

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**YANAL DEFORMASYONLARI KARBON ELYAF
KUMAŞ VE CAM ELYAF KUMAŞ İLE
SINIRLANDIRILMIŞ BETONLARIN EKSENEL YÜK
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

İsmail ÜNAL

**Tez Danışmanı
Dr. Öğretim Üyesi Handan ADIBELLİ**

Yozgat 2018

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**YANAL DEFORMASYONLARI KARBON ELYAF
KUMAŞ VE CAM ELYAF KUMAŞ İLE
SINIRLANDIRILMIŞ BETONLARIN EKSENEL YÜK
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

İsmail ÜNAL

**Tez Danışmanı
Dr. Öğretim Üyesi Handan ADIBELLİ**

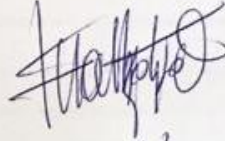
Yozgat 2018

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

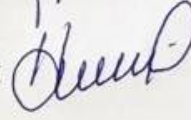
TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans/Doktora Programı 70110713004 numaralı öğrencisi İsmail ÜNAL 'ın hazırladığı "Yanal Deformasyonları Karbon Elyaf Kumaş ve Cam Elyaf Kumaş İle Sınırlandırılmış Betonların Eksenel Yük Altındaki Davranışının İncelenmesi" başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 19.04.2018 Perşembe günü saat 09.00'da yapılmış, tezin onayına oy birliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Fuat KÖKSAL



Jüri Üyesi (Danışman) : Doktor Öğretim Üyesi Handan ADIBELLİ



Jüri Üyesi : Doç. Dr. Burçin Şenol ŞEKER



ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 04.../05/2018 tarih ve 18-2 sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

04.../05/2018



Prof. Dr. Fuat KÖKSAL
Müdür

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
3. LİFLİ POLİMERLER	17
3.1. Lif Çeşitleri	18
3.1.1. Doğal Lifler.....	18
3.1.2. Metalik Lifler	18
3.1.3. Polimer Lifler	19
3.1.4. Cam Lifler	20
3.1.4.1. Cam Liflerin Özellikleri.....	21
3.1.4.2. Cam Liflerin Üretimi.....	21
3.1.4.3. Cam Liflerin Kullanım Alanları.....	25
3.1.4.4. Cam Liflerin Özellikleri ve Avantajları	26
3.1.5. Karbon Lifler.....	28
3.1.5.1. Karbon Liflerin Özellikleri	29
3.1.5.2. Karbon Liflerin Üretimi	29
3.1.5.3. Karbon Liflerin Kullanım Alanları	33
3.1.5.4. Karbon Liflerin Özellikleri ve Avantajları.....	34
3.1.6. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Avantajları	35
4. SARGILI BETON MODELLERİ.....	38
4.1. Betonun Gerilme-Şekil Değişirme Özellikleri.....	38
4.2. Sargılı Beton Davranışı	40
4.3. Sargılı Beton Modelleri.....	41
4.3.1. Richart ve Abbott (1975) Modeli.....	42
4.3.2. Samaan ve Diğ. (1998) Modeli	43
4.3.3. Lam ve Teng (2003) Modeli	43

4.3.4. Jiang ve Teng (2006) Modeli	44
4.3.5. Fahmy ve Wu (2010) Modeli	45
4.3.6. Tautanji (1999) Modeli	46
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	48
5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	48
5.1.1. Karbon Elyaf Kumaş	48
5.1.2. Cam Elyaf Kumaş	49
5.1.3. Epoksi Reçine	50
5.1.4. Beton	50
5.1.4.1. Agregata	51
5.1.4.2. Çimento	52
5.1.4.3. Beton Karışım Suyu	52
5.1.4.4. Katkı	53
5.1.4.5. Silis Dumanı	53
5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	54
5.2.1. Beton Numunelerin Hazırlanması	54
5.2.2. Elyaf Kumaşların Hazırlanması	56
5.2.3. Elyaf Kumaşların Beton Numunelere Sarılması	57
5.3. Deneylerin Yapılması	60
5.3.1. Referans Beton Numuneleri	60
5.3.2. Elyaf Sargılı Beton Numuneler	60
5.4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	61
5.4.1. Referans Beton Numuneleri	61
5.4.2. Karbon Elyaf (CFRP) Sargılı Beton Numuneler	63
5.4.3. UD Cam Elyaf (GFRP) Sargılı Beton Numuneler	75
6. SARGILI BETON MODELLERİNİN DENEY NUMUNELERİNE UYGULANMASI	83
6.1. Karbon Elyaf Sargılı Beton Numuneler	83
6.2. Cam Elyaf Sargılı Beton Numuneler	86
7. BULGULAR	91
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
KAYNAKLAR	98
ÖZGEÇMİŞ	104

**YANAL DEFORMASYONLARI KARBON ELYAF KUMAŞ VE CAM ELYAF
KUMAŞ İLE SINIRLANDIRILMIŞ BETONLARIN EKSENEL YÜK ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

İsmail ÜNAL

**Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2018; Sayfa:104

ÖZET

Bu çalışmada yanıl deformasyonları FRP ile sınırlandırılmış betonların deneysel davranışı incelenmiştir. C20, C50 ve C75 olmak üzere üç farklı beton sınıfı, tek kat ve iki kat olmak üzere iki farklı sargı kalınlığı ve CFRP (Karbon Lifleriyle Güçlendirilmiş Polimer) ve GFRP (Cam Lifleriyle Güçlendirilmiş Polimer) olmak üzere iki farklı sargı malzemesi kullanılmıştır. FRP ile sınırlandırılmış betonların mekanik davranışını belirlemek için deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Test sonucu olarak gerilme – şekil değiştirme ilişkisi grafik olarak sunulmuştur. Deneyle sonucunda sargılı betonun dayanım ve düktilitesi önemli ölçüde artmıştır. Bu artış beton dayanımının azalmasıyla artmıştır. Deneysel sonuçlar sargılı beton için kullanılan bazı modeller ile karşılaştırılmış ve grafik olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: FRP, GFRP, Sargı, Beton, Eksenel Basınç Dayanımı.

**INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF BELT DEFORMATIONS WITH
AXIAL LOADS CONTAINED WITH CARBON FIBER FABRIC AND GLASS
FIBER FABRIC**

İsmail ÜNAL

**Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis**

2018; Page: 104

ABSTRACT

In this paper, the experimental behavior of concrete confined lateral deformations by FRP (Fiber Reinforced Polymer) was investigated. Three different concrete grades of C20, C50, C75 and two different jacket thickness of single layer, double layer and two different jacket materials of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) were used as the variables. An experimental study were conducted to determine mechanical behaviour of concrete confined by FRP sheets. As an experimental test results, axial stress – strain relationship were given graphically. The strength and ductility of concrete were significantly increased by wrapping FRP sheets. This increase was decreases with concrete strength increase. The experimental results were compared with the results of some models for wrapped concretes and the results were given graphically.

Keywords: FRP, GFRP, Dressing, Concrete, Axial Pressure Strength.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez konumu bana öneren, bu tezi yöneten, bilgi ve tecrübeleriyle tezime ilgili her konuda yardımcı olan değerli hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Handan ADIBELLİ 'ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen hocalarım Sayın Prof. Dr. Fuat KÖKSAL 'a ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Yuşa ŞAHİN 'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimin süresi boyunca bana yakınlık gösteren ve çok rahat bir ortamda çalışmamı sağlayan emeği geçen Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görev yapan değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince gösterdikleri anlayıştan dolayı iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu hayatta desteklerini asla esirgemeyen ve bana olan güvenlerini asla kaybetmeyen kıymetli ve çok değerli ailem; annem Vicdan ÜNAL 'a, babam Celal ÜNAL 'a, eşim Tuğba Güçlü ÜNAL 'a ve oğlum Miraç Duha ÜNAL 'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmamın benzer çalışmalara kaynak ve örnek teşkil etmesini ve Ülkemize yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

İsmail ÜNAL

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Lif Tiplerinin Mekanik Özellikleri.....	17
Tablo 3.2. Bazı Metalik Liflerin Tipik Özellikleri	18
Tablo 3.3. Farklı Türdeki Liflere Ait Fiziksel Özellikler.....	19
Tablo 3.4. Polimerik Liflerin Fiziksel Özellikleri.....	20
Tablo 3.5. Bazı Cam Liflerine Ait Fiziksel ve Mekanik Özellikler	20
Tablo 3.6. Cam Fiber Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri.....	21
Tablo 3.7. Tekstil Cam Liflerinin % Karışım Oranları	22
Tablo 3.8. Cam Liflerin Fiziksel Özellikleri	27
Tablo 3.9. Cam Liflerin Kimyasal, Elektriksel ve Termal Özellikleri.....	28
Tablo 3.10. Cam Liflerin Genel Özellikleri ve Kimyasal Bileşimleri	28
Tablo 3.11. PAN Esaslı Karbon Liflerin Özellikleri.....	30
Tablo 3.12. Katran Esaslı Karbon Liflerin Özellikleri.....	31
Tablo 5.1. Karbon Elyaf Kumaşın Özellikleri	48
Tablo 5.2. Cam Elyaf Kumaşın Özellikleri.....	49
Tablo 5.3. Üretimde Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	51
Tablo 5.4. Üretimde Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları	51
Tablo 5.5. Kullanılan Çimentonun Özellikleri.....	52
Tablo 5.6. Master Glenium SKY506M Katkısına Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler.....	53
Tablo 5.7. Silis Dumanının Kimyasal Analizi.....	53
Tablo 5.8. Referans Beton Numuneleri İçin Mekanik Özellikler	62
Tablo 5.9. CFRP Sargılı Beton Numunelerine Ait Gerilme Değerleri.....	63
Tablo 5.10. GFRP Sargılı Beton Numunelerine Ait Gerilme Değerleri	73

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Yüksek Sıcaklıktaki Sıvı Cam Lifi	21
Şekil 3.2. Cam Lifi Üretim Prosesindeki Tipik İşlem Akış Şeması	24
Şekil 3.3. Cam Fiber Üretimi	25
Şekil 3.4. Cam Liflerinin Kullanım Yerlerine Göre Yüzdeleri	26
Şekil 3.5. PAN Esaslı Karbon Lifleri	29
Şekil 3.6. PAN Esaslı Karbon Lif Görünüşü	30
Şekil 3.7. PAN Lifinden Karbon Lif Üretim Aşamaları	32
Şekil 3.8. Karbon Liflerin Dünyadaki Ülkelere Göre Üretim Şeması	33
Şekil 3.9. Kullanım Alanlarına Göre Talebin Yıllara Göre Dağılımı	34
Şekil 4.1. Tipik Beton Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi	39
Şekil 4.2. Beton Dayanımının Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi İlişkisine Etkisi	39
Şekil 4.3. Betonun Üç Eksenli Gerilme Altındaki Davranışı	40
Şekil 4.4. Sargılı Beton Kesiti	41
Şekil 4.5. Richart ve Abbott Tarafından Önerilen Eğri	42
Şekil 4.6. Tautanji Tarafından Önerilen Eğri	46
Şekil 5.1. Elyaf Kumaşlarda Dokuma Biçimleri	48
Şekil 5.2. Karbon Elyaf Kumaş	49
Şekil 5.3. Cam Elyaf Kumaş	50
Şekil 5.4. Çift Bileşenli Epoksi	50
Şekil 5.5. Agrega Karışımına Ait Granülometri Eğrisi	51
Şekil 5.6. Master Glenium SKY560M Katkı	53
Şekil 5.7. Silis Dumanı	54
Şekil 5.8. Deneylerde Kullanılan Betoniyer	55
Şekil 5.9. Taze Beton Numuneleri	55
Şekil 5.10. Kür Havuzundaki Numuneler	56
Şekil 5.11. Karbon Elyaf Kumaşın Kesilmesi	56
Şekil 5.12. 300x600 mm Ölçülerinde Kesilerek Hazırlanan Kumaşlar	57
Şekil 5.13. C20, C50, C75 Beton Silindir Numuneleri Ayrı Ayrı	57
Şekil 5.14. C20, C50, C75 Beton Silindir Numuneleri Beraber	58

Şekil 5.15. Çift Bileşenli Epoksinin Hazırlanması	59
Şekil 5.16. Cam Elyaf Kumaşların Betona Sarılması	59
Şekil 5.17. Karbon Elyaf ve Cam Elyaf Sargılı Numuneler	60
Şekil 5.18. Deney Düzeneği.....	60
Şekil 5.19. C20 Referans Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri.....	61
Şekil 5.20. C50 Referans Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri.....	62
Şekil 5.21. C75 Referans Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri.....	62
Şekil 5.22. CFRP-C20 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği	63
Şekil 5.23. CFRP-C50 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği	65
Şekil 5.24. CFRP-C75 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği	66
Şekil 5.25. CFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	67
Şekil 5.26. CFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	67
Şekil 5.27. CFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	68
Şekil 5.28. CFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	68
Şekil 5.29. CFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	69
Şekil 5.30. CFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	69
Şekil 5.31. CFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	70
Şekil 5.32. CFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	70
Şekil 5.33. CFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	71
Şekil 5.34. CFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	71
Şekil 5.35. CFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	72
Şekil 5.36. CFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	72
Şekil 5.37. GFRP-C20 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği	74
Şekil 5.38. GFRP-C50 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği	75

Şekil 5.39. GFRP-C75 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafığı	76
Şekil 5.40. GFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	77
Şekil 5.41. GFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	77
Şekil 5.42. GFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	78
Şekil 5.43. GFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	78
Şekil 5.44. GFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	79
Şekil 5.45. GFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	79
Şekil 5.46. GFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	80
Şekil 5.47. GFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	80
Şekil 5.48. GFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	81
Şekil 5.49. GFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	81
Şekil 5.50. GFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi	82
Şekil 5.51. GFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası	82
Şekil 6.1. CFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	83
Şekil 6.2. CFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	84
Şekil 6.3. CFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	84
Şekil 6.4. CFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	85
Şekil 6.5. CFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	85
Şekil 6.6. CFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	86
Şekil 6.7. GFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	87
Şekil 6.8. GFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	87
Şekil 6.9. GFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	88

Şekil 6.10. GFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	89
Şekil 6.11. GFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	89
Şekil 6.12. GFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları	90
Şekil 7.1. C20 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Düşey Deformasyon Grafiği.....	92
Şekil 7.2. C50 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Düşey Deformasyon Grafiği.....	92
Şekil 7.3. C75 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Düşey Deformasyon Grafiği.....	93
Şekil 7.4. C20 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Yatay Deformasyon Grafiği.....	93
Şekil 7.5. C50 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Yatay Deformasyon Grafiği.....	94
Şekil 7.6. C75 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Yatay Deformasyon Grafiği.....	94

KISALTMALAR LİSTESİ

FRP	:Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	:Cam Elyaf Takviyeli Polimer
CFRP	:Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
σ_c	:Betonun gerilmesi
ϵ_c	:Betonun birim şekil değiştirme değeri
ϵ_{co}	:Sargısız betonun maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri
ϵ_{cu}	:Betonun nihai birim şekil değiştirmesi
f_c	:Betonun basınç dayanımı
f_c'	:Beton silindir basınç dayanımı
E_c	:Beton elastisite modülü
ϵ_{cc}	:Sargılı betonun maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri
ϵ_{cu}	:Sargısız betonda kabuk betonun dökülmesi sonrasında nihai birim şekil değiştirmesi
f_{cc}	:Sargılı betonun basınç dayanımı
f_{co}	:Sargısız betonun basınç dayanımı
E_{sec}	:Beton kesitin sekant modülü
f_{cc}	:Eksenel basınç dayanımı
σ_1	:Yanal basınç gerilmesi
K	:Yanal basınç katsayısı
F_j	:Sargı malzemesinin birim boyda oluşan çekme kuvveti
n_f	:Sargı malzemesinin kat sayısı
t	:Bir kat şeridin kalınlığı
f_i	:Sargı malzemesinde oluşan çekme gerilmesi
f_o	:İkinci eğrinin başlangıç noktasındaki gerilme (MPa)
f_{co}	:Sargısız betonun maksimum basınç dayanımı (MPa)
f_{c1}	:İlk eğrinin maksimum olduğu noktada sargılı betonun eksenel basınç dayanımı (MPa)
f_{lu}	:FRP'ye ait kopma anındaki yanal sargı basıncı (MPa)

- $f_{u,a}$** :FRP'ye ait kopma anındaki etkin yanal sargı basıncı (MPa)
- k_E** :FRP halkasında oluşan yanal şekil değiştirmeyi azaltma katsayısı
- n** :Eğri şekil parametresi
- E_{frp}** :FRP malzemesinin elastisite modülü (MPa)
- t_{frp}** :FRP malzemesinin kalınlığı (mm)
- D** :Betonun çapı (mm)
- f_{cc}** :Sargılı betonun maksimum basınç dayanımı (MPa)
- ϵ_{cu}** :FRP'nin koptuğu andaki maksimum dayanıma karşılık gelen eksenel şekil değiştirme değeri
- $\epsilon_{h,rupt}$** :FRP halkasının kopma şekil değiştirme değeri
- ϵ_{lu}** :FRP'nin kopma anındaki yanal şekil değiştirme değeri
- ϵ_{co}** :Sargısız beton dayanımına karşılık gelen noktadaki eksenel şekil değiştirme değeri
- ϵ_{c1}** :İlk eğrinin maksimum olduğu noktadaki gerilmeye karşılık gelen eksenel şekil değiştirme değeri
- E_1** :FRP'ye ait yanal sargı rijitliği (MPa)
- E_{c1}** :Sargılı betonun başlangıç eğimi (MPa)
- E_{c2}** :İkinci doğrunun eğimi (MPa)
- E'_{c2}** :Tautanji modelinde ikinci doğrunun eğimi (MPa)

1. GİRİŞ

Yapı ve yapı elemanları kullanım ömürleri boyunca birçok etkiye maruz kalmaktadır. Bu etkiler neticesinde yapıdaki performans düşebilmekte ve çeşitli hasarlar meydana gelebilmektedir. Yapının belirlenen işletme ömrünün tamamlanabilmesi ve kullanılabilirliğinin sürdürülebilmesi için farklı tedbirler alınabilir. Bunlardan biri, gevrek bir malzeme olan betonun dayanım ve sünekliğinin artırılmasıdır. Bunun için; betona naylon ve çelik lif eklemek, çeşitli katkıları kullanmak, basınca çalışan beton göbek kısmının etriye, fret gibi enine donatı ile sargılamak suretiyle yanal deformasyonları sınırlayarak dayanım ve sünekliği arttırmak ve betonun yanal deformasyonlarının çelik veya polimer tüp içerisine koyarak sınırlandırma yöntemlerinden biri kullanılabilir. Bu yöntemlere ek olarak özellikle son yıllarda kullanımı oldukça yaygınlaşan, çeşitli kalınlık, ağırlık ve lif dizilimlerine sahip elyaf kumaşlarla betonu sargılamak ihtiyaca göre onarım veya güçlendirme amacıyla tercih edilmektedir.

Güçlendirme; hasarsız yapı ve yapı elemanının çeşitli metotlarla iyileştirilmesi işlemidir. Onarım ise hasara sahip bir yapı veya yapı elemanının iyileştirilmesi işlemidir. Yapı elemanlarında eğilme dayanımı ve rijitliğin artırılması için lifli polimerler boylamasına, kesme dayanımının, sünekliğin, basınç dayanımının ve sismik dayanımın artması amacıyla enlemesine uygulanır. FRP sargılı kolonlar, artan sismik ve tekrarlı yüklere karşı daha fazla deplasman yaparak enerji sönümler. Kiriş – kolon birleşim bölgelerinde sargı donatısı sıklaştırmasına dikkat edilmemiş olan mevcut yapılarda FRP ile onarım bu eksikliği giderebilir [1].

Lifli polimer sargılı betonlarla ilgili araştırmalar 1950'lere dayanmaktadır. Ancak ülkemizde popülaritesi son yıllarda artmaya başlamıştır. Bu yöntem kullanılarak betonun dayanım ve süneklik gibi mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [1].

Betonların yanal deformasyonları lifli polimerler kullanılarak genel olarak iki farklı şekilde sınırlandırılmıştır. Bunlardan birincisi yapı elemanlarının beton dolu lifli polimer tüp şeklinde üretilmesi, ikincisi ve ülkemizde daha yaygın olanı ise var olan

beton ya da betonarme elemanın güçlendirme veya onarım amacıyla FRP sargı ve epoksi yardımıyla sarılarak incelenmesidir [2].

Beton dolu lifli tüp polimer, farklı kalınlıkta ve farklı cins kumaşlardan üretilmiş olan FRP boruların içerisine farklı sınıf betonlar konularak üretilir.

FRP tüpler beton için önemli bir biçim sağlarlar. İşçilikten, zamandan ve maliyetten kazandırır. Özellikle kolonlarda, betonarme kolonun sınırlandırılmasıyla betonun dayanımı ve duktilitesi artarken donatının burkulması önlenir. Ayrıca kolonun eğilme kapasitesi ve kesme dayanımı artar. GFRP malzeme özellikle sıcak yağ boruları üretiminde alüminyum ve paslanmaz çelikten daha fazla tercih edilir. Çünkü 140 C⁰ 'den daha fazla sıcaklıklara, doğrudan güneş ışığına, neme ve tuzlu suya dayanıklıdır [2].

FRP tüplerde aksel doğrultuda fiberlerin yerleştiği durumlarda fiber yüzdesinin veya fiber duvar kalınlığının artmasıyla hem ince hem de kalın tüplerin eğilme dayanımı artar. Bununla birlikte yapılan çalışmalarda ince tüplerde fiberlerin aksel doğrultuda yüzdelere artması aksel dayanım üzerinde önemli bir etki göstermemektedir [3].

Beton dolu FRP kullanımının son yıllarda alt yapı uygulamalarında da giderek daha popüler hale gelmiştir [4]. Altyapının bozulması inşaat mühendisliğinin büyük endişelerinden biridir [5].

Daha düşük trafik hacmi ve daha az yük için inşaa edilmiş karayolu köprülerinin artan trafik hacmi ve yüke göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Genelde bu amaçla çelik plaklar kullanılır. Çelik plak dayanımı ve rijitliği artırır. Ancak çelik-epoksi arasındaki korozyon olumsuz olabilir. Bu etkiyi önlemek için çelik yerine fiber kompozit kullanılabilir. Ayrıca çelik köprü ayaklarının korozyondan korunmasında ve onarımında da FRP sargı etkili olmaktadır.

Son yıllarda FRP kompozitler beton yapıların güçlendirilmesinde ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton ve betonarme yapıların yanı sıra çelik ve metalik yapıları güçlendirmek için FRP kullanımı önemli ölçüde dikkat çekmektedir [6].

Mevcut betonarme kolonlar, enine donatının yanlış seçilmesi, yapısal tasarımdaki hatalar, yük taşıma kapasitesi yetersizliği gibi çeşitli nedenlerden dolayı yapısal olarak yetersiz olabilir. Bu şekilde yetersiz olan betonarme kolonlar için karbon veya cam takviyeli sargı güçlendirme amacıyla etkili bir şekilde kullanılabilir. Bu kolonlar için FRP sargısının etkisi, numunelerin kare veya dikdörtgen olması durumunda köşe yarıçaplarına ve sınırlandırma için FRP tabakalarının sayısına bağlıdır [7].

Dairesel beton dolu FRP tüplerin basınç davranışları ile Karbon elyaf kumaş ile sarılmış beton silindir numunelerin basınç altındaki davranışları arasında belirgin fark görülmemiştir. Beton dolu CFRP tüp ile beton silindir numunenin sargılanmasıyla oluşturulan numunelerin basınç dayanımları oldukça yakın çıkmıştır [8].

FRP ile sınırlandırılmış beton silindirler üzerinde yapılan çalışmalarda aksenal basınç dayanımı ve burkulma dayanımının geliştirilmesinde kompozit fiberler etkili olmuştur [9]. Aksenal basınç altında numuneler karbon fiber kompozit kumaş aniden kopana kadar lineer bir davranış sergilerler [10]. Boyuna donatıların burkulmasının önlenmesi için ise sargılamanın enine doğrultuda yapılması gerekmektedir [11].

Bu tez çalışması 8 bölümden oluşmaktadır. 1. bölümde Giriş, 2. bölümde Literatür taraması, 3. bölümde ise Lifli polimerlerin genel özellikleri sunulmuştur. 4. bölümde Sargılı beton modelleri anlatılmış ve 5. bölümde ise Deneysel çalışmadan bahsedilmiştir. 6. bölümde Sargılı beton modellerinin deney numunelerine uygulanması anlatılmış ve 7. bölümde bulgulardan oluşmaktadır. 8. bölümde ise sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Mirmiran A. ve Shahawy M. (1996) yaptıkları çalışmada, FRP –Betonarme kompozit olarak üretilen numuneleri inceleyerek, beton dolu çelik tüplere benzer bir davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. Çelik tüplerin yerine kullanılan FRP borular, çelik tüpe benzer olarak beton için bir kalıp oluşturup biçim sağlamakla birlikte yüksek dayanım ve süneklilik de sağlarlar. Yapılan çalışmada sargılı betonarme kolonlar için yeni bir pasif sınırlama modeli ve dıştaki sargının yatay rijitlik üzerindeki etkisini belirlemek için yeni bir model geliştirilmiştir [2].

Fam A. Z. ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada, üç adet kiriş ve beş adet kolon olarak hazırlanan ve tamamen veya kısmen betonla doldurulmuş olan, dikdörtgen, cam elyaf takviyeli polimer tüpleri incelemişlerdir. Kiriş numuneler yer değiştirme kontrollü, 2000 kN kapasiteli, hidrolik preste dört noktalı eğilme testine tabi tutulurken, kolonlar ise 9000 kN kapasiteli basınç presinde test edilmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında kiriş ve kolonda farklı eksantrisite değerleri için, iki tanesi tamamen betonla dolu, bir tanesi ise kiriş ağırlığının en aza indirgenmesi için kısmen betonla doldurulan kirişler için deneysel çalışma ve sonuçlarını sunmuşlardır [3].

Yapılan çalışma sonucunda;

- Kısmen doldurulmuş kirişlerin tamamen doldurulmuş kirişlere benzer rijitlik göstermesine rağmen, farklı yerel kırılma ve bozulmalardan ötürü daha düşük eğilme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür.
- Kısa kolonlarda ise merkezi yüklü GFRP tüpünün orta bölgelerde daha yüksek dayanımlar oluşmuştur.

Raval R. Urmil D. (2013) aynı kesit alanına sahip dairesel, kare ve dikdörtgen kesitli betonarme kolonlar için GFRP ile güçlendirmenin etkisini incelemişlerdir. 1 m yüksekliğinde toplam 15 adet betonarme kolon numunesi hazırlanmıştır. Üretilen kolonlardan dokuz adedi kontrol numunesi olarak ayrılırken, kalan altı adet kolon ise köşe yarıçapları 20 mm olacak şekilde GFRP sargı ile güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre dayanım ile aksenal deformasyon yönünden daire kesitli numuneler kare ve dikdörtgen kesitli numunelere kıyasla daha iyi bir davranış sergilemiştir.

Ayrıca kolonun sargılanmasıyla, orijinal kolon boyutları değişmeden yük taşıma kapasitesi, mukavemet ve sünekliliği artmıştır [4].

Green M. F. ve ark. (2000) tarafından, tek eksenli FRP şeritler ile güçlendirilen 100 mm x 200 mm boyutlarında 27 adet betonarme kiriş numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmada, donma-çözülme döngüsünün lifli polimer ve beton arasındaki bağın üzerinde oluşturduğu olumsuz etkiler araştırılmıştır. Sürdürülen deneysel çalışmada, üretilen numuneler, bir su banyosunda 16 saat donma ve 8 saatte eritme (çözünme) işlemlerinden oluşan 200 defa donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Bununla birlikte, donma-çözünme deneyinden önce, çatlama yüzeyi tamamen beton yüzeyinde yer almaktayken, donma-çözünme döngüsünün tekrar sayısı artınca kırılma olayı yapıştırıcı tabaka içinde ve hatta lifli polimer plakası içinde gerçekleşmiştir. Bu olay yapıştırıcı malzemesinin donma-çözünme döngülerinden etkilenmesi ve kesme dayanımının azalmasından kaynaklanmıştır [5].

Teng J. G. ve Hu Y. M. (2007) tarafından yapılan çalışmada, FRP sargılı boşluklu çelik borular incelenmiştir. Mukavemet ve sünekliliği artırmak için betonarme kolonlarla yaygın olarak kullanılan sargılamanın etkisini çelik borularda incelemek için, çelik borularda eksenel basınç testleri yapılmıştır ve yapılan bu deneyler sonlu elemanlarla modellenmiştir. Bu testler sonucunda elde edilen hem deneysel hem de analitik sonuçlar, FRP sargının dairesel içi boş boruların güçlendirilmesi ve takviye edilmesi için çok faydalı bir teknik olduğunu göstermiştir. Ek olarak, FRP sargılı altı silindirin alt kısımları için sonlu eleman sonuçları FRP sargılama işleminin, ayakların tabana yakın kısmındaki çökmeleri engellemek veya azaltmak için etkili bir metot olduğunu göstermiştir [6].

Sharma S. S. ve ark. (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmada, değerlendirilen GFRP sarılı betonarme kolonların davranışı, sarılı olmayan betonarme kolonları için gözlemlenen performans ile karşılaştırılmıştır. Kesit boyutları 125 mm x 125 mm ve uzunluğu 1200 mm olan 15 adet betonarme kolon eksenel basınç altında test edilmiştir. Bu kolonlardan üç tanesi kontrol numunesi olarak belirlenmiştir. Köşe yarıçapı 25 mm olacak şekilde üç kolon sırasıyla bir ve iki kat GFRP ile sarılmıştır. GFRP kompozitinin erken yırtılmasını önlemek için, köşeler 5 mm yarıçapında yuvarlatılarak, kalan altı kolon sırasıyla bir veya bir ve iki kat GFRP ile köşe yarıçapı

5 mm olacak şekilde yuvarlatılarak sarılmıştır. Sonuçta, betonarme kolonlarının kare kesit kenarlarının düzgünleştirilmesinin, kenarlardaki GFRP kompozitinin kopmasını geciktirmede önemli rol oynadığı görülmektedir. Yazarlar GFRP tabaka sayısının basınç dayanımını arttırdığı ancak bu artış ile tabaka sayısı arasında lineer bir değişim olmadığını göstermişlerdir. Tabaka sayısının artmasıyla eksenel gerilme ve eksenel şekil değiştirme artmıştır [7].

Özbakkaloğlu T.(2013) eksenel basınç altında yaptığı çalışmada daire, dikdörtgen ve kare kesitli 92 adet beton dolu FRP numuneyi test ederek beton dayanımı, CFRP tüp malzemesinin türü, miktarı, tüplerin üretim metodu ve numune boyutlarının basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Geleneksel FRP tüplerine ek olarak, içerisinden FRP takviyeli yeni tür borular tasarlanmış ve test edilmiştir. Sonuçlar, beton dayanımı, kesit şekli, beton sınıfı, sargı malzemesinin miktarı, tüp malzemesinin cinsinin tüplerin davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Numune boyutunun ise basınç dayanımı üzerinde daha az etkili olduğu görülmüştür. Dairesel Beton dolu CFRP tüp ile beton silindir numunenin sargılanarak oluşturduğu FRP numunelerin basınç dayanımları oldukça yakın çıkmıştır [8].

Lorenzis L. D. ve Tefpers R. (2002) tarafından yapılan çalışmada, beton silindirlerin FRP levha veya tüpler ile sınırlandırılmasıyla eksenel basınç dayanımı ve taşıma kapasitelerinin arttığı görülmüştür. [9].

Xiao Y. ve Wu H. L. (2000) tarafından yapılan çalışmada, 152 mm x 305 mm boyutlarında 36 adet beton silindir numunesi eksenel basınç altında test edilmiştir. Üretilen 36 adet beton numuneden 27 adedi karbon fiber takviyeli kompozitlerle sarılarak güçlendirilmiştir. Bu numunelerin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 27,60 MPa, 37,90 MPa ve 48,20 MPa olarak elde edilen, farklı sınıflara ait beton silindir numunelerin, eksenel basınç altındaki davranışları incelenmiştir. Yazarlar bu çalışma kapsamında beton dayanımlarının ve karbon fiberin sargı kalınlığının etkilerini incelemiştir. Karbon fiber kompozit ile sarılan beton numunenin basınç dayanımları ve sünekliğinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Sonuçlarla ilgili olarak bir gerilme-deformasyon modeli önerilmiştir [10].

Wang Y. C. ve Restrepo J. (2001) tarafından yapılan çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer şeritler ile sarılan ve etriye ile sınırlandırılmış dikdörtgen veya kare numunenin kısa vadeli aksenal yük altındaki deformasyon davranışlarını değerlendirmek için analitik bir model önerilmiştir. Bu çalışmada 3 adet kare ve 3 adet dikdörtgen kolon hasar görene kadar aksenal basınç altında test edilmiştir. Sonuçlar, cam elyaf takviyeli polimer ile sarılan kolonların dayanımlarının yanı sıra şekil değiştirme özelliklerinin de iyileştiğini göstermiştir. [11].

Ritchie P. ve ark. (1991) tarafından yapılan çalışmada, FRP sargı ile dıştan güçlendirilmiş 16 adet kiriş teste tabi tutulmuştur. İnce tabakalı, cam, karbon ve aramid elyaflar iki parçalı bir epoksi kullanılarak kirişlerin çekme yüzeylerine yapıştırılmıştır. FRP plaka ile güçlendirilmiş kirişlerin rijitliklerinde %17 - %19 artış olurken, yük taşıma kapasitelerinde %40 - %97 artış olmuştur. Deneysel çalışma sırasında genellikle FRP plakalar ile kaplanmış kirişlerin uç bölgelerinde deformasyonlar görülmüştür. FRP plakalar ile kaplanmış kirişlerin rijitliklerini ve maksimum kuvvetini tahmin etmek için tekrarlanan analitik bir yöntem geliştirilmiştir. Maksimum moment bölgesinde başarısız olan kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilen değer ile %5'lik bir fark gösterdiği görülmüştür [12].

Mirmiran A. and Shahawy M. (1997) tarafından yapılan deneylerde, yüksek mukavemetli elyaf kompozitler ile betonu harici olarak sargılamanın, dayanım ve sünekliliği önemli ölçüde artırabildiği gibi büyük enerji emme kapasitesine de neden olduğu görülmüştür. Beton dolu FRP boru kullanılabileceği gibi mevcut kolonlar elyaf sargı ile sarılarak da kullanılabilir. Bu çalışmada FRP tüpler için tek aksenal basınç testlerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki mevcut modellerle karşılaştırılmıştır [13].

Saadatmanesh H. ve Ehsani M. R. (1991) tarafından, cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) plakalarının çekme flanşlarına yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş betonarme kirişleri deneysel olarak araştırılmıştır. Beş adet dikdörtgen kiriş ve bir adet T kiriş üzerinde dört noktalı eğilme etkisinde deneysel çalışma yapılmıştır. Dikdörtgen kirişler 455mm x 205mm boyutlarında, T kiriş flanşın genişliği ve kalınlığı ise sırasıyla 610mm, 75mm ve yüksekliği 455mm olarak verilmiştir. Kullanılan tüm

kirişler 4,88 m uzunluğunda olup sonuçlar, GFRP levhalarının kirişlere yapıştırılması ile betonarme kirişlerin eğilme dayanımının önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermiştir. Deney sonuçlarından güçlendirilen kirişlerin eğilme dayanımında artış gözlenirken çatlak aralığında ise azalma tespit edilmiştir. Buna ek olarak, epoksi bağlı plakalar görünür çatlakların oluşmasını geciktirerek ve daha yüksek yük seviyelerinde çatlak genişliklerini azaltarak kirişlerin çatlama davranışlarını geliştirmiş ve böylelikle eğilme çatlaklarının oluşumu gecikirken kiriş sinekliklerinin de azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca kiriş maksimum yük kapasitesinden %65 artış olduğu da deney sonuçlarında belirtilmiştir [14].

Tautanji H. A. ve Balaguru P. (1998) 'nun yaptıkları deneysel araştırmada, beton yapıların rehabilitasyonu ve güçlendirilmesi için etkili bir yöntem olarak fiber takviyeli polimer kompozit sargı kullanılmıştır. Islak-kuru ve dondurma-çözülme koşullarına tabi tutulan karbon ve cam FRP kompozit levhalarla sarılı beton kolonların performansı üzerine deneysel bir çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Bu deneysel çalışmada beton kolonlar, iki karbon ve bir cam olmak üzere üç farklı FRP tabaka ile sarılmıştır. Bu testler gerçekleştirilirken değişken olarak lif türü ve çevresel etkilere maruz kalma koşullarını içermiştir. Hazırlanan numuneler üç farklı ortamda incelenmiştir; birincisi oda sıcaklığı (+20 °C), ikincisi tuzlu su kullanılarak 300 defa ıslak-kuru döngü, üçüncüsü ise 300 defa dondurma-çözme döngüsü. Bu şartlara maruz kalmasının sonunda, dayanım, sağlamlık ve sünekliği değerlendirmek için gerilme-şekil değiştirme davranışı elde edilmiştir. Sonuçlar; karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) ile sarılan numunelerde ıslanma-kuruma nedeniyle güç veya süneklikte azalma olmadığını, buna karşılık cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) içeren numunelerde hem mukavemet hem de süneklikte azalma olduğu görülmüştür. Donma-çözünme durumundaysa hem CFRP hem de GFRP ile sarılmış numunelerde mukavemet ve süneklik önemli ölçüde azalmıştır [15].

Mander B. ve ark. (1988) tarafından tek eksenli basınç yüklemesine tabi tutulan ve enine donatı ile sınırlanan beton için, bir gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modele göre, sınırlandırılmış betonun sınırlandırılmamış betona göre nihai gerilmede ölçülen şekil değiştirmesinin değerinin gerilmeye göre beş kat daha fazla arttığı görülmüştür [16].

Toutanji H. A. (1999) yaptığı çalışmada, beton kolonlar üç farklı tipte FRP kompozit ile sarılmıştır. Sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış (kontrol) numuneler tek eksenli basınç testine tabi tutulmuştur. Eksenel yük ile eksenel ve yanal gerilmeler, sargılanmış numunelerin gerilme-şekil değiştirme davranışı, nihai dayanım, rijitlik ve sinekliğini değerlendirmek için elde edilmiştir. Sonuçlar, FRP kompozit levhalar ile dıştan betonu sınırlamanın, beton numunelerin mukavemetini, sünekliğini ve enerji emme kapasitesini önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. FRP kompozit levhalarla sarılmış beton numunelerin tüm gerilme-şekil değiştirme ilişkisini öngörmek için analitik bir model geliştirilmiştir. Deneysel ve analitik sonuçlar arasındaki karşılaştırma, modelin gerilme-şekil değiştirme tepkisi ile ilgili tatmin edici tahminler sağladığını göstermiş, literatürde mevcut olan FRP tabakalarıyla sınırlı beton üzerine yapılan bir dizi deneyin sonuçları da modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak yakın değerler bulunmuştur [17].

Demers M. ve Neale K. W. (1999) yapısal güçlendirme ve onarım için, fiber takviyeli polimer kompozit levhaların beton kolonların etrafına sarılmasını incelemişlerdir. 300 mm çapında ve 1200 mm yüksekliğinde 16 adet dairesel betonarme kolon için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Üretilen kolonlar epoksi yardımıyla karbon levhalarla sınırlandırılmış ve eksenel basınç ile merkezi olarak yüklenmiştir. Bu çalışmada; beton dayanımı, boyuna donatı miktarı, sargının etriye veya fret olması gibi parametrelerin kolonların yapısal davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Test sonuçları güçlendirmenin kompozit malzemelerle yapılması sonucunda; sünekliğin arttığını göstermekle birlikte eksenel yük taşıma kapasitesinin artırdığını da göstermiştir. Ayrıca önceden hasar görmüş ve sonrasında güçlendirilmiş numunelerin doğrudan güçlendirilmiş numunelere çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [18].

Fam A. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tamamen dolu GFRP tüpler ile kısmen dolu GFRP tüpler incelenmiştir. Çalışma kapsamında, eksenel basınç yükleri altında GFRP tüplerin kullanımının sınırlandırılmaya bağlı olarak betonun mukavemetinde ve sünekliğinde bir artışa sebep olduğunu göstermişlerdir. Tamamen dolu tüplerde, kısmen dolu tüplere kıyasla daha yüksek dayanım sağlanmıştır. Numunelerin ortasında delik bulunması sınırlama etkisini azaltırken, iç tüpün kullanılması bu tür

numunelerde sınırlandırmayı artırabilmiştir. Çalışma kapsamında aynı zamanda çelik boruların burkulmasında beton dolununun fayda ve daha yüksek mukavemet sağladığı görülmüştür. Test sonuçlarına göre, eğilme davranışının, kullanılan çelik tüpün rijitlik, çap, kalınlık oranlarına oldukça bağlı olduğunu ancak daha az ölçüde beton dayanımının etkili olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda burkulma mukavemetinde beton sarılma katkısının önemsiz denecek kadar az olduğu, süneklik artışı için bu katkının arttığı görülmüştür. FRP tüpler tarafından sınırlandırılmış eksenel yüklü dairesel beton kolonların davranışını öngörmek için, Mander ve diğerleri (1988) tarafından çelik takviye ile sınırlandırılmış beton için uygulanan sınırlandırma modelinin bir uzantısı olan bir analitik model geliştirilmiştir. Bu modelin geliştirilmesi eksenel yükün eksantrisitesi arttıkça kademeli olarak indirgemeyi hesaplamak için istenmiştir [19].

De Lorenzis L. ve ark. (2000), betonarme yapıları güçlendirmek için kullanılan FRP sistemlerinin etkinliğini incelemiştir. Bu deneysel çalışmada, T kesitli betonarme kirişte eğilme momentine karşı güçlendirme uygulaması için farklı boyutlarda olan cam ve karbon lifli polimer çubuklar kullanılmıştır. Güçlendirilmiş olan kiriş numunelerde, kontrol kirişe kıyasla %25 - %44 aralığında değişen kapasite artışı görülmüştür ve rijitlik değerinde önemli artışlar meydana gelmiştir [20].

Mirmiran A. ve ark. (2001) tarafından yapılan çalışmada, beton doldurulmuş elyaf takviyeli polimer tüplerinin sınırlayıcı etkileri nedeniyle geleneksel betonarme elemanlarla karşılaştırılabilir bir performansa sahip oldukları görülmüştür. Ancak, mukavemet ve sünekliğin geliştirilmesinde ince kesitlere, istikrarsızlığa, geometrik ve yükleme koşullarına dikkat edilmelidir. Toplam 7 adet hibrit kolonda tek eksenli basınç testleri narinlik oranlarında %36 artma ile eşdeğer kısa kolonun mukavemetinin %71 kadar azaldığını göstermiştir. FRP malzemenin çelikten daha yüksek bir mukavemete ve daha düşük bir rijitliğe sahip olmasından dolayı hibrit-FRP kolonlar narinlik etkilerine karşı daha hassastır.[21].

Deniaud C. ve Cheng J. J. R. (2001) tarafından yapılan çalışmada, kesme donatısı ve harici elyaf takviyeli polimer levhalarının, betonarme kirişlerin kesme kuvvetine etkileri araştırılmıştır. Bu amaca yönelik olarak üretilen sekiz adet 600 mm yükseklikte T kiriş test edilmiştir. T kirişler güçlendirmek için üç tip FRP

uygulanmıştır. Uygulanan FRP'ler; tek eksenli cam elyaf, tek eksenli karbon elyaf ve iki eksenli cam elyaf içermektedir. Test sonuçları; FRP kompozitler ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımlarında FRP kompozit ile güçlendirme uygulanmamış kirişlere kıyasla maksimum mukavemetlerinin %77,4'den %117,3'e arttığını göstermektedir. Kesme kapasitesindeki artış oranının sadece kullanılan FRP kompozit tipine bağlı olmadığı, aynı zamanda kesme donatısının miktarına da bağlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çalışmalarında, test numunelerinin hata mekanizmalarına dayalı bir tasarım modeli sunulmuştur [22].

İlki A. ve Kumbasar N. (2002) yaptıkları çalışmada, 200 mm x 200 mm x 200 mm ölçülerinde 28 adet betonarme numuneyi eksenel kuvvet ve eğilme momenti etkisinde incelemiştir. Numuneler hasar gördükten sonra 9 adet numune CFRP ile sargılanarak güçlendirilmiştir. Tekrar benzer yükleme şartları altında deneye tabi tutulmuşlardır. Böylelikle incelenen onarım ve güçlendirme tekniğinin elemanın dayanım, süneklik ve enerji yutma özelliklerini olumlu etkilediği belirlenmiştir. CFRP sargılarla güçlendirilen numunelerin yanal yük taşıma kapasitelerindeki artış oranı %28 ile %77 arasında değişmiştir [23].

Tan K. H. (2002) tarafından, çalışma kapsamında toplam 52 adet kısa kolon imal edilmiş, imal edilen bu kolonlar; fiber tipi, konfigürasyonu ve fiber sargılarının kolonların güç artırımı üzerindeki etkisini araştırmak için eksenel basınç yükü altında test edilmiştir. FRP sargılı merkezi yüklü kolonlarda güç artırımının iki farklı kaynaktan meydana geldiğini söylemişlerdir. Bu kaynaklardan birincisi, çapraz fiber tabakalarının sınırlandırma etkisi olup, betonun tek eksenli basınç dayanımında bir artışa ve bundan dolayı betonarme kolonun yük taşıma kapasitesinde bir artışa neden olmasıdır. İkincisi ise, uzunlamasına elyaf tabakalarının doğrudan kolonun yük taşıma kapasitesine katkıda bulunmasıdır. Dikdörtgen kolonlarda dıştan sarılmış FRP sistemlerinin sınırlanma etkisinin, dairesel veya kare kolonlarda dıştan sarılmış FRP sistemlerinin sınırlama etkisinden daha düşük olmuştur. Güçlendirilmiş kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi için analitik bir yaklaşım önermişlerdir [24].

Chaallal O. M. Ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada, karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) sargı ile güçlendirilmiş eksenel yüklü kısa dikdörtgen kolonların

davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Dikdörtgen ve kare kısa kolonlara altı seri basınç testi uygulanmış ve toplam 90 adet numunenin aksel ve enine doğrultudaki davranışları incelenmiştir. Betonun dayanımı, enine kesitin en-boy oranı ve CFRP katmanlarının sayısının davranışa etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmaya göre CFRP sargı, bütün kolonların basınç dayanımını ve sünekliğini artırmıştır. Bu artış tabaka sayısı artışı ile artmıştır. Mukavemet ve süneklikteki artış, yüksek dayanıma sahip betona göre daha düşük dayanıma sahip betonda daha etkilidir. Çalışmada 3 ksi (20,68 MPa) dayanıma sahip sargılı betonun dayanımı %90 artarken, buna karşın 6 ksi (41,36 MPa) dayanıma sahip betonun dayanımı %30 artmıştır [25].

Shao Y. ve Mirmiran A. (2004) yaptıkları çalışmada FRP'nin sismik bölgelerdeki beton yapılar için kullanımının etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada iki farklı davranış elde etmişlerdir. Bu davranışlardan birincisi; kalın tüpler için gevrek basınç kırılması olup fiberler düşey doğrultuda yerleştirilmiştir, ikincisi ise; ince tüpler için sünek çekme kırılması olup bunlarda fiberler eksen doğrultusunda yerleşmiştir. Beton ile doldurulmuş tüplerin geleneksel betonarme kolonlara kıyasla süneklik seviyesinin tayini için uygun bir şekilde tasarlanabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak analitik modeller ile deney sonuçları arasında iyi bir uygunluk olduğu görülmüştür [26].

Guoqiang Li (2006) bu çalışma kapsamında, FRP sargılı beton silindir ve FRP boru içerisine konulmuş betonları incelemiştir. 24 adet FRP sargılı beton silindir için değişken olarak altı lif yönü ile iki farklı duvar kalınlığı ve beton dayanımı değişken olarak kullanılmıştır. 15 adet de FRP boru içerisine konularak elde edilen silindir numune incelenmiştir. Sınırlandırılmış betonun 28 günlük basınç dayanımı 150,4 mm x 300,8 mm silindirler kullanılarak belirlenmiş ve üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla; 31,10 MPa, 35,20 MPa, 46,10 MPa, 49,50 MPa ve 82,00 MPa olarak bulunmuştur. Bu çalışma sonunda FRP sargılı beton silindirlerle ve FRP boru içerisine doldurulmuş beton silindirlerle üretilen numunelerde dayanımda ve poisson oranında artış olduğu görülmüştür. Fakat yüksek dayanımlı betonlarda çok fark olmadığı görülmüştür [27].

Wang F. Y. ve Wu H. L. (2010) aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP) tabakalarıyla sarılmış kare kesitli kısa kolon numuneleri üzerinde deneysel bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada 100 mm x 300 mm ölçülerinde hazırlanan ve 46,43 MPa 'dan 101,18 MPa 'ya değişen basınç dayanımlarında 9 adet referans beton numunesi ve 54 adet sargılı beton numunesi monoton aksenal basınç yükü altında test edilmiştir. Bu numuneler üretilirken üç farklı beton sınıfı kullanılmıştır. Bu numuneler kısmen sarılmış, tamamen sarılmış ve sargı miktarı değiştirilerek mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, AFRP sarma biçimine bağlı olarak iki tür aksenal gerilme-şekil değiştirme eğrisinin gözlemlendiğini, kolonların dayanım ve sünekliklerinin tamamen sarılı AFRP tabakalarında arttığı, kısmen sarılmış AFRP tabakalarında sadece dayanımının arttığı görülmüştür [28].

Vincent T. ve Özbakkaloğlu T. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 55 adet beton numunesi yüksek dayanım için FRP ile sarılarak aksenal basınç altında deneye tabi tutulmuştur. Bu numunelerin hazırlanmasında 35 MPa, 65 MPa ve 100 MPa olmak üzere üç farklı beton sınıfı kullanılmıştır. Bu numunelerin dayanımlarında sargı yönleri, sargı sayısı ve sarım tekniği etkili olmuştur. Sonuç olarak, üretilen numunelerin sarım yönleri ve kat adetleri beton basınç değerlerine göre dayanımın arttığı ve YDB (yüksek dayanımlı beton) numunelerde fazla bir değişim olmadığı görülmüştür. Üretilen beton numunelerin süneklik ve enerji yutma kapasitelerinin arttığı görülmüştür [29].

Vincent T. ve Özbakkaloğlu T. (2013) tarafından yapılan çalışma kapsamında, 24 adet AFRP ile sınırlandırılmış dairesel kesitli beton numune aksenal basınç altında test edilmiştir. Bu numunelerin 18 adedi beton dolu FRP tüp olarak kalan 6 adedi ise FRP sargılı beton silindir olarak üretilmiştir. Bu numuneler için 50 MPa ve 80 MPa olmak üzere iki beton sınıfı kullanılmıştır. Ayrıca fiberlerin diziliminin etkisinin incelenmesi için 45, 60, 75 derece olarak verilen farklı fiber açıları kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre FRP sargılı betonların dayanımı artmış ve liflerin yönleri ile sarım teknikleri dayanımları için önemli bir etken olmuştur. Ayrıca sınırlama metodunun aksenal gerilme-şekil değiştirme davranışında çok önemli olmadığı FRP sınırlandırılmış beton ile beton dolu FRP tüp davranışının birbirine yakın olduğu görülmüştür [30].

Lim J. C. ve Özbakkaloğlu T. (2013) tarafından yapılan çalışmada, literatürde yayınlanan 832 adet dairesel FRP ile sınırlandırılmış beton numune üzerindeki eksenel basınç test sonuçlarından elde edilen test dataları sunulmuştur. Bu datalar; 1991 – 2013 yılları arasında yapılan 253 deneysel çalışmadan elde edilen 3042 test sonucundan oluşmuştur. Çalışmada FRP sargılı beton numunelerde, sargının beton dayanımlarına göre; dayanım, süneklilik ve elastisite modülüne etkileri değerlendirilmiştir [31].

Güler S. (2014) tarafından, CFRP, AFRP ve GFRP sargılı ultra yüksek performanslı 100x200 mm ölçülerinde, 36 adet silindir beton numunesi ve 6 adet silindir referans beton numunesi olmak üzere toplam 42 adet numuneye eksenel basınç testi uygulanmıştır. Dayanım açısından en iyi davranış sargı sayısı fazla olan CFRP sargılı beton numunelerde görülmüştür. Düktilite açısından GFRP sargılı betonlar diğer sargılı beton numunelerine kıyasla daha iyi davranış gösterdiği bulunmuştur [32].

Lim J. C. ve Özbakkaloğlu T. (2014) FRP sargılı 36 adet numune üretmişler ve eksenel basınç altında teste tabi tutmuşlardır. Üretilen bu numuneler imal edilirken FRP kumaşlarda 150 mm üst üste bindirme boyu bırakılmış ve beton silindir numunelere reçine emdirilerek FRP kumaşlar bir tabaka ile dört tabaka olacak şekilde sarılarak üretilmişlerdir. Ayrıca numunelerin orta bölgelerine 50 mm genişliğinde FRP şeritler sarılmıştır. Numuneler için 25 MPa, 50 MPa, 75 MPa ve 100 MPa olmak üzere dört farklı beton sınıfı kullanılmıştır. Deney sonucunda; numunelerin elastisite modülün, dayanım, süneklilikte ve tokluklarında artma olduğu görülmüştür [33].

Lim J. C. ve Özbakkaloğlu T. (2014) tarafından, 30 adet FRP sargılı ve 30 adet sargısız beton numunesi eksenel basınç altında deneye tabi tutulmuştur. Bu numunelerin mekanik özelliklerinde silis dumanı oranlarındaki değişim belirleyici olurken, su-imento oranları değişmemiştir. Numuneler farklı beton sınıflarında üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; silis dumanı miktarındaki artışın mukavemet artışında etkili olmadığı ancak eksenel şekil değiştirmede artışa neden olduğu görülmüştür [34].

Guoqiang L. ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada, çapı 152,4 mm ve yüksekliği 304,8 mm olan 27 adet beton silindir numune üretilmiştir. Üretilen numunelerden 18 tanesi iki kat FRP ve 6 farklı açıda fiber dağılımına sahip olup 6 tanesi ise dört kat FRP hem boyuna hem enine fiber dağılımına sahiptir. Yazarlar gerilme-şekil değiştirme, dayanım ve duktilite üzerinde fiber açılarının ve tabakanın toplam kalınlığının önemli etkilerinin olduğunu göstermişlerdir [35].

İlki A. ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışmada kare, dikdörtgen ve dairesel kesitli 1 adet beton ve 15 adet betonarme kolon aksenal basınç altında incelenmiştir. Üretilen numunelerin yükseklikleri 500 mm'dir. Bu numunelerin 4 tanesi kare, 3 tanesi dairesel ve 3 tanesi de dikdörtgen kesitli olup 31 MPa normal basınç dayanımına sahiptir. Kalan numunelerden 3 tanesi daire kesitli ve 3 tanesi kare kesitli 15,9 MPa düşük basınç dayanımına sahiptirler. Sınırlamanın etkisi daha düşük dayanımlı betonda daha fazla görülmüştür. Dayanım dairesel kesitlerde daha fazla kaydedilirken dikdörtgen kesitlerin daha fazla deformasyon yapabildikleri belirlenmiştir [36].

Wang D. Y. ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, farklı büyüklüklere sahip 23 adet beton dolu FRP kare kolonun monoton aksenal basınç altında davranışını belirlemek için deneysel bir çalışma sürdürmüşlerdir. Numuneler; numune boyutu, FRP tabaka sayısı, FRP'nin teorik olarak elde edilen yanal basıncı, betonun donatı içerip içermemesine göre farklı gruplarda sıralanmış, numuneler her grupta farklı enine kesit boyutlarından oluşmakla birlikte aynı teorik yanal sınırlama basıncı etkisinde kalmışlardır. Deney sonuçları numune boyutunun, FRP ile sınırlandırılmış 350 mm'den küçük orta ve küçük boyutlu kolonların aksenal gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, ancak daha büyük numunelerde numune boyutu arttıkça şekil değiştirmelerin azaldığı görülmüştür [37].

Eid R. ve Paultre P. (2017) tarafından yapılan çalışmada, 150x150x300 mm boyutlarındaki altı adet kare ve 150x300 mm boyutlarında altı adet silindir beton numune aksenal basınç altında teste tabi tutulmuştur. Bu çalışmada, depreme karşı dayanım standartlarının belirlenmesi aşamasında, betonarme kolonların sünek davranışını sağlamak için enine donatı takviye miktarı için yeni tasarım denklemleri üzerine çalışılmıştır. Sismik yük etkisindeki mevcut kolonların güçlendirilmeye

ihtiyacı olduğu görülmüştür. Önerilen model ile öngörülen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin, sunulan deneysel sonuçlarıyla da iyi uyum içinde olduğunu göstermişler[38].



3. LİFLİ POLİMERLER

Bir boyutu diğer boyutlarından çok büyük olan, insan eliyle veya doğal kaynaklardan elde edilen uzunluk, esneklik, mukavemet ve elastisite modülleri büyük malzemeler lif olarak tanımlanır [39]. Uygulamada kullanılan yapay ve doğal lifler vardır. Doğal lifler; mineral, hayvansal atıklar, bitkiler ve bitkisel kalıntılar gibi doğal kaynaklardan elde edilir ve hiçbir işleme tabi tutulmadan doğrudan kullanılırlar. Yapay lifler ise insan yapısı olarak ve istenilen bazı özellikleri taşıyacak biçimde üretilirler [40, 41].

19. yüzyılın sonunda ilk defa ortaya çıkan liflerin üretimi insan eliyle olmuştur. İnsan eliyle yapılmış (sentetik) lifler günümüzde vazgeçilmez bir malzemedir [42]. Liflerin kullanımı ile lifli kompozit malzemeler elde edilir.

Kompozit malzemeler; belirgin bir amaca ve özelliğe yönelik olarak en az iki veya daha fazla malzemeyi bir araya getirerek oluşturulan bir malzeme grubudur [43]. Kompozit malzeme fiber ve matris olarak ayrılırsa fiber malzemenin esas yük taşıyan kısmı matris ile fiberi bir arada tutan kısımdır [44]. Kompozit malzeme içerisindeki matrislerin aynı olması durumunda fiber malzemesinin miktarına ve dizilişine bağlı olarak malzemenin mekanik özellikleri değişiklik gösterir [45].

Tablo 3.1. Lif Tiplerinin Mekanik Özellikleri

Malzeme Türü	Elastisite Modülü (kN/mm ²)	Çekme Dayanımı (kN/mm ²)
Cam	70 – 90	2,00
Karbon	230 – 640	4,00
Aramid	120 – 130	2,90
Çelik (ST37)	210	0,37

Kompozitlerin üretiminde fiber olarak üstün özelliklerinin yanı sıra ekonomi açısından en çok tercih edilen elyaf türü cam liflerdir [44].

Liflerin betonun yapısına etkileri genel olarak şu şekilde sıralanabilir;

- Taze betona katılan lifler betonda oluşan çatlakları engeller,
- Çekme dayanımlarını arttırmanın yanı sıra eğilme dayanımlarını da arttırırlar,
- Çarpma dayanımlarını ve tokluğu arttırırlar,
- Taze betona katılan lifler betonun gevrek kırılmasını engeller,

- Durabiliteyi artırır [46].

3.1. Lif Çeşitleri

Mekanik özelliklerine ve kullanım alanlarına göre farklı lif çeşitleri vardır.

3.1.1. Doğal Lifler

Kolayca elde edilebilir olmaları doğal liflerin en önemli özelliğidir. Doğal liflerin en büyük sorunu alkali ortamda parçalanma eğilimi olmasıdır. Liflerde oluşacak bu sorunu çözmek için beton bileşiminde kullanılan katkıların ve betonun alkalitesinin azaltılması için gerekli olan katkı maddeleri kullanılması gerekmektedir [39]. Doğal liflerin en eskileri olarak tabir edilmekle birlikte yaygın olarak bilinenleri at yelesi ve samandır. Portland çimentosu ile kullanılan diğer doğal lifler ise; hindistan cevizi, bambu, şeker kamışı ve ahşap lifleridir [41].

3.1.2. Metalik Lifler

Metaller, yüksek plastik deformasyon yetenekleri nedeniyle endüstri ve inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Lif halindeki metaller uzun süredir kullanılmaktadır. Metalik liflerin bazılarına ait olan fiziksel özellikleri Tablo 3.2. de görülmektedir [42].

Tablo 3.2. Bazı Metalik Liflerin Tipik Özellikleri [42]

Metal	Elastisite Modülü (GPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Al	70	2,7	300	660
0,9 % Karbon Çeliği (0,1 mm çapında)	210	7,9	4000	1300
Be	310	1,8	1100	1350
Paslanmaz Çelik (0,05 mm çapında)	198	7,8	2400	1535
Cu	125	8,9	450	1083
W	350	19,3	2890(<250µm) 3150(<125µm) 3850(<25µm)	3410
Mo	330	10,2	2200	2625

Paslanmaz çelik lifleri en yaygın olarak kullanılan metalik liflerdendir. Bu liflerin paslanmaz çelikten olması, metallerin korozyona uğramasını ortadan kaldırır. Aynı zamanda elastisite modülü ve mukavemeti yüksektir [42].

Bunlar başlıca doğal ve sentetik lifler olarak ayrılabilirler [46]. Farklı türdeki liflere ait olan bazı özellikler Tablo 3.3. de gösterilmektedir;

Tablo 3.3. Farklı Türdeki Liflere Ait Fiziksel Özellikler [47]

Lif Cinsi	Elastisite Modülü (10 ³ ,MPa)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Uzama (%)
Asbestler	83 – 138	3,2	552 – 966	0,6
Polyester	8,3	1,4	724 – 863	11 – 13
Pamuk	4,8	1,5	414 – 690	3 – 10
Akrilik	2,1	1,1	207 – 414	25 – 45
Mineral Yünü	69 – 117	2,7	483 – 759	0,6
Cam	69	2,5	1035 – 3795	1,5 – 3,5
Polietilen	0,14 – 0,4	0,95	690	10
Naylon	4,1	1,1	759 – 828	16 – 20
Polipropilen	3,5	0,90	552 – 759	25
Çelik	200	7,8	276 – 2760	0,5 – 35
Pamuk – Yün	6,9	1,5	414 – 621	10 – 25

3.1.3. Polimerik Lifler

Polimer lifleri geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve birçok çeşidi bulunan bir fiber türüdür. Polimerik lifleri iki ana grup altında incelemek mümkündür. Bunlar; doğal lifler ve sentetik liflerdir. Doğal lifler; yün ve deri gibi hayvansal veya hint keneviri, sisal, iplik ve pamuk gibi bitkiselidirler. 20. yüzyılın yarısında polimerik lifler büyük bir ilerleme göstermişlerdir. Polyester ve naylon gibi sentetik liflerin keşfedilmesi ile 1930'lu yılların sonlarına doğru ve 1940'lı yılların başlarında lif çağı olarak da adlandırılacak olan dönem resmen başlamıştır. 1950'li yılların sonlarına doğru ve 1960'lı yılların başlarına doğru elastisite modülü yüksek ve sağlam olan sentetik polimer liflerin yapılması ve bu liflerin polimer takviyesinde kullanılması araştırma konusu olmuştur. Aramid polietilen gibi uzun zincirli olan yüksek elastisite modülüne sahip ve sağlam olan liflerin yapılması bu araştırmalar neticesinde mümkün hale gelmiş olmakla birlikte yeni liflerin üretimine doğru gidilmeye çalışılmıştır. Sentetik liflerin başlıcaları; perlon, naylon, polipropilen, polietilen ve

aramiddir. Polimer liflerin bazılarına ait olan fiziksel özellikleri Tablo 3.4. de verilmiştir [48].

Tablo 3.4. Polimerik Liflerin Fiziksel Özellikleri [48]

Lif Tipleri	Elastisite Modülü (GPa)	Etkili Çap (10^{-3} mm)	Nihai Uzama (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Çekme Dayanımı (MPa)
Polipropilen	3,5 – 4,9	18	15,0	0,90 – 0,91	160	310 – 760
Akrilik	14,6 – 19,6	13 – 104	7,5 – 50,0	1,17	-	207 – 1000
Naylon	5,17	23	20,0	1,16	260	965
Aramid I	62	12	4,4	1,14	-	3620
Polietilen	5,0	25 – 1020	3,0	0,96	253	200 – 300
Aramid II	117	10	2,5	1,44	-	3620
Polyester	17,5	-	-	1,34 – 1,39	265	896 – 1100

3.1.4. Cam Lifler

Cam lifler; sertlik, korozyon direnci ve diğer malzemelerle aşırı derecede reaksiyona girmemesi gibi özellikler gösterirler. Ayrıca bu avantajlarının yanı sıra çok hafif, esnek ve kolayca uygulanabilirler ayrıca maliyetleri diğer liflerle karşılaştırıldığında daha düşüktür. Cam lifler özellikleri bakımından kendi içlerinde birçok sınıfa ayrılır.. Tüm cam lifleri esneklik modüllerinde benzer olmakla birlikte, farklı mukavemet değerlerine sahip olmalarının yanı sıra çevresel etkilere karşı farklı direnç gösterirler. Bu liflerden; E tipi lifler düşük çekme mukavemetine sahip olmalarının yanı sıra bu liflerin kimyasal dirençleri de düşüktür, S tipi lifler ise E tipi liflere kıyasla daha yüksek mukavemete ve daha yüksek maliyete sahiptir, C tipi lifler ise E ve S tipi liflere kıyasla yüksek korozyon dayanımına sahip olması istenilen uygulamalarda kullanılırlar. Tablo 3.5. de bazı cam liflerinin tipik özellikleri verilmiştir [49].

Tablo 3.5. Bazı Cam Liflerine Ait Fiziksel ve Mekanik Özellikler [42]

Cam Lifi Tipi	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)
C	2,48	70	1,7 – 2,8
E	2,54	69 – 72	1,7 – 3,5
CEM-FİL	2,7	80	-
S	2,48	85	2,0 – 4,5

3.1.4.1. Cam Liflerin Özellikleri

Cam liflerin çeşitli şekillerde geometrik özellikleri bulunur ve bununla birlikte hazır şekilde imalatı bulunan cam fiber takviyeli polimer örtüler deprem güçlendirmesi gereken yerlerde kolaylıkla kullanılırlar. Bu elyaflar duvar kâğıdı veya kumaşı andırmalarının yanı sıra 0,30 – 0,60 metre eninde sarılmış olan rulolar halinde satılırlar [50]. Cam Lifler yapı elemanı üzerine reçine ile uygulanırlar ve çok yüksek bir çekme dayanımına sahiptirler. Fakat bu dayanım kullanımın şekline ve işçiliğin yöntemine göre değişiklik gösterebilir. Yüksek alev ve yüksek ağırlık dayanımına sahiptirler. Bu özelliğinden dolayı yaygın olarak ısı dayanımı gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar [51].

Tablo 3.6. Cam Fiber Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri [51]

Lif Türü	Yüksek Dayanımlı Cam Fiber
Tabaka Örgü Şekli	Tek Yönlü
Elastisite Modülü (N/mm ²)	240000
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	3800
Tasarım Kesim Kalınlığı (mm)	0,117
Toplam Ağırlık (gr/m ²)	230
Kopma Uzaması (%)	1,55
Genişlik (mm)	300 / 600

3.1.4.2. Cam Liflerin Üretimi

Cam lifin eldesi için silis kumu, soda külü, borik asit, kireç taşı, boraks, feldispat ve fluorspar gibi doğal mineraller yüksek sıcaklıklarda eritilir. Yaklaşık 1500 – 1600 °C sıcaklıkta ergitme fırında sıcaklığın artışıyla karışım sıvı hale gelir [52].



Şekil 3.1. Yüksek Sıcaklıktaki Sıvı Cam Lifi

Cam liflerin üretiminde hammadde olarak kullanılan malzeme bildiğimiz camdan başka bir malzeme değildir. Bununla birlikte, gerçek camlar alkali ve alkalın toprak silikatlarından ve hatta borat ve alüminatı içeren kompleks karışımlardan oluştuğunda, lif üretiminde kullanılacak olanlar çoğunlukla soda-kireç silikatlar veya boraks silikatlarıdır [53]. İçeriğinde bulunacak olan katı maddelerin oranları cama kazandırılacak olan özelliklere göre değişiklik göstermektedir. Tablo 3.7. de cam lif üretiminin türlerinin karışım içerikleri (% olarak) verilmiştir [54].

Tablo 3.7. Tekstil Cam Liflerinin % Karışım Oranları [54]

Cam Tipi	A Tipi	D Tipi	Advantex	C Tipi	E Tipi	R Tipi	ECRGlas	AR Tipi	S-2 Tipi
Oksit	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SiO ₂	63-72	72-75	59-62	64-68	52-56	56-60	54-62	55-75	64-66
F ₂	0-0,4	-	-	-	0-1	0-0,1	-	-	-
Al ₂ O ₃	0-6	0-1	12-15	3-5	12-16	23-26	9-15	0-5	24-26
Fe ₂ O ₃	0-0,5	0-0,3	-	0,8	0-0,4	0-0,5	0-0,8	0-5	0-0,1
B ₂ O ₃	0-6	21-24	<0,2	4-6	5-10	0-0,3	-	0-8	<0,05
ZrO ₂	-	-	-	-	-	-	-	1-18	-
CaO	6-10	0-1	20-24	11-15	16-25	8-15	17-25	1-10	0-0,2
TiO ₂	0-0,6	-	-	-	0-0,8	0-0,25	0-4	0-12	-
MgO	0-4	-	1-4	2-4	0-5	4-7	0-4	-	9,5-10,3
Na ₂ O+K ₂ O	14-16	0-4	-	7-10	0-2	0-1	0-2	11-21	<0,3
ZnO	-	-	-	-	-	-	2-5	-	-
Li ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	0-1,5	-
BaO	-	-	-	0-1	-	0-0,1	-	-	-

* **A-Tipi Cam Lifi:** Alkali-kireçli, borlu veya bor içermeyen camdır. Bunlar % 0,8'den daha fazla spesifik tipte alkali oksit bileşikleri içerir. E-tipi cam elyafta olduğu gibi soda kireç silikat cam kullanılarak üretilirler, burada mukavemet, kararlılık ve iyi elektrik kuvveti gerekmez.

* **C-Tipi Cam Lifi:** Kimyasal kararlılığı korozif asidik koşullara karşı sağlayan kalsiyum borosilikat camdan imal edilmiştir. Asitler ve alkaliler de dahil olmak üzere dirençleri kimyasallara karşı oldukça iyidir.

* **D-Tipi Cam Lifi:** Düşük dielektrik dirençler için elektriksel uygulamalarda sabitli borosilikat camlarından oluşurlar.

* **E-Tipi Cam Lifi:** % 0,8'den daha az alkali oksit bileşiği içeren alüminyum borosilikat camdır. Sentetik liflerin güçlendirilmesinde ve yüksek mukavemetli ve elektriksel mukavemetin gerekli olduğu durumlarda kullanılır.. E-tipi camlar geniş bir uygulama yelpazesi için öncelikle elektroteknik amaçlı geliştirilmiştir. Ancak günümüzde sentetik malzemelerin takviye edilmesi için de kullanılmaktadırlar

* **ADVANTEX Tipi Cam Lifi:** kalsiyum alüminosilikat camdan yapılmıştır.

* **ECRGLASS Tipi Cam Lifi:** Güç, elektriksel direnç ve asidik korozyon direnci için dizayn edilmiş, maksimum% 2 alkali içeren kalsiyum alüminosilikat camlardan oluşur.

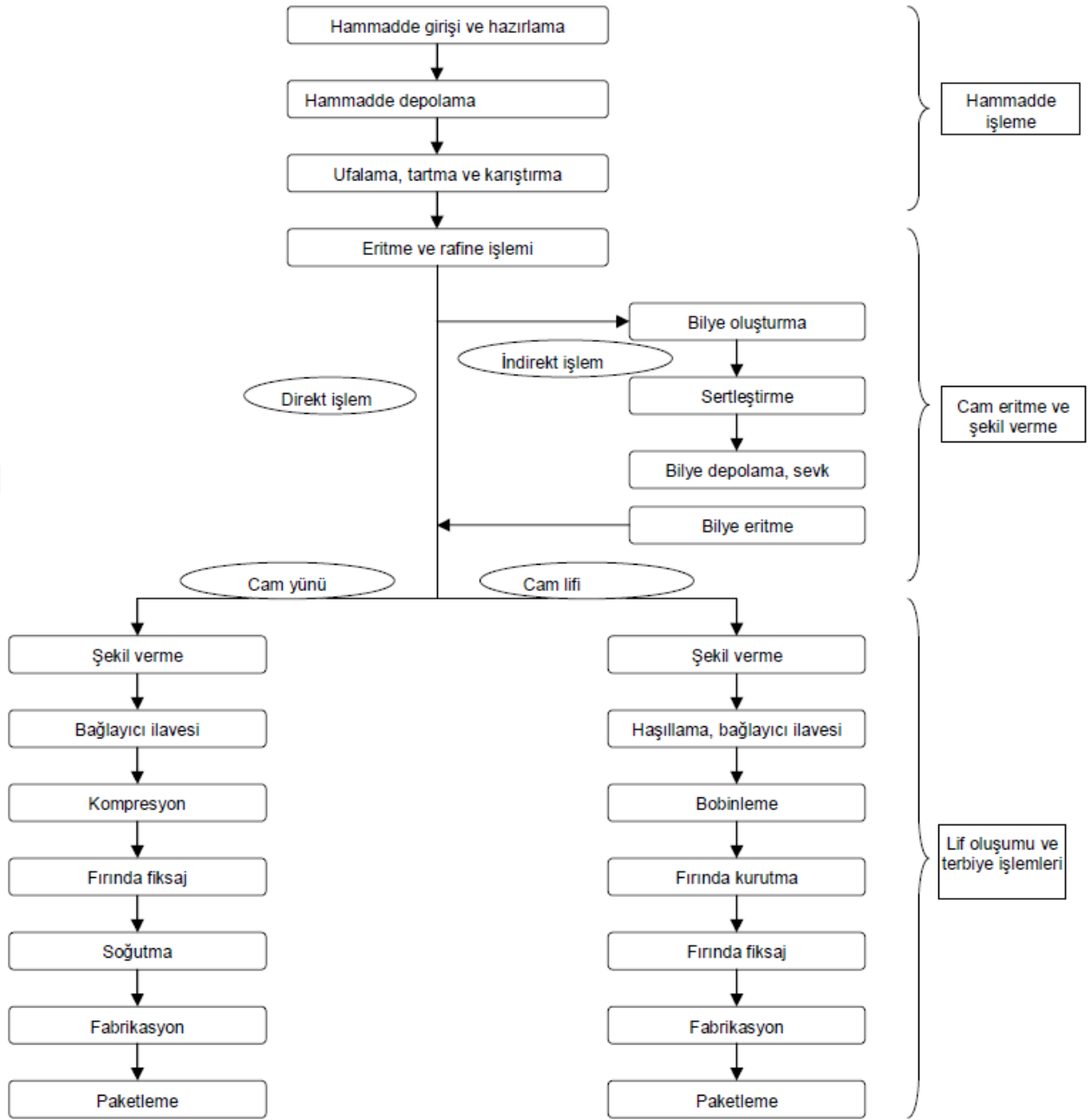
* **AR-GLASS Tipi Cam Lifi:** Alkali zirkonyum silikatlar, alkali dayanıklı camların bir karışımını kullanır.

* **R Tipi Cam Lifi:** Asidik korozyon direnci ve mukavemeti, kalsiyumalüminosilikat camları kullanıldığında ortaya çıkan tiptir.

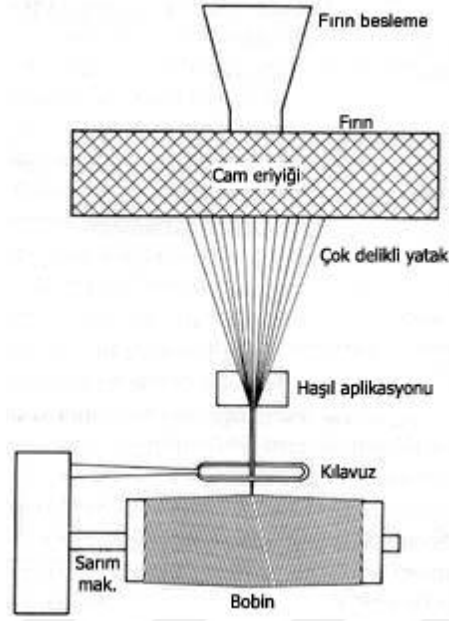
* **S-2 Tipi Cam Lifi:** S-2 tipi yüksek mukavemetli cam lifleri alüminyum silikatların yüksek sıcaklık macunudur, incelikleri 5-27 µm arasında değişir. Silikat, cam lif kompozit ve kompozit endüstrisi için üretilmektedir.

* **M-Tipi Cam Lifleri:** Beliryum içeren camlar kullanılmasının yanı sıra elastisite modülleri yüksektirler.

* **Z-Tipi Cam Lifleri:** Çimento ile birlikte kullanılmalarının yanı sıra betonların takviye edilmesinde kullanılan cam lifleridir.



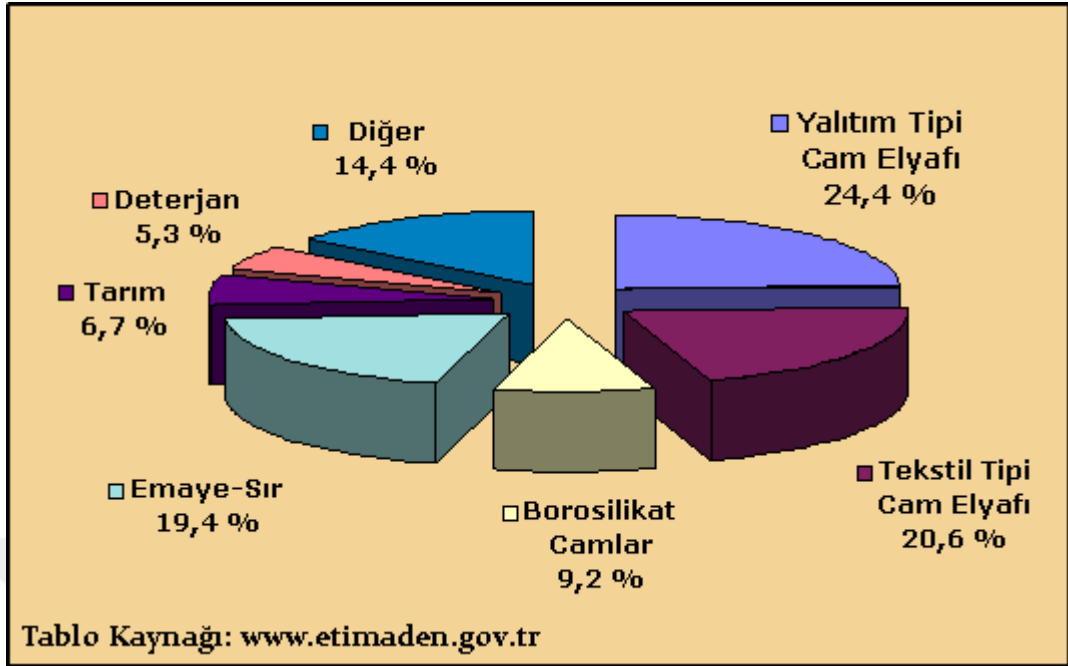
Şekil 3.2. Cam Lifi Üretim Prosesindeki Tipik İşlem Akış Şeması [55]



Şekil 3.3. Cam Lif Üretimi [55]

3.1.4.3. Cam Liflerin Kullanım Alanları

- Havacılık ve Uzay Sanayisi
- Gıda Tesisleri
- Taşıma Araçları
- Askeri Amaçlı Malzemeler
- İnşaat Sektörü [44].
- Endüstriyel Malzemeler
- Spor Malzemeleri
- Genel Üretim Tesisleri
- Kıyı İskele Uygulamaları [45].
- Elektrik Dağıtım Uygulamaları
- Su ve Atık Su Arıtma Tesisleri
- Deniz Uygulamaları ve Tersaneler
- Kimya Tesisleri
- Kişisel Koruyucu Ekipmanlar
- Kamusal ve Ticari Uygulamalar [56].



Şekil 3.4. Cam Lifin Kullanım Yerlerine Göre Yüzdeleri

3.1.4.4. Cam Liflerin Özellikleri ve Avantajları

Cam lifler uygun kullanım avantajları, fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı çokça tercih edilirler [54, 55].Cam lifler;

- Yuvarlak kesitli ve saydamdırlar. Ayrıca düzgün yüzeyli ve pürüzsüzdürler. 2-13 mikron değerlerinde değişen incelikleri vardır.
- Kopma dayanımları 6-7,3 g/denye değerleri arasında değişmektedir.
- Yoğunlukları 2,5-2,7 g/cm³ tür.
- Cam lifler %0,13-0,8 arasında nem içerirler.
- 1150 °C civarında ve üzerindeki sıcaklıklarda erirler, buna rağmen yanma özellikleri yoktur.
- Asitlere karşı oldukça dayanıklı olmalarına karşın fosforik asitten ve bunun bileşenlerini içeren asitlerden ayrıca sıcak hidroflorik asit ve bunun bileşenlerini içeren asitlerden etkilenirler.
- Elektrik ve ısıyı iletmezler.
- Hafiftirler.
- Kalıplanmaları kolaydı, kolaylıkla tamir edilebilirler.
- UV ışınlarına dirençlidirler.

- Basit bir şekilde işlenebilirler ve boya ile bakım gerektirmezler.
- Korozyona karşı oldukça dayanıklıdırlar.
- Yüksek izolasyon yeteneğine sahiptirler.
- Depreme karşı yüksek dayanıklılık sağlarlar.
- Aynı ebatta bulunan çelikten 10 kat daha fazla esneme mukavemetine sahiptirler.
- Anti-bakteriyeldirler ve Anti-statik özelliktedirler.
- Her renkte üretilebilirler.

Tablo 3.8. Cam Liflerin Fiziksel Özellikleri [53]

Fiziksel Özellikler									
	A Tipi	C Tipi	D Tipi	E Tipi	Advantex	ECRGlas	AR Tipi	R Tipi	S-2 Tipi
Yoğunluk g/cc	2,44	2,52	2,11-2,14	2,55-2,62	2,62	2,68-2,72	2,70	2,54	2,46-2,49
Refrakto İndeksi	1,538	1,533	1,465	1,558	1,561	1,576	1,562	1,546	1,521
Yumuşama Noktası °C	705	750	771	846	916	882	773	952	1056
Tavlama Noktası °C	-	588	521	657	736	-	-	-	816
Gerilme Noktası °C	-	522	477	615	691	-	-	736	766
Gerilme Mukavemeti, MPa									
-196 °C	-	5380	-	5310	-	5310	-	-	8275
23 °C	3310	3310	2415	3445	-	3445	3241	4135	4890
371 °C	-	-	-	2620	-	2165	-	2930	4445
538 °C	-	-	-	1725	-	1725	-	2140	2415
Young Modülü, GPa									
23 °C	68,9	68,9	51,7	72,3	76,6	80,3	73,1	85,5	86,9
538 °C	-	-	-	81,3	84,3	81,3	-	-	88,9
Esneme %	4,8	4,8	4,6	4,8	4,6	4,8	4,4	4,8	5,7
Spesifik Gerilme Dayanımı x 10 ³ m	-	145	125	145	-	140	-	180	220
Spesifik Gerilme Modülü x 10 ⁶ m	-	3	2,7	3,1	-	3,25	-	3,7	3,9

Tablo 3.9. Cam Liflerin Kimyasal, Elektriksel ve Termal Özellikleri [53]

	A Tipi	C Tipi	D Tipi	E Tipi	ECRGlas	AR Tipi	R Tipi	S-2 Tipi
KİMYASAL ÖZELLİKLER								
Dayanım (% Ağırlık Kaybı)								
H ₂ O : 24 s	1,8	1,1	0,7	0,7	0,6	0,7	0,4	0,5
168 s	4,7	2,9	5,7	0,9	0,7	1,7	0,6	0,7
% HCl : 24 s	1,4	4,1	21,6	42	5,4	2,5	9,5	3,8
168 s	-	7,5	21,8	43	7,7	3	10,2	5,1
% 10 H ₂ SO ₄ : 24 s	0,4	2,2	18,6	39	6,2	1,3	9,9	4,1
168 s	2,3	4,9	19,5	42	10,4	5,4	10,9	5,7
% 10 Na ₂ CO ₃ : 24 s	-	24	13,6	2,1	-	1,3	3,0	2,0
168 s	-	31	36,3	2,1	1,8	1,5	-	2,1
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER								
Dielektrik Sabiti 1 MHz	6,2	6,9	3,8	6,6	6,9	8,1	6,4	5,3
10 GHz	-	-	4,0	6,1	7,0	-	-	5,2
Dağılıma Faktörü 1 MHz	-	0,0085	0,0005	0,0025	0,0028	-	0,0034	0,0020
10 GHz	-	-	0,0026	0,0038	0,0031	-	0,0051	0,0068
Hacim Dayanıklılığı (ohm-cm)	1,0E+10	-	-	4,02E+14	3,84E+14	-	2,03E+14	9,05E+12
Yüzey Dayanıklılığı (ohm)	-	-	-	4,02E+15	1,16E+16	-	6,74E+13	8,86E+12
Dielektrik Dayanımı (volt/mil)	-	-	-	262	250	-	274	330
TERMAL ÖZELLİKLER								
Spesifik Isı J/g°C								
23 °C	0,796	0,787	0,733	0,810	-	-	0,732	0,737
200 °C	-	0,900	-	1,03	0,97	-	0,938	0,821
Termal Esneme Katsayısı (x10 ⁻⁷)	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
-30 °C'dan 250 °C'ye kadar	73	63	25	54	59	65	33	16

Tablo 3.10. Cam Liflerin Genel Özellikleri ve Kimyasal Bileşimleri [57]

Özellikler	Cam Türü			
	A	C	E	S
Çekme Mukavemeti (MPa)	3033	3033	3048	4585
Elastisite Modülü (GPa)	-	69	72,4	85,5
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2,50	2,49	2,54	2,48
Isıl Genleşme Katsayısı (m/m/°Cx10 ⁶)	8,6	7,2	5,0	5,6
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	727	749	841	970
Bileşenler				
SiO ₂	72	64,4	52,4	64,4
BaO	-	0,9	-	-
Al ₂ O ₃ – Fe ₂ O ₃	0,6	4,1	14,4	25,0
B ₂ O ₃	-	4,7	10,6	-
CaO	10	13,4	17,2	-
Na ₂ O – K ₂ O	14,2	9,6	0,8	0,3
MgO	2,5	3,3	4,6	10,3

3.1.5. Karbon Lifler

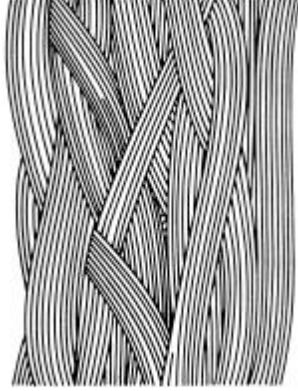
Karbon lif, dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle tercih edilen, ayrıca lifler dayanımlarının yüksek olması ve hafif olması gibi özelliklerinden dolayı yüksek teknolojinin birçok alanında kullanılan liflerdir [58].

3.1.5.1. Karbon Liflerin Özellikleri

Karbon lifi 19. yüzyılın sonlarına doğru Thomas Edison tarafından ilk kez 1879 yılında ampulün içerisinde filaman olarak kullanılmıştır [59]. Karbon elyaflar çok yüksek ısıyla muamele gördüklerinde, elyaf tamamen karbonize olur ve bu elyafa grafit tanecikleri denir. Karbon elyafı, epoksi matrislerle kombine edildiğinde istisnai dayanıklılık ve sağlamlık sergiler [60].

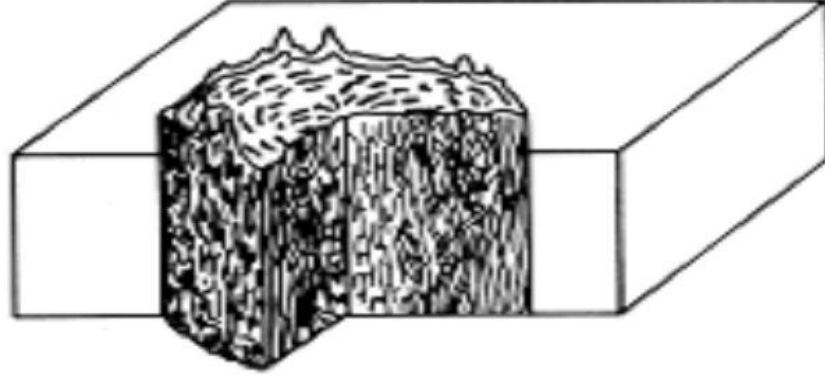
3.1.5.2. Karbon Liflerin Üretimi

İşlem sıcaklığına ve hammadde yoğunluğuna bağlı olarak yoğunlukları değişen karbon lifleri $1,6 - 2,2 \text{ g/cm}^3$ arasında değerler alabilirken hammaddeler ise $1,14 - 1,19 \text{ g/cm}^3$ arasında değerler alabilirler [61]. Karbon lifleri çelikten daha dayanıklı olmakla birlikte çelikten daha hafiftirler. Aynı şekilde karbon lifleri alüminyumlardan daha dayanıklı olmalarının yanı sıra daha sert ve daha hafiftir.[62]. Korozyona karşı dayanımının çok iyi olabilmesi için kompozitin uygun olan reçine ile kaplanması gerekmektedir. Karbon liflerin özelliklerini dikey ve yatay olarak kristalitlerin mikro yapıdaki yerleşimi etkilemektedir. Şekil 3.5. de PAN esaslı karbon lifleri görülmektedir [63].



Şekil 3.5. PAN Esaslı Karbon Lifleri [62]

PAN esaslı karbon lifleri, katran esaslı karbon liflerine kıyasla daha yüksek çekme ve basma mukavemetine, daha fazla kırılma uzamasına sahiptirler. Şekil 3.6. de PAN esaslı karbon lifinin görünüşü verilmiştir [62].



Şekil 3.6. PAN Esaslı Karbon Lif Görünüşü [62]

PAN liflerden elde edilmiş olan karbon lifleri üç kategoriden oluşmaktadır. Bu üç kategori arasındaki farklar ısıl genişleme direnci, mekanik gerilme eğilimi ve poliakrinitril liflerinin iplik bükme sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Ticari ürünlerde ve havacılık sanayinde çokça kullanılan PAN esaslı karbon lifleri vardır. Tablo 3.11. da PAN esaslı karbon liflerin özellikleri verilmektedir [62].

Tablo 3.11. PAN Esaslı Karbon Liflerin Özellikleri [62]

Özellik	Ticari Olarak		Havacılık Sanayinde		
	Birim	Standart Modül	Standart Modül	Orta Modül	Yüksek Modül
Germe Modülü	GPa	228	220-240	290-297	345-448
Kopma uzaması	%	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Germe Dayanımı	Mpa	380	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Lif çapı	μm	6-8	6-8	5-6	5-8
Karbon içeriği	%	95	95	95	+99
Yoğunluk	g/cm^3	1,8	1,8	1,8	1,9

Elektriksel iletkenlik bakımından diğer karbon liflere kıyasla katran esaslı karbon lifler 3 kat daha fazla elektriksel iletkenliğe sahiptirler. Katrandan üretilmiş olan karbon lifleri PAN'dan üretilmiş karbon liflerine kıyasla daha büyük bir grafen tabakaya sahiptirler [61]. Daha büyük kristalleri ve daha iyi yönlendirmelerinden ötürü, katran esaslı karbon elyafları çok yüksek modüllü, iyi elektriksel iletkenliğe sahip olmalarının yanı sıra termal iletkenliğe de sahiptir. Uydu yapımında kullanılan bu lifler yukarıdaki özelliklerinden dolayı çok fazla tercih edilirler. Tablo 3.12. de katran esaslı karbon liflerin özellikleri verilmektedir [62].

Tablo 3.12. Katran Esaslı Karbon Liflerin Özellikleri [64]

Özellik	Birim	Düşük (Alt) Modül	Yüksek (Orta) Modül	Ultra-Yüksek (Üst) Modül
Lif çapı	µm	11	11	10
Germe Modülü	GPa	170-241	380-620	690-965
Karbon içeriği	%	+97	+99	+99
Germe Dayanımı	Mpa	1380-3100	1900-2750	2410
Yoğunluk	g/cm ³	1,9	2,0	2,2
Kopma uzaması	%	0,9	0,5	0,4-0,27

Karbon elyafların üretimi çok pahalı olduğundan ve aşamaları fazla olduğundan, özel imalat olan uçak endüstrisinde, kişisel imalata sahip olan spor ekipmanlarında veya hayati öneme sahip tıbbi ekipmanların yüksek değere sahip uygulamalarında kullanılır. Karbon elyafları piyasada iki biçimde kullanılır [60, 61].

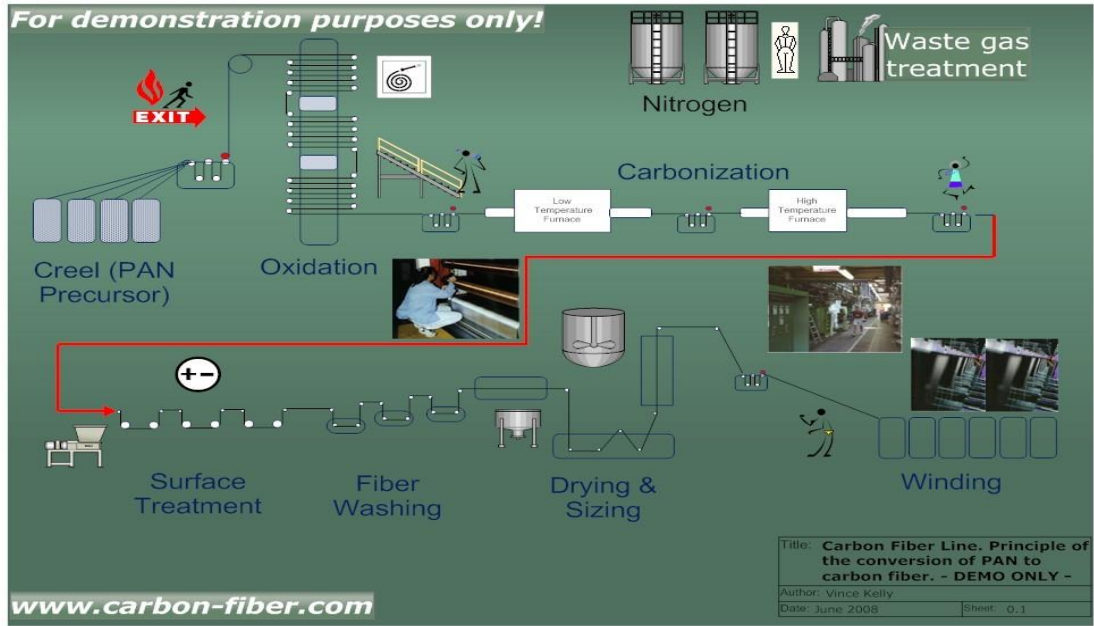
- **Sürekli elyaf:** Dokuma, tel sargı uygulamaları, örgü, tek yönlü bantlar ve ön ayırıcılarda kullanılır. Sürekli elyaflar kullanılırken elyaflar için kullanılabilen reçinelerin tamamı ile birlikte uyumlu bir şekilde çalışabilir.
- **Kırılmış elyaf:** Genellikle enjeksiyon dökümlerinde, makine parçaları ve kimyasal vana yapımı için basınçlı kaplarda kullanılırlar. Bu şekilde elde edilmiş olan ürünler mükemmel korozyon dayanımına sahip olmalarının yanı sıra yorulma direncine, ayrıca yüksek mukavemet ve sertlik özelliklerine sahiptir. Karbon elyaf genellikle ziftten ve PAN'dan elde edilir. Daha düşük mekanik özelliklere sahip olana elyaf türü zift tabanlı karbon elyaflardır. Zift tabanlı karbon elyaflara kıyasla daha mukavemetli ve daha hafif olan PAN tabanlı karbon elyafları sürekli geliştirilmişlerdir. Dünya üretiminde karbon fiberlerin %94'ü PAN temelli, %6'sı katran (zift) temellidir. PAN tabanlı karbon elyafına dönüştürülürken dört aşama gerçekleştirilir:

1-) Oksidasyon: Fiberler açık havada 300 °C'ye kadar ısıtılarak elde edilirler. Bu şekilde liften hidrojenin ayrılmasına ve daha uçucu oksijen ilavesi sağlar. Daha sonra karbonizasyon aşaması için lifleri kesilip grafit tekneye yerleştirilir. Bu işlem sırasında, lifin rengi beyazdan kahverengiye değişir ve daha sonraki işlemde siyaha dönüşür.

2-) **Karbonizasyon:** Fiber, kapalı ortamda 3000 °C'ye ısıtılarak % 100 karbonize edilir. Karbonizasyon işlemi sırasında uygulanacak olan sıcaklık üretilecek olan elyafın sınıfını belirler.

3-) **Yüzey iyileştirme:** Elektrolitik banyo, karbon fiberin yüzeyini temizlemek ve lif kompozit malzemesinin reçinesine daha iyi yapışması için yapılır.

4-) **Kaplama:** Karbon fiberin sonraki işlemde korunması için nötr bir sonlandırma işlemi yapılır. Fiber reçine ile kaplanarak kaplama meydana getirilir. Genellikle fiber reçinelerin kaplanması işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine, kompozit malzeme ile elyaf arasında bir ara yüz görevi görür [65, 66, 67, 68, 69].



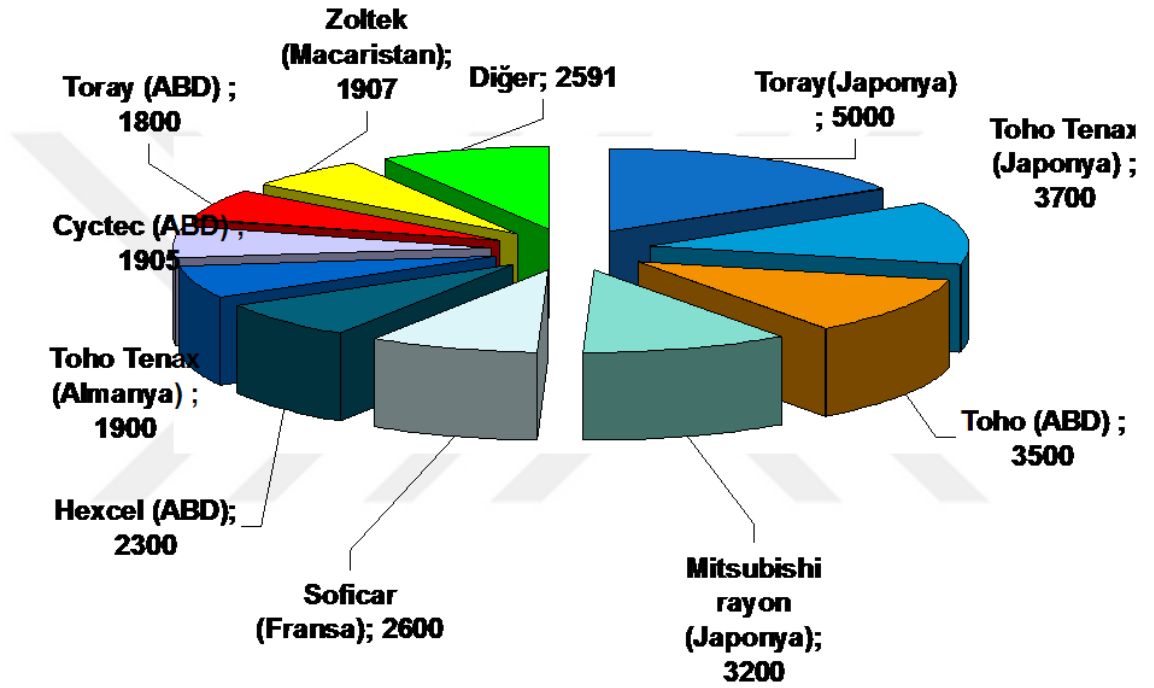
Şekil 3.7. PAN Lifinden Karbon Lif Üretim Aşamaları

Dünya üzerinde git gide artan karbon lif maddesi başlıca 8 ülkede üretilmektedir. Bu ülkeleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [70].

- Macaristan
- Japonya
- Fransa

- İngiltere
- ABD
- Almanya
- Tayvan
- İran İslam Cumhuriyeti

Bu ülkeler içerisinde karbon lif üretiminin büyük bir kısmı Japonya ve ABD temelli iki firma tarafından yapılmaktadır.



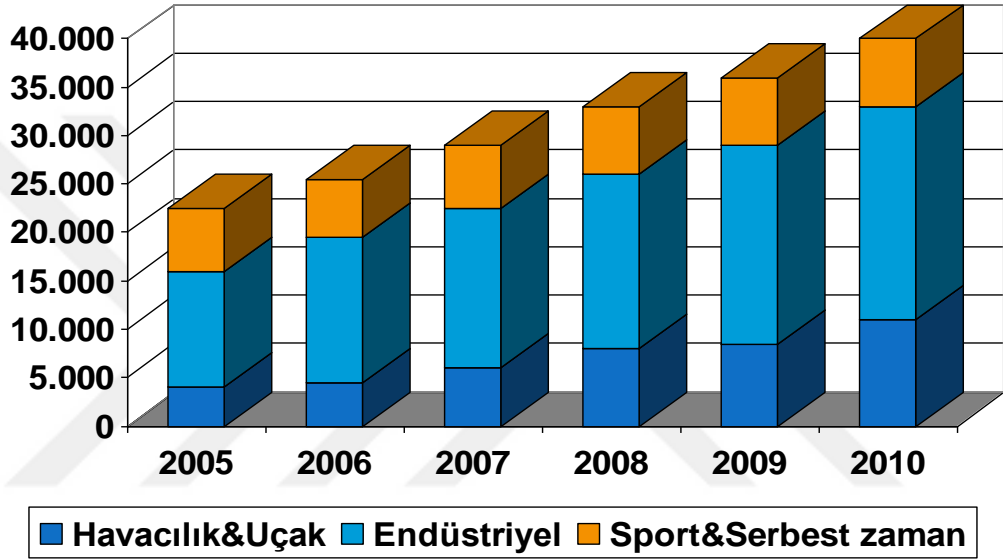
Şekil 3.8. Karbon Liflerin Dünyadaki Ülkelere Göre Üretim Şeması [70]

Karbon lifleri genelde Türkiye'ye ithal olarak gelmekte olup, genelde kısıtlı sayıda üretim yapan firmalar vardır.

3.1.5.3. Karbon Liflerin Kullanım Alanları

- Altyapı İnşaatlarında
- Rüzgâr Enerjisinde
- Termoplastik Bileşimlerde
- Kompozit Malzeme Üretiminde
- Gemi ve Yat İnşaa Sanayinde
- Spor Malzemelerinde

- Bina Güçlendirme Projelerinde
- Havacılık ve Uzay Mühendisliğinde
- CNG Basınçlı Kaplarda
- Otomotiv Endüstrisinde
- Endüstriyel Malzemeler
- Askeri Amaçlı Malzemeler



Şekil 3.9. Kullanım Alanlarına Göre Talebin Yıllara Göre Dağılımı- Ton/Yıl [70]

3.1.5.4. Karbon Liflerin Özellikleri ve Avantajları

Karbon elyafı % 95 karbon atomundan yapılır ve modern bir teknolojik yiv ipliksi benzeri dokuya sahip olup bu malzemenin genel özellikleri aşağıda sıralandığı gibidir [50].

- Sınırsız raf ömrüne sahiptirler.
- Düşük Lif çapına sahiptirler, 5 – 8 μm
- Kopma uzamaları, %1,6 – 2,2
- Elektriksel öz dirençleri, 1650 $\mu\Omega$
- İyi bir ısı iletkenliğe sahiptirler, 20 W/M \square K (Standart modül için)
- Yüksek gerilme gerilimi mukavemeti, Gerilme modülü; 220 – 240 GPa, çekme mukavemeti 3450 – 4850 MPa

- Düşük yoğunluğa sahiptirler, $1,8 \text{ g/cm}^3$
- Yüksek mukavemetlidirler ve yüksek elastisite modülüne sahiptirler.
- Çeliğe göre 3 kat daha dayanıklıdır ve çelikten 4,5 kat daha hafiftirler.
- Ölü yükü artırmadığı gibi uygulandıkları elemanların geometrisini değiştirmezler.
- Yüksek sıcaklıklara ve mekanik etkilere oldukça dayanıklıdır.
- Güçlendirme ve onarım çalışmalarında ekonomik ve pratik çözümler sağlamalarının yanı sıra her çeşit yapı elemanı için güçlendirme malzemesi olarak kullanılırlar.
- Bakım gerektirmezler ve maliyeti yüksek makine veya ekipmana ihtiyaç duymazlar.
- Tasarımları kolay olmakla beraber kullanımları ve uygulamaları oldukça kolaydır. Esnek olmaları nedeniyle her türlü forma kolaylıkla adapte olurlar.
- Çelik veya betonarme yapı elemanları gibi güçlendirme tekniklerine nazaran çok daha kolay ve çabuk uygulanırlar.
- Eğilme dayanımını artırır ve sehimi azaltırlar [56].

3.1.6. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Avantajları

1-). Yüksek Mukavemet: Kompozit malzemeler diğer malzemelere kıyasla oldukça yüksek bir mukavemete (dayanıma) sahiptirler.

2-). Hafiflik: Kompozit malzemeler diğer tüm malzemelere göre birim alana düşen malzeme bakımından oldukça hafiftirler ve çelik gibi diğer malzemelere kıyasla oldukça yüksek mukavemete sahiptirler.

3-). Tasarım Esnekliği: Kompozit malzemeler istenilen her şekilde, boyutta ve estetik amaçlı dekoratif malzemelerin yapımında kolayca şekil alırlar ve kullanılırlar.

4-). Boyutsal Stabilité: Mekanik etkiler ve çevresel baskılar altında boyutlarını korurlar.

5-). Yüksek Dielektrik Direnimi: Birçok kompozitin üretimi için oldukça önemli bir özelliktir. Birçok komponentin üretimi konusunda oldukça önemli bir özelliktir.

6-). Korozyon Dayanımı: Kompozit malzemeler diğer tüm malzemelere kıyasla korozyona karşı oldukça dayanıklıdırlar ve bu nedenle birçok alanda tercih edilirler.

7-). Kalıplama Kolaylığı: Kompozit ürünler, çelik, ahşap gibi geleneksel ürünlere kıyasla daha kolay ve hızlı bir şekilde kalıplama işlemlerini sunar ve tek parçada kalıplama ile işlem kolaylığı sağlar.

8-). Yüzey Uygulamaları: Kompozit ürünlerin uygulanabilmesi için kullanılacak olan polyester reçineler özel olarak katkıları ile renklendirilebildikleri gibi kullanılacak kompozitin amacına uygun olacak şekilde kendinden renkli olarakta üretilebilirler. Yani kompozitler tüm yüzeylere reçineler yardımıyla yüzey uygulaması olarak kullanılabilirler.

9-). Şeffaflık Özelliği: Kompozit malzemeler yüzeylerine uygulandıkları malzemeleri tam olarak görme imkânı sağlarlar, cam gibi saydamdırlar ve ışığı geçirme özellikleri vardır. Işığı tam yayması ve geçirmesi özelliğinden dolayı seralarda kullanılırlar.

10-). Beton Yüzeylere Uygulama İmkânı: Kompozitler beton yüzeylere mükemmel ve pürüzsüz bir şekilde uygulanabilirler. Betonun gözenekli olmasından dolayı o gözenekler polyester reçine ile dolar ve üzerine sarılan elyaf ile pürüzsüz bir yüzey elde edilir. Bu şekilde kullanım alanında bir daralma olmaz.

11-). Ahşap Yüzeylere Uygulama İmkânı: Kompozit malzemeler beton yüzeylerde olduğu gibi ahşap yüzeylere de kolaylıkla uygulanır ve polyester reçineler yardımıyla yapıştırılırlar. Ancak ahşaba uygulama yapılırken kullanılan reçine ahşap yüzeyine iyice emdirilmelidir.

12-). Demir Yüzeylere Uygulama İmkânı: Kompozit malzemeler demir yüzeylere uygulanırken demir yüzeyde oluşan pas ve yağ tabakaları iyice temizlenmelidir. Temizlenen yüzeyler kompozitlerle kaplanarak korozyona karşı oldukça dayanıklı bir yüzey ve yeni kompozit malzeme meydana gelmiş olur.

13-). Yanmazlık Özelliği: Kompozit malzemelerin aleve ve sıcaklığa karşı dayanımları kullanılacak olan polyesterlerin cinsine ve türüne bağlı olarak değişiklik

göstermektedir.

14-). Kompozitler Sıcaklıktan Etkilenmez: Kompozit malzemeler sıcaklıktan etkilenmezler, çünkü sıcaklıktan etkilenmeyen polyester reçineler ile birlikte kullanılırlar ve bu sayede ısıdan etkilenmeler. Sıcağa karşı dayanıklılık kompozitin yapıştırılması için kullanılacak olan polyester reçinenin cinsine ve türüne bağlı olarak değişiklik gösterir.

15-). Kompozitler İçine Farklı Malzemeler Gömülebilir: Kompozit malzemeler yukarıda da belirtilen özelliklerde olduğu gibi içlerine; ahşap, çelik, beton gibi yapıda sıkça ve sürekli kullanılan yapı malzemelerinin yanı sıra, köpük, tel, halat gibi diğer malzemelerde kompozit malzemelerin içerisine kolaylıkla yerleştirilerek kompozitten bir kaplama malzemesi ile sarılır.

16-). Tamir Edilebilirlik Özelliği: Kompozit malzemeler tamir işlemlerinde de oldukça kolay bir şekilde kullanılırlar. Tamir işlemi tamamlandıktan sonra kompozit yüzeyinin pürüzsüz ve düzgün durması için zımpara ve benzeri malzemeler kullanılarak yüzey düzgün ve pürüzsüz bir hale getirilirler.

17-). Kompozitler Kesilip Delinebilir: Kompozit malzemeler tahta ve plastik gibi kolaylıkla delinirler ve kesilirler. Kompozitlerin istenilen şekilde hazırlanmasında kesim yapacak ucun cinsi çok büyük önem taşır, bu sayede düzgün bir kesim yapılabilir [43].

4. SARGILI BETON MODELLERİ

Yapı mühendisliğinde mekanik bir problemin çözülebilmesi için aşağıda gösterilmiş olan üç aşama kullanılabilir;

- Yapıda oluşabilecek denge koşullarının sağlanması
- Yapıda uygulama için oluşabilecek uygunluk koşullarının sağlanması
- Gerilme-şekil değiştirme değerlerinin kullanılan her malzeme için ilişkilerinin ve değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

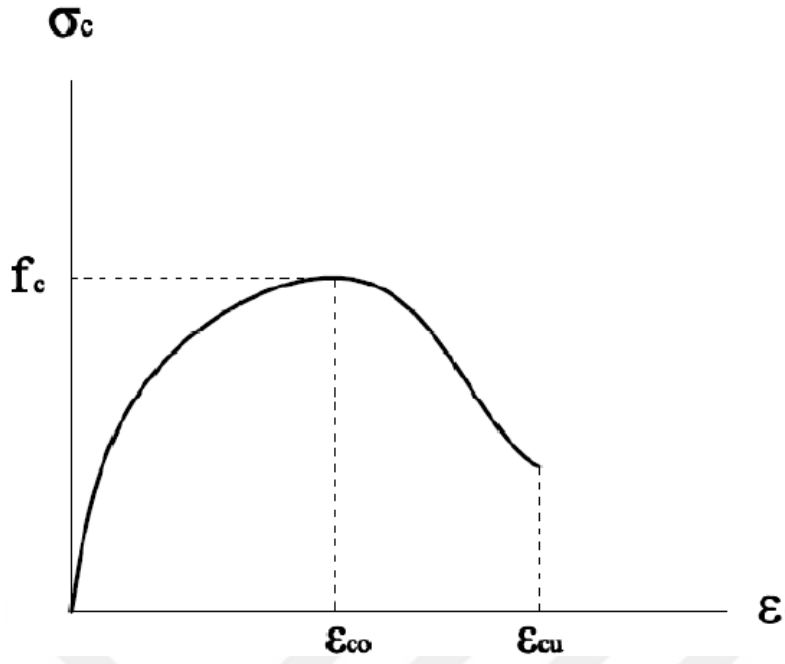
Bu üç evrenin sadece son aşamasında malzemenin kendine has özellikleri dikkate alınır ve bu özellikler bakımından malzemelerin özellikleri birim gerilme ilişkisine etkisi üzerinde büyük öneme sahiptir [71].

4.1. Betonun Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri

Betonun basınç dayanımı çekme dayanımının yanında çok yüksektir ve betonun çekme dayanımı çok düşük olduğundan, genellikle betonun basınç dayanımı dikkate alınır. Betonun gerilme-şekil değiştirme özellikleri yaygın olarak 150 mm taban çapına ve 300 mm yüksekliğe sahip uygun koşullarda hazırlanmış beton silindir numunelerin tek eksenli basınç altında elde edilmektedir.

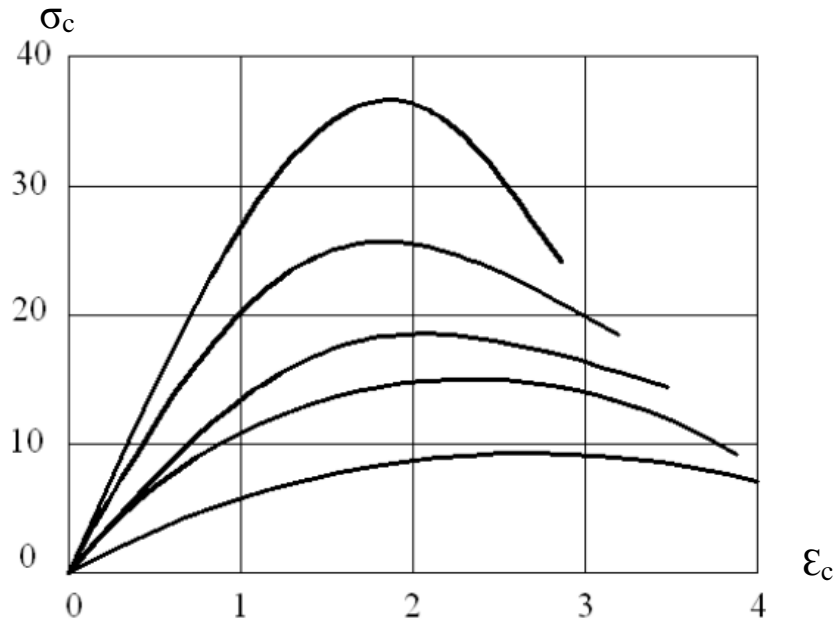
Betonun, gerilme-şekil değiştirme ilişkisini etkileyecek birçok değişkene sahip olduğu bilinmektedir; beton dayanımı, uygulanan yük tipi, uygulanan yükün uygulama hızı, yük öyküsü, kesit geometrisi, sargı özellikleri, sargı kalınlığı bu değişkenlerin en önemlilerindedir.

Beton için tipik gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tipik Beton Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi

Betonun gerilme-şekil değiştirme özellikleri, beton dayanımına göre değişir. Beton basınç dayanımı arttıkça, beton deforme olma kabiliyeti azalır; gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin başındaki eğim (elastisite (esneklik) modülü) artar ve tepe noktalar keskinleşir. Şekil 4.2.'de görülmektedir.



Şekil 4.2. Beton Dayanımının Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi İlişkisine Etkisi [72]

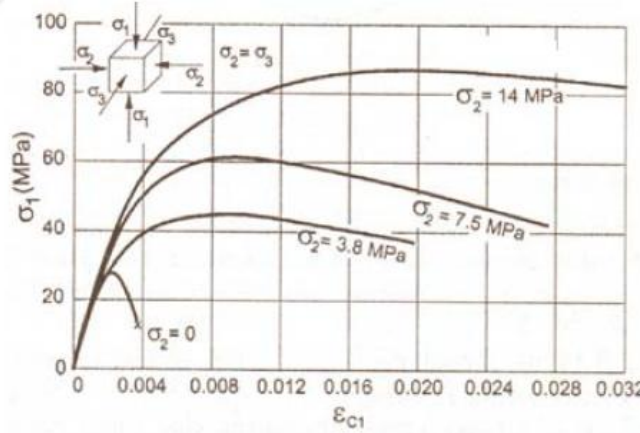
4.2. Sargılı Beton Davranışı

Sargılı beton, ekipmanlar (donatılar, vs.) vasıtasıyla beton çekirdeğe yanal basınç uygulama prensibine dayanır. Farklı yöntemlerle sargılanan beton göbekte, uygulanan yanal basınçla betonun mukavemeti ve sünekliliği artar [73].

Sargısız betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkileri tek eksenli yüke göre incelenmiştir. Sargılı beton numuneleri ise üç eksenli yükleme koşullarına göre araştırılmıştır. Betonun yanal deformasyonlarının kumaş ile sınırlandırılması ile beton göbekte üç eksenli gerilme durumu oluşur. Üç eksenli yüke göre oluşan yükleme deneylerinin temel amacı, yanal olarak uygulanan basıncın aksel olarak uygulanan basıncın direnci üzerinde oluşacak olan etkisini belirlemektir. Bu durum; basit bir şekilde ifade edilmek istenirse aşağıdaki formül kullanılabilir.

$$f_{cc} = f_c + K\sigma_l \quad (4.1)$$

4.1 formülünde verilen K katsayısının 4,50 ila 7,00 arasında değişen bir değer olarak alınabilir. Şekil 4.3.'de üç eksenli gerilme altında ve farklı basınçlar altında betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisini göstermektedir.

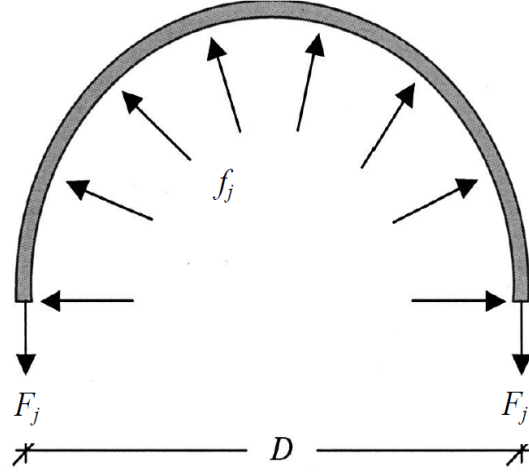


Şekil 4.3. Betonun Üç Eksenli Gerilme Altındaki Davranışı [71]

Betonarme uygulamada, beton göbek genel olarak enine donatı ile sargılanır. Daire kesitli betonarme elemanlarda sargı işlemi için dairesel etriyeler veya spiral etriyeler kullanılırken, dikdörtgen kesitli elemanlarda ise sargı işlemi için etriyeler kullanılır ve karşılıklı bağlama için ise çirozlar kullanılır. Betonun mukavemeti arttıkça beton gevrekleşir ve yanal deformasyon kabiliyeti azalır, sargının etkisi azalır [71, 72, 74]. Ayrıca aksel yük seviyesinin artmasıyla sünekliliği arttırmak için enine donatı da artırılmalıdır [74].

4.3. Sargılı Beton Modelleri

Betonun basınç dayanımı, elastisite modülleri gibi özelliklerinin tahmini için birçok araştırmacı tarafından çok sayıda çalışma yapılmıştır.

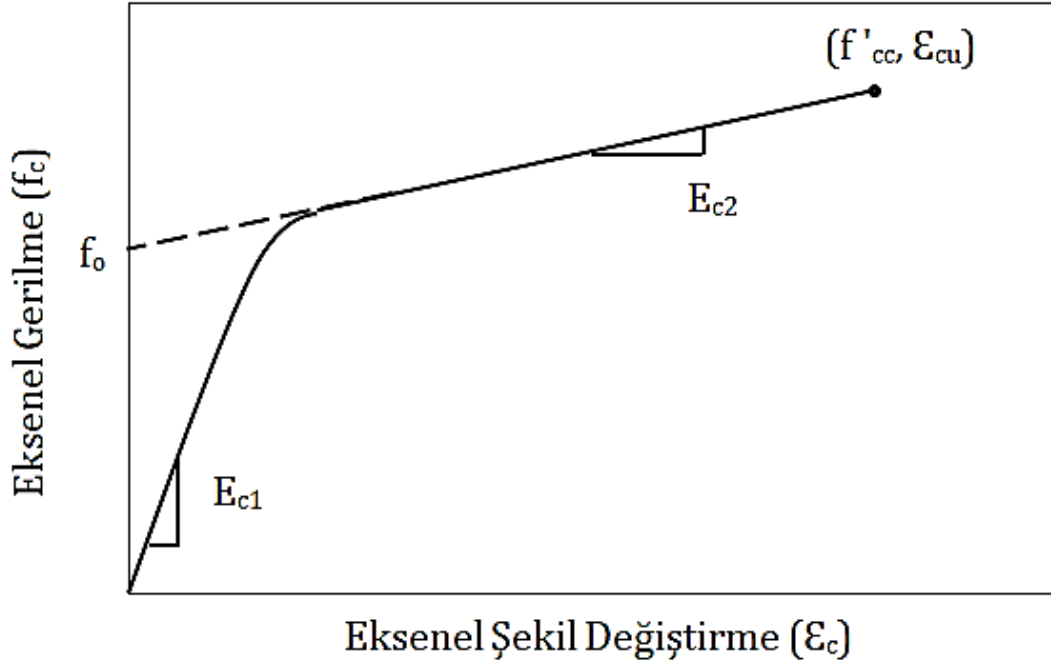


Şekil 4.4. Sargılı Beton Kesiti

Betonda basınç gerilmeleri oluşurken sargı malzemesinden de çekme gerilmeleri oluşur ve sargı malzemesinin birim boyda oluşan çekme kuvveti genel olarak (4.2) denkleminde verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$F_j = 2n_f + tf_i \quad (4.2)$$

4.3.1. Richart ve Abbott (1975) Modeli



Şekil 4.5. Richard ve Abbott Tarafından Önerilen Eğri [75]

Şekil 4.5.'de görülen aksenal gerilme-aksenal şekil değişirme eğrisi Richart ve Abbott tarafından önerilmiştir. Sargılı betonun gerilme şekil değişirme davranışı, iki eğri ile tanımlanmış olup ilk eğri eğrilerin elastik kısmı olarak adlandırılan lineer bir eğriden (E_{c1}), ikinci eğri ise yine taşıma gücüne erişilene dek lineer olarak artış gösteren başka bir eğriden (E_{c2}) oluşmaktadır. Burada, iki eğri arasındaki geçişi tamamlamak için (n) belirlenmiştir. Eğriyi genel olarak ifade eden denklemler aşağıdaki gibi verilmiştir [75].

$$f_c = \frac{(E_{c1} - E_{c2}) \varepsilon_c}{\left\{ 1 + \left[\frac{(E_{c1} - E_{c2}) \varepsilon_c}{f_o} \right]^n \right\}^{\frac{1}{n}}} + E_{c2} \varepsilon_c \quad (4.3)$$

$$f_o = f'_{cc} - E_{c2} \varepsilon_{cu} \quad (4.4)$$

$$n = 1 + \frac{1}{\frac{E_{c1}}{E_{c2}} - 1} \quad (4.5)$$

Bu eğri tipine uyan, literatürde tanımlı çoğu model için betonun elastisite modülünün hesabında, ACI 318-95 yönetmeliğinde belirtilen (4.6) denklemi kullanılmaktadır.

$$E_{c1} = E_c = 4730\sqrt{f'_{co}} \quad (4.6)$$

4.3.2. Samaan ve Diğ. (1998) Modeli

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir [76].

$$f_o = 0,872 f'_{co} + 0,371 f_{lu} + 6,258 \quad n = 1,5 \quad (4.7)$$

$$f_{lu} = \frac{2E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}{D} \varepsilon_{f_{fp}} \quad (4.8)$$

$$E_{c1} = 3950\sqrt{f'_{co}} \quad (4.9)$$

$$E_{c2} = 245,61 f'_{co}{}^{0,2} + 1,3456 \left(\frac{E_{f_{fp}} t_{f_{fp}}}{D} \right) \quad (4.10)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirme değerleri ise (4.11) ve (4.12)'de verilen denklemler ile tanımlanmaktadır.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 6,0(f_{lu})^{0,7} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cc} - f_o}{E_{c2}} \quad (4.12)$$

4.3.3. Lam ve Teng (2003) Modeli

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir [77].

$$f_c = E_{c1} \varepsilon_c - \frac{(E_{c1} - E_{c2})^2}{4f_o} \varepsilon_c^2 \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1}) \quad (4.13)$$

$$f_o = f'_{co} \quad f_c = f'_{co} + E_{c2} \varepsilon_c \quad (\varepsilon_{c1} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_{c1} = \frac{2f'_{co}}{(E_{c1} - E_{c2})} \quad (4.15)$$

$$E_{c2} = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cu}} \quad (4.16)$$

$$E_{c1} = E_c = 4730\sqrt{f'_{co}} \quad (4.17)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3,3 \frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} \quad (4.18)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1,75 + 5,53 \left(\frac{f_{lu,a}}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{frp}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \quad (4.19)$$

$$f_{lu,a} = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \varepsilon_{h,rup} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{h,rup} = k_{\varepsilon} \varepsilon_{frp} \quad k_{\varepsilon} = 0,586 (CFRP) \quad (4.21)$$

4.3.4. Jiang ve Teng (2006) Modeli

Modelde eğri Lam ve Teng tarafından önerilen ifadeler kullanılarak tanımlanmıştır. Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi verilmektedir [78].

$$\frac{E_1}{\left(\frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}} \right)} \geq 0,01 \text{ ise}; \quad \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3,5 \left(\frac{E_1}{\left(\frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}} \right)} - 0,01 \right) \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right) \quad (4.22)$$

$$\frac{E_1}{\left(\frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}} \right)} < 0,01 \text{ ise}; \quad \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 \quad (4.23)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = 1,65 + 6,5 \left(\frac{E_1}{\left(\frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}} \right)} \right)^{0,8} \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^{1,45} \quad (4.24)$$

$$\varepsilon_{h,rup} = k_{\varepsilon} \varepsilon_{frp} \quad k_{\varepsilon} = 0,5 (CFRP) \quad (4.25)$$

$$E_1 = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \quad (4.26)$$

4.3.5. Fahmy ve Wu (2010) Modeli

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir [79].

$$E_{c1} = E_c = 4730\sqrt{f'_{co}} \quad (4.27)$$

$$E_{c2} = m_2 \left(245,61(f'_{co})^{m_1} + 0,6728E_1 \right)$$

$$m_1 = 0,5, \quad m_2 = 0,83 \quad f'_{co} \leq 40 \text{ MPa} \quad (4.28)$$

$$m_1 = 0,2, \quad m_2 = 1,73 \quad f'_{co} > 40 \text{ MPa}$$

$$E_1 = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \quad (4.29)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_{lu} \quad (4.30)$$

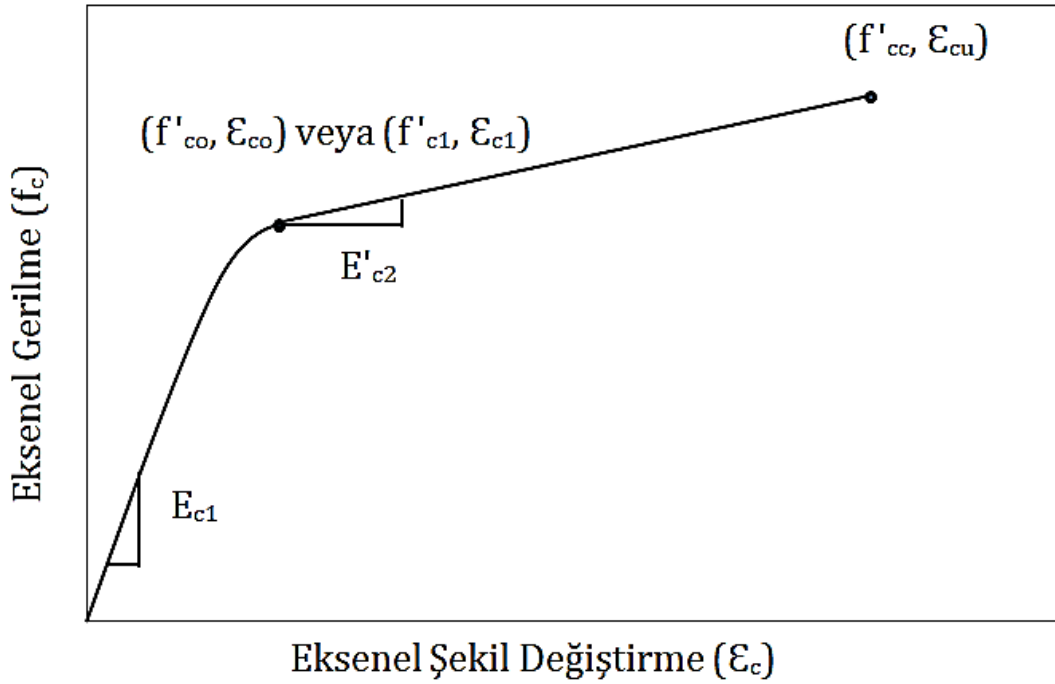
$$k_1 = 4,5 f'_{lu}{}^{-0,3} \quad f'_{co} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$k_1 = 3,75 f'_{lu}{}^{-0,3} \quad f'_{co} > 40 \text{ MPa}$$

$$f'_{lu} = \frac{2E_{frp}t_{frp}}{D} \varepsilon_{frp} \quad (4.31)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{E_{c2}} \quad (4.32)$$

4.3.6. Tautanji (1999) Modeli



Şekil 4.6. Tautanji Tarafından Önerilen Eğri [80]

FRP sargılı beton için önerilen bir diğer model olan Şekil 4.6.'da görülen eğri yine iki farklı eğri ile tanımlanmış olup ilk eğrinin eğimi elastik olarak artan kısmın elastisite modülünü (E_{c1}), ikinci eğrinin eğimi ise daha az eğimle yine artan ve taşıma gücüne erişebilen kısmın elastisite modülünü (E'_{c2}) vermektedir. Bu tip modellerde ikinci kısmın elastisite modülü olan (E'_{c2}), başlangıçtaki eğrinin maksimum olduğu noktadaki gerilme değeri (f'_{c1}) aşıldıktan sonraki kısmın tanjant eğimi olarak tanımlanmaktadır. Eğriyi genel olarak ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi verilmiştir [80].

$$f_c = \frac{A_j \varepsilon_c}{1 + C_j \varepsilon_c + D_j \varepsilon_c^2} \quad (4.33)$$

$$A_j = E_{c1} \quad (4.34)$$

$$C_j = \frac{E_{c1}}{f'_{c1}} - \frac{2}{\varepsilon_{c1}} + \frac{E_{c1} E'_{c2} \varepsilon_{c1}}{f'_{c1}{}^2} \quad (4.35)$$

$$D_j = \frac{1}{\varepsilon_{c1}{}^2} - \frac{E_{c1} E'_{c2}}{f'_{c1}{}^2} \quad (4.36)$$

Önerdikleri modelde eğriyi tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibi verilmektedir [80].

$$f'_{c1} = f'_{co} \left[1 + 0,0178 \left(\frac{E_1}{f'_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (4.37)$$

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{co} \left[1 + 0,0448 \left(\frac{E_1}{f'_{co}} \right)^{0,85} \right] \quad (4.38)$$

$$E_{c1} = 10200 \left(f'_{co} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.39)$$

$$E'_{c2} = 0,3075 \left(\frac{f'_{co}}{\varepsilon_{co}} \right) \quad (4.40)$$

$$E_1 = \frac{2E_{fp} t_{fp}}{D} \quad (4.41)$$

Modelde taşıma gücüne ulaşıldığı andaki dayanım ve şekil değiştirmeyi ifade eden denklemler ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_{lu} \quad (4.42)$$

$$k_1 = 3,5 \left(\frac{f'_{lu}}{f'_{co}} \right)^{0,15} \quad (4.43)$$

$$f'_{lu} = \frac{2E_{fp} t_{fp}}{D} \varepsilon_{fp} \quad (4.44)$$

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} \left[1 + k_2 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (4.45)$$

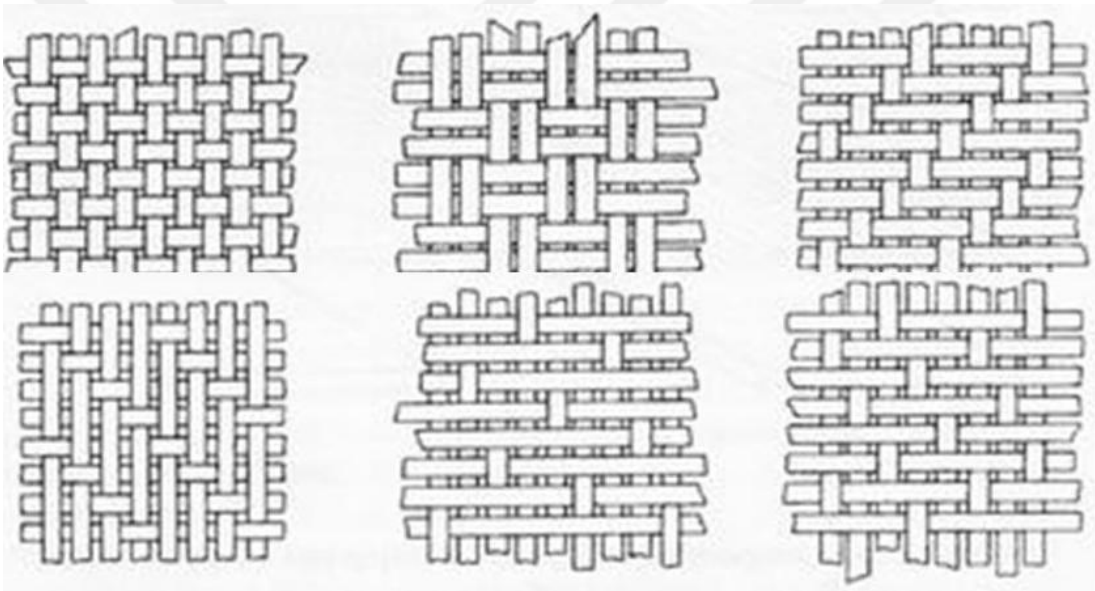
$$k_2 = 310,57 \varepsilon_{lu} + 1,9 \quad (4.46)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada elyaf kumaş tabaka sayısına ve beton sınıfına bağlı olarak elyaf sargılı beton numunelerinin mekanik özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma Bozok Üniversitesi Yapı Mekaniği ve Malzemeleri Laboratuvarında yapılmıştır.

5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma için iki farklı tür elyaf kumaş, beton silindir numune üretimi için çimento, agrega, katkı, silis umanı ve su hazırlanmıştır. Bunlardan elyaf kumaşlar ister cam ister karbon olsun farklı dokuma biçimlerine göre Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi temin edilebilmektedir.



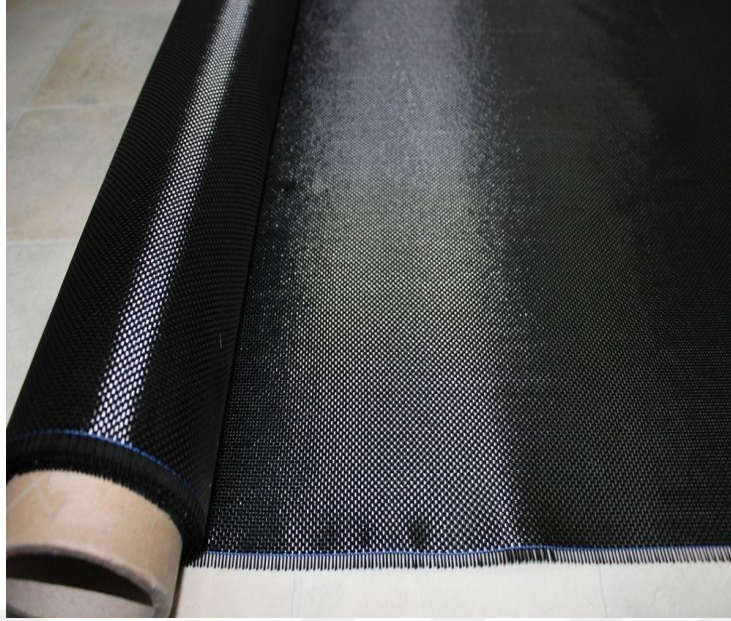
Şekil 5.1. Elyaf Kumaşlarda Dokuma Biçimleri

5.1.1. Karbon Elyaf Kumaş

Deneylerde kullanılacak olan Tek yönlü (UD) karbon elyaf kumaşlar ülkemize ithal olarak gelmiştir. Kumaş atkı yönünden termoplastik çözgü yönünden ise karbon elyaflar ile üretilmiştir. Karbon Elyaf Kumaşın Özellikleri Tablo 5.1 de verilmiştir.

Tablo 5.1. Karbon Elyaf Kumaşın Özellikleri

Lif Tipi	Karbon
Lif Dayanımı	3900
Lif Rijitliği	230
Alan Ağırlığı	300
Elyaf Kalınlığı	0,166
Stil	Örgülü UD



Şekil 5.2. Karbon Elyaf Kumaş

5.1.2. Cam Elyaf Kumaş

Tek doğrultuda (UD) cam elyaf kumaş; yük taşıyan fiberlerin tek bir doğrultuda dizildiği kumaş türüdür. Ekonomiktir ve çekme dayanımı yüksektir.

Tablo 5.2. Cam Elyaf Kumaşın Özellikleri

Lif Tipi	Cam
Lif Dayanımı	2300
Lif Rijitliği	190
Alan Ağırlığı	260
Elyaf Kalınlığı	0,172
Stil	Örgülü UD



Şekil 5.3. Karbon Elyaf Kumaş

5.1.3. Epoksi Reçine

Karbon ve cam kumaşların beton numunelerine yapıştırılmasında epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır (Şekil 5.4.). İki bileşenli suya dayanıklı, yüksek mukavemetli solventsiz yapıştırma harcında yapıştırıcı olan epoksi malzemesi ve priz süresini düzenleyen sertleştirici bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Çift Bileşenli Epoksi

5.1.4. Beton

C20, C50 ve C75 olmak üzere üç farklı beton sınıfı için 150x300 mm ölçülerinde 45 adet silindirik beton numunesi laboratuvarında hazırlanmıştır. Beton üretiminde elek analizi ile belirlenen granülometri eğrisi yardımıyla hazırlanan karışım hesabı göz önüne alınarak

belirlenen miktarlarda agrega, su, çimento, silis dumanı ve katkı göz önüne alınarak beton karışımı hazırlanmıştır.

5.1.4.1. Agrega

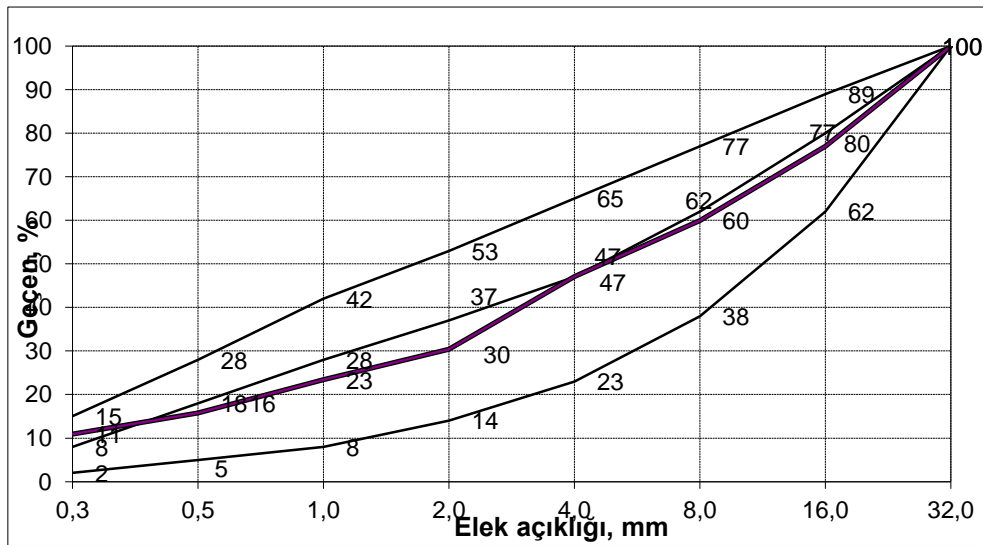
Elek analizi yardımıyla çizilmiş granülometri eğrisine uygun olarak hesap edilen miktarlarda agrega hazırlanmıştır. Üretimde kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 5.3.'de, üretimde kullanılan agregaların elek analizi sonuçları Tablo 5.4.'de verilmektedir.

Tablo 5.3. Üretimde Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega	Su Emme Ağırlığı (%)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Tane Birim Ağırlığı (kg/m ³)
0 – 3 Kum	2,98	1698	2478
7 – 15 Çakıl	2,57	1704	2535
15 – 30 Çakıl	2,75	1556	2568

Tablo 5.4. Üretimde Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları

Elek Gözü Boyutu	(0 – 4) Kırmataş	(4 – 13) Kırmataş	(13– 22) Kırmataş
0,25	22,5	0,3	0,2
0,5	32,6	0,3	0,2
1	48,5	0,3	0,2
2	63,0	0,3	0,2
4	89,2	16,6	0,4
8	100,0	47,0	0,8
16	100,0	100,0	14,8
32	100,0	100,0	100,0



Şekil 5.5. Agrega Karışımına Ait Granülometri Eğrisi

5.1.4.2. Çimento

Beton üretiminde Portland CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özellikleri Tablo 5.5.'de verildiği gibidir.

Tablo 5.5. Kullanılan Çimentonun Özellikleri

Kimyasal Analiz Sonuçları %		Standart	
SiO ₂	20,36		
Al ₂ O ₃	4,56		
Fe ₂ O ₃	3,5		
CaO	64,77		
MgO	1,06		
SO ₃	2,79	≤4,0	
Çözünmeyen Kalıntı	0,64	≤5,0	
Kızdırma Kaybı	1,89	≤5,0	
Serbest Kireç	1,00		
Toplam Alkali	0,56		
Klorür	0,0079	≤0,10	
Minerolojik Bileşim %			
C ₃ S	61,28		
C ₂ S	12,15		
C ₃ A	6,16		
C ₄ AF	10,65		
Fiziksel Analiz Sonuçları %		Standart	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,14		
Kıvam (Su/Çimento)	27,3		
Donma Süresi (Dak.)	Başlangıç	158	≥60
	Son	220	
Hacim Sabitliği (mm)	1	≤10,0	
İncelik %			
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3122		
200 µm elek bakiyesi			
90 µm elek bakiyesi	0,2		
45 µm elek bakiyesi			
32 µm elek bakiyesi	14,3		
Dayanım Sonuçları MPa		Standart	
2.gün	28,4	≥20,0	
7.gün	49,0		
28.gün	57,8	≥42,5≤62,5	

5.1.4.3. Beton Karışım Suyu

Betonun hazırlanmasında kullanılan karışım suyu çimento hidrasyonunu sağlamak ve taze betonda istenilen işlenebilirliği sağlama görevlerine sahiptir. Beton karışımında kullanılan bu su asidik özelliği göstermemelidir.

5.1.4.4. Katkı

Master Glenium SKY506M yüksek oranda su azaltıcı, süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Kullanılan katkıının teknik özellikleri Tablo 5.6.'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Master Glenium SKY506M Katkı

Tablo 5.6. Master Glenium SKY506M Katkısına Ait Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Teknik Özellikler	
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilit Eter Esaslı
Görünüm	Opak
Özgül Ağırlık (20°C'de)	1,074 – 1,134 kg7lt
pH Değeri	5 – 7
Alkali İçeriği (%)	≤3,00
Klor İyon İçeriği (%)	≤0,10
Korozyon Davranışı	Sadece EN 934-1:2008, EK A.1 standardına uygun bileşenleri içerir.
Tehlikeli Maddeler	Tamamen Ek-AZ'ye uygundur.

5.1.4.5. Silis Dumanı

Çalışmada ASTM C-1240 standartlarına uygun silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanına ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 5.7.'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Silis Dumanının Kimyasal Analizi

Bileşenler (%)	Silis Dumanı
SiO ₂	85,35
Al ₂ O ₃	4,48
Fe ₂ O ₃	2,39
CaO	0,80
MgO	1,47
Na ₂ O+K ₂ O	-
SO ₃	1,34
Kızdırma Kaybı	3,4
Çözünmeyen Kalıntı	-



Şekil 5.7. Silis Dumanı

5.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

5.2.1. Beton Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada C20, C50 ve C75 olmak üzere 3 farklı beton sınıfından 150x300 mm ölçülerinde 45 adet beton numunesi Bozok Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında hazırlanmıştır.

Öncelikle daha önce çizilmiş olan granülometri eğrisi yardımıyla belirlenen karışım agrega miktarları göz önüne alınarak C20 betonu için agregalar, çimento, su ve katkıları betoniye vasıtasıyla karıştırılarak taze beton elde edilmiştir.

Üretilen beton 150x300 mm ölçülerinde boş silindir kalıplar içerisine dökülmüş ve kalıplar 3 seferde doldurulmuştur. Bu doldurma işleminde kalıp içerisine konulan beton her seferinde 25 kez şişlenerek doldurulmuştur. Daha sonra beton içerisindeki boşluğun en aza indirilebilmesi için sarsma tablasında sarsılarak sıkıştırılmıştır. 15 adet C20 silindir beton numunesi hazırlanmıştır. Yukarıdaki anlatılan işlemlerin tamamı tekrarlanarak 15 adet C50 ve 15 adet C75 silindir beton numunesi olmak üzere toplamda 45 adet silindir beton numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 5.8. Deneylerde Kullanılan Betoniyer



Şekil 5.9. Taze Beton Numuneleri

Beton numuneler döküldükten sonra kurumaya bırakılmış ve bir gün sonra prizini alması için kür havuzuna konularak 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir.



Şekil 5.10. Kür Havuzundaki Numuneler

5.2.2. Elyaf Kumaşların Hazırlanması

Beton numuneler prizini alırken sargılama için gerekli olan; Karbon Elyaf Polimer (CFRP), Cam Elyaf Polimer (GFRP) kumaşlar 300x600 mm ölçülerinde şarzlı kevlar makası ile kesilerek hazırlandı. Kumaşlarda literatür dikkate alınarak 130 mm bindirme boyu bırakılmasına dikkat edildi. Bu şekilde hem CFRP hem de GFRP kumaşları kesilerek hazırlandı.



Şekil 5.11. Karbon Elyaf Kumaşın Kesilmesi



Şekil 5.12. 300x600 mm Ölçülerinde Kesilerek Hazırlanan Kumaşlar

5.2.3. Elyaf Kumaşların Beton Numunelere Sarılması

Kür havuzuna konulmuş olan numuneler 28 gün sonra havuzdan çıkarılarak kuruması için oda sıcaklığında bekletildi. Daha sonra kurumaya bırakılan numunelere baş kısımlarında pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için ince kum ve çimento birleşiminden oluşan başlıklar yapılmıştır.



Şekil 5.13. C20, C50, C75 Beton Silindir Numuneleri Ayrı Ayrı



Şekil 5.14. C20, C50, C75 Beton Silindir Numuneleri Beraber

Bu numunelerden her bir beton sınıfı için 3 adet yani toplamda 9 adet referans numunesi olarak ayrılmıştır. Kalan numuneler; C20 beton sınıfından 3 adedi tek kat karbon elyaf, 3 adedi çift kat karbon elyaf, 3 adedi tek kat UD cam elyaf ve 3 adedi çift kat UD cam elyaf olmak üzere 12 adet sargılı beton numunesi üretilmiştir. C50 beton sınıfından 3 adedi tek kat karbon elyaf, 3 adedi çift kat karbon elyaf, 3 adedi tek kat UD cam elyaf ve 3 adedi çift kat UD cam elyaf olmak üzere 12 adet sargılı beton numunesi üretilmiştir. C75 beton sınıfından 3 adedi tek kat karbon elyaf, 3 adedi çift kat karbon elyaf, 3 adedi tek kat UD cam elyaf ve 3 adedi çift kat UD cam elyaf olmak üzere 12 adet sargılı beton numunesi üretilmiştir. Toplamda ise 36 adet sargılı beton numunesi hazırlanmıştır. Elyaf kumaşların betona sarılmasında yani Cam ve Karbon elyaf kumaşların beton numunelerine yapıştırılmasında epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçine iki bileşenli suya dayanıklı, yüksek mukavemetli solventsiz yapıştırma harcıdır. Karışımında; yapıştırıcı olan epoksi malzemesi priz süresini

düzenleyen sertleştirici bulunmaktadır. Bu yapıştırıcı için kullanma kılavuzunda önerilen 4:1 oranında karışım düşük devirli matkap ile karıştırılarak hazırlanmıştır.



Şekil 5.15. Çift Bileşenli Epoksinin Hazırlanması

Hazırlanan epoksi yapıştırıcısı kısa sürede reaksiyona geçtiğinden bir seferde 2 numunenin sarılabilmesi için yeterli olacak epoksi karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi; beton yüzeyinin zımparalanıp silindikten sonra hazır hale getirilmesi ile beton yüzeyine ince bir tabaka halinde mala veya boyacı rulosu yardımıyla sürülmesiyle elyaf cam ve karbon kumaşlar beton yüzeyine yapıştırılmıştır. Daha sonra beton yüzeyi ile karbon-cam elyaf kumaşlar arasında oluşabilecek hava kabarcıkları rulo yardımıyla giderilmiştir.



Şekil 5.16. Cam Elyaf Kumaşların Betona Sarılması



Şekil 5.17. Karbon Elyaf ve Cam Elyaf Sargılı Numuneler

5.3. Deneylerin Yapılması

Deneyler Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında gerçekleştirildi.

5.3.1. Referans Beton Numuneleri

Daha önce Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında üretilmiş olan referans beton numuneleri 28 günlük kürün sonunda su tanklarından çıkarılarak kurumaya bırakıldı ve kuruduktan sonra sırasıyla tüm referans beton numunelerine 500 ton'luk cihazda aksel basınc testi uygulandı. Testler yapılırken kullanılacak 500 ton'luk cihaz yük kontrollü olarak ayarlandı.

5.3.2. Elyaf Sargılı Beton Numuneler

Karbon elyaf ve cam elyaf UD ile sargılı beton numuneler sırasıyla test edildi. Sargılı olan betonlara aksel basınc testi uygulanırken LVDT'ler aracılığıyla yatay ve düşey yer değiştirmenin aksel yük ile değişimi ve aksel yük-zaman değişimi kaydedildi.



Şekil 5.18. Deney Düzeneği

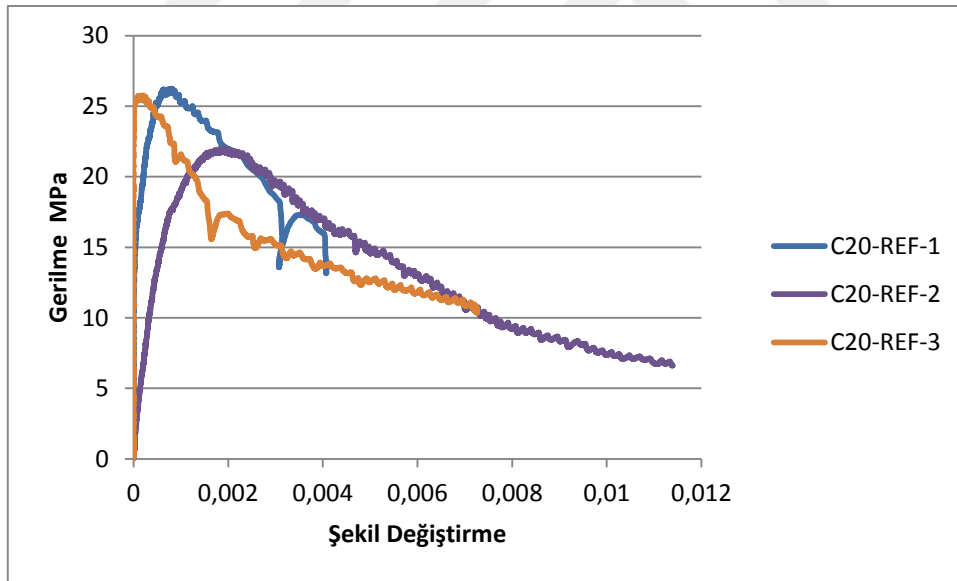
5.4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu çalışmada yanal deformasyonların Karbon elyaf (UD) ve Cam elyaf (UD) ile sınırlandırılmış C20, C50, C75 sınıfına ait betonlar 500 ton'luk preste eksenel basınç altında test edildi. Bu işlemden test sonucu; eksenel düşey yük ve eksenel yatay yükleri ile yatay ve düşey şekil değiştirmeler, bu elde edilen verilere bağlı olarak da gerilme-düşey deformasyon eğrileri belirlendi.

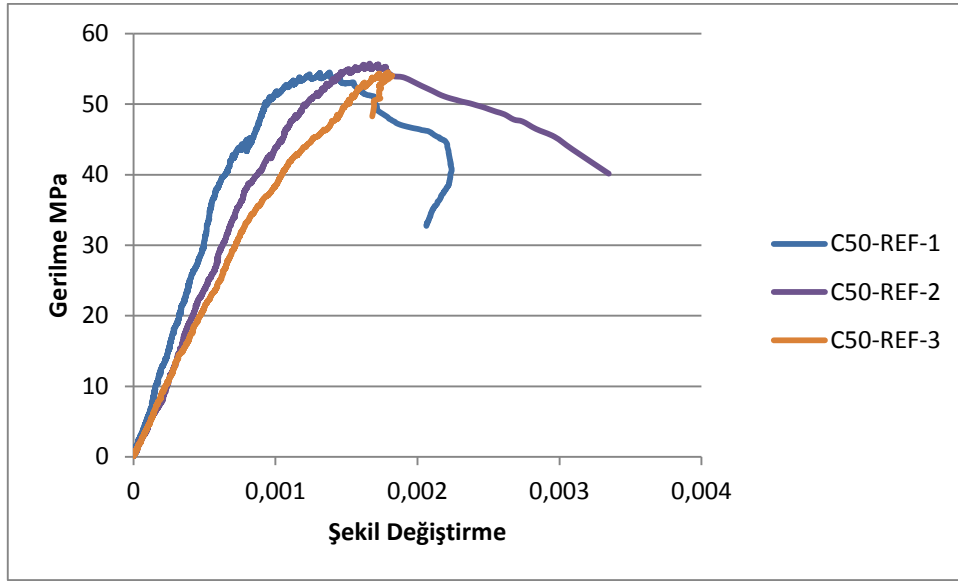
Deneylerde derecesi beton sınıfına ve elyaf cinsine bağlı olsa da genel olarak eksenel basınç arttıkça numune yana doğru genişlemeye çalışırken sargı bu yanal deformasyona mani olmaya çalışmıştır. Böylece sargısız bir numuneye göre hem basınç dayanımı hem de sünekliliği oldukça artmıştır.

5.4.1. Referans Beton Numuneleri

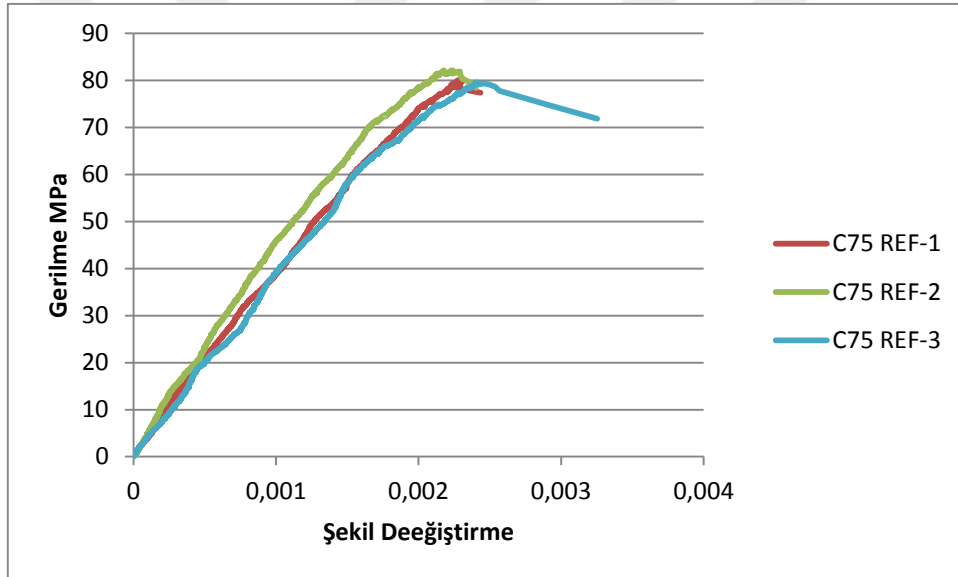
C20, C50 ve C75 beton sınıfına ait referans beton numuneleri 500 ton'luk eksenel basınç altında test edilerek yük-deformasyon değerleri elde edilmiştir. Bu elde edilen değerlere bağlı olarak da gerilme-şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir.



Şekil 5.19. C20 Referans Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri



Şekil 5.20. C50 Referans Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri



Şekil 5.21. C75 Referans Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri

Tablo 5.8. Referans Beton Numuneleri İçin Mekanik Özellikler

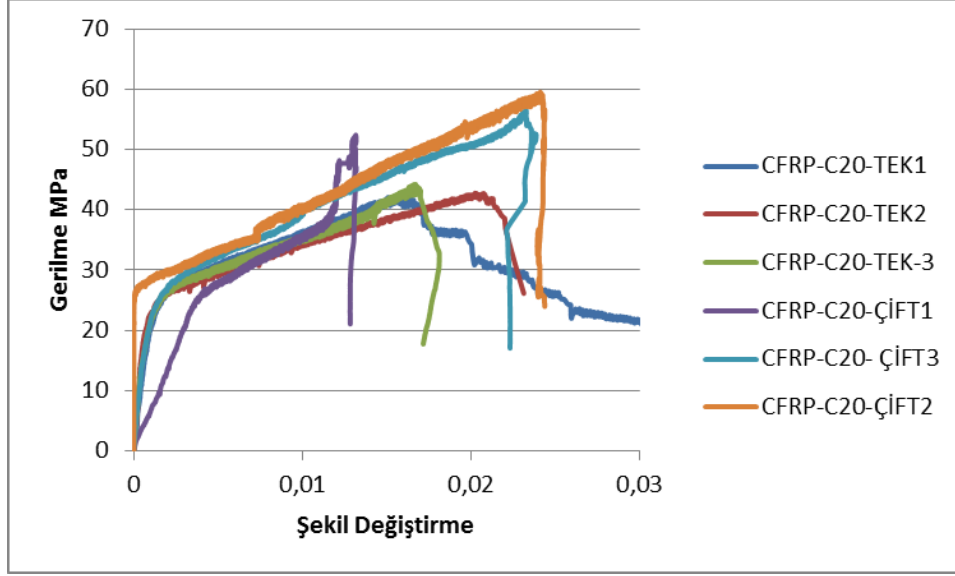
Beton Sınıfı	Yük (kN)	Düşey Deplasman	Düşey Şekil Değişirme	Gerilme (MPa)	Ortalama Nihai Yük (kN) P	Ortalama Nihai Gerilme (MPa) F _{co}	Nihai Şekil Değişirme	Elastisite Modülü
C20	388,732	0,3065	0,002309	22,00	435,894	24,70	0,001052	23234
	463,550	0,12	0,000747	26,30				
	455,399	0,016	0,0001	25,80				
C50	985,088	0,266	0,001663	55,80	972,329	55,03	0,001335	34467
	962,952	0,221	0,001381	54,50				
C75	968,947	0,1545	0,00096	54,80	1420,093	80,37	0,002216	42134
	1452,060	0,358	0,002238	82,20				
	1401,370	0,2585	0,002	79,30				
	1406,850	0,3855	0,002409	79,6				

5.4.2. Karbon Elyaf (CFRP) Sargılı Beton Numuneleri

C20, C50, C75 olmak üzere üç farklı beton sınıfına ait olan numuneler tek kat ve çift kat olmak üzere iki farklı sargı sayısına göre hazırlanan numuneler aksenal basınç altında test edilmişlerdir ve yük-deformasyon değerleri ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlere bağlı olarak da aksenal gerilme-şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme ve şekil değiştirme değerleri tek kat ve iki kat sargı durumu için Şekil 5.22., Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'de grafik olarak Tablo 5.9.'da ise sayısal değerler olarak verilmiştir.

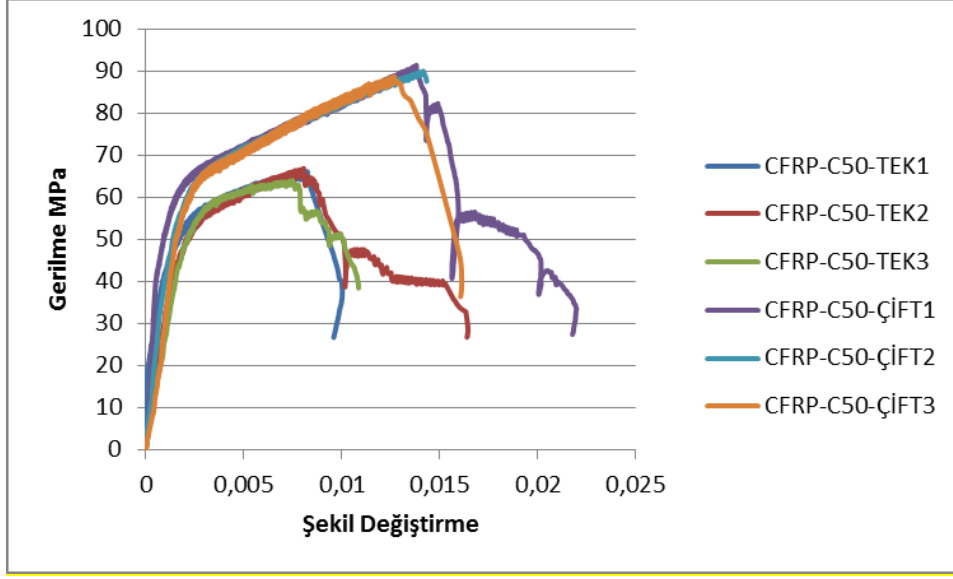
Tablo 5.9. CFRP Sargılı Beton Numunelere Ait Gerilme Değerleri

Numune Adı	Nihai Yük (kN)	Düşey Deplasman (mm)	Düşey Şekil Değiştirme	Alan (mm ²) A	Nihai Gerilme (MPa)	Ortalama Nihai Gerilme (MPa) F _{co}	Ortalama Düşey Şekil Değiştirme
CFRP-C20 TEK KAT-1	745,734	2,5035	0,015647	17668	42,2	43,067	0,017464
CFRP-C20 TEK KAT-2	755,880	3,2365	0,020228	17668	42,8		
CFRP-C20 TEK KAT-3	781,706	2,6735	0,016516	17668	44,2		
CFRP-C20 ÇİFT KAT-1	926,057	2,085	0,013130	17668	52,4	56,133	0,020029
CFRP-C20 ÇİFT KAT-2	1051,960	3,698	0,024056	17668	59,5		
CFRP-C20 ÇİFT KAT-3	998,463	3,6685	0,02290	17668	56,5		
CFRP-C50 TEK KAT-1	1169,10	1,244	0,007775	17668	66,2	65,7	0,031605
CFRP-C50 TEK KAT-2	1182,010	1,2885	0,007956	17668	66,9		
CFRP-C50 TEK KAT-3	1131,280	1,198	0,00748	17668	64		
CFRP-C50 ÇİFT KAT-1	1614,580	2,135	0,013344	17668	91,4	90,0	0,013389
CFRP-C50 ÇİFT KAT-2	1590,410	2,263	0,014144	17668	90		
CFRP-C50 ÇİFT KAT-3	1566,210	2,0295	0,012678	17668	88,6		
CFRP-C75 TEK KAT-1	1649,200	-	0,0018345	17668	91,8	89,367	0,001845
CFRP-C75 TEK KAT-2	1542,470	0,2065	0,001291	17668	87,3		
CFRP-C75 TEK KAT-3	1573,060	0,3855	0,002409	17668	89		
CFRP-C75 ÇİFT KAT-1	1622,780	0,406	0,002538	17668	93,3	98,867	0,002151
CFRP-C75 ÇİFT KAT-2	1810,020	0,334	0,002088	17668	102,4		
CFRP-C75 ÇİFT KAT-3	1782,230	0,2565	0,001828	17668	100,9		



Şekil 5.22. CFRP-C20 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

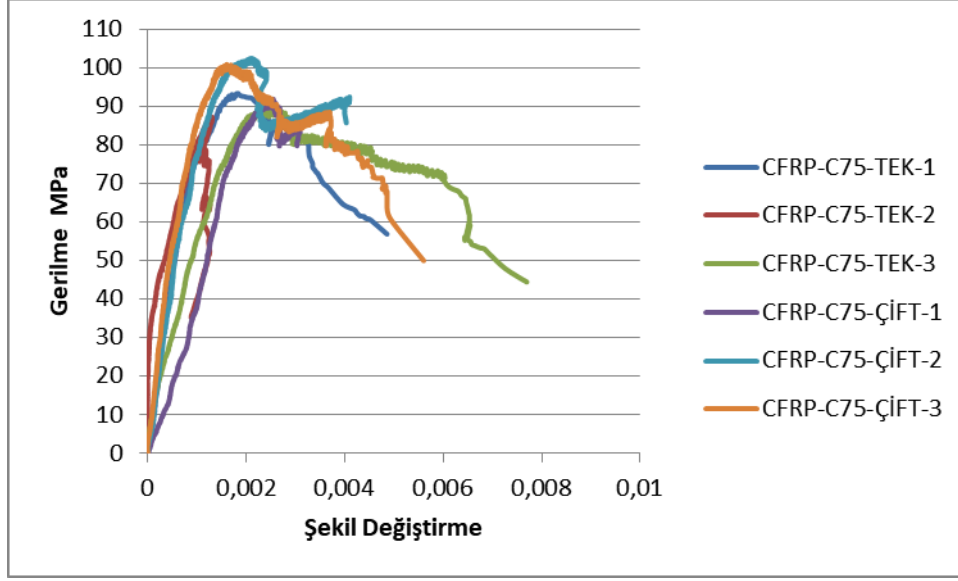
Tablo 5.22. ve Şekil 5.22.'den de görüldüğü gibi CFRP-C20 TEK-1 yani C20 betonundan hazırlanmış silindirin tek kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 24,70 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %70,85, ikinci numunede %73,28, üçüncü numunede %78,95 ve ortalama dayanım da %74,36 dayanım artışı sağlanmıştır. C20 betonundan hazırlanmış silindir çift kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 24,70 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %112,15, ikinci numunede %140,89, üçüncü numunede %128,75 ve ortalama dayanım da %127,26 dayanım artışı sağlanmıştır.



Şekil 5.23. CFRP-C50 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

Tablo 5.22. ve Şekil 5.23.'den de görüldüğü gibi CFRP-C50 TEK-1 yani C50 betonundan hazırlanmış silindirin tek kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 55,03 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %20,30, ikinci numunede %21,57, üçüncü numunede %16,30 ve ortalama dayanım da %19,39 dayanım artışı sağlanmıştır. C50 betonundan hazırlanmış silindir çift kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 55,03 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %66,09, ikinci numunede %63,55, üçüncü numunede %61,00 ve ortalama dayanım da %63,55 dayanım artışı sağlanmıştır.

CFRP-C50 TEK-1 numunesinin şekil değişirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değişirmesi göz önüne alındığında birinci numunede %482,40, ikinci numunede %495,96, üçüncü numunede %460,30 şekil değişirmede artış sağlanmıştır. C50 betonundan hazırlanmış silindir çift kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda şekil değişirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değişirmesi göz önüne alındığında birinci numunede %899,55, ikinci numunede %959,48, üçüncü numunede %849,66 şekil değişirmede artış sağlanmıştır.



Şekil 5.24. CFRP-C75 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

Tablo 5.22. ve Şekil 5.24.'den de görüldüğü gibi CFRP-C75 TEK-1 yani C75 betonundan hazırlanmış silindirin tek kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 80,37 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %16,09, ikinci numunede %8,62, üçüncü numunede %10,74 ve ortalama dayanım da %11,82 dayanım artışı sağlanmıştır. C75 betonundan hazırlanmış silindir çift kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 80,37 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %14,22, ikinci numunede %27,41, üçüncü numunede %25,54 ve ortalama dayanım da %22,39 dayanım artışı sağlanmıştır.

CFRP-C75 TEK-1 numunesinin şekil değiştirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değiştirmesi göz önüne alındığında üçüncü numunede %8,71 şekil değiştirmede artış sağlanmıştır. C75 betonundan hazırlanmış silindir çift kat karbon elyaf ile sargılanması durumunda şekil değiştirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değiştirmesi göz önüne alındığında birinci numunede %14,53 şekil değiştirmede artış sağlanmıştır.

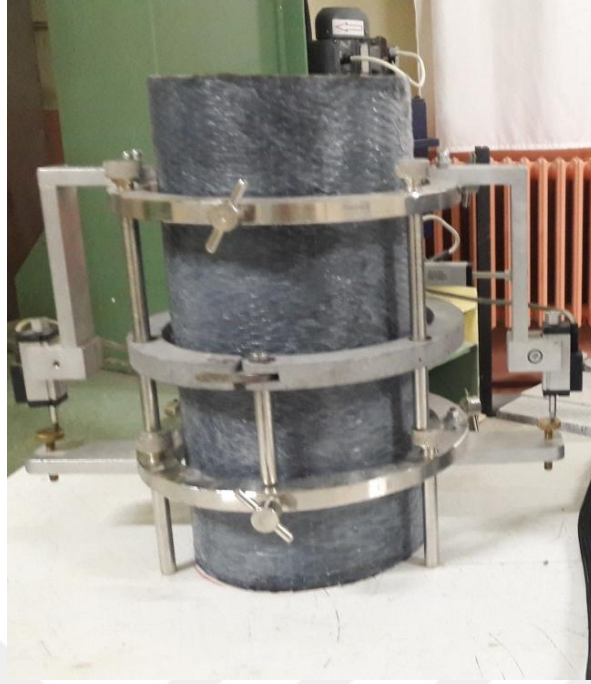


Şekil 5.25. CFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.26. CFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

CFRP-C20 tek kat karbon elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında kopma ve betonda patlama gerçekleşmiştir. Özellikle karbon elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Karbon elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve parçalanmamıştır.



Şekil 5.27. CFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.28. CFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

CFRP-C20 çift kat karbon elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında kopma gerçekleşmiştir. Özellikle karbon elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesindeki elyaf kumaşı hasar görmüştür. Karbon elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve hasar görmemiştir.

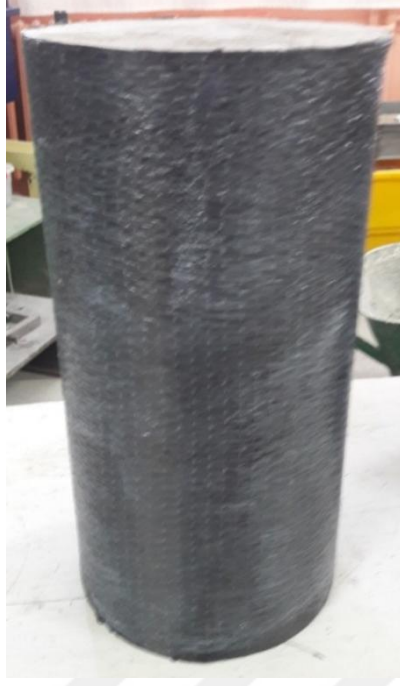


Şekil 5.29. CFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.30. CFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

CFRP-C50 tek kat karbon elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında kopma ve betonda parçalanma meydana gelmiştir. Özellikle karbon elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve hasar görmemiştir.



Şekil 5.31. CFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.32. CFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

CFRP-C50 çift kat karbon elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında kopmalar olmuş ve beton kısımda hafif çatlamlar olmuştur. Özellikle karbon elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Karbon elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuştur.

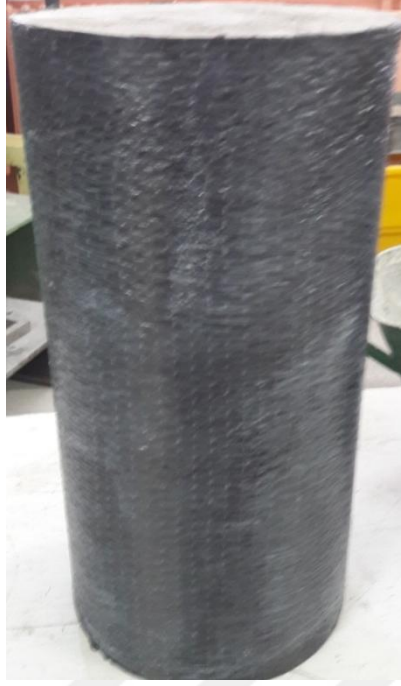


Şekil 5.33. CFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.34. CFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

CFRP-C75 tek kat karbon elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasıyla birlikte üst kısmında kopmalar olmuş ve betonun orta bölgesinde hasar görülmüştür. Karbon elyaf sargılı beton numunenin alt kısmında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve hasar bile görmemiştir.



Şekil 5.35. CFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.36. CFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

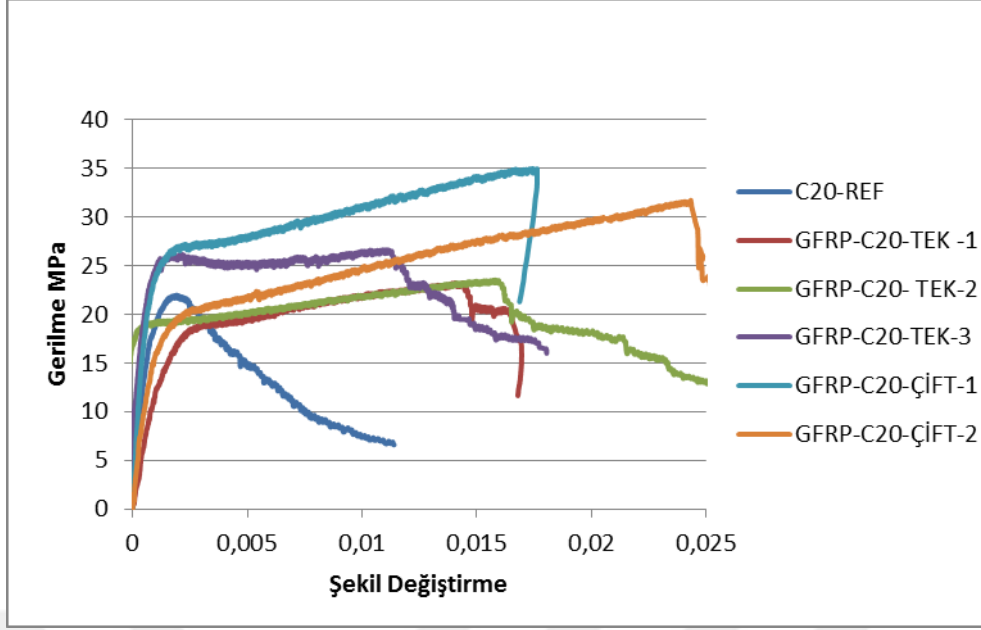
CFRP-C75 çift kat karbon elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortası ile birlikte üst kısmında da kopma meydana gelmiş ve betonun orta bölgesinde ise hafif kırılmalar ve dökülmeler olmuştur. Karbon elyaf sargılı beton numunenin alt kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuştur ve herhangi bir hasar görülmemiştir.

5.4.3. UD Cam Elyaf (GFRP) Sargılı Beton Numuneleri

Karbon elyaf ile karşılaştırıldığında dayanımları daha düşük olduğu bilinen ancak sünekliliğe oldukça önemli katkıları olan cam elyaf kumaş ile sargılı GFRP beton numuneler aksenal basınç altında test edilmişlerdir. Hesaplanan gerilme ve şekil değiştirme değerleri tek kat ve iki kat sargı durumunda C20, C50 ve C75 için sırasıyla Şekil 5.37., Şekil 5.38. ve Şekil 5.39.'de ve Tablo 5.10.'da verilmiştir.

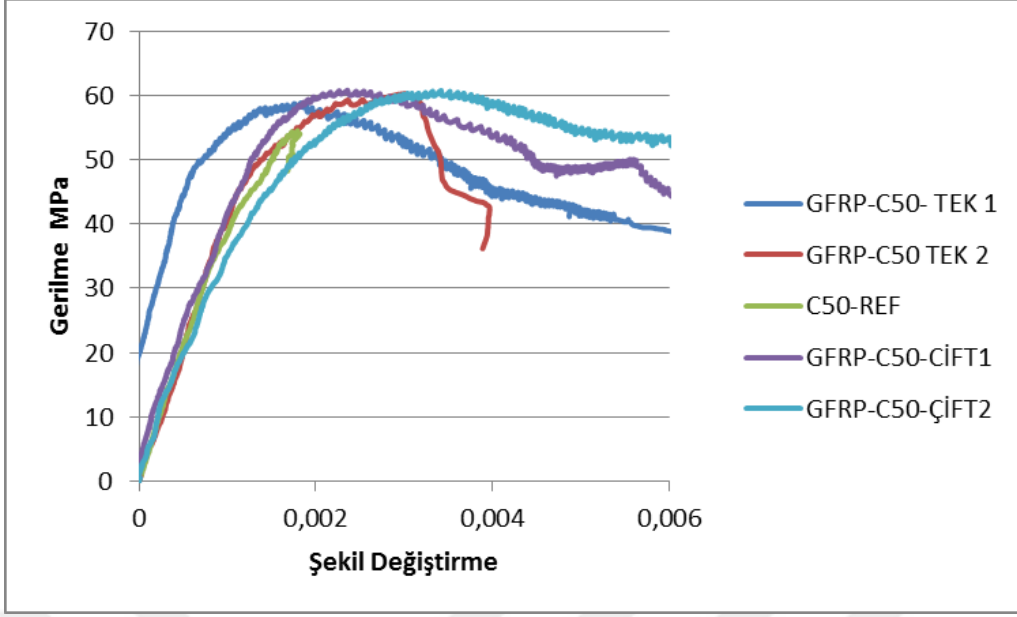
Tablo 5.10. GFRP Sargılı Beton Numunelere Ait Gerilme Değerleri

Numune Adı	Nihai Yük (kN)	Düşey Deplasman	Düşey Şekil Değiştirme	Alan (mm ²) A	Nihai Gerilme (MPa)	Ortalama Nihai Gerilme (MPa) F _{co}	Ortalama Düşey Şekil Değiştirme
GFRP-C20 TEK KAT-1	411,268	2,3045	0,014403	17668	25,3	25,10	0,013629
GFRP-C20 TEK KAT-2	416,432	2,4495	0,015309	17668	25,6		
GFRP-C20 TEK KAT-3	470,892	1,788	0,011175	17668	26,7		
GFRP-C20 ÇİFT KAT-1	618,819	2,7885	0,017428	17668	35,0	31,73	0,014906
GFRP-C20 ÇİFT KAT-2	561,033	3,859	0,024119	17668	31,8		
GFRP-C20 ÇİFT KAT-3	501,787	0,5075	0,0031723	17668	28,4		
GFRP-C50 TEK KAT-1	1028,900	0,0725	0,000453	17668	58,2	59,10	0,001762
GRP-C50 TEK KAT-2	1039,510	0,293	0,001831	17668	58,8		
GFRP-C50 TEK KAT-3	1064,870	0,4805	0,003003	17668	60,3		
GFRP-C50 ÇİFT KAT-1	1074,100	0,3775	0,002359	17668	60,8	60,9	0,002661
GFRP-C50 ÇİFT KAT-2	1079,170	0,3685	0,002303	17668	61,1		
GFRP-C50 ÇİFT KAT-3	1073,640	0,5315	0,003322	17668	60,8		
GFRP-C75 TEK KAT-1	1315,530	0,2965	0,001853	17668	75,0	79,367	0,002082
GFRP-C75 TEK KAT-2	1487,210	0,4835	0,003022	17668	84,2		
GFRP-C75 TEK KAT-3	1403,200	0,2195	0,001372	17668	79,4		
GFRP-C75 ÇİFT KAT-1	1578,540	0,4375	0,002734	17668	89,3	89,03	0,003598
GFRP-C75 ÇİFT KAT-2	1659,230	0,8645	0,005403	17668	93,9		
GFRP-C75 ÇİFT KAT-3	1482,650	0,425	0,002656	17668	83,9		



Şekil 5.37. GFRP-C20 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

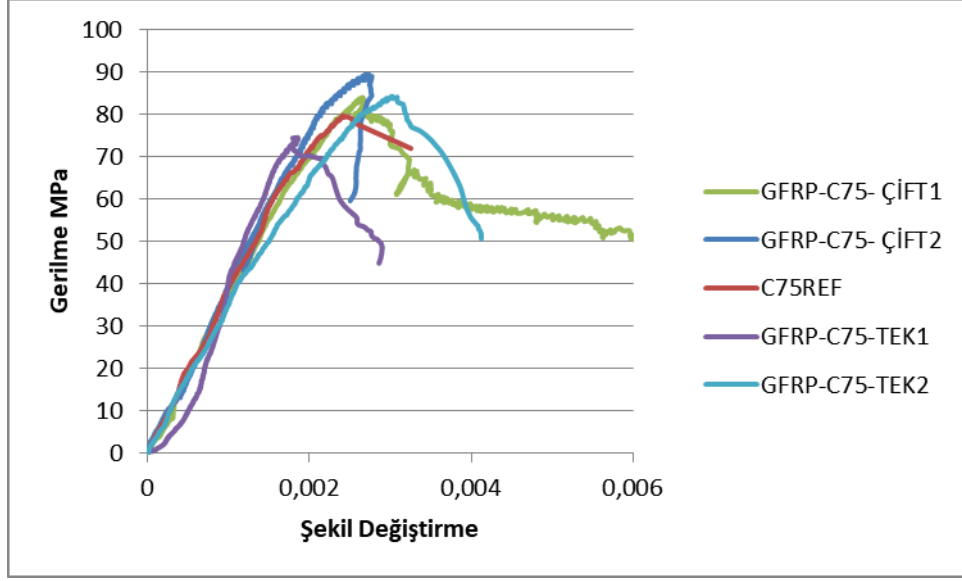
Tablo 5.22. ve Şekil 5.25.'den de görüldüğü gibi GFRP-C20 TEK-1 yani C20 betonundan hazırlanmış silindirin tek cam karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 24,70 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %2,43, ikinci numunede %3,64, üçüncü numunede %8,10 ve ortalama dayanım da %4,72 dayanım artışı sağlanmıştır. C20 betonundan hazırlanmış silindir çift kat cam elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 24,70 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %41,70, ikinci numunede %28,75, üçüncü numunede %14,98 ve ortalama dayanım da %28,48 dayanım artışı sağlanmıştır.



Şekil 5.38. GFRP-C50 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

Tablo 5.22. ve Şekil 5.26.'den de görüldüğü gibi GFRP-C50 TEK-1 yani C50 betonundan hazırlanmış silindirin tek cam karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 55,03 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %5,76, ikinci numunede %6,85, üçüncü numunede %9,58 ve ortalama dayanım da %7,40 dayanım artışı sağlanmıştır. C50 betonundan hazırlanmış silindir çift kat cam elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 55,03 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %10,49, ikinci numunede %11,03, üçüncü numunede %10,49 ve ortalama dayanım da %10,67 dayanım artışı sağlanmıştır.

GFRP-C50 TEK-1 numunesinin şekil değiştirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değiştirmesi göz önüne alındığında ikinci numunede %37,15, üçüncü numunede %124,95 şekil değiştirmede artış sağlanmıştır. C50 betonundan hazırlanmış silindir çift kat cam elyaf ile sargılanması durumunda şekil değiştirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değiştirmesi göz önüne alındığında birinci numunede %76,70, ikinci numunede %72,51, üçüncü numunede %148,84 şekil değiştirmede artış sağlanmıştır.



Şekil 5.39. GFRP-C75 Beton Numunelerine Ait Gerilme-Şekil Değişirme Grafiği

Tablo 5.22. ve Şekil 5.27.'den de görüldüğü gibi GFRP-C75 TEK-1 yani C580 betonundan hazırlanmış silindirin tek cam karbon elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 80,37 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %4,77, C75 betonundan hazırlanmış silindir çift kat cam elyaf ile sargılanması durumunda sargısız betonun ortalama dayanımı 80,37 MPa göz önüne alındığında dayanımda birinci numunede %11,11, ikinci numunede %16,83, üçüncü numunede %4,39 ve ortalama dayanım da %10,78 dayanım artışı sağlanmıştır.

GFRP-C75 TEK-1 numunesinin şekil değiştirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değiştirmesi göz önüne alındığında birinci ikinci numunede %36,37 şekil değiştirmede artış sağlanmıştır. C75 betonundan hazırlanmış silindir çift kat cam elyaf ile sargılanması durumunda şekil değiştirmesi sargısız numunenin ortalama şekil değiştirmesi göz önüne alındığında birinci numunede %23,38, ikinci numunede %143,82, üçüncü numunede %19,86 şekil değiştirmede artış sağlanmıştır.

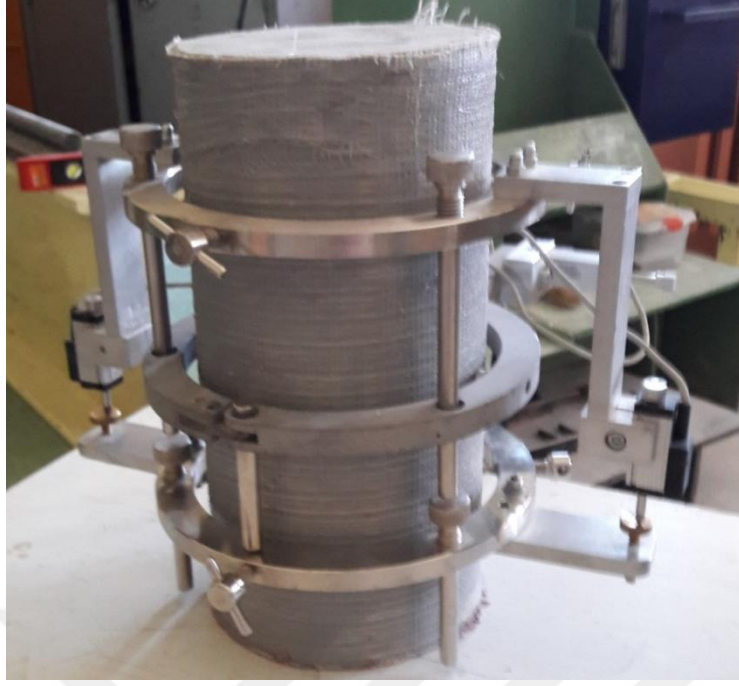


Şekil 5.40. GFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.41. GFRP-C20 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

GFRP-C20 tek kat cam elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında kopma ve betonda hafif çatlamlar gerçekleşmiştir. Özellikle cam elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Cam elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuştur.



Şekil 5.42. GFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.43. GFRP-C20 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

GFRP-C20 çift kat cam elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında kopma ve betonda parçalanma görülmüştür. Özellikle cam elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Cam elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve hasar bile görmemiştir.



Şekil 5.44. GFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.45. GFRP-C50 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

GFRP-C50 tek kat cam elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasıyla birlikte alt kısmında doğru kopma ve betonda hafif çatlamlar gerçekleşmiştir. Cam elyaf sargılı beton numunenin üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuştur.



Şekil 5.46. GFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.47. GFRP-C50 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

GFRP-C50 çift kat cam elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasıyla birlikte üst kısmına yakın yerlerde kopma ve betonda hafif çatlamlar gerçekleşmiştir. Cam elyaf sargılı beton numunenin alt kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve hasar görmemiştir.



Şekil 5.48. GFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.49. GFRP-C75 Tek Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

GFRP-C75 tek kat cam elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında hafif yırtılma gerçekleşmiştir ve beton pek hasar görmemiştir. Özellikle cam elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Cam elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuştur.



Şekil 5.50. GFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Öncesi



Şekil 5.51. GFRP-C75 Çift Sarım Beton Numunesi Deney Sonrası

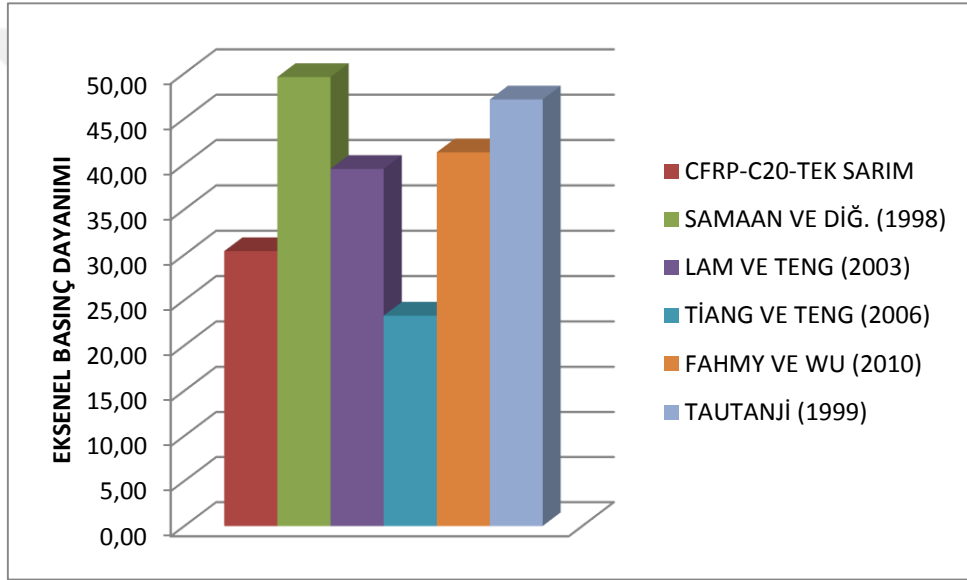
GFRP-C75 çift kat cam elyaf sargılı numunenin yüklenmesi sonrasında; elyaf kısmın ortasında yırtılma görülmüş ve betonda hafif çatlama gerçekleşmiştir. Özellikle cam elyaf sargılı beton numunenin orta bölgesi hasar görmüştür. Cam elyaf sargılı beton numunenin alt ve üst kısımlarında ise elyaf ile birlikte beton durumunu korumuş ve hasar görmemiştir.

6. SARGILI BETON MODELLERİNİN DENEY NUMUNELERİNE UYGULANMASI

Bu bölümde sargılı beton modelleri ile deneysel numunelerle bulunan dayanımlar karşılaştırılmıştır.

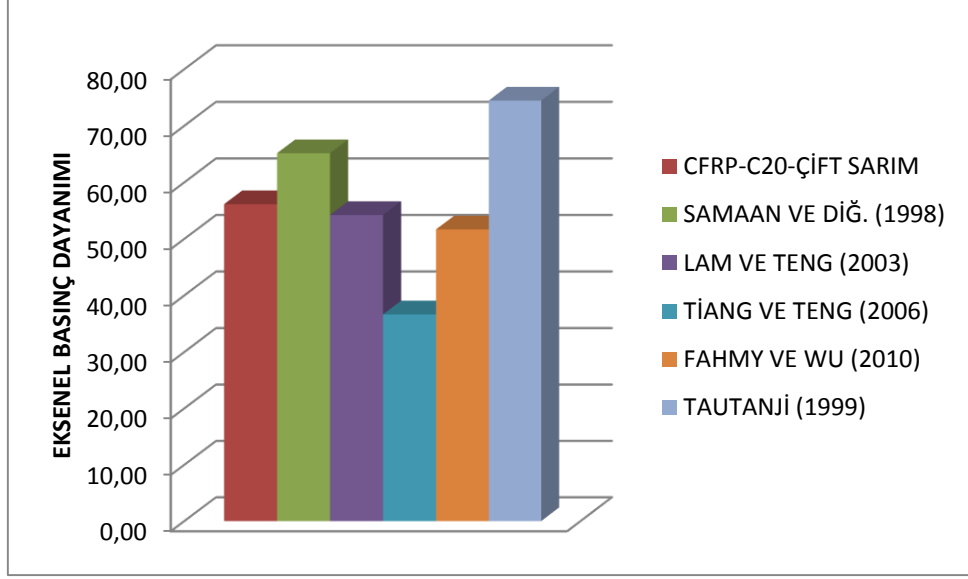
6.1. Karbon Elyaf Sargılı Beton Numuneler

Bu bölümde farklı sargılı beton modelleri kullanılarak elde edilen basınç dayanımları, deneysel numunelerin sargılı basınç dayanımları ile karşılaştırılmıştır.



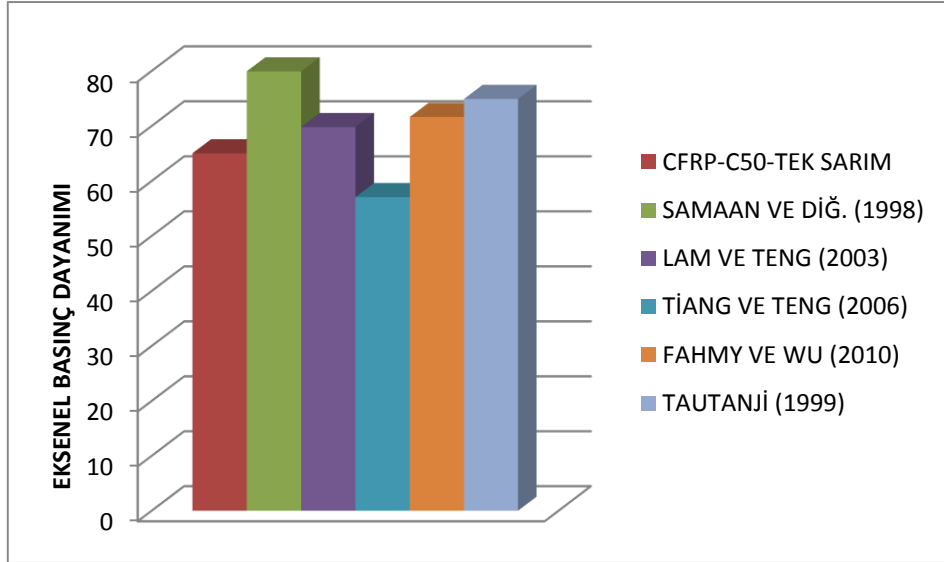
Şekil 6.1. CFRP-C20 Tek Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

CFRP-C20 tek kat sargılı beton numunelerinin deneysel basınç dayanımına çok yakın bir sonuç bulunmamasıyla birlikte incelenen modellerden Lam ve Teng (2003) ve Tiang ve Teng (2006) diğer modellere göre daha yakın sonuçlar vermektedir, Samaan ve Diğ. (1998) ve Tautanji (1999) modeli ile hesaplanan dayanım değerleri ise, eksenel deney sonuçlarına uzak olmakla birlikte birbirlerine en yakın değerleri vermektedir.



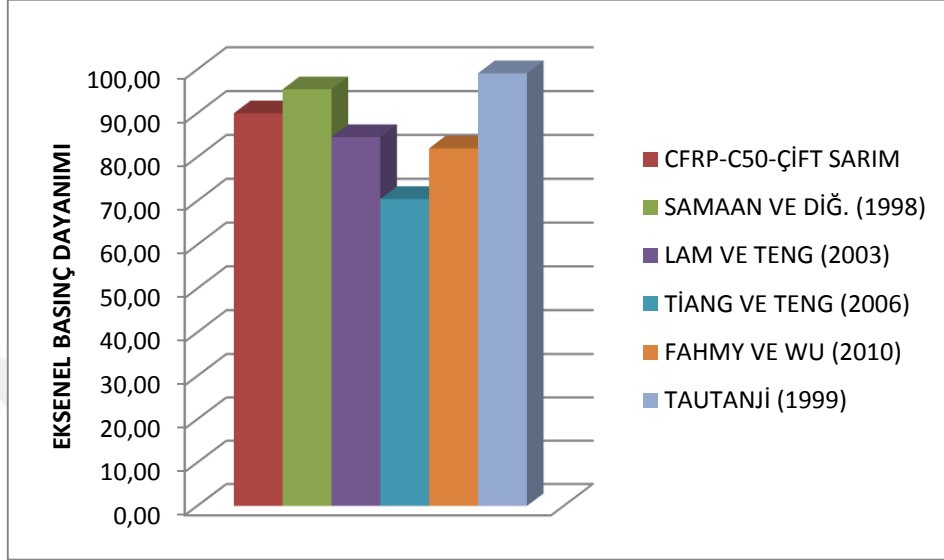
Şekil 6.2. CFRP-C20 Çift Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

CFRP-C20 çift kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın sonucu Lam ve Teng (2003) verirken Fahmy ve Wu (2010) modeli hemen onu izlemiştir, eksenel basınç dayanımları deney sonuçlarına daha uzak olmasıyla birlikte Samaan ve Diğ. (1998) modeli de Tautanji (1999) ve Tiang ve Teng (2006) modellerine göre daha yakın sonuçlar vermiştir.



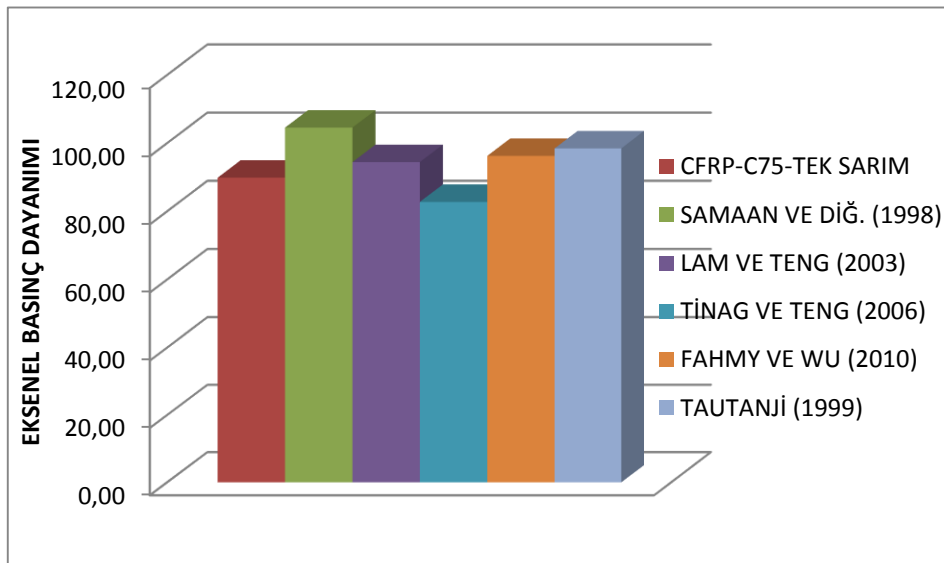
Şekil 6.3. CFRP-C50 Tek Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

CFRP-C50 tek kat sargılı beton numunelerinin aksel basınç dayanımına en yakın sonucu sırasıyla Lam ve Teng (2003) ve Fahmy ve Wu (2010) verirken, aksel basınç dayanımları deney sonuçlarına en uzak sonuçları Samaan ve Diğ. (1998) modeli vermiştir.



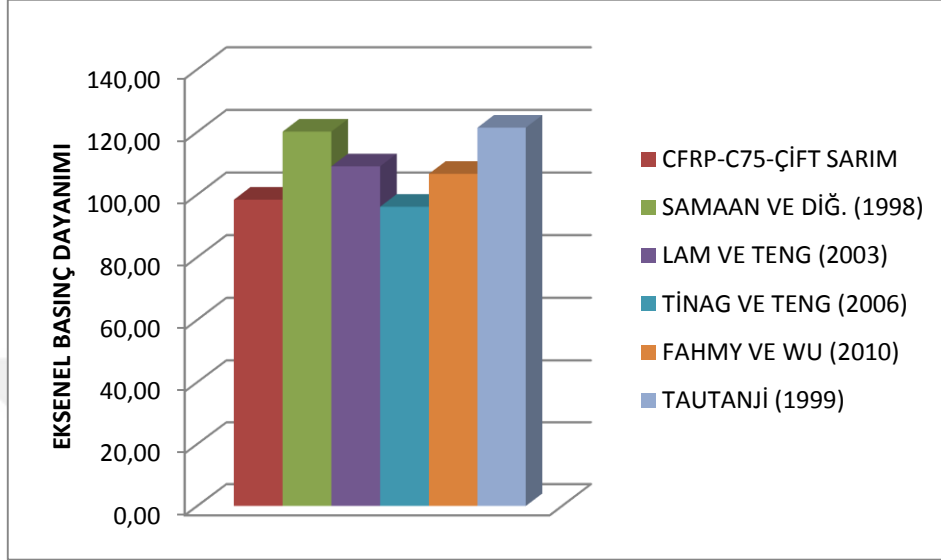
Şekil 6.4. CFRP-C50 Çift Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

Buna göre; CFRP-C50 çift kat sargılı beton numunelerinin aksel basınç dayanımına en yakın aksel basınç dayanımları Samaan ve Diğ. (1998) ve Lam ve Teng (2003) verirken en farklı dayanım değeri Tautanji (1999) modeline göre hesaplanmıştır.



Şekil 6.5. CFRP-C75 Tek Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

Buna göre; CFRP-C75 tek kat sargılı beton numunelerinin aksel basınç dayanımına en yakın sonucu Lam ve Teng (2003) vermektedir. En büyük dayanım değeri ise Samaan ve Diğ. (1998) ait modelden hesaplanmıştır.

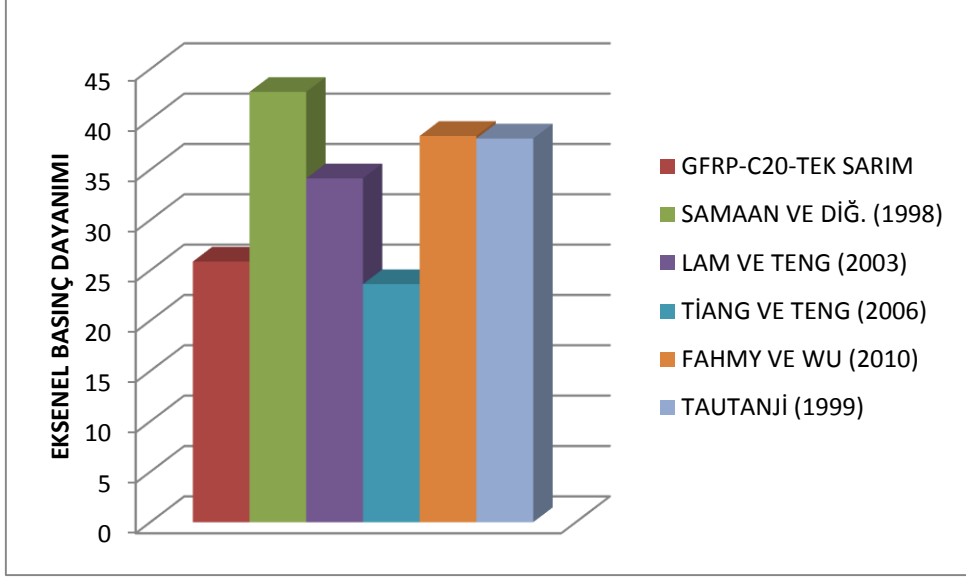


Şekil 6.6. CFRP-C75 Çift Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

Buna göre; CFRP-C75 çift kat sargılı beton numunelerinin aksel basınç dayanımına en yakın sonucu Tiang ve Teng (2006) vermektedir. Aksel basınç dayanımları deney sonuçlarına uzak olmasına rağmen Samaan ve Diğ. (1998) ve Tautanji (1999) modellerine göre hesaplanan basınç dayanımları birbirlerine en yakın değerleri almaktadır.

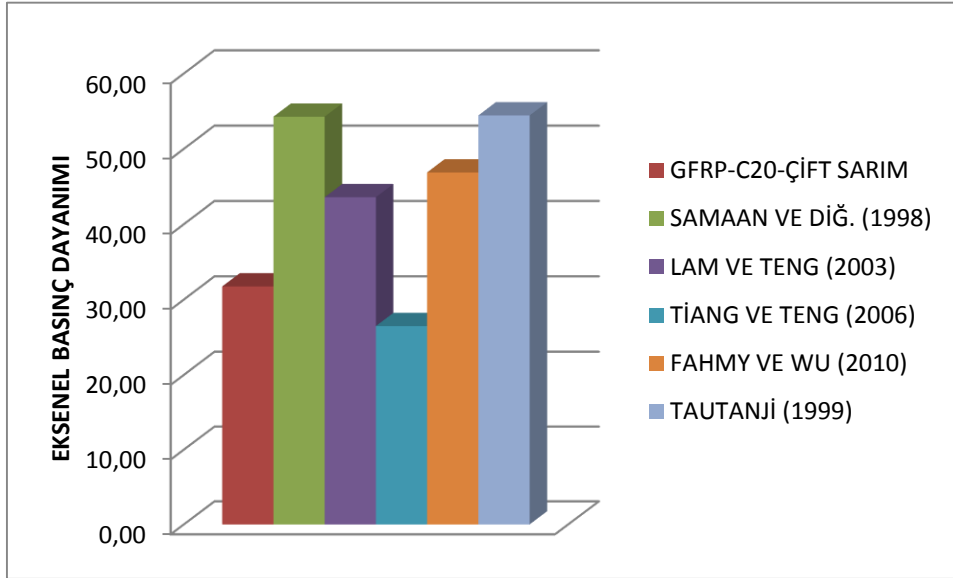
6.2. Cam Elyaf Sargılı Beton Numuneler

Bu bölümde farklı sargılı beton modelleri kullanılarak elde edilen basınç dayanımları, deneysel numunelerin sargılı basınç dayanımları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.7. GFRP-C20 Tek Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

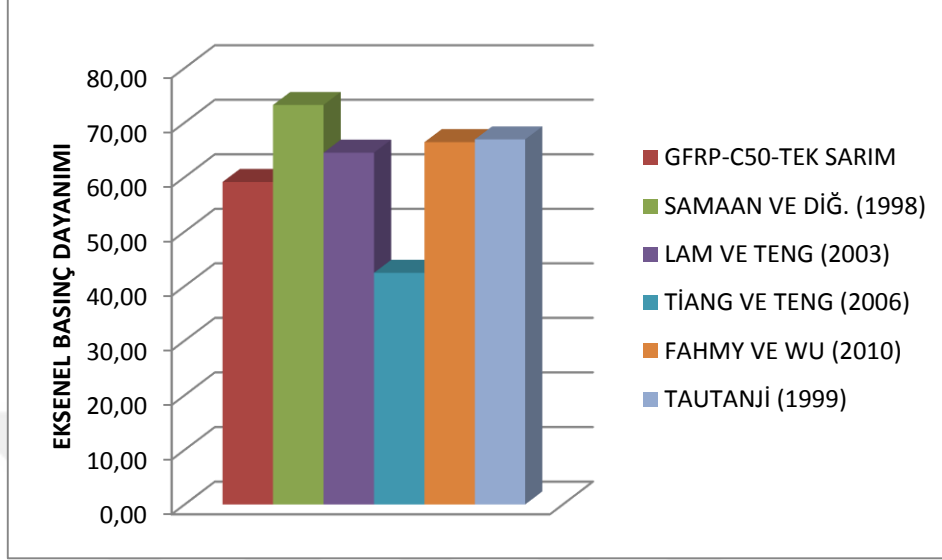
Buna göre; GFRP-C20 tek kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın dayanım Tiang ve Teng (2006) modeli ile elde edilirken en uzak basınç dayanımı Samaan ve Diğ. (1998) modelinden elde edilmiştir. Fahmy ve Wu (2010) ve Tautanji (1999) modelleri ise birbirlerine en yakın değerleri elde etmektedir.



Şekil 6.8. GFRP-C20 Çift Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

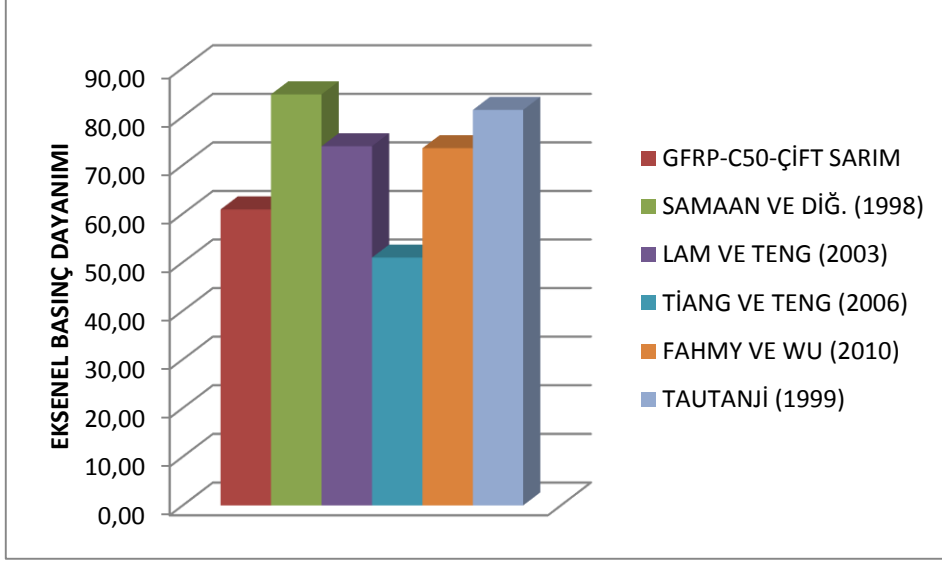
Buna göre; GFRP-C20 çift kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın sonucu sırasıyla Lam ve Teng (2003) ve Fahmy ve Wu (2010) veririrken, eksenel basınç

dayanımları deney sonuçlarına uzak olmasına rağmen Samaan ve Diğ. (1998) ve Tautanji (1999) sonuçları birbirlerine en yakın değerleri vermektedir.



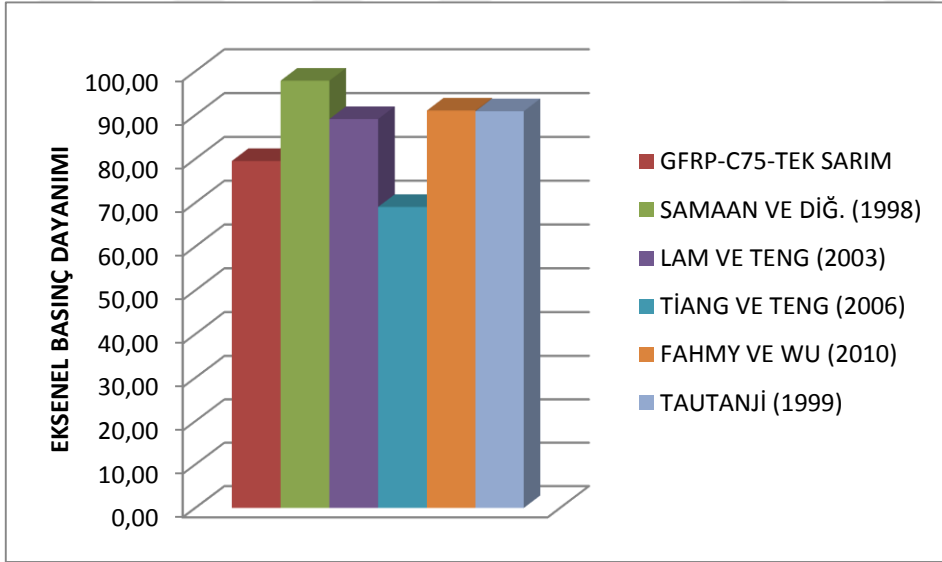
Şekil 6.9. GFRP-C50 Tek Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

Buna göre; GFRP-C50 tek kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın sonucu sırasıyla Lam ve Teng (2003) ve Fahmy ve Wu (2010) verirken, eksenel basınç dayanımları deney sonuçlarına uzak olmasına rağmen Fahmy ve Wu (2010) ve Tautanji (1999) sonuçları birbirlerine en yakın değerleri vermektedir.



Şekil 6.10. GFRP-C50 Çift Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

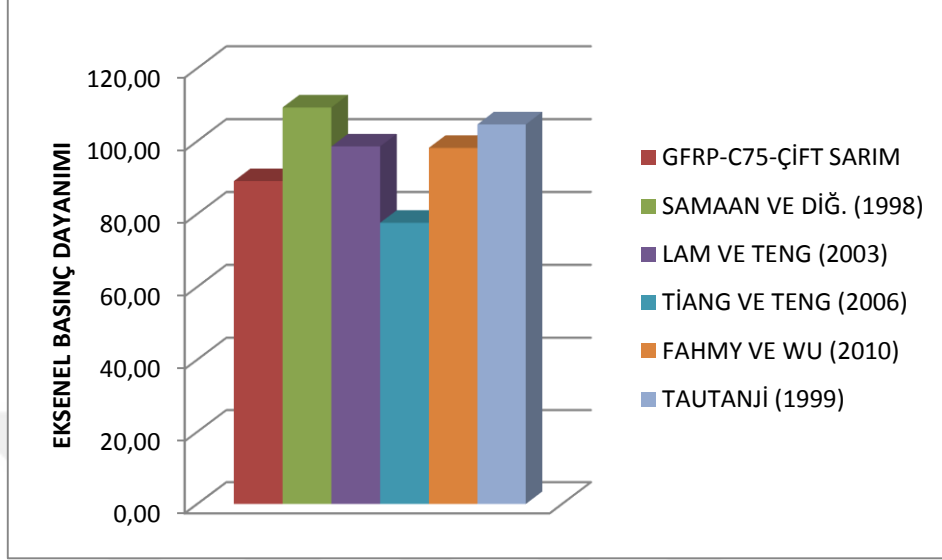
Buna göre; GFRP-C50 çift kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın sonucu sırasıyla Lam ve Teng (2003) ve Fahmy ve Wu (2010) verirken, eksenel basınç dayanımları deney sonuçlarına uzak olmasına rağmen Samaan ve Diğ. (1998) ve Tautanji (1999) sonuçları birbirlerine en yakın değerleri vermektedir.



Şekil 6.11. GFRP-C75 Tek Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

Buna göre; GFRP-C75 tek kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın sonucu sırasıyla Lam ve Teng (2003) ve Fahmy ve Wu (2010) verirken, eksenel basınç

dayanımları deney sonuçlarına uzak olmasına rağmen Fahmy ve Wu (2010) ve Tautanji (1999) sonuçları birbirlerine en yakın değerleri vermektedir.



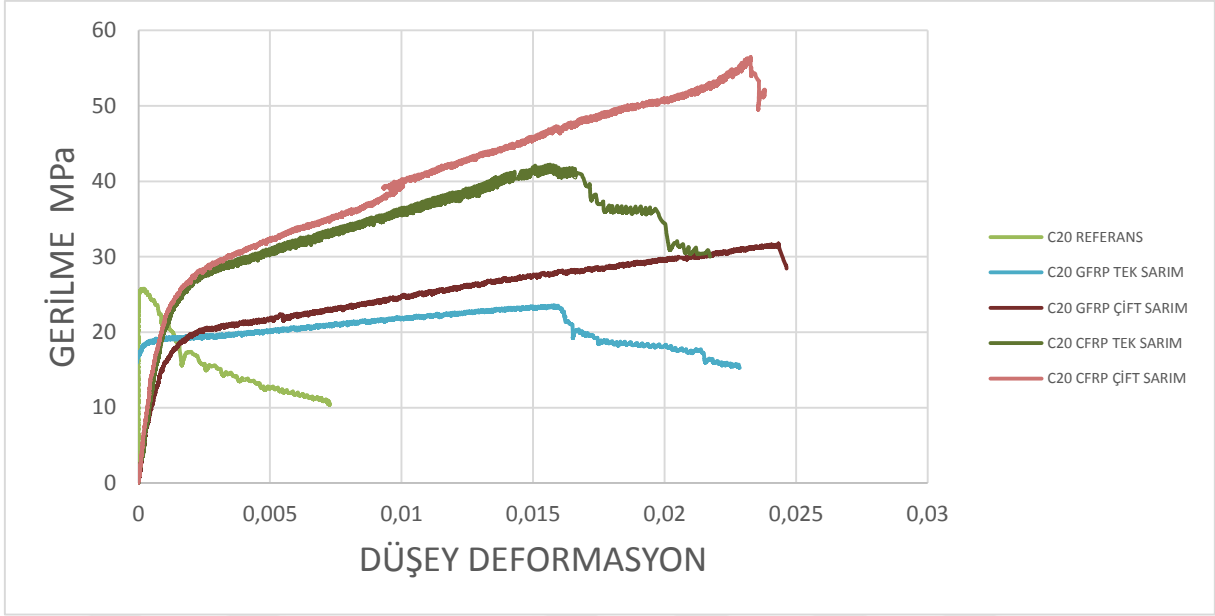
Şekil 6.12. GFRP-C75 Çift Sarım Numunesine Ait Sargılı Beton Modellerine Göre Basınç Dayanımları

Buna göre; GFRP-C75 çift kat sargılı beton numunelerinin eksenel basınç dayanımına en yakın sonucu sırasıyla Lam ve Teng (2003) ve Fahmy ve Wu (2010) verirken, eksenel basınç dayanımları deney sonuçlarına uzak olmasına rağmen Samaan ve Diğ. (1998) ve Tautanji (1999) sonuçları birbirlerine en yakın değerleri vermektedir.

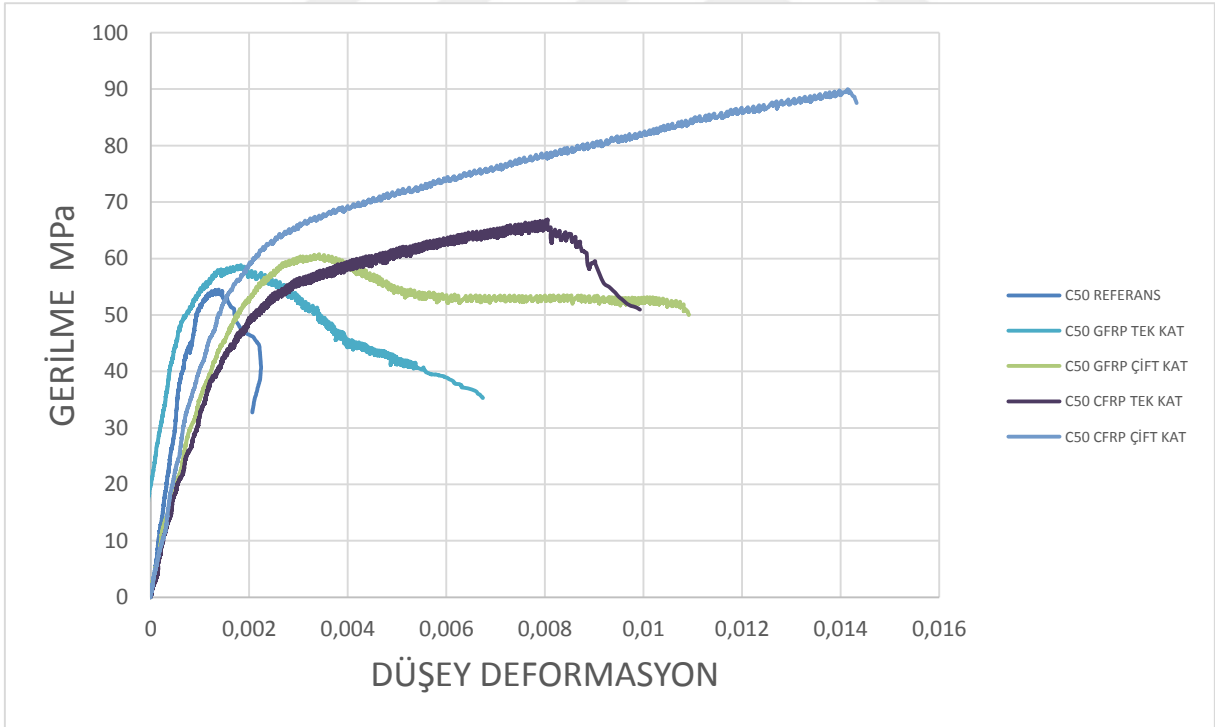
7. BULGULAR

Üç farklı sınıf beton dayanımına sahip 45 adet standart silindir numunenin iki farklı cins elyaf kumaş ile farklı iki tabaka kalınlığı göz önüne alınarak sargılanması sonucu dayanım ve düşey deformasyon değerleri oldukça artmıştır. Bu artış özellikle dikkate alınan deney numunelerinin en düşük dayanımlı beton sınıfına sahip sargılı C20 numunelerinde dikkat çekici olmuştur. Referans numune dayanım değerleri arttıkça sargının gerilme şekil değiştirme davranışı incelendiğinde basınç dayanımı değerleri giderek azalmıştır. Özellikle C75 sınıfına ait betonların numunelerde dayanım artışı sınırlı olmuştur. Bununla birlikte sargı cinsi de davranışta oldukça etkili olmuştur. Karbon elyaf ile sargılı numunelerle deneyde kullanılan tüm referans beton sınıfları için dayanım artışı sağlanırken, cam elyaf sargılı numunelerde bu artış özellikle yüksek dayanımlı beton sınıfına sahip C75 numuneler için oldukça az olmuştur.

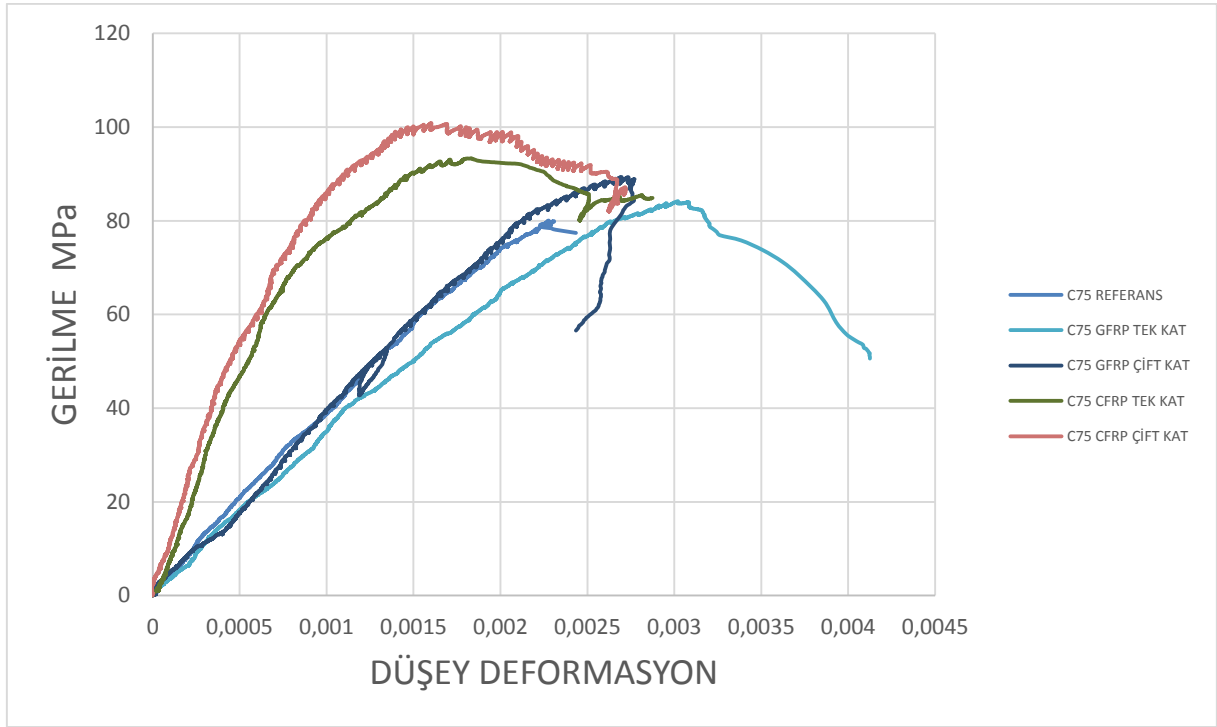
Betonların dayanımı arttıkça gevreklik özellikleri artar. Çeşitli sargı yöntemleriyle bu gevreklik giderilebilir. Deneysel çalışmaya konu olan beton numunelerin sünek davranış sergileyip sergilemediği araştırılmıştır. Beton dayanımı yanı sıra kullanılan tabaka sayısı da değişken olarak tutulmuştur. C20 betonu için gerilme şekil değiştirme eğrisi, referans numune, CFRP-C20 Tek kat, CFRP-C20 Çift kat, GFRP- C20 Tek kat ve GFRP-C20 Çift kat için elde edilmiş olan düşey gerilme-şekil değiştirme ve yatay gerilme-şekil değiştirme eğrileri aynı grafik üzerinde sunulmuştur. C50 betonu için gerilme şekil değiştirme eğrisi, referans numune, CFRP-C50 Tek kat, CFRP-C50 Çift kat, GFRP- C50 Tek kat ve GFRP-C50 Çift kat için elde edilmiş olan düşey gerilme-şekil değiştirme ve yatay gerilme-şekil değiştirme eğrileri aynı grafik üzerinde sunulmuştur. C75 betonu için gerilme şekil değiştirme eğrisi, referans numune, CFRP-C75 Tek kat, CFRP-C75 Çift kat, GFRP- C75 Tek kat ve GFRP-C75 Çift kat için elde edilmiş olan düşey gerilme-şekil değiştirme ve yatay gerilme-şekil değiştirme eğrileri aynı grafik üzerinde sunulmuştur.



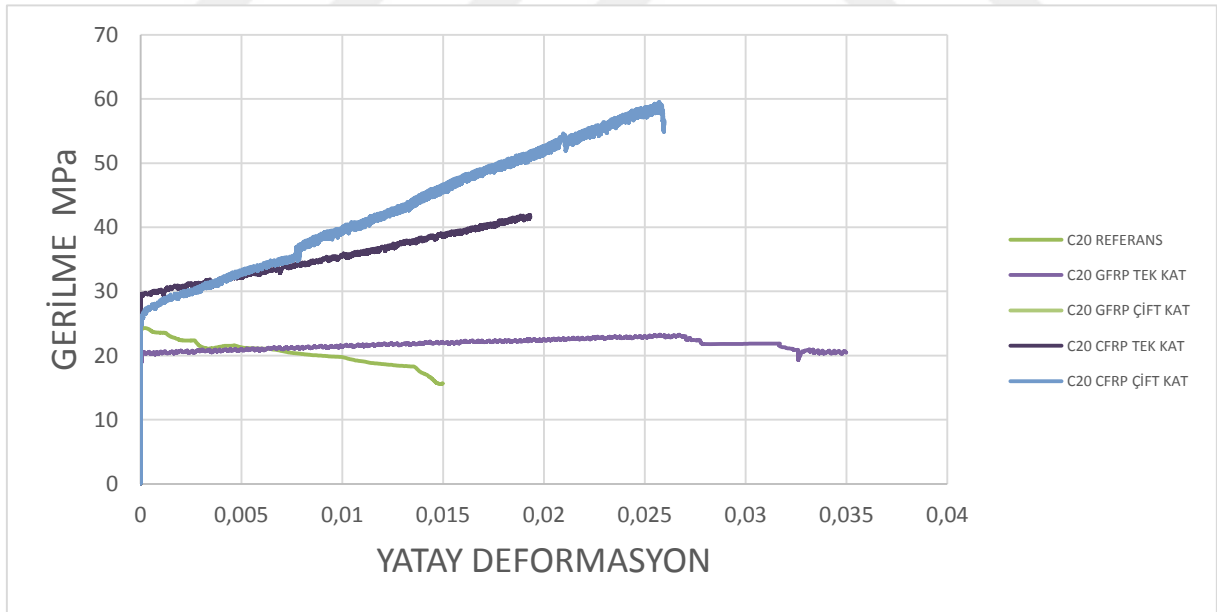
Şekil 7.1. C20 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Düşey Deformasyon Grafiği



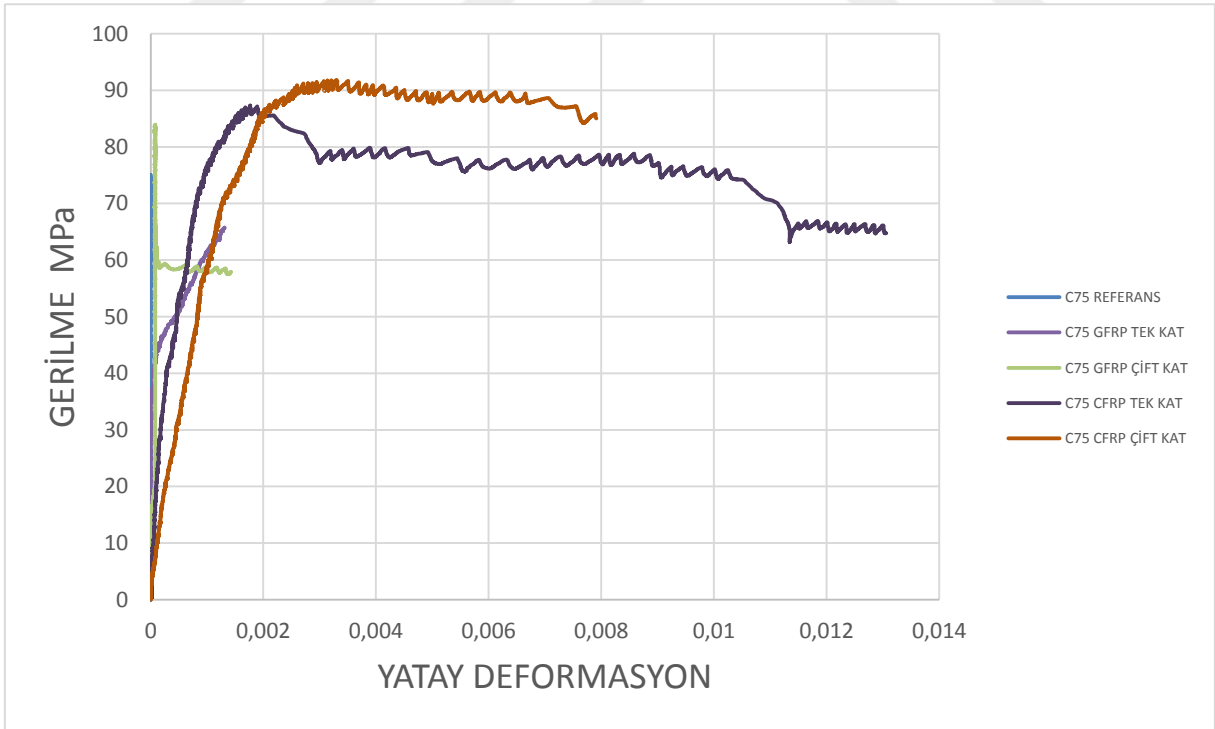
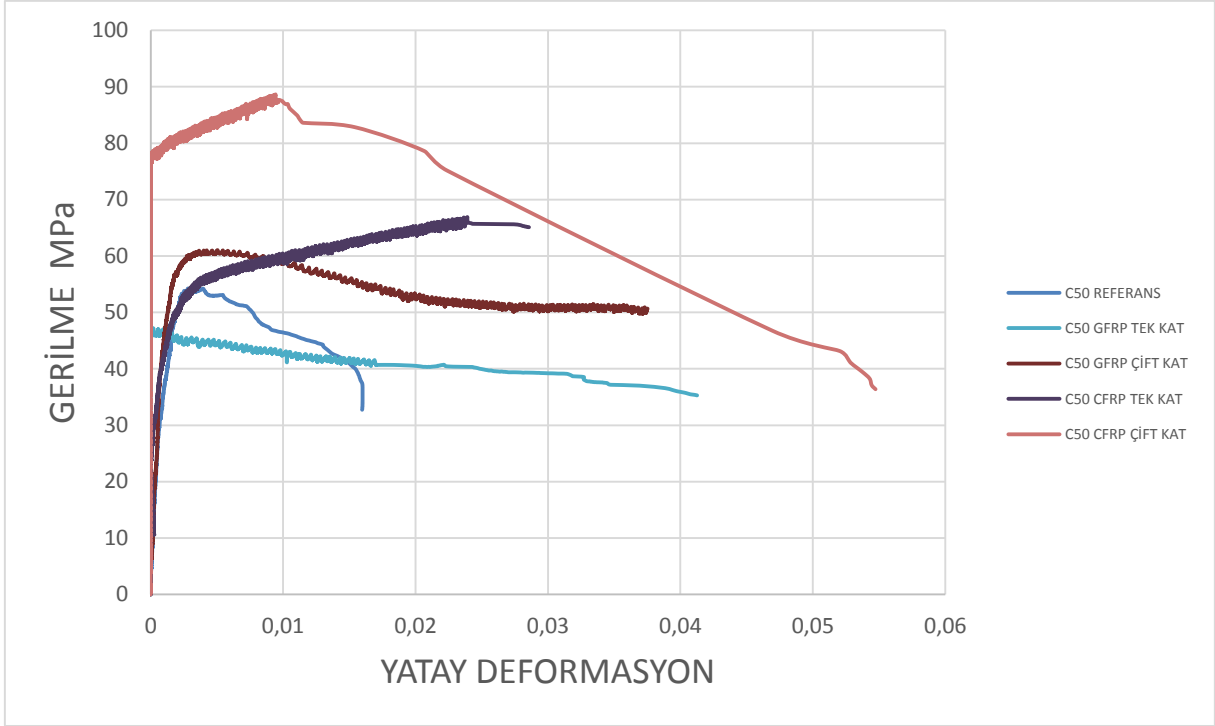
Şekil 7.2. C50 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Düşey Deformasyon Grafiği



Şekil 7.3. C75 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Düşey Deformasyon Grafiği



Şekil 7.4. C20 Sargılı ve Sargısız Beton Numunelerine Ait Gerilme-Yatay Deformasyon Grafiği



- C20 beton numuneler için; karbon elyaf sargı cam elyaf sargıya göre daha fazla dayanım artışı sağlamıştır. Süneklilik anlamında ise cam elyaf sargılı beton numuneleri karbon elyaf sargılı beton numunelerine kıyasla daha sünek davranış göstermişlerdir. Ayrıca kullanılan tabaka sayısı arttıkça Gerilme-şekil değiştirme davranışı hem dayanım hem süneklilik açısından daha başarılı olmuştur.
- Karbon elyaf sargılı C50 beton numuneleri cam elyaf sargılı beton numunelerine göre dayanım açısından dahi iyi bir davranış göstermiştir. Cam elyaf numuneler ise sünek bir davranış göstermişlerdir. Tabaka kat sayısı artışı dayanım ve süneklilik artışına sebep olmuştur.
- C75 beton numuneler için; karbon elyaf sargılı beton numuneler, cam elyaf sargılı beton numunelerine göre daha fazla dayanım artışına sebep olurken diğer beton sınıfları ile karşılaştırıldığında üç sınıf betondan en az dayanım ve süneklilik artışı bu sınıfa ait beton numunelerden elde edilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yanal deformasyonları tek doğrultulu karbon elyaf kumaş ve cam elyaf kumaşlarla sınırlandırılmış betonların aksenal basınç altındaki davranışları incelenmiştir. Genel sonuçlar kısaca aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

- C20, C50 ve C75 beton numuneleri kıyaslandığında ise en fazla dayanım artışı C20 çift kat karbon elyaf sargılı beton numunelerde görülmüştür.
- C20, C50 ve C75 beton numuneleri kıyaslandığında ise en fazla süneklilik artışı C20 çift kat cam elyaf sargılı beton numunelerde görülmüştür.
- C50 ve C75 beton numuneleri kıyaslandığında ise bu iki beton sınıfına göre dayanım artışı C50 çift kat karbon elyaf sargılı beton numunelerde görülmüştür.
- C50 ve C75 beton numuneleri kıyaslandığında ise bu iki beton sınıfına göre süneklilik artışı C50 çift kat cam elyaf sargılı beton numunelerde görülmüştür.
- C75 beton sınıfında ise hem dayanım hem süneklilik yönünden pek fark olmadığı görülmüştür. Bu da yüksek dayanımlı betonlarda sargının çok etkili olmadığını göstermiştir.
- Beton dayanımı arttıkça tek kat ve çift kat sargı yapmanın dayanım ve süneklilikte pek fazla etkisinin olmadığı görülmüştür.

Sargılı betonun davranışı sargı malzemesine, sargı sayısına ve betonun basınç dayanımına bağlı olarak değişmiştir. Yanal deformasyonların sınırlandırılması ile betonun dayanım ve şekil değiştirme kapasitesi artmıştır. Bu artışın miktarı betonun basınç dayanımı ile ters orantılı olarak değişmiştir.

Beton sargısının daha düşük dayanımlı betonlarda etkisi olurken yüksek dayanımlı betonlarda çok etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak tabaka sayısının artırılmasının yüksek dayanımlı betonda etkisi yeni bir çalışmada incelenebilir.

Aynı tabaka ve beton özellikleri ile birlikte beton içine çeşitli lifler katılarak veya daha farklı sargı malzemeleri kullanılarak yatay deformasyon ve dayanımda artış incelenebilir.

Aynı çalışma betonun boş tp numune içerisine doldurulmasıyla hazırlanan eni numunelerde de tekrarlanabilir.



KAYNAKLAR

1. Demir H., Depremden Hasar Görmüş Betonarme Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1992.
2. Mirmiran A. and Shahawy M., A New Concrete Filled Hollow FRP Composite Column, Composites Part B, Engineering, 27, p. 263-268, 1996.
3. Fam A. Z., Schnerch D.A. and Rızkalla S. H., Rectangular FRP Tubes Filled With Concrete For Beam and Column Applications, Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement For Concrete Structures, pp. 685-694, 2004.
4. Raval R., Urmil D., Behaviour Of GFRP Wrapped RC Columns Of Different Shapes, Procedia Engineering , 51, 240-249, 2013.
5. Green M. F., Bisby L. A., Beaudoin Y. and Labossiere P., Effect Of Freeze-Thaw Cycles On The Bond Durability Between Fibre Reinforced Polymer Plate Reinforcement and Concrete. Canadian Journal Of Civil Engineering, 27 (5), 949-959, 2000
6. Teng J. G., Hu Y. M., Behaviour of FRP-Jacketed Circular Steel Tubes and Cylindrical Shells Under Axial Compression, Construction and Building Materials, 21, p. 827-838, April, 2007.
7. Sharma S. S., Dave U. V., Solanki H., FRP Wrapping For RC Columns With Varying Corner Radii, Procedia Engineering, 51, 220-229, 2013.
8. Özbakkaloğlu T., Compressive Behaviour FRP Tubes Columns: Assessment Of Critical Column Parameters, Engineering Structures, 51, 188-199, 2013.
9. Lorenzis L. D., Tefers R., Applicability Of FRP Confinement To Strengthen Concrete Columns, Department Of Innovation Engineering University Of Lecce I-73100 Lecce, Italy – Department Of Structural Engineering and Mechanics Chalmers University Of Technology SE-412 96 Gothenburg Sweden, 2002.
10. Xiao Y. and Wu H. L., Compressive Behaviour Of Concrete Confined By Carbon Fiber Composite Jackets, Journal Of Materials İn Civil Engineering, 12, No.2, 139-146, 2000.
11. Wang Y. C. and Restrepo J., Investigation Of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Confined With Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets, ACI Structural Journal, 98, No.3, 377-385, 2001.
12. Ritchie P., Thomes D., Lu l., Connelly G., External Reinforcement Of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics, Structural Engineering, 88, 490-500, 1991.
13. Mirmiran A. and Shahawy M., Behaviour Of Concrete Columns Confined By Fiber Composites, ASCE Journal Of Structural Engineering, 123, No.5 583-590, 1997.

14. Saadatmanesh H., Ehsani M. R., RC Beams Strengthened With GFRP Plates. I: Experimental Study, J. Struct. Engineering., ASCE, Vol: 117 (11), pg: 3417-3433, 1997.
15. Tautanji H. A. and Balaguru P., Durability Characteristics Of Concrete Columns Wrapped With FRP Tow Sheets. Journal Of Materials In Civil Engineering, 10 (1), 52-57, 1998.
16. Mander B., Priestly M. J. N., Park R., Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete, Journal Of Structural Engineering, 114, 8, 1804-1825, 1988.
17. Tautanji H. A., Stress-Strain Characteristics Of Concrete Columns Externally Confined With Advanced Fiber Composite Sheets, ACI Materials Journal, 96, No.3, 397-403, 1999.
18. Demers M. and Neale K. W., Confinement Of Reinforced Concrete Columns With Fibre-Reinforced Composite Sheets-An Experimental Stud, Can. J. Civ. Eng. 26, No.2, 226-241, 1999.
19. Fam A., Flisak B., Shnerch D. and Rizkalla S., Beam-Column Behavior Of Circular and Rectangular Concrete-Filled FRP Tubes, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7533.
20. De Lorenzis L., Nanni A. and La Tegola A., May. Strengthening Of Reinforced Concrete Structures With Near Surface Mounted FRP Rods. International Meeting On Composite Materilas (Milan, Italy), PLAST 2000, Proceedings, Advancing With Composites (pp. 9-11), 2000.
21. Mirmiran A., Member, ASCE, Shahawy M. and Beitleman T., Slenderness Limit For Hybrid FRP-Concrete Columns, 2001.
22. Deniaud C., Cheng J. J. R., Shear Behavior Of Reinforced Concrete T-Beams With Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Sheets, ACI Structural Journal, 98 (3): 368-394, 2001.
23. Vincent T., Özbakkaloğlu T., Influence of Fiber Orientation and Specimen end İlki A. ve Kumbasar N., Karbon Lifli Takviyeli Polimer Kompozit Malzeme ile Hasarlı Betonarme Elemanların Onarım ve Güçlendirilmesi, İMO Teknik Dergi, s. 2598-2616, 2002.
24. Tan K. H., Strength Enhancement Of Rectangular Reinforced Concrete Columns Using Fiber-Reinforced Polymer, ASCE Journal Of Composites For Construction, 6, No.3, 175-183, 2002.
25. Chaallal O. M., ASCE, Shahawy M. and Hassan M., Performance Of Axially Loaded Short Rectangular Columns Strengthened With Carbon Fiber-Reinforced Polymer Wrapping, ASCE Journal Of Composites Of Construction, 7, No.3, 200-208, 2003.
26. Shao Y., Mirmiran A., Nonlinear Cyclic Response Of Laminated Glass FRP Tubes Filled With Concrete, Composites Structures, 65, p. 91-101, 2004.
27. Guoqiang Li., Experimental Study Of FRP Confined Concrete Cylingders, Engineering Structures, 28, p. 1001-1008, 2006.

28. Wang F. Y., Wu H. L., Experimental Investigation On Square High Strength Concrete Short Columns Confined With AFRP Sheets, *Journal Of Composites For Construction*, 14, 3, 346-351, ASCE, 2010.
29. Vincent T., Özbakkaloğlu T., Influence Of Concrete Strength and Confinement Method On Axial Compressive Behaviour Of FRP Confined High and Ultra High-Strength Concrete, *Composites Part B, Engineering*, 50, 413-428, July, 2013.
30. Vincent T., Özbakkaloğlu T., Influence of Fiber Orientation and Specimen end Condition On Axial Compressive Behavior Of FRP-Confined Concrete, *Construction and Building Materials*, 47, October, 2013.
31. Lim J. C., Özbakkaloğlu T., Axial Compressive Behavior Of FRP-Confined Concrete: Experimental Test Database and A New Design-Oriented Model, *Composites Part B, Engineering*, 55, 607-634, December, 2013.
32. Güler S., Axial Behaviour Of Ultra High Strength Of FRP-Wrapped Circular Ultra High Performance Specimens, *Structural Engineering Mechanics*, 50, 6, 709-722, 2014.
33. Lim J. C., Özbakkaloğlu T., Hoop Strains In FRP-Confined Concrete Columns: Experimental Observations, *Materials and Structures*, DOI 10.1617, s11527, 2014.
34. Lim J. C., Özbakkaloğlu T., Influence Of Silica Fume On Stress-Strain Behavior Of FRP-Confined HSC, *Construction and Building Materials*, 63, p. 11-24, 2014.
35. Guoqiang L., Dinesh M., Kumar S., Su-Seng P., Manu J., Effect Of Fiber Orientation The Strucutral Behaviour Of FRP Wrapped Concrete Cylindirs, *Composite Structures*, 74, 475-483, 2016.
36. İlki A., Peker Ö., Karamuk E., Demir C., Kumbasar N., Axial Behaviour Of RC Columns Retrofitted With FRP Composites, *Advances In Earthquake Engineering For Urban Risk Reduction*, 3010-3016, 2016.
37. Wang D. Y., Wang Z. Y., Smith S. T., Yu T., Size Effect On Axial Stress-Strain Behaviour Of CFRP-Confined Square Concrete Columns, *Construction and Building Materials*, 118, 116-126, 2016.
38. Eid R., Paultre P., Compressive Behavior Of FRP-Confined Reinforced Concrete Columns, *Engineering Structures*, 132, 518 – 530, 2017.
39. Kurt G., Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği, Mayıs, 2006.
40. Acun S., Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
41. Ekincioglu Ö., Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı Bir Optimum Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
42. Chawla K. K., *Fibrous Materials*, Cambridge University Pres, Cambridge, 1998.

43. <http://www.esa.com.tr/kompozit-hakkında/>
44. <http://www.teknikkompozit.com/Urunler.aspx?id=112>
45. <http://durakam.com/ctp-kompozit-hakkında/>
46. Hannant D. J., Advanced Concrete Technology, Elsevier Ltd., 2003.
47. Biber S. A., Karmaşık Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, 2001.
48. Songa P. S., Hwangb S. and Sheub B. C., Strength Properties Of Nylon and Polypropylen Fiber Reinforced Concretes, Cement and Concrete Research, Vol.35, 2005.
49. Barbero E. J., Introduction To Composite Materials Design, Edwards Brothers, Ann Arbor, MI, U.S.A., 1999.
50. <http://carbomid.com.tr/tr/karbon-elyaf-2/>, <http://www.tekstilbilgi.net/karbon-lifli-nedir.html>
51. <http://www.gensaproje.com.tr>
52. Bunsell A. R., Fiber Reinforcement For Composite Materials, Vol:2 Composite Materials Series, Elsevier Science, The Netherlands, 1988.
53. Advanced Glassfiber Yarns Llc, Technical Paper, High Strength Glass Fibers, p. 2-11, March 2013.
54. Seventekin N., Kimyasal Lifler, E.Ü. Teks. Ve Konf. Araş. Uyg. Merk., s. 128-134, 2001.
55. Mineral Product Industry, Glass Fiber Manufacturing, p. 1-3, January 1995.
56. <http://cdn.elektrikport.com//Content//201506/Resim1.png>
57. Baştürk Ö., Beton Yüzeylerine Sarılan Lifli Kompozitlerin Basınç Dayanımına Etkilerinin Araştırılması, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
58. Kılıç E., Kompozit Malzemeden Yapılan Yaprak Yayıların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 3-15, 2006.
59. Eker A. A., Mühendislik Malzemeleri ve Özellikleri, Ders Notu, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2008.
60. Arslan Z., Karakuzu R., Transient Dynamic Analysis Of Laminated Composite Plate Subjected To Low-Velocity Impact, Mathematical & Computational Applications, 7(1): 73-82, 2002.
61. Yaman N., Ökten T., Seventekin N., Karbon Liflerinin Özellikleri ve Kullanım Olanakları, Tekstil ve Konfeksiyon, 2, 90 – 95, 2007.
62. Walsh P. J., Carbon Fiber, ASM Handbook, 21, 35-40, 2001.
63. http://eng.uab.edu/epcl/b_fiber.htm#carbon

64. Türkmen İ., Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde Elyaf Tabaka Sayısına ve Üretim Yöntemine Bağlı Mekanik Özelliklerinin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 2012.
65. Sierakowski R. L., Chaturverdi S. K., Dynamic Loading and Characterization Of Fiber-Reinforced Composites, Willy, New York, 1997.
66. Abrate S., Impact On Composite Structures, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
67. Yazıcı M., Ülkü S., İki Boyutlu Rastgele Dağılı E-Cam Lifi/Polyester Matris Kompozitlerde Yükleme Hızının Mukavemet Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Müh. Mimarlık Fakültesi Dergisi, 8 (1), 2003.
68. Şenel M., Ön Gerilmeli Kompozit Plakların Düşük Hızlı Darbe Yüğü Etkisi Altında Davranışlarının İncelenmesi, TÜBİTAK Proje No:105M195, 2009.
69. Rotem A., Lifshitz J. M., Longitudinal Strength Of Unidirectional Fibrous Composite Under High Rate Of Loading, Proc. 26th Annual Tech. Conf. Soc. Plastics Industry Reinforced Plastics, Composites Division, Washington, DC, Section 10-G: 1-10, 1971.
70. <http://cdn.elektrikport.com/Content/201506/Resim1.png>
71. Ersoy U., Betonarme Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2007.
72. Celep Z., Kumbasar N., Betonarme Yapılar, Beta Dağıtım, İstanbul, 2005.
73. İnel M., Özmen H. B., Bilgin H., Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı Kullanım Kılavuzu, Denizli, 2008.
74. Sheikh S. A., Confined Concrete Subjected To Axial and Bending Loads, Proceedings Of 8th World Conference On Earthquake Engineering, San Francisco, USA, 1984.
75. Richart R.M., Abbott B. J., Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, Journal Of The Engineering Mechanics Division, ASCE, 101(4), 511-515, 1975.
76. Samaan M., Mirmiran A., Shahawy M., Model Of Concrete Confined By Fiber Composites, Journal Of Structural Engineering, 124(9), 1025-1031, 1988.
77. Lam L., Teng J. G., Design-Oriented Stress-Strain Model For FRP-Confined Concrete, Construction and Building Materials, 17(6-7), 471-489, 2003.
78. Jiang T., Teng J. G., Strengthening Of Short Circular RC Columns With FRP Jackets: A Design Propals, 3rd International Conference On FRP Composites In Civil Engineering, Miami, Florida, USA, 13-15 December, 2006.
79. Fahmy M., Wu Z., Evaluating and Proposing Models Of Circular Concrete Columns Confined With Different FRP Composites, Composites Part B: Engineering, 41(3), 199-213, 2010.

- 80.** Tautanji H. A., Stress-Strain Characteristics Of Concrete Columns Externally Confined With Advanced Fiber Composite Sheets, ACI Materials Journal, 96(3), 397-404, 1999.



ÖZGEÇMİŞ

20.11.1989 yılında Yozgat'ta doğan İsmail ÜNAL, 1995 – 2003 yılları arasında sırasıyla Erdoğan Akdağ İ.Ö.O, Atatürk İ.Ö.O, Fatma Temel Turhan İ.Ö.O'nda ilköğretim ve ortaöğretimi mi tamamlamıştır. 2003 – 2006 yılları arasında 75. Yıl Serpil Akdağ Lisesinde lise eğitimimi tamamlayarak, 2008 – 2010 yılları arasında Balıkesir Üniversitesi Dursunbey MYO İnşaat Teknolojisi Bölümünü 1.'lik ile bitirerek mezun olmuştur. 2010 yılında girmiş olduğu DGS sınavını kazanarak Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne yerleştirilmiştir. 2010 – 2013 yılları arasında Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun olmuş ve 2013 yılında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans eğitimime başlamıştır. Aynı zamanda yapı denetim firmasında iş hayatına başlamış olup halen aynı firmada (sorumlu müdür olarak) çalışmaktadır. Aynı zamanda evli ve bir çocuk babasıdır. 2018 yılında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans eğitimini başarı ile tamamlayarak mezun olmuştur.

İletişim Bilgileri

Adres : Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü YOZGAT
Telefon: 0554 635 9662
E-posta: is_ma_il_unal66@hotmail.com