
1.2. Tezin Kapsamı 2
1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler 3
1.4. Kompozit Malzemeler 3
1.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları 5
1.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 7
1.6.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre 7
1.6.1.1. Plastik kompozitler 7
1.6.1.2. Metal fiber kompozitler 8
1.6.1.3. Cam elyaf kompozitler 9
1.6.1.4. Köpük kompozitler 9
1.6.1.5. Metal matrisli kompozitler 9
1.6.1.6. Seramik kompozitler 10
1.6.2. Yapı bileşenlerinin şekline göre 10
1.6.2.1. Partikül esaslı kompozitler 10
1.6.2.2. Lamel esaslı kompozitler 10
1.6.2.3. Fiber esaslı kompozitler 11
1.6.2.4. Dolgu kompozitler 12
1.6.2.5. Tabaka yapılı kompozitler 12
1.7. Kompozit Malzeme Yapımında Kullanılan Parametreler 13
1.7.1. Matris malzemeleri 13
1.7.2. Reçineler ve özellikleri 14
1.7.2.1. Epoksi reçineler 14
1.7.2.2. Polyesterler 14
1.7.2.3. Üretan reçineler 14
1.7.2.4. Fenolik reçineler 15
1.7.3. Elyaf çeşitleri ve özellikleri 15
1.7.3.1. Cam elyaf 16
1.7.3.2. Karbon elyaf 19
1.8. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri 20
1.8.1. Elle yatırma yöntemi 20
1.8.2. Püskürtme yöntemi 21
1.8.3. Elyaf sarma yöntemi 22
1.8.4. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi 23
1.8.5. Profil çekme yöntemi 23
1.8.6. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi 24
1.8.7. Otoklav yöntemi 25
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 26
3. MATERYAL ve YÖNTEM 32
3.1. Polimer Matrisli Kompozit Plakaların Üretimi 32
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması 39
3.3. Kompozit Malzemelerde Hook Sabitlerinin Elde Edilmesi 40
3.3.1. E_1' in elde edilmesi 41
3.3.2. E_2' in elde edilmesi 42
3.3.3. v_{12} poisson oranının elde edilmesi 43
3.3.4. G_{12} kayma modülünün elde edilmesi 45
3.3. Ansys Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Burkulma Analizi 46

3.3.1. Analiz tipinin belirlenmesi 46
3.3.2. Malzeme tipi ve özelliklerinin belirlenmesi 46
3.3.3. Malzeme modelinin oluşturulması 49
3.3.4. Malzemeyi elemanlara ayırma işlemi 49
3.3.5. Yükleme ve sınır şartlarının tanımlanması 50
3.3.6. Çözüm 52
3.3.7. Elde edilen sonuçların okunması 54
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 55
4.1. Çevresel Şartlara Maruz Bırakılmadan Önce Cam Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyi 56
4.2. Çevresel Şartlara Maruz Bırakılmadan Önce Karbon Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyi . 60
4.3. Çevresel Etkilere Maruz Kalan Cam Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyleri 62
4.3.1. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 63
4.3.2. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 66
4.3.3. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 69
4.3.4. 2, 4 ve 6 ay toprak etkisine maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 72
4.4. Çevresel Etkilere Maruz Bırakılan Karbon Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyleri 78
4.4.1. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 78
4.4.2. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 81
4.4.3. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 84
4.4.4. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri 87
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 94
5.1. Sonuçlar 94
5.2. Öneriler 102
KAYNAKLAR 103
ÖZGEÇMİŞ 105

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI ÇEVRESEL ŞARTLARA MARUZ KOMPOZİT MALZEMELERİN BURKULMASI

Mehmet Ali KURT

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat KISA
YIL: 2019, Sayfa: 105

Cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitler; yüksek dayanım değerleri, korozyon dirençleri, hafiflikleri ve kolay üretilmeleri sayesinde uzay, deniz, otomotiv, savunma sanayisi gibi yüksek performans isteyen alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu tür kompozit yapılarda, matris malzemesi olarak epoksi reçinesi çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sanayi uygulamalarındaki cam ve karbon elyaflı epoksi kompozitlerin kullanımındaki artış ile birlikte çalışma koşullarındaki çevresel şartların kompozit malzemeler üzerine olan etkilerini incelemek önem arz etmektedir. Buna yönelik bu çalışmada, farklı ortam koşullarına 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılmış tek yönlü cam ve karbon elyaf takviyeli farklı oryantasyon açılarına sahip epoksi kompozit plakaların kritik burkulma yükleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deney ve nümerik sonuçların birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Standartlara uygun olarak hazırlanan deney numuneleri, Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği kullanılarak üretilmiştir. Deneylerdeki kritik burkulma yükleri numunelerin her iki tarafı ankastre olacak şekilde elde edilmiştir. Sonuç olarak; iki, dört ve altı aylık periyotlarla güneş, toprak, deniz suyu ve şebeke suyu etkilerine maruz bırakılan 0°, 45° ve 90° oryantasyon açılarına sahip cam ve karbon elyaflı epoksi kompozit malzemelerin kritik burkulma yüklerinde düşüş meydana gelmiştir. Sonuç verilerine göre, her üç periyodun sonunda en çok çevresel şartlardan etkilenen oryantasyon açıları, cam elyaflı kompozitler için 45° oryantasyon açısına sahip numuneler olurken, karbon elyaflı kompozitlerde ise 90° oryantasyonlu numuneler olmuştur. Hem cam hem karbon elyaflı 0° oryantasyon açılı kompozit plakalar, her üç periyodun sonunda çevresel etkilerden en az etkilenen plakalar olmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Kompozit, burkulma, ansys, çevresel etkiler, elyaf, oryantasyon

ABSTRACT

MSc Thesis

BUCKLING OF COMPOSITE MATERIALS EXPOSED TO DIFFERENT ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Mehmet Ali KURT

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat KISA
Year: 2019, Page: 105

Glass and carbon fiber reinforced epoxy composites are frequently preferred in areas requiring high performance, such as aerospace, automotive, defense industry, thanks to their high resistance values, corrosion resistance, lightness and easy production. In such composite structures, epoxy resin is widely used as matrix material. Due to the increase in the use of glass and carbon fiber epoxy composites in industrial applications, it is important to examine the effects of environmental conditions on composite materials in working conditions. In this study, critical buckling loads of unidirectional glass and carbon fiber reinforced epoxy composite plates with different orientation angles exposed to different ambient conditions at 2, 4 and 6 month periods were investigated experimentally and numerically. Experimental and numerical results were found to be close to each other. Test samples prepared in accordance with the standards are produced using vacuum assisted resin infusion method. The critical buckling loads in the experiments were obtained in such a way that both sides are cantilever. As a result, the buckling stresses of glass and carbon fiber epoxy composite materials with 0 °, 45 ° and 90 ° orientation angles subjected to solar, soil, seawater and city water effects for two, four and six months period have decreased. According to the results, at the end of each three periods, the orientation angles affected by the most environmental effects were samples with 45° orientation angles for glass fiber composites, and 90° orientation angles for carbon fiber composites. Both the glass and carbon fiber composites with 0 ° orientation angles were least affected by the environmental effects at the end of each three periods.

KEY WORDS: Composite, buckling, ansys, environmental effects, fiber, orientation

TEŞEKKÜR

Tez konusunun seçiminde, çalışmalarımda beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Murat KISA'ya şükranlarımı sunarım.

Tez çalışması boyunca, sahip olduğu bilgi ve birikimlerini benden esirgemeyen saygıdeğer hocam, Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mustafa ÖZEN'e ve tezin her aşamasında özellikle laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan değerli hocam Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. Gökhan DEMİRCAN'a verdikleri emeklerden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmamda gerekli maddi desteğe öncülük eden HÜBAK birimine teşekkür ederim.

Tüm çalışmam boyunca her zaman yanımda olan, manevi desteklerini benden esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime en içten duygularımla minnettarım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Tabaka açılarının farklı gösterimi 11
Şekil 1.2. Kompozit yapılarda farklı fiber katkı türleri 11
Şekil 1.3. Elyaf dokuma çeşitleri 16
Şekil 1.4. Elyaf yapılarda kullanılan cam lifleri 16
Şekil 1.5. Cam elyaf üretimi 17
Şekil 1.6. Elyaf yapılarda kullanılan karbon lifi 19
Şekil 1.7. Elle yatırma yöntemi 21
Şekil 1.8. Püskürtme yöntemi 22
Şekil 1.9. Elyaf sarma düzeneği 22
Şekil 1.10. RTM yönteminin şematik gösterimi 23
Şekil 1.11. Profil çekme yöntemi 24
Şekil 1.12. Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi 24
Şekil 1.13. Kompozit üretiminde kullanılan otoklav makinesi 25
Şekil 3.1.Üretim tezgahı yüzeyinin temizlenerek kalıp ayırıcı filminin serilmesi 32
Şekil 3.2. Kalıp ayırıcı kenarlarının sızdırmazlık bandı ile bantlanması 33
Şekil 3.3. Hazırlanan 16 kat cam ve karbon elyaf kumaşları 33
Şekil 3.4. Cam ve karbon elyaf kumaşların kalıp ayırıcı üzerine yerleştirilmesi 34
Şekil 3.5. a. Soyma kumaşının yerleştirilmesi b. İnfüzyon filesinin yerleştirilmesi 34
Şekil 3.6. Vakum hattının oluşturulması için spiral hortumların yerleştirilmesi 35
Şekil 3.7. Vakum poşetinin tüm yüzeyi kaplayacak şekilde yerleştirilmesi 35
Şekil 3.8. a. Basınç göstergesi b. Reçine infüzyonuna hazır vakum hattı 36
Şekil 3.9. Hazırlanan epoksi matrisi 37
Şekil 3.10. a. Epoksi reçinesinin ilerleyişi b. Plakanın kürlenmeye hazır hale getirilmesi 38
Şekil 3.11. Üretilen cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar 39
Şekil 3.12. Üretilen kompozit plakaların numune boyutlarında kesim aşaması 39
Şekil 3.13. Hazırlanan 0º, 45º ve 90º açılı cam ve karbon elyaflı deney numuneleri 40
Şekil 3.14. Kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekilmesi 41
Şekil 3.15. Kompozit malzemenin takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekilmesi 42
Şekil 3.16. Kompozit plakaya kayma gerilmesinin uygulanışı 43
Şekil 3.17. Kompozit plakada toplam kayma deformasyon gösterimi 44
Şekil 3.18. Sructural analiz tipinin belirlenmesi 46
Şekil 3.19. Plakaların eleman tipinin belirlenmesi 47
Şekil 3.20. Orthotropic yapıda seçilen kompozit malzeme 47
Şekil 3.21. Kompozit malzeme özelliklerinin girilmesi 48
Şekil 3.22. Kompozit plakaların oryantasyon açıları ve tabaka kalınlıklarının girilmesi 48
Şekil 3.23. Tabaka dizilimi 49
Şekil 3.24. Kompozit plakanın X ve Y koordinatlarının girilmesi 49
Şekil 3.25. Elemanlarına ayrılacak plakaların mesh birim uzunluğunun girilmesi 50
Şekil 3.26. Serbestlik dereceleri ve sınır şartlarının girilmesi 50
Şekil 3.27. Uygulanan basınç değerinin girilmesi 51
Şekil 3.28. Çözümlemeye hazır plaka 51
Şekil 3.29. Prestress Effects'in aktif hale getirilmesi 52
Şekil 3.30. Burkulma analizi gerçekleştirmek için Eigen buckling'in seçilmesi 53
Şekil 3.31. Matris çözümü için No. Of modes to extract değerinin girilmesi 53
Şekil 3.32. Burkulma analizi çözümünün genişletilmesi 54
Şekil 4.1. Burkulma deneylerin yapıldığı shimadzu AGS-X Plus adlı marka cihaz 55
Şekil 4.2. Cam elyaf deney numuneleri 56
Şekil 4.3. Deney numunelerinin kesit alanlarının girilmesi 56
Şekil 4.4. Kompozit plakaların burkulma deneyleri 57
Şekil 4.5. Kritik burkulma yükünün tespit edilmesi 57
Şekil 4.6. 0° açılı cam kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi 58
Şekil 4.7. 45° açılı cam kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi 58

Şekil 4.8. 90° açılı cam kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi 59
Şekil 4.9. Karbon elyaf takviyeli deney numuneleri 60
Şekil 4.10. Karbon elyaflı kompozit plakanın burkulma deneyi 60
Şekil 4.11. 0° açılı karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi..... 61
Şekil 4.12. 45° açılı karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi..... 61
Şekil 4.13. 90° açılı karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi..... 61
Şekil 4.14. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 64
Şekil 4.15. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 64
Şekil 4.16. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 65
Şekil 4.17. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 67
Şekil 4.18. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 67
Şekil 4.19. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 68
Şekil 4.20. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 70
Şekil 4.21. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 70
Şekil 4.22. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 71
Şekil 4.23. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 73
Şekil 4.24. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 73
Şekil 4.25. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 74
Şekil 4.26. Değişik çevre koşullara maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim 75
Şekil 4.27. Değişik çevre koşullara maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim 76
Şekil 4.28. Değişik çevre koşullara maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim 77
Şekil 4.29. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 79
Şekil 4.30. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 80
Şekil 4.31. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 81
Şekil 4.32. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 82
Şekil 4.33. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 83
Şekil 4.34. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 84
Şekil 4.35. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 85
Şekil 4.36. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 86
Şekil 4.37. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 87
Şekil 4.38. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 88
Şekil 4.39. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 89
Şekil 4.40. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 90
Şekil 4.41. Değişik çevre koşullara maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim..... 91
Şekil 4.42. Değişik çevre koşullara maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim..... 92
Şekil 4.43. Değişik çevre koşullara maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim..... 93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Cam elyafların çeşitli mekanik özellikleri 18
Çizelge 1.2. Çeşitli cam elyafların yüzde bileşim oranları 19
Çizelge 1.3. Çeşitli hammaddelerden elde edilmiş karbon liflerinin bazı mekanik özellikleri 20
Çizelge 3.1. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri 37
Çizelge 4.1. Cam elyaflı numunelerin deney ve Ansys sonuçlarının karşılaştırılması 59
Çizelge 4.2. Karbon elyaflı numunelerin deney ve Ansys sonuçlarının karşılaştırılması 62
Çizelge 4.3. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam kompozitlerin kritik yük değerleri 63
Çizelge 4.4. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam kompozitlerin kritik yükleri . 66
Çizelge 4.5. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yük 69
Çizelge 4.6. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri 72
Çizelge 4.7. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri 79
Çizelge 4.8. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri.....82
Çizelge 4.9. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri..... 85
Çizelge 4.10. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükü. 88
Çizelge 5.1. İki ay çevresel etkilere maruz kalan cam ve karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde meydana gelen yüzde azalma oranları 95
Çizelge 5.2. Dört ay çevresel etkilere maruz cam ve karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde meydana gelen yüzde azalma oranları 96
Çizelge 5.3. Altı ay çevresel etkilere maruz cam ve karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde meydana gelen yüzde azalma oranları 97
Çizelge 5.4. Üç farklı yönelim açısına sahip kompozitlerin dört farklı çevresel etkiye 2, 4 ve 6 ay maruziyet sonlarındaki yüzde değişim oranları 99

SİMGELER VE KISALTMALAR

VARTM	Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
RTM	Reçine transfer kalıplama yöntemi
P_{kr}	Kiritik burkulma yükü
E	Elastisite modülü
I	Eylemsizlik momenti
L	Burkulma boyu
σ_{max}	Maksimum gerilme
P_{max}	Maksimum burkulma yükü
A	Kesit alanı
*A*f	Fiberin kesit alanı
*A*m	Matrisin kesit alanı
τ	Kayma gerilmesi
Δ	Toplam kayma
Δm	Matriks malzemenin kayma miktarı
Δf	Fiber malzemenin kayma miktarı
*G*m	Matriks malzemenin kayma şekil değiştirmesi
G_f	Matriks malzemenin kayma şekil değiştirmesi
σi	Gerilme bileşenleri
εij	Birim şekil değiştirmeler
x,y,z	Kartezyen koordinat sistemi
u,v,w	x, y, z doğrultularındaki deplasmanlar
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
ν	Poisson oranı
σ_1, σ_2	Asal gerilmeler
τ_{12}	Maksimum kayma gerilmesi
σf	Fiber malzemenin gerilme değeri
σm	Matriks malzemenin gerilme değeri
E_f	Fiber malzemenin elastiklik modülü
*E*m	Matriks malzemenin elastiklik modülü
V_f	Fiber malzemenin hacimsel oranı
V_m	Matriks malzemenin hacimsel oranı
εm	Matriks malzemenin birim şekil değiştirmesi
εf	Fiber malzemenin birim şekil değiştirmesi
W	Malzeme kalınlığı
W_m	Matriks malzemenin kalınlığı
W_f	Fiber malzemenin kalınlığı
γm	Matriks malzemenin kayma şekil değiştirmesi
γ_f	Fiber malzemenin kayma şekil değiştirmesi

1.GİRİŞ

1.1. Tezin Önemi ve Amacı

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin önemi günümüz teknolojisi ile paralel olarak hızla artmaktadır. Endüstriyel alanlarda ihtiyaç duyulan üstün özelliklere sahip malzemelerin, maliyetlerinin yüksek olması veya elde edilememesinden dolayı kompozit malzemelerin kullanılması ve geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda hem ekonomik hem de yüksek mukavemetli ve aynı zamanda çok daha hafif olan malzemelerin oluşturulması için yapılan araştırmalar yaygınlaşmıştır.

Yapılan araştırmalar neticesinde, fiber takviyeli kompozit malzemelerin çeşitli özelliklere sahip olması örneğin; korozyona karşı dayanımları, yüksek darbe dayanımları, esneklik ve düşük ağırlık/hacim oranları gibi özelliklerinden dolayı endüstriyel alanda metalik malzemelere oranla daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca, bu üstün özelliklerinden dolayı deniz, kara ve havacılıkta metalik malzemelere alternatif olarak kullanılmaktadır.

Makine ve yapı elemanı seçiminde istenilen mukavemet, rijitlik ve kararlılık durumundaki avantajları ile de ön plana çıkan fiber takviyeli kompozit malzemeler, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılıyor olması, kompozit yapılardan yapılmış sertleştirilmiş plakaların yüksek verimlerinden dolayı kullanımının giderek artması ve son yıllarda birçok endüstriyel alanda özellikle havacılık endüstrisinde de kullanıma sahip olmaları, malzeme bilimi için son yıllarda ortaya konulan gelişmelerden birisi olmuştur. Ülkemizde de hızla gelişen havacılık endüstrisinde, elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ileride yüksek teknolojiye dayalı bir endüstri alanı oluşturulmasına katkı sağlamaktadır (Aksoylu, 2007).

Bu çalışmadaki amaç, tek yönlü cam ve karbon elyaf takviyeli, farklı oryantasyon açılarına (0°, 45°, 90°) sahip tabakalı kompozit plakaları, farklı çevresel

etkilere (güneş, toprak, deniz suyu ve şebeke suyu) iki, dört ve altı aylık periyotlarla maruz bırakarak çevresel şartların, kompozit malzemelerin kritik burkulma yüklerine olan etkilerini deneysel ve nümerik olarak incelemektir.

1.2. Tezin Kapsamı

Günümüzde endüstriyel uygulamaların her geçen gün artması, özellikleri diğer malzemelere kıyasla daha iyi olan malzemelerin doğmasına sebebiyet vermiştir. Bu malzemelerin başında, üstün özelliklere sahip elyaf takviyeli kompozit malzemeler gelmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimi özellikle son yüzyılda büyük ölçüde artmıştır. Genel olarak elyaf takviyeli kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere göre daha yüksek elastisite/yoğunluk ve dayanım/yoğunluk gibi oranlara sahip olduklarından ötürü tercih edilmektedirler (Topal, 2014).

Tüm bu üstün özelliklerinin yanında elyaf takviyeli kompozit malzemeler, kullanım ömürleri boyunca çevresel etkilere maruz kalarak deformasyona uğramakta ve bu deformasyonlardan kaynaklı kompozit yapılar, sahip olduğu tabakalar arasındaki katmaların birbirlerinden ayrılarak yapının kendisinden beklenen fonksiyonları yerine getirememesine sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca, uygulama alanı olarak farklı iklim şartlarında kullanılan kompozit yapılar, çok büyük sıcaklık ve yapısal değişimlere ve aynı zamanda birbirinden farklı ortam koşullarının etkisinde kalabilmektedirler. Çevresel etkilere maruz kalan bir kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesi veya dayanım değeri önemli derecede etkilenerek malzemenin mukavemet ve rijitliği düşmektedir (Tekin ve ark., 2016). Dolayısıyla, bu etkilerden kaynaklı oluşan deformasyonlar malzemenin daha düşük yükte burkulmasına neden olmaktadır. Ve kompozit malzeme beklenmedik yapısal bozulmalarla karşılaşabilmektedir. Sertleştirilmiş plakaların genel olarak fiziksel yapısı, düzlem içi sıkıştırmaya maruz kalmakta ve bu yükün sürekli artması, burkulma sonucunda yapısal arızalanmalara neden olmaktadır. Bu sebeblerden ötürü kompozit malzemelerin kullanılacağı yerlerdeki stabilitesi için burkulma değerlerini saptamak ve çevresel faktörlerin oluşturduğu etkileri incelemek önem arz etmektedir.

Bu kapsamda, literatür çalışmaları incelendiğinde elyaf takviyeli kompozit yapıların burkulması konusu üzerine birçok çalışma mevcut olup çevresel etkilerin burkulma üzerindeki etkisini inceleyen araştırmaların nadiren yapılmış olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, takviye malzemeleri tek yönlü cam ve karbon elyaf olan epoksi matrisli kompozit plakalar Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Tekniği ile üretilmiştir. Burkulma deneylerine geçmeden önce üretilen plakalar her bir çevresel etki için cam elyaf takviyeli numuneler için beşer adet, karbon elyaf takviyeli numuneler için ise dörder adet olacak şekilde deney numuneleri hazırlanmış olup numuneler su ile çalışan kesici testere ile belli ebatlarda ve 0º, 45º ve 90º oryantasyon açılarına sahip olacak şekilde kesilerek elde edilmiştir. Elde edilen numuneler çevresel etkilere tabi tutulmadan kritik burkulma yük değerleri her iki tarafı ankastre olacak şekilde belirlenmiştir. Daha sonra numuneler iki, dört ve altı aylık süreler ile şebeke suyu, toprak, deniz suyu ve güneş olmak üzere dört farklı çevresel etkiye maruz bırakılarak kritik burkulma yük değerleri belirlenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

1.3. Tezin Katkısı ve Getireceği Yenilikler

- Yapılan literatür çalışmalarını incelediğimizde çevresel etkilere maruz cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde, özel bir durum olan burkulma davranışı üzerine yapılan çalışmaların çok nadir yapıldığı görülmüştür. Bu nedenle, yapılan bu çalışmanın literatüre önemli bir katkı yapacağı düşünülmektedir.
- Bu çalışma ile makine uygulamalarında kullanılacak olan farklı oryantasyon açılarına sahip cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin, değişik çevresel şartlar altındaki burkulma davranışları hakkında bilgiler elde edilmiş olup bu bilgilerden kompozit malzeme üreticilerinin faydalanacağı öngörülmektedir.

1.4. Kompozit Malzemeler

'Karma' anlamına gelen ve Fransızca 'composite' ifadesinden türeyen kompozit malzemeler, birbirinden farklı iki ve daha fazla maddenin arzu edilen

mekanik özellikleri belirlemek için tek bir malzemede belirlenen şartlar ve oranlarda bir araya getirilerek elde edilen malzemelere denir (Vatangül, 2008).

Kompozit malzemeler temel eleman olarak matris ve takviye malzemesi olarak adlandırılan fiber malzemelerden oluşmaktadırlar. Bu malzeme grubundan matris malzemeler; lifleri bir arada tutmak, yükü fiberlere homojen olacak şekilde dağıtmak ve malzeme plastik deformasyona geçerken oluşan çatlakların ilerlemesini ve kopmasının önüne geçmek için kullanılır (Şencan, 2015). Fiber malzemeler ise kompozit malzemenin mukavemet, yük taşıma ve kararlılık gibi özelliklerini sağlamaktadır. Günümüzde malzeme dayanımı/ağırlık oranı yüksek olan malzemelere olan gereksinim sürekli olarak artmakta, aynı zamanda ısıl iletkenlik, ısı yalıtımı, yorulma, ısıl genleşme ve korozyon gibi değişik özelliklere sahip malzemeler, endüstri sanayisinde daha çok tercih edilmektedir.

Kompozit malzeme örnekleri doğadan esinlenmiş olup çok uzun bir kullanım tarihine sahiptirler. Buna verilebilecek en iyi örneklerden bir tanesi kerpiç malzemelerdir. Kerpiç üretiminde çamur içerisine katılan doğal bitkisel sap ve lifler, malzemenin kullanım sırasındaki mukavemetini ve rijitliğini artırmaktadır. Ancak bulunduğumuz bu uzay çağında, malzemenin bilimsel ve mühendislik kavramlarıyla geliştirilmesi ve özellikle sentetik reçinelerin kullanımının artması 1940'lı yıllarda görülmüştür. İlk uygulama alanlarına örnek olarak radar kubbeleri söylenebilir. Cam ve karbon elyaf takviyeli plastik malzemeler atmosfer koşullarına dayanıklılığının yanı sıra elektromanyetik geçirgenliği ve hafiflik gibi üstün özellikleri sayesinde istenilen amaç için kullanılabilecek uygun malzemeler listesine girmişlerdir (Baba, 2013). Tarihsel sürece bakıldığı zaman, ilk elyaf sarma metodu ABD'de 1946 yıllarında görülmüş olup 1950 yıllarında ise uçak kanatlarında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise savunma sanayisinin en popüler malzemeleri olarak kullanılmaktadır.

Teknolojinin özellikle 20. asrın ikinci yarısından sonra hızla ilerlemesi, paralelinde sanayinin temel ham maddesi olarak kullanılan malzemelerinde ilerlemesine neden olmuştur. Fakat bu ilerleme, dünyada bulunan temel

malzemelerin sınırlı olmasından dolayı ihtiyaçlara cevap veremez duruma gelmiştir. Uzay araçlarının üretimine geçilen yüzyılımızda ise bilim insanları çağın getirdiği yenilikler ile birlikte mevcut olan malzemelerin özelliklerinden bilimin gelişimi ile aynı doğrultuda, günün gereksinimleri ile uyumlu yeni malzememeler üretmişlerdir. Bu doğrultuda hem ekonomik hem mukavemetli hem de çok daha hafif olan malzemeleri üretmek için çok daha fazla mesai harcanmaktadır. Böylece malzemeyi oluşturan bileşenlerin, özellikleri birbirinden farklı olan kombinasyonların oluşturdukları kompozit malzemeler meydana gelmiştir.

1.5. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin metalik malzemelere oranla yüksek özelliklerinin farklılık göstermesinden dolayı, metalik malzemelere kıyasla daha büyük öneme sahiptirler. Örneğin; kompozit malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük olması, korozyon dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu gibi özelliklere sahip olmaları onların ilgili kullanım alanları için büyük avantajlar sağlamaktadır.

Aşağıda, kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları kısaca ele alınacak olup dezavantajları ilgili yapılan çalışmalar sağlıklı neticelenmesi halinde kompozit malzemeler, endüstriyel alan başta olmak üzere sanayinin tüm alanlarında metalik malzemelerin yerini alabileceklerdir.

- **Yüksek mukavemet:** Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemetleri, metalik malzemelere kıyasla çok daha yüksektir. Ayrıca, istenilen bölge ve yönlerde kaplama özelliklerinden dolayı gerekli mukavemet verilebilir. Bu şekilde malzemeden tasarruf yapılarak daha ucuz ve düşük maliyetli ürünler elde edilebilir.
- **Isıya ve ateşe dayanıklılık:** Kompozit malzemeler, ısı iletim katsayıları düşük malzemelerden meydana geldikleri için ısıya dayanıklılık özellikleri yüksek ısı ortamlarında kullanabilmelerini sağlamıştır. Ayrıca, bazı özel katkı maddeler ile ısıya karşı dayanımlarını artırmak mümkündür.

- **Kolay şekillenebilme:** Büyük ve kompleks parçalı kompozit yapılar, tek işlem ile bir parça halinde şekillendirilebilir. Bu özelliğinden dolayı malzeme ve işçilikten kazanç sağlanır.
- **Korozyona ve kimyasal etkilere karşı mukavemet:** Kompozit malzemeler diğer metalik malzemelere oranla korozyondan, çoğu kimyasal maddelerden ve hava etkilerinden çok nadir etkilenmektedir. Bu özelliklerinden dolayı tanklarda, boru ve aspiratörlerinde, tekne ve deniz araçlarında çok yaygın olarak kullanılabilmektedirler.
- **Elektriksel özellikleri:** Kompozit malzemelerin elde edilmesinde uygun malzemelerin seçilmesi ile çok üstün özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir.
- **Kalıcı renklendirme:** Kalıplama esnasında kompozit yapılara, reçineye dahil edilebilen özel pigmentler sayesinde istenilen renklendirme işlemleri yapılabilmektedir. Bu işlemler için ayrı bir masraf gerekmemektedir.
- **Hafiflik:** Özgül ağırlıkları 1-2 gr/cm^3 arasında olan kompozit yapıların, metalik yapıların sahip olduğu 6-13 gr/cm^3 arasındaki özgür ağırlığından düşük olması, daha hafif konstrüksiyonların yapılmasına olanak sağlamıştır.
- **Titreşim sönümleme:** Sünek yapıya sahip olan kompozit yapılar, doğal bir titreşim sönümleme özelliğine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı çatlak ilerlemesi en aza indirgenmiş olur.
- **Rijitlik ve boyut kararsızlığı:** Düşük olan genleşme katsayılarından dolayı sert, yapısal olarak sağlam ve büyük boyut kararlılığı gösterirler.

Yukarda belirtilen kompozit malzemelerin avantajlarının yanında olumsuz yönleri de şu şekilde sıralanabilir;

- Hammaddeleri pahalıdır ve aynı zamanda üretim maliyetleri de çok yüksektir.
- Mekanik karakterizasyonları, metalik malzemelere oranla daha karmaşıktır.
- Kompozit malzemelerin bünyesinde bulunan hava zerrecikleri malzemenin yorulma değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir.
- Değişik doğrultularda kompozit malzemeler değişik özellikler gösterebilmektedir.

- Çekme, basma ve eğilme değerlerinin aynı kompozit malzemede farklılık gösterebilmektedir.
- Malzemelerin kaliteleri, üretim yöntemlerinin kalitelerine bağlı olarak değişmesinden dolayı standartlaştırılmış bir kaliteleri yoktur.
- Kırılgan (gevrek) malzeme olmaları daha kolay zarar görmelerine ve onarılmaları yeni problemlere yol açmaktadır.
- Deneysel ve hesaplamalı analizleri karmaşıktır.
- Geri dönüşümlü malzeme sınıfında yer almamalarından dolayı doğa dostu malzemeler değillerdir.

1.6. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edildiklerinden dolayı kesin bir sınıflandırma yapmaktan kaçınılır. Bu yüzden, bir sınıflandırma yapacak olursak, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin şekillerine göre iki farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre bir gruplandırma yapılabileceği gibi yapı bileşenlerinin şekillerine göre de sınıflandırılabilir.

1.6.1. Yapılarını oluşturan malzemelere göre

1.6.1.1. Plastik kompozitler

Yük taşıma özelliğine sahip fiber olarak kullanılan plastik malzemeler, matris olarak kullanılan plastik, darbe emici, esneklik verici ve arzu edilen amaca yönelik plastiklerin özelliklerine sahip olabilmektedir. Kullanılabilecek plastik türleri iki ayrı grupta incelemek mümkündür.

Termoplastikler: Isıtıldığında yumuşayan ve şekil verildikten sonra soğutulduğunda sertleşen malzemelerdir. Bu işlemler sırasında malzemenin mikro yapısında herhangi bir yapısal bozukluk meydana gelmez. Genellikle, 5-50 ºC sıcaklık arasında kullanılabilmektedirler. Bu plastik grubuna örnek verilirse;

a) Naylon
b) Polietilen
c) Karbonflorür
d) Selülozikler
e) Viniller

şeklinde sıralanabilir.

Termoset Plastikler: Bu tip plastikler ise ısıtma işleminin ardından şekillendirilip soğutulduktan sonra eski haline gelmesi mümkün değildir. Bu gruba da örnek verilirse:

a) Polyesterler
b) Epoksiler
c) Alkiter
d) Aminler

şeklinde sıralanabilirler.

1.6.1.2. Metal fiber kompozitler

Endüstriyel alanda çok sık kullanılmakta olan metal fiber takviyeli plastikten meydana gelen kompozit yapılar, oldukça mukavemetli ve hafif bir malzeme olarak endüstriyel pazardaki yerini almıştır. Bu yapılar, takviye malzemeleri metal fiberleri (bronz, alüminyum, bakır, çelik vs.) polipropilen ve polietilen plastiklerinin takviyelendirilmesi ile oluşturulmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle deformasyona karşı takviyelendirilmesi üzerinde durulmakta ve çok iyi verim sağlanmaktadır.

1.6.1.3. Cam elyaf kompozitler

İsteğe bağlı olarak termoset ve termoplastikten oluşan cam liflerin ve matris malzemelerin belli oranlarda bir araya gelmesi ile oluşturulmaktadır. Cam liflerin mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı birçok durumda asbest, sentetik elyaf, pamuk ipliği, metal gibi liflerin yerlerine tercih edilmektedir. Kullanılan uygun plastik reçine yardımıyla yapıların kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirilerek istenilen şekillere sokulabilmektedirler. Plastik reçinelerin, cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda en çok kullanılanı ise polyesterlerdir.

1.6.1.4. Köpük kompozitler

Bu tür yapılarda, fiber görevi gören plastik malzemeler olurken köpük ise matris olarak kullanılmaktadır. Köpükler, genel olarak sentetik olarak imal ettirilip hafif olmalarına rağmen düşük yoğunlukta, hücreli yapılara sahip olma, gözenekli ve doğal halde bulunabilirler. Hücre yapılarına göre köpükler yumuşak, sert, kırılgan ve elastik durumlarına sahiptirler. Bu köpük türleri, matris olarak kullanılarak kullanılan plastiğin farklı kombinasyonları ile değişik özelliklerde kompozit yapılar elde edilebilmektedir.

1.6.1.5. Metal matrisli kompozitler

Metallerin ve metal alaşımların geneli yüksek sıcaklık durumlarında bazı özellikleri sağlamalarının yanında yine de kırılgan olabilmektedirler. Fakat takviye malzemesi olarak metalik fiberler kullanılan metal matrisli kompozit yapılar, iki fazın uyum halinde çalışması ile yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklık değerlerine çıkabilmektedirler. Alüminyum ve bakır matrisli, molibden veya wolfram fiberli kompozitler metal matrisli kompozit yapıların en iyi örneklerindendir. Bu tür kompozitler, matris özelliklerinin iyileştirilmesi ile ekonomik olarak elde edilebilmektedir.

1.6.1.6. Seramik kompozitler

Metal ve metal olmayan malzemelerin bir araya getirilmesi oluşturulan seramik kompozitler, rijit ve gevrek yapılarının yanında çok yüksek sıcaklık koşullarına dayanım gösterebilmektedirler. Ayrıca, elektriksel olarak yalıtkan özellikleriyle de ön plana çıkmaktadırlar.

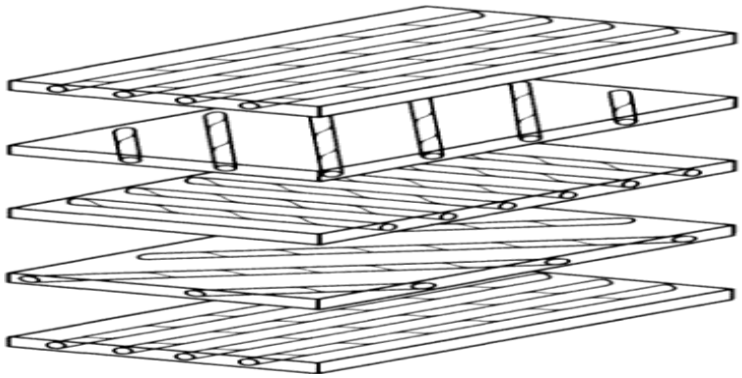
1.6.2. Yapı bileşenlerinin şekline göre

1.6.2.1. Partikül esaslı kompozitler

Şekillendirmeleri rijitlik ve mukavemet özelliklerinde artış sağlayan, dolgu maddesi küçük granül malzemelerden oluşan materyallerin ilavesiyle oluşturulan yapılardır. Bu tür kompozitler, sıfır boyutlu olarak adlandırılan gözle görülmeyecek kadar küçük mikroskobik partiküller ile bir veya iki boyuta sahip makroskobik partiküllerin matris fazı ile bir araya gelerek oluşturdukları malzemelerdir. Bu yapılar, makroskobik ve mikroskobik boyutlu partiküllerden etkilenerek malzeme özelliklerinde farklılıklar oluşturmaktadır. Bu tür kompozit yapıları, fiber ve pul yapılı kompozit yapılardan farklı kılan en belirgin karakteristik özellikleri ise partiküllerin matris içinde gelişigüzel dağılmaları ve malzeme yapılarının izotropik yapı göstermemesidir. Ayrıca, bu yapıların maliyetleri düşük rijitlik yapıları istenilen seviyededir.

1.6.2.2. Lamel esaslı kompozitler

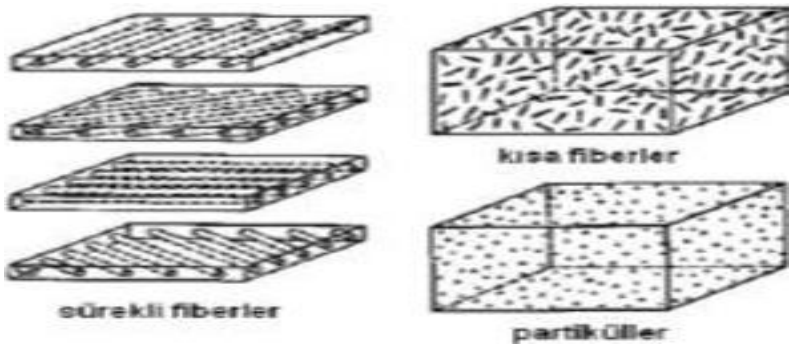
Üretilmeleri dolgu maddelerinin yüksek yük taşıma kabiliyetine sahip uzunluk/çap oranlarında katılarak elde edilirler. Pulların konsantrasyonu, matris içinde düşük olabileceği gibi birbiriyle temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlere de sahiptir. Pul esaslı sistemlerin maliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklı olarak maliyetleri yüksektir. Ayrıca, bu tür kompozitlerin mukavemet değerleri de yüksektir. Bu tür kompozit yapıların tabaka açılarının farklı gösterimi Şekil 1.1.'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Tabaka açılarının farklı gösterimi (Vatangül, 2008)

1.6.2.3. Fiber esaslı kompozitler

Yüksek etkinlik ve birçok özellik değerlerinde artış sağlayan liflerin ilavesiyle üretilirler. Fiber esaslı kompozitler, mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen malzemeler olmakla birlikte rijitlik ve mukavemet değerleri kütle halindeki değerlerden daha yüksek olabilmektedir. Örneğin, karbon fiberden oluşan bir malzemenin çekme mukavemeti, kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği ise 3 kat daha üstündür. Fiberlerin bu üstün özellikleri fark edilmesiyle fiber esaslı kompozit malzemelerin üretilmesinde artış gözlemlenmiştir. Günümüzde kullanım alanları, roket motorlarından düşük performanslı ev eşyalarına kadar çok yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Fiberler, yapı malzemeleri içerisinde uzun fiberlerin kesilmesiyle oluşan süreksiz fiberler veya kesintisiz uzayan olarak adlandırılan sürekli fiberler ya da elyaflar şeklinde olabilmektedir. Farklı fiber çeşitleri Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Kompozit yapılarda farklı fiber katkı türleri

Mühendislik performasyonlarını etkileyen fiber matrisli kompozitlerin en önemli özellikleri fiberlerin şekli, yönlenme açıları, uzunlukları, matrisin mekanik özellikleri ve ara yüzey yapışmasıdır. Fiberlerin şekli nadiren dikdörtgen, içi boş dairesel kesitli ve hegzagonal oldukları gibi dairesel şeklinde de olabilirler. Bu değişik şekillere sahip kompozit yapıların artı özellikleri olmakla birlikte (yüksek mukavemet, paketleme vs.) dairesel kesit şeklinde olanlar kullanım kolaylığı ve maliyet açısından üstünlük sağlarlar. Genel olarak sürekli fiber ile çalışmak kolaylık sağlamasının yanında, tasarım serbestliği süreksizlere göre daha sınırlıdır. Süreksizlere göre sürekli fiberler daha iyi yönlenme göstermesinin yanında, süreksiz fiberler sürekli olanlara göre daha pratik sonuçlar verebilmektedir.

1.6.2.4. Dolgu kompozitler

Üç boyutlu özelliklere sahip matris malzemesi ile dolgu maddesinin bir araya getirilmesi ile elde edilen yapılardır. Matris malzemesi değişik geometrik şekillere sahip şebeke ve iskelet yapısına sahiptir. Organik, metalik veya seramik esaslı dolgu maddeleri düzgün petek veya süngere benzeyen gözenekli yapıların içeresinde olmaları mümkün olabilmektedir. Böyle yapıların üretimi için kimyasal reaksiyon vermeyen ve birbiri içerisinde çözünmeyen malzemelerin belirlenmesi gerekmektedir.

1.6.2.5. Tabaka yapılı kompozitler

En az iki tabakanın, farklı özellikteki kombinasyonlarının bir araya getirilmesi ile oluşmaktadırlar. Tabakalanmış kompozitleri farklı kombinasyonlarla üretmek mümkündür. Bununla birlikte, yumuşak malzemelerin sert malzemeler ile birleştirilerek aşınma direnci ve sertliği, tek tabakalı olarak değişik fiber oryantasyon açılarıyla birleştirilerek yük taşıma özellikleri çok yönlü olarak geliştirmek mümkündür.

1.7. Kompozit Malzeme Yapımında Kullanılan Parametreler

1.7.1. Matris malzemeleri

Matris malzemelerin genel olarak kompozit yapılarda üç temel fonksiyonu vardır. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür; malzeme üzerine gelen yükü fiberlere dağıtmak, elyafları çevresel şartlardan korumak ve fiberleri bir arada tutmaktır. Başlangıçta bir matris malzemesi düşük viskoziteye sahip iken, fiberlere infüzyonu sağlandığında sağlam ve istenilen şekilde katı forma dönüşmektedir.

Matris malzemelerin mekanik özellikleri, kompozit yapılarda yükü taşıyan fiberlerin üstün özelliklerini yerine getirebilmelerini sağlamaları açısından rolleri çok büyüktür. Örneğin, bir elyaf demeti, matris malzemesi olmadan yüke maruz bırakıldığında yük, tüm fiberler tarafından taşınması mümkün olmamakla birlikte yük birkaç elyaf tarafından taşınır. Ama yükün tüm fiberler tarafından eşit olarak dağılımı ise ancak matrisin varlığı ile mümkün olabilmektedir. Kesme yüküne maruz bir malzemenin gerilmeye dayanımı matrisin yüksek kesme mukavemet özelliklerinin yanında matris ile fiber arasında iyi bir yapışma olmasıyla mümkündür. Fiberlerin farklı doğrultularda, matris ile fiberlerin arasında ki bağ kuvvetlerinin ve matrisin mekanik özellikleri kompozit malzemelerin mukavemetini belirleyici en önemli parametrelerdir. Fiberlere göre daha zayıf ve esnek olan matris malzemelerinin bu özelliklerinden dolayı kullanılacak yapılarda dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matris ile fiberler arasındaki bağ kuvveti ile matrisin kesme mukavemeti normal değerlerinin üstünde ise yapıda oluşabilecek bir çatlağın ilerlemesi yön değiştirmeden mümkündür. Bu durumdan kaynaklı kompozit yapılar, genellikle gevrek bir malzeme gibi davrandıklarından kopma yüzeyleri parlak ve temiz bir yapı gibi olur. Kompozit yapıların zayıflamasına sebep olan bağ mukavemeti çok düşük ise fiberler, boşluktaki bir fiber demeti gibi davranarak yapının zayıflamasına sebep olmaktadır. Eğer bağ mukavemeti orta seviyelerde ise yapıda başlayan enlenmesi doğrultusunda oluşan bir çatlak fiber doğrultusunda veya matris/fiber ara yüzeyine

dönük ilerleyebilir. Neticede, sünek malzemelerin kopması kompozit yapılarda lifli bir yüzey gibi davranabilmektedir.

1.7.2. Reçineler ve özellikleri

1.7.2.1. Epoksi reçineler

Epoksi reçineleri epiklorhidridin ile birlikte bifenol A reaksiyon ürünü olup sertleştirici malzeme ile karıştırıldığında sertleşmeleri, fırın (70-90°C) yardımıyla veya oda sıcaklığının etkisi ile oluşup daha sonra plastik görünüm elde edilmektedir. Bu tür reçinelerin önemli bazı özellikleri; kimyasal, ısı ve elektrik dirençleri ile sıvı, katı ve sıvı viskoz durumlarında bulanabilmeleri, hava şartlarından etkilenmemeleri ve mekanik özelliklerinin yüksek olmalarıdır. Ayrıca, bu tür reçineler oda sıcaklığında 24 ay depolanabilme özelliğine sahiptirler.

1.7.2.2. Polyesterler

Glikol, gliserin ve dibazik asitler gibi polialkollerin bir araya gelerek, oluşan tepkime sonucunda meydana gelirler. Sıvı polyesterlerin kür edilmeleri, hızlandırıcı ve katalist yardımıyla yapılır. Polyesterlerin, hava şartlarına ve sert kimyasal maddelere karşı dirençleri istenilen seviyede olup darbe dayanımlarına karşı etkili olan türleri ise katı polyesterlerdir.

1.7.2.3. Üretan reçineler

Oda sıcaklığında, bir polialkol ile bir izosiyanatın bir araya gelerek oluşturdukları katılma polimerizasyonu ile elde edilen üretanlar, köpük lastik üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca, bu tür reçinelerin kimyasal maddelere karşı dirençleri çok yüksektir.

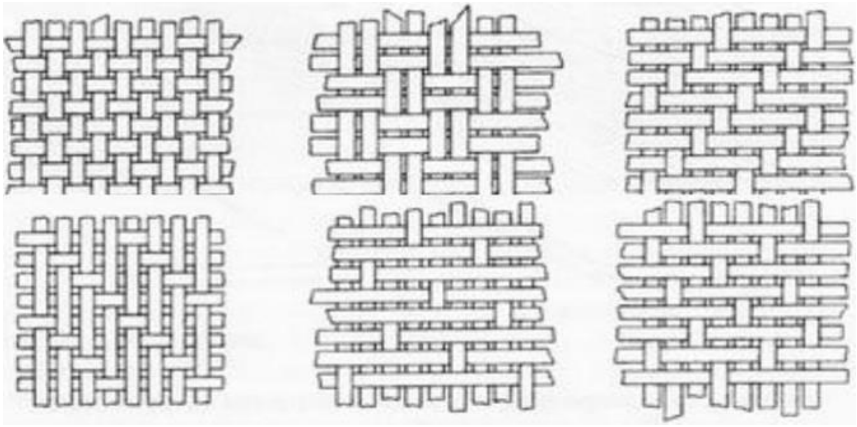
1.7.2.4. Fenolik reçineler

Fenol formaldehit kondenzasyon hammaddesinin türevlerinde kullanabilen ve bu hammaddelerin bir ürünü olan fenolik reçineler katı ve sıvı türlere sahiptirler. Ülkemizde genel olarak sıvı türleri daha çok üretilmektedir.

1.7.3. Elyaf çeşitleri ve özellikleri

Takviye malzemesi olarak kullanılan elyaflar, matris malzemesi içerisinde yer alarak kompozit yapıların temel mukavemet elemanlarıdır. Yüksek elastisite modül değerlerinin yanı sıra yüksek sertlik ve düşük yoğunluğa sahip olan elyaflar, kimyasal korozyona karşı olan dirençleri de yüksektir. Elyaf türlerinden biri olan sürekli elyaflar, en önemli takviye malzemesi olarak günümüzde kompozit yapılarda sıklıkla kullanılmaktadır. Modern kompozitlerin yapımında çok önemli yer tutan cam elyaflar da aynı zamanda teknolojik yapılarda kullanılan en eski türlerdir. Son yıllarda, gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan elyaf türleri ise aramid, silisyüm karbür, karbon ve bor elyaf tipleridir. Büyük kütlesel yapılara kıyasla elyafların yapısal hata olasılıklarının düşük seviyelere inmesinde, elyafların ince çaplı olarak üretilmelerinin etkisi büyüktür. Bu özelliklerinden dolayı elyaflar, üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca elyaflar, Şekil 1.3.'teki gibi değişik dokuma türlerine sahiptirler. Bununla birlikte yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olan elyafların, üstün özellikler göstermelerinin başlıca nedenleri arasında aşağıda verilen özelliklerin payı da büyüktür.

1. Tane yapılarının küçük olmaları, üstün mikroyapısal özellikler göstermeleri ve küçük çaplarda üretilmeleridir.
2. Fiberlere iletilen yük miktarının matris malzeme tarafından artırılarak boy/çap oranına bağlı olarak değişebilmesidir.
3. Elastisite modül değerlerinin yüksek değerlerde olmasıdır.



Şekil 1.3. Elyaf dokuma çeşitleri

1.7.3.1. Cam elyaf

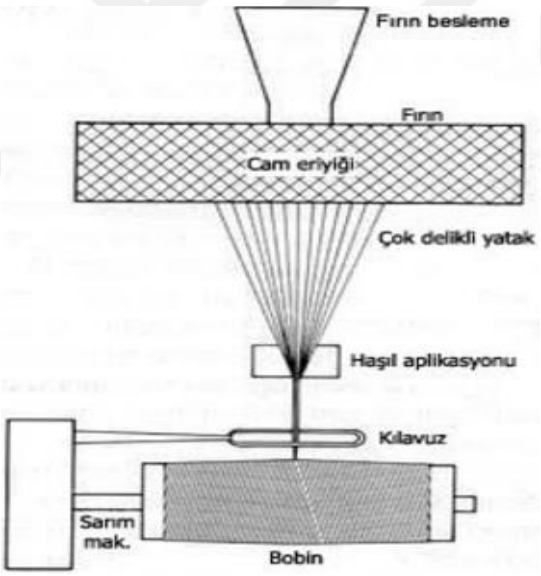
Cam elyaflar, yüksek saflıkta olan kuartz camından sıradan bir şişe camına kadar pek çok şekillerde üretilmektedirler. Aynı zamanda, yapıları polimerik olmakla birlikte amorf bir malzeme şeklindedir. Molekül yapıları, üç boyutlu olacak şekilde dört oksijen atomu ile birlikte bir silisyum atomuyla çevrilmiştir. Hafif olmasıyla birlikte metalik olmayan silisyum malzemeler, doğada çok sık olarak oksijen ile beraber silis (SiO_2) şeklinde bulunabilmektedir. Cam elyaf elde etmek için silis kumu, kuru halde 1260 ºC'ye kadar katkı maddeleri ile birlikte ısıtılır ve daha sonra soğutma işleminden geçirilerek sert bir yapı malzemesi olarak elde edilir. Şekil 1.4.'de cam elyaf örneği ve Şekil 1.5.'te ise cam elyaf üretim şekli gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Elyaf yapılarda kullanılan cam lifleri

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

1. Isıl dirençleri düşük olmakla birlikte, yüksek sıcaklıkta yumuşarlar fakat yanmazlar.
2. Kimyasal maddelere karşı dirençleri yüksektir.
3. Çekme mukavemetleri yüksek olmakla birlikte birim ağırlığa düşen mukavemet değerleri çeliğinkinden daha yüksektir.
4. Nemi absorbe etmezler ancak bu tür kompozit yapılarda cam elyaf ile matris arasında nemden kaynaklı bir çözülme gerçekleşebilir. Çözülme etkisi özel elyaf kaplama işlemleri ile ortadan kaldırmak mümkündür.
5. Elektriği iletmezler. Elektriksel yalıtımın gerektirdiği durumlarda veya ortamlarda, cam elyaf takviyeli kompozit yapıların kullanılmasına imkan tanınır.



Şekil 1.5. Cam elyaf üretimi (Phillips, 1989)

Çeşitli katkı maddeleri, cam elyaf üretiminde silis kumuna eklendiğinde eklenen malzemelerin etkisi ile yapı farklı özellikler kazanabilir. Cam elyaf türlerini kısaca dört başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar;

A (Alkali) Camı: Yüksek dozda alkali içeren bir cam elyaf çeşidi olup bu etkilerinden kaynaklı elektriksel yalıtkan özellikleri zayıftır. En yaygın cam tipi olmakla birlikte kimyasal dirençleri yüksektir.

S (Mukavemet) Camı: Bu tür cam elyaf türlerin mukavemet değerleri yüksektir. Bununla birlikte E camına kıyasla çekme mukavemetleri % 33 daha fazladır. Ayrıca, yorulma dirençleri yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı uzay endüstrisinde, havacılık ve savunma sanayisinde daha çok tercih edilmektedirler. Epoksi ve plastik reçinelerle kullanımları çoktur.

C (Korozyon) Camı: Bu tür cam elyafların dirençleri kimyasal çözeltilere karşı çok yüksektir. Genellikle depolama tanklarında kullanılır.

E (Elektrik) Camı: Elektriksel yalıtkan özellikleri, düşük alkali oranlarından dolayı diğer türlere göre çok daha iyidir. Mukavemet değerleri istenilen sevidedir. Ayrıca, kompozit yapıların nemli ortamlarda kullanılanları genellikle E cam tipine sahip olanlardır.

Aşağıda cam elyaf türlerinin bazı mekanik özellikleri Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Cam elyafların çeşitli mekanik özellikleri (URL-1, 2018)

Özellikler	**Cam Elyaf Tipi**			
	A	**C**	**E**	**S**
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastisite Modülü (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme Mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl Genleşme Katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama Katsayısı (ºC)	727.0	749.0	841.0	970.0

Çizelge 1.2.'de cam elyafların türüne göre yüzde bileşim oranları yer almaktadır.

Çizelge 1.2. Çeşitli cam elyafların yüzde bileşim oranları (URL-2, 2018)

Katkı Malzemesi (%)	Cam Elyaf Tipi			
	A	C	E	S
SiO_2	72.0	64.4	52.4	64.4
Al_2O_3, Fe_2O_3	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na_2O, K_2O	14.2	9.6	0.8	0.3
B_2O_3	-	4.7	10.6	-

1.7.3.2. Karbon elyaf

Önemli bir lif türü olan karbon elyaflar, liflerin donatılması ile kompozit yapıların üretiminde kullanılırlar. Cam elyaflardan sonra gelişen ve onlardan daha yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Genellikle kristal yapılarda olup ilk kullanımları 1960'lı yıllara dayanan karbon fiberlerin, yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne karşın yoğunlukları düşüktürler. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilme özelliğine sahip olan bu tür elyafların mekanik özellikleri, üretimindeki son işlem sıcaklığına bağlı olarak önemli değişkenlikler gösterebilmektedirler. Şekil 1.6.'da elyaf yapımlarında kullanılan karbon elyafların lif şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Elyaf yapılarda kullanılan karbon lifi

Çizelge 1.3.'te çeşitli hammaddelerden üretilen karbon liflerin bazı özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 1.3. Çeşitli hammaddelerden elde edilmiş karbon liflerinin bazı mekanik özellikleri (Yaman ve ark., 2007)

Hammadde	**Tipi**	**Yoğunluk (mg/m^3)**	**Çekme dayanımı (GPa)**	**Elastisite modülü (GPa)**	**Uzama (%)**	**Elektriksel özdirenç (µOhm*m)**
Rayon	50S	1,67	1,9	390	0,5	10
	75S	1,82	2,5	520	0,5	---
Pan	T800	1,80	5,6	290	1,9	13
	M50	1,91	2,4	490	0,4	7,6
İzotropik katran	T101F	1,65	0,8	33	2,4	150
	T201F	1,57	0,7	33	2,1	50
Mezofaz katran	P25	1,90	1,4	160	0,9	13
	P120	2,18	2,2	830	0,3	2,2
Tek kristal grafit	---	2,25	---	1000	---	0,4

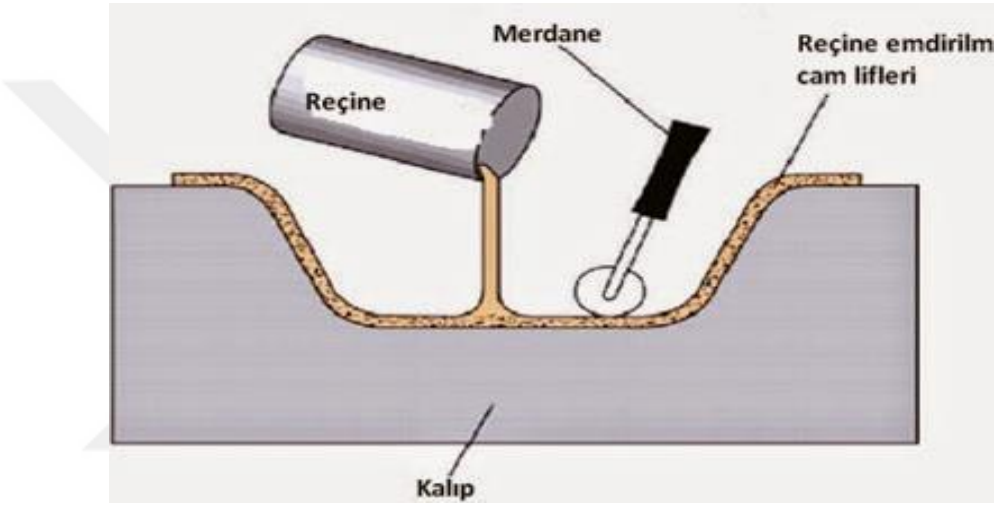
Karbon elyafların en belirgin özellikleri yüksek mukavemet sağlamaları, düşük yoğunluk ve tokluk değerleridir (Yaman ve ark., 2007). Karbon elyafların sürünme mukavemetleri yüksektir ve nemden etkilenmezler. Ayrıca, yorulma mukavemetleri ve aşınma özellikleri de istenilen seviyededir. Bu özelliklerinden dolayı karbon elyaflar, savunma sanayisinde ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çeşitli plastik matrislerle kullanılan karbon elyaflar, genel olarak epoksi reçinelerle kullanılmaktadır. Bunun yanında magnezyum ve alüminyum gibi metal matrislerlede kullanımları mevcuttur.

1.8. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

1.8.1. Elle yatırma yöntemi

Takviye kumaşları kırpılmış veya dokuma elyaflar şeklinde olup, kalıp üzerine el yardımıyla yatırıldıktan sonra üzerine elyaf tabakalarına emdirilmesi yoluyla sıvı

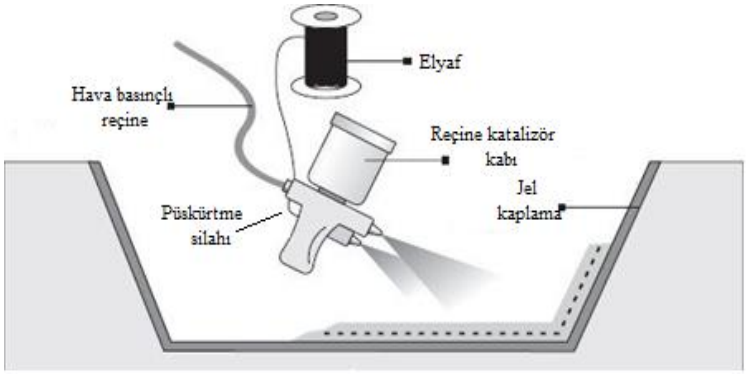
reçine infüzyonu sağlanır. Kalıp ilk başta temizleme işleminden geçirildikten sonra jelkot sürülür ve sürülen jelkot sertleştikten sonra elyaflar yatırılır. Reçine işlemi kompozit malzeme hazır olması için en son fazda sürülür. Elle yatırma yönteminde en önemli husus reçinenin tüm elyaflara iyi nüfuz etmesidir. Elle yatırma yönteminde genellikle epoksi ve polyester ile beraber, fenolik reçineler ve vinil ester de kullanılmaktadır. Elle yatırma yöntemi genellikle düşük sayıdaki üretimler için tercih edilmekte olup ayrıca yoğun işçilik gerektirmektedir. Şekil 1.7.'de elle yatırma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Elle yatırma yöntemi (Topal, 2014)

1.8.2. Püskürtme yöntemi

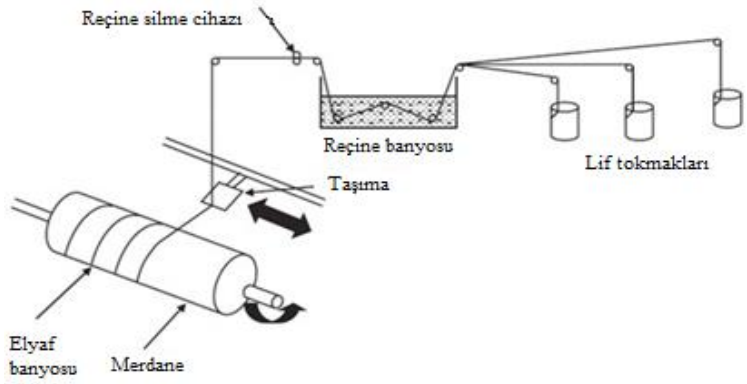
Elle yatırma tekniğinin kısmen makineleşmiş halidir denilebilir. İçine sertleştirici eklenmiş reçine ile birlikte kırpılmış halde olan elyaflar kalıp yüzeyine özel bir tabanca yardımıyla püskürtülmesi işlemidir. Tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız hareket eden kırpıcı sayesinde elyafın kırpılma işlemi yapılmaktadır. Bir rulo aparatı ile yüzeyin püskürtmeden sonra düzeltilmesi ile kompozit malzeme hazır hale getirilir. Şekil 1.8.'de elle püskürtme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Püskürtme yöntemi (Vatangül, 2008)

1.8.3. Elyaf sarma yöntemi

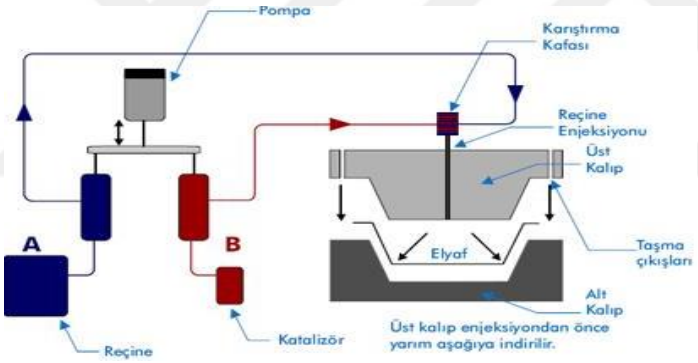
Özel geometrik şekillere sahip ürünlerin, seri üretimi için uygun bir yöntem şeklidir. Bu yöntem kısaca, reçine tarafından ıslatılan sürekli elyaf liflerinin bir makara yardımıyla çekilmesi ile kalıbın üzerine sarılması işlemidir. Yöntem ile farklı mekanik özelliklere sahip ürünler, sürekli elyaf liflerinin farklı açılarla kalıba sarmasıyla elde edilebilmektedir. Elyaf katmanlarının yeterli sayıda sarılmasından sonra ürün sertleşip ardından döner kalıptan ayrılmaktadır. Bu yöntemle daha çok dairesel basınç tankları, silindirik borular, uçak su tankları, araba şaftları, yat direkleri gibi ürünler üretmek mümkündür. Şekil 1.9.'da elyaf sarma düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Elyaf sarma düzeneği (Topal, 2014)

1.8.4. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi

Bu yöntem, genellikle iki yüzeyinde jel kotlu veya jel kotsuz olarak düzgün istenilen ürünlerin üretilmesinde kullanılır. Bu yöntemde kumaş, keçe ve bu ikisinin kombinasyonları olan takviye malzemeleri kullanılır. İlk önce kalıp boşluğu dolacak şekilde takviye malzemesi kalıba yerleştirilir ve daha sonra kalıp kapatılır. Elyafların sürüklenmesini engellemek için matris içinde geç çözünen reçineler, kalıp içinde basınç yardımıyla reçine kalıbına pompalanır. En çok 80 ºC' ye kadar ısıtılmış, ılık ve soğuk kaplarda, matris enjeksiyonu uygulanması yapılabilir. Reçinenin elyaf içlerine iyi dağılım gösterebilmesi ve kaplama içerindeki havanın dışarı çıkarılabilmesi için vakum hattı kullanılıp zararlı gazlar azaltılıp gözeneksiz bir ürün elde edilmesi sağlanır (Özen, 2017). Ayrıca bu yöntemle karmaşık ürünlerde üretmek mümkündür. Şekil 1.10.'da RTM yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.

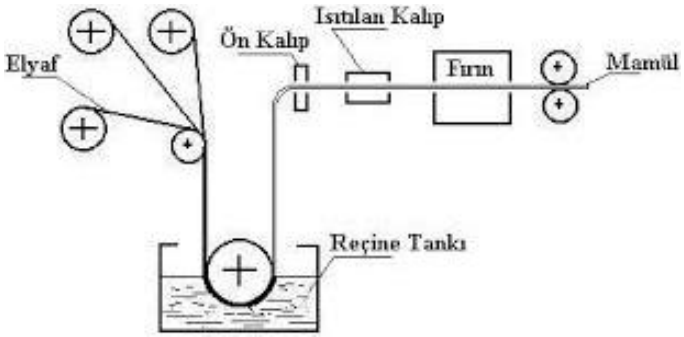


Şekil 1.10. RTM yönteminin şematik gösterimi

1.8.5. Profil çekme yöntemi

Bu yöntem ile sürekli sabit kesitli profil kompozitlerin üretiminin yapıldığı, maliyetlerinin düşük olduğu bir seri üretim şeklidir. Reçine banyosundan geçirilen takviye malzemeleri, 120-150 ºC' ye kadar ısıtılan kalıplardan geçirilerek sertleşmeye bırakılır. Genellikle bu yöntemde kullanılan kalıplar, kromla kaplanmış parlak çelikten imal edilmektedirler. Ayrıca, takviye yönünde yüksek mukavemet değerleri elde etmek için sürekli elyaflar tercih edilmekte ve özel dokumalar

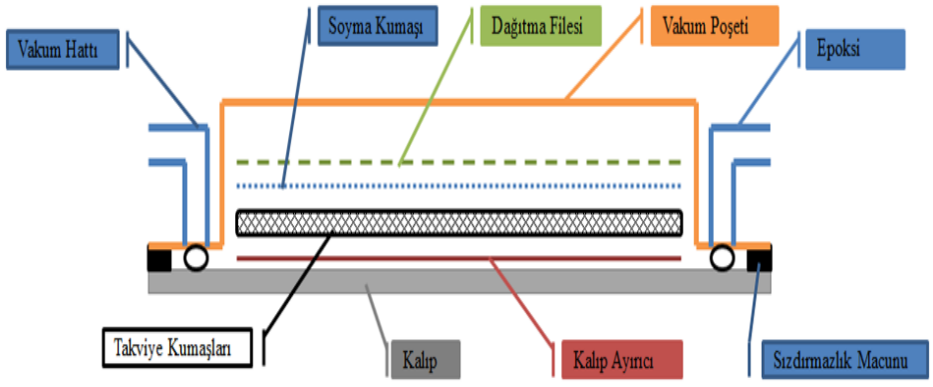
kullanılarak enine yükler karşılanmaktadır. Şekil 1.11'de profil çekme yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Profil çekme yöntemi (Topal, 2014)

1.8.6. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi

Bu yöntemde ilk olarak, takviye malzemeleri bir kalıba yerleştirilir daha sonra vakum torbası en üste gelecek şekilde yerleştirilerek vakum hattı oluşturulur. Kalıp içindeki hava 1 bar basınçla vakumlandıktan sonra reçinenin infüzyonu sağlanıp daha sonra kürlenmeye bırakılır. Bu yöntem genellikle yatırma teknikleri ve elyaf sarma yöntemleri ile uygulanılır. Ayrıca, bu yöntem kompozit malzemelerin tamir işlemlerinde de kullanılmaktadır. Şekil 1.12.'de vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.12. Vakum destekli reçine infüzyon yönteminin şematik gösterimi (Özen, 2017)

1.8.7. Otoklav yöntemi

Bu yöntemde, vakum destekli reçine infüzyon yöntemindeki gibi vakum torbası yardımıyla elyaf kumaşlara basınç uygulamak mümkündür. Ancak, dışsal basınç ile düzenli ve kontrol edilebilir bir basınç uygulanabilir. Yöntemde, en çok tercih edilen metot ise kapta bulunan kompozit yapıya dıştan sıkıştırılmış gazın verilmesidir. Ayrıca, elyaf/reçine oranı artırılarak ve malzeme içinde bulunan hava boşluklarının tamamen ortadan kaldırılması ile termoset kompozit yapıların performansları artırılabilir. Bu verimi elde etmek için malzeme yüksek basınç ve ısıya maruz bırakılarak sağlanır.

Otoklav cihazı; ısının, basıncın ve emişin kontrolünün sağlandığı bir kapla birlikte kullanılmaktadır. Bu nedenle, yüksek kalitelerde kompozit yapılar elde etmek için kürlenme durumlarının kontrolü tam olarak sağlanır. Fakat bu yöntem, diğer yöntemlere nazaran daha uzun süreli olmakla birlikte maliyetleri yüksektir. Şekil 1.13.'de otoklav cihazı gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Kompozit üretiminde kullanılan otoklav makinesi (Vatangül, 2008)

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Karama ve ark. (2003), tabakalı kompozit yapıların; burulma, burkulma ve serbest titreşim gibi mekanik davranışlarını incelemek için yeni çok tabakalı kompozit yapı modeli üzerinde incelemeler yapmışlardır. Bir durum çalışması olarak lamine kompozit kirişlerin, mekanik davranışı hem statik hem de dinamik açıdan araştırılmıştır. Sonuç olarak, bu yeni modelin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlara kıyasla daha önceki modellerden daha hassas sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir.

Aslan ve Şahin (2008), delaminasyon boyutunun, kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri ve çok büyük delaminasyonlar ile e-cam/epoksi kompozit plakaların bası yükü altındaki etkisini incelemişlerdir. Delaminasyonlu ve delaminasyon olmaksızın çapraz katmanlı lamine levhalar, el yatırma tekniği kullanılarak üretilmiştir. Deneysel burkulma yükleri, plakaların her iki tarafı ankastre olacak şekilde elde edilmiş ve daha sonra sonuçlar, sonlu elemanlar yöntemi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, en uzun ve yüzeye yakın delaminasyon boyutunun kompozit plakaların burkulma yükünü etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Esfahani ve ark. (2010), delaminasyon yerinin kritik burkulma yükü ve hibrid kompozit kirişlerin burkulması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Delamine kompozit kirişlerin burkulma yükünü belirlemek için deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, delaminasyon pozisyonu ve yerinin burkulma modunu ve kritik burkulma yükünü etkileyebileceğini öngörmüşlerdir. Ayrıca, delaminasyon yeri dış yüzeye yaklaşarak numunenin burkulma yükünü düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Burkulma işlemleri, sonlu elemanlar programı olan ANSYS ile nümerik analizi yapılmış olup kritik burkulma yükleri ilgili deney sonuçları ile doğrulanmıştır.

Ghasemnejad ve ark. (2011), rüzgar türbinlerinde kullanılan hibrid kompozit malzemelerin, düşük hız etkilerinden kaynaklı meydana gelen burkulmanın tabakalar

arasında meydana getirdiği hasarları incelemişlerdir. Çalışmalarında, takviye malzemesi olarak doğal keten ipliklerinden oluşan bileşenleri kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlardan, 0º açı yönelimli tabakalı yapılarda delaminasyon hatası oluşmadığını, 90º açı yönelimli tabakalı yapılarda ise genel çökme, burkulma sonrası testlerde delaminasyon kopmasına neden olmadığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, çok tabakalı kompozit bir kirişin burkulma işlemi sonlu elemanlar yazılımı ANSYS kullanılarak nümerik analizi yapılmış olup sonuçlar ilgili deney sonuçları ile büyük ölçüde doğrulanmıştır.

Gençoğlu (2011), takviye malzemesi olarak karbon, grafit ve karbon/grafit fiberden oluşan polyester matristen üretilmiş tabakalı kompozit plakaların, simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimine sahip olan farklı delik geometrileri ve aynı zamanda farklı kombinasyon açılarının burkulma analizlerini incelemiştir. Analizler için ANSYS11.0 sonlu elamanlar programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda veriler birbirleriyle kıyaslanarak grafikler halinde sunulmuştur. Sonuç olarak, simetrik tabaka dizilimine sahip levhaların burkulma yüklerinin, anti simetrik tabakalara göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Baba (2013), sekiz tabakalı kompozit plakaların delaminasyon durumlarındaki burkulma davranışlarını incelemiştir. Farklı iki sınır koşulu için kompozit plakaların burkulma yüklerini belirlemiştir. İlk önce, hasarsız tabakalı kompozit plakaların burkulma yükleri belirlenerek daha sonra analiz sonuçlarıyla gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak, deleminasyon çapı artıkça kritik burkulma yükünde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Yeter (2013), takviye malzemesi olarak aramid, karbon ve cam elyaflarını kullanarak farklı kombinasyonlardan oluşan tabakalı hibrit kompozit plakaları vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanarak üretmiştir. Bu farklı kombinasyonlara sahip plakaların, burkulma ve yanal burkulma davranışlarını incelemiş ve sonuçları karşılaştırmıştır. Aynı zamanda ANSYS sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak nümerik çalışmalar da yapmış olup plakanın en/boy oranı, kalınlık, kesit tipi ve konumunun burkulma ve yanal burkulma yüklerine etkisini incelemiştir.

Heidari-rarani ve ark. (2014), farklı dizilimlere sahip ince katmanlı kompozitlerin kritik burkulma yükü ve kusurlu modları ile beraber burkulma davranışlarını incelemek için analitik ve sonlu eleman yöntemlerinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca, üretmiş oldukları kare kompozit plakaların analitik ve sayısal sonuçlarını doğrulamak için, [0° / 90°] , [± 30°] ve [± 45°] 'lik katmanları tek eksenli burkulma yükü altında test etmişlerdir. Sonuç olarak, sonlu eleman analizinin deneylere kıyasla doğrulukları ile çok yönlü laminatların kritik burkulma yüklerini kesin bir doğrulukta gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Topal (2014), cam elyaf takviyeli simetrik sekiz katmanlı elle yatırma tekniği ile imal edilen tabakalı kompozit plakalarda, delik çapının burkulmaya etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Plakaların, kritik burkulma yükleri her iki tarafı ankastre olacak şekilde elde edilmiş ve sayısal analizden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Sonuçlardan elde edilen veriler ışığında, delik çapı değeri ve farklı fiber oryantasyonlarının kritik yükleri etkilediği, kritik burkulma yüklerinde önemli bir düşüş meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Emam ve Eltaher (2016), hidro-termal ortamlarda kompozit kirişlerin burkulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Hem sıcaklık değişimi hem de nem emiliminden dolayı serbest genleşme durumunu dikkate almışlardır. Ayrıca, kritik burkulma yükü, sıcaklık ve nem durumlarını ayrı ayrı hesaplamışlardır. Elde edilen veriler literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sonuç olarak, sıcaklık değişiminin burkulma yükünü önemli ölçüde azalttığını ve burkulma sonrası genliğini ise arttırdığı gözlemlemişlerdir.

Aslan ve Daricik (2016), çoklu delaminasyonların, e-cam/epoksi kompozitlerin basma, çekme, eğilme dayanımı ve kritik burkulma yükü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı boyutlardaki delaminasyonlar, el yatırması ve sıcak pres kullanılarak dörtlü [45/0/−45/90] yönelimli cam/epoksi kompozit plakalı yapılara uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, çoklu büyük tabakaların varlığı sıkıştırma, eğilme dayanımı ve kritik burkulma yükünü önemli ölçüde etkilemekte

olduğunu, gerilme mukavemetinin ise çoklu tabakalara ayırma ile daha az etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Feng ve ark. (2016), darbe hasarı pozisyonun eksenel sıkıştırma altındaki kompozit panellerin burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla, üç farklı darbe hasarı bölgesi oluşturulmuş ve darbe hasarı etkisini elde etmek için hem hasarlı hem hasarsız numuneler yardımıyla burkulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, dört yarı dalga şeklindeki hasarın her iki numune tipinde burkulma meydana getirmediği, dış kabuk bölgesinde ise sadece yerel burkulma meydana getirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, hasarlı numunelerin çökme yükleri, hasarsız numunelere kıyasla maksimum %10'luk bir düşüş ile darbe durumlarına göre farklı ölçülerde azalttığını gözlemlenmiştir.

Juhasz ve Szekrenyes (2017), delaminasyon varlığının yapılarda kritik burkulma yüküne etkisini incelemişlerdir. Numuneler, tek yönlü olarak ve plakalar enine delaminasyonlu olacak şekilde elde edilmiştir. Sonuç olarak, delaminasyon ve plaka uzunluk oranının aynı olduğu ve iki kenarın serbest olduğu tüm plaka geometrileri için burkulma yük eğrilerinin geçerli olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, elde ettikleri bu normlu eğrileri sadece plakanın genişlik/uzunluk oranı sabit tutulduğunda geçerli olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kısa ve ark. (2017), aramid elyaf takviyeli kompozit plakaları farklı çevresel etkilere maruz bırakarak, kuru kayma durumlarında meydana gelen aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Numuneler; 10N, 20N ve 30N'luk yüklerin etkisine bırakılmadan önce 100 ve 200 gün periyotlarla çevresel etkilere maruz bırakılarak aşınma durumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan hareketle malzemelerde yüzde aşınma durumlarında artış gözlemlenirken, sürtünme katsayılarında ise azalma meydana geldiği gözlemlemişlerdir.

Rajesh ve Pitchaimani (2017), eksenel sıkıştırma yükünün, doğal elyaf takviyeli polimer kompozit kirişlerde burkulma ve serbest titreşim özellikleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deney sonuçlarından elde edilen

veriler ışığında, burkulma dayanımının kompozit malzemede elyaf tabakasının artması ile arttığı, kumaşın dokuma yapısının kompozit malzemenin burkulma mukavemetini etkilediği gözlemlemişlerdir. Ayrıca, serbest titreşim frekansı ön burkulma bölgesinde sönümleme faktörü ile artarken, eksenel sıkıştırma yükündeki artışla azaldığını öngörmüşlerdir.

Shen ve ark. (2017), grafin ile güçlendirilmiş kompozit lamine levhaların burkulma sonrası davranışını incelemişlerdir. Plakaları, tek eksenli sıkıştırmaya maruz olarak ve termal bir ortama bırakmışlardır. Farklı termal ortam koşullarında kusurlu ve kusursuz olacak şekilde, geometrik olarak orta düzlemli simetrik lamine levhalar sıkıştırılarak burkulma davranışları elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç verilerine göre, burkulma yükleri grafinin işlevsel olarak derecelendirilmiş dağılımı ile arttırılabileceğini gözlemlemişlerdir.

Jeyaprakash ve ark. (2018), karbon fiber takviyeli plastiklerin, burkulma durumları ile ilgili olarak deneysel ve numerik analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, delikli ve deliksiz olmak üzere burkulma yükünün analizi için farklı 2 geometrik şekil kullanmışlardır. Sonuç olarak, basma gerilmesinin, plakanın boy ve kalınlık oranındaki artışla arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, elde edilen sonuçlar malzeme modellemenin doğru bir şekilde yapılması ile sayısal modellemenin burkulma kuvvetini doğru olarak değerlendirmek için kullanılabileceğini öngörmüşlerdir.

Kumar ve ark. (2018), ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak burkulma yükünü tespit etmek için üç farklı tip sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş kompozit plakalardan yararlanmışlardır. Ayrıca, fiber oryantasyonun etkilerini, boy ve kalınlık oranlarını, sertleştirilmemiş plakalar için farklı kesme şekilleri, yükseklik etkisi, konumu, farklı tip sertleştirici sayıları gibi durumlar için analizler gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlardan, uzunluk oranın artması kritik burkulma yükünün artmasına ve kesme şekillerinin var olması ise kritik burkulmayı azalttığını gözlemlemişlerdir.

Wang ve ark. (2018), eğrisel lifli farklı rijitlik derecelerine sahip kompozit plakaların, burkulma ve burkulma sonrası davranışlarını incelemişler ve düz lifli sabit rijitlik derecesine sahip kompozit plakalar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, değişken rijitlik derecesine sahip kompozit yapının kritik burkulma yükünün, sabit rijitlik derecesine sahip kompozit yapılardan yaklaşık %3 daha yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir.

Öndürücü ve Kayıran (2019), farklı deniz sularının ve farklı istifleme dizilimlerinin hibrit kompozit plakaların burkulma davranışına olan etkilerini incelemişlerdir. Hibrit kompozit numuneleri, farklı zaman aralıklarında farklı ortamlarda tutmuşlardır. Bu amaçla, takviye malzemeleri olarak cam, karbon ve aramid elyaftan 12 katmanlı deney numuneleri üretmişlerdir. Ayrıca, deney numunelerini [(0/90)]s, [(30/−60)]s, [(45/−45)]s oryantasyon açılarına sahip olacak şekilde elde etmişlerdir. Sonuç olarak, oda sıcaklığına karadeniz ve akdeniz sularına belirli periyotlarla maruz bırakılan hibrit kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde düşüş gözlemlemişlerdir. En yüksek kritik burkulma yükü, istifleme dizisi [(0/90)]s olan karbon/aramid/cam hibrit numunelerde meydana gelirken, en düşük kritik burkulma yükü ise [(45/−45)]s istifleme dizilimlerine sahip karbon/aramid/cam elyaflı numunelerde meydana geldiği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmanın amacı; farklı çevresel şartlar etkisindeki kompozit plakaların burkulma davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemektir. Bu amaçla, çalışmada kullanılan tek yönlü cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler, ileri kompozit üretim yöntemlerinden biri olan Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi ile üretilmiştir.

Çalışmada; şebeke suyu, toprak, güneş ve deniz suyu olmak üzere dört farklı çevresel etkiye 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 0º, 45º, 90º oryantasyon açılarına sahip cam ve karbon elyaflı epoksi matrisli kompozit plakaların, burkulma deneyleri yapılıp çevresel şartların kritik burkulma yükleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Polimer Matrisli Kompozit Plakaların Üretimi

İlk olarak, Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi (VARTM) kullanılarak üretimleri yapılacak olan tek yönlü cam ve karbon elyaf takviyeli deney numunelerinin üretim aşamalarına geçmeden önce, tezgahın yüzeyi daha önceki üretimlerden kalma yağ, sızdırmazlık macunu veya kalıp ayırıcıyı delebilecek epoksi kalıntılarından temizlenerek kalıp yüzeyi hazır hale getirilmiştir. Tezgahın üzeri temizlik işleminden geçirildikten sonra plakalara yapışmayan ve epoksinin tezgaha yapışmasını engelleyen kalıp ayırıcı film Şekil 3.1.'deki gibi serilmiştir.



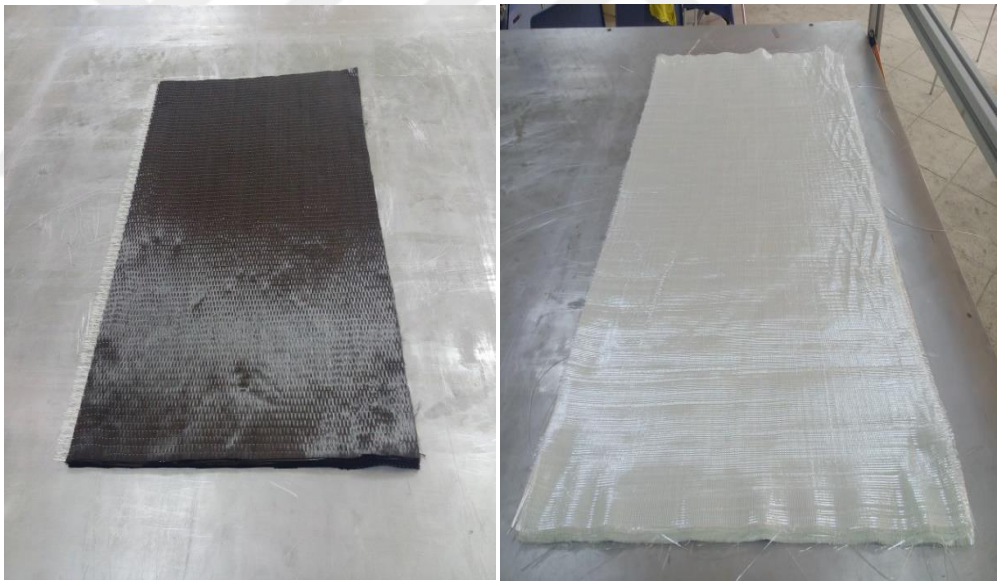
Şekil 3.1.Üretim tezgahı yüzeyinin temizlenerek kalıp ayırıcı filminin serilmesi

İkinci aşama olarak, kalıp ayırıcı filmin etrafı hava sızdırmazlığını sağlayan çift taraflı sızdırmazlık bandı ile Şekil 3.2.'deki gibi bantlanarak sızdırmazlığı sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Kalıp ayırıcı kenarlarının sızdırmazlık bandı ile bantlanması

Bu işlemden sonra kullanılacak takviye malzemeleri olan tek yönlü ve 300 gr/m^2 yoğunluğa sahip cam ve karbon elyaf kumaşları, plakaların tabaka sayısı 16 kat olacak şekilde Şekil 3.3.'teki gibi hazırlanmıştır.



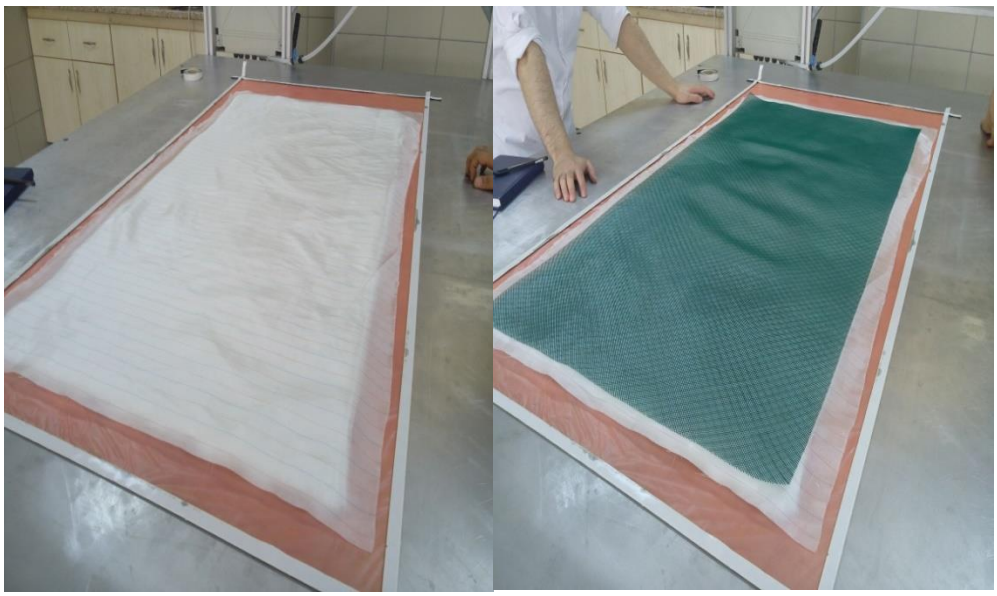
Şekil 3.3. Hazırlanan 16 kat cam ve karbon elyaf kumaşları

Kesim işlemleri bittikten sonra kesilen takviye kumaşları, kalıp ayırıcıyı ortalayacak şekilde Şekil 3.4.'deki gibi tezgaha yerleştirilmiştir. Ayrıca bu aşamada, plakaların istenilen düzlükte elde edilebilmesi için kumaşların kalıp ayırıcı üzerinde kaymaması sağlanmıştır.



Şekil 3.4. Cam ve karbon elyaf kumaşların kalıp ayırıcı üzerine yerleştirilmesi

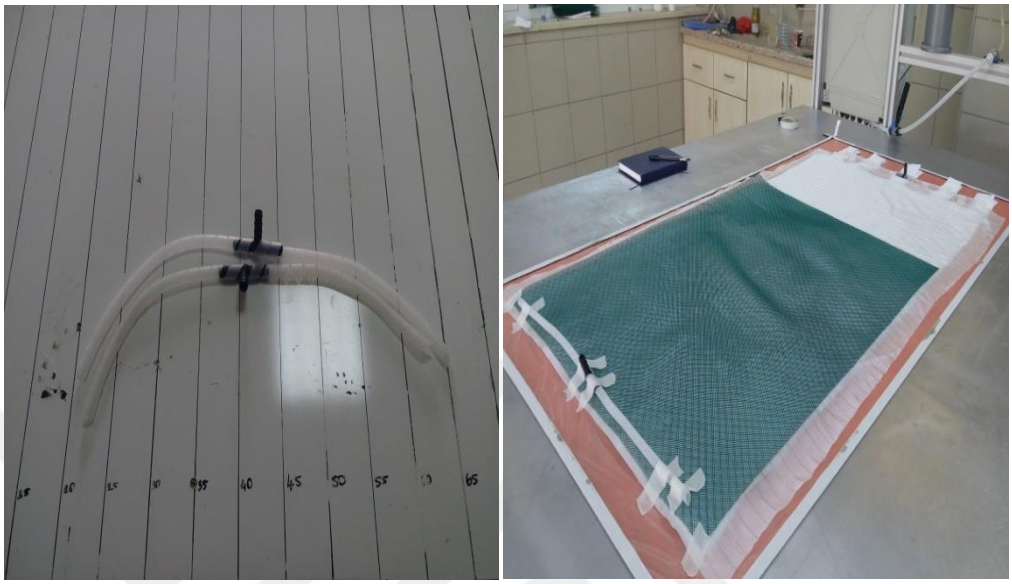
Plakanın infüzyon filesine yapışmasını engelleyen soyma kumaşı, cam ve karbon elyaflar ile aynı ebatlarda olacak şekilde Şekil 3.5.a.'daki gibi yerleştirilmiştir ve kaymaması için köşelerinden bantlanmıştır. Ardından, reçinenin homojen bir şekilde dağılmasını sağlayan infüzyon filesi Şekil 3.5.b.'deki gibi serilmiştir. Ayrıca, plakalarımızın katman sayısının fazla olması ve reçinenin infüzyon filesi üzerinde hızlı akmasından dolayı reçinenin tüm katmanlara infüzyonu sağlamak için infüzyon filesinden belli ebatlarda kesim yapılmıştır.



a) b)

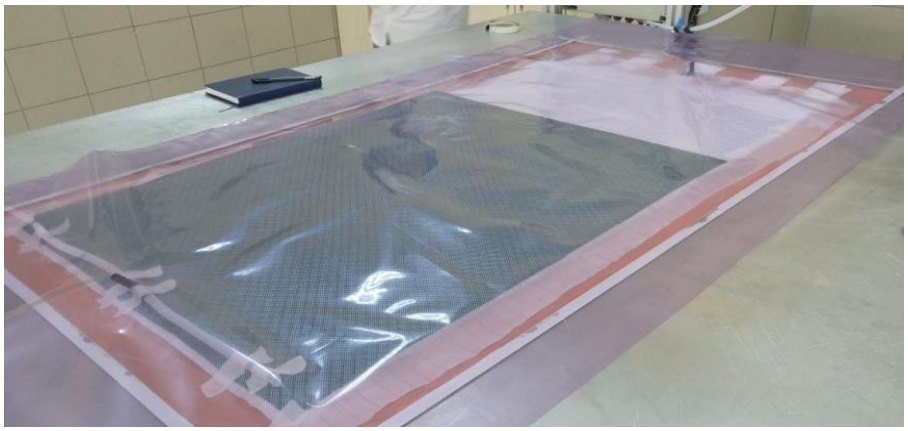
Şekil 3.5. a. Soyma kumaşının yerleştirilmesi b. İnfüzyon filesinin yerleştirilmesi

İnfüzyon filesi, soyma kumaşının üzerine düzgün bir şekilde yerleştirildikten sonra takviye malzemelerinin karşılıklı iki tarafına vakum hattı sağlanması için spiral hortumlar Şekil 3.6.'daki gibi yerleştirilmiştir.



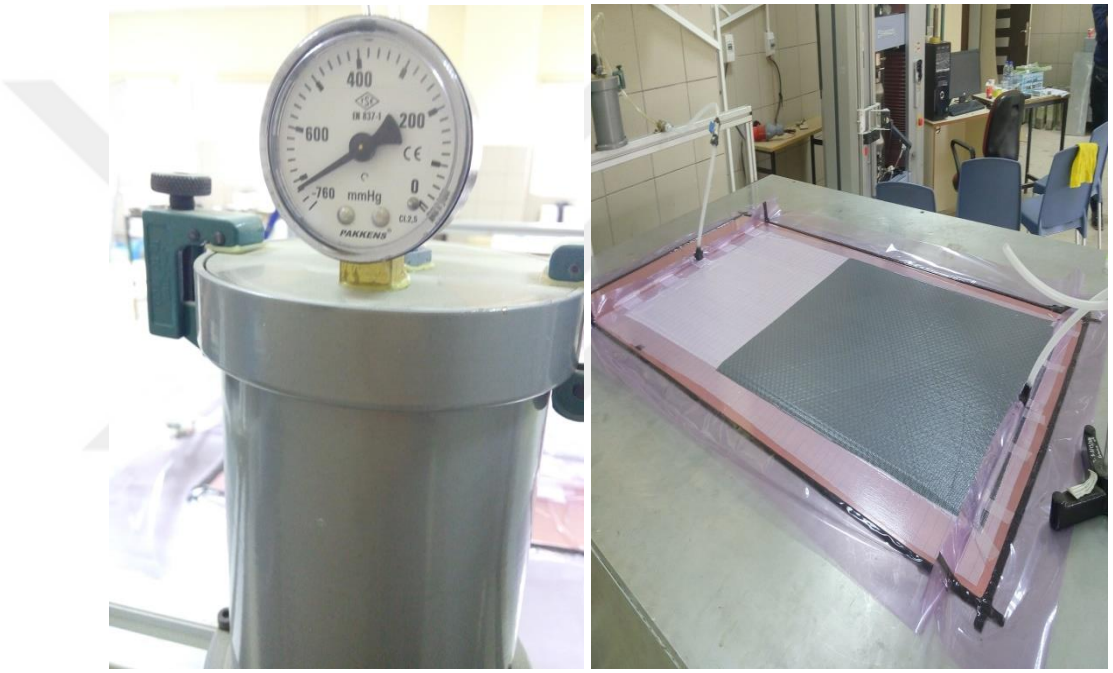
Şekil 3.6. Vakum hattının oluşturulması için spiral hortumların yerleştirilmesi

Bir sonraki aşamada ise hava sızdırmazlığı sağlanması için kullanılacak olan vakum torbası, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde yerleştirilmiştir ve en altta daha önce yerleştirmiş olduğumuz çift taraflı sızdırmazlık bandının üst kısmı ile Şekil 3.7.'deki gibi yapıştırılmıştır. Ayrıca, bantlarda oluşabilecek hava kaçışını önlemek için vakum poşeti sızdırmazlık bantlarına düzgün bir şekilde yapıştırılmıştır.



Şekil 3.7. Vakum poşetinin tüm yüzeyi kaplayacak şekilde yerleştirilmesi

Vakum poşetinin yerleştirilmesinden sonra sızdırmazlığı sağlamak için spiral ve infüzyon hortumu sızdırmazlık macunu yardımıyla birbirine bağlanmıştır. Bağlantı kurulduktan ve hortumların birbirine iyi bir şekilde bağlandıklarından emin olduktan sonra vakum pompası açılmış ve olası hava kaçağı Şekil 3.8.a.'daki basınç göstergesinden kontrol edilerek vakum hattı hazır hale getirilmiştir. Basınç göstergesinden, hava kaçağı tespit edilmiş ve sızdırmazlık macunu ile kapatılmıştır. Kaçak yerlerinin giderilmesi ile birlikte takviye malzemeleri reçine infüzyonuna Şekil 3.8.b.'deki gibi hazır hale getirilmiştir.



a) b)

Şekil 3.8. a. Basınç göstergesi b. Reçine infüzyonuna hazır vakum hattı

Vakum hattı, reçine infüzyonuna hazır hale getirilmesi ile kompozit plakaların üretiminde kullanılacak olan matris malzemeleri Çizelge 3.1.'de teknik özellikleri verilen F-1564 reçinesi ile F-3487 sertleştiricisidir.

Çizelge 3.1. Reçine ve sertleştiricinin teknik özellikleri

F 1564 Reçinesi			**F 3487 Sertleştiricisi**		
Yoğunluk (25°C)	1,15 g/cm^3		Yoğunluk (25 °C)	1 g/cm^3	
Vizkosite (25 °C)	1200-1400 mPa.s		Vizkosite (25 °C)	30-70 mPa.s	
Kürlenme	23 °C	2 gün	Kürlenme	23 °C	2 gün
	80 °C	4 saat		80 °C	4 saat
	100 °C	2 saat		100 °C	2 saat
Karışım oranı (Ağırlıkça)	F 1564	100	Karışım oranı (Ağırlıkça)	F 1564	100
	F 3487 Sertleştiricisi	34		F 3487 Sertleştiricisi	34
Görünüm	Berrak-sıvı		Görünüm	Berrak-sıvı	

Kullanılan sertleştirici ve reçine oranı kütlece 1/3 oranında karıştırılarak matris malzemesi (epoksi) Şekil 3.9.'daki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. Hazırlanan epoksi matrisi

Epoksi reçinesinin hazırlanması ile vakum pompasının kapasitesi göz önüne alınarak matris malzemesi, 1 atm basınç altında vakumlanarak tüm elyaf malzemelerinin üzerine ilerlemesi Şekil 3.10.a.'daki gibi sağlanmış ve homojen olarak infüzyonu Şekil 3.10.b.'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Burada, vakum ile infüzyon etmekteki amaç reçinenin kısa bir zaman içerisinde hedeflenen yere

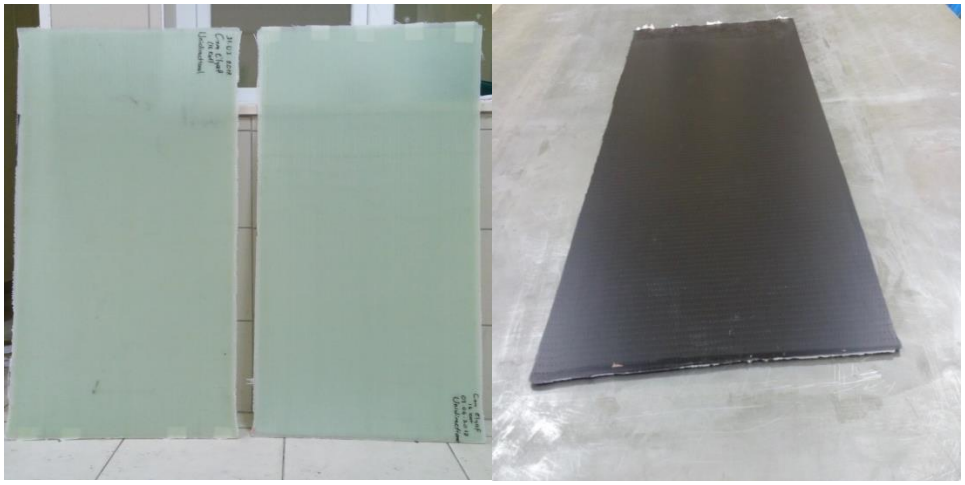
ulaşması ve parçanın düşük boşluk içeriğine sahip olacak şekilde üretilmesidir (Özen, 2017). Bu aşamada ayrıca, takviye malzemelerinin katmanları arasında reçinenin homojen bir şekilde emiliminin sağlanması için köşelerden katmanların ortasına peçete yerleştirilmiştir. Epoksi reçinesinin, tüm takviye malzemelerine (cam ve karbon elyaf) vakum desteği ile infüzyonu sağlanmasıyla tezgah, epoksi reçinenin optimum değeri olarak belirtilen 100 °C'de 2 saat boyunca kürlenmeye bırakılmış ve daha sonra bir gün süre ile soğumaya bırakılmıştır. Elde edilen cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar, çevresel şartlar için gerekli olan numune sayılarının ebatları göz önüne alınarak üretilmiştir.



a) b)

Şekil 3.10. a. Epoksi reçinesinin ilerleyişi b. Plakanın kürlenmeye hazır hale getirilmesi

100 °C' de 2 saat kürlenmeye ve 1 gün süre ile soğumaya bırakılan cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit plakaların, üzerlerinde yapışık halde bulunan vakum poşetleri ve soyma kumaşları spatula yardımıyla sökülmüştür. Üretilen plakaların son halleri Şekil 3.11.'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.11. Üretilen cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar

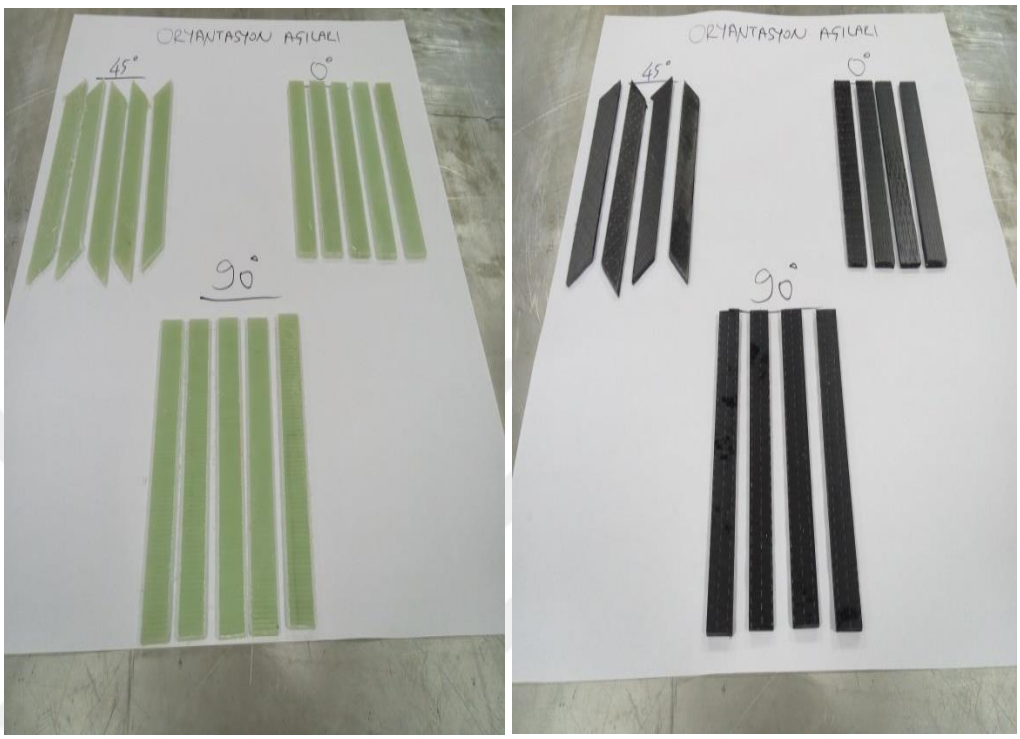
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilen 16 kat cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar, dört farklı çevresel şartlara (toprak, şebeke suyu, güneş ve deniz suyu) tabi tutularak çevresel şartların kritik burkulma yükü üzerindeki etkisi incelenecektir. Bu amaçla, burkulma deneylerine geçmeden önce üretilen plakalar, soğutma suyu ile çalışan ve 200 mm çapında 0.75 KW gücünde kesici testere ile boyutları 175x20x4.5 mm ebatlarında (Esfahani ve ark., 2010) ve 0º, 45º ve 90º' lik oryantasyon açılarına sahip olacak şekilde Şekil 3.12.'deki gibi kesme işlemine tabi tutulmuştur. Burada, soğutma suyu ile kesmekteki amaç hem elyafların yanmasını önlemek hem de testerenin ısınmasını engellemektir.



Şekil 3.12. Üretilen kompozit plakaların numune boyutlarında kesim aşaması

Kesim işlemleri yapılan plakalar, her bir oryantasyon açısı (0º, 45º ve 90º) için cam elyaf takviyeli numuneler için 5'er adet, karbon elyaf takviyeli numuneler için 4'er adet olacak şekilde deney numuneleri Şekil 3.13.'deki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 3.13. Hazırlanan 0º, 45º ve 90º açılı cam ve karbon elyaflı deney numuneleri

Deneylere hazır hale getirilmiş cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar, belirli periyotlarla çevresel şartlara maruz bırakılmadan önce her numune için kritik burkulma yük değerleri elde edilmiştir.

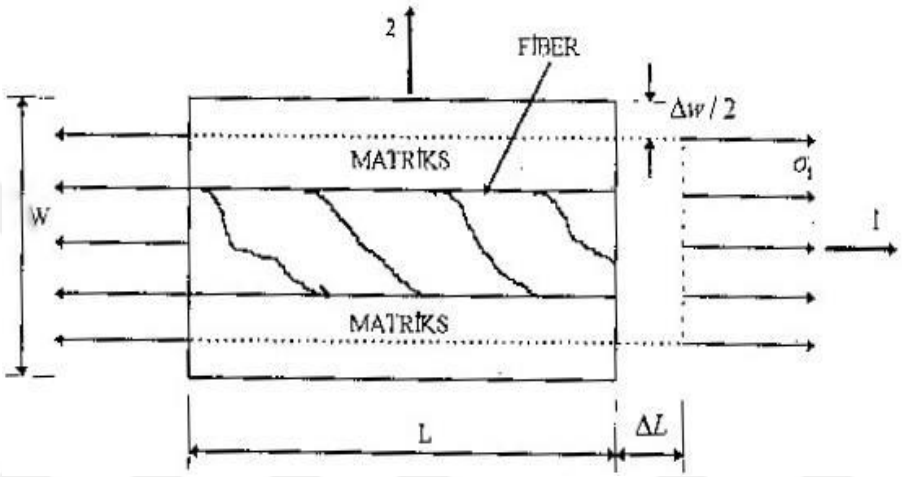
3.3. Kompozit Malzemelerde Hook Sabitlerinin Elde Edilmesi

Tek eksenli gerilme ve kayma testleri gibi basit testlerle ölçülebilen dikdörtgen şeklindeki kompozit plakaların kayma modülleri "*G*", Elastisite modülleri "*E*" ve Possion oranları "ν" şekillerinde simgelenir ve genel olarak malzemenin mühendislik sabitleri olarak kabul edilirler. Böylece, daha açık ve fiziksel anlam taşıyan mühendislik sabitleri ile ifade edilebilme imkanına sahip olurlar ve böylelikle rijitlik matrisi elemanları, matematiksel olarak ifade edildikleri değerden kurtulurlar.

3.3.1. E_1' in elde edilmesi

Eğer bir malzeme takviye doğrultusunda bir σ_1 gerilmesinin etkisinde Şekil 3.14.'teki gibi maruz bırakılırsa hem matris malzeme hem de lifler aynı miktarda ε_1 kadar uzuyor kabul edilir. O halde;

$$\sigma_1 = E_1\varepsilon_1,\ \sigma_f = E_f\varepsilon_1,\ \sigma_m = E_m\varepsilon_1 \tag{3.1}$$



Şekil 3.14. Kompozit malzemenin takviye doğrultusunda çekilmesi (Topal, 2014)

denklemlerini yazmak mümkündür. F çekme kuvvetini hesaplamak için malzeme kesit alanı A ve bu alan içerisindeki fiber alanın A_f, matriks alanının A_m olarak belirlenirse F çekme kuvveti aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F = \sigma_1 A = \sigma_f A_f = \sigma_m A_m \tag{3.2}$$

daha sonra bu eşitlikten E_1;

$$E_1 = \varepsilon_1 A = E_f\varepsilon_1 A_f = E_m\varepsilon_1 A_m$$

$$E_1 = (A_f/A)E_f + (A_m/A)E_m \tag{3.3}$$

olarak elde edilir. Lifin ve matrisin hacimsel konsantrasyonları ise;

$$V_f = A_f/A \, , V_m = A_m/A \, , \; V_f + V_m = 1 \tag{3.4}$$

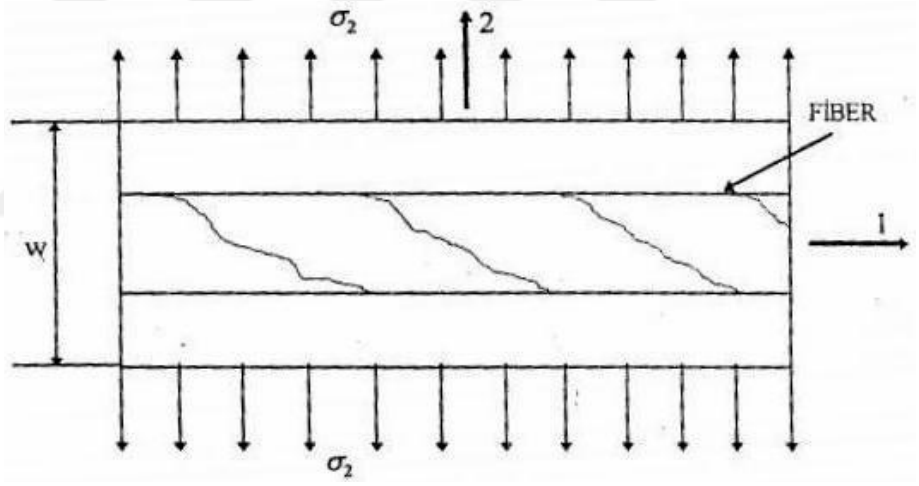
olarak tanımlanır. E_1 son olarak;

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{3.5}$$

şeklinde elde edilir.

3.3.2. E_2' in elde edilmesi

Malzemenin σ_2 gerilmesinin matriks ve fiber tarafından eşit olarak taşınması Şekil 3.15.'teki gibi yüklenmesi sonucu oluşur. Bu nedenle;



Şekil 3.15. Kompozit malzemenin takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekilmesi (Topal, 2014)

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \, , \sigma_f = E_f \varepsilon_f \tag{3.6}$$

$$\sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 \quad \sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m \tag{3.7}$$

denklemleri elde edilir. Malzemenin kalınlığı W olarak kabul edilmesi halinde ise $V_f W$ kadarını takviye malzemesi, $V_m W$ kadarını ise matris malzemesi oluşturur. Böylelikle malzemenin şekil değiştirme miktarı;

$$\varepsilon_2 W = V_f W E_f + V_m W E_m \quad (3.8)$$

eşitlik yardımıyla elde edilir. Buradan;

$$\varepsilon_2 = V_f \varepsilon_f + V_m \varepsilon_m \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_2 = V_f(\sigma_f / \varepsilon_f) + V_m(\sigma_2 / E_m) \quad (3.10)$$

denklemleri elde edilir. Bu ifadelerden;

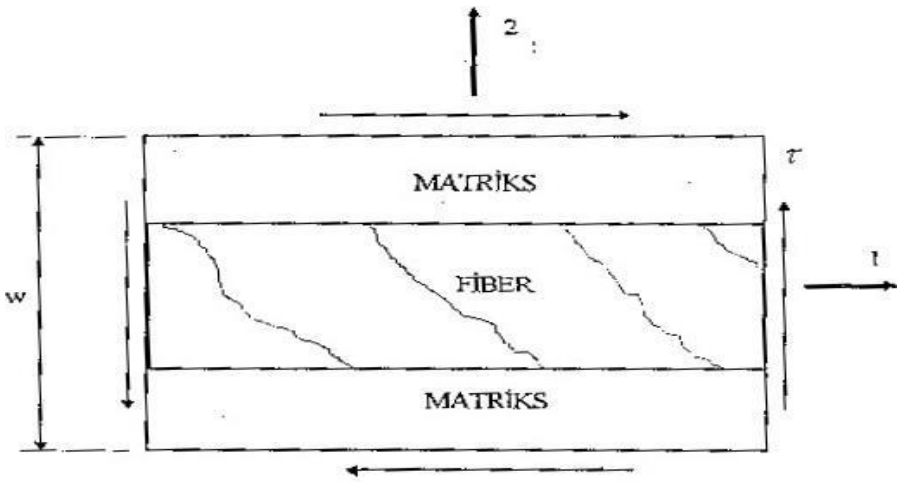
$$\sigma_2 = E_f \varepsilon_2 = E_2(V_f \sigma_2 / E_f + V_m \sigma_2 / E_m)$$

$$E_2 = E_f E_m / (V_m E_f + V_f E_m)$$

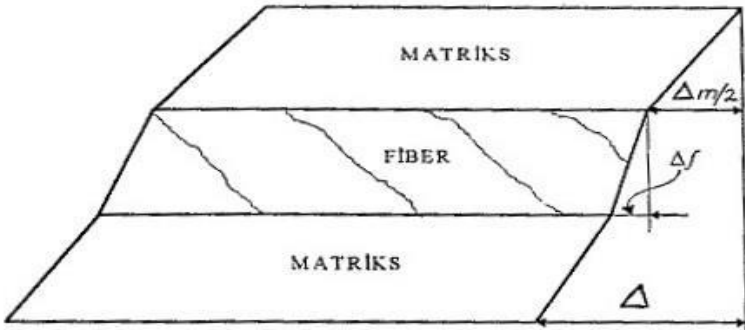
bağıntısı ortaya çıkar (Topal, 2014). Bu bağıntıyı denklem (3.11) de gösterildiği gibi yazmak mümkündür.

$$1/ E_2 = V_f / E_f + V_m / E_m \quad (3.11)$$

3.3.3. v_{12} poisson oranının elde edilmesi



Şekil 3.16. Kompozit plakaya kayma gerilmesinin uygulanışı (Topal, 2014)



Şekil 3.17. Kompozit plakada toplam kayma deformasyon gösterimi (Topal, 2014)

Şekil 3.16.'dan;

$$v_{12} = -\varepsilon_2/\varepsilon_1 \tag{3.12}$$

eşitliği yazılır (Topal, 2014). Bu eşitlik yardımıyla;

$$\Delta W = -V_m\varepsilon_2 = W v_{12}\varepsilon_1 \tag{3.13}$$

$$\Delta W = \Delta W_m + \Delta W_f \tag{3.14}$$

denklemleri elde edilir. Denklem (3.14) bağıntısının sağındaki ifadeler;

$$\Delta W_m = V_m W v_m \varepsilon_1 \tag{3.15}$$

$$\Delta W_f = V_f W v_f \varepsilon_1 \tag{3.16}$$

denklem (3.15) ve (3.16) denklemler yardımıyla elde edilir. Buradan da;

$$v_{12} = V_m v_m + V_f v_f \tag{3.17}$$

sonuç denklemine ulaşılır. Eğer $v_m = v_f$ ise $v_{12} = v_m = v_f$ olacaktır.

3.3.4. G_{12} kayma modülünün elde edilmesi

Malzeme aynı şekilde Şekil 3.16.'daki gibi yüklendiği takdirde;

$$\gamma_m = \tau \,/\, G_m \tag{3.18}$$

$$\gamma_f = \tau \,/\, G_f \tag{3.19}$$

denklem bağıntılarını yazmak mümkündür. Kompozit plakalarda meydana gelen deformasyon biçimleri Şekil 3.17'de görülmektedir. Toplam kayma deformasyonu ise;

$$\Delta = \gamma W \tag{3.20}$$

denklemi yardımıyla bulunur. Matriks ve fiberler için ayrı ayrı yazılırsa;

$$\Delta_m = V_m W \gamma_m \tag{3.21}$$

$$\Delta_f = V_f W \gamma_f \tag{3.22}$$

denklem bağıntıları elde edilir. Son aşama olarak $\Delta = \Delta_m + \Delta_f$ eşitliğinden;

$$\gamma = V_m \gamma_m + V_f \gamma_f \tag{3.23}$$

eşitliği elde edilir ve böylelikle kayma gerilmesi;

$$\gamma = \tau / G_{12} = V_m \tau / G_m + V_f \tau / G_f \tag{3.24}$$

$$G_{12} = G_m G_f / \left(V_m G_f + V_f G_m\right) \tag{3.25}$$

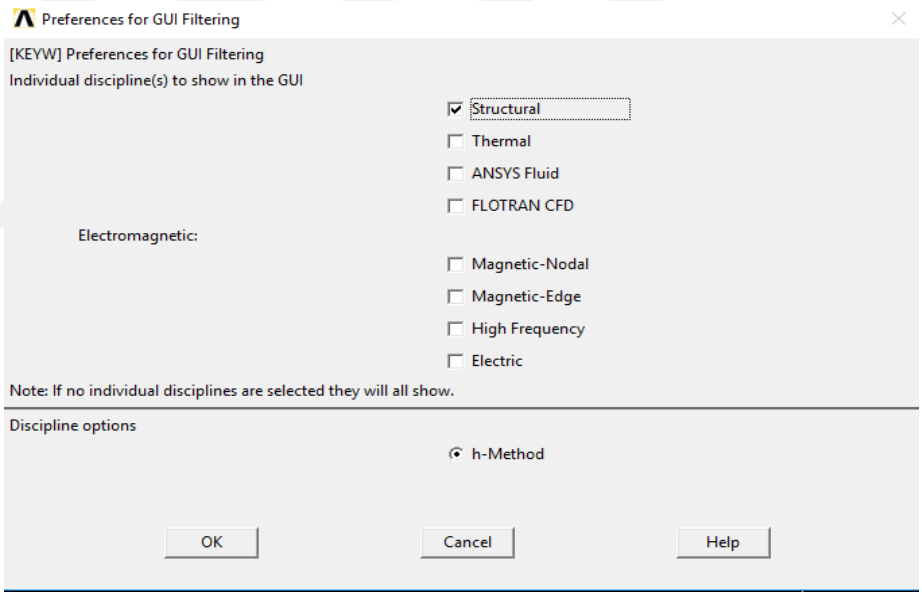
bağıntıları ile bulunur.

3.3. Ansys Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Burkulma Analizi

Bu bölümde dikdörtgen şeklindeki kompozit plakaların, iki yönlü yükleme altındaki kritik burkulma yükleri ANSYS sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla hesaplanmıştır. Aşağıda, kritik burkulma yüklerinin hesaplanmasında uygulanan aşamalar adım adım sunulmuştur.

3.3.1. Analiz tipinin belirlenmesi

Ansys programında modelleme işlemlerine geçilmeden önce yapılacak analiz çalışmasının tipi belirlenir. Bunun için öncelikle **'ANSYS Main Menu / Preference '** ekranından Şekil 3.18.'deki gibi **' structural'** işaretlenir.

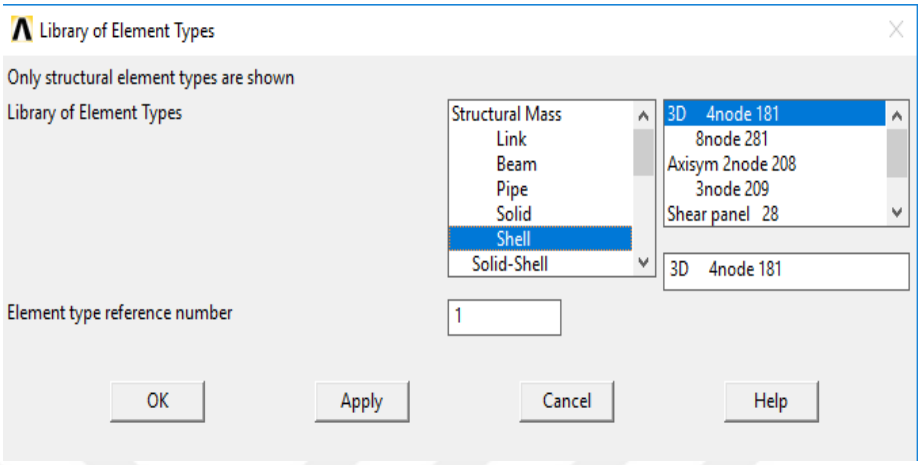


Şekil 3.18. Structural analiz tipinin belirlenmesi

3.3.2. Malzeme tipi ve özelliklerinin belirlenmesi

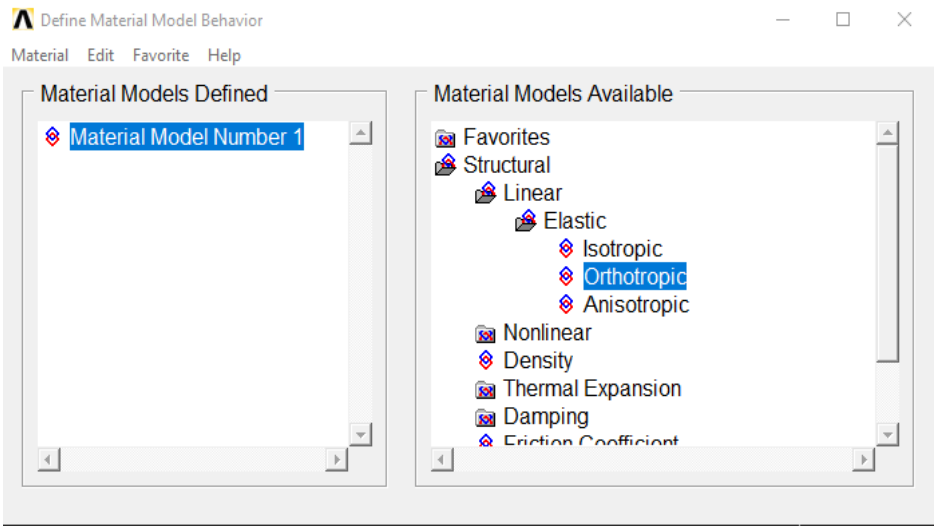
Kompozit malzememizin levha uzunluk oranları çok küçük olduğundan çalışmamızda eleman tipi **'Shell'** seçilmiştir. Bu seçim sırasıyla **Preprocecessor > Element Type > Add/Edit/Delete** ekranından seçilir. Çıkan ekranda '**Add'** seçeneği

seçilerek programın eleman tipi sekmesinden Şekil 3.19.'da gösterildiği gibi **'Shell > 4 node 181'** eleman tipi seçilir. Böylelikle eleman tipi belirlenmiş olur.

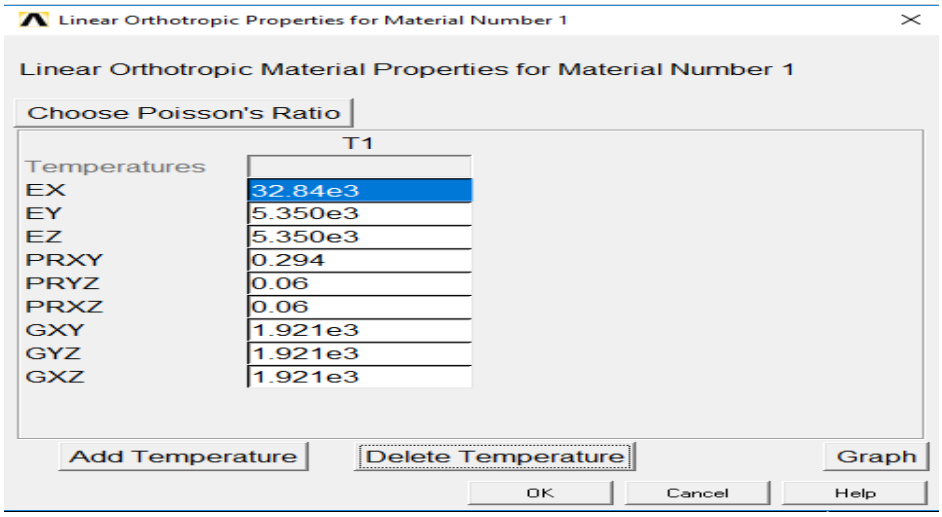


Şekil 3.19. Plakaların eleman tipinin belirlenmesi

Çalışmamızda kullandığımız kompozit malzemeler ortotropik yapıdadır. Bu yüzden Şekil 3.20.'de gösterildiği gibi **Preprocecessor > Material Probs > Material Models > Orthotropic** seçilir daha sonra açılan ekrandan Şekil 3.21.'de gösterildiği gibi cam ve karbon elyaflı kompozit plakaların mekanik özellikleri ayrı ayrı programa tanımlanır.

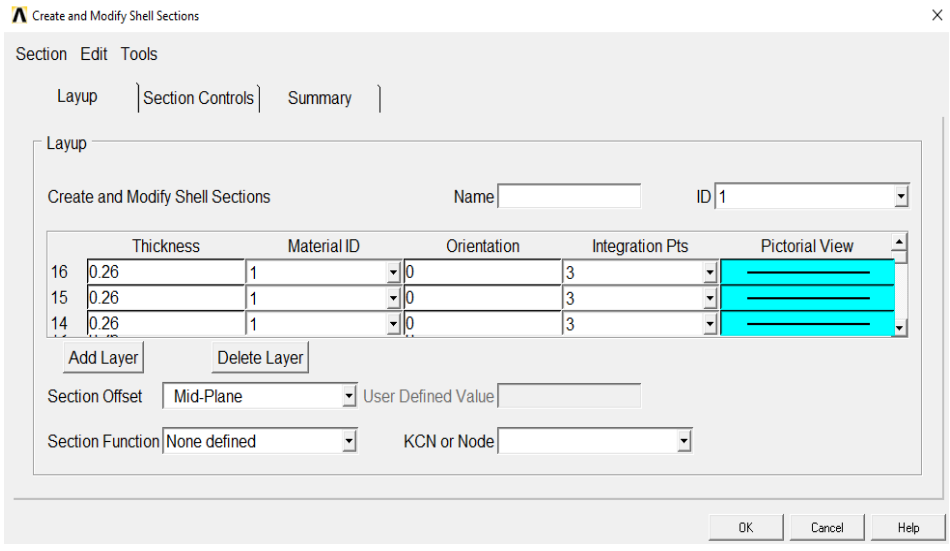


Şekil 3.20. Orthotropic yapıda seçilen kompozit malzeme

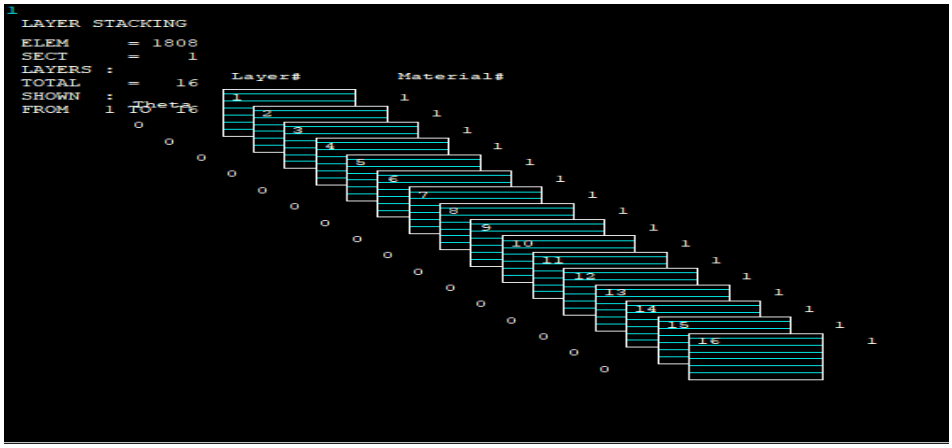


Şekil 3.21. Kompozit malzeme özelliklerinin girilmesi

Malzeme özellikleri girildikten sonra sırasıyla **Preprocessor** > **Sections** > **Shell** > **Lay-up** > **Add/Edit** seçilerek, her bir kompozit katmanının Şekil 3.22.'de gösterildiği gibi tabaka sayısı, tabaka kalınlıkları ve farklı oryantasyon açıları girilir ve **'OK'** butonuna basılır. 90° oryantasyon açısı için oluşturulan tabaka dizilimi Şekil 3.23.'te gösterilmiştir.



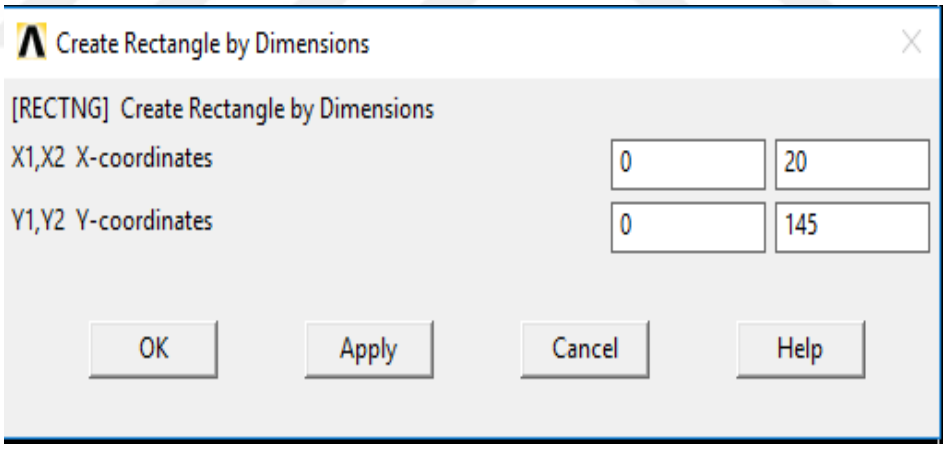
Şekil 3.22. Kompozit plakaların oryantasyon açıları ve tabaka kalınlıklarının girilmesi



Şekil 3.23. Tabaka dizilimi

3.3.3. Malzeme modelinin oluşturulması

Kullanılan cam ve karbon elyaflı kompozit plakların modellemeleri Şekil 3.24.'de gösterildiği gibi sırasıyla **Preprocecessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By dimensions** seçilerek açılan ekrandan plakaların ebatları girilir.

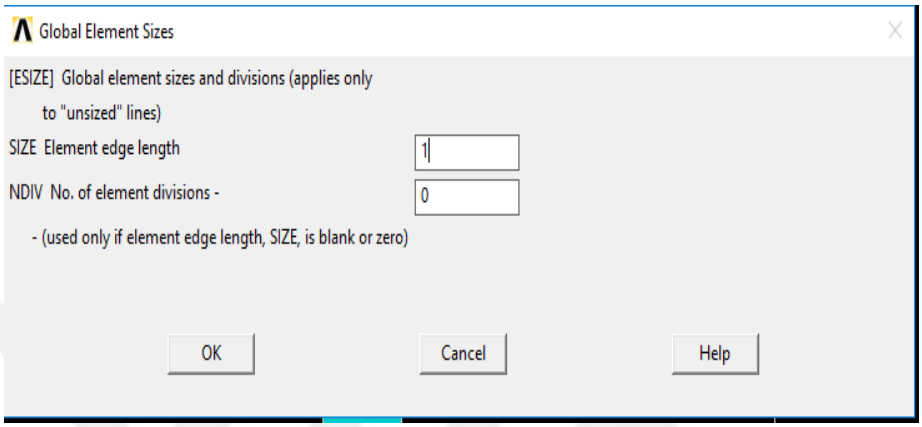


Şekil 3.24. Kompozit plakanın X ve Y koordinatlarının girilmesi

3.3.4. Malzemeyi elemanlara ayırma işlemi

Kullandığımız cam ve karbon elyaflı kompozit plakaların, malzemelerine ayırma şekli '**mesh**' komutu yardımıyla yapılmıştır. Bunun için öncelikle **Preprocessor > Meshing > Size Contrls > Manuel Size > Global > Size** seçilerek

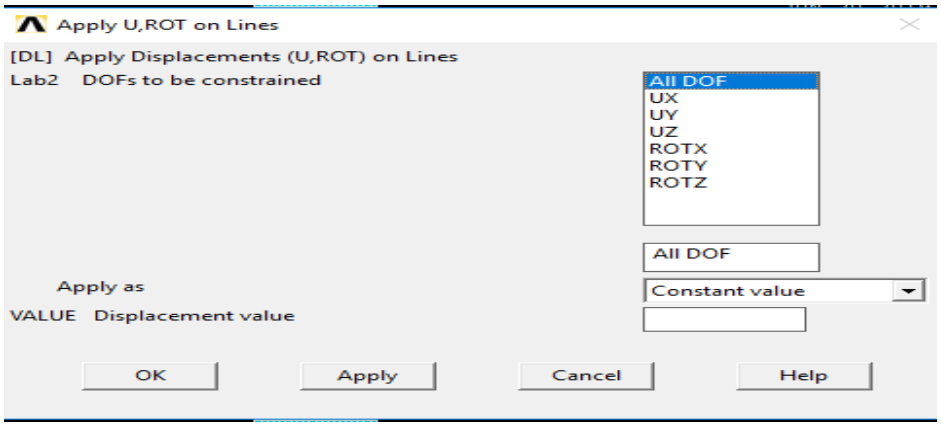
Şekil 3.25.'te gösterildiği gibi çıkan ekrandan mesh değeri girilir ve **'OK'** butonuna basılır. Ayrıca, mesh değeri ne kadar küçük değerde olursa analizimiz o kadar hassas olacaktır. Daha sonra sırasıyla **Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Mapped > 3 or 4 sided** mesh yapılacak plaka seçilir ve böylelikle kompozit malzeme elemanlarına ayrılmış olacaktır.



Şekil 3.25. Elemanlarına ayrılacak plakaların mesh birim uzunluğunun girilmesi

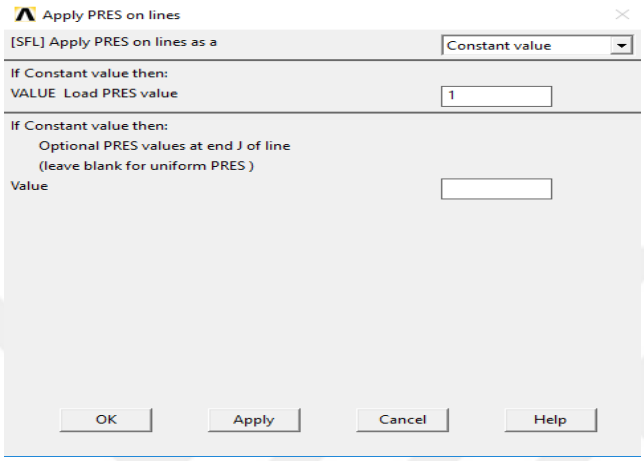
3.3.5. Yükleme ve sınır şartlarının tanımlanması

Elemanlara ayırdığımız kompozit plakaların sınır şartlarını tanımlamak için öncelikle sırasıyla **Solutions > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines** sekmeleri seçilir ve plakanın alt kenar çizgisi boyunca mesnetleme yapılarak Şekil 3.26.'daki gibi serbestlik dereceleri **'All DOF'** olarak girilir.

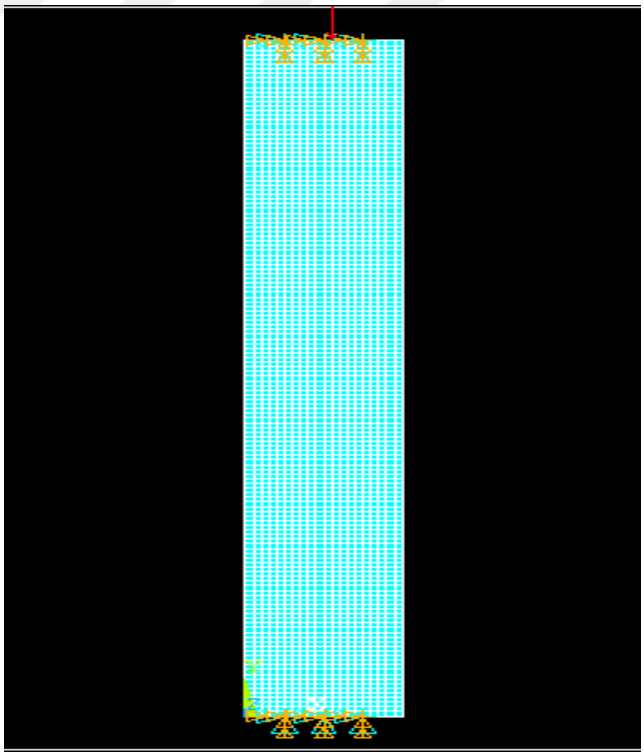


Şekil 3.26. Serbestlik dereceleri ve sınır şartlarının girilmesi

Ardından plakanın üst kenarından Y yönünde 1 N'luk basınç uygulanır. Bu işlem sırasıyla **Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On lines** girilerek açılan ekrandan Şekil 3.27.'de gösterildiği gibi **'Load Pressure Value'** değeri **1** olarak girilir. Tanımlanan yükleme ve sınır şartlarının son halleri Şekil 3.28.'deki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 3.27. Uygulanan basınç değerinin girilmesi

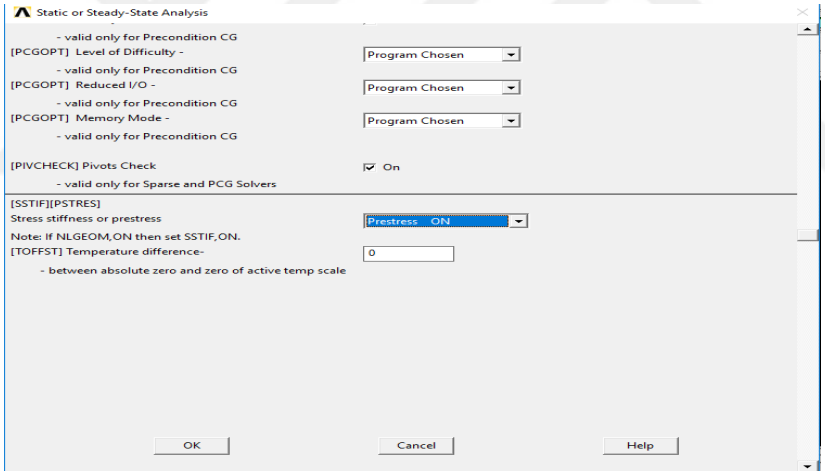


Şekil 3.28. Çözümlemeye hazır plaka

3.3.6. Çözüm

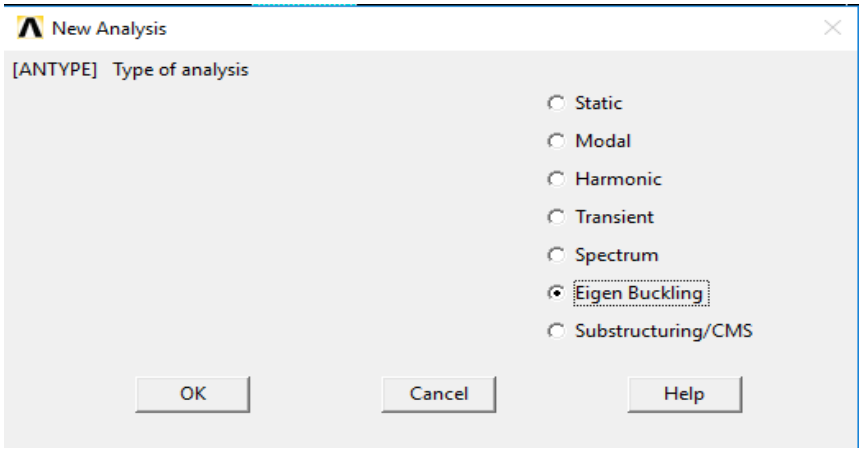
ANSYS sonlu elemanlar programı yardımı ile yapılan burkulma analizini üç aşamada gerçekleştirmek mümkündür. Bunun için ilk adım olarak, serbestlik derecelerinde herhangi bir sıkıntı olup olmadığını kontrol etmek amacıyla statik analizi gerçekleştirilecek daha sonra Eigen Buckling yani burkulma analizi gerçekleştirilecek ve son olarak burkulma yüklerini belirlemek için burkulma analizleri genişletilecektir.

İlk olarak, burkulma analiz çözümünü çalıştırmak için **'Prestress Effects'** aktif hale getirilir. Bunun için sırasıyla **Solution > Unabridged Menu > Analysis Options** seçilir ve çıkan ekrandan Şekil 3.29.'daki gibi **'Stress stiffness or prestress'** bölümünden **'Prestress On'** aktif hale getirilir.



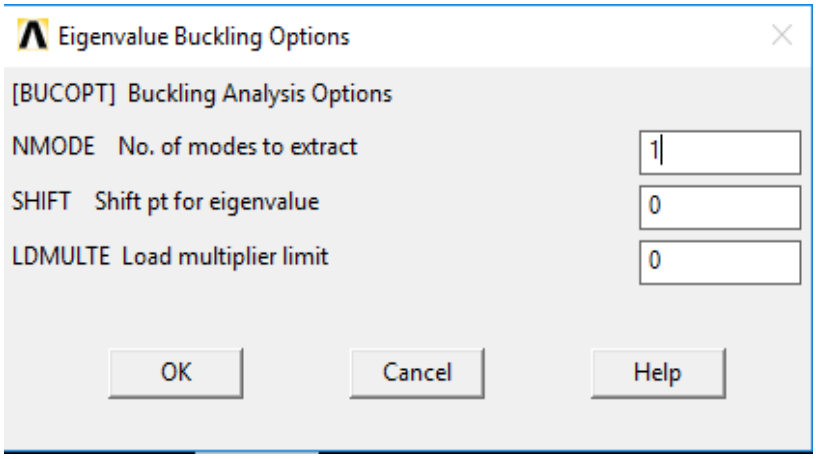
Şekil 3.29. Prestress Effects'in aktif hale getirilmesi

Prestress Effects aktif hale getirildikten sonra, sırasıyla **Solution > Solve > Current LS** sekmesi tıklanır ve ilk çözüm yapılmış olur. İkinci aşama olarak sırasıyla Şekil 3.30.'daki gibi **Solution > Analysis Type > New Analysis > Eigen Buckling** seçilip '**OK**' butonu tıklanır.



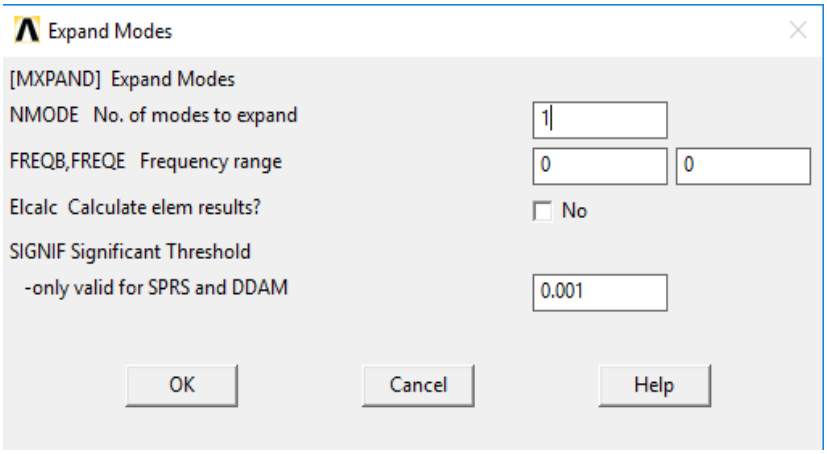
Şekil 3.30. Burkulma analizi gerçekleştirmek için Eigen buckling'in seçilmesi

Block Lanczos çözüm metodu burkulma çözümü yapmak için kullanılır. Block Lanczos'u aktif hale getirmek için sırasıyla, **Solution > Analysis Type > Analysis Options** seçilir ve açılan pencereden Block Lanczos seçilir ve Şekil 3.31.'deki gibi **'No. Of modes to extract '** bölümüne **1** değeri girilir. **1** değeri girildikten sonra tekrar **Solution > Solve > Current LS** seçilerek ikinci çözüm yapılır. İkinci çözüm yapıldıktan sonra ana menüden **'FINISH'** sekmesine tıklanır.



Şekil 3.31. Matris çözümü için No. Of modes to extract değerinin girilmesi

Burkulma analizini genişletmek için son olarak, **Solution > Load Step Options > ExpansionPass > Single Expand > Expand Modes** tıklanır ve Şekil 3.32.'deki gibi **No.of modes to expand** satırına tekrar **1** değeri girilerek burkulma analizi genişletilmiş olunacaktır.



Şekil 3.32. Burkulma analizi çözümünün genişletilmesi

Ve son olarak, **Solution > Solve > Current LS** sekmesi tıklanır ve böylelikle son çözüm yapılmış olur. Çözüm tamamlandıktan sonra ana menüden **'FINISH'** tıklanarak sonuçlar değerlendirilir.

3.3.7. Elde edilen sonuçların okunması

Ansys sonlu elemanlar paket programında yapılan burkulma analiz işlemleri bittikten sonra, plakalarımızın kritik burkulma yüklerine ulaşmak için sırasıyla **General Postproc > List Results > Detailed Summary** sekmesi tıklanır ve açılan penceredeki yük değerleri **Newton** olarak okunur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında daha önce de belirtildiği gibi ilk olarak, tek yönlü cam ve karbon elyaflı epoksi matrisli kompozit plakaların üretimi yapılmıştır. Üretilen kompozit plakalar, dört farklı çevresel etkiye maruz bırakılmak amacıyla her bir oryantasyon açısı (0^o, 45^o ve 90^o) için tek yönlü cam elyaflı plakalardan beşer adet, karbon elyaflı plakalardan ise dörder adet numunenin kesim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kesim işlemleri tamamlanan plakalar, herhangi bir çevresel etkiye maruz bırakılmadan önce ilk burkulma deneyleri Şekil 4.1.'deki 100 kN kapasiteli Shimadzu AGS-X Plus marka cihazla, her iki tarafı ankastre mesnetle ile mesnetlenmiş olarak ve basma hızı 1 mm/dk olacak şekilde elde edilmiştir.

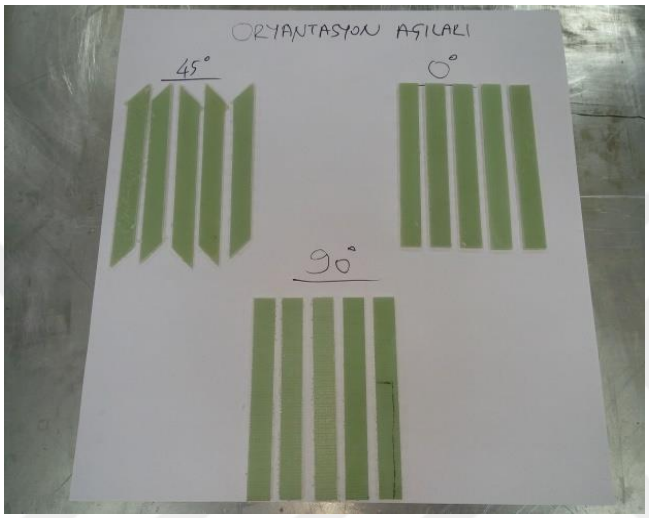


Şekil 4.1. Burkulma deneylerin yapıldığı shimadzu AGS-X Plus adlı marka cihaz

Deneylerde, mesnetler arası mesafe 145 mm olarak belirlenmiş ve kritik burkulma yük değerleri göz önüne alınmıştır. Daha sonra deney numuneleri, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla dört farklı çevresel şartlara (toprak, şebeke suyu, güneş, deniz suyu) maruz bırakılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

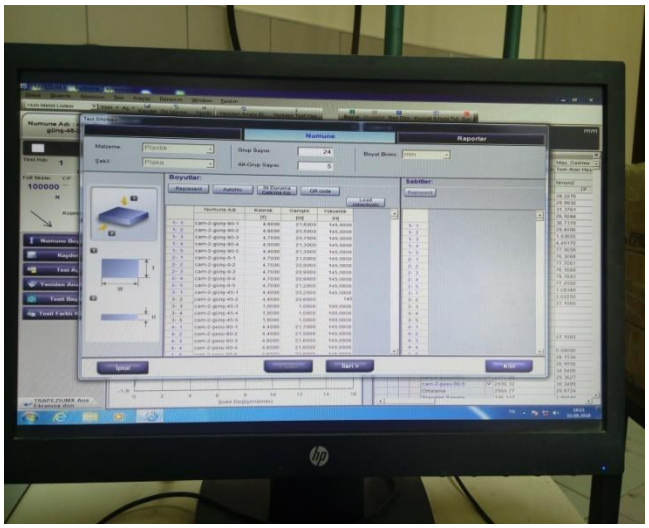
4.1. Çevresel Şartlara Maruz Bırakılmadan Önce Cam Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyleri

Herhangi bir çevresel şarta maruz bırakılmayan Şekil 4.2.'deki 0º, 45º ve 90º oryantasyon açılarına sahip beşer adet cam elyaf kompozit deney numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 4.2. Cam elyaf deney numuneleri

Burkulma deneylerine geçmeden önce deney numunelerinin kesit alanları Şekil 4.3.'teki cihaz programına tanımlandıktan sonra ayrı ayrı burkulma deneyleri Şekil 4.4.'deki gibi gerçekleştirilmiştir.

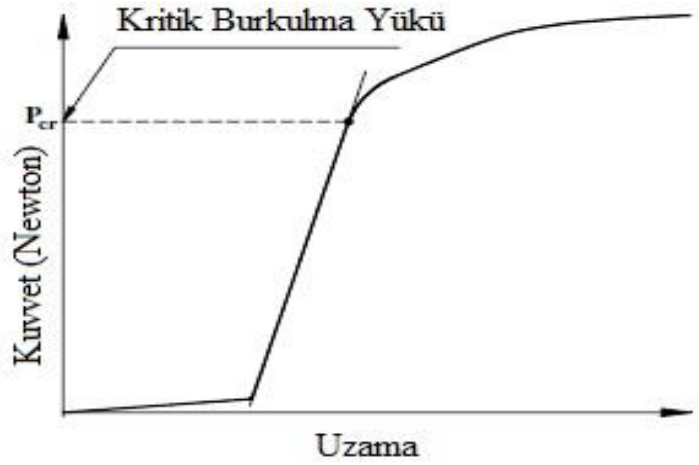


Şekil 4.3. Deney numunelerinin kesit alanlarının girilmesi



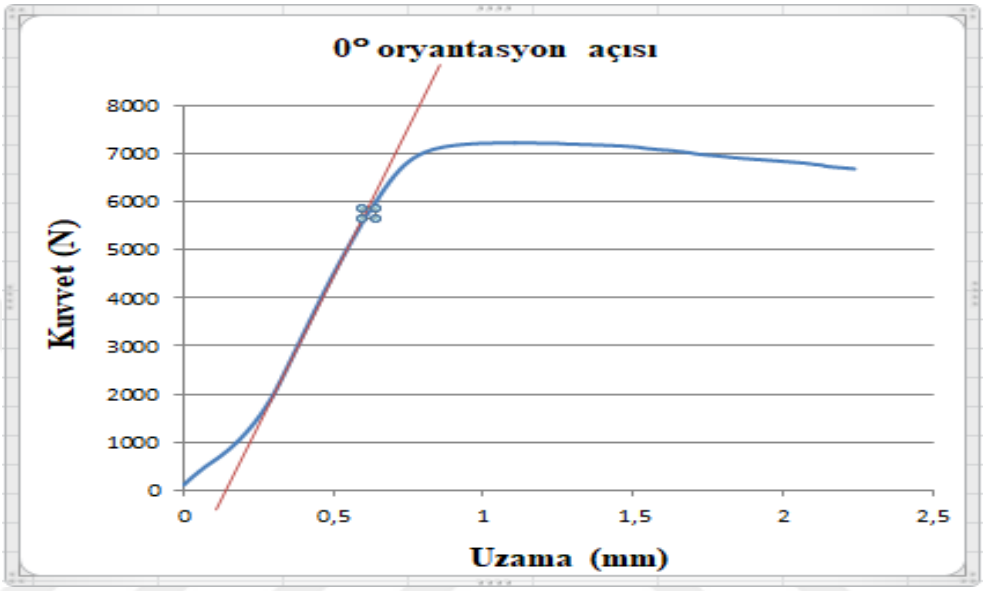
Şekil 4.4. Kompozit plakaların burkulma deneyleri

Burkulma deneyleri gerçekleştirildikten sonra kritik burkulma yük değerlerini belirlemek için öncelikle Şekil 4.5.'te gösterildiği gibi grafik üzerindeki lineer çizgeden ayrılan nokta tespit edilmiş ve daha sonra belirlenen noktanın y ekseni üzerindeki değeri kritik burkulma yükü olarak alınmıştır (Deniz, 2017).

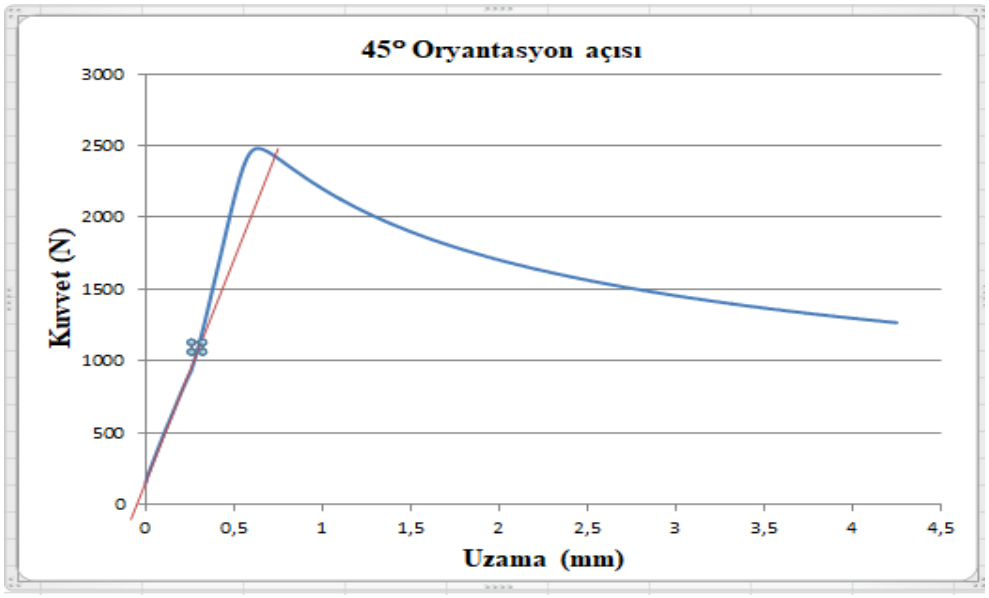


Şekil 4.5. Kritik burkulma yükünün tespit edilmesi (Topal, 2014)

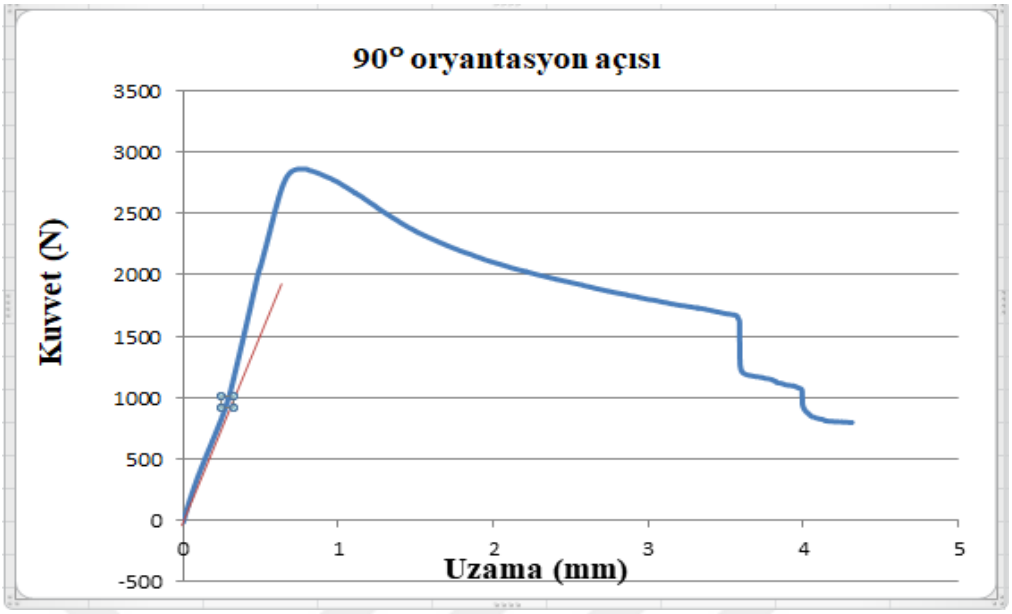
Çalışmamızda, numunelere ait bütün grafiklerin kritik burkulma yük değerleri shimadzu AGS-X Plus adlı marka cihazın verdiği nokta değerlerin Excel.10 grafik programında çizilmesi ile elde edilmiştir. Aşağıda, her bir oryantasyon açısı için sırasıyla elde edilen kritik burkulma yük değerleri Şekil 4.6., Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de gösterilmiştir (Esfahani ve ark., 2010).



Şekil 4.6. 0° açılı cam kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi



Şekil 4.7. 45° açılı cam kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi



Şekil 4.8. 90° açılı cam kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi

Gerçekleştirilen her bir deney sonucunda, numunelerin oryantasyon açılarına göre oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri deneysel ve nümerik olarak Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

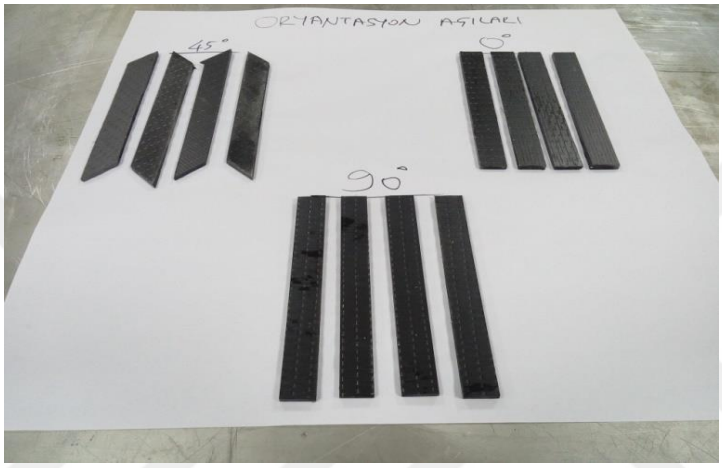
Çizelge 4.1. Cam elyaflı numunelerin deney ve Ansys sonuçlarının karşılaştırılması

Oryantasyon açısı	Deney - Kritik Burkulma Yükü (N)	ANSYS Kritik Burkulma Yükü (N)	Yüzdelik fark (%)
0°	5771.59	5573	3.44
45°	1136.96	1080.2	4.90
90°	993.17	942	5.15

Herhangi bir çevresel etkiye maruz kalmayan cam elyaflı kompozitlerin, kritik burkulma yük değerlerine bakıldığında en yüksek değerin 0° oryantasyon açısına sahip numunelerde gerçekleşirken, en düşük değere sahip olan ise 90° oryantasyon açısına sahip numuneler olmuştur. Ayrıca, deneylerin ortalama değerleri ile ANSYS değerleri arasında; 0° oryantasyon açılı numunelerde %3.44, 45° oryantasyon açısına sahip numunelerde %4.9 ve 90° oryantasyon açılı numunelerde ise %5.15'lik fark gerçekleşmiştir. Bu farklar, kabul edilebilir seviyede olup ANSYS ile edilen nümerik sonuçların deneysel çalışma ile doğrulanması yapılmıştır.

4.2. Çevresel Şartlara Maruz Bırakılmadan Önce Karbon Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyleri

Herhangi bir çevresel etkiye maruz kalmayan cam elyaflı kompozitlerde olduğu gibi Şekil 4.9.'daki gibi hazırlanan karbon elyaflı deney numunelerinin kesit alanları sisteme tanımlandıktan sonra burkulma deneyleri ayrı ayrı Şekil 4.10.'daki gibi gerçekleştirilmiştir.



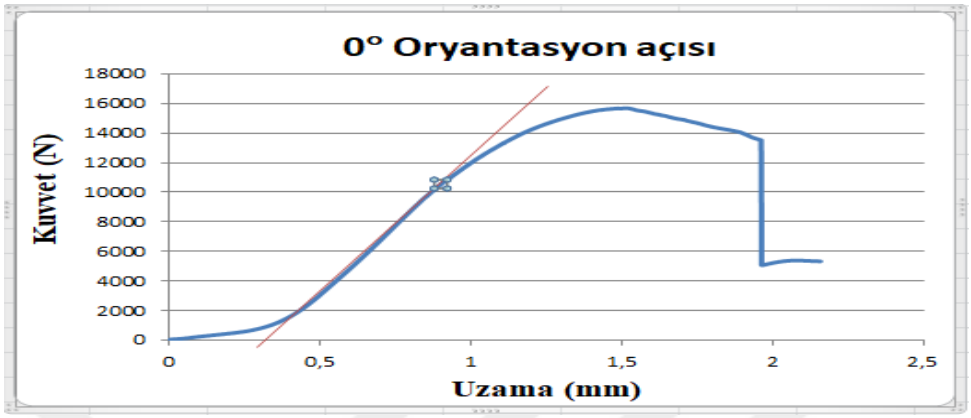
Şekil 4.9. Karbon elyaf takviyeli deney numuneleri



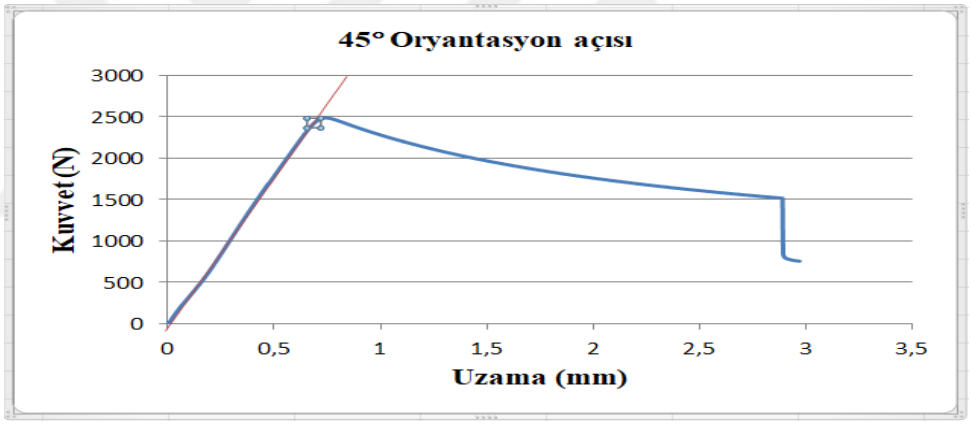
Şekil 4.10. Karbon elyaflı kompozit plakanın burkulma deneyi

Burkulma sonucunda oluşan kritik burkulma yük değerleri, cam elyaflı numunelerde olduğu gibi benzer şekilde tespit edilmiştir. Aşağıda, her bir

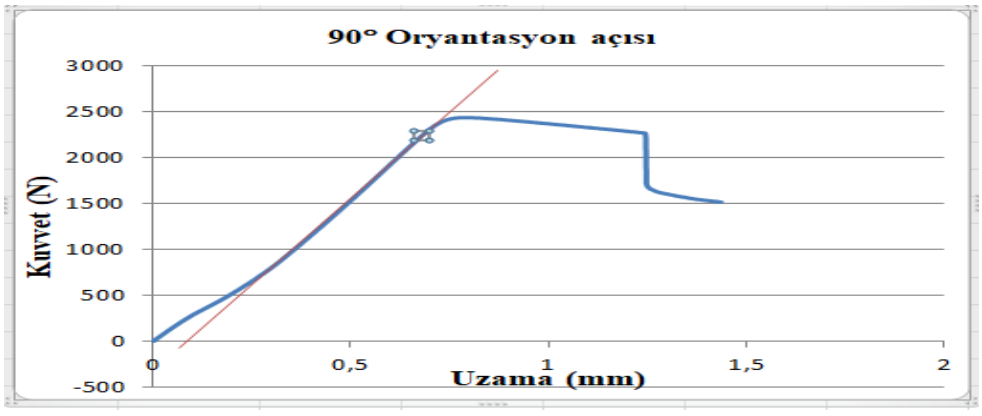
oryantasyon açısı için sırasıyla elde edilen kritik burkulma yük değerleri Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'de gösterilmiştir (Esfahani ve ark., 2010).



Şekil 4.11. 0° açılı karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi



Şekil 4.12. 45° açılı karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi



Şekil 4.13. 90° açılı karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinin tespit edilmesi

Her bir oryantasyon açısı için dörder adet deney yapılmış olup deneylerin oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri deneysel ve nümerik olarak Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Karbon elyaflı numunelerin deney ve Ansys sonuçlarının karşılaştırılması

Oryantasyon açısı	Deney - Kritik Burkulma Yükü (N)	ANSYS Kritik Burkulma Yükü (N)	Yüzdelik fark (%)
0°	10420.97	9971.43	4.31
45°	2497.64	2402.98	3.78
90°	1936.53	1878.20	3.01

Herhangi bir çevresel etkiye maruz bırakılmayan farklı oryantasyon açısına sahip karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların, burkulma sonuçlarına bakıldığında kritik burkulma yük değeri en yüksek olan numunelerin 0° oryantasyon açısına sahip numuneler olduğu, 90° oryantasyon açısına sahip numunelerin ise en küçük değere sahip olduğu belirlenmiştir (Dhuban ve ark., 2017). Ayrıca, deneylerin ortalama değerleri ile ANSYS değerleri arasında; 0° oryantasyon açılı numunelerde %4.31, 45° oryantasyon açısına sahip numunelerde %3.78 ve 90° oryantasyon açılı numunelerde ise %3.01'lik fark gerçekleşmiştir. Bu farklar, kabul edilebilir seviyede olup ANSYS ile edilen nümerik sonuçların deneysel çalışma ile doğrulanması yapılmıştır.

4.3. Çevresel Etkilere Maruz Kalan Cam Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyleri

Çevresel etkilere maruz bırakılan cam elyaflı kompozit plakaların her bir oryantasyon açısı için beşer numune olacak şekilde toplamda 180 adet deney numunesi dört farklı ortama ve belirli periyotlarla maruz bırakılmıştır. Farklı ortamlar ve belli periyotlar sırası ile güneş, şebeke suyu, deniz suyu, toprak ve 2, 4, 6 aylık sürelerdir. Bu çevresel şartlara maruz her bir cam elyaflı kompozit plakanın, burkulma deneyleri gerçekleştirilmiş olup çevresel etkilerin faklı oryantasyon açılarına sahip kompozit plakaların kritik burkulma yükleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

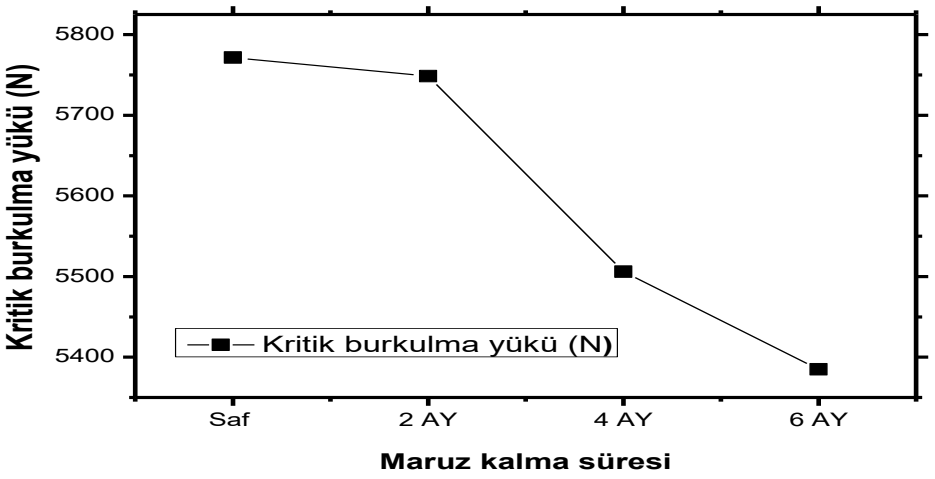
4.3.1. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Güneş etkisine; 2, 4 ve 6 sürelerle maruz bırakılan cam elyaflı kompozit plakaların ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin, her bir oryantasyon açısı için oluşan değişim grafikleri ise Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da verilmiştir.

Çizelge 4.3. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam kompozitlerin kritik yük değerleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü (N)	Saf Kritik burkulma yükü (N)	Yüzde azalma (%)
Güneş	2 Ay	0°	5748.51	5771.59	0.4
		45°	1123.32	1136.96	1.2
		90°	960.4	993.17	3.3
	4 Ay	0°	5506.09	5771.59	4.6
		45°	1100.58	1136.96	3.2
		90°	950.46	993.17	4.3
	6 Ay	0°	5384.89	5771.59	6.7
		45°	1073.29	1136.96	5.6
		90°	924.64	993.17	6.9

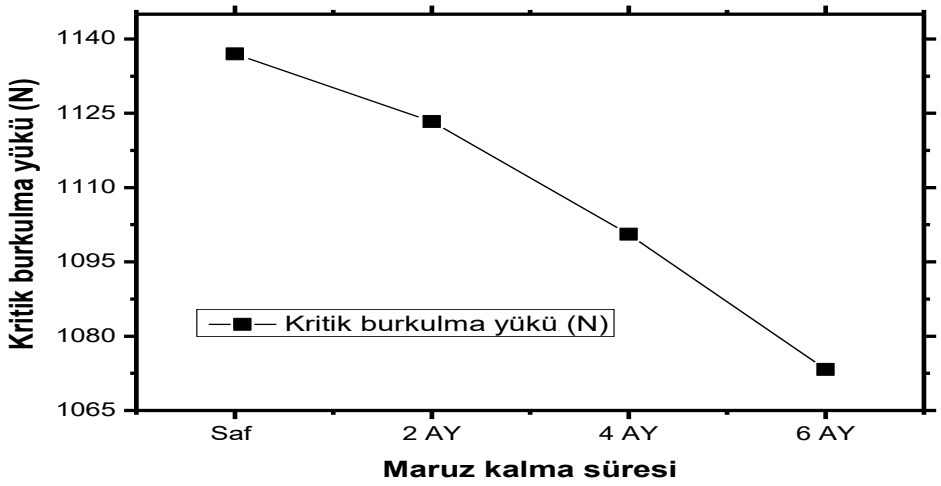
Çizelge 4.3'te verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla güneş etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.14.'te verilmiştir.



Şekil 4.14. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.14.'te görüldüğü üzere, 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin güneş etkisine maruziyet süreleri artıkça kritik burkulma yüklerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma, 2'nci ayın sonunda % 0.42'lik bir düşüş ile neredeyse güneş etkisinden hiç etkilenmediği, 2 aydan sonraki maruziyet sürelerinde ise gözle görülebilir bir düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş, 4'üncü ayın sonunda %4.55 olarak gerçekleşmiş iken, 6'ncı ayın sonunda %6.68 olarak gerçekleşmiştir.

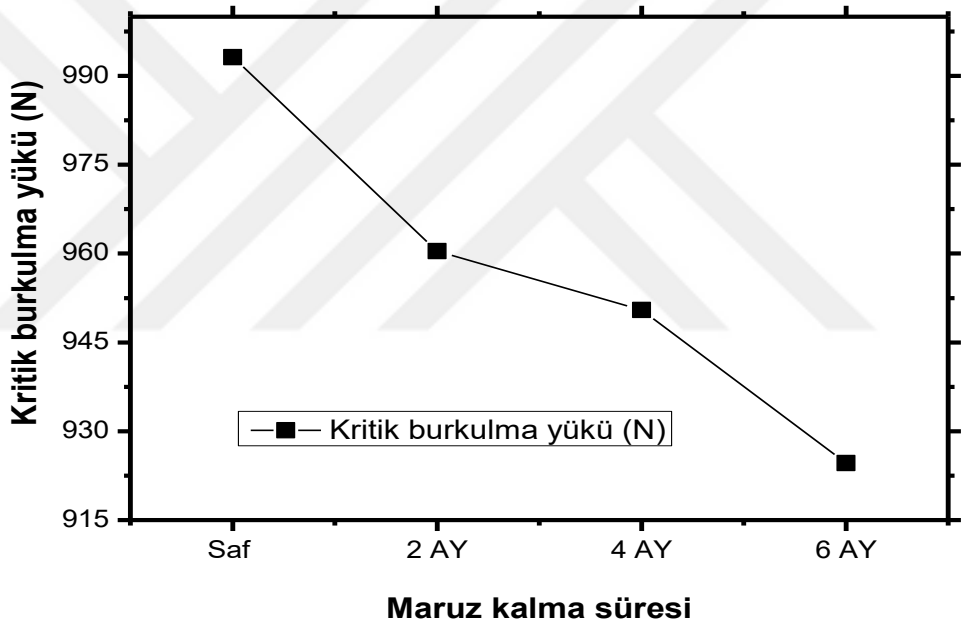
Güneş etkisine maruz bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip deney numunelerinin, 2, 4 ve 6 aylık periyotların sonunda kritik burkulma yüklerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.15.'te verilmiştir.



Şekil 4.15. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yüklerinde meydana gelen değişim verileri incelendiğinde maruziyet süresi artmasıyla kritik burkulma yüklerinde düşüş meydana gelmiştir. Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %1.19 oranında en az olarak gerçekleşirken, en fazla düşüş ise 6'ncı ayın sonunda %5.58 olarak gerçekleşmiştir.

Son olarak, diğer bir oryantasyon açısı olan 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numuneleri yine aynı şekilde güneş etkisine 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılmış, kritik burkulma yüklerinde meydana gelen değişim ise Şekil 4.16.'da verilmiştir.



Şekil 4.16. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.16.'ya göre, güneş etkisine maruz bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinde de maruz kalma süresinin artmasıyla kritik burkulma yüklerinde düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %3.27 olarak gerçekleşirken, 6 ayın sonunda %6.86 olarak gerçekleşmiştir.

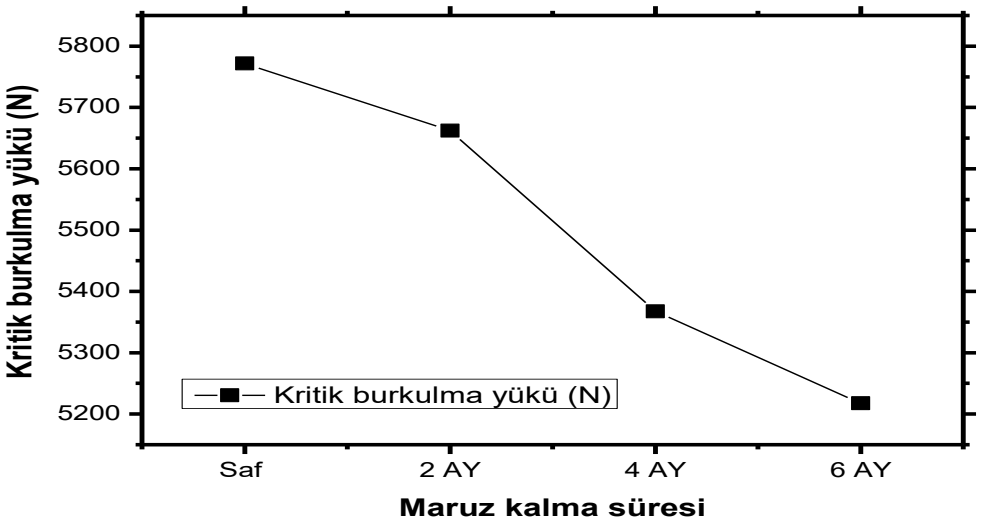
4.3.2. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Şebeke suyuna 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan cam elyaflı kompozit plakaların, ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin her bir oryantasyon açısı için değişim grafikleri ise Şekil 4.17., Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da verilmiştir.

Çizelge 4.4. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü (N)	Saf Kritik burkulma yükü (N)	Yüzde azalma (%)
Şebeke Suyu	2 Ay	0°	5661.93	5771.59	1.9
		45°	993.70	1136.96	12.6
		90°	990.19	993.17	0.3
	4 Ay	0°	5367.58	5771.59	7
		45°	975.51	1136.96	14.2
		90°	984.23	993.17	0.9
	6 Ay	0°	5217.52	5771.59	9.6
		45°	919.80	1136.96	19.1
		90°	915.70	993.17	7.8

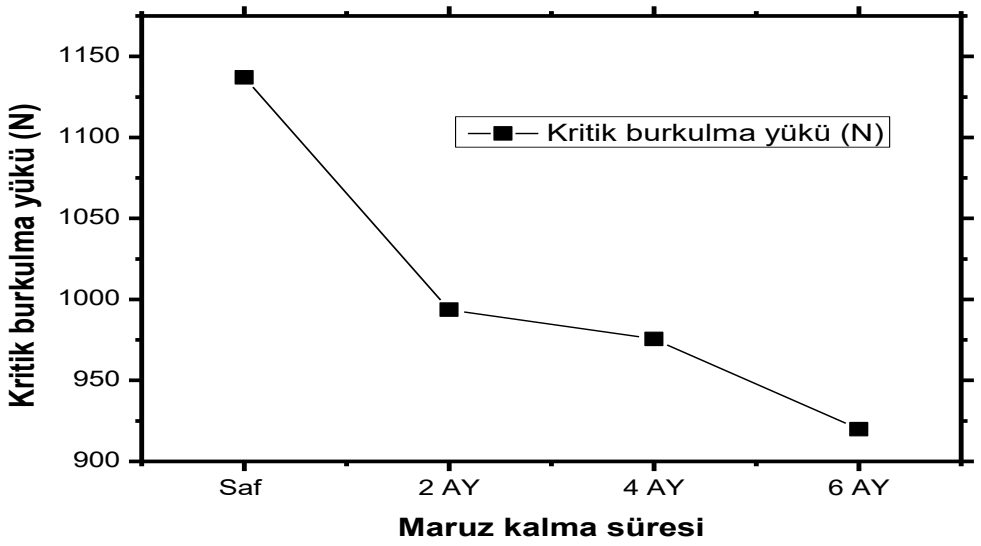
Çizelge 4.4.'te verilen 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla şebeke suyu etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip kompozit numunelerin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.17.'de verilmiştir.



Şekil 4.17. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.17.'e göre, şebeke suyuna 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz kalan 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin kritik burkulma yüklerinde düşüş gerçekleşmiştir. Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %1.93 iken, 6'ncı ayın sonunda %9.64 olarak gerçekleşmiştir.

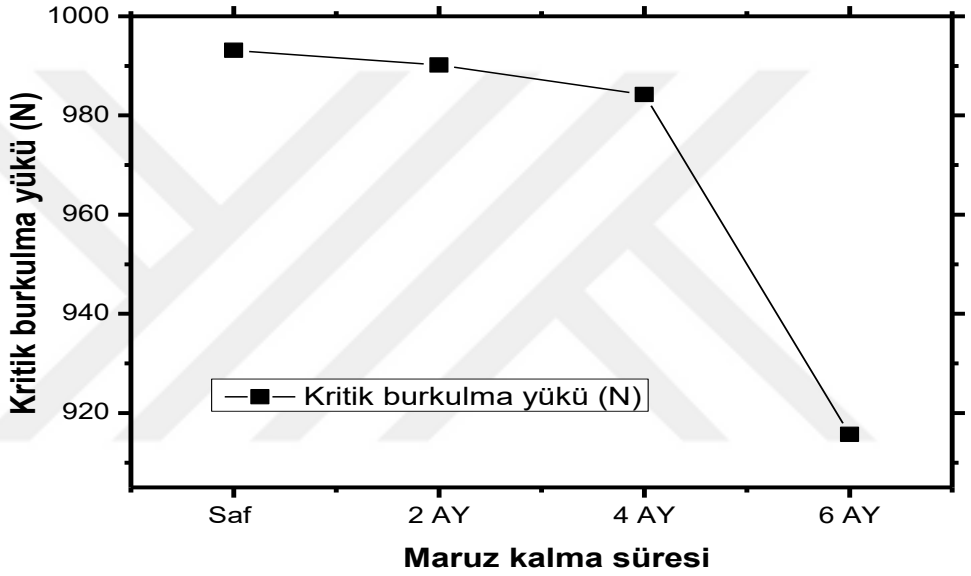
Şebeke suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 45° oryantasyon açılarına sahip cam elyaflı deney numunelerinin kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği ise Şekil 4.18.'de verilmiştir.



Şekil 4.18. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.18'e bakıldığında, şebeke suyu etkisine bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresi artıkça düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %12.67 olarak gerçekleşmiş iken, 6'ncı ayın sonunda %19.13 olarak gerçekleşmiştir.

Son olarak, şebeke suyu etkisine 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği ise Şekil 4.19.'da verilmiştir.



Şekil 4.19. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.19.'a göre, 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerlerindeki değişim değeri 2'nci ve 4'üncü ayların sonunda %0.26 ve %0.92'lik bir değişim oranı ile birbirlerine çok yakın çıktığı ve neredeyse hiç değişmediği, 6'ncı ayın sonunda ise %7.79'luk bir düşüş meydana gelmiştir.

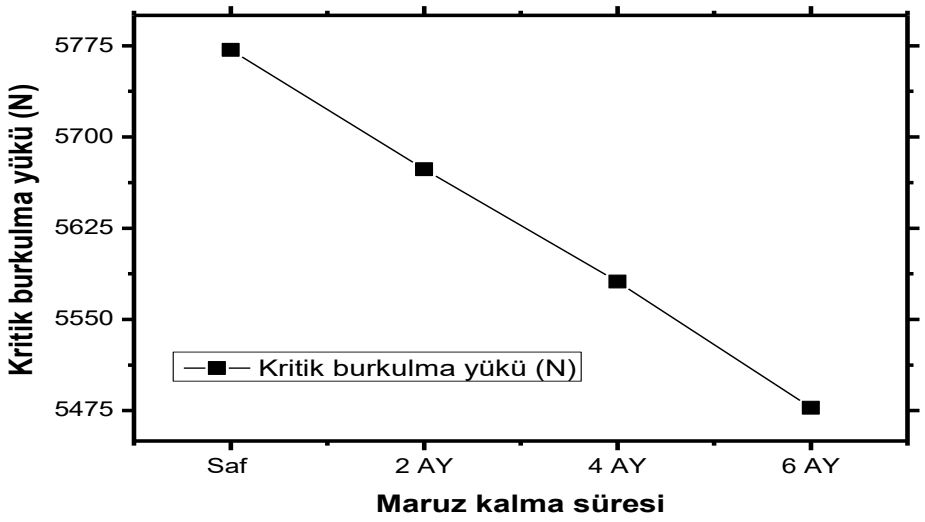
4.3.3. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Deniz suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan cam elyaflı kompozit plakaların, ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin, her bir oryantasyon açısı için oluşan değişim grafikleri ise Şekil 4.20., Şekil 4.21. ve Şekil 4.22.'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü(N)	Saf Kritik burkulma yükü(N)	Yüzde azalma (%)
Deniz Suyu	2 Ay	0°	5673.47	5771.59	1.7
		45°	999.39	1136.96	12.1
		90°	946.49	993.17	4.7
	4 Ay	0°	5581.13	5771.59	3.3
		45°	986.88	1136.96	13.2
		90°	902.79	993.17	9.1
	6 Ay	0°	5477.24	5771.59	5.1
		45°	939.13	1136.96	17.4
		90°	872.99	993.17	12.1

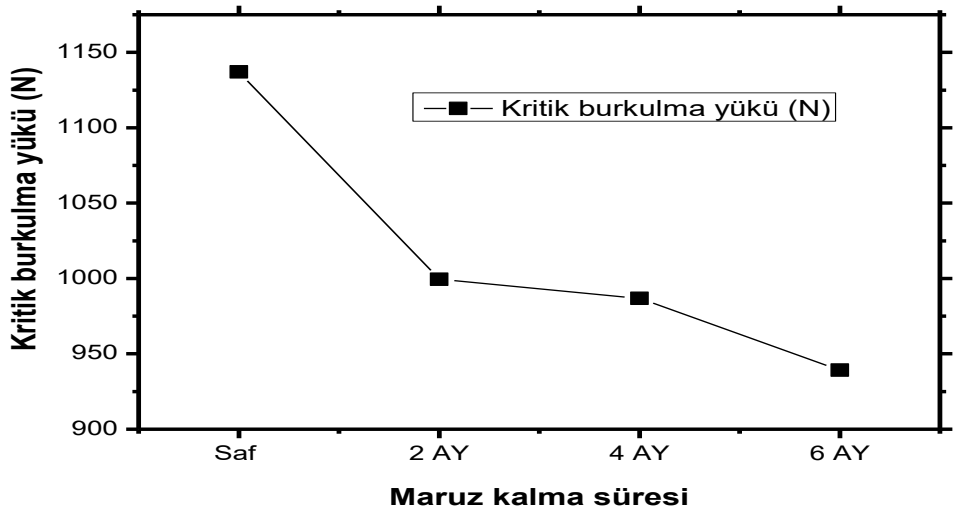
Çizelge 4.5.'te verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla deniz suyu etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaf takviyeli kompozit deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.20.'de verilmiştir.



Şekil 4.20. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.20.'e göre, deniz suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, deniz suyu içerisinde maruziyet süreleri artıkça kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir (Öndürücü ve ark., 2019). Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %1.66 olarak gerçekleşmiş iken, 6'ncı ayın sonunda %5.08 olarak gerçekleşmiştir.

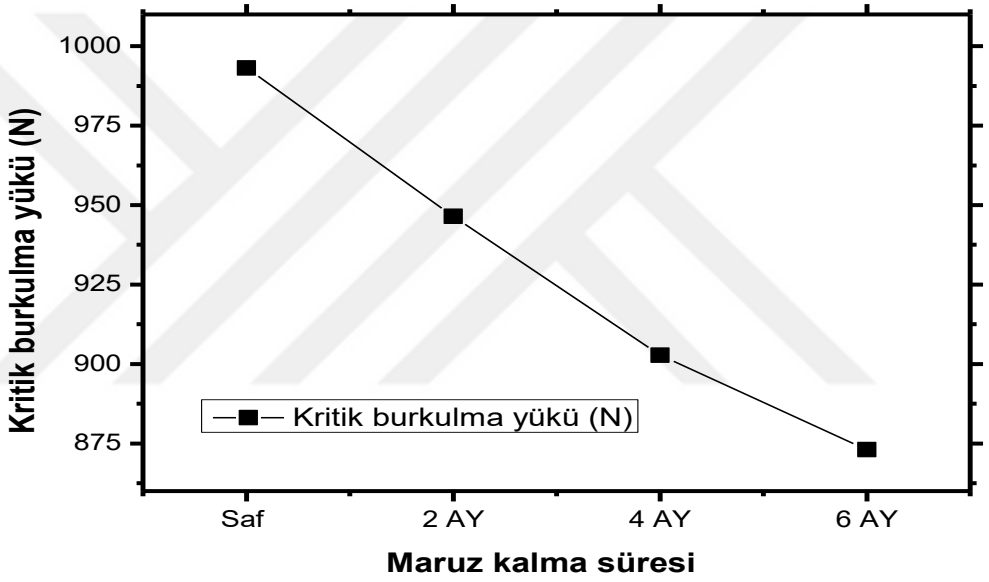
Deniz suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 45° oryantasyon açılarına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.21.'de verilmiştir.



Şekil 4.21. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.21.'e göre, deniz suyu etkisine bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, maruziyet süresinin artması ile kritik burkulma yük değerlerinde 2'nci ve 4'üncü aylarının sonunda %12.02 ve %13.20'lik bir düşüş ile birbirlerine yakın etkilendiği, 6'ncı ayın sonunda bu düşüş %17.42 olarak gerçekleşmiştir (Öndürücü ve ark., 2019).

Son olarak, diğer bir oryantasyon açısı olan 90°'e sahip cam elyaflı deney numunelerinin, deniz suyu etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlar sonucunda kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim ise Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.22.'e göre, deniz etkisine bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin maruziyet süresinin artması ile kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir (Öndürücü ve ark., 2019). Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %4.68 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda bu düşüş %12.08 olarak gerçekleşmiştir.

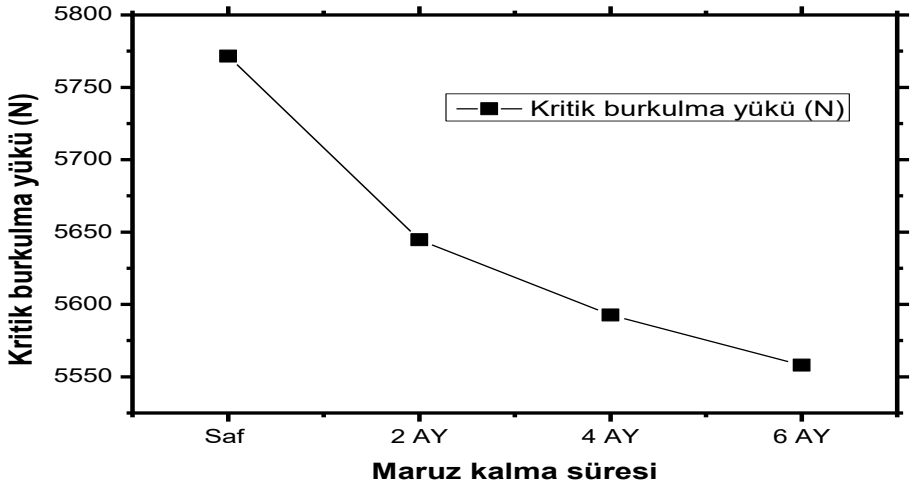
4.3.4. 2, 4 ve 6 ay toprak etkisine maruz cam elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Toprak etkisine, 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan cam elyaflı kompozit plakaların ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin, her bir oryantasyon açısı için değişim grafikleri ise Şekil 4.23., Şekil 4.24. ve Şekil 4.25.'te verilmiştir.

Çizelge 4.6. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0º, 45º ve 90º açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü (N)	Saf Kritik burkulma yükü(N)	Yüzde azalma (%)
Toprak	2 Ay	0°	5644.62	5771.59	2.2
		45°	974.37	1136.96	14.3
		90°	969.33	993.17	2.4
	4 Ay	0°	5592.67	5771.59	3.1
		45°	935.72	1136.96	17.7
		90°	967.35	993.17	2.6
	6 Ay	0°	5558.04	5771.59	3.7
		45°	820.89	1136.96	27.8
		90°	941.53	993.17	5.2

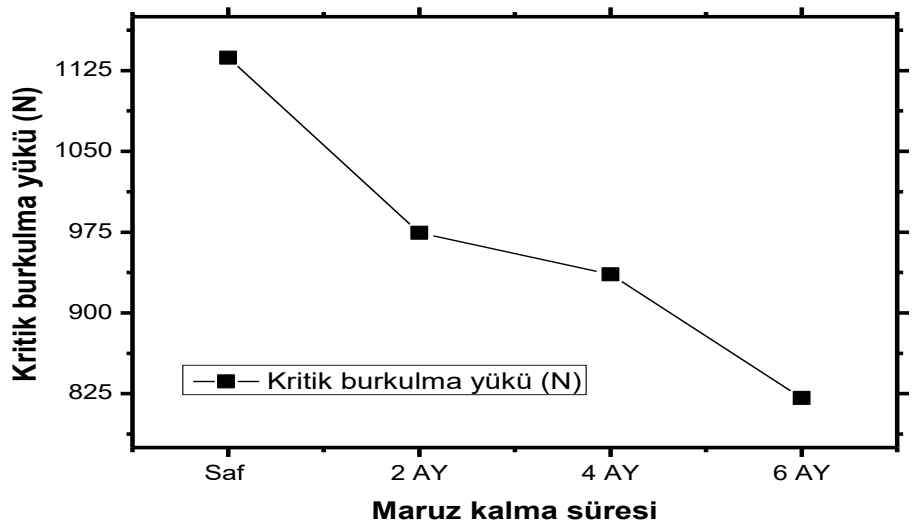
Çizelge 4.6.'da verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla toprak etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip kompozit deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.23.'te verilmiştir.



Şekil 4.23. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.23.'e göre, toprak etkisine bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresinin artması ile düşüş meydana gelmiştir. Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %2.19 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda %3.68 olarak gerçekleşmiştir.

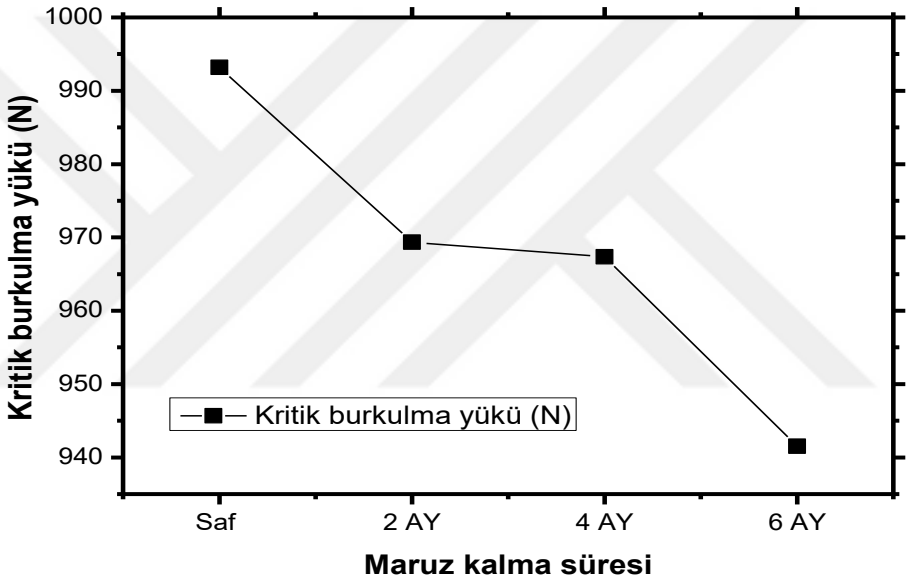
Çizelge 4.6.'da verilen, toprak etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 45° oryantasyon açılarına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim ise Şekil 4.24.'te verilmiştir.



Şekil 4.24. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.24.'e göre, toprak etkisine bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresinin artması ile düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %14.32 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda bu düşüş %27.85 olarak gerçekleşmiştir.

Son olarak, çizelge 4.6.'da verilen toprak etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 90° oryantasyon açılarına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği ise Şekil 4.25.'te verilmiştir.

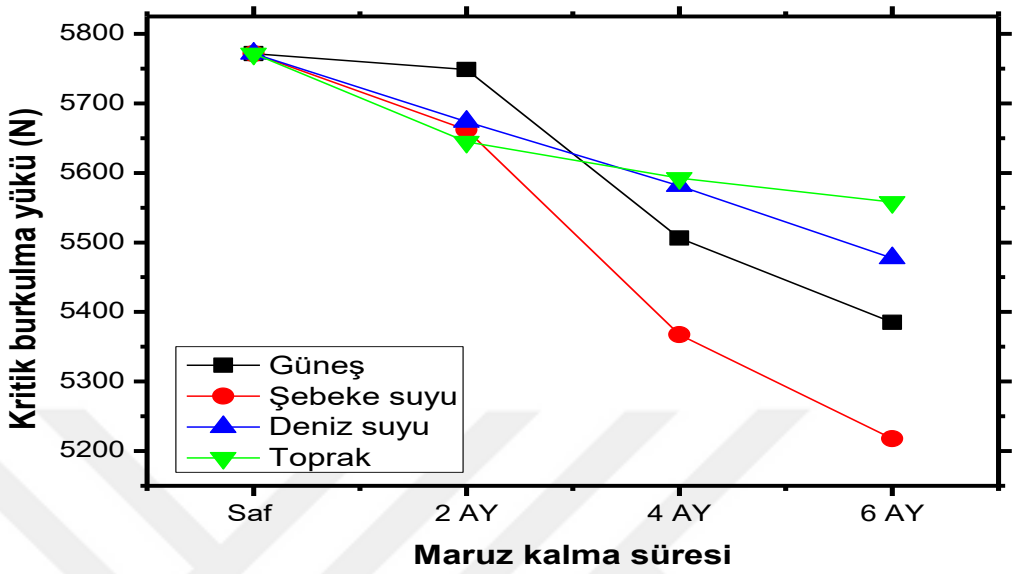


Şekil 4.25. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.25.'e göre, toprak etkisine bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerleri maruziyet süresinin artması ile düşüş meydana gelmiştir. Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %2.43 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda %5.56 olarak gerçekleşmiştir.

Çevresel şartlar olan güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak etkisine maruz bırakılan 0°, 90° ve 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerleri için elde edilen tüm veriler bir araya getirildiğinde, her

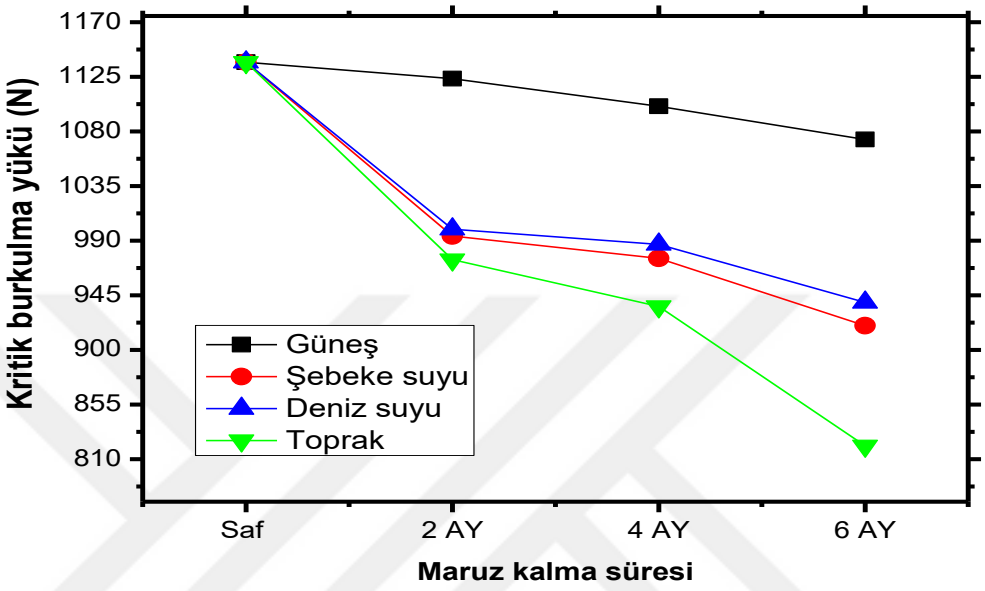
bir oryantasyon açısı için oluşan grafikler Şekil 4.26., Şekil 4.27. ve Şekil 4.28.'de sunulmuştur.



Şekil 4.26. Değişik çevre koşullara maruz 0° açılı cam elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim

Şekil 4.26'a göre, tüm çevresel şartların maruziyet süresinin artmasıyla 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yüklerini etkileyerek düşürmüştür. Söz gelimi, ikinci ayın sonunda birbirine çok yakın olsa da en çok etkileyen çevresel şartın toprak olduğu ve en az etkilendiği şartın güneş olduğu görülmekte, şebeke suyu ve deniz suyunun neredeyse aynı oranda etkilediği görülmektedir. Dördüncü aya bakıldığında, en çok etkilendiği çevresel şartın şebeke suyu olduğu en az etkilendiği çevresel şartın ise birbirine çok yakın değerler olan deniz suyu ve toprak etkisinin olduğu görülmektedir. Son olarak, altı ay süreyle maruziyet durumuna bakacak olursak, 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yüklerini en fazla düşürenden en aza doğru şebeke suyu, güneş, deniz suyu ve toprak olduğu anlaşılmıştır. Şekle göre, genel olarak ikinci ay hariç 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yüklerini en çok etkileyen çevresel şartın şebeke suyu olduğu belirlenmiştir.

Tüm çevresel şartlara (güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak) 2, 4 ve 6 aylık sürelerle tabi tutulan 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, her bir periyot sonunda oluşan kritik burkulma yük değerlerinde oluşan değişim sonuçları Şekil 4.27.'de verilmiştir.

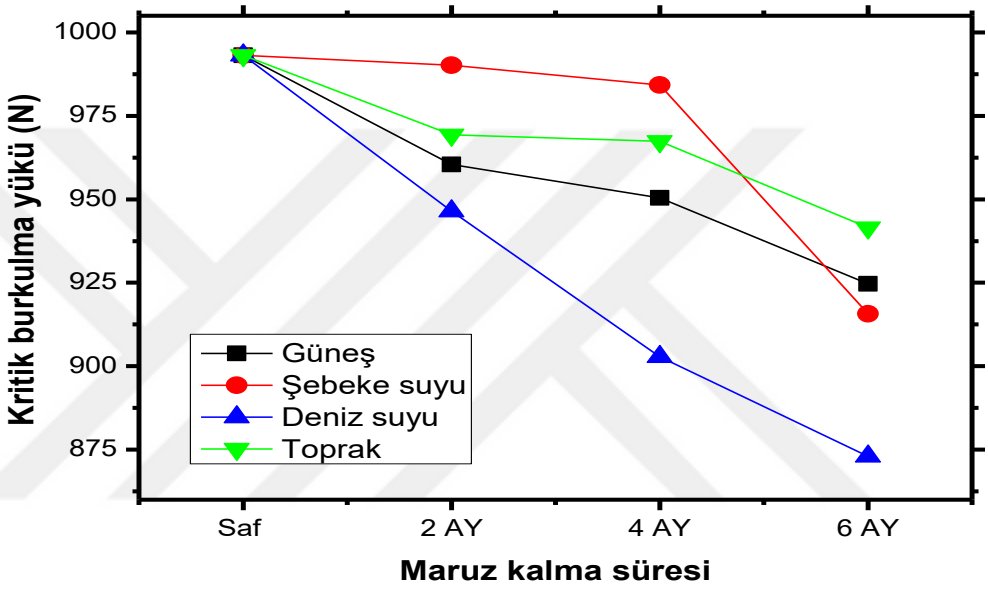


Şekil 4.27. Değişik çevre koşullara maruz 45° açılı cam elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim

Şekil 4.27. incelendiğinde, bütün çevresel şartların 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların kritik burkulma yüklerini etkileyerek düşürmüştür. Şekle bakacak olursak, ikinci ayın sonunda en fazla kritik burkulma yükünü etkileyen çevresel şartın toprak olduğu, en az etkileyenin ise güneş etkisinin olduğu görülmekle birlikte deniz suyu ve şebeke suyunun neredeyse aynı oranda etkilediği görülmektedir. Dördüncü ayın sonuna baktığımızda yine aynı sonuçları görmekteyiz ki en fazla kritik burkulma yükünü etkileyen çevresel şartın toprak, en az etkileyenin ise güneş etkisinin olduğu deniz suyu ve şebeke suyunun birbirine yakın olarak etkilediği görülmektedir. Son olarak, altıncı aya baktığımızda ise açık ara ile 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, toprak etkisinden en çok etkilendiği diğer çevresel şartların ise sırasıyla şebeke suyu, deniz suyu ve güneşin etkisinin olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, 2, 4 ve 6 ayların sonunda kritik

burkulma yüklerini en çok etkileyen çevresel şartın toprak, en az etkileyen çevresel şartın ise güneş etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.

Son olarak, tüm çevresel şartlara (güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak) 2, 4 ve 6 aylık sürelerle tabi tutulan 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, her bir periyot sonunda oluşan kritik burkulma yük değerlerinde oluşan değişim sonuçları Şekil 4.28.'de sunulmuştur.



Şekil 4.28. Değişik çevre koşullara maruz 90° açılı cam elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim

Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların çevresel şartlar altındaki kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği incelediğimizde, genel olarak kompozit plakaların çevresel şartlardan etkilendiği ve kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Çevresel etkilere maruz bıraktığımız periyotlar olan iki, dört ve altı ayların sonunda meydana gelen değişimlere baktığımızda, ikinci ayın sonunda kompozit plakaların kritik burkulma yüklerini en çok etkileyen çevresel şartın deniz suyu, en az etkileyenin şebeke suyu olduğu, güneş ve toprak etkisinin ise birbirine çok yakın değerlerde etkilemiştir. Dördüncü ayın sonuna baktığımızda, yine kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen çevresel şartın deniz suyu, en az etkileyenin ise şebeke

suyu olmuştur. Son olarak, altı ay maruziyet süresine baktığımızda ise kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen çevresel şartın deniz suyu, en az etkileyenin ise iki ve dördüncü aydan farklı olarak toprak etkisinin olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerlerini iki, dört ve altı aylık maruziyet sürelerinin sonunda en çok etkileyen çevresel şartın deniz suyu olduğu belirlenmiştir.

4.4. Çevresel Etkilere Maruz Bırakılan Karbon Elyaf Kompozitlerin Burkulma Deneyleri

Çevresel etkilere maruz bırakılan karbon elyaflı kompozit plakalar, her bir oryantasyon açısı için dörder numune olacak şekilde toplamda 144 adet deney numunesi ayrı ayrı dört farklı ortama ve belirli periyotlarla maruz bırakılmıştır. Farklı ortamlar ve belli periyotlar sırası ile güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak etkisinden geçirilen 2, 4 ve 6 aylık periyotlardır. Bu periyotlardan geçirilen her bir karbon elyaflı kompozit plakanın, burkulma deneyleri gerçekleştirilmiş olup çevresel etkilerin faklı oryantasyon açılarına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

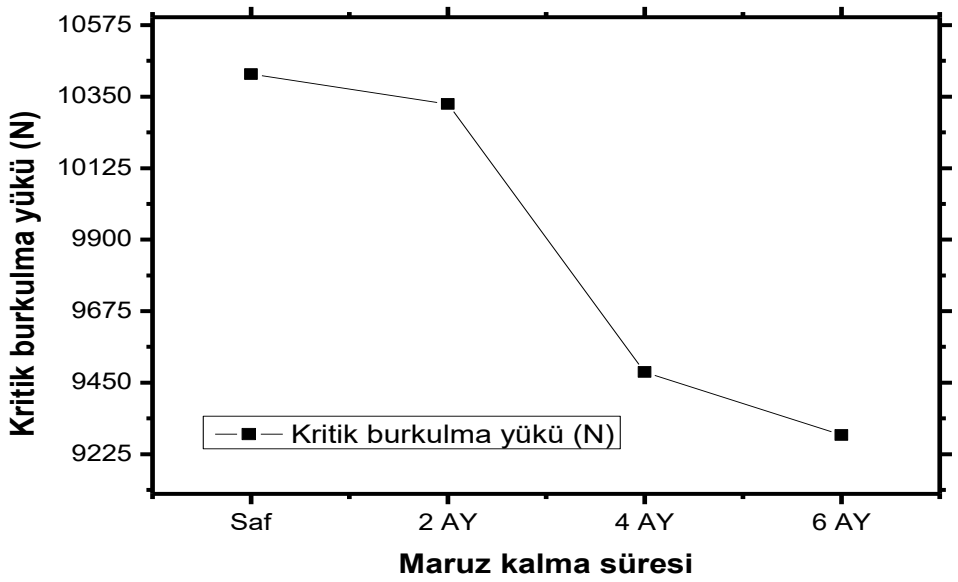
4.4.1. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Güneş etkisine, 2, 4 ve 6 sürelerle maruz bırakılan karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların, ayrı ayrı burkulma deneyleri gerçekleştirildikten sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin, her bir oryantasyon açısı için oluşan değişim grafiği ise Şekil 4.29., Şekil 4.30. ve Şekil 4.31.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü(N)	Saf Kritik burkulma yükü(N)	Yüzde azalma (%)
Güneş	2 Ay	0°	10327.18	10420.97	0.9
		45°	2490.15	2497.64	0.3
		90°	1903.61	1936.53	1.7
	4 Ay	0°	9483.08	10420.97	9
		45°	2392.74	2497.64	4.2
		90°	1893.93	1936.53	2.2
	6 Ay	0°	9285.08	10420.97	10.9
		45°	2315.31	2497.64	7.3
		90°	1646.05	1936.53	15

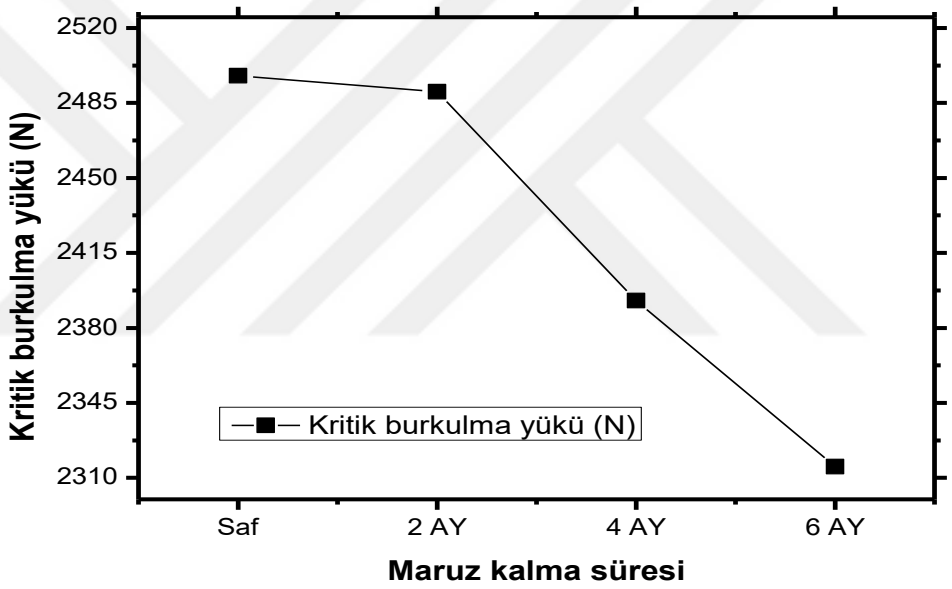
Çizelge 4.7'de verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla güneş etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.29.'da verilmiştir.



Şekil 4.29. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.29.'da görüldüğü üzere, karbon elyaflı deney numunelerinin güneş etkisine maruziyet süreleri artıkça kritik burkulma yük değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma, 2'nci ayın sonunda %0.93'lük bir düşüş ile neredeyse güneş etkisinden hiç etkilenmediği, 2 aydan sonra ki maruziyet sürelerinde ise gözle görülebilir bir düşüş gerçekleştiği bu düşüş, 4'üncü ayın sonunda %9.01 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda %10.94 olarak gerçekleşmiştir.

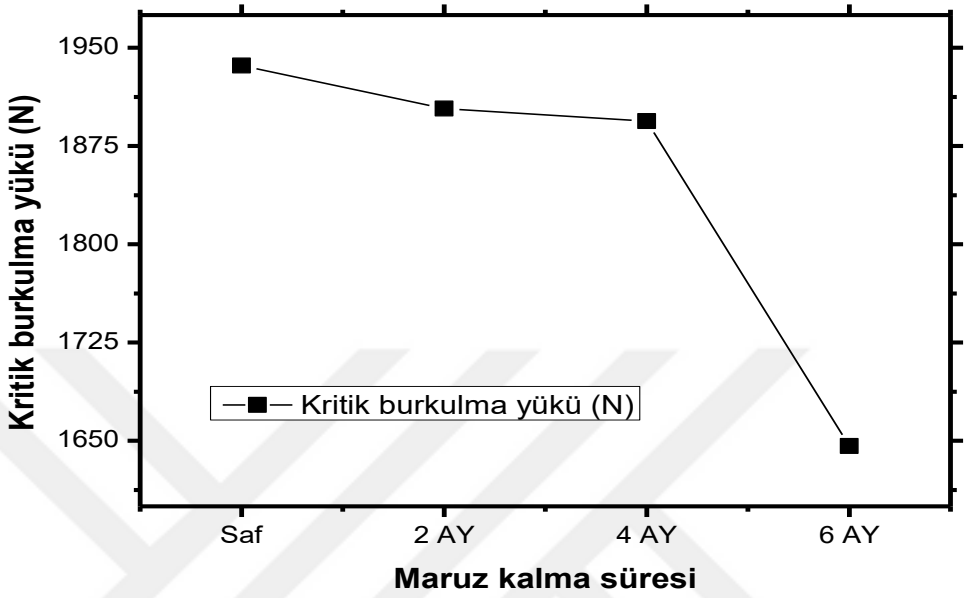
Güneş etkisine maruz kalan 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, 2, 4 ve 6 aylık periyotların sonunda kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.30.'da verilmiştir.



Şekil 4.30. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin kritik burkulma yük değerlerindeki değişim verileri incelendiğinde, maruz kalma süresi artmasıyla kritik burkulma yük değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %0.26 oranında en az olarak gerçekleşirken, en fazla düşüş ise 6'ncı ayın sonunda %7.33 olarak gerçekleşmiştir.

Son olarak, diğer bir oryantasyon açısı olan 90°'e sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, güneş etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotların sonunda kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim ise Şekil 4.31.'de verilmiştir.



Şekil 4.31. 2, 4 ve 6 ay güneşe maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.31. grafiğine göre, güneş etkisine maruz bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin diğer oryantasyon açıları gibi maruziyet süresinin artmasıyla kritik burkulma yük değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %1.67 oranında bir düşüş olarak gerçekleşirken, 6 ayın sonunda ise %14.96 olarak gerçekleşmiştir.

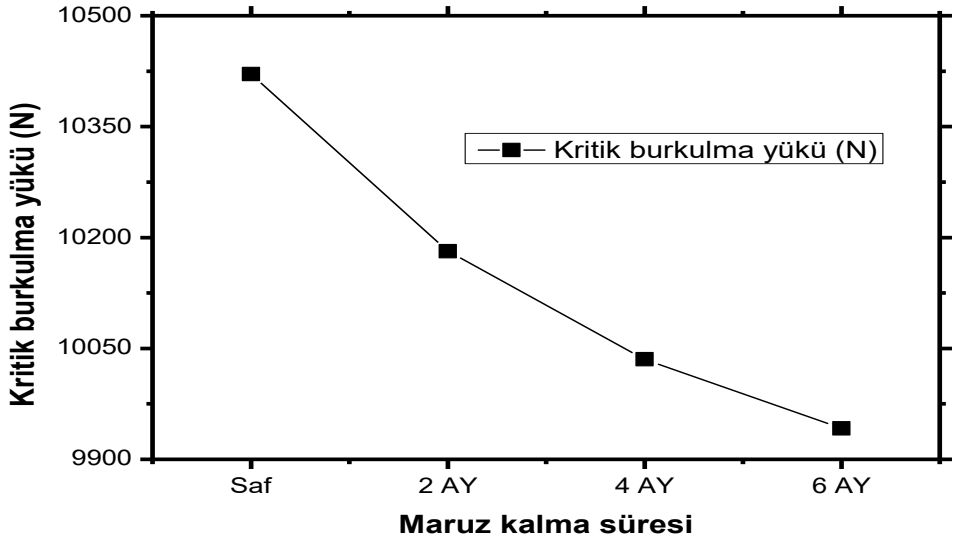
4.4.2. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Şebeke suyuna, 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan karbon elyaflı kompozit plakaların, ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.8.'de verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin her bir oryantasyon açısı için değişim grafikleri ise Şekil 4.32., Şekil 4.33. ve Şekil 4.34.'te verilmiştir.

Çizelge 4.8. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü(N)	Saf Kritik burkulma yükü(N)	Yüzde azalma (%)
Şebeke Suyu	2 Ay	0°	10181.29	10420.97	2.3
		45°	2245.38	2497.64	10.1
		90°	1756.43	1936.53	9.3
	4 Ay	0°	10035.4	10420.97	3.7
		45°	2220.40	2497.64	11.1
		90°	1692.53	1936.53	12.6
	6 Ay	0°	9941.61	10420.97	4.6
		45°	2182.94	2497.64	12.6
		90°	1506.62	1936.53	22.2

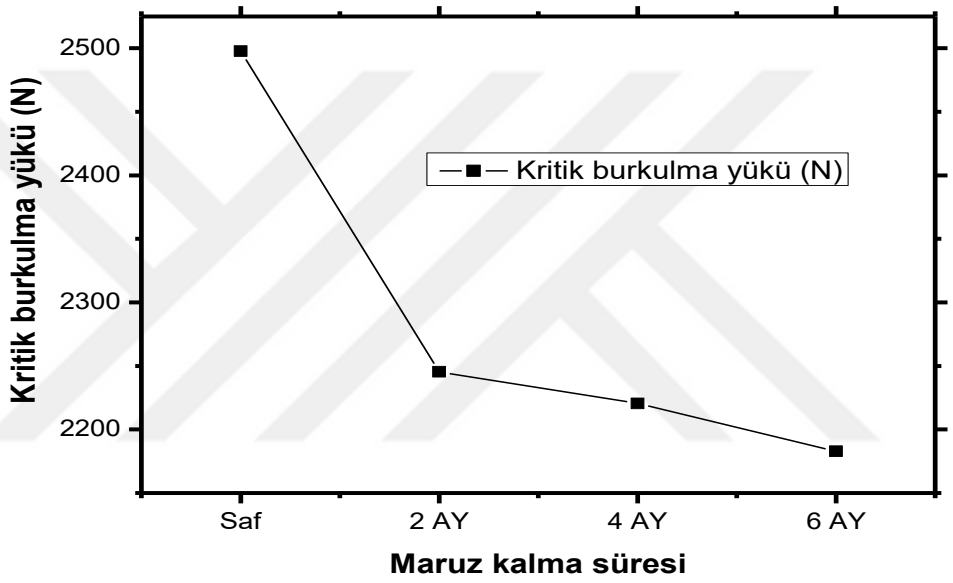
Çizelge 4.8.'de verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla şebeke suyu etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.32.'de verilmiştir.



Şekil 4.32. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.32.'e göre, şebeke suyuna 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz kalan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %2.29 iken 6'ncı ayın sonunda %4.61 olarak gerçekleşmiştir.

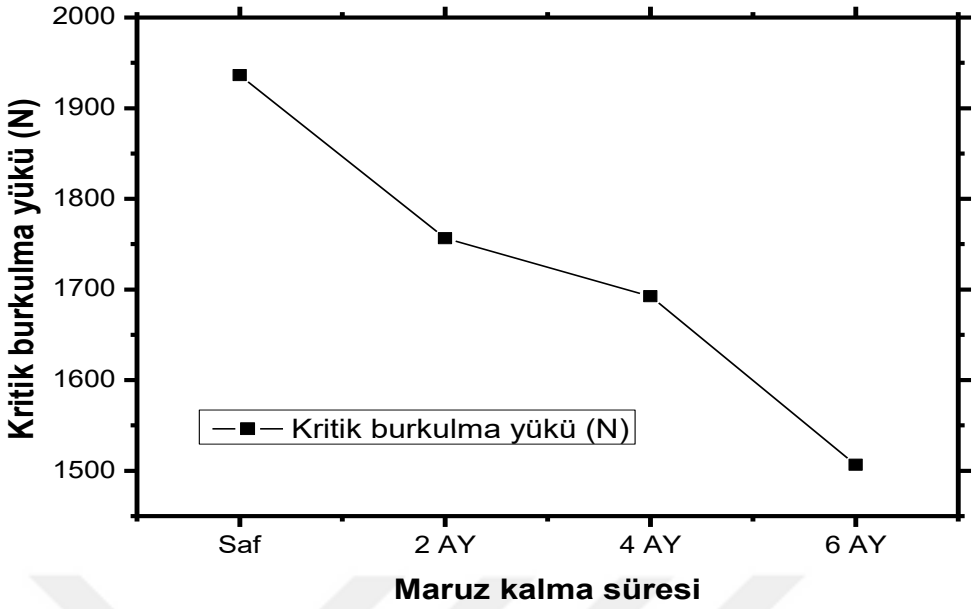
Şebeke suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 45° oryantasyon açılarına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği de Şekil 4.33.'te verilmiştir.



Şekil 4.33. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.33.'e bakıldığında, şebeke suyu etkisine bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresi artıkça düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %10.03 olarak gerçekleşmiş iken, 6'ncı ayın sonunda %12.63 olarak gerçekleşmiştir.

Son olarak, şebeke suyu etkisine 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği ise Şekil 4.34.'te verilmiştir.



Şekil 4.34. 2, 4 ve 6 ay şebeke suyuna maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.34.'e göre, şebeke suyuna 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresinin artması ile düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %9.25 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda %22.18 olarak gerçekleşmiştir.

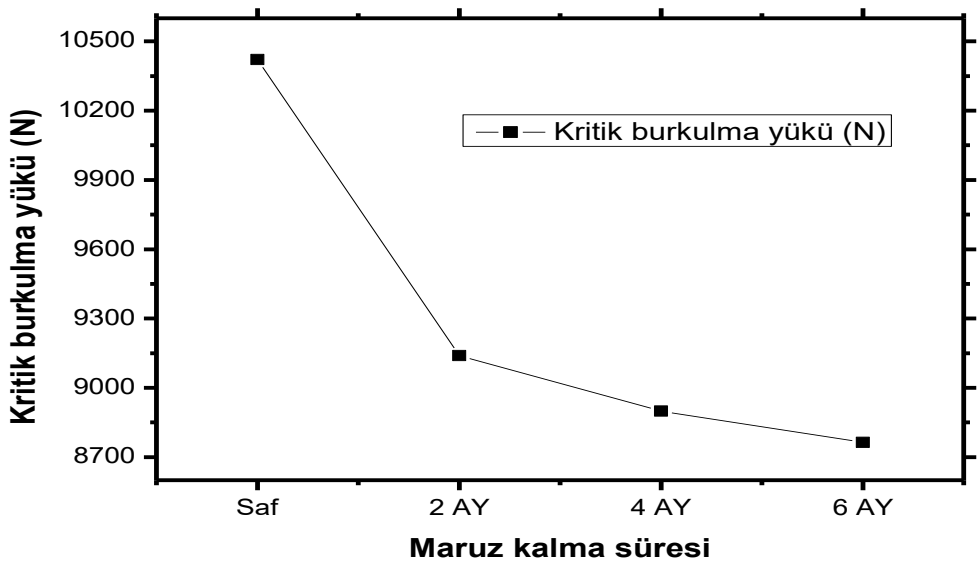
4.4.3. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Deniz suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan karbon elyaflı kompozit plakaların, ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.9.'da verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin, her bir oryantasyon açısı için değişim grafikleri ise Şekil 4.35., Şekil 4.36. ve Şekil 4.37.'de verilmiştir.

Çizelge 4.9. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü (N)	Saf Kritik burkulma yükü (N)	Yüzde azalma (%)
Deniz Suyu	2 Ay	0°	9139.2	10420.97	12.3
		45°	2385.25	2497.64	4.5
		90°	1872.62	1936.53	3.3
	4 Ay	0°	8899.51	10420.97	14.6
		45°	2252.87	2497.64	9.8
		90°	1793.23	1936.53	7.4
	6 Ay	0°	8764.04	10420.97	15.9
		45°	2242.88	2497.64	10.2
		90°	1783.54	1936.53	7.9

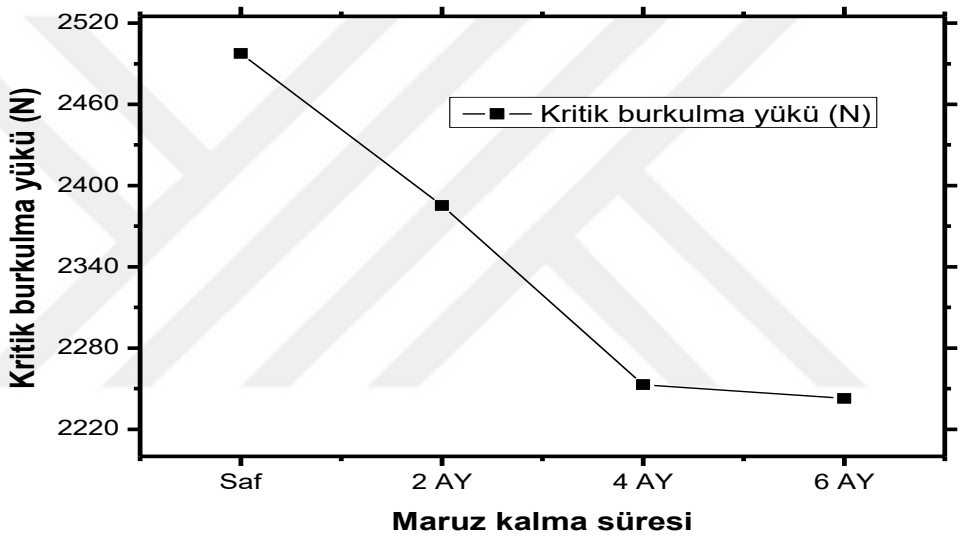
Çizelge 4.9.'da verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla deniz suyu etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.35.'te verilmiştir.



Şekil 4.35. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.35.'e göre, deniz suyu etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, deniz suyu içerisinde maruziyet süreleri artıkça kritik burkulma yük değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir (Öndürücü ve ark., 2019). Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %12.27 olarak gerçekleşmiş iken, 6'ncı ayın sonunda %15.87 olarak gerçekleşmiştir.

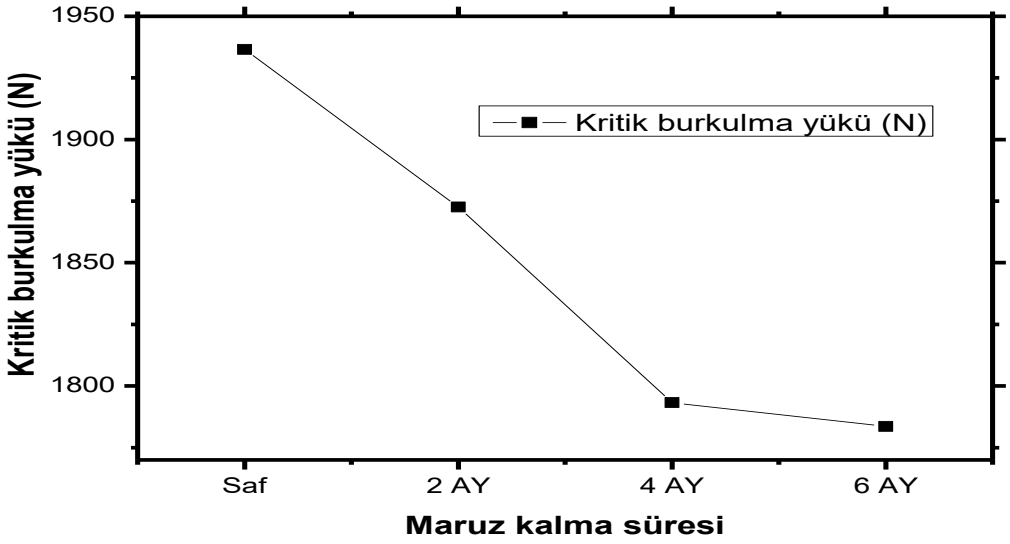
Deniz suyu etkisine, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 45° oryantasyon açılarına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerin de meydana gelen değişim grafiği Şekil 4.36.'da verilmiştir.



Şekil 4.36. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.36.'a göre, deniz suyu etkisine bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, maruziyet süresinin artması ile kritik burkulma yük değerlerinde 2'nci ayın sonunda %4.52'lik bir düşüş meydana gelirken, dördüncü ve altıncı ayların sonunda %9.75 ve %10.20'lük düşüşler ile birbirlerine yakın etkilenmiştir (Öndürücü ve ark., 2019).

Son olarak, diğer bir oryantasyon açısı olan 90°'e sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, deniz suyu etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlar sonucunda kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim grafiği ise Şekil 4.37.'de verilmiştir.



Şekil 4.37. 2, 4 ve 6 ay deniz suyuna maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.37.'e göre, deniz etkisine bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin maruziyet süresinin artması ile kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir (Öndürücü ve ark., 2019). Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %3.28 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda %7.93 olarak gerçekleşmiştir.

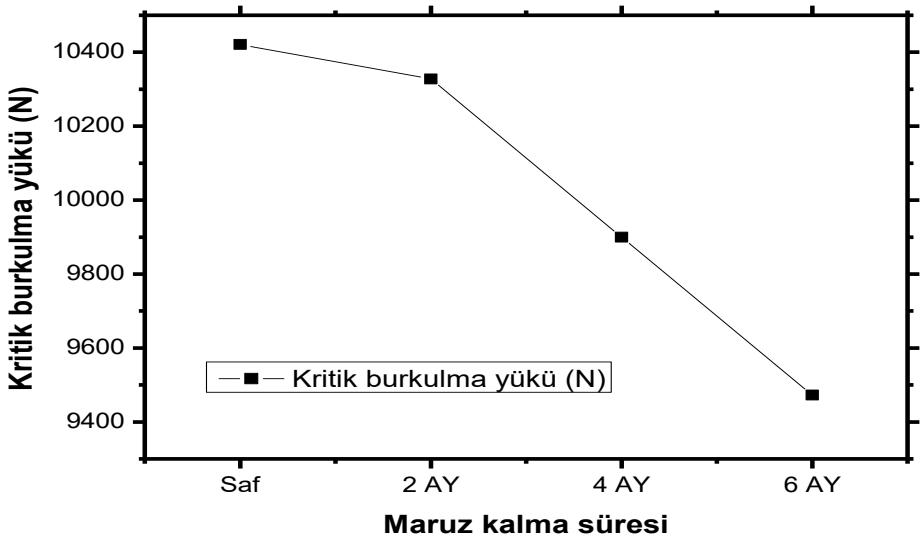
4.4.4. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz karbon elyaf kompozitlerin burkulma deneyleri

Toprak etkisine, 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan karbon elyaflı kompozit plakaların, ayrı ayrı burkulma deneyleri yapıldıktan sonra her bir oryantasyon açısı için oluşan ortalama kritik burkulma yük değerleri Çizelge 4.10.'da verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin, her bir oryantasyon açısı için değişim grafikleri ise Şekil 4.38., Şekil 4.39. ve Şekil 4.40.'ta sunulmuştur.

Çizelge 4.10. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0º, 45º ve 90º açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Ortam	Bekletilme Süresi	Oryantasyon açısı	Oluşan Kritik burkulma yükü (N)	Saf Kritik burkulma yükü (N)	Yüzde azalma (%)
Toprak	2 Ay	0°	10327.18	10420.97	0.9
		45°	2355.27	2497.64	5.7
		90°	1742.88	1936.53	10
	4 Ay	0°	9899.92	10420.97	5
		45°	2307.82	2497.64	7.6
		90°	1692.53	1936.53	12.6
	6 Ay	0°	9472.66	10420.97	9.1
		45°	2202.92	2497.64	11.8
		90°	1642.18	1936.53	15.2

Çizelge 4.10.'da verilen, 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla toprak etkisine maruz bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.38.'de verilmiştir.

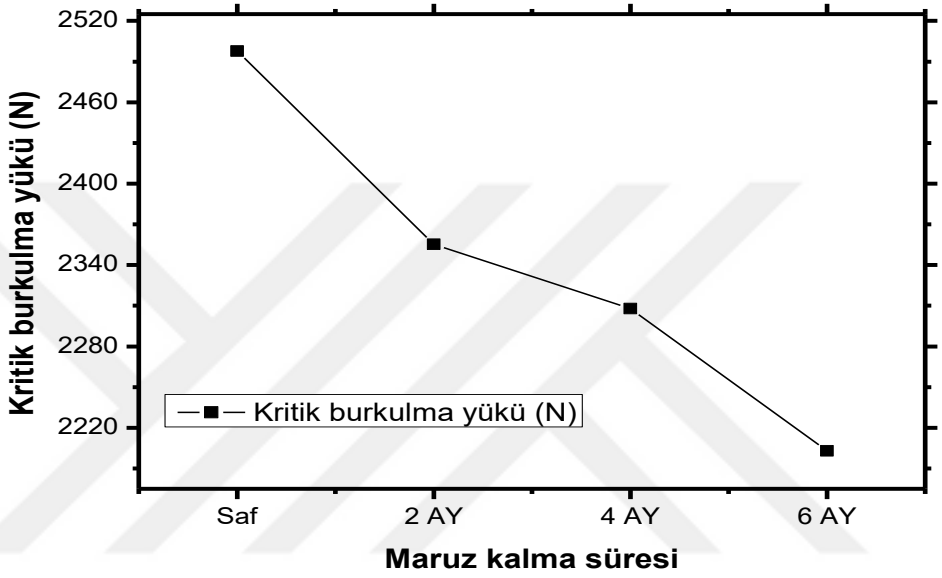


Şekil 4.38. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.38.'e göre, toprak etkisine bırakılan 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet

süresinin artması ile düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %0.85 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda bu düşüş %9.11 olarak gerçekleşmiştir.

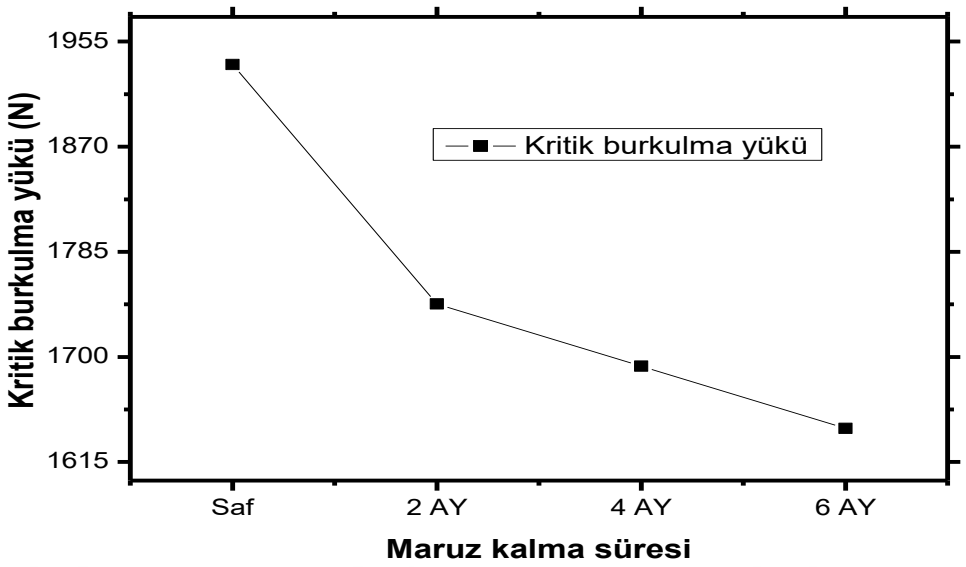
Çizelge 4.10.'da verilen, toprak etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 45° oryantasyon açılarına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.39.'da verilmiştir.



Şekil 4.39. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.39.'a göre, toprak etkisine bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresinin artması ile düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %5.71 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda bu düşüş %11.78 olarak gerçekleşmiştir.

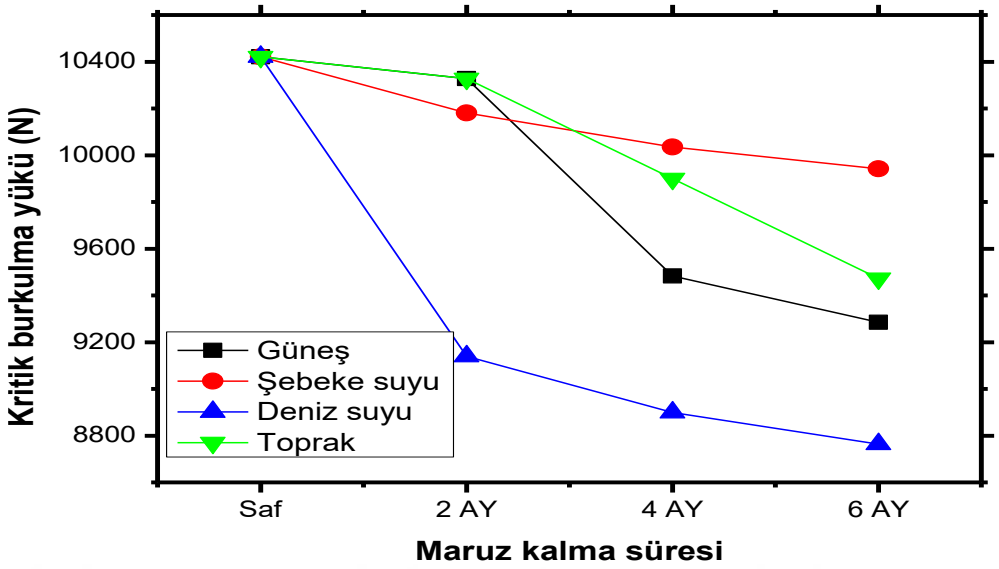
Çizelge 4.10.'da verilen, toprak etkisine 2, 4 ve 6 aylık periyotlarla maruz bırakılan 90° oryantasyon açılarına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen değişim ise Şekil 4.40.'ta verilmiştir.



Şekil 4.40. 2, 4 ve 6 ay toprağa maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin kritik yükleri

Şekil 4.40.'a göre, toprak etkisine bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı deney numunelerinin, kritik burkulma yük değerlerinde maruziyet süresinin artması ile düşüş meydana gelmiştir. Söz konusu bu düşüş, 2'nci ayın sonunda %3.28 olarak gerçekleşirken, 6'ncı ayın sonunda %7.93 olarak gerçekleşmiştir.

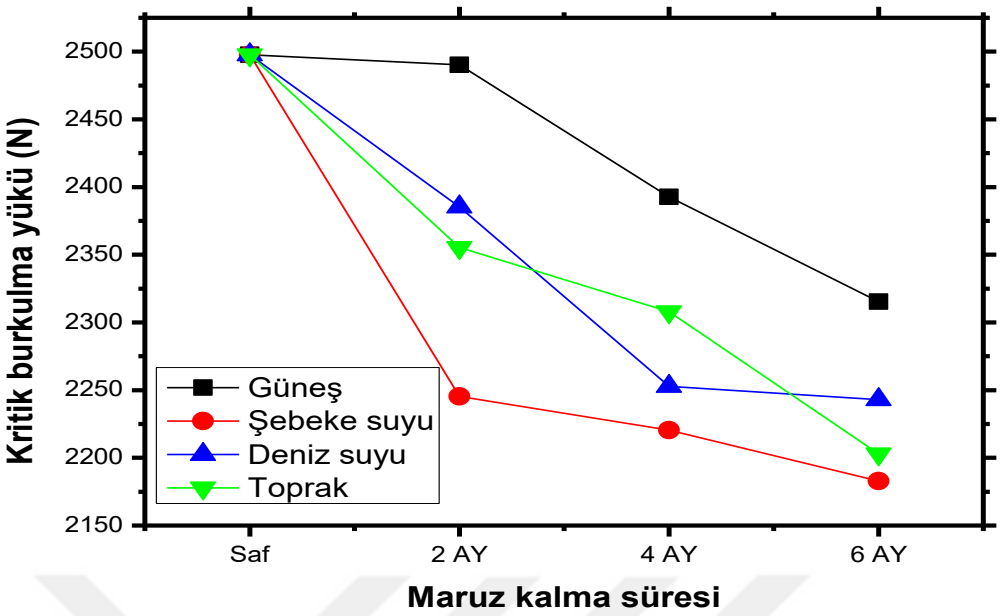
Çevresel şartlar olan güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak etkisine maruz bırakılan 0°, 90° ve 45° oryantasyon açılarına sahip karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerleri için elde edilen tüm veriler bir araya getirildiğinde her bir oryantasyon açısı için oluşan grafikler sırasıyla Şekil 4.41., Şekil 4.42. ve Şekil 4.43.'te verilmiştir.



Şekil 4.41. Değişik çevre koşullara maruz 0° açılı karbon elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim

Şekil 4.41.'den de görüleceği gibi, tüm çevresel şartların maruziyet süresinin artmasıyla 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yüklerini etkileyerek düşürmüştür. Söz gelimi, ikinci ayın sonunda en çok etkileyen çevresel şartın deniz suyu olduğu, güneş ve toprak etkisinin aynı oranlarda ve en az etkilemiştir. Dördüncü aya bakıldığında, yine aynı şekilde deniz suyu etkisinin 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların kritik burkulma yüklerini en çok etkilemişken, en az etkileyen çevresel şartın da şebeke suyu olmuştur. Son olarak, altı ay süreyle maruziyet durumuna bakıldığında en çok etkileyenden en aza doğru deniz suyu, güneş, toprak ve şebeke suyu olmuştur. Şekle göre, genel olarak bir değerlendirme yapıldığında 0° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yüklerini en çok etkileyen çevresel şartın deniz suyu olduğu, en az etkileyen çevresel etkinin ise iki ay maruziyet süresi hariç şebeke suyu olmuştur.

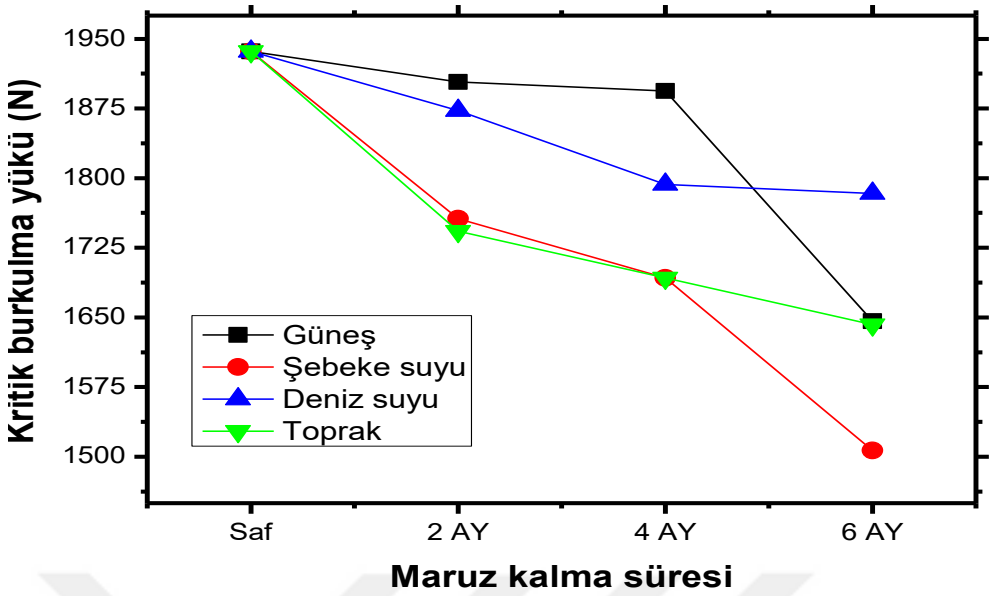
Tüm çevresel şartlara (güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak) 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, her bir periyot sonunda oluşan kritik burkulma yük değerlerindeki değişim sonuçları Şekil 4.42.'de verilmiştir.



Şekil 4.42. Değişik çevre koşullara maruz 45° açılı karbon elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim

Şekil 4.42.'yi incelediğimizde, bütün çevresel şartların 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerlerini etkileyerek düşürmüştür. Şekle bakacak olursak, ikinci ayın sonunda kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen çevresel şartın şebeke suyu olduğu, en az etkileyenin ise güneş etkisi olmuştur. Dördüncü ayın sonuna baktığımızda aynı durum söz konusu olduğu görülmekte yani kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen şebeke suyu, en az etkileyenin ise güneş etkisi olmuştur. Son olarak, altı ay maruziyet durumuna bakıldığında ise en çok etkileyenden en aza doğru şebeke suyu, toprak, deniz suyu ve güneş olmuştur. Sonuç olarak, 45° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların kritik burkulma yüklerini iki, dört ve altı aylık maruziyet sürelerinin sonunda en çok etkileyen çevresel şart şebeke suyu olmuştur.

Son olarak, tüm çevresel şartlara (güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak) 2, 4 ve 6 aylık sürelerle maruz bırakılan 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, her bir periyot sonunda oluşan kritik burkulma yük değerlerindeki değişim sonuçları Şekil 4.43.'te sunulmuştur.



Şekil 4.43. Değişik çevre koşullara maruz 90° açılı karbon elyaf kompozitlerin maruziyet sürelerine bağlı olarak kritik burkulma yüklerindeki değişim

Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, çevresel şartlar altındaki kritik burkulma yük değerlerindeki değişim grafiği incelediğimizde (Şekil 4.43.), genel olarak kompozit plakaların diğer oryantasyon açılarında olduğu gibi çevresel şartlardan etkilendiği ve kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Şekil incelendiğinde, iki ay maruziyet sonunda en çok etkileyen çevresel şartların birbirlerine çok yakın etkileyen şebeke suyu ve toprak etkisinin olduğu, en az etkileyenin ise güneş etkisi olmuştur. Dört ay sonundaki maruziyet durumuna bakıldığında yine aynı durum söz konusu olduğu görülmektedir. Son olarak, altı ay maruziyet durumuna baktığımızda ise sırasıyla kritik burkulma yüklerini en çok etkileyenden en az etkileyene doğru şebeke suyu, toprak, güneş ve deniz suyu olmuştur. Genel olarak şekli incelediğimizde ise 90° oryantasyon açısına sahip karbon elyaflı kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerlerini iki, dört ve altı aylık maruziyet sürelerinin sonunda en çok etkileyen çevresel şartın şebeke suyu olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan bu tez çalışmasında, farklı çevresel şartlara maruz bırakılan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların, kritik burkulma yük davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçların birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. Çalışmada, ilk olarak cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalar, su ile çalışan kesici testere yardımı ile farklı oryantasyon açılarına (0°, 45° ve 90°) sahip olacak şekilde ve 175x20x4.5 mm ebatlarında kesim işlemlerinden geçirilmiştir. Kesim işlemleri tamamlanan farklı oryantasyon açılarına sahip cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit deney numuneleri, çevresel etkilere maruz bırakılmadan önce burkulma deneyleri her iki tarafı ankastre olacak şekilde kritik burkulma yük değerleri tespit edilmiştir. Yük değerleri tespit edildikten sonra deney numuneleri, dört farklı çevresel şartlar olan güneş, şebeke suyu, deniz suyu ve toprak etkilerine iki, dört ve altı aylık periyodlarla maruz bırakılmıştır. Maruz bırakılan deney numuneleri, her periyod sonunda burkulma deneyleri gerçekleştirilerek kritik burkulma yük değerleri tespit edilmiş ve çevresel şartların etkileri incelenmiştir. Sonuçlar kıyaslandığında, çevresel etkilere iki, dört ve altı aylık periyotlarla maruz bırakılan farklı oryantasyon açılarına sahip kompozit malzemelerin, maruziyet periyotlarının sonunda kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışma (Öndürücü ve ark., 2019) ile uyuşmaktadır. Bu düşüşler, her bir periyodun sonunda çizelge 5.1., çizelge 5.2. ve çizelge 5.3.'teki gibi gerçekleşmiştir. Bu çalışmada elde edilen bilgi ve verilerin kullanılması durumunda, kompozit malzemelerden üretilmiş makine elemanlarının farklı çevresel etkiler altındaki kullanımı ve ayrıca malzeme seçimleri hakkında yol gösterici olacaktır.

Çizelge 5.1. İki ay çevresel etkilere maruz kalan cam ve karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde meydana gelen yüzde azalma oranları

Takviye malzemesi	Oryantasyon açısı	Yüzde azalma oranları (%)			
		Güneş	Şebeke suyu	Deniz suyu	Toprak
Cam	0°	0.42	1.93	1.66	2.19
	45°	1.19	12.67	12.02	14.31
	90°	3.27	0.26	4.68	2.37
Karbon	0°	0.93	2.29	12.27	0.85
	45°	0.26	10.03	4.52	5.71
	90°	1.69	9.25	3.28	9.95

Çizelge 5.1.'e göre, iki ay süre ile bütün çevresel faktörlerin cam ve karbon elyaflı kompozit plakaların, üç farklı oryantasyon açı durumu için kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Cam elyaflı epoksi kompozitler için sonuçlar değerlendirildiğinde, 0° ve 45° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yüklerini en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru toprak, şebeke suyu, deniz suyu ve güneş etkisi olmuştur. 90° oryantasyon açısına sahip numuneler için ise deniz suyu, güneş, toprak ve şebeke suyu etkisi olmuştur. Oryantasyon açıları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise, iki ay süre ile ortalama %10.05 azalma oranı ile en çok etkilenen 45° oryantasyon açısı olmuş, ortalama %1.55 azalma oranı ile en az etkilenen ise 0° oryantasyon açısına sahip kompozitler plakalar olmuştur.

Çizelge 5.1.'e göre, karbon elyaflı epoksi kompozitler için sonuçlar değerlendirildiğinde, 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru deniz suyu, şebeke suyu, güneş ve toprak etkisi olmuştur. 45° oryantasyon açısına sahip numunelere bakıldığında, kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru şebeke suyu, toprak, deniz suyu ve toprak etkisi olmuştur. Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip numuneler için sonuçlara baktığımızda ise, kritik burkulma yüklerini en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru toprak, şebeke suyu, deniz suyu ve güneş etkisi olmuştur. Sonuçlara

göre güneş etkisinin, üç farklı oryantasyon durumu için en az etkileyen çevresel etki olmuştur. Oryantasyon açıları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise, iki ay süre ile ortalama %6,05 azalma oranı ile en çok etkilenen 90° oryantasyon açısı olduğu, ortalama %4,08 azalma oranı ile en az etkilenen ise 0° oryantasyon açısına sahip kompozit plakalar olmuştur.

Dört ay süre ile çevresel etkilere maruz bırakılan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen yüzde azalma oranları Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Dört ay çevresel etkilere maruz cam ve karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde meydana gelen yüzde azalma oranları

Takviye malzemesi	Oryantasyon açısı	Yüzde azalma oranları (%)			
		Güneş	Şebeke suyu	Deniz suyu	Toprak
Cam	0°	4.55	7	3.31	3.09
	45°	3.15	14.21	13.20	17.67
	90°	3.27	0.92	9.05	2.55
Karbon	0°	9.01	3.73	14.62	4.97
	45°	4.24	11.12	9.75	7.6
	90°	2.22	12.58	7.40	12.61

İki ay maruziyet periyodu sonunda kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen düşüş gibi, dört aylık maruziyet sonunda da çevresel faktörlerin cam ve karbon elyaflı kompozit plakaların, üç farklı oryantasyon durumu için kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Söz konusu bu düşüş, cam elyaflı epoksi kompozit malzemeler için değerlendirildiğinde Çizelge 5.2.'den de görüldüğü üzere, 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru şebeke suyu, güneş, deniz suyu ve toprak etkisi olmuştur. 45° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini ise en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru toprak, şebeke suyu, deniz suyu ve güneş etkisi olmuştur. Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip numunelerin kritik burkulma yük değerlerini de en çok etkileyen

çevresel şarttan en az etkileyene doğru deniz suyu, güneş, toprak ve şebeke suyu etkisi olmuştur. Oryantasyon açıları kendi aralarında değerlendirildiğinde, dört ay maruziyet süresi sonunda ortalama %12.06 azalma oranı ile en çok etkilenen 45° oryantasyon açısı olduğu, ortalama %4.48 azalma oranı ile en az etkilenen ise 0° oryantasyon açısına sahip kompozit plakalar olmuştur.

Karbon elyaflı epoksi kompozitler için sonuçlar değerlendirildiğinde, 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru deniz suyu, güneş, toprak ve şebeke suyu etkisi olmuştur. 45° oryantasyon açısına sahip numuneler için, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru şebeke suyu, deniz suyu, toprak ve güneş etkisi olmuştur. Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip numuneler için en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru toprak, şebeke suyu, deniz suyu ve güneş etkisi olmuştur. Oryantasyon açıları kendi aralarında değerlendirildiğinde, dört ay maruziyet süresi sonunda ortalama azalma oranı %8.70 ile en çok etkilenen 90° oryantasyon açısı olduğu, ortalama değişim oranı %8.08 ile en az etkilenen ise 0° oryantasyon açısına sahip kompozit plakalar olmuştur.

Son olarak, altı ay süre ile çevresel etkilere maruz bırakılan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların, kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen yüzde azalma oranları Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Altı ay çevresel etkilere maruz cam ve karbon elyaflı kompozitlerin kritik burkulma yüklerinde meydana gelen yüzde azalma oranları

Takviye malzemesi	Oryantasyon açısı	Yüzde azalma oranları (%)			
		Güneş	Şebeke suyu	Deniz suyu	Toprak
Cam	0°	6.68	9.64	5.08	3.68
	45°	5.58	19.13	17.42	27.84
	90°	6.85	7.79	12.07	5.23
Karbon	0°	10.93	4.61	15.87	9.11
	45°	7.33	12.63	10.21	11.78
	90°	14.96	22.18	7.93	15.18

Son olarak, iki, dört ay maruziyet periyodu sonunda kritik burkulma yük değerlerinde meydana gelen düşüş gibi, altı ay maruziyet sonunda da bütün çevresel faktörlerin cam ve karbon elyaflı kompozit plakaların üç farklı oryantasyon durumu için kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana getirmiştir. Söz konusu bu düşüş, cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler için değerlendirildiğinde, Çizelge 5.3.'den de görüldüğü üzere 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru şebeke suyu, güneş, deniz suyu ve toprak etkisi olmuştur. 45° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru toprak, şebeke suyu, deniz suyu, güneş etkisi olmuştur. Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip numunelerin kritik burkulma yük değerlerini, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru deniz suyu, şebeke suyu, güneş ve toprak etkisi olmuştur. Oryantasyon açıları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise, altı ay maruziyet süresi sonunda ortalama %17.49 azalma oranı ile en çok etkilenen 45° oryantasyon açısı olduğu, ortalama değişim oranı %6.27 ile en az etkilenen ise 0° oryantasyon açısına sahip kompozit plakalar olmuştur.

Altı ay maruziyet durumu sonuçlarının karbon elyaflı epoksi kompozitler için değerlendirildiğinde, 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin kritik burkulma yük değerlerini, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru deniz suyu, güneş, toprak ve şebeke suyu etkisi olmuştur. 45° oryantasyon açısına sahip numuneler için de sonuçlar değerlendirildiğinde, en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru şebeke suyu, toprak, deniz suyu ve güneş etkisi olmuştur. Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip numuneleri ise en çok etkileyen çevresel şarttan en az etkileyene doğru şebeke suyu, toprak, güneş ve deniz suyu etkisi olmuştur. Oryantasyon açıları kendi aralarında değerlendirildiğinde ise, altı ay maruziyet süresi sonunda ortalama %15.06 azalma oranı ile en çok etkilenen 90° oryantasyon açısı olduğu, ortalama %10.13 değişim oranı ile en az etkilenen ise 0° oryantasyon açısına sahip kompozit plakalar olmuştur.

Çizelge 5.4. Üç farklı yönelim açısına sahip kompozitlerin dört farklı çevresel etkiye 2, 4 ve 6 ay maruziyet sonlarındaki yüzde değişim oranları

Malzeme	Açı	Yüzde değişim (%)											
		Güneş			Şebeke suyu			Deniz suyu			Toprak		
		2 ay	4 ay	6 ay	2 ay	4 ay	6 ay	2 ay	4 ay	6 ay	2 ay	4 ay	6 ay
Cam	0°	0.4	4.6	6.7	1.9	7	9.6	1.7	3.3	5.1	2.2	3.1	3.7
	45°	1.2	3.2	5.6	12.6	14.2	19.1	12.1	13.2	17.4	14.3	17.7	27.8
	90°	3.3	4.3	6.9	0.3	0.9	7.8	4.7	9.1	12.1	2.4	2.6	5.2
Karbon	0°	0.9	9	10.9	2.3	3.7	4.6	12.3	14.6	15.9	0.9	5	9.1
	45°	0.3	4.2	7.3	10.1	11.1	12.6	4.5	9.8	10.2	5.7	7.6	11.8
	90°	1.7	2.2	15	9.3	12.6	22.2	3.3	7.4	7.9	10	12.6	15.2

Yapılan tez kapsamında çevresel şartlara; 2, 4 ve 6 ay maruz bırakılan 0°, 45° ve 90° açılı cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar için elde edilen tüm sonuçlar bir araya getirildiğinde maruziyet sürelerindeki artış ile birlikte kritik burkulma yüklerinin çevresel şartlardan etkilendiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki çalışma (Öndürücü ve ark., 2019) sonuçlarıyla uyuşmaktadır. Bu etki, Çizelge 5.4.'te verilen cam elyaflı kompozit numunelerin her bir oryantasyon açısı için yüzde azalma oranları üzerinden incelendiğinde 0° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozit numuneler, şebeke suyunda maruziyet süresinin artışı ile nem miktarının artmasından kaynaklı olarak güneş, deniz suyu ve toprak etkilerine maruz numunelere oranla kompozit malzemedeki lifleri zayıflatması ve ara yüzey yapışmasını daha çok etkileyerek kritik burkulma yük değerlerini daha çok düşürdüğü görülmüştür. Güneş ve toprak etkileri maruz bıraktığımız zaman aralığı olan, haziran ayından aralık ayına kadar diğer faktörlerden (bulut, yağmur vs.) etkilenmesinden dolayı etkilerini tam olarak gösterememişlerdir.

45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı numuneler için topraktaki nem oranı, maruziyet süresinin artmasıyla etkisini daha çok göstermesinden güneş, şebeke suyu ve deniz suyu şartlarına oranla kritik burkulma yükünü daha fazla düşürdüğü görülmüştür.

Son olarak, 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozitlerde ise deniz suyu içerisinde bulunan tuz ve nem etkisi maruziyet süresindeki artış ile etkisini daha çok göstermesinden, diğer çevresel etkilere oranla 0° ve 45° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı kompozitlerde olduğu gibi cam liflerini zayıflatması ve ara yüzey yapışmasını etkileyerek kritik burkulma yükünü daha çok düşürdüğü tespit edilmiştir. Aslında, 90° oryantasyon açısına sahip cam elyaflı plakalarda burkulma yönünde daha çok epoksi görüldüğü için tuz ve nem etkisi epoksiyide etkilediği görülmüştür.

Çevresel koşullar etkisindeki farklı oryantasyon açılarına sahip cam elyaflı kompozit numunelere ait elde edilen tüm veriler birleştirildiği takdirde çevre faktörlerinin ve bu etkilere maruziyet sürelerindeki artışla beraber kritik burkulma yüklerine olan etkileri daha açık görülmüş olup çevresel koşullara maruz kompozitlerin burkulma davranışları hususunda önemli bilgiler tespit edilmiştir. Ayrıca, çeşitli çevresel şartlara 2, 4 ve 6 ay maruz bırakılan farklı oryantasyon açılı cam elyaf takviyeli kompozit plakalar nem ve tuzluluk etkisinin kritik burkulma yüklerini daha çok etkilediği yaptığımız burkulma deneylerinde açıkça görülmüştür.

Genel olarak, toprak etkisine maruz bırakılan cam elyaf takviyeli kompozit plakaların kritik burkulma yüklerinde zamana bağlı en fazla azalma oranı oluştuğu görülmüştür. Bu tez çalışmasında, çalışılan çevre şartları göz önüne alındığında toprak etkisinde bekletilen cam elyaflı numunelerin kritik burkulma yük değerlerinde en fazla düşme oluşturduğu görülmüştür. Buda, toprakta ki nem etkisinin zamanla cam elyaf takviyeli kompozitleri daha çok etkilediği sonucunu ortaya koymaktadır. Uygulanan maruziyet süresi göz önüne alındığında sırasıyla kritik burkulma yüklerini en çok etkileyenden en az etkileyene doğru toprak, deniz suyu, şebeke suyu ve güneş etkisinde bekletilen numunelerde oluştuğu görülmüştür. Toprak içerisinde bekletilen cam elyaflı kompozitlerde nem miktarı çok olacağından, bu ortamda çalışması gereken malzemelerde burkulmaya karşı korunma tedbirleri alınmalıdır.

Çevresel koşullar etkisindeki farklı oryantasyon açılarına sahip karbon elyaflı kompozit numunelere ait elde edilen tüm veriler birleştirildiğinde (Çizelge 5.4.) çevre faktörlerinin ve bu etkilere bekletilme sürelerindeki artışla beraber kritik

burkulma yüklerine olan etkileri açıkça görülmüştür. Çizelge 5.4.'e göre; karbon elyaf takviyeli kompozitler için sonuçlar incelendiğinde, 0° oryantasyon açısına sahip kompozitlerin çevresel şartlara bırakılma sürelerindeki artış ile ara yüzey yapışmasını ve elyafların zayıflamasını daha çok etkileyerek kritik burkulma yüklerini düşüren çevresel şartın; güneş, şebeke suyu ve toprak etkilerine oranla deniz suyu etkisinin daha çok düşürdüğü görülmüştür. Bu etki, deniz suyu içerisinde yer alan nem ve tuzluluk etkisinin karbon liflerini daha çok etkilemesi ile kritik burkulma yüklerini düşürdüğü sonucu çıkarılmıştır. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin özellikle güneşten çok etkilenmemesinin nedenlerinin; numunelerin ilgili çevre koşuluna maruziyet aralığı olan haziran ile aralık ayı döneminde bölgedeki aşırı arazi sulamalarından kaynaklı nem artışı (Şanlıurfa da yaz aylarında nem miktarı son yıllarda önemli oranda artmıştır) ve mevsimsel yağmur yağışları olduğu düşünülmektedir.

Benzer şekilde bu etkiyi, hem 45° hem 90° oryantasyon açısına sahip kompozit plakalar için ise şebeke suyundaki zamanla artan nem etkisinden kaynaklı olarak diğer çevresel etkilere oranla kritik burkulma yük değerlerini daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. Çeşitli çevresel şartlara; 2, 4 ve 6 ay maruz bırakılan farklı oryantasyon açılı karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar, cam elyaflı kompozitlerde olduğu gibi nem ve tuzluluk etkisinin kritik burkulma yüklerini daha çok etkilediği yaptığımız burkulma deneylerinde açıkça görülmüştür (Öndürücü ve ark., 2019).

Genel olarak, şebeke suyu etkisine maruz bırakılan karbon elyaf takviyeli kompozit plakaların kritik burkulma yüklerinde zamana bağlı en fazla azalma oranı gerçekleştiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında, çalışılan çevre şartları göz önüne alındığında şebeke suyu etkisinde bekletilen karbon elyaflı numunelerin kritik burkulma yük değerlerinde en fazla düşme oluştuğu görülmüştür. Uygulanan maruziyet süresi göz önüne alındığında sırasıyla kritik burkulma yüklerini en çok etkileyenden en az etkileyene doğru şebeke suyu, deniz suyu, toprak ve güneş etkisinde bekletilen numunelerde oluştuğu görülmüştür. Şebeke suyu içerisinde bekletilen karbon elyaflı

kompozitlerde zamanla nem miktarı artacağından bu ortamda çalışması gereken malzemelerde burkulmaya karşı korunma tedbirleri alınmalıdır.

Sonuç itibariyle, iki, dört ve altı ay periyotlarla çevresel etkilere maruz bırakılan 0°, 45° ve 90° oryantasyon açısına sahip cam ve karbon elyaflı kompozit malzemelerin kritik burkulma yük değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Sonuç verilerine göre, her üç periyodun sonunda en çok çevresel etkilerden etkilenen oryantasyon açıları, cam elyaflı kompozit plakalar için 45° oryantasyon açısına sahip kompozitler olurken, karbon elyaflı kompozitlerde ise 90° oryantasyon açısına sahip kompozitler olmuştur. Hem cam elyaflı hem de karbon elyaflı 0° oryantasyon açısına sahip kompozit plakaların, her üç periyodun sonunda çevresel etkilerden en az etkilenen oryantasyon açısı olmuştur. Bu çalışmada, elde edilen bilgi ve verilerin kullanılması durumunda kompozit malzemelerden üretilmiş makine elemanlarının farklı çevresel etkiler altındaki burkulma davranışları ve malzeme seçimleri hakkında yol gösterici olacaktır.

5.2. Öneriler

Yapılan tez çalışması ile çevresel şartlara maruz bırakılan cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin burkulma deneyleri yardımıyla kritik burkulma yükleri incelenmiştir. Aşağıdaki önerilerin mevcut tez çalışmasının daha ileriye götüreceği düşünülmektedir.

- Kullanılan takviye malzemeleri olan cam ve karbon elyaf yerine başka elyaf çeşidi veya matris malzemesi yerine farklı matris malzemeleri için inceleme yapılabilir.
- Kompozit plakalarda kullanılan tabaka sayısı düşürülerek çevresel etkilerin sonuçları incelenebilir.
- Çevresel etkilerin kompozit malzemelerin kritik burkulma yükleri üzerine etkisinin yanı sıra basma, çekme, eğme vs. gibi durumlar üzerine etkileri de incelenebilir.
- Maruz bırakılan çevresel etkilerin yerine farklı çevresel etkiler kullanılarak çalışma geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

AKSOYLU, B., 2007. Kompozit Malzemelerde Elyaf Burkulmasının Sayısal Olarak İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye, 166 s.

ASLAN, Z. and ŞAHİN, M., 2009. Buckling behavior and compressive failure of composite laminates containing multiple large delaminations. Composite Structures, 89(3): 382-390.

ASLAN, Z. and DARİCİK, F., 2016. Effects of multiple delaminations on the compressive, tensile, flexural, and buckling behaviour of E-glass/epoxy composites. Composites Part B: Engineering, 100: 186-196.

BABA, A.B., 2013. Delaminasyonlu tabakalı kompozit plakaların burkulma analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye. 55 s.

BEER, F.P., 2015. Cisimlerin mukavemeti. Literatür Yayıncılık.

DENİZ, M.E., 2017. Ortasında delik bulunan eğrisel yüzeyli kompozit plakların burkulma davranışı. DÜMF Mühendislik Dergisi, 8(1), 203-212.

DHUBAN, S.B., KARUPPANAN, S., MENGAL, A.N. and PATİL, S.S., 2017. Effect of fiber orientation and ply stacking sequence on buckling behaviour of basalt-carbon hybrid composite laminates. indian journal of Engineering and Materials Sciences, 23: 187-193.

EMAM, S. and ELTAHER, M.A., 2016. Buckling and postbuckling of composite beams in hygrothermal environments. Composite Structures, 152: 665-675.

ESFAHANİ, M.M., GHASEMNEJAD, H. and BARRİNGTON, P.E., 2010. Experimental and numerical buckling analysis of delaminated hybrid composite beam structures. In Applied Mechanics and Materials, 24: 393-400.

FENG, Y., ZHANG, H., TAN, X., HE, Y., AN, T. and ZHENG, J., 2016. Effect of impact damage positions on the buckling and post-buckling behaviors of stiffened composite panel. Composite Structures, 155: 184-196.

GENÇOĞLU, M., 2011. Tabakalı kompozit levhalarda burkulma analizi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ, Türkiye 182 s.

GHASEMNEJAD, H., OCCHİNERİ, L. and SWİFT-HOOK, D.T., 2011. Post-buckling failure in multi-delaminated composite wind turbine blade materials. Materials and Design, 32(10): 5106-5112.

HEİDARİ-RARANİ., M. KHALKHALİ-SHARİFİ, S.S. and SHOKRİEH, M.M., 2014. Effect of ply stacking sequence on buckling behavior of E-glass/epoxy laminated composites. Computational Materials Science, 89: 89-96.

JEYAPRAKASH, P., PRABHAKARAN, V. and DEVARAJU, A., 2018. Experimental and Numerical Analysis of Carbon Epoxy Fibre Composite under Buckling Load. Materials Today: Proceedings, 5(6): 14526-14530.

JUHASZ, Z. and SZEKRENYES, A., 2017. The effect of delamination on the critical buckling force of composite plates: Experiment and simulation. Composite Structures, 168: 456-464.

KARAMA, M., AFAQ, K.S. and MİSTOU, S., 2003. Mechanical behaviour of laminated composite beam by the new multi-layered laminated composite

structures model with transverse shear stress continuity. International Journal of solids and structures, 40(6): 1525-1546.
KISA, M., ÖZEN, M., DEĞİRMENCİ, D., DEMİRCAN, G. ve DİRİLMİŞ, M., 2017. Çevresel Etkilere Maruz Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 2(1): 54-59.
KUMAR, P.R., GUPTA, G., SHAMİLİ, G.K. and ANİTHA, D., 2018. Linear Buckling Analysis and Comparative Study of Un-stiffened and Stiffened Composite Plate. Materials Today: Proceedings, 5(2): 6059-6071.
ÖNDÜRÜCÜ, A. and KAYIRAN, H.F., 2019. Effect of seawater on the buckling behavior of hybrid composite plates. Journal of Composite Materials, 53(9), 1135-1144.
ÖZEN, M., 2017. E-cam/epoksi kompozitlerde lif doğrultularının gerilme gevşeme davranışı üzerindeki etkisi, Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 29(1): 219-224.
ÖZDİLLİ, Ö., 2007. Alüminyum metal matriksli kompozit malzemelerde fiber takviye açısının mekanik özelliklere etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye. 103 s.
RAJESH, M. and PİTCHAİMANİ, J., 2017. Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression. Composite Structures, 163: 302-311.
SHEN, H.S., XİANG, Y., LİN, F. and HUİ, D., 2017. Buckling and postbuckling of functionally graded graphene-reinforced composite laminated plates in thermal environments. Composites Part B: Engineering, 119: 67-78.
ŞENCAN, C., 2015. Kompozit plakalarda delaminasyonun yeri ve şeklinin serbest titreşim cevabına ve burkulma yüküne etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Türkiye. 156 s.
TEKİN, A., ESENDEMİR, Ü. ve ÖNDÜRÜCÜ, A., 2016. Farklı ortam koşullarına maruz bırakılan kompozit malzemenin eğilme davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1(21), 27-37.
TOPAL, E., 2014. Kompozit delikli kare levhalarda iki yönlü yükleme altında mekanik burkulmalarının incelenmesi. Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Çorum, Türkiye. 113 s.
URL-1, https://slideplayer.biz.tr/slide/3000598/, Erişim tarihi 12 aralık 2018.
URL-2, https://slideplayer.biz.tr/slide/3000598/, Erişim tarihi 12 aralık 2018.
VATANGÜL, E., 2008. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ansys 10 programı ile ısıl gerilme analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Bitirme Projesi, İzmir, Türkiye. 88 s.
WANG, P., HUANG, X., WANG, Z., GENG, X. and WANG, Y., 2018. Buckling and Post-Buckling Behaviors of a Variable Stiffness Composite Laminated Wing Box Structure. Applied Composite Materials, 25(2): 449-467.
YAMAN, N., ÖKTEM, T. ve SEVENTEKİN, N., 2007. Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. Tekstil ve Konfeksiyon, 17(2), 90-95.
YETER, E., 2013. Hibrid kompozit plakaların burkulma etkisinin araştırılması. Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gaziantep, Türkiye. 161 s.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Ali KURT
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : CİZRE/01.01.1992
Telefon : 0552 335 13 19
Faks :
E-mail : mkurt6313@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:Konya Karatay Anadolu Lisesi	2010
Üniversite	:Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016-2017	Ada Safran Yapı	Makina Mühendisi
2018-	Harran Üniversitesi	Araştırmacı

UZMANLIK ALANI

Kompozit, Sonlu Elemanlar Yöntemi

YABANCI DİLLER

İngilizce