İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME YAPILARIN LİF TAKVİYELİ POLİMERLER (FRP) İLE ONARIMI VE GÜÇLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aydın Rıza KOÇAK

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME YAPILARIN LİF TAKVİYELİ POLİMERLER (FRP) İLE ONARIMI VE GÜÇLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aydın Rıza KOÇAK
(501001168)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Metin AYDOĞAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü.)

Doç.Dr. Mustafa ZORBOZAN (Y.T.Ü.)

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, son yıllarda özellikle yurtdışında güçlendirme uygulamalarında kullanımı yaygınlaşan ancak ülkemizde yeteri kadar tanınmayan lif takviyeli polimerlerin davranışı ve özellikleri üzerine yapılan araştırma sonuçları ve hesap esasları ayrıntılı olarak derlenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Metin AYDOĞAN'a teşekkür ederim.

Tezimi hazırlarken yapmış olduğum araştırmalar sırasında eriştiğim SİKA'dan İdil YURDAKUL ve KOR-TEK'den Zeynep ÖZMEN'e bilgiye ulaşmamda yol gösterdikleri ve bilgilerini benden esirgemeyip benimle ilgilendikleri için kendilerine teşekkür ederim.

Son olarak bu tez çalışmamı, en zor anlarımda yanımda olan, bana çalışma azmi ve isteği veren, her konuda destek ve yardımcı olan çok değer verdiğim eşim Kimya Mühendisi R. Sevda KOÇAK'a ve tabii ki bana tahsil imkanı sağlayan aileme ithaf ederim.

Aydın Rıza KOÇAK

MAYIS 2003

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR viii
TABLO LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
SEMBOL LİSTESİ xiii
ÖZET xv
SUMMARY xvi

1. GİRİŞ 1
1.1. Lif Takviyeli Polimer (FRP) Nedir? 1

2. LİFLER 3
2.1. Liflerin Özellikleri 4
2.2. Liflerin Fiziksel Özellikleri 5
2.2.1. Kimyasal direnç 5
2.2.2. Ultraviole ışınıma karşı direnç 5
2.2.3. Elektrik iletkenliği 5
2.2.4. Basınç mukavemeti 5
2.2.5. Rijitlik 6
2.2.6. Çarpışma (Patlama) direnci 6
2.2.7. Yangın 6
2.2.8. Sağlık ve güvenlik 6
2.2.5. Çevresel etkileri 6
2.3. Liflerin Mühendislik Özellikleri 6
2.4. Tekstiller (Dokumalar) 7
2.5. Levhalar (Laminatlar) 8
2.6. Lif Seçimi 8

3. YAPIŞTIRICILAR 10

4. FRP'NİN YAPIM AŞAMASI 14
4.1. Vakum Çantası / Sterilizatör Kalıbı 14
4.2. Pultrasyon 14
4.3. FRP Tiplerinin Karşılaştırması 14

5. LİF TAKVİYELİ POLİMERLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ 17
5.1. Göçme Modu Tipleri 17
5.1.1. Çekme kırılması 17
5.1.2. FRP kopması 19

5.1.3. Basınç kırılması 20
5.1.4. Yerel kırılmalar 21
5.1.4.1. Kesme kırılması 21
5.1.4.2. Ankraj kırılması 22
5.1.4.3. FRP sıyrılma göçmesi 26
5.2. Yük Taşıma Kapasitesini Etkileyen Faktörler 29
5.2.1. Yapıştırıcı tipi 29
5.2.2. Ankrajın etkisi 29
5.2.3 Lif yönlendirmesinin etkisi 33
5.2.4 Levha kalınlığının ve FRP oranının etkisi 34
5.2.5. Donatı oranı 35
5.2.6 Beton basınç mukavemeti 37
5.3. Kompozit Malzemelerle Onarılmış Beton Yapılarda Aktarma Boyu 37
5.3.1 Diferansiyel denge denkleminin çıkartılışı 37
5.3.1.1 Varsayımlar 37
5.3.1.2 Diferansiyel denklem 37
5.3.2 Basit kesme 39
5.3.2.1 Denge denkleminin çözümü 39
5.3.2.2 Beton bloğun rijitliğinin etkisi 40
5.3.2.3 Basitleştirilmiş ifadeler 40
5.3.3 Betonda sabit boyuna uzama 41
5.3.3.1 Denge denkleminin çözümü 41
5.3.3.2 Basitleştirilmiş ifadeler 42
5.3.4 Eğilme 43
5.3.4.1 Denge denkleminin çözümü 43
5.3.4.2 Basitleştirmeler 45
5.3.4.3 Sabit yayılı yük özel hali 47
5.3.4.4 $\tau(x)$ ve $f_f(x)$ için sonuç basitleştirilmiş ifadeler 48
5.3.5 Kayma gerilmesi azaltma çalışması 48
5.3.5.1 Üç hal arasında karşılaştırma 48
5.3.5.2 Aktarma boyu 49
5.3.5.3 Maksimum kayma gerilmesi 49
5.3.5.4 Sayısal örnek 50
5.3.6 Sonuç 52
5.4 Levha Ucundaki Gerilme Yığılmalarından Dolayı Oluşan Kırılma Yükünün Tahmini 52

6. FRP'NİN BETONARME YAPILARDA KULLANIM NEDENLERİ 53
6.1. Eğilme Dayanımını Arttırmak 53
6.1.1. Tasarım yaklaşımı 53

6.1.2. Mevcut durumun değerlendirilmesi 54
6.1.2.1. Çatlamış kesitte başlangıç şekil değiştirmeleri 54
6.1.3. Ön tasarım 54
6.1.3.1. Mevcut kayma dayanımı 54
6.1.3.2. Mevcut rijitlik 55
6.1.4. Nihai dayanım analizi 55
6.1.4.1. Donatı ile güçlendirilmiş betonarme 56
6.1.5. Süneklik 69
6.1.5.1. Donatısız beton 60
6.1.5.2. Betonarme 60
6.1.6 Kullanılabilirlik gereksinimleri 61
6.1.6.1. İşletme gerilme analizi 61
6.1.7. Bir köprü tabliyesinin eğilme dayanımının arttırılmasının hesabı 63
6.1.8. Bir kirişin eğilme dayanımının arttırılmasının hesabı 68
6.2. Kayma Dayanımını Arttırmak 72
6.2.1. Kayma dayanımı seçenekleri 72
6.2.1.1. Çeşitli sarma tipleri 72
6.2.1.2. Kayma takviyesi aralığı 73
6.2.1.3. Lif yönü 73
6.2.1.4. İki eksenli donatı 74
6.2.2. Tasarım 74
6.2.2.1. FRP ile güçlendirilmiş kesitin kesme kuvveti taşıma kapasitesi 75
6.2.2.2. Kesme kapasitesine FRP donatısının katkısı 75
6.2.3. Tasarım tavsiyeleri 79
6.2.3.1. İki eksenli FRP donatısı 79
6.2.3.2. Ara mesafe gereksinimleri 80
6.2.3.3. Toplam kayma donatısı sınırı 80
6.2.4. Deneysel verilerle karşılaştırma 80
6.2.5. T kesitli bir kirişin kayma dayanımının arttırılmasının hesabı 81
6.2.6. İlâve kayma donatısı hesabı 85
6.3. Eksenel Yük Taşıma Gücünün Arttırılması 88
6.3.1. FRP ile sarılmış betonun davranışı 88
6.3.1.1. Daire kesitli betona FRP sarılmasının davranışdaki etkisi 91
6.3.1.2 Boyuna şekil değiştirmenin bir fonksiyonu cinsinden sargı basıncı 93
6.3.1.3 FRP sarılı beton için yapılan düzenleme 93
6.3.2. Eksenel kuvvet ve eğilme momentleri 94
6.3.2.1. Nihai dayanım analizi 94
6.3.2.2. Kullanılabilirlik 94
6.3.3. Kesme kapasitesinde artış 95

6.3.4. Dairesel bir kolonun nihaî yük taşıma kapasitesinin arttırılması hesabı 95

7. İŞÇİLİK VE MONTAJ 98
7.1. Malzeme Depolaması 98
7.2. Saha Koşulları 98
7.3. Mevcut Beton Kalitesinin Belirlenmesi 98
7.4. Yüzey Hazırlığı 99
7.4.1. Beton yüzeyi 99
7.4.2. Hazırlık teknikleri 99
7.5. Yapışkanın Karıştırılması ve Uygulanması 101
7.5.1. Genel 101
7.5.2. Levha montajından önce alt tabakanın uygulanması 102
7.5.3 FRP levhaların uygulanması 102
7.5.4. Tekstil uygulanmasından önce alt tabakanın uygulanması 103
7.5.5. FRP tekstillerinin uygulanması 103
7.6. Montaj ve Görsel Kontrol 105
7.6.1. FRP levhalarının montajı 105
7.6.2. FRP tekstillerinin montajı 105
7.7. Tahribatsız Deneyler 107
7.8. Üst Kaplama Uygulanması 107

8. DÜNYADAKİ UYGULAMALARDAN ÖRNEKLER 109
8.1. Binalardaki Uygulamalar 110
8.1.1. Kirişler ve döşemelerdeki uygulamalar 110
8.1.1.1. İlâve yük kapasitesi 110
8.1.1.2. Yapısal değişiklikler 110
8.1.1.3. Yetersiz donatı 110
8.1.1.4. Yanlış yerleştirilmiş donatılar 110
8.1.1.5. Yapısal hasar 111
8.1.1.6. Onarım 111
8.1.2. Kolonlardaki uygulamalar 111
8.1.2.1. İlâve yük kapasitesi 111
8.1.2.2. Yanlış tasarım 111
8.1.2.3. İlâve sismik kapasitesi 111
8.1.3. Kolon - kiriş birleşimlerindeki uygulamalar 112
8.1.4. Duvarlardaki uygulamalar 112
8.2. Köprülerdeki Uygulamalar 112
8.2.1. Kirişler ve tabliyelerdeki uygulamalar 112
8.2.1.1. İlâve yük kapasitesi 112
8.2.1.2. Yetersiz donatı 112
8.2.2. Kolonlardaki uygulamalar 113
8.2.2.1. Lif ile sarma 113

8.2.2.2. Tekstil ile birleştirilmiş genleşen harç 113
8.3. Diğer Yapılardaki Uygulamalar 113
8.3.1. Kuleler ve bacalardaki uygulamalar 113
8.3.2. Tünellerdeki uygulamalar 114
8.3.3. Su/Kıyı yapılarındaki uygulamalar 114

9. SONUÇ **115**
9.1. FRP'nin Üstünlükleri ve Sakıncaları 115
9.1.1. Levhaların dayanımı 115
9.1.2. Levhaların ağırlığı 115
9.1.3. Levhaların taşınması 115
9.1.4. Sistemlerin çok yönlü tasarımı 116
9.1.5. Kolay ve güvenilir yüzey hazırlığı 116
9.1.6. Azaltılmış mekanik sabitleştirme 116
9.1.7. Güçlendirme sisteminin dayanıklılığı 116
9.1.8. Yangın güvenliğinin arttırılması 117
9.1.9. Donma/erime hasar riskinin düşürülmesi 117
9.1.10. Takviye sisteminin bakımı 117
9.1.11. İnşaat süresini düşürmesi 117
9.1.12. Öngerme yeteneği 118
9.1.13. Levha maliyeti 118
9.1.14. Mekanik hasar 118

KAYNAKLAR **120**

ÖZGEÇMİŞ **123**

KISALTMALAR

AFRP	: Aramid Lif Takviyeli Polimer
CFRP	: Karbon Lif Takviyeli Polimer
FEM	: Sonlu Elemanlar Metodu
FRP	: Lif Takviyeli Polimer
GFRP	: Cam Lif Takviyeli Polimer
ROBUST	: İngiltere'de Polimerik Kompozit Malzemeler Kullanarak Köprülerin Güçlendirilmesi Projesine verilen ad

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1.	Liflerin genel özellikleri.....	3
Tablo 2.2.	En sık kullanılan lif tiplerinin özellikleri.....	3
Tablo 2.3.	Matris tipleri ve özellikleri.....	4
Tablo 2.4.	Tipik Kompozit özellikleri (%40 lif %60 reçine hacminde).....	4
Tablo 2.5.	Mbrace lifleri için tasarım değerleri	7
Tablo 2.6.	FRP için süre ve çevre katsayıları tablosu	8
Tablo 3.1.	Çekme etkisi altında reçine özellikleri	12
Tablo 3.2.	Eğilme etkisi altında reçine özellikleri	12
Tablo 3.3.	Basınç etkisi altında reçine özellikleri …….....	13
Tablo 4.1.	Hacimsel lif içeriği %65 olan tek yönlü yönlendirilmiş liflerin karşılaştırılması.....	15
Tablo 4.2.	Mbrace FRP laminat özellikleri.....	15
Tablo 4.3.	Mbrace FRP tekstil özellikleri.....	16
Tablo 5.1.	Farklı hallerde $f_p(x)$ ve $\tau(x)$ için gerçek ve basitleştirilmiş analitik çözümler.....	48
Tablo 5.2.	Kompozit boyunca kayma gerilmesindeki düşüş.....	49
Tablo 6.1.	Güçlendirmede kullanılan malzemelerin emniyet gerilmeleri.....	62
Tablo 6.2.	FRP için süre ve çevre katsayıları tablosu.....	62
Tablo 6.3.	c'nin elde edilmesi için deneme-yanılma hesaplamalarının özeti.....	66
Tablo 8.1.	İngiltere'de FRP ile güçlendirilmiş yapılara bazı örnekler….....	109

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Üç tip FRP için gerilme-şekil değiştirme diyagramı..... 7
Şekil 4.1 : Mbrace FRP tekstil resmi..... 15
Şekil 4.2 : Mbrace FRP laminat resmi..... 15
Şekil 5.1 : A_s ve A_f'ye bağlı olarak göçme modlarının sınıflandırılması..... 17
Şekil 5.2 : Kesiti etkileyen değişkenler ve iç kuvvetler 18
Şekil 5.3 : Kesite etkiyen kuvvetler..... 19
Şekil 5.4 : FRP kopma göçmesi mekanizması..... 19
Şekil 5.5 : Basınç kırılmasının şematik resmi..... 20
Şekil 5.6 : Kesme kırılması mekanizması..... 22
Şekil 5.7 : Ankraj kırılması..... 23
Şekil 5.8 : Levhalanmış kiriş kesiti..... 23
Şekil 5.9 : Beton ve çeliğin alanlarının eşdeğer FRP'ye dönüşümü..... 25
Şekil 5.10 : Eğilme çatlaklarında FRP sıyrılması..... 27
Şekil 5.11 : Diyagonal çatlaklarda FRP sıyrılması..... 27
Şekil 5.12 : Yüzey pürüzlülüğünden dolayı oluşacak FRP sıyrılması..... 28
Şekil 5.13 : FRP sıyrılma mekanizması..... 28
Şekil 5.14 : Çelik ankraj bulonları ile ankrajlanmış kirişteki diyagonal çekme çatlaklarının yayılışı..... 30
Şekil 5.15 : I şeklinde mantolanmış GFRP levhasının yandan görünüşü..... 30
Şekil 5.16 : I şeklinde mantolanmış GFRP levhasının alttan görünüşü..... 30
Şekil 5.17 : Değişik yöntemler kullanarak kirişlerin güçlendirilmesi..... 31
Şekil 5.18 : 3 ve 4 numaralı kirişlerin yük-sehim diyagramı..... 32
Şekil 5.19 : 5 numaralı kirişlerin yük-sehim diyagramı..... 32
Şekil 5.20 : Farklı ankraj tiplerinin şematik gösterimi..... 33
Şekil 5.21 : FRP oranının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi..... 35
Şekil 5.22 : 2.grup kirişlere ait yük-şekil değiştirme eğrileri..... 36
Şekil 5.23 : 5.grup kirişlere ait yük-şekil değiştirme eğrileri..... 36
Şekil 5.24 : Betonun ve kompozitin sonsuz küçük parçası..... 37
Şekil 5.25 : Basit kesme..... 39
Şekil 5.26 : Betondaki sabit çekme gerilmeleri..... 41
Şekil 5.27 : Eğilme altında güçlendirilmiş kiriş durumları..... 43
Şekil 5.28 : L = 3m, l_0 = 0,01m için mutlak değer r(d,l_0) oranı..... 48
Şekil 5.29 : Kesitin ölçüleri..... 51
Şekil 5.30 : Üç noktadan eğilme hali için tipik mutlak değer ($\tau(x)$) eğrisi..... 51
Şekil 5.31 : Sabit eğilme momenti hali için tipik mutlak değer ($\tau(x)$) eğrisi..... 51
Şekil 5.32 : Sabit yayılı yük hali için tipik mutlak değer ($\tau(x)$) eğrisi..... 51
Şekil 6.1 : Döşeme altına iki doğrultuda yapıştırılmış FRP laminat..... 53

Şekil 6.2 **:** Nihai durumda betonarme bir kesitte gerilme ve şekil değiştirme dağılımı..... 56
Şekil 6.3 **:** Çeşitli seviyelerde güçlendirilmiş betonarme kirişler için idealleştirilmiş tipik moment eğrilik ilişkisi..... 59
Şekil 6.4 **:** Sünekliğin bir fonksiyonu olarak dayanım azaltma katsayısını temsil eden grafik..... 61
Şekil 6.5 **:** İşletme gerilmesi analizi için gerilme ve şekil değiştirme dağılımı..... 63
Şekil 6.6 **:** Kesit geometrisi..... 63
Şekil 6.7 **:** Kesit geometrisi..... 68
Şekil 6.8 **:** Şekil değiştirmelerin oranlanması..... 69
Şekil 6.9 **:** Moment ve iç kuvvetlerin gösterimi..... 70
Şekil 6.10 **:** Kesite FRP'nin ilâvesi..... 70
Şekil 6.11 **:** Kuvvet dengesi..... 71
Şekil 6.12 **:** Şekil değiştirmelerin oranlanması..... 71
Şekil 6.13 **:** FRP takviyesinin çeşitli sarma şekilleri..... 73
Şekil 6.14 **:** FRP kayma takviyesi tipleri..... 73
Şekil 6.15 **:** FRP tekstillerinin yönlendirme açıları..... 74
Şekil 6.16 **:** İki eksenli FRP tekstili (a) 0°/90° (b) ± 45° 74
Şekil 6.17 **:** Kesme dayanımı hesabında FRP alanını tanımlamak için kullanılan ölçüler..... 76
Şekil 6.18 **:** Sarma şekillerine göre etkili derinlik hesabı……..... 79
Şekil 6.19 **:** Deneysel sonuçlarla tasarım yöntemiyle hesaplanmış sonuçların karşılaştırması..... 81
Şekil 6.20 **:** T-kesitli kiriş ölçüleri..... 82
Şekil 6.21 **:** Hesap sonucu bulununan FRP şerit yerleşimi..... 85
Şekil 6.22 **:** Yük dağılımı değişimini gösteren kiriş görünüşü..... 85
Şekil 6.23 **:** Orta açıklıktaki kiriş enkesiti..... 86
Şekil 6.24 **:** Kesme kuvveti diyagramı..... 86
Şekil 6.25 **:** FRP takviyesinin kiriş üzerindeki yeri..... 88
Şekil 6.26 **:** Sarılmamış betona tek eksenli yüklenmiş tipik gerilme-boyuna, enine ve hacimsel şekil değiştirme ilişkisi..... 89
Şekil 6.27 **:** Lif yönlendirmesini gösteren FRP ile sarılmış bir kolonun şekli.. 89
Şekil 6.28 **:** Bir FRP manto ile sarılmaış betonun genelleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisi..... 90
Şekil 6.29 **:** Çeşitli sargı seviyeleri altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi..... 90
Şekil 6.30 **:** FRP mantosu ve beton kolondaki harici ve dahili kuvvetler diyagramı..... 92
Şekil 6.31 **:** Donatısız, etriyeli ve FRP mantolu kolonların basınç etkisindeki tipik davranışı..... 92
Şekil 6.32 **:** Kolon enkesiti..... 95
Şekil 6.33 **:** $\gamma = 0.60$ için karşılıklı etkileşim diyagramı..... 96
Şekil 6.34 **:** $\gamma = 0.90$ için karşılıklı etkileşim diyagramı..... 97
Şekil 7.1 **:** Beton dayanımının tayini için çekme testinin kullanılması..... 99
Şekil 7.2 **:** Yüzey taşlaması..... 100
Şekil 7.3 **:** Çabuk kür alan tamir harçlarıyla yüzey kusurlarının doldurulması. 100
Şekil 7.4 **:** Düz sopa ile yüzeyin kontrolü..... 101
Şekil 7.5 **:** Uygun bir ekle bir elektrikli araç kullanılarak karıştırılan yapışkanı gösteriyor..... 102

Şekil 7.6 **:** Beton yüzeye yapışkanın uygulanışı…..... 10
Şekil 7.7 **:** Kompozit lifli levhanın üzerine yapışkanın uygulanışı..... 103
Şekil 7.8 **:** Tekstilin makas ile düzgünce kesilişi..... 104
Şekil 7.9 **:** Rulo kullanarak reçinenin uygulanışı..... 104
Şekil 7.10 **:** Tekstilin emdirilme işlemi..... 104
Şekil 7.11 **:** Rulo ile basınç uygulayarak levhaların yerlerine monte edilmesi. 105
Şekil 7.12 **:** Köşeli bir elemanın çevresine tekstil sarılması..... 106
Şekil 7.13 **:** Kolon çevresinin tekstil ile sarılması..... 106
Şekil 7.14 **:** Hava boşluklarını almak için rulonun tekstil üzerinde lif doğrultusunda gezdirilmesi..... 106
Şekil 7.15 **:** Üst kaplama harcının sprey ile uygulanması..... 108
Şekil 9.1 **:** Karbon FRP levhalarının sahaya getirilme şekli..... 116

SEMBOL LİSTESİ

a : Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun yüksekliği
b : Kiriş genişliği [mm]
b_a : Yapışkan genişliği [mm]
b_f : FRP genişliği [mm]
c : Tarafsız eksen derinliği [mm]
d : Kirişin faydalı yüksekliği [mm]
d' : Beton örtüsü, pas payı [mm]
d_f , d_p : FRP takviyesinin derinliği(genellikle d-h_s'dir) [mm]
d_{fe} : Sadece yeterli yapışma alanını dikkate alan etkili FRP derinliği [mm]
f'_c : Betonun karakteristik basınç dayanımı [MPa]
f'_{cc} : Mantolanmış betonun nominal basınç dayanımı [MPa]
f_{cd} : Betonun tasarım basınç dayanımı [MPa]
f_{ck} : Betonun karakteristik basınç dayanımı [MPa]
f_{cp} : FRP mantosu tarafından sağlanan sargı basıncı [MPa]
f_f : FRP'nin sağladığı gerilme seviyesi [MPa]
f_s : Çekme donatısı akma gerilmesi [MPa]
f'_s : Basınç donatısı akma gerilmesi [MPa]
f_u : FRP'nin tasarım dayanımı [MPa]
f_{wy} : Etriye donatısının çekme dayanımı [MPa]
f_y : Donatının akma dayanımı [MPa]
f_{yd} : Donatının tasarım çekme dayanımı [MPa]
h : Kesit yüksekliği [mm]
h_s : Tablalı kesitte döşeme kalınlığı [mm]
k : Elastik tarafsız eksen derinliğinin etkili derinliğe(d) oranı
k_1 : Ortalama basınç gerilmesinin en yüksek basınç gerilmesine oranı
k_n : Yapışkanın birim boyunun normal rijitliği [MPa/mm]
k_s : Yapışkanın birim boyunun rijitliği [MPa/mm]
n : FRP kat sayısı
s_f : FRP takviyesinin şeritler arasındaki mesafe [mm]
t_f , t_p : FRP takviyesinin bir katının kalınlığı [mm]
w_f : FRP takviyesinin bir şeridinin genişliği [mm]
A_{fv} : Enine FRP takviyesinin bir şeridinin toplam alanı = $2nt_fw_f$ [mm^2]
A_f , A_p : FRP alanı [mm^2]
A_s : Çekme donatısı alanı [mm^2]
A'_s : Basınç donatısı alanı [mm^2]
E_c : Betonun elastisite modülü [MPa]
E_f : FRP'nin elastisite modülü [MPa]
E_s : Donatının elastisite modülü [MPa]
I_c : Betonun atalet momenti [mm^4]
I_{cr} : Çatlamış beton kesitin atalet momenti [mm^4]
I_f : FRP'nin atalet momenti [mm^4]
I_s : Donatının atalet momenti [mm^4]
L_0 : FRP'nin bir katının etkili aderans boyu [mm]
L_e : FRP şeridinin etkili aderans boyu [mm]

M_{ip} :FRP montajı sırasında esas olarak ölü yüklerden oluşan moment [Nmm]

M_n : Bir kesitin nominal moment kapasitesi [Nmm]

M_r : Kesitin eğilme momenti taşıma gücü [Nmm]

M_s : Servis yüklerinden dolayı oluşan moment [Nmm]

M_u : Kesitin taşıyabileceği nihai moment değeri [Nmm]

R :Göçme anında FRP'deki gerilme seviyesini bulmak için FRP'nin nihai dayanımı ile çarpılan azaltma katsayısı

V_c : Beton kesitin kesme kuvveti dayanımına katkısı [N]

V_f : FRP'nin kesme kuvveti dayanımına katkısı [N]

V_n : Nominal kesme kuvveti [N]

V_s : Donatının kesme kuvveti dayanımına katkısı [N]

V_u : Nihai kayma dayanımı [N]

β : FRP şeritlerin yatayla yaptığı açı

β_1 : Beton eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun derinliğinin tayininde c'nin çarpanı

γ : Beton eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğunun şiddetinin tayininde f_c' çarpanı

ε_b : Verilen bir eğilme momentinin geliştirdiği beton altyüzündeki şekil değiştirme seviyesi

ε_{bi} : FRP montajı sırasında beton altyüzündeki şekil değiştirme seviyesi

ε_c : Betondaki birim kısalma

ε'_c : Gerilmenin pik değerine(f_c') karşılık gelen şekil değiştirme seviyesi

ε'_{cc} : Gerilmenin pik değerine(f_{cc}') karşılık gelen mantolanmış betonun şekil değiştirme seviyesi

$\varepsilon_{c,cr}$: Betondaki enine çatlaklara neden olan boyuna şekil değiştirme seviyesi

ε_{cu} : Betonda en büyük birim kısalma

ε_f , ε_p : FRP'deki birim uzama

ε_{fu} , ε_{pu} : FRP'deki en büyük birim uzama

ε_s : Çekme donatısındaki birim uzama

ε'_s : Basınç donatısındaki şekil değiştirme seviyesi

ε_{sy} : Çekme donatısının akma noktasındaki şekil değiştirme seviyesi (f_y/E_s)

ε_t : Sarılmış veya sarılmamış betonun enine yöndeki şekil değiştirme seviyesi

ε'_t : Betondaki çekme gerilmesinin en büyük değerine karşılık gelen şekil değiştirme seviyesi (0.0002)

$\varepsilon_{t,cr}$: Betondaki enine çatlaklara neden olan enine şekil değiştirme seviyesi

ρ : Çekme donatısı oranı

ρ' : Basınç donatısı oranı

ρ_b : Dengeli donatı oranı

ρ_f : Hacimsel FRP takviyesinin oranı, liflerin hacminin mantolanmış betonun hacmine oranı

ρ_m : Süneklik sınırı donatı oranı

Φ : Dayanım azaltma katsayısı

σ_s : Betonun tasarım basınç dayanımı[MPa]

σ'_s : Basınç donatısındaki gerilme[MPa]

ν_c : Betonun poisson oranı

BETONARME YAPILARIN LİF TAKVİYELİ POLİMERLER (FRP) İLE ONARIMI VE GÜÇLENDİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada lif takviyeli polimerler (FRP) hakkında genel bilgiler verilip tanıtımı yapılmış, inşaat mühendisliğindeki kullanımı incelenmiştir. Konu ile ilgili yapılan çeşitli araştırma sonuçlarına yer verilmiş ve hesap esasları örneklerle açıklanmıştır. Ayrıca malzemenin sahada nasıl uygulanacağı hakkında bir kılavuz teşkil edilmiştir. Ülkemizdeki uygulama seyrekliğinden dolayı yurtdışında uygulanmış somut örneklerle kullanımının yaygınlığı ispatlanmak istenmiştir.

İlk dört bölümde lif takviyeli polimer kompozitlerini oluşturan malzemeler (lif ve yapıştırıcı) hakkında bilgiler verilip, yapım aşaması anlatılmıştır.

Beşinci bölümde mühendislik hesaplarda göz önünde bulundurulması gereken kompozitin davranışı üzerine birçok araştırmacı tarafından yapılmış çeşitli araştırma sonuçlarına yer verilmiştir.

Altıncı bölümde lif takviyeli polimer kompozitlerin eksenel yük taşıma kapasitesi ile eğilme ve kayma dayanımına katkısı formüllerle ifade edilmiş ve açıklayıcı örneklerle pekiştirilmiştir.

Yedinci bölümde malzemenin işçiliği ve montajı ile ilgili bilgiler verilmiş, bu sayede montaj esnasında uyulması gereken işlemler uygulamalara kolaylık sağlaması açısından tariflenmiştir.

Sekizinci bölümde bu takviye malzemesinin yurtdışında hangi sebeplerle tercih edildiğine ve nerelerde kullanıldığına dair somut örnekler verilmiştir. Böylece yapıda herhangi bir problemle karşılaşıldığında ne tür çözümler uygulanabileceğine emsal teşkil etmesi sağlanmıştır.

Dokuzuncu ve son bölümde de güçlendirmede kullanılan diğer bir malzeme olan çelik ile FRP'nin üstünlükleri ve sakıncaları karşılaştırmalı olarak anlatılıp, sonuca bağlanmıştır.

REPAIR AND STREGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH FIBER REINFORCED POLYMER (FRP)

SUMMARY

In this study, fiber reinforced polymer (FRP) has been introduced and examined for in civil engineering usage. Many experimental resultants which is related with this topic have been collected and ncalculations have been illustrated.

In the first four chapters, the materials (such as fiber and adhesive) which are consisted fiber reinforced polymer have been explained detailly and expressed the producing progresses which is called pultrusion.

In the fifth chapter, there are experimental resultants which are made for learning the behaviour of the fiber reinforced polymer composites under various configurations.

In the sixth chapter, the contribution of externally bonded fiber reinforced polymer to improve load capacity and to increase both shear and flexural strengthening have been formulized and illustrated.

In the seventh chapter, some helpful informations have been given about installation and workmanship of fiber reinforced polymer composites.

In the eigth chapter, there are some current samples from all over the world which may help us to understand why fiber reinforced polymer is chosen and how it is used as a reinforcement material.

In the last chapter, the advantages and disadvantages of fiber reinforced polymer and steel have been compared and come to a conclusion.

1. GİRİŞ

Betonarme yapılar, proje veya uygulama aşamasında yetersiz donatı kullanımından, betonun geçirimli olması durumunda donatıların uğrayacağı korozyondan, kullanım değişikliğinden dolayı proje aşamasında hesaba katılmayan ilâve yüklerden, doğru detaylandırılma yapılmadığında oluşan aşırı sehimlerden, kullanım sırasındaki yangın, tahrip gibi hasarlardan ve deprem gibi kesitin bütünlüğünü bozabilecek ani yükleme durumlarından dolayı onarım veya güçlendirilmeye ihtiyaç duyarlar.

Bilinen geleneksel onarım ve güçlendirme yöntemlerine (betonarme mantolama, çelik levha ile kılıf veya iskelet geçirme) son yıllarda gelişen teknoloji ile elde edilmiş olan yeni bir yapı malzemesi eklenmiştir. Literatürde kullanılan adıyla FRP'ler (fiber reinforced polymers) yani lif takviyeli polimerler, sahip oldukları yüksek dayanım, hafiflik ve yüksek korozyon direnci gibi üstün özellikleriyle tasarımcılara yeni bir alternatif sunar.

1.1 Lif Takviyeli Polimer (FRP) Nedir?

Lif takviyeli polimerler (literatürde bilinen adıyla FRP'ler), bir polimer reçinesinin içine gömülmüş yüksek mukavemetli liflerden oluşan kompozit elemanlardır [1]. Korozyon dayanımının yanında göçmeye ulaşıncaya kadar doğrusal bir gerilme-deformasyon ilişkisi gösteren geniş bir rijitlik ve mukavemet yeteneğine sahiptirler. FRP kompozitlerinin içindeki lifler, asıl yük taşıyan elemanlardır. Reçineler ise, lifleri birarada tutmak, hasardan korumak, sıralı düzenlerini sürdürmek ve yükün aralarında dağıtımını sağlamak için lifleri çevreler. En yaygın polimerik reçine tipleri; polyester, vinilester ve epoksidir.

FRP kompozitleri, çeliğin çekme ve yorulma dayanımları ile karşılaştırıldığında oldukça önemli mekanik ve fiziksel özellikler taşımaktadırlar. Çeliğin taşıma ve montaj sırasındaki ağırlığı, korozyon riskinin yüksekliği gibi sakıncalarını ortadan kaldıran FRP mühendislere, düşük ağırlık (hafiflik), korozyona dayanıklılık,

mükemmel rijitlik ve mekanik mukavemet, uzun mesafelerde bile şekil alabilme yeteneği gibi önemli, göze çarpan özelliklerin kombinasyonunda olanaklar sağlar [2].

Lif takviyeli polimer levhaların veya dokumaların özellikle betonarme kirişlerin ve köprü kolonlarının güçlendirilmesinde kullanımı giderek artmaktadır[3].

2. LİFLER

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan en uygun lifler; karbon, aramid ve camdır. Tablo 2.1'de bu liflere ait özelikler verilmiştir. Ancak bu değerler lifli kompozitler için değil sadece lifler için geçerlidir [4]

Tablo 2.1 Liflerin genel özellikleri

Lif Tipi	**Çekme Mukavemeti (MPa)**	**Elastisite Modülü (GPa)**	**Uzama (%)**	**Özgül Yoğunluk (t/m^3)**
Karbon: Yüksek mukavemetli	4300 – 4900	230 – 240	1.9 – 2.1	1.8
Karbon: Yüksek modüllü	2740 – 5490	294 – 329	0.7 – 1.9	1.78 – 1.81
Karbon: Ultra yüksek modüllü	2600 – 4020	540 – 640	0.4 – 0.8	1.91 – 2.12
Aramid: Yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü	3200 – 3600	124 – 130	2.4	1.44
Cam	2400 - 3500	70 - 85	3.5 – 4.7	2.6

Tablo 2.2 En sık kullanılan lif tiplerinin özellikleri [5]

	Lif Tipleri			
	E-Cam	**S-Cam**	**Kevlar™49**	**Karbon (HS)**
Yoğunluk (g/cm^3)	2.54	2.49	1.45	1.8
Çekme Mukavemeti (GPa)	1.72 – 3.45	2.53 – 4.48	2.27 – 3.80	2.80 – 5.10
Elastisite Modülü (GPa)	72.5	87	117	227
Kırılmadaki Uzama (%)	2.5	2.9	1.8	1.1

Tablo 2.3 Matris tipleri ve özellikleri [5]

	Matris Tipleri			
	Poliester	**Fenolik**	**Vinilester**	**Epoksi**
Yoğunluk (g/cm^3)	1.20	1.20	1.15	1.10 – 1.40
Çekme Mukavemeti (MPa)	50 – 60	50 – 40	70 – 80	50 – 90
Elastisite Modülü (GPa)	3.0	3.0	3.5	3.0
Kırılmadaki Uzama (%)	2.0 – 3.0	1.0 – 2.0	4.0 – 6.0	2.0 – 8.0

Tablo 2.4 Tipik Kompozit Özellikleri (%40 lif %60 reçine hacminde) [5]

	Kompozit Tipleri			
	E-cam / Epoksi	S-cam / Epoksi	Aramid / Epoksi	Karbon / Epoksi
Yoğunluk (g/cm^3)	2.10	2.00	1.38	1.58
Çekme Mukavemeti (MPa)	1080	1280	1280	2280
Elastisite Modülü (GPa)	39.0	43.0	87.0	142.0
Kırılmadaki Uzama (%)	55	50	60	63

2.1 Liflerin Özellikleri

Yapılacak uygulamalara göre kullanılacak liflerin seçiminde çeşitli faktörler rol oynar. Bunlar; yapının tipi, beklenen yükleme, çevre koşulları olarak özetlenebilir. Kısaca açıklamak gerekirse [4];

- Cam lifleri çok kullanılan güçlendirme lifleridir. Diğer liflere göre ucuz olmasına karşılık işlenme karakteristikleri de çok iyidir.
- Karbon lifleri yüksek mukavemet ve yüksek rijitlik elde edebilmek için en çok kullanılan takviye malzemesidir.
- Aramid lifleri çok sıkı organik sentetik liflerdir [6].
- Karbon ve aramid lifleri birçok kimyasal etkiye karşı direnç gösterirlerken, cam lifleri alkaliler tarafından çeşitli etkilere maruz kalırlar.

- Cam ve karbon lifleri ultraviyole ışınımdan etkilenmezler. Ancak aramid lifleri, ultraviyole ışık altında renk değişimine ve mukavemet azalmasına maruz kalır.
- Aramid ve cam lifleri iletken değillerdir. Karbon lifinin ise iletkenliği söz konusudur. Karbon ve cam liflerinin basınç mukavemeti, çekme mukavemetlerine yakındır. Aramid'in basınç mukavemeti ise çekme mukavemetinden oldukça düşüktür.
- Karbon, aramid ve cam lifleri toksik etkisi olmayan ve kirlilik açısından tehlikeli sayılmayacak malzemelerdir [4].

2.2 Liflerin Fiziksel Özellikleri

2.2.1 Kimyasal direnç

Karbon ve aramid lifleri kimyasal etkinin bir çok şekline karşı direnç gösterir. Cam lifinin bir çok türü ise alkaliler (pH'ı yaklaşık 11'den büyük olan) tarafından etkiye maruz kalmakla beraber asitlerden etkilenmezler. Aramidler, cam ve karbon liflerine nazaran daha çok su absorbe ederler. Bu da reçine/lif arayüzünde problemlere neden olur.

2.2.2 Ultraviole ışınıma karşı direnç

Karbon ve cam lifleri ultraviole ışınımdan etkilenmezler. Aramid lifleri ise ultraviole etkisiyle renk değişimine uğrarlar ve mukavemetlerinde azalma görülür.

2.2.3 Elektrik iletkenliği

Aramid ve cam lifleri iletken değildirler, bu yüzden enerji hatlarının ve demiryollarının yakınında, komünikasyon araçlarında kullanımına uygundur. Karbon lifleri elektriği iletirler. Bu özelliklerinde dolayı elektrikli ekipmanların yakınında karbon FRP (CFRP)'lerin kesimi ya da işlenmesi sırasında çok dikkat edilmelidir.

2.2.4 Basınç mukavemeti

Karbon ve cam liflerinin basınç mukavemeti, çekme mukavemetlerine yakındır. Aramid'in basınç mukavemeti ise çekme mukavemetinden oldukça düşüktür.

2.2.5 Rijitlik

Karbon liflerinin elastisite modülü çeliğin elastisite modülüyle benzerlik gösterir. Aramid'in rijitliği daha düşük, cam lifinin rijitliği ise en düşüktür.

2.2.6 Çarpışma (Patlama) direnci

Çarpışma sırasında liflerin performansı elastik deformasyon enerjisine bağlıdır. Çekme mukavameti 3500 MPa'dan, uzama oranı ise %2'den yüksek olan lifler, çarpışma direncinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Lif tipi seçiminde bu gereksinim göz önüne alınmalıdır.

2.2.7 Yangın

Cam lifleri, erime noktasına kadar (1000ºC üzerinde) dayanım gösterirlerken karbon lifleri 650ºC üzerindeki bir ortamda okside olurlar. Aramid lifleri ise genellikle 200ºC üzerindeki değerlerde kullanılmazlar. Bu üç liften hiçbiri yanmayı, tutuşmayı desteklemez. Kompozitlerde, reçine performansda baskın bir rol oynar, çoğu toksik duman meydana getirir.

2.2.8 Sağlık ve güvenlik

Bütün lifler normal şartlar altında kullanıldığında insan sağlığı açısından çok da önemsenmeyecek riskler taşırlar. Böyle olmasına rağmen kompozitlerin kesiminde ve işlenmesinde çok dikkatli olunmalıdır. Çünkü liflerin ince parçacıkları cilde ve gözlere zarar verebilir.

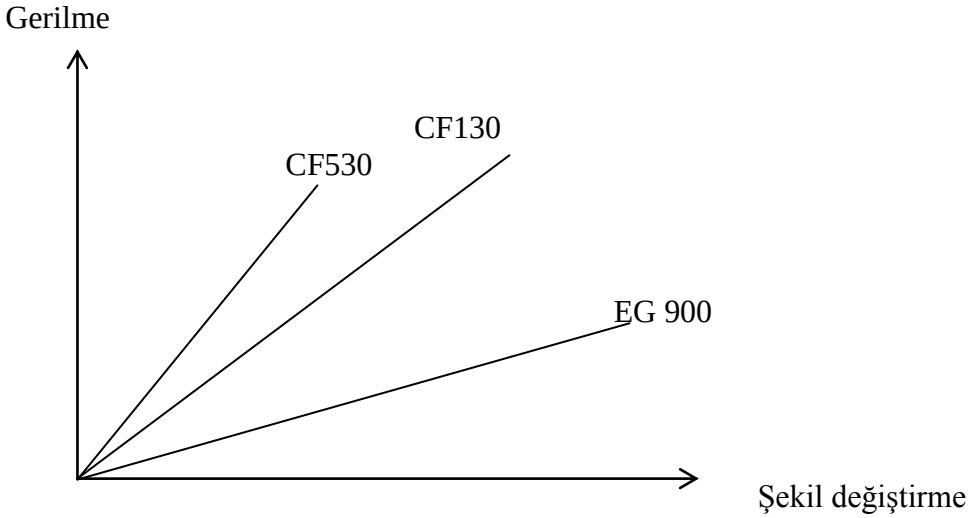
2.2.9 Çevresel etkileri

Karbon, aramid ve cam lifleri toksik etkisi olmayan ve kirlilik açısından tehlikeli sayılmayacak malzemelerdir. Çöp olarak yok edilmek istenirse, yeraltı suyunu veya havayı kirletebilecek herhangi bir madde içermez. Yakıldıkları zaman kompozitteki matris problem yaratabilir. Bundan başka, karbon malzemelerinin yakılmasıyla havaya elektriksel iletkenliği olan çok ince ve küçük parçacıklar yayılabilir [4].

2.3 Liflerin Mühendislik Özellikleri

Kompozit sistemlerin bütün mekanik ve mühendislik özelliklerini lifler etkiler. Tasarım için lifin çekme dayanımı ve çekme modülü dikkate alınır. Bu değerler de

FRP örneklerinin çekme testiyle elde edilir. Nihaî dayanım, kürlenmiş doyurma maddesinin içine emdirilmiş lifin net alanı kullanılarak bulunur. Tasarım mukavemeti ise üç standart sapmalı ortalama nihaî dayanımın azaltılmasıyla elde edilir. Lif takviyeli polimerlerin gerilme / deformasyon eğrisi nihaî gerilmesine ulaşıncaya kadar doğrusal davranır. Sonra da gevrek bir şekilde kopar [7].



Şekil 2.1 Üç tip FRP için gerilme-şekil değiştirme diyagramı [7]

Tablo 2.5 Mbrace lifleri için tasarım değerleri [7]

FRP Tipi	Tasarım Kalınlığı (mm)	Nihai Mukavemet (MPa)	Tasarım Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (MPa)	Tasarım Şekil Değiştirmesi (mm/mm)
CF130 Yüksek mukavemetli Karbon	0,165	4275	3790	228000	0,017
CF530 Yüksek Modüllü Karbon	0,165	4027	3517	372000	0,009
EG 900 E-Cam	0,353	1730	1517	72400	0,021

2.4 Tekstiller (Dokumalar)

Tekstil malzemelerinin özellikleri, kullanılan lif miktarına ve cinsine bağlıdır. Diğer bir özellik ise liflerin dizilimidir. Örülmüş dokumanın iki yönde özellikleri varken, paralel lif dizilimi dokumaya tek yönde özellik kazandırır. Örülmüş dokumalarda, liflerin %70'i boyuna, %30'u enine yönde olmaktadır. Gözönünde bulundurulması gereken bir nokta, dokuma malzemesindeki lif ipliklerinin birbirlerine dolanmasının mukavemeti düşüreceğidir. Malzemenin kalınlığı 0,1 mm kadar ince olabilir. Ayrıca 500 mm veya daha fazla genişlikte olabilmelidir [4].

2.5 Levhalar (Laminatlar)

Tek yönlü levhalar, genelde pultrasyon işlemi ile oluşturulurlar. Devam eden iplikler şeklindeki lifler, emdirilmiş lif demeti halinde dikkatlice kontrol edilerek reçine banyosu içerisinden çekilirler ve gerekli şekli alırlar. Kalıp, reçine kürü oluşumu için ısıtılır. Boyuna yönde, yüksek mukavemet ve sertlik, istenen şekilde sağlanır (%65). Boyuna yöndeki liflerin çoğunda, enine levhalar 1-2 mm kalınlığında ve genelde (değişken olmak üzere) 50-100 mm genişliktedir [4].

2.6 Lif Seçimi

Lif tipi seçilirken gözönünde bulundurulması gereken faktörler yüklemenin tipi (devamlı yükleme, tekerlek yükü vb.), çevre koşulları ve proje maliyetidir.

Karbon lifleri, yüksek mukavemet ve yüksek dayanıma sahiptir ve çevre koşullarından etkilenmezler. Karbon lifler, sünme kopmasına neden olan devamlı yükleme periyodlarından oluşan büyük gerilmelere karşı koyar.

E-cam lifleri malzeme maliyetini düşürür, ancak karbon liflerinden daha az mukavemet ve modüle sahiptir. Ayrıca karbon liflerinin uzun dönem davranışlarındaki üstün niteliğini de gösteremezler. Genelde E-cam lifleri neme ve diğer çevre koşullarına maruz kaldığında ömürleri azalır. Sonunda, E-cam lifleri nihaî gerilmesinin %30'undan daha fazla olan devamlı gerilmelerde sünme etkisiyle koparlar. Çevre koşulları ve sünme etkisine karşı güvenlik sağlamak için tasarım aşamasında süre; C_D ve çevresel dayanım; C_E azaltma katsayıları uygulanır (Tablo 2.6). Bu azaltma katsayıları emniyet gerilmelerini sınırlar [7].

Tablo 2.6 FRP için süre ve çevre katsayıları tablosu [7]

FRP Malzemesi	Süre Katsayısı, C_D	Çevre Katsayısı, C_E
Karbon FRP	1.00	0.65-1.00
Cam FRP	0.30	0.60-1.00

Tablodaki bu katsayılar koruyucu katmanı olmayan FRP çekme numunelerinin uzun dönem dayanıklılık testleriyle elde edilmiştir. Onun için, bu dayanım azaltma katsayılarını kullanan tasarımlar güvenli olacaktır.

Yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve ihmal edilebilir sünme kopması davranışı karbon liflerini hem eğilme hem de kayma dayanımını arttırıcı

uygulamalarda ideal bir malzeme kılmıştır. Çünkü bu tip uygulamalarda kullanılan lifler yüksek mertebelerde devamlı gerilmeleri taşır. E-cam lifleri sünme kopmasını engellemek için büyük dayanım azaltma katsayısı kullanımını gerektirir. Birçok onarım işinde bu sonuçlar malzemenin etkinliğini ve proje maliyetini kötü etkiler. Sert çevre koşullarına maruz yerlerde karbon lifi tercih edilmelidir.

Farklı özelliklerde olan birkaç çeşit karbon lifi mevcuttur. Bir beton elemanının davranışı (ilâve yük taşıma kapasitesinin arttırılması, kayma dayanımı arttırılması, vb.) geliştirilmek istendiğinde daha yüksek mukavemetli ve kırılmadaki uzaması daha fazla olan karbon lifi seçilmelidir. Kullanılabilirliğin (sehim, emniyet gerilmeleri vb.) önemli olduğu uygulamalarda ise daha yüksek elastisite modülüne sahip karbon lifi seçimi doğru olur.

E-cam lifleri, devamlı gerilme sonucu oluşacak sünme kopması kusurunu göstermeyecek deprem, patlama vb. gibi ani yükleme koşulları için idealdir. Bu gibi durumlar için düşük maliyetli olan cam lifi en uygun çözümü sunar. Sert çevre koşullarına karşı malzemeyi koruyucu bir kaplama kullanımı kompozitin kullanım ömrünü arttıracaktır [7].

3. YAPIŞTIRICILAR

Yapıştırıcı, malzemeleri yüzey ekleriyle beraber tutma yeteneğine sahip bir malzemedir [8]. Temel olarak yapıştırıcının amacı; yapışkan katmanın kalınlığı boyunca kayma gerilmesinin aktarımı sayesinde geliştirilen bütün kompozit davranışı garanti altına alarak, FRP ve beton arasındaki aderansın devamlılığını gerçekleştirebilmektir [7]. PVA, PVC, Poliamid, Amino plastik ve epoksi başta olmak üzere çok çeşitli yapıştırıcılar bulunmaktadır. Bunların içinde en çok kullanılan yapıştırıcı türlerinden olan epoksi yapıştırıcıları temel olarak bünyesinde epoksi reçinesi ve katılaştırıcı malzeme bulundururlar. Bu reçineler termoset[1] reçinelerinden gelmektedir [9].

Yapıştırıcıların özellikleri;

- İnce tabakalara ya da diğer malzemelere etkin şekilde nüfûz edebilme özelliğine sahiptirler.
- Yapıştırılmış bileşenlerin yorulma direncinde artışa neden olan, birleşimdeki gelişmiş bir gerilme dağılımı sağlar.
- Tasarım esnekliği sunar.
- Uygun ve maliyet açısından etkili bir tekniktir [8].

Epoksi reçineleri, inşaat mühendisliğinde yapıştırıcı katkı maddesi olarak kullanılan diğer malzemelerden daha avantajlıdırlar. Epoksi reçineleri içine pek çok dolgu maddesi katılır. Bunlar viskoziteyi değiştirmek, termik genleşme katsayısını düşürmek, elektriksel iletkenliği sağlamak, tiksotropi kazandırmak, sertliği arttırmak gibi amaçlar taşırlar. Aliminyum, bakır, demir, gümüş, Al_2O_3, çelik, kolloidal silis, kalker unu, alçı, mika, aspest, grafit gibi maddeler dolgu malzemesi olarak kullanılabilirler. Özelliklerinden bahsetmek gerekirse;

---

[1] Termosetler: Termosetler ve termo plastikler olmak üzere iki polimer grubu vardır. Termosetler sıcakta sertleşerek sert ve dayanıklı hale geçerler. Yüksek sıcaklıklardan zarar görürler, ancak yumuşamazlar ve plastikleşmezler.

- Yüksek yüzey aktivitesine ve alt tabakaların çeşitliliği için iyi ıslanma özelliğine sahiptir.
- Yeterli bir uygulama süresi sağlar.
- Poliesterler, akrilikler ve vinil tiplerine kıyasla daha düşük büzülme özelliklerine sahiptir.
- Beton ve tuğlaya kıyasla yangına oldukça az dirençlidir [10].
- 80°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanımı önemli ölçüde azalır [10].
- Yüksek basınç, çekme ve eğilme dayanımına sahiptir.
- Uzun süreli yükleme altında düşük sünme ve yüksek mukavemet özelliği gösterir.
- Düşey yüzeylere uygulamada kendini tutabilir, yani akmaz (Tiksotropiktir).
- Kimyasalların büyük bir kısmına dirençlidir.
- Dayanıklıkları 20 yılın üzerindedir. Epoksilere alternatif olarak gösterilen yapıştırıcıların çeşitli sakıncaları aşağıda sıralanmıştır:
- Polyester yapıştırıcılar yüksek büzülme ve termal genleşme katsayısına sahiptirler, alkalik hidrolize maruz kalabilirler ve katılaştıklarında yapışma ve bağlanmada zorluk çıkarırlar.
- Vinil ester yapıştırıcıları büzülmeye maruz kalırlar ve yapışma nemli tarafından çok kötü etkiye maruz kalır.
- Poliüretan yapıştırıcılar ise yüksek büzülmeye sahiptirler, nemden olumsuz yönde etkilenirler ve yapışmaları zordur [4].

Yapılan uygulamada hangi yapıştırıcı kullanılırsa kullanılsın dikkat edilmesi gereken belli hususlar vardır. Örneğin yapıştırıcı uygulama sırasında maksimum sıcaklık olan 50ºC'a dayanmalıdır ve genellikle camlaşma sıcaklığı (T_g)[2] 50ºC ile 65ºC arasında olmalıdır. FRP ile yapılan yapıştırma işlemlerinde bazı özel durumlar olabilir ve yapıştırıcı daha fazla sıcaklığa maruz kalmak zorunda kalabilir. O durumda daha yüksek camlaşma sıcaklığına sahip epoksi seçilmelidir ve yapıştırıcıyı sağlayan firmaların tavsiyeleri mutlaka dikkate alınmalıdır. Yapıştırıcının kullanılacağı beton yüzey genellikle kuru olmalıdır. Eğer bu sağlanamıyorsa yapıştırıcı içerisine özel maddeler katılarak, ıslak yüzeyde kullanımı üretici firmalar tarafından sağlanmalıdır [4].

[2] Camlaşma sıcaklığı (T_g): Polimerik bir yapıştırıcının nispeten rijit ve gevrek bir malzemeden viskoz bir malzemeye değişimini sağlayan sıcaklık oranlarının yaklaşık orta noktasıdır.

Epoksi reçine yapıştırıcıların kullanımlarında dikkatli olunmalıdır. İki parça reçine karıştırılmak üzere iki ayrı kapta bulunurlar. Sertleştiriciyi reçine kabına eklemek ve düşük hızlı mekanik karıştırıcıyla karıştırmak önemlidir. Yüksek hızlı karıştırıcılar, hava eklerler ve etkisini azaltırlar. Reçine ve sertleştirici, farklı renklerde olmalı, ve tek bir renk çıkarıncaya kadar karıştırılmalıdır. Kimyasal reaksiyonun hızı, ısıya göre artar.

Tasarım varsayımlarından biri, beton alt yüzeyi ile kompozit arasındaki yapışmanın mükemmel olduğudur. Yapışma mesafesi boyunca bütün malzemelerin betondan daha güçlü ve elastiki olması gerekir. Bu sebepten, içinde lif bulunmayan reçinelerin çekme, basınç ve eğilmedeki özellikleri bilinmelidir.

Bu özellikleri elde etmek için yapılan testlerde lifsiz (yalın) reçineler karıştırılır, levhaların içine dökülür ve kürlenmeye bırakılır. Kür işlemi bittikten sonra (7 gün boyunca 20°C'da %40 nemde tutulur) numuneler levhadan alınır ve belli özelliklerinin tayini için test edilir.

Tablo 3.1 Çekme etkisi altında reçine özellikleri [7]

Özellik	**Birim**	**Astar**	**Macun**	**Doyurma Reçinesi**
Maksimum Gerilme	MPa	17,2	15,2	55,2
Akma Gerilmesi	MPa	14,5	13,1	53,8
Kopma Gerilmesi	MPa	17,2	14,5	54,5
Maksimum Gerilmedeki Uzama	mm/mm	0,4	0,06	0,03
Akma Uzaması	mm/mm	0,04	0,02	0,025
Kopma Uzaması	mm/mm	0,4	0,07	0,035
Elastisite Modülü	MPa	715	1790	3035
Poisson Oranı		0,48	0,48	0,4

Tablo 3.2 Eğilme etkisi altında reçine özellikleri [7]

Özellik	**Birim**	**Astar**	**Macun**	**Doyurma Reçinesi**
Maksimum Gerilme	MPa	24,1	27,6	138
Akma Gerilmesi	MPa	24,1	26,2	138
Kopma Gerilmesi	MPa	Kırılmadan büyük deformasyon	25,5	124
Maksimum Gerilmedeki Uzama	mm/mm	0,06	0,06	0,042
Akma Uzaması	mm/mm	0,05	0,04	0,038
Kopma Uzaması	mm/mm	Kırılmadan büyük deformasyon	0,07	0,050
Elastisite Modülü	MPa	595	895	3724

Reçinelerin viskoelastik davranışından dolayı test süresince sıcaklık ve deformasyon oranı malzemeyi oluşturan asıl maddelerin rijitlik ve dayanımını etkileyen önemli parametrelerdir [7].

Tablo 3.3 Basınç etkisi altında reçine özellikleri [7]

Özellik	**Birim**	**Astar**	**Macun**	**Doyurma Reçinesi**
Maksimum Gerilme	MPa	28,3	22,8	86,2
Akma Gerilmesi	MPa	26,2	22,8	86,2
Maksimum Gerilmedeki Kısalma	mm/mm	0,1	0,1	0,05
Akma Gerilmesindeki Kısalma	mm/mm	0,04	0,05	0,050
Basınç Modülü	MPa	670	1075	2620

Not: Değerler 20°C'da ve % 40 relatif nemde belirlenmiştir.

4. FRP'NİN YAPIM AŞAMASI

4.1 Vakum Çantası / Sterilizatör Kalıbı

Reçine emdirilmiş lif donatısının katmanları bir kalıba uygulanır ve döndürülür. Bir kauçuk veya naylon tabaka uygulamanın üzerine yerleştirilir ve bir vakum pompası aracılığıyla hava boşaltılır. Kalıp, 80-200°C arasında sıcaklık uygulanan bir kazana veya hem sıcaklık hem de basınç (7 bar) uygulanan bir sterilizatörün içine yerleştirilir. Önceden emdirilmeye alternatif olarak, sonradan kalıpta reçine ile emdirilmiş kuru donatı kullanılabilir. Katalizör gibi bir hızlandırıcı içeren reçine karışımı bu yöntemde kullanılabilir. Isı kaynağı mevcut değilse bu kullanışlı bir seçenektir. İşlem yavaş ve zahmetlidir ama mükemmel özellikte FRP'ler üretir [6].

4.2 Pultrasyon

Lif katmanlarının çekilmesiyle kompozit profillerinin üretimine izin veren devamlı bir işlemdir. Donatı, reçine eklenen bir makineden geçirilerek çekilir. Islanmış lif daha sonra üretilecek kesitin şeklinde ısıtılmış bir çelik kalıpdan geçerek çekilir. Kalıp, reçinenin reaksiyona girmesi, jelleşmesi ve kürü için yaklaşık 150°C'ye kadar ısıtılır. Profil kalıptan çıktığı zaman kürünün büyük bir çoğunluğunu başarmış olur. Profil ya birbirinin yerine gecen çekicilerle ya da bir kolu geriye atan tırtıl ile çekilir ve sonra otomatik olarak boyuna testere ile kesilir. Reçine sistemler mevcut zaman içinde kürünü gerçekleştirmesi için yüksek derecede tepkisel olmalıdır. Makine hızı, kalıp sıcaklığı ve reçinenin reaksiyona girme kabiliyeti birbirini etkileyen ve dengede olması gereken parametrelerdir [6].

4.3 FRP Tiplerinin Karşılaştırması

Karbon lifleri nem, çözücü, baz ve zayıf asitlere karşı daha iyi direnç gösterir. Karbon liflerinden üretilen kompozitler çelikten daha dayanıklı ve hafif, cam veya aramid kompozitlerinden de daha rijittir. Örneğin, cam lifinden üretilmiş bir laminat aynı hacimsel lif içeriğinde aynı çekme rijitliğini sağlayabilmesi için karbon FRP

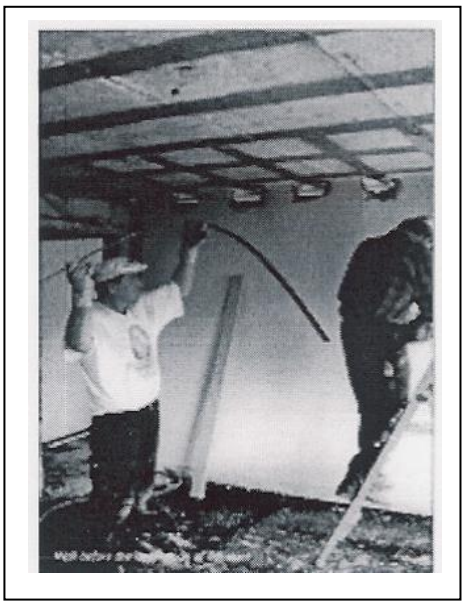
(CFRP) laminatından üç kat daha kalın olmalıdır. CFRP mükemmel yorulma dayanımına ve lif doğrultusunda çok düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir. Kalite kontrolü tahribatsız deneylerle (örneğin sahada kızılötesi inceleme yapılarak) kolayca yapılabilirken bunu çelikde yapmak mümkün değildir [6].

Tablo 4.1 Hacimsel lif içeriği %65 olan tek yönlü yönlendirilmiş liflerin karşılaştırılması [6]

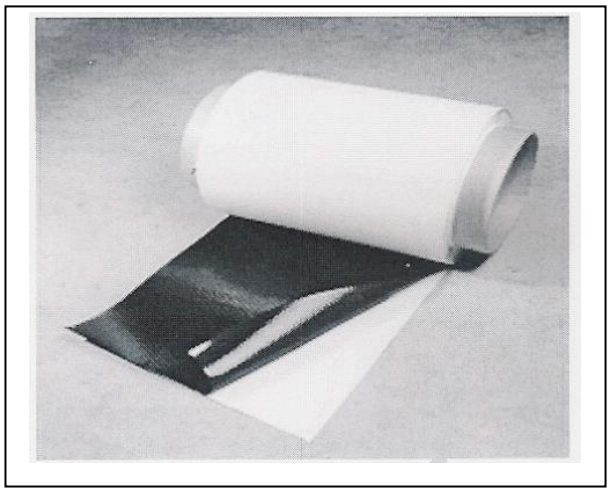
Karakteristik	**Karbon**	**Aramid**	**Cam**
Çekme dayanımı	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Basınç dayanımı	Çok iyi	Yetersiz	İyi
Rijitlik	Çok iyi	İyi	Uygun
Uzun dönem davranışı	Çok iyi	İyi	Uygun
Yorulma davranışı	Mükemmel	İyi	Uygun
Kütle yoğunluğu	İyi	Mükemmel	Uygun
Alkali direnci	Çok iyi	İyi	Yetersiz
Maliyet	İyi	Uygun	Çok iyi

Tablo 4.2 Mbrace FRP laminat özellikleri [7]

Laminat Tipi	**Mbrace Laminat LM**	**Mbrace Laminat HM**
Karakteristik Elastisite Modülü, E_{tk} (MPa)	150000	200000
Nihai çekme uzaması, ε_u (%)	1.4	1.1
Karakteristik çekme dayanımı, f_{tk} (MPa)	>2200	>2200
Tasarım çekme dayanımı, f_d (MPa)	1100	1100
Kalınlık, s (mm)	1.4	1.4
Genişlik, w (cm)	10	10



Şekil 4.1 Mbrace FRP tekstil resmi [7]



Şekil 4.2 Mbrace FRP laminat resmi [7]

Tablo 4.3 Mbrace FRP tekstil özellikleri [7]

Lif	**C1-30**	**C5-30**	**C8-30**	**G-60AR**	**EG-60**
Lif Tipi	Yüksek dayanımlı karbon lifler	Yüksek modüllü karbon lifler	Çok Yüksek modüllü karbon lifler	Alkali Dayanımlı cam lifler	E-Cam Lifleri
Tekstilin Şekli	Tek yönlü	Tek yönlü	Tek yönlü	Tek yönlü	Tek yönlü
Rulolar: genişlik(m),uzunluk (m),alan (m^2)	0,5/100/50	0,5/100/50	0,5/100/50	0,5/100/50	0,5/100/50
Yüzey yoğunluğu, D(kg/ m^2)	0.300	0.300	0.300	0.600	0.600
Yoğunluk, ρ(kg/ m^3)	1820	1820	2100	2600	2600
Kuru tekstil liflerin eşdeğer kalınlığı, t(mm)	0.165	0.165	0.143	0.230	0.230
Birim genişlik için alan Aeff(mm^2/cm^{-1})	1.65	1.65	1.43	2.3	2.3
Karakteristik Elastisite Modülü, E_{tk}(MPa)	230000	390000	640000	65000	65000
Nihai çekme uzaması, ε_u(%)	1.5	0.8	0.3	2.8	2.8
Karakteristik çekme dayanımı, f_{tk}(MPa)	3430	3000	1900	1700	1700
Birim genişlik için Karakteristik çekme dayanımı, f_{tkl}(N/ mm)	565	495	270	390	390
Tasarım çekme dayanımı, f_d(MPa)	1750	1500	1000	600	600
Termal genleşme katsayısı, α(K^{-1})	-10-7	-10-7	-10-7	5.10-6	5.10-6
Termal İletkenlik (J m^{-1} s^{-1} K^{-1})	17	17	17	Yalıtkan	Yalıtkan
Elektrik direnci(Ω m)	1,6 10-5 Iletken	1,6 10-5 Iletken	1,6 10-5 Iletken	- Yalıtkan	- Yalıtkan

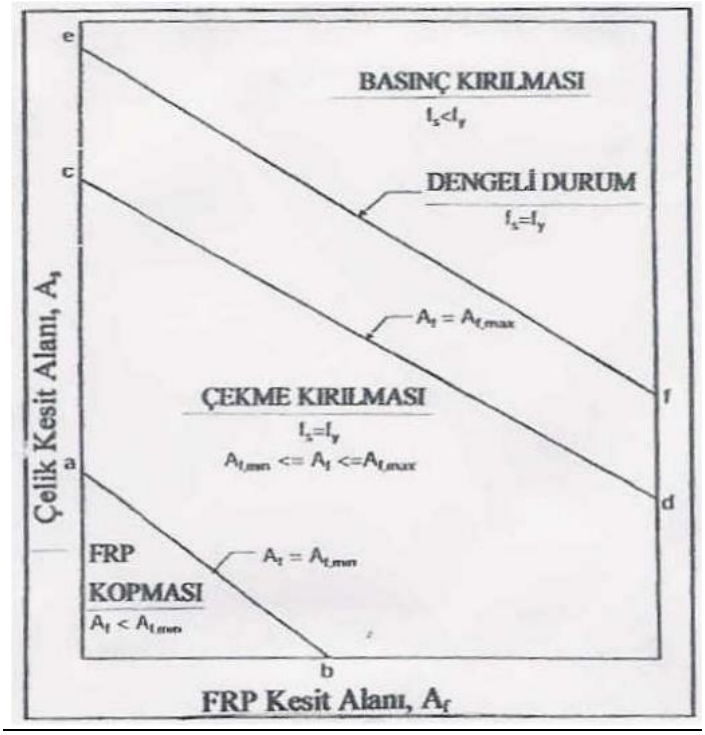
5. LİF TAKVİYELİ POLİMERLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

5.1 Göçme Modu Tipleri

Grace ve arkadaşları [11], Triantafillou ve Plevris [12], Büyüköztürk ve Hearing [13] gibi birçok araştırmacı göçme modları ve göçme mekanizmaları ile ilgili birçok araştırmaya imza atmışlardır. FRP malzemeleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişler üzerinde farklı göçme modları olduğunu bildirmişlerdir.

5.1.1 Çekme kırılması

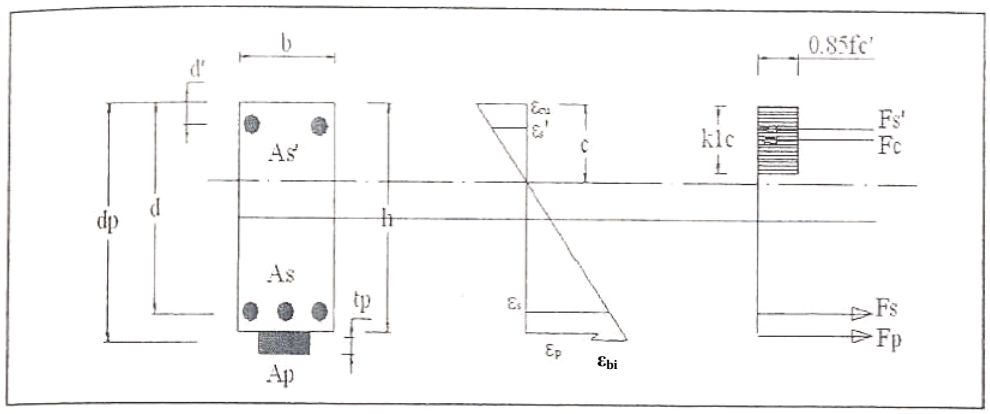
En çok arzu edilen bu kırılma moduna göre, kritik kesitin göçmesi, betonun ezilmesini takiben çekme donatısının akması şeklinde gerçekleşir [14]. Çekme kırılması mekanizması tercih edilir çünkü bu sünek bir kırılmadır. Eğer FRP kesit alanı minimum FRP alanından, $A_{f\ min}$, daha az ise FRP kopması kırılma moduna egemen olur (Şekil 5.1) [15].



Şekil 5.1 A_s ve A_f'ye bağlı olarak göçme modlarının sınıflandırılması [15]

FRP levha yeteri kadar ince ve kesitin çekme donatısı alanı oranı küçük olduğu zaman bu kırılma mekanizması görülür [12].

Aşağıdaki formülasyon çekme kırılması mekanizması için geçerlidir. Değişkenler Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Kesiti etkileyen değişkenler ve iç kuvvetler [14]

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cu} * \frac{d_p - c}{c} - \varepsilon_{bi} \tag{5.1}$$

$$M_u = A_s * f_y * (d - \frac{k_1 * c}{2}) + A_p * E_p * \varepsilon_p * (d_p - \frac{k_1 * c}{2}) + A'_s * E_s * \varepsilon'_s * (\frac{k_1 * c}{2} - d') \tag{5.2}$$

Yukarıdaki denklemin geçerli olması için şu varsayımların kontrolü gerekir:

- Çekme donatısı akmıştır.

$$\varepsilon_s \geq f_y / E_s \tag{5.3}$$

- FRP levhasının şekil değiştirmesi nihai şekil değiştirmeden daha azdır.

$$\varepsilon_p \leq \varepsilon_{pu} \tag{5.4}$$

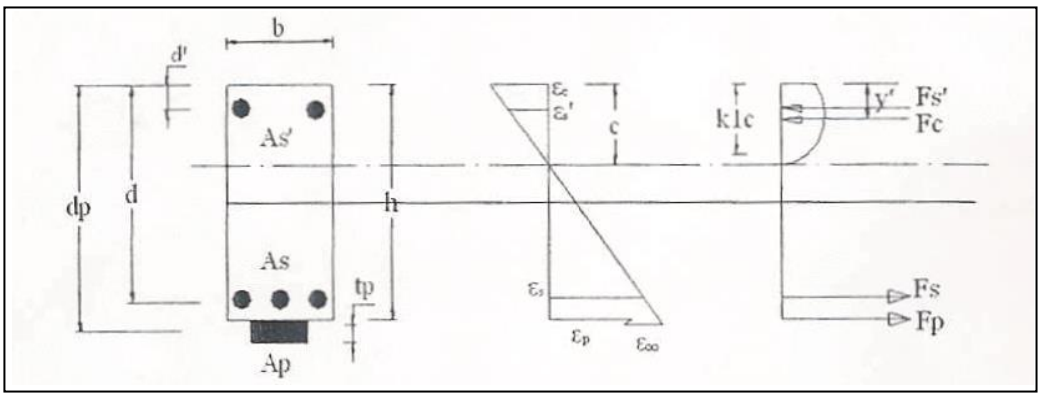
- Yukarıdaki denklemler için basınç donatısının akmadığı kabul edilmiştir [14].

$$\varepsilon'_s \leq f_y / E_s \tag{5.5}$$

Bu kontroller yapıldıktan sonra şekil değiştirme uyumluğundan yararlanarak bilinmeyen şekil değiştirmeler bulunur ve kesitin taşıyabileceği moment kapasitesi hesaplanır.

5.1.2 FRP kopması

FRP laminatın kopmasını takiben çekme donatısının akmasından dolayı eğilme mukavemetine ulaşıldığında, FRP kopma mekanizması oluşur. Bu kırılma modu için, çekme donatısı ve FRP alan kesri oldukça küçüktür [12]. Kesite etkiyen kuvvetler Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



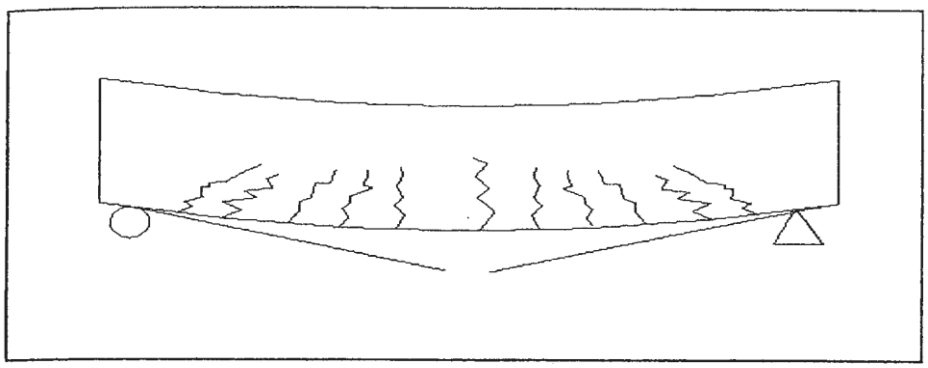
Şekil 5.3 Kesite etkiyen kuvvetler [14]

FRP kopma modu için, şekil değiştirmeler ve taşıma gücü moment kapasitesi aşağıda özetlenmiştir. Taşıma gücü momenti bütün iç kuvvetlerin toplamı olarak bulunmuştur. FRP kopma göçmesi mekanizması Şekil 5.4'de görülmektedir.

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_c * \frac{(c - d')}{c} \tag{5.6}$$

$$M_u = A_s * f_y *(d - y') + A_p * E_p * \varepsilon_{pu} * (d_p - y') + A'_s * E_s * \varepsilon'_s * (y' - d') \tag{5.7}$$

Yukarıdaki moment hesabı basınç donatısının akmadığı varsayımıyla uygulanabilir. Eğer basınç donatısı akmış ise, basınç donatısının akma mukavemeti, f_y, moment denkleminde $E_s * \varepsilon'_s$'in yerinde kullanılır [14].



Şekil 5.4 FRP kopma göçmesi mekanizması [13]

5.1.3 Basınç kırılması

Kesitteki çekme donatısı alanı oranının ve/veya FRP alanı oranının oldukça fazla olması durumunda, çekme donatısı akmadan ve kompozit laminatlar kopmadan önce beton maksimum kapasitesine ulaşacaktır. Bu kırılma tipinde betonun basınç liflerindeki en fazla kısalma 0.003 olur [12]. Basınç kırılması mekanizmasından sakınmak için, kullanılacak FRP laminatının kesit alanı, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi maksimum FRP kesit alanını, $A_{f\,max}$, aşmamalıdır [15].

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} * \frac{(c - d')}{c} \tag{5.8}$$

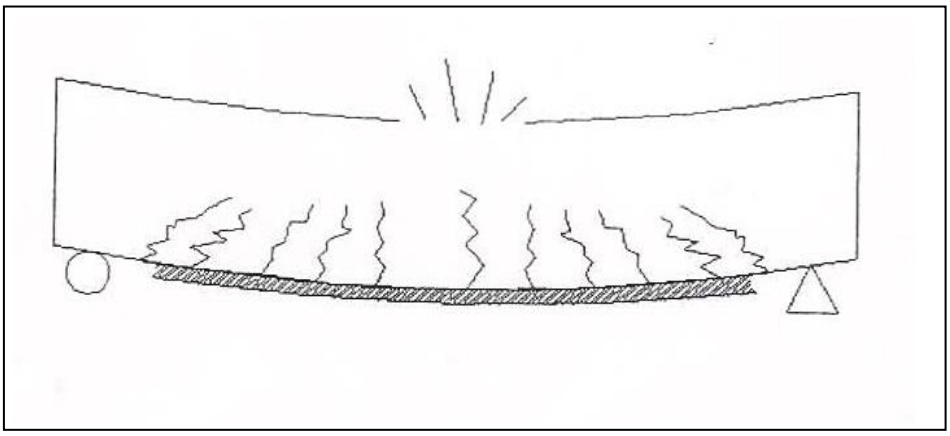
$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} * \frac{(d - c)}{c} \leq \varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \tag{5.9}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cu} * \frac{(d_p - c)}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{pu} \tag{5.10}$$

$$M_u = A_s E_s \varepsilon_s (d - \frac{k_1 * c}{2}) + A_p E_p \varepsilon_p (d_p - \frac{k_1 * c}{2}) + A'_s E_s \varepsilon'_s (\frac{k_1 * c}{2} - d') \tag{5.11}$$

Yukarıdaki denklem basınç donatısının akmadığı koşuluyla geçerlidir. Aksi takdirde, basınç donatısının akma mukavemeti, f_y, moment denkleminde $E_s * \varepsilon_s$' 'in yerinde kullanılmalıdır.

Basınç kırılmasının şematik resmi Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Basınç kırılmasının şematik resmi [13]

5.1.4 Yerel kırılmalar

FRP-beton arayüzeyi boyunca oluşan çatlak yayılımının bir sonucu olarak kompozit laminat ile beton yüzeyinin arasındaki yapışma ani olarak bozulabilir [12].
Böyle bir çatlağın oluşumunun muhtemel nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Yapıştırıcının yayılımındaki kusurlar.
- Eğilme çatlaklarının ortasından gelişen yatay arayüzey çatlaklarına neden olan betondaki eğilme çatlakları.
- Beton çekme yüzünün tamamen düzgün olmadığı zaman kompozit laminatın sıyrılması.
- Yorulma yükleri.

Beton kirişteki kesim noktasında bulunan kayma ve normal gerilmeler betonda habersiz yerel göçmelere veya levhanın ayrımına neden olabilir. Bir başka deyişle, kesim noktasındaki veya eğilme çatlaklarının çevresindeki kayma ve normal gerilme konsantrasyonları yerel göçmelerin asıl nedenidir [4].

5.1.4.1 Kesme kırılması

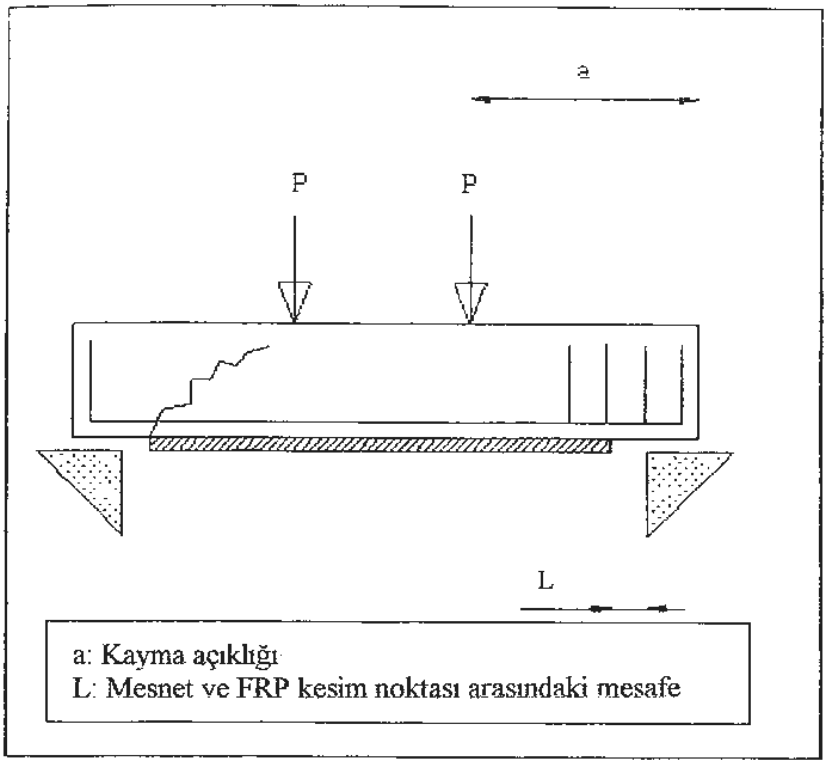
Güçlendirilmiş kesitlerin kesme kırılmasının, kesitin yük seviyesinin eğilme mukavemetine ulaşmadan kesme kapasitesini aştığında oluştuğu görülmüştür [13].

Bu kırılma modunun ana karakteristiği boyuna donatının hemen altından beton katmandan geçerek çatlamasıdır. Ancak etriyesiz betonarme yapılar için çatlak diyagonal bir şekilde ilerleyebilir. Kesme kırılmasının şematik olarak Şekil 5.6'da gösterilmiştir [14].

FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme kapasitesi,V_{up}, ACI 318-95'de [16] ve Ziraba ve arkadaşlarının [17], geleneksel betonarme kayma teorisini esas alan çalışmasında çıkarılmıştır. Bu yöntem FRP tekstilinin veya şeridinin sarımı gibi yeni kesme donatısı onarım tekniklerini göz önüne almaz [13]. (C_{R1} ve C_{R2} deneysel katsayılardır).

$$V_{up} = (V_c + k * V_s) \tag{5.12}$$

$$V_c = \frac{1}{6} * (\sqrt{f'_c} + 100*\rho_s) * b * d \tag{5.13}$$



Şekil 5.6 Kesme kırılması mekanizması [14]

$$V_s = \frac{A_w * f_{wy} * d}{s} \tag{5.14}$$

$$k = 2.4e^{\left(-0.08 C_{R1} C_{R2} 10^6\right)} \tag{5.15}$$

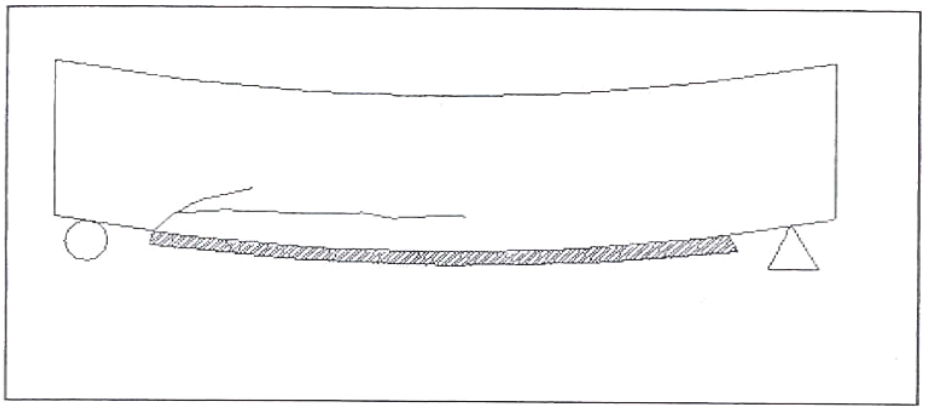
5.1.4.2 Ankraj kırılması

FRP levha ucunda başlayan kayma gerilmesi kırılması kirişte kesme kırılmasına veya eğilme donatısındaki bir beton katmanın ayrılmasına sebep olabilir. Bu tip karmaşık kırılma mekanizmaları üzerine Kaiser ve Arduini gibi birçok araştırmacı çalışmalar yapmıştır [13].

Ankraj kırılma mekanizması oldukça yaygındır ve uçlardaki beton-FRP arayüzeyindeki aşırı kayma gerilmelerinden dolayı ortaya çıkar. Betonun üzeri şeritler veya levhalarla sarılarak FRP uçlarının ankrajlanması bu kırılma tipine engel olabilir [14]. Ankraj kırılmasının şematik diyagramı Şekil 5.7 de görülmektedir [13]. Levha kısalma bölgesindeki kayma ve normal gerilmeler aşağıda verilmiştir.

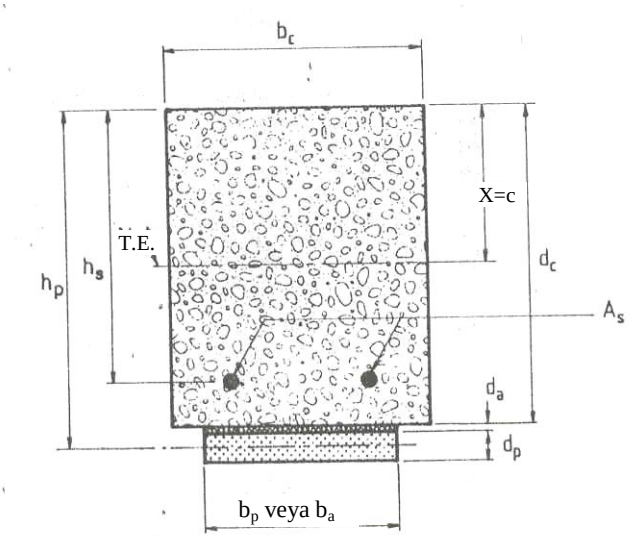
$$\tau = \left\{ V + \left[\frac{k_s}{E_p * b_p * d_p} \right]^{1/2} * M \right\} * \frac{b_p * d_p}{I * b_a} * (h_p - c) \tag{5.16}$$

$$\sigma = \tau * d_p * \left[\frac{k_n}{4 * E_p * I_p} \right]^{\frac{1}{4}} \qquad (5.17)$$



Şekil 5.7 Ankraj kırılması mekanizması [13]

5.1.4.2.a Levha sıyrılma yükünün hesabı



Şekil 5.8 Levhalanmış kiriş kesiti [18]

Verilenler: Malzeme özellikleri ve kesit ölçüleri

d_c= 150 mm	b_c= 150 mm	E_c= 27 000 MPa
d_p= 3 mm	b_p= 100 mm	E_p= 14 900 MPa
A_s= 157 mm^2	h_s= 113 mm	E_s= 200 000 MPa
d_a= 1 mm	b_a= 100 mm	h_p= 152.5 mm

$$\tau = \left\{ V + \left[\frac{k_s}{E_p b_p d_p} \right]^{\frac{1}{2}} M \right\} \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - X) \tag{5.16}$$

$$\sigma = \tau d_p \left[\frac{k_n}{4 E_p I_p} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{5.17}$$

Varsayımlar :

- ✓ Malzeme lineer bir davranış gösterir.
- ✓ Betonun çekmeye katkısı yoktur.
- ✓ Çatlamış kesitin, tarafsız eksen uzaklığı, X, ve atalet momenti, I, gibi özelliklerini hesaplarken yapıştırıcı katmanın kalınlığı ihmal edilir.
- ✓ Yapıştırıcının Young modülü, E_a, ve kayma modülü, G_a, deneysel test sonuçlarına dayanılarak sırasıyla 300 MPa ve 120 MPa olarak alınmıştır.

İstenen : Levha sıyrılma yükünün tayini

Çözüm : Mesnetten $(d_p+d_c)/2$ mesafesinde levha kısalmasındaki kesme kuvveti ve moment değerleri aşağıdaki ifadelerle bulunur.

$$V = \frac{P}{2} \tag{5.18}$$

$$M = \frac{P}{2} \left(\frac{d_p + d_c}{2} \right) \tag{5.19}$$

(5.18) ve (5.19), (5.16) formülünde yerlerine konursa;

$$\tau = \left[\frac{P}{2} + \left(\frac{k_s}{E_p b_p d_p} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{d_p + d_c}{2} \right) \right] \frac{b_p d_p}{I b_a} \left(h_p - X \right) \tag{5.20}$$

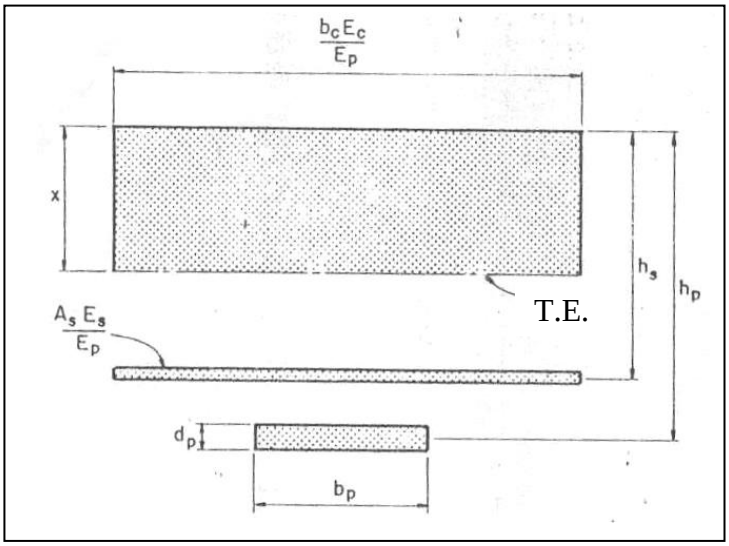
formülü elde edilir. Bu formülden P, bulunması istenen bilinmeyen olduğuna göre

$$P = \frac{2\tau}{\left[1 + \left(\frac{d_p + d_c}{2} \right) \left(\frac{k_s}{E_p b_p d_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \frac{d_p b_p}{I b_a} \left(h_p - X \right)} \tag{5.21}$$

şeklinde yazılabilir.

Burada k_s; birim boydaki yapıştırıcının kayma rijitliğini göstermektedir ve aşağıdaki formülle hesaplanır. G_a; yapıştırıcının kayma modülünü ifade eder.

$$k_s = G_a \frac{b_a}{d_a} \tag{5.22}$$



Şekil 5.9 Beton ve çeliğin alanlarının eşdeğer FRP'ye dönüşümü

Tarafsız eksene göre statik moment alınıp, X çözülürse

$$X = \frac{-B + \left(B^2 + 4AC\right)^{\frac{1}{2}}}{2A} \tag{5.23}$$

elde edilir. Burada;

$$A = \frac{E_c b_c}{2E_f} \tag{5.24}$$

$$B = \frac{E_s}{E_f} A_s + b_f d_f \tag{5.25}$$

$$C = h_s A_s \frac{E_s}{E_f} + h_f d_f b_f \tag{5.26}$$

ifade eder.

Eşdeğer GFRP kesitinin atalet momenti şu şekilde hesaplanır.

$$I = \frac{E_c b_c X^3}{12E_p} + \frac{E_c}{E_p} X b_c \left(\frac{X}{2}\right)^2 + \frac{A_s E_s}{E_p}(h_s - X)^2 + b_p d_p (h_p - X)^2 \quad (5.27)$$

(5.22) denkleminden k_s = 12000 MPa/mm, (5.23) denkleminden X = 37.7 mm ve (5.27) denkleminden I = 1.59×10^7 mm^4 olarak bulunur. Sonra levha ayırımına neden olan yük (5.21) denkleminden yapıştırıcının kayma dayanımı τ = 3.5 MPa alınarak, P = 65 kN olarak hesaplanır.

$$K_n = E_a \frac{b_a}{d_a} = 30000 MPa/mm \quad (5.28)$$

Levhanın atalet momenti

$$I_f = \frac{b_f d_f^3}{12} = 225 mm^4 \quad (5.29)$$

Böylece, P = 65 kN yük seviyesindeki sıyrılma gerilmesi, σ, (5.17) formülünden σ = 2.28 MPa olarak hesaplanabilir.

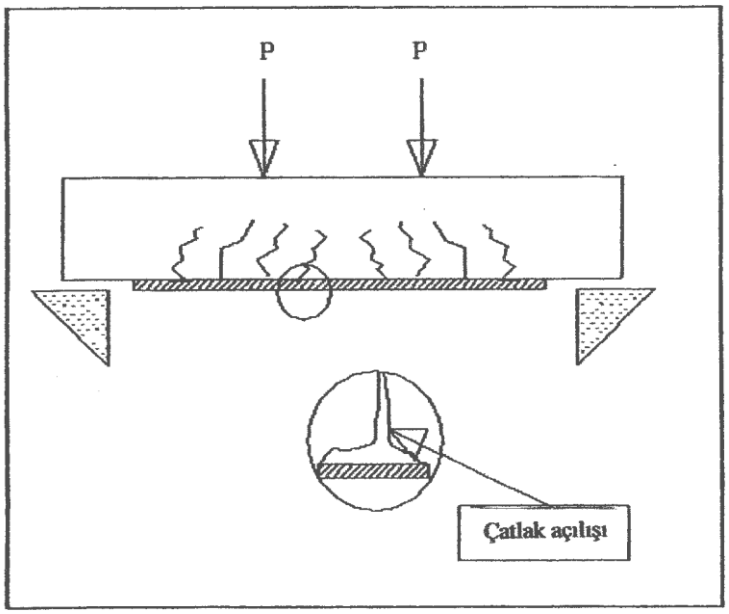
5.1.4.3 FRP sıyrılma göçmesi

Betondan FRP levhasının sıyrılması betondaki mevcut çatlaklardan veya levhanın ucundan başlayabilir [13]. Ayrıca, beton yüzeyin pürüzlülüğü sıyrılmaya neden olan yerelleşmiş gevşekliğe sebep olabilir. Şekil 5.10 - 5.11 ve 5.12 bu göçme modunun şematik diyagramlarını göstermektedir [14].

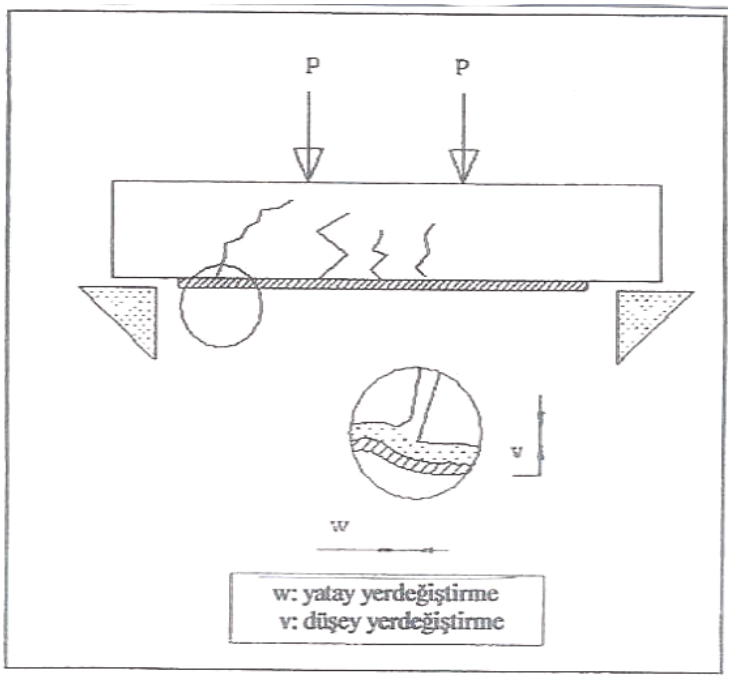
Esas olarak mil etkisi ve agregaların kenetlenme mekanizmalarından dolayı oluşan betondaki kesme çatlakları, Şekil 5.13'de gösterildiği gibi hem yatay hem de düşey açıklıklarla ilgilidir.

Varsayıma göre, çatlak yerinde bulunan çekme donatısındaki ve FRP'deki dübel şekil değiştirmeleri kaymadan dolayı olur ve FRP' nin sıyrılması v/w oranının $(v/w)_{cr}$'e ulaştığı zaman ortaya çıkacaktır. Üstelik, kesme kuvveti harici yük, P, ile orantılıdır. Böylece, gevşeme yükü toplam kayma rijitliğinin, (ΣGA), lineer bir fonksiyonu olarak bulunur [12].

$$P = \lambda * \sum (G * A) \quad (5.30)$$



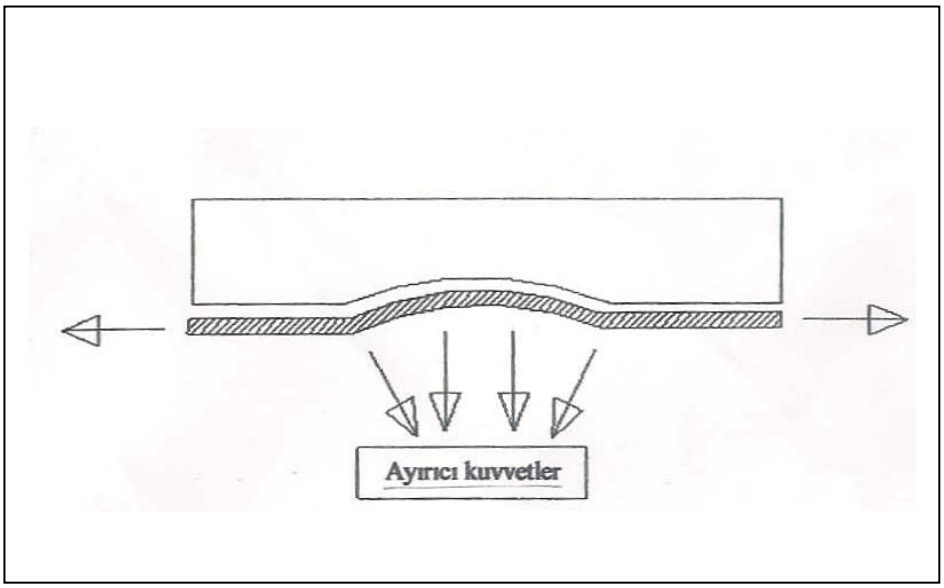
Şekil 5.10 Eğilme çatlaklarında FRP sıyrılması [14]



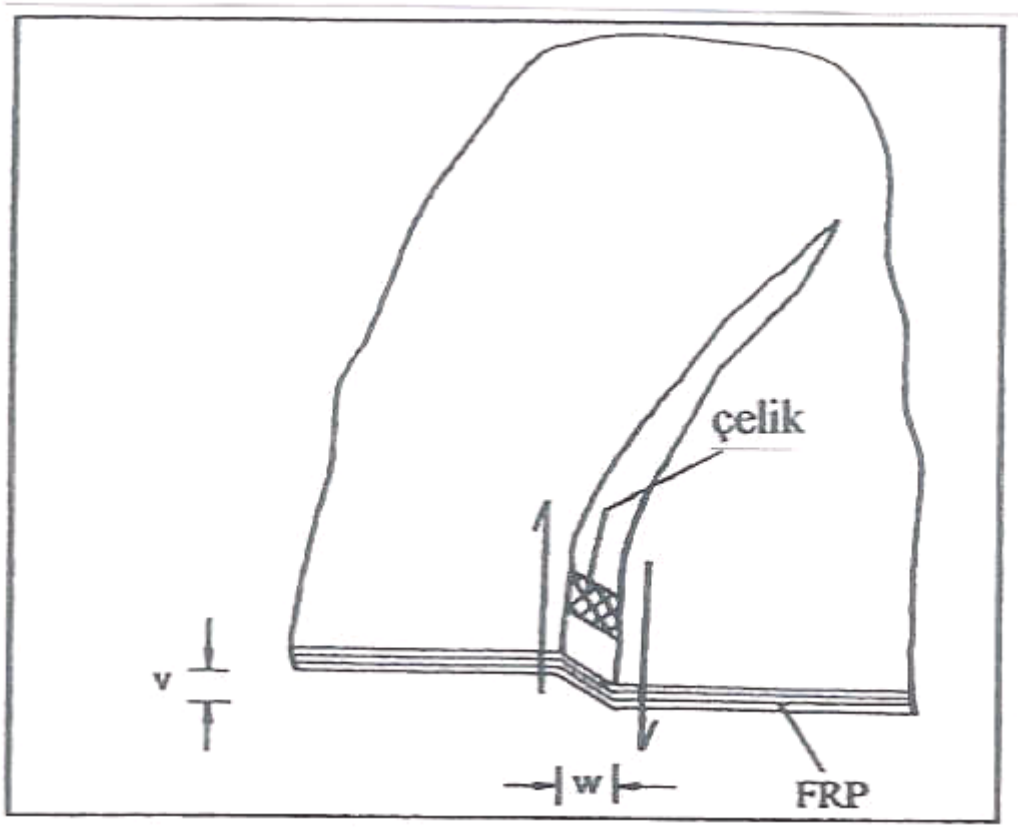
Şekil 5.11 Diyagonal çatlaklarda FRP sıyrılması [14]

Yerel kırılmaları önlemek için alınabilecek bazı önlemler aşağıda sıralanmıştır:

- Özel mekanik ankraj ekipmanlarından yararlanılabilir.
- Beton alt yüzeyindeki delikler özel harçlarla uygun bir şekilde doldurulabilir [14].



Şekil 5.12 Yüzey pürüzlülüğünden dolayı oluşacak FRP sıyrılması [14]



Şekil 5.13 FRP sıyrılma mekanizması [12]

5.2 Yük Taşıma Kapasitesini Etkileyen Faktörler

5.2.1 Yapıştırıcı tipi

Yapıştırıcı, yükleri kirişten FRP kompozitine aktarma görevi yapar. Bundan dolayı, yük taşıma kapasitesinde ve göçme modunda çok önemli bir rol oynar. Piyasada farklı mekanik ve fiziksel özelliklerde yapıştırıcılar mevcuttur. O yüzden uygun yapıştırıcının seçilmesi gerekir.

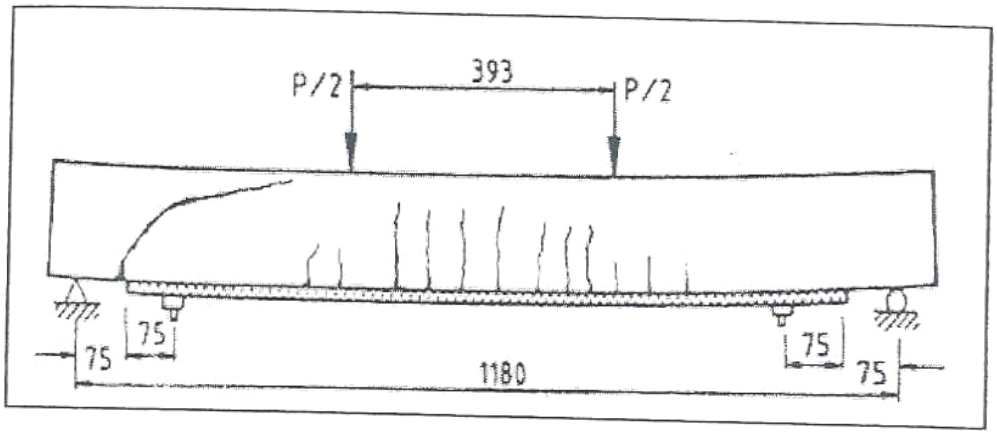
Bu konu ile ilgili Hamoush ve Ahmad'ın [19] yapmış olduğu çalışma, yapıştırıcı kalınlığının artışının şekil değiştirme enerjisi serbest bırakma oranını düşürdüğü sonucunu gösterdi. Böylece, yapıştırıcının homojen olması ve kalınlığının yaklaşık olarak 2-3 mm'yi geçmemesi gerektiği hesaba katılmalıdır.

5.2.2 Ankrajın etkisi

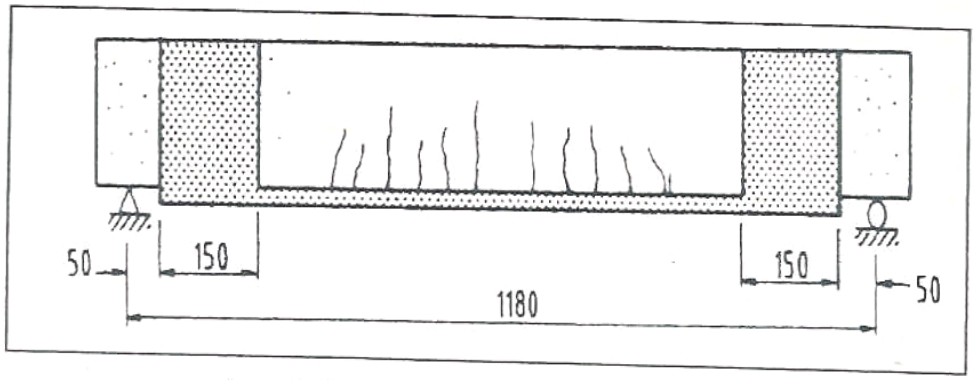
Uygulamada ankrajın çeşitli tipleri ile karşılaşmak mümkündür. L şekilli Carbodur laminatlar, CFRP levhalar ve tekstiller, çelik bulonlar ve çelik U şeritleri pratikte kullanılan bazı ankraj tiplerindendir. Ankraj tipini iyi belirlemek ve tasarımını dikkatli yapmak gerekir. Bu konuda birçok araştırma yapılmıştır.

Harici ankrajlarla betonarme kirişe harici olarak yapıştırılan CFRP kompozitlerinin davranışını inceleyen Spadea [20], çalışmasında çelik ankrajlar kullanmıştır. Açıklık boyunca ilave ankrajların levha ile kirişin beton yüzü arasındaki kaymayı azalttığını görmüştür. Ankrajlı kirişlerin ankrajsız kirişlere kıyasla yaklaşık %70 ilave yük taşıdığını belirlemiştir. Bu ankrajlardan dolayı, ankrajsız kirişe göre beton basınç şekil değiştirmeleri ve CFRP levha şekil değiştirmelerinde artış görülmüştür. Bu çalışma ayrıca yeteri kadar kullanılan ankrajlı kompozit kirişin sünekliğinin artmasının mümkün olduğunu da göstermiştir.

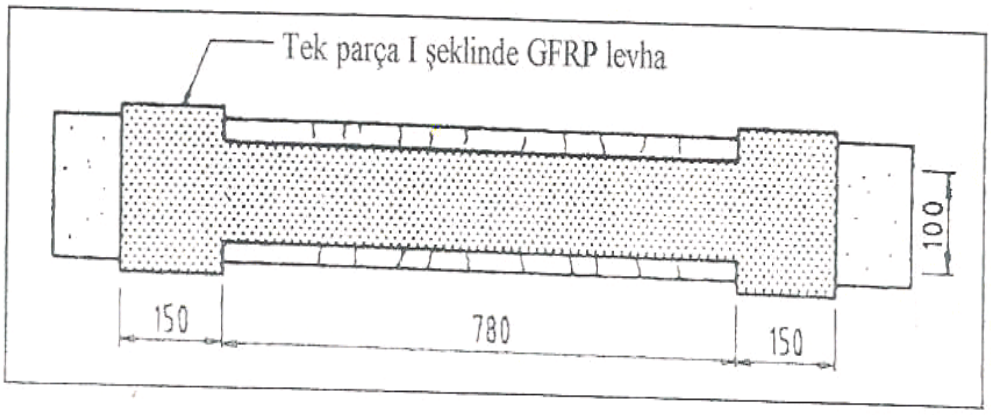
Sharif [18] yaptığı çalışmada çeşitli ankraj tiplerini kullanmış ve aralarındaki farklılıkları ortaya koymuştur. Çelik ankraj bulonlarının levha sıyrılmasını ortadan kaldırdığını ancak göçmenin diyagonal çekme çatlaklarından dolayı olduğunu ortaya çıkarmıştır (Şekil 5.14). I şeklinde mantolanmış GFRP levhalarının çalışmada en iyi ankraj sistemi olduğu anlaşılmıştır. Öyle ki levha sıyrılması ile diyagonal çekme çatlak göçmesini ortadan kaldırırken eğilme mukavemetini de arttırdığı görülmüştür (Şekil 5.15 ve 5.16).



Şekil 5.14 Çelik ankraj bulonları ile ankrajlanmış kirişteki diyagonal çekme çatlaklarının yayılışı [18]



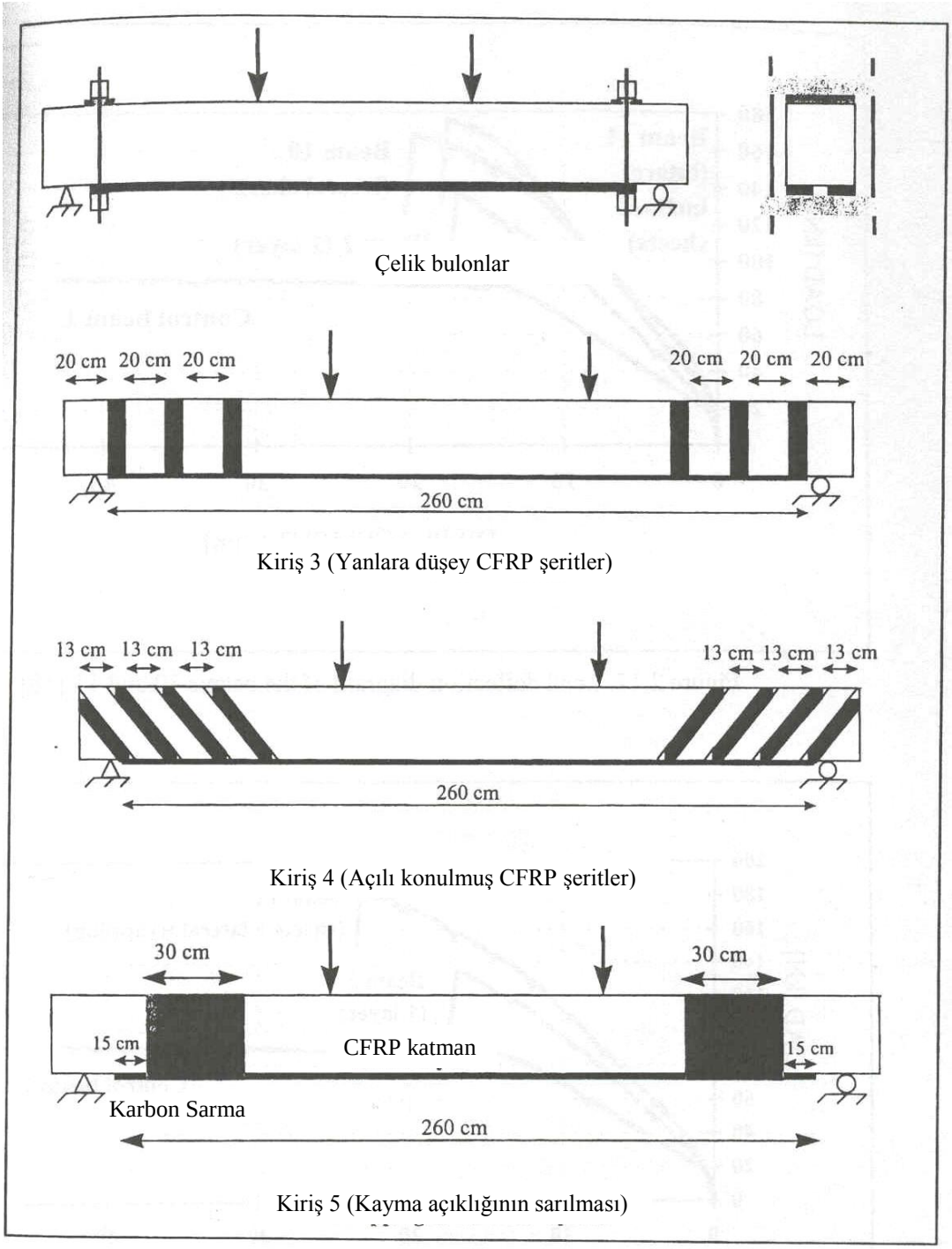
Şekil 5.15 I şeklinde mantolanmış GFRP levhasının yandan görünüşü [18]



Şekil 5.16 I şeklinde mantolanmış GFRP levhasının alttan görünüşü [18]

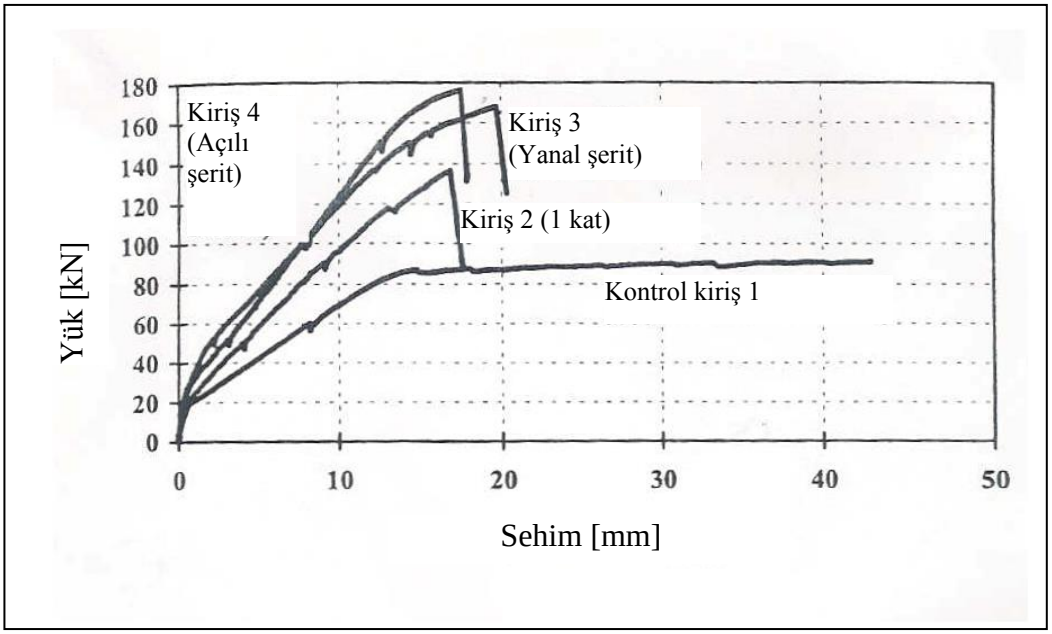
David [21] ise yaptığı çalışmada CFRP tekstillerin mekanik davranışını incelemiş ve Şekil 5.17'de gösterilen aşağıdaki teknikleri uygulayıp, açıklamıştır.

1. CFRP levhalarının ucuna çelik bulonların kullanılması
2. Yanal, düşey veya eğri levhaların birleştirilmesi
3. Kayma açıklıklarının sarılması

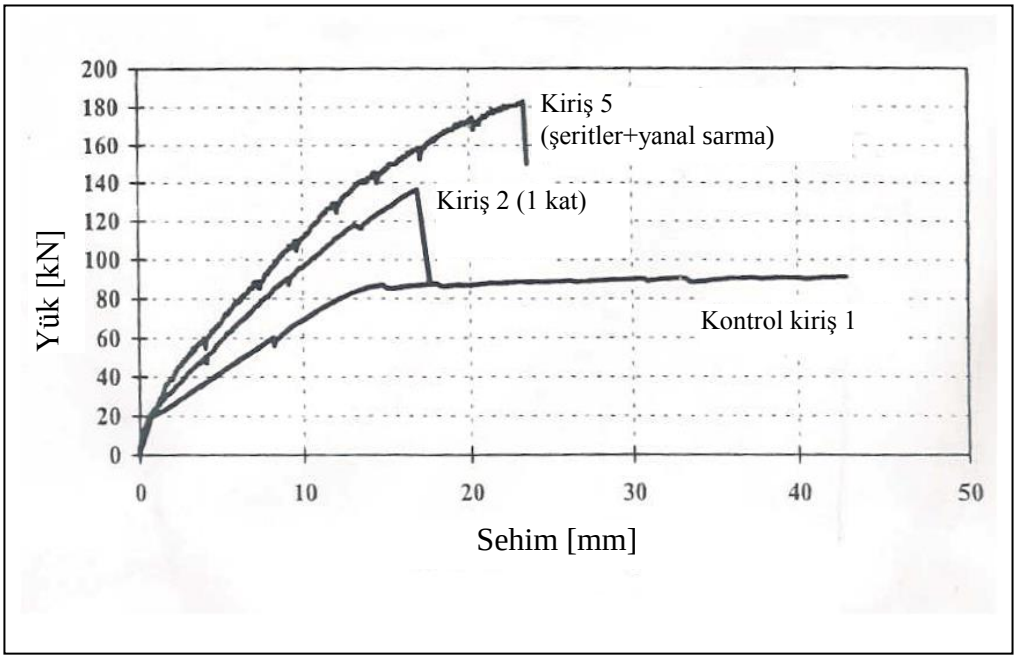


Şekil 5.17 Değişik yöntemler kullanarak kirişlerin güçlendirilmesi [21]

Yük taşıma kapasitesinin arttırılmasında ikinci ve üçüncü tekniğin birincisine kıyasla daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkarılmıştır. Şekil 5.18 ve 5.19 de yapılan deneylerin sonuçları grafikte açıklanmıştır. Burada 1 numaralı kiriş kontrol kirişi olarak seçilmiş, 2 numaralı kiriş ise bir kat FRP ile sarılmıştır. Şekil 5.17'de sarma biçimleri gösterilmiş kirişlerde nihai yüklerin, 3 numaralı kiriş için 168 kN, 4 numaralı kiriş için 176 kN ve 5 numaralı kiriş için 183 kN olduğu görülmektedir.

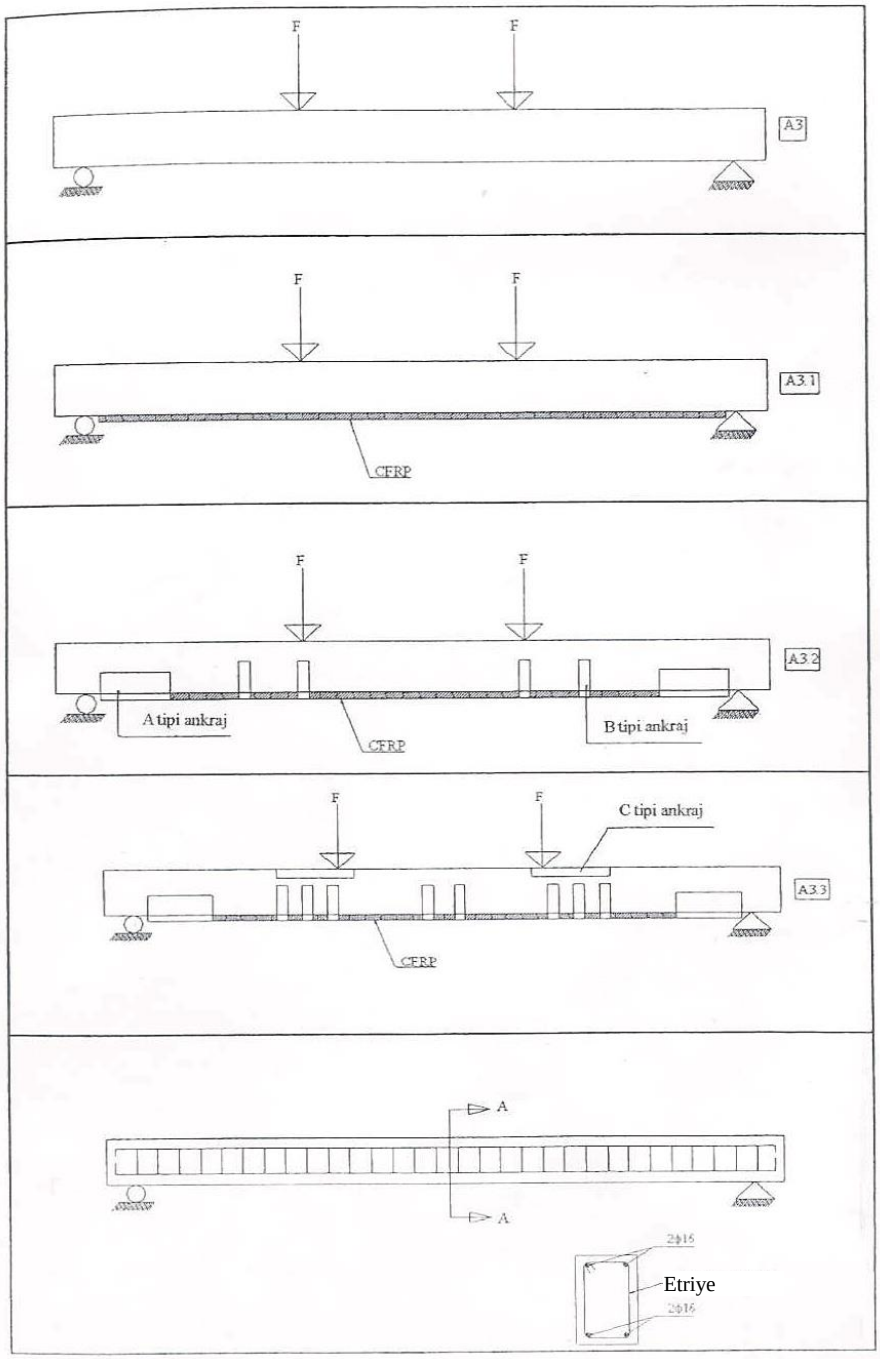


Şekil 5.18 3 ve 4 numaralı kirişlerin yük-sehim diyagramı [21]



Şekil 5.19 5 numaralı kirişlerin yük-sehim diyagramı [21]

Spadea ve arkadaşlarının [22] yapmış olduğu bir başka çalışmada harici ankrajlar değişkenlerden biri olarak test edilmiştir. Çeşitli harici ankraj sistemleri ile güçlendirilmiş kirişlerin harici ankrajsız kirişlerden daha fazla yük taşıdığı ve göçme modlarının daha fazla sünek davrandığı görülmüştür. Çalışmada kullanılan ankrajların yerleri Şekil 5.20'da gösterilmektedir.



Şekil 5.20 Farklı ankraj tiplerinin şematik gösterimi [21]

5.2.3 Lif yönlendirmesinin etkisi

FRP levhasının lif yönlendirmesi, taşıyıcı elemanın yük taşıma kapasitesinin ve kırılma modlarının değişmesine neden olur. Bu sebeple, lif yönlendirmesi arzu edilen doğrultuda FRP'nin etkisini arttırmak için belirlenmelidir.

Norris ve arkadaşlarının [23] yaptıkları araştırmada kompozit kirişlerin davranışı üzerindeki lif yönlendirmesinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, kiriş eksenine göre

0º, 90º ve ± 45º olarak üç ayrı tipte lif yönlendirmesi kullanılmıştır. Kiriş 1A'da lifler hem çekme başlığına hem de gövdeye boylamasına yönlendirilmiş ve bu kirişin nihai mukavemetinin yaklaşık 138 kN ve kırılma tipinin CFRP laminatının betondan sıyrılması şeklinde olduğu gözlenmiştir. Kiriş 1B (0º/90º) karşılıklı kat uygulaması olarak birleştirilmiş ve bu kirişin en son dayanımının Kiriş 1A'dan daha az olduğu ancak kırılmanın ise daha az şiddetli olduğu görülmüştür. Kiriş 1C kirişin eksenine ±45º'li lifler uygulanmış ve bu kirişin de en son dayanımının Kiriş 1B'nin dayanımından da az olduğu ancak kirişin tüm davranışının diğer iki kirişden daha sünek olduğu sonucu ortaya çıkmıştır [23].

Böylece, bu çalışma göstermiştir ki, CFRP lifleri kirişte çatlaklara dik olarak yerleştirildiklerinde, rijitlik ve dayanımları büyük ölçüde artarken kırılma modları gevrek olur, çatlaklara eğik olarak yerleştirildiklerinde ise rijitlik ve dayanımları daha az artarken kırılma modları da daha sünek olur [23].

5.2.4 Levha kalınlığının ve FRP oranının etkisi

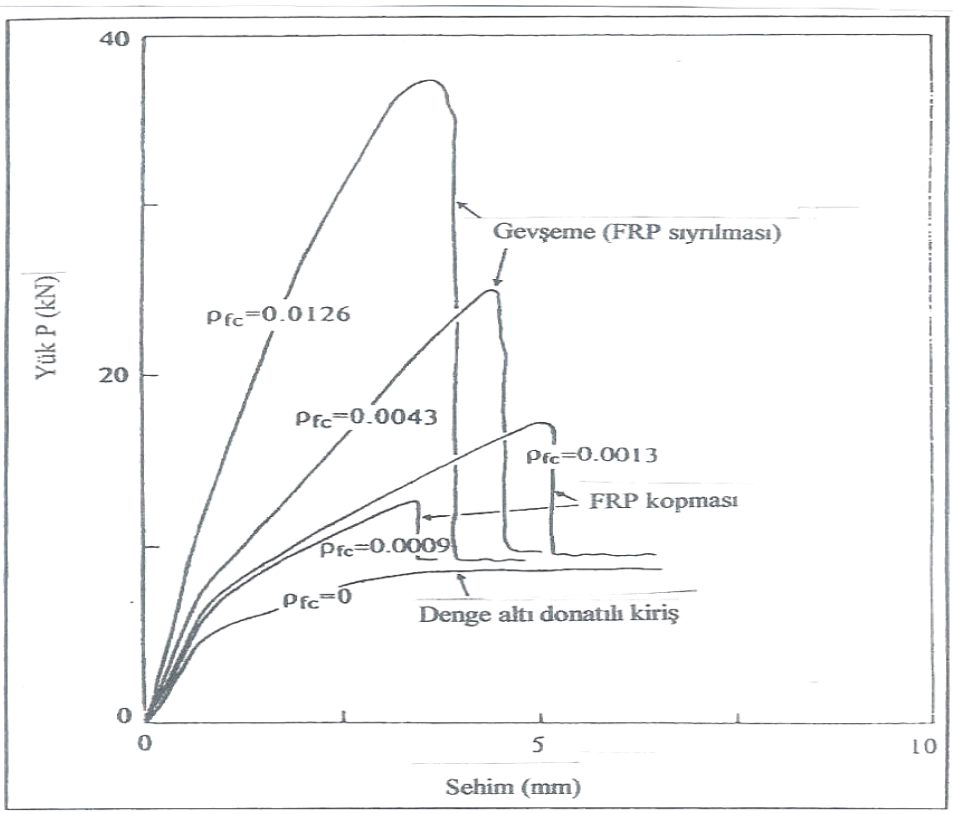
Levha kalınlığının ve FRP oranının artışı yük taşıma kapasitesinin artışına neden olur ama kırılma mekanizmalarını da değiştirir. Bu parametrelerin etkisi birçok araştırmaya konu olmuş, bulunan sonuçlar yük taşıma kapasitesinin arttığını destekler yönde çıkmıştır.

CFRP levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin mekanik davranışı üzerine bir dizi çalışma David [21] tarafından yapılmıştır. Levha kalınlığı ve levha oranı gibi birçok parametrenin araştırıldığı bu çalışmalarda P2, P3, P4 ve P5 olarak isimlendirilen dört adet kiriş, bu parametrelerin davranış üzerindeki etkisini bulmak amacıyla test edilmiştir. P2 ve P3 kirişleri tek katmanlı iki levha ve diğer iki kiriş de çift katmanlı iki levha olarak tasarlanmıştır. Kalınlığın artışının, kirişlerin rijitliğini ve nihai yük taşıma kapasitesini arttırdığı sonucu çıkmıştır. Ayrıca, levha oranının artışı rijitlik ve nihai yükte de bir artışa neden olmuştur. Nihai yüklerdeki artışlar güçlendirilmemiş P1 kirişine göre P2 ve P3 kirişleri için %51 ve %58 mertebelerinde gerçekleşmiştir. Bu artışların P4 ve P5 kirişlerinde ise yine P1 güçlendirilmemiş kirişe göre sırasıyla %73 ve %77 seviyelerinde olduğu bulunmuştur [21].

Shaarif ve arkadaşları [18] tarafından yapılan bir araştırmada, üç kiriş farklı kalınlıklarda levhalarla yapıştırılmıştır (P1 kirişi 1 mm, P2 kirişi 2 mm, P3 kirişi 3 mm). Levha kalınlığı arttığı zaman, akmadaki yükler de artarken, süneklik indeksi

düşmüştür. Ayrıca, kırılma mekanizması da değişmiştir. P1 kirişi için kırılma modu levha kırılması şeklindeyken, diğer kirişler boyuna çekme donatısı boyunca betondaki yerel kesme çatlağıyla birlikte bulunan levha ayrılması şeklinde göçmüştür [18].

FRP oranının etkisi de Triantafillou ve Plevris [12] tarafından araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan numuneler, orta açıklığın her iki yanının 305 mm mesafesinde simetrik olarak uygulanan tekil yükle yüklenmiştir ve 1220 mm temiz açıklığa sahiptir. FRP oranındaki artış rijitlik ve nihai yük kapasitesini yükseltmiştir. Bununla birlikte, kırılma mekanizması FRP kopmasından yapışma bölgesinden sıyrılmaya dönüşmüştür.

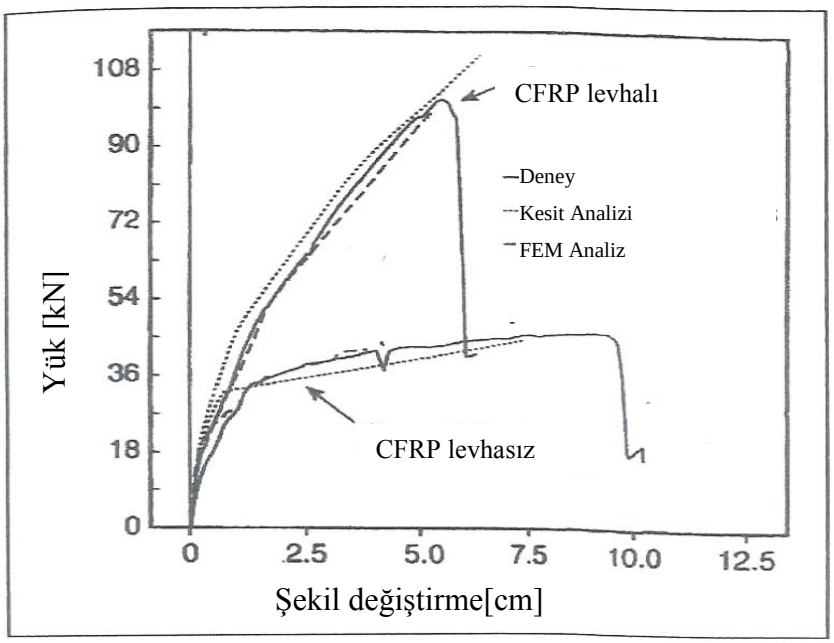


Şekil 5.21 FRP oranının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi [12]

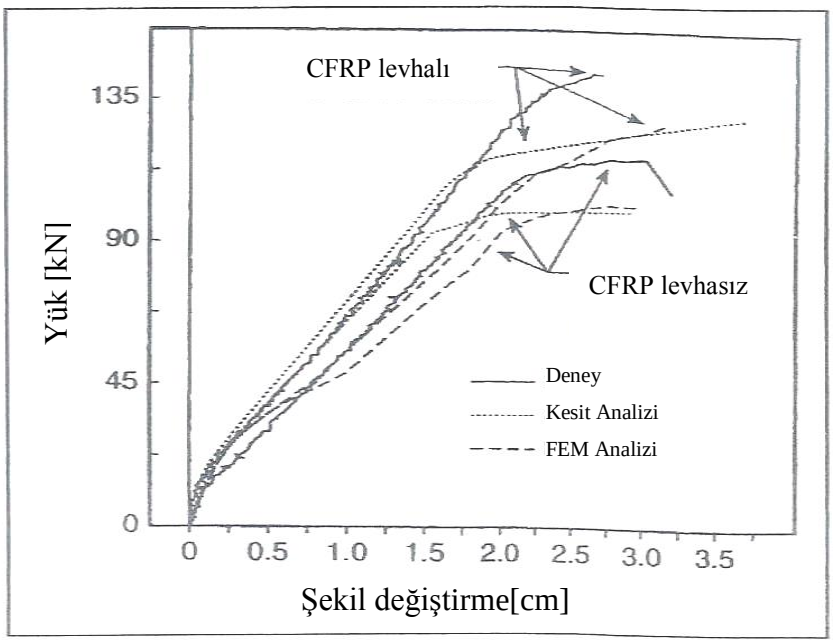
5.2.5 Donatı oranı

FRP levhalı BA kirişlerin güçlendirilmesi düşük donatı oranları için daha etkilidir. Donatı oranının etkisi Ross ve arkadaşları [24] tarafından araştırılmıştır. Çalışmada 1 ile 6 arasında adlandırılan altı değişik donatı oranı kullanılmıştır. Donatı oranı arttığı zaman, kirişlerin nihai yüklerinin de arttığı fakat FRP'nin katkısının azaldığı

görülmüştür. Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 az donatılmış ve çok donatılmış betonarme kirişlerin yük-şekil değiştirme eğrilerini göstermektedir [24].



Şekil 5.22 2.grup kirişlere ait yük-şekil değiştirme eğrileri [24]



Şekil 5.23 5.grup kirişlere ait yük-şekil değiştirme eğrileri [24]

Düşük donatı oranı için nihai yükteki artış yüksek donatı oranlı olandan daha fazladır. Çünkü A_s/A_{frp} oranı az donatılmış betonarme kirişler için daha fazladır. Dahası, düşük donatı oranına sahip kirişlerin şekil değiştirmeleri de daha fazladır.

5.2.6 Beton basınç mukavemeti

Beton basınç mukavemetindeki artış kapasitede bir artışa neden olur. Çünkü kesit ilave bir kuvvet çiftine sahip olur.

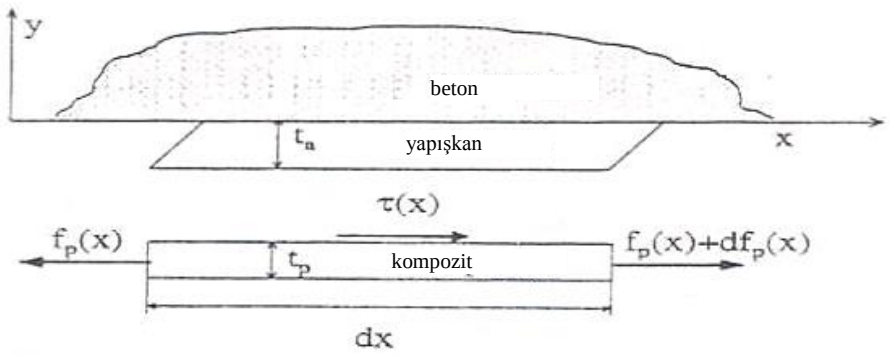
Kirişlerin mekanik davranışı üzerindeki tasarım değişkenlerinin etkilerini araştırmak amacı ile parametrik bir çalışma An ve arkadaşları [25] tarafından gerçekleştirilmiştir. Beton basınç mukavemetleri 20.6 MPa ve 41.4 MPa olan iki tip ele alınmıştır. Sonuçda kompozit levhanın ilavesi ile basınç mukavemetinin artışının, nihai moment ve nihai yük taşıma kapasitelerini de yükselttiği görülmüştür [25].

5.3 Kompozit Malzemelerle Onarılmış Beton Yapılarda Aktarma Boyu

5.3.1 Diferansiyel denge denkleminin çıkartılışı

5.3.1.1 Varsayımlar

- Betonda çatlak yoktur.
- Beton mesnetin rijitliği kompozit levhanın rijitliğinden daha fazladır.
- Yapışkanın kalınlığı boyunca kayma şekil değiştirmesi sabittir.
- Malzemeler lineer elastiktir.
- Boyuna gerilme yalnızca kompozitte oluşur [26].



Şekil 5.24 Betonun ve kompozitin sonsuz küçük parçası [26]

5.3.1.2 Diferansiyel denklem

$$\tau dx + df_p = 0 \qquad (5.31)$$

τ = Yapışkandaki kayma gerilmesi

f_p = Kompozitteki birim genişlikteki çekme kuvvetidir.

$$\tau = \frac{-df_p}{dx} \tag{5.32}$$

Yapışkanın kalınlığı boyunca oluşan kayma şekil değiştirmesi, γ;

$$\gamma = \frac{\Delta u}{t_a} \tag{5.33}$$

$$\Delta u = u_c(x) - u_f(x) \tag{5.34}$$

Dahası;

$$\gamma = \frac{\tau}{G_a} \tag{5.35}$$

Öyleyse $u_f(x)$ şöyle ifade edilebilir:

$$u_f(x) = u_c(x) - \Delta u = u_c(x) - t_a\gamma = u_c(x) - t_a \frac{\tau}{G_a} \tag{5.36}$$

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_c(x) - \frac{t_a}{G_a}\frac{d\tau}{dx} = \varepsilon_c(x) + \frac{t_a}{G_a}\frac{d^2 f_f(x)}{dx^2} \tag{5.37}$$

$$\varepsilon_f(x) = \frac{\sigma_f(x)}{E_f} = \frac{f_f(x)}{t_f E_f} \tag{5.38}$$

f_p'nin bilinmediği yerde (5.36) ve (5.37)'daki eşitlikler aşağıdaki ifadeyi alır:

$$\frac{d^2 f_f}{dx^2} - \frac{1}{l^2{}_0} f_f = -\frac{\varepsilon_c(x) G_a}{t_a} \tag{5.39}$$

$$l_0 = \frac{\sqrt{E_f t_a t_f}}{\sqrt{G_a}} \tag{5.40}$$

Buradan l_0 ileriki bölümlerde bir değişim olarak yorumlanacak olan uzunluğu gösterir. (5.38) numaralı denklemin çözümü kompozitin birleştirildiği beton mesnetin boyuna şekil değiştirmesine ($\varepsilon_c(x)$) bağlıdır. Kompozit levhanın rijitliği ve beton kirişin rijitliği arasındaki büyüklüğün derecesinin çok önemli farklılığından dolayı bu uzama gerçekte beton mesnet tarafından kompozite yaptırılır. Hepsi $\varepsilon_c(x)$

ve sınır koşulları için farklı ifadelere tekabül eder. Bundan dolayı (5.38) numaralı diferansiyel denklem için farklı çözümlere götürür [26].

5.3.2 Basit kesme



Şekil 5.25 Basit kesme [26]

5.3.2.1 Denge denkleminin çözümü

f burada birim kompozit genişliğine etkiyen yüktür. Madem ki beton mesnetin rijitliği kompozitin rijitliğinden daha büyük olduğu varsayılır, o zaman ε_c sıfıra eşit kabul edilebilir. O halde (5.38) numaralı diferansiyel denklem [26]:

$$\frac{d^2 f_f}{dx^2} - \frac{1}{l^2{}_0} f_f = 0 \qquad \text{şeklinde yazılabilir.} \tag{5.41}$$

(5.39) numaralı diferansiyel denklem şu formu alır:

$$f_f(x) = A\sinh\left(\frac{x}{l_0}\right) + B\cosh\left(\frac{x}{l_0}\right) \tag{5.42}$$

Sınır koşulları

$$x = 0 \quad f_f(0) = f \tag{5.43}$$

$$x = L \quad f_f(L) = 0 \tag{5.44}$$

$$B = f \quad \text{ve } A = -f\,\frac{\cosh(L/l_0)}{\sinh(L/l_0)} \tag{5.45}$$

Nihayet $f_f(x)$ ve $\tau(x)$ için çözüm;

$$f_f(x) = f\,\frac{\sinh\left((L-x)/l_0\right)}{\sinh\left(L/l_0\right)} \tag{5.46}$$

$$\tau(x) = \frac{f}{l_0}\,\frac{\cosh\left((L-x)/l_0\right)}{\sinh\left(L/l_0\right)} \qquad \text{şeklinde yazılır.} \tag{5.47}$$

5.3.2.2 Beton bloğun rijitliğinin etkisi

Beton bloğun gerçek rijitliğinin kompozitin rijitliğinden daha büyük olduğu beton bloktaki varolmayan bir şekil değiştirmenin sonucu olarak varsayılmıştır. Beton bloğun şekil değiştirmesi genellikle hesaba katılır. Bu halde, beton mesnedin uzaması

$\varepsilon_c = -\frac{f_p(x)}{t_c E_c}$ olarak yazılır. (5.48)

(5.39) numaralı diferansiyel denklem, yalnızca l_0 değişimi l_0' ile ifade edilir.

$$\acute{l}_0 = l_0 \sqrt{\frac{1}{1+\alpha'}} \tag{5.49}$$

$$\alpha = \frac{E_p t_p}{E_c t_c} \tag{5.50}$$

α buna rağmen E_p, t_p, E_c ve t_c'nin herzamanki değerleriyle çok küçüktür. Örneğin E_p = 160GPa, t_p = 1 mm, E_c = 33 GPa ve t_c = 200 mm iken α = 2,4*10⁻² ve $l_0' = 0{,}99 * l_0$. Bundan dolayı pratikte $l_0' \sim l_0$ kabul edilir. Bu hesaplar 5.3.1.1'deki ikinci varsayımı doğrular [26].

5.3.2.3 Basitleştirilmiş ifadeler

$$\tau(x) = \frac{f}{l_0} \frac{\exp\left((L-x)/l_0\right) + \exp\left(\left(-L+x\right)/l_0\right)}{\exp\left(L/l_0\right) - \exp\left(-L/l_0\right)} \tag{5.51}$$

$$\tau(x) = \frac{f}{l_0} \exp\left(\frac{-x}{l_0}\right)\left(\frac{1+\exp\left(2\left(x-L/l_0\right)\right)}{1-\exp\left(2L/l_0\right)}\right) \tag{5.52}$$

L ve l_0'ın olağan değerleri için $L >> l_0$. Bundan dolayı $1 - \exp\left(-2L/l_0\right) \cong 1$

Aynı yolla, $g(x) = \exp(-x/l_0)$ (5.53)

ve $h(x) = \exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) * \left(1+\exp\right)\left(\frac{2(x-L)}{l_0}\right)$ (5.54)

ifadeleri x, 0 ile L arasında değişirken $L >> l_0$ olduğunda eşittir. Sonuçta,

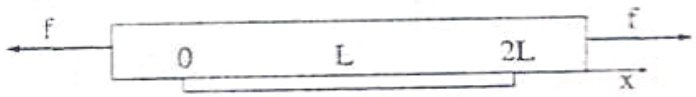
$$\tau(x) = \frac{f}{l_0}\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) \tag{5.55}$$

Aynı yolla,

$$f_p(x) = f^*\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) \tag{5.56}$$

şeklinde kolaylıkla gösterilebilir.

5.3.3 Betonda sabit boyuna uzama



Şekil 5.26 Betondaki sabit çekme gerilmeleri [26]

5.3.3.1 Denge denkleminin çözümü

Betonda sabit çekme uzaması hali, sabit çekme gerilmelerine maruz kalan bir beton numune üstüne bir kompozitin birleştirilmesi sırasında oluşur. Sıcaklık değişimi altında betonun genişlemesi veya büzülmesi birleştirilmiş kompozite zorla yüklenecek beton bloğun sabit boyuna uzamasına da öncülük edecektir. Önceden gelen yükleme halinin aksine, kompozit yapışkan boyunca yüklenir. Betondaki sabit uzama $\varepsilon_c(x) = \varepsilon_{c0}$ şeklinde gösterilir. (5.39) numaralı denklemin çözümü [26];

$$f_f(x) = A\sinh\left(\frac{x}{l_0}\right) + B\cosh\left(\frac{x}{l_0}\right) + C \tag{5.57}$$

şeklini alır.

$$C = E_f * t_f * \varepsilon_{c0} \tag{5.58}$$

Eğer beton mesnet gibi aynı ε_{c0} uzamasına maruz bırakılırsa bu miktar gerçekte kompozit tarafından taşınacak olan birim genişlikteki f_{p0} kuvvetidir. Yani $C = f_{f0}$'dir. Eğer kompozit beton kirişin yüzüne simetrik olarak birleştirilirse, sınır koşulları;

x = 0 $f_{f0} = 0$ (5.59)

x = L $\tau(L) = 0$ simetriden (5.60)

(5.56) numaralı sınır koşulu B = -C = - f_{f0}

(5.31) numaralı denklemde (5.54) ve (5.57) numaralı eşitlikler uygulanırsa

$$A = -B\tanh\left(\frac{L}{l_0}\right) \tag{5.61}$$

olur. Bazı basitleştirmeler sonrasında $f_p(x)$ ve $\tau(x)$

$$f_f(x) = f_{f0}\left(1 - \frac{\cosh\left((L-x)/l_0\right)}{\cosh\left(L/l_0\right)}\right) \tag{5.62}$$

$$\tau(x) = \frac{-f_{f0}}{l_0}\frac{\sinh\left((L-x)/l_0\right)}{\cosh\left(L/l_0\right)} \tag{5.63}$$

şeklinde yazılır.

5.3.3.2 Basitleştirilmiş ifadeler

$$\tau(x) = \frac{-f_{f0}}{l_0}\frac{\exp\left((L-x)/l_0\right) - \exp\left((-L+x)/l_0\right)}{\exp\left(L/l_0\right) + \exp\left(-L/l_0\right)} \tag{5.64}$$

$$\tau(x) = \frac{-f_{f0}}{l_0}\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right)\left(\frac{1-\exp\left(2(x-L)/l_0\right)}{1+\exp\left(-2L/l_0\right)}\right) \tag{5.65}$$

Kayma gerilmesi için çıkartılmış bu ifade 5.3.2.3'deki ifade ile çok benzemektedir. Sadece bazı işaretler farklıdır. Daha önce de açıklanmış aynı sebeplerden dolayı, $\tau(x)$ için ifade;

$$\tau(x) = \frac{-f_{f0}}{l_0}\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) \tag{5.66}$$

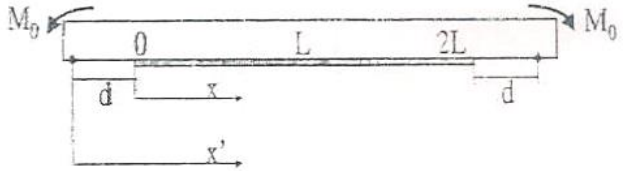
şeklinde basitleştirilebilir.

Aynı yolla f_f ifadesi;

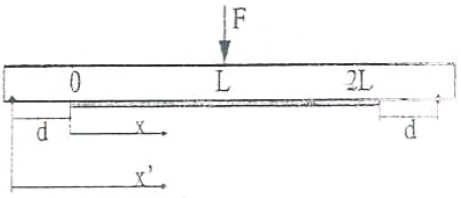
$$f_p(x) = f_{p0}\left(1 - \exp\left(\frac{-x}{l_0}\right)\right) \tag{5.67}$$

şeklinde kolaylıkla gösterilebilir [26].

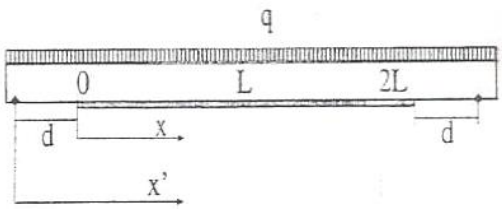
5.3.4 Eğilme



a-Sabit eğilme momenti hali



b- Üç noktadan eğilme hali



c-Sabit yayılı yük hali

Şekil 5.27 Eğilme altında güçlendirilmiş kiriş durumları [26]

5.3.4.1 Denge denkleminin çözümü

Bir kirişin eğilme etkisi altındaki hali Şekil 4'dedir. Betondaki $\varepsilon_c(x)$ uzaması yüklemenin tipine bağlıdır. Bu şekil değiştirme en genel halde;

$$\varepsilon_c(x) = a_1 x'^2 + a_2 x' + a_3 = -\frac{\delta M(x)}{E_f I} \tag{5.68}$$

olarak yazılır.

Burada M(x) eğilme momentine, I eşdeğer kompozit kesitin atalet momentine ve δ betonarme kirişin tarafsız ekseniyle kirişin alt yüzünün arasındaki mesafeyi (δ>0) ifade eder. x′ ekseninin orijini sol taraftaki mesnettir. Oysa x ekseninin orijini kesilen noktadır. Bundan dolayı $x' = x + d$ dir. Burada d mesnetle kesilen nokta arasındaki uzaklıktır.

Sabit bir M_0 eğilme momenti etkisindeki bir kiriş için; $a_1 = a_2 = 0$, $a_3 = -M_0\left(\delta / E_f I\right)$

3 noktadan eğilme etkisindeki bir kiriş için; $a_1 = a_3 = 0$, $a_2 = F(\delta/2E_f I)$. Sabit yayılı yük etkisindeki bir kiriş için; $a_1 = -q(\delta/2E_f I)$, $a_2 = q(L+d)(\delta/EfI)$, $a_3 = 0$

(5.39) numaralı diferansiyel denklemi [26];

$$\frac{d^2 f_f}{dx^2} - \frac{1}{l^2{}_0} f_f = -\frac{G_a}{t_a}(a_1 x^2 + (2da_1 + a_2)x + a_1 d^2 + a_2 d + a_3) \quad \text{olur.} \qquad (5.69)$$

Genel Çözüm:

$f_f(x) = A\sinh(x/l_0) + B\cosh(x/l_0) + b_1x^2 + b_2x + b_3$ olur. (5.70)

Burada,

$$b_1 = l_0^{\,2}\frac{G_a}{t_a}a_1 \qquad (5.71)$$

$$b_2 = l_0^{\,2}\frac{G_a}{t_a}(2da_1 + a_2) \qquad (5.72)$$

$$b_3 = l_0^{\,2}\left(\frac{G_a}{t_a}(a_1 d + a_2 d + a_3) + 2b_1\right) \qquad (5.73)$$

Sınır Koşulları:

x = 0 $f_f(0) = 0$ (5.74)

x = L $\tau(L) = 0$ simetriden (5.75)

$B = -b_3$ ve

$$A = \frac{-1}{\cosh(L/l_0)}\left(-b_3\sinh\left(\frac{L}{l_0}\right) + 2b_1 l_0 L + b_2 l_0\right) \qquad (5.76)$$

$$A = b_3\tanh\left(\frac{L}{l_0}\right) - \frac{2b_1 l_0 L + b_2 l_0}{\cosh(L/l_0)} \qquad (5.77)$$

$f_f(x)$ ve $\tau(x)$ için çözüm sonuçta şöyle yazılır:

$$f_f(x) = \left(b_3 \tanh\left(\frac{L}{l_0}\right) - \frac{2b_1 l_0 L + b_2 l_0}{\cosh(L/l_0)} \right) \sinh\left(\frac{x}{l_0}\right) - b_3 \cosh\left(\frac{x}{l_0}\right) + b_1 x^2 + b_2 x + b_3 \quad (5.78)$$

$$\tau(x) = -\frac{1}{l_0}\left(b_3 \tanh\left(\frac{L}{l_0}\right) - \frac{2b_1 l_0 L + b_2 l_0}{\cosh(L/l_0)} \right) \cosh\left(\frac{x}{l_0}\right) + \frac{b_3}{l_0} \sinh\left(\frac{x}{l_0}\right) - 2b_1 x - b_2 \quad (5.79)$$

5.3.4.2 Basitleştirmeler

Pratikte L>> l_0'dır. O halde $\tanh(L/l_0) \approx 1$ ve $\frac{2b_1 l_0 L + b_2 l_0}{\cosh(L/l_0)}$ ihmal edilebilir. Bundan dolayı A = -B = b_3 ve τ(x) kayma gerilmesi;

$$\tau(x) = \frac{-b_3}{l_0} \exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) - 2b_1 x - b_2 \quad \text{şeklinde yazılır.} \quad (5.80)$$

ama, $$b_3 = l_0^2 \left(\frac{G_a}{t_a}(a_1 d^2 + a_2 d + a_3) + 2b_1 \right) \quad (5.81)$$

$$b_3 = E_f t_f (a_1 d^2 + a_2 d + a_3) + 2b_1 l_0^2 \quad (5.82)$$

$$b_3 = E_f t_f \varepsilon_{c_{x=0}} + 2b_1 l_0^2 \quad (5.83)$$

$$b_3 = f_{f0} + 2l_0^2 b_1 \quad (5.84)$$

Burada f_{f0}, bir boyuna ε_0 uzaması altında kesilen noktada beton mesnetin üzerine konan kompozitde oluşacak birim genişlikteki çekme kuvvetidir (x = 0'da).

$$\tau(x) = -\underbrace{\left(\frac{f_{f0}}{l_0} + 2b_1 l_0 \right)}_{1\,4\,4\,4\,4\,4\,2\,4\,4\,4\,4\,3} \exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) \underbrace{- 2b_1 x - b_2}_{1\,4\,2\,4\,3} \quad (5.85)$$

τ(x) = τ_1(x) + τ_2(x). (5.86)

Aynı yolla, f_p(x) için kesin ifade pratikte,

f_f(x)= -(f_{f0} + 2$b_1 l_0^2$) exp(-x/l_0) + $b_1 x^2$ + b_2x + b_3 (5.87)

Anlaşılacağı üzere, $\tau(x)$ kayma gerilmesi $\tau_1(x)$ ve $\tau_2(x)$'nin toplamıdır.

İlk terim olan $\tau_1(x) = -\left(\frac{f_{fo}}{l_0} + 2b_1 l_0\right)\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right)$ (5.88)

yalnızca kesim noktasındaki tekilliğinden dolayıdır ve 5.3.3.2 ve 5.3.2.3'de bulunan kayma gerilmesi ifadelerine benzer. Fark yalnızca M eğilme momentinin ikinci mertebesinden dolayı gelen $2b_1l_0$ teriminin ilavesidir. Böylece eğer eğilme momenti doğrusalsa $\tau_1(x)$ 5.3.3.2 ve 5.3.2.3'de tanımlanan $\tau(x)$ ile aynıdır (özellikle de kiriş kuvvetlere ve momentlere maruzsa). f_{f0}/l_0 ve $2b_1l_0$ terimlerinin büyüklüğü aşağıda karşılaştırılmıştır.

İkinci terim olan τ_2 eğilmiş kirişlerde görülen olağan kayma gerilmesidir. Gerçekte, δ mesafesi yaklaşık olarak tarafsız eksen ile kompozit kesitin merkezi arasındaki uzaklığa eşittir. Kompozitteki boyuna gerilme kiriş teorisi içinde

$$\sigma_f(x) = -\frac{M\delta}{I} \tag{5.89}$$

şeklinde yazılır. Böylece,

$$f_f(x) = t_f\sigma_f = -\frac{Mt_f\delta}{I} \tag{5.90}$$

τ_2 kayma gerilmesi (5.31) numaralı eşitlikten çıkarılır.

$$\tau_2 = \frac{dM}{dx}\frac{t_f\delta}{I} \tag{5.91}$$

Mademki $M = -\frac{E_f I\varepsilon_c}{\delta}$ (5.92)

$$M = -\frac{E_f I}{\delta}(a_1x^2 + (2a_1d + a_2)x + (a_1d^2 + a_2d + a_3)) \tag{5.93}$$

$\tau_2(x)$ sonuç olarak ,

$$\tau_2(x) = -t_f E_f(2a_1x + 2a_1d + a_2) \tag{5.94}$$

$$\tau_2(x) = -{l_0}^2 \frac{G_a}{t_a}(2a_1 x + (2da_1 + a_2)) \tag{5.95}$$

$$\tau_2(x) = -2b_1 x - b_2 \tag{5.96}$$

olur. Sonuçta denklem (5.80)'deki τ_2 gerçekte basit kafes kiriş teorisi içinde hesaplanmış beton ve kompozit arasındaki kayma gerilmesidir [26].

5.3.4.3 Sabit yayılı yük özel hali

Yukarıda gösterildiği gibi $\tau_1(x)$'in büyüklüğü f_{f0}/l_0 ve $2b_1l_0$ terimlerinin toplamıdır. Kesilen nokta x = 0'da ise ilk terim olmaz. 5.3.4a ve 5.3.4b hallerinde 2. terim olmaz. 5.3.4c halinde, f_{f0}/l_0 ve $2b_1l_0$ arasındaki büyüklüğün farkı,

$$r(d,l_0) = \frac{f_{f0}}{2b_1{l_0}^2} \qquad \text{oranı çalışması ile hesaplanabilir.} \tag{5.97}$$

Bazı basitleştirmelerden sonra bu oran;

$$r(d,l_0) = \frac{a_1d^2 + a_2d + a_3}{2a_1{l_0}^2} \qquad \text{şeklinde yazılır.} \tag{5.98}$$

Sabit yayılı yük halinde;

$$a_1 = -q\frac{\delta}{2E_fI} \qquad a_2 = qL\frac{\delta}{2E_fI} \qquad a_3 = 0$$

Böylece;

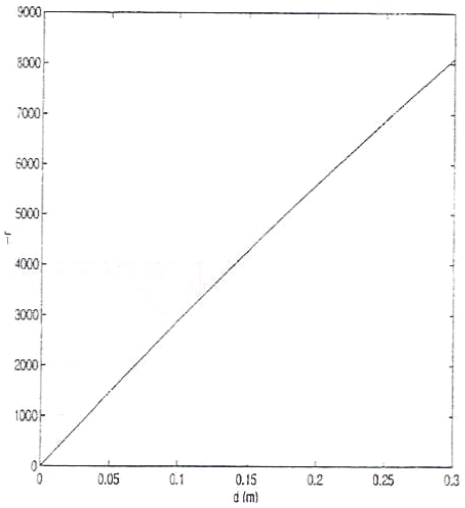
$$r(d,l_0) = \frac{d^2 - Ld}{2{l_0}^2} \tag{5.99}$$

Mesela L = 3m, l_0 = 0,01 m olan bir örnek gözönüne alınırsa, r(d,l_0)'ın mutlak değeri (gerçekte bu oran negatiftir), d mesafesi 0 ve 0,3m arası için Şekil 5.28'de çizilmiştir. d arttıkça mutlak değer r'nin de yükseldiği görülmektedir. Sonuç olarak f_{f0}/l_o d artarken $2b_1l_0$'dan daha büyük olur. Bu sebeple,

$$\frac{f_{fo}}{l_0} + 2b_1l_0 \cong \frac{f_{f0}}{l_0} \qquad (d \cong 0 \text{ olduğu çok özel bir halden hariç}) \tag{5.100}$$

5.3.4.4 τ(x) ve f_f(x) için sonuç basitleştirilmiş ifadeler

$$\tau(x) = \underbrace{-\frac{f_{f0}}{l_0}\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right)}_{1} \underbrace{-2b_1x - b_2}_{2} \qquad (5.101)$$



$$\tau(x) = \tau_1(x) + \tau_2(x) \qquad (5.102)$$

Aynı yolla;

$$f_f(x) = -f_{f0}\exp\left(\frac{-x}{l_0}\right) + b_1x^2 + b_2x + b_3 \qquad (5.103)$$

Şekil 5.28 L = 3m, l_0 = 0,01m için mutlak değer r(d,l_0) oranı [26]

5.3.5 Kayma gerilmesi azaltma çalışması

5.3.5.1 Üç hal arasında karşılaştırma

Tablo 5.1'de üç hal için bulunan kesin ve yaklaşık çözümler raporlanmıştır. Gerçekte üç halde benzer modeller tarafından tariflenen x = 0'da kayma gerilmesinin ani düşüşünün bu ifadelerde görülmesi önemsiz bir sorundur [26].

Tablo 5.1 f_p(x) ve τ(x)'in farklı haller için gerçek ve basitleştirilmiş analitik çözüm formülleri

	Basit kesme hali	Sabit şekil değiştirme hali	Eğilme hali
Gerçek			
$f_p(x)$	$f_p(x) = f\dfrac{\sinh((L-x)/l_0)}{\sinh(L/l_0)}$	$f_p(x) = f_{p0}\left(1 - \dfrac{\cosh((L-x)/l_0)}{\cosh(L/l_0)}\right)$	$f_p(x) = \left(b_3\tanh\left(\dfrac{L}{l_0}\right) - \dfrac{2b_1l_0L + b_2l_0}{\cosh(L/l_0)}\right)\sinh\left(\dfrac{x}{l_0}\right) - b_3\cosh\left(\dfrac{x}{l_0}\right) + b_1x^2 + b_2x + b_3$
$\tau(x)$	$\tau(x) = \dfrac{f}{l_0}\dfrac{\cosh((L-x)/l_0)}{\sinh(L/l_0)}$	$\tau(x) = \dfrac{-f_{p0}}{l_0}\dfrac{\sinh((L-x)/l_0)}{\cosh(L/l_0)}$	$\tau(x) = \dfrac{-1}{l_0}\left(b_3\tanh\left(\dfrac{L}{l_0}\right) - \dfrac{2b_1l_0L + b_2l_0}{\cosh(L/l_0)}\right)\cosh\left(\dfrac{x}{l_0}\right) + \dfrac{b_3}{l_0}\sinh\left(\dfrac{x}{l_0}\right) - 2b_1x - b_2$
Basitleştirilmiş			
$f_p(x)$	$f_p(x) = f\exp\left(\dfrac{-x}{l_0}\right)$	$f_p(x) = f_{p0}\left(1 - \exp\left(\dfrac{-x}{l_0}\right)\right)$	$f_p(x) = -f_{p0}\exp\left(\dfrac{-x}{l_0}\right) + b_1x^2 + b_2x + b_3$
$\tau(x)$	$\tau(x) = \dfrac{f}{l_0}\exp\left(\dfrac{-x}{l_0}\right)$	$\tau(x) = \dfrac{-f_{p0}}{l_0}\exp\left(\dfrac{-x}{l_0}\right)$	$\tau(x) = \dfrac{-f_{p0}}{l_0}\exp\left(\dfrac{-x}{l_0}\right) - 2b_1x - b_2$

5.3.5.2 Aktarma boyu

Güçlendirilmiş kiriş problemlerinde ankraj boyu ve aktarma boyu ile karşılaşılmaktadır. Ankraj boyu test biçimlerine bağlı çeşitli tanımlamalara uyar. Tek bindirmeli kayma testinde**,** ankraj boyu beton blok üzerindeki kompozitin birleşmiş kısmının uzunluğudur. Dört noktadan eğilme testinde, ankraj boyu kesme açıklıklarında yükleme noktalarının ötesinde birleşmiş levha donatısının uzunluğudur.

Betondan kompozite aktarılan yükleme boyunca mesafe çoğunlukla aktarma boyu olarak tanımlanır. Pratikte bu aktarma boyunun tanımı bir parça keyfidir. Kayma gerilmesinin ihmal edilebilir olduğu mesafe olarak tanımlanabilir. Oysa ki teoride bu gerilme sıfıra ulaşamaz. Bu olgu üç haldeki kayma gerilmesi ifadelerini basitleştirmede kullanılan eksponansiyel fonksiyondan dolayı l_0 değişimiyle direkt olarak ilgilidir. Tablo 5.2 değişimin birden çok değerine karşı kompozit boyunca kalan kayma gerilmesini gösterir. Açıkça görülür ki hiçbir kayma şekil değiştirmesi $\tau(3l_o)/\ \tau_{max}$ = 5%'den dolayı pratikte $3l_o$'ın ötesinde meydana gelemez. Aktarma boyu değişimin yaklaşık üç katıdır. Ankraj boyu, kompozit ve beton arasındaki doğru bir aktarımı sağlayabilmesi için şüphesiz ki değişimin üç katından da büyük olmalıdır [26].

Tablo 5.2 Kompozit boyunca kayma gerilmesindeki düşüş [26]

$\frac{x}{l_o}$	1	2	3
$\frac{\tau(x)}{\tau_{max}}$	$\frac{1}{e^1} \cong 0.37$	$\frac{1}{e^2} \cong 0.14$	$\frac{1}{e^3} \cong 0.05$

5.3.5.3 Maksimum kayma gerilmesi

Kayma gerilmesinin mutlak değerinin maksimum değeri, τ_{max}, x = 0'daki tekilliğinden dolayıdır (τ_{1max} bir eğilmiş kiriş halinde). $\tau_{1max} = f/l_0$, $\tau_{2max} = \tau_{3max} = f_{p0}/l_0$ (2. ve 3. haller için).

Maksimum değerin tam olarak kesim noktasında olmadığını ancak bu noktaya çok yakın olduğunu sonlu eleman modeli gibi çok gelişmiş analizler göstermiştir. Bununla birlikte, gerçek yeri burada tariflenen basitleştirilmiş çözümlerle

bulunamaz. l_0 değişimi sadece malzeme ve geometrik parametrelere bağlıdır (5.39). Diğer yandan, f tek bindirmeli kayma testinde kompozite uygulanan birim genişlikteki çekme kuvveti ve f_{po} ise kalan iki halde x = 0'da beton mesnete aynı uzamaya maruz bırakıldığında kompozitte oluşacak birim genişlikteki çekme kuvvetidir. Yukarıdaki denklem 2. ve 3. hallerde açıkça göstermektedir ki maksimum kayma gerilmesi kesim noktasında ise x = 0'da beton mesnedin alt yüzeyindeki boyuna uzama ile doğru orantılıdır. 1. halde bu maksimum kayma gerilmesi kompozite direkt olarak uygulanan f yüklemesiyle orantılıdır [26].

5.3.5.4 Sayısal örnek

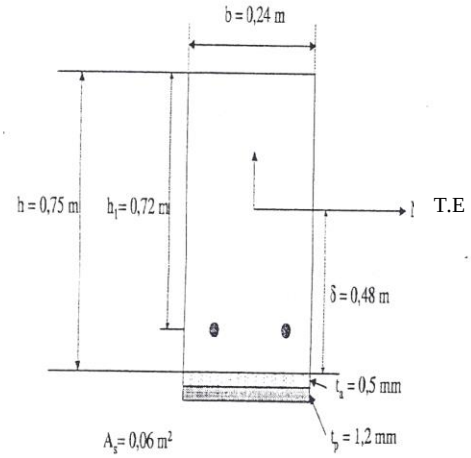
Yukarıdaki çalışmadan görüleceği gibi, $\tau_1(0)$ kesim noktasında eğilme momenti ile doğru orantılı, oysa $\tau_2(0)$ bunun birinci türevi (yani kesme kuvveti) ile doğru orantılıdır. Kesim noktasının, basit mesnetli güçlendirilmiş kiriş problemlerinin çoğunda mesnedin yanında olduğu belirtilmelidir. Literatürde pek vurgulanmayan ancak oldukça ilginç bir sonuç ta mesnetlerde eğilme momenti sıfır olduğundan kompozite zorla yüklenmiş boyuna uzamanın çok küçük olduğu gerçeğidir. Bu $\tau_1(0)$ kayma gerilmesi pik değeri için bir değere yol açar. Gerçekte, kesim noktası mesnete ne kadar yakınsa, $\tau_1(0)$ kayma gerilmesi pik değeri o kadar azdır. Kesim noktası ve mesnet arasındaki d mesafesi üstündeki $\tau_1(x)$'in bu bağımlılığı Chaturvedi ve Zayas tarafından bulunan sonuçlarla uyum içindedir. Bu bilim adamları 2L açıklığın %40'ından %100'üne kadar çeşitli L_c uzunluklarında kompozitle üç noktadan eğilme altında bazı betonarme kirişlerinin kırılma yükleri üzerinde durmuşlardır. Kesim noktasında beton tarafından zorlanmış boyuna uzamanın en fazla olduğu zaman ölçülen yükün daima hesaplananınkinden en fazla $L_c/2L$ = %40 kadar farklı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bu özellik basit bir sayısal örnek ile açıklanabilir. $M_0 = -1{,}5*10^4$ Nm ile 3a hali, F = 10^4 N ile 3b hali, q = $5*10^4$ N ile 3c haline karşılık gelen yükleme koşulları altındaki bir kiriş gözönüne alınsın. Açıklığı 3m ve kesit ölçüleri Şekil 5.29'daki gibidir. Malzeme özellikleri E_p = 165 GPa, G_a = 12GPa. Bütün geometrik, malzeme ve yükleme karakteristiklerinin, değişken olarak gözönüne alınan kesim noktası ve harici mesnet arasındaki d mesafesinden ayrı olarak sabit olduğu varsayılır. Kayma gerilmesi diyagramı her bir yükleme halinde d mesafesinin 25 mm'den 400 mm'ye kadar olan çeşitli değerleri için elde edilmiştir. Sabit eğilme momenti hali için (Şekil

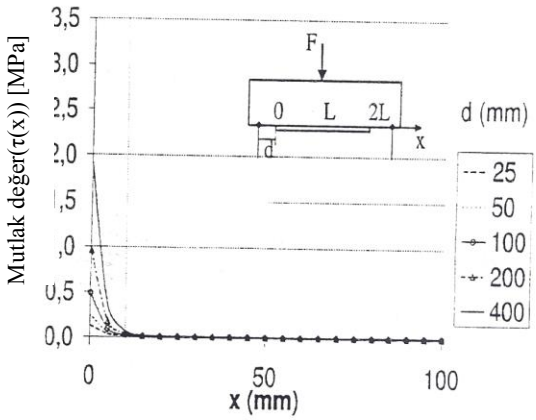
5.30) beton kirişin alt yüzündeki boyuna şekil değiştirme sabit olduğundan dolayı kayma gerilmesi pik değerinin kesim noktası ile sol taraftaki mesnet arasındaki d mesafesine bağlı olmadığı açıktır. 3 noktadan eğilme altında kiriş hali için (Şekil 5.31); beton kirişin alt yüzündeki boyuna şekil değiştirmenin bu yükleme halinde doğrusal olarak artışından dolayı, kayma gerilmesi pik değeri d mesafesinin artışı gibi doğrusal olarak artar. Kayma için asimptotik değer, kiriş teorisi içinde hesaplanmış kayma gerilmesi olan sıfır haricinde bir sabittir. Son yükleme hali için (Şekil 5.32); beton kirişin alt yüzündeki boyuna şekil değiştirmenin bu yükleme halinde parabolik bir gelişim gösterdiğinden, kayma gerilmesi pik değeri de d ile parabolik bir gelişim gösterir. Bu üç yükleme hali için, l_0 değişimi

$$l_0 = \sqrt{\frac{165*0{,}5*1{,}2}{12}} \cong 2{,}9 \text{ mm'dir.} \qquad (5.104)$$

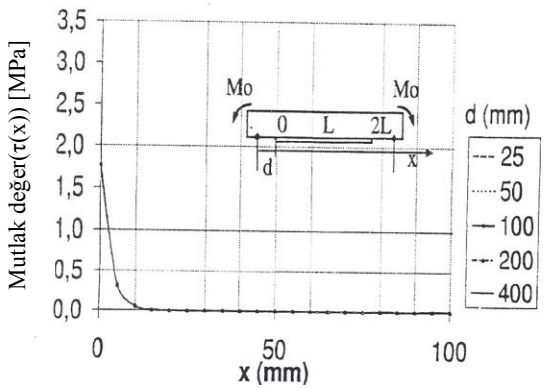
bu sebeple, aktarma boyu Şekil 5.29–5.30–5.31–5.32'den de kolaylıkla kontrol edilebileceği gibi yaklaşık $3l_0 \approx 8{,}7$ mm'dir.



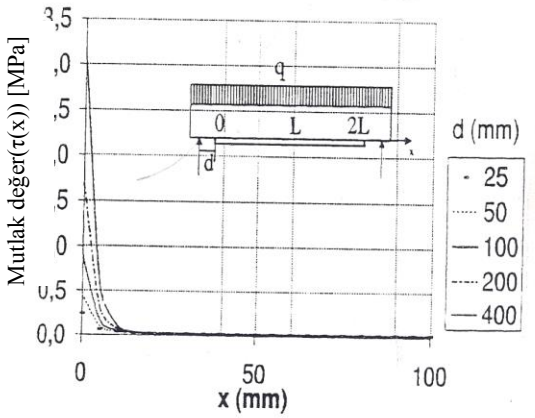
Şekil 5.29 Kesitin ölçüleri



Şekil 5.30 Üç noktadan eğilme hali için tipik mutlak değer (τ(x)) eğrisi



Şekil 5.31 Sabit eğilme momenti hali için tipik mutlak değer (τ(x)) eğrisi



Şekil 5.32 Sabit yayılı yük hali için tipik mutlak değer (τ(x)) eğrisi

5.3.6 Sonuç

Kayma gerilmesi dağılımı için analitik çözümünün üç farklı yükleme hali ele alınmıştır. Kesim noktasında kayma gerilmesi pik değerinin birleştirilmiş bir analizine yol gösteren üç hal için basitleştirilmiş ifadeye eşit olduğu gösterilir. Kayma gerilmesinin düşüşü l_0 değişimi tarafından idare edilir. Pratikte, değişimin üç katı dışında kayma gerilmesi ihmal edilebilir. Kayma gerilmesi pik değerinin büyüklüğü kesim noktasındaki kompozite beton mesnet tarafından yüklenmiş boyuna şekil değiştirmeye doğrudan bağlıdır. Eğilmiş kiriş halinde, özellikle eğilme momentinin ve kompozite yüklenmiş boyuna şekil değişiminin sıfır olduğu durumdaki gibi kesim noktası mesnetlerin yanında olursa, bu kayma pik değeri düşer [26].

5.4 Levha Ucundaki Gerilme Yığılmalarından Dolayı Oluşan Kırılma Yükünün Tahmini

Levhanın kesim noktasındaki normal gerilme ve kayma gerilmesinin hesabı için yapılan deneyler sonucunda onarılmış kirişlerde, boyuna donatı ve levha arasındaki beton katmanda oluşan yerel kırılmalardan dolayı göçmenin olduğu gözlenmiştir. Kırılmanın bu moduna, eğilme çatlaklarının yanısıra levha ucunda yerel gerilme yığılmaları neden olmuştur. Levhanın kesim noktasındaki normal gerilme ve kayma gerilmesinin hesabı için, malzemenin doğrusal elastik davranışı esas alınarak bir yöntem geliştirilmiştir. Tahmin edilen sonuçlar hem sonlu elemanlar metoduyla hem de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyuştuğu görülmüştür. Modele göre kesim noktasında ortaya çıkan en büyük kayma gerilmesi ve epoksi katmanındaki en büyük normal kuvvet aşağıda verilmiştir[27].

$$\tau_{\max} = t_f * \left(b_3 \sqrt{A} + b_2\right) \tag{5.105}$$

$$f_{n,\max} = \frac{K_n}{2\beta^3}\left(\frac{V_f}{E_f I_f} - \frac{V_c + \beta M_o}{E_c I_c}\right) + \frac{qE_f I_f}{b_f E_c I_c} \tag{5.106}$$

Burada; $b_{1\text{-}3}$; kayma/normal gerilme denklemlerinde kullanılan parametreleri, A; kayma/normal gerilme denklemlerinde kullanılan parametreyi, β; normal gerilme tanımlamasında kullanılan katsayıyı ve K_n; epoksinin birim alanındaki normal rijitliğini ifade etmektedir [27].

6. FRP'NİN BETONARME YAPILARDA KULLANIM NEDENLERİ

6.1 Eğilme Dayanımını Arttırmak

Elemanın uzunluğu boyunca yönlendirilmiş liflerin eğilme elemanlarının çekme yüzlerine yapıştırılmasıyla eğilme dayanımını % 10 ile % 160 arasında arttırdığı çeşitli araştırmalarda elde edilmiştir. Bununla birlikte süneklik ve kullanılabilirlik sınırları göz önüne alındığında % 5 ile % 40 arasında artış tasarım için makuldur [7].



Şekil 6.1 Döşeme altına iki doğrultuda yapıştırılmış FRP laminat [7]

6.1.1 Tasarım yaklaşımı

Eğilme elemanlarının FRP kompozitleri ile yapıştırılmasındaki hesap yaklaşımı sınır durumlar prensiplerini esas alır. Mukavemet, süneklik ve kullanılabilirlik gereksinimleri de araştırılabilir. Muhtemel göçme modları ve sınır durumların irdelenmesi gerekir. Burada tavsiye edilen tasarımda bir başlangıç FRP alanı elde edilir ve bu alan kesitin mukavemet, süneklik ve kullanılabilirlik yönünden ayrıntılı analizini esas alarak geliştirilir. Hesaplar çeşitli iterasyonlar yapılmasını gerektirir. Burada sadece kesitlerin analizi ve tasarımını değiştirecek kritik kesitlerdeki FRP alanına karar verildikten sonra gerekli detaylandırma yapılacaktır. Bunları yaparken aşağıdaki varsayımlardan yararlanılır.

- FRP ile yapıştırma yüzeyi arasında kayma yoktur.
- Düzlem kesit düzlem kalır (Bernoulli prensibi)
- FRP montajı sırasındaki yükler yapının elastik sınırları içersindedir.
- Mevcut durum çok iyi değerlendirilmiştir (Donatı alanı ve özellikleri, beton dayanımı vb.).

ACI 318'de öngörülen yük ve dayanım azaltma katsayıları kullanılmıştır. Ancak mevcut durumun değerlendirilmesi sonrası güvenlik katsayıları gerekli görüldüğü hallerde arttırılabilir [7].

6.1.2 Mevcut durumun değerlendirilmesi

Harici olarak birleştirilen takviye malzemesi (çelik, FRP) genelde gerilmesiz olarak monte edilir. Ancak yapıştırılacak yüzey yapının kendi ağırlığından veya montaj aşamasındaki başka yüklerden dolayı belli bir gerilme altındadır. Dolayısıyla bu gerilme FRP'deki şekil değiştirme seviyesini bulmak için (şekil değiştirme uyumundan belirlenen) beton alt yüzündeki gerilme seviyesinden çıkartılmalıdır.

$$\varepsilon_f = \left(\varepsilon_b - \varepsilon_{bi}\right) \leq \varepsilon_{fu} \tag{6.1}$$

6.1.2.1 Çatlamış kesitte başlangıç şekil değiştirmeleri

Başlangıç şekil değiştirmeleri güçlendirilmemiş kirişin çatlamış kesit özellikleri kullanılarak belirlenebilir. 3. varsayım esas alınarak beton alt yüzeyindeki başlangıç şekil değiştirmesi;

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{ip} * \left(h - kd\right)}{I_{cr} * E_c} \quad \text{'dır.} \tag{6.2}$$

6.1.3 Ön tasarım

Kazanılabilecek en yüksek yük seviyesi eğilme göçmesi, kayma göçmesi, sehim sınırları veya emniyet gerilmesi sınırları tarafından kontrol edilir.

6.1.3.1 Mevcut kayma dayanımı

Kazanılabilecek yük seviyesi mevcut yapının kayma mukavemetiyle kontrol edilebilir. Bundan dolayı onarımdan sonra, kirişin nominal kayma mukavemeti

güçlendirmeden dolayı artan yükler nedeniyle oluşan kesme kuvvetinden daha büyük olmalıdır [7].

$$\phi V_{n,mevcut} \geq V_{u,güçlendirilmiş} \tag{6.3}$$

6.1.3.2 Mevcut rijitlik

FRP kullanımı bir eğilme elemanının rijitliğini önemli ölçüde değiştirmez. İlave bir rijitlik kazandırırsa da bunun mertebesi büyük değildir. Mevcut kesit özellikleri ve güçlendirilmiş yapıdaki yükler kullanılarak yapılan sehim hesapları makûl değerler verir.

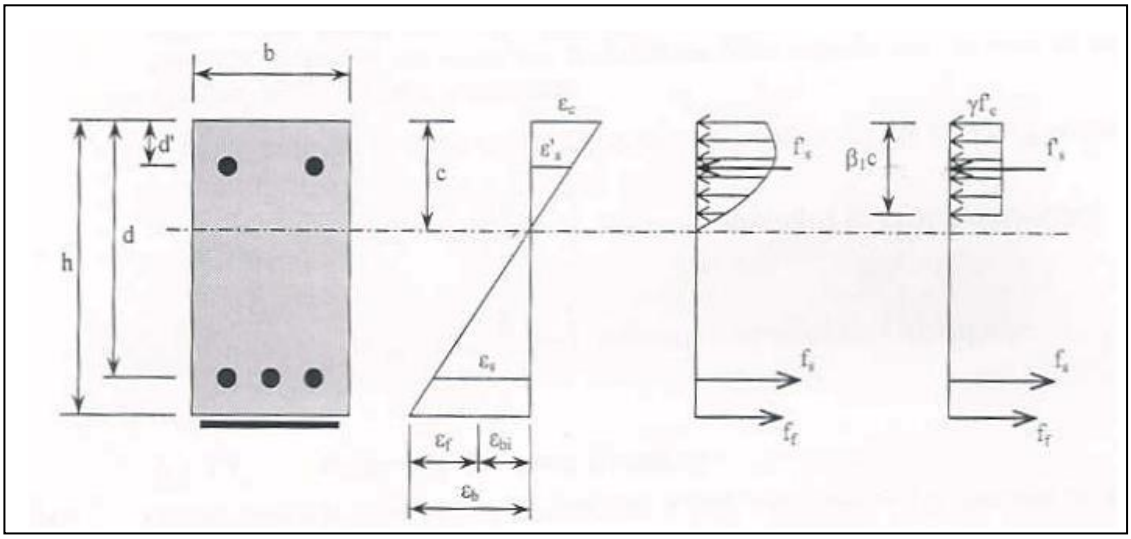
6.1.4 Nihai dayanım analizi

Nihai sınır durumu analizi gerilme dengesi, şekil değiştirme uyumluğu ve kırılma anında malzemenin özelliklerinin birleştirilmesiyle kesitin kapasitesini hesaplamak için kullanılır. Nihai durumda gerilme şekil değiştirme dağılımı Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Hesaplarda kolaylık sağlaması için betonun doğrusal olmayan gerilme şekil değiştirme davranışı, $\gamma.f'_c x\beta_1.c$ ölçülerinde bir dikdörtgen gerilme bloğu olarak düşünülebilir. FRP ile güçlendirilmiş bir eğilme elemanının nihai dayanımı ya betonun basınç etkisiyle ezilmesi ya da FRP'nin çekme çatlakları etkisiyle kopması şeklinde denetlenir. Kirişin nominal moment kapasitesinin değerini bulmak için, bu göçme modlarının mevcut donatının akmaya başlamasından önce mi sonra mı meydana geldiğini belirlemek önemlidir [7].

Sonuç olarak, elemanın davranışı göçme modunu sınırlamakla yakından ilgilidir. Verilen herhangi bir kesit için hangi göçme modunun etkili olacağını belirlemek gerekir. Muhtemel eğilme göçme modları aşağıda verilmiştir.

- Donatı akmadan önce betonun ezilmesi
- Donatı akmadan önce FRP'nin kopması
- Betonun ezilmesini takiben donatının akması
- FRP kopmasını takiben donatının akması

Bu eğilme göçme modlarının dışında beton ile FRP arayüzünde başka habersiz yerel göçmelerin olması çok muhtemeldir. Ancak bu tip göçme modları uygun detaylandırma ile önlenebilir.



Şekil 6.2 Nihai durumda betonarme bir kesitte gerilme ve şekil değiştirme dağılımı [7]

6.1.4.1 FRP ile güçlendirilmiş betonarme

FRP ile dayanımı arttırılmış bir betonarme kesitin nominal moment kapasitesinin genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$M_n = A_s f_s\left(d - \frac{\beta_1 * c}{2}\right) + A'_s f'_s\left(\frac{\beta_1 * c}{2} - d'\right) + 0.85 A_f f_f\left(h - \frac{\beta_1 * c}{2}\right) \qquad (6.4)$$

f_s terimi boyuna donatının akma gerilmesinde olmadığını gösterir. Kirişe ilave edilmiş FRP, moment kapasitesinin aşırı artmasına neden olur. Böylece donatı akmaz. Malzemelerdeki gerilmeler şekil değiştirme dağılımına ve göçme moduna bağlı olacaktır. Değişkenlerin sayısından dolayı, şekil değiştirme dağılımını ve göçme modunun tayinini yapabilen doğrudan bir yöntem yoktur. Deneme yanılma yöntemi yapılması gerekir. Bu yöntem tarafsız eksen derinliğini (c), ilk olarak tahmin eder ve bu değere göre göçme modu belirlenir. Tahmin edilen bu derinlik doğrulanır veya şekil değiştirme uyumu, malzemenin özellikleri ve kuvvet dengesinden yararlanılarak yeniden değiştirilir. Birçok durumda ilk yaklaşım olarak c = 0,15d kabulu makul sonuçlar verir. c'nin tahmini yapılarak aşağıdaki kriterlere göre göçme modu kontrolü yapılır [7].

$\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi} \rangle \varepsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right)$ ise göçme beton ezilmesi ile oluşur.

$\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi} \langle \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right)$ ise göçme FRP kopması ile oluşur.

Beton ezilmesi ile oluşan göçme

Göçmenin beton ezilmesi ile meydana geldiği durumda göçme anında betondaki şekil değiştirme kendisinin limit şekil değiştirmesi ε_{cu} olacaktır.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \tag{6.5}$$

Çekme ve basınç donatılarındaki şekil değiştirme seviyeleri betonarmedeki bu bilinen şekil değiştirme seviyesi ve varsayılan tarafsız eksen derinliği esas alınarak belirlenebilir.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d-c}{c} \right) \tag{6.6}$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} \left(\frac{c-d'}{c} \right) \tag{6.7}$$

FRP'deki şekil değiştirme, nihaî durumda beton alt yüzündeki şekil değiştirme bulunarak ve FRP montajı sırasında beton alt yüzündeki şekil değiştirmeden çıkartılarak bulunur.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \tag{6.8}$$

Donatıdaki gerilmeler, akma noktasının altındaki şekil değiştirmelerle orantılı olarak hesaba katılabilir ve (elasto-plastik yaklaşımı kullanılarak) akma noktasının ötesindeki şekil değiştirmeler için akma gerilmesi olarak alınabilir.

$$f_s = E_s * \varepsilon_s \leq f_y \tag{6.9}$$

$$f'_s = E_s * \varepsilon'_s \leq f_y \tag{6.10}$$

FRP tekstil göçmeye kadar lineer elastik davranır.

$$f_f = E_f * \varepsilon_f \tag{6.11}$$

c'nin tahmin edilen değeri aşağıdaki ifadelerden elde edilen değerle kontrol edilebilir.

$$c = \frac{A_s f_s - A_s' f'_s + A_f f_f}{0.85 f_c' \beta_1 b} \tag{6.12}$$

FRP kopması ile oluşan göçme

FRP kopmasıyla oluşan göçme etkisindeki bir kesitin nominal moment kapasitesini hesap etmek için kullanılan hesap yöntemi benzerdir. Bu durumda, FRP'deki bilinen şekil değiştirme değeri malzemenin her yerindeki şekil değiştirme seviyesini belirlemek için varsayılan tarafsız eksenin yeri ile birlikte kullanılabilir [7].

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} = \varepsilon_b - \varepsilon_{bi} \tag{6.13}$$

$$\varepsilon_c = \left(\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi}\right)\left(\frac{c}{h-c}\right) \tag{6.14}$$

$$\varepsilon_s = \left(\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi}\right)\left(\frac{d-c}{h-c}\right) \tag{6.15}$$

$$\varepsilon'_s = \left(\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi}\right)\left(\frac{c-d'}{h-c}\right) \tag{6.16}$$

Donatıdaki gerilmeler denklem 6.9 ve 6.10'dan bulunabilir. FRP'deki nihai çekme gerilmesi f_f olarak alınabilir. Beton kendi nihai basınç kısalmasına ulaşamayacağından gerilme bloğunu kullanmak uygun değildir. Betonun gerilmesi uygun bir non-lineer gerilme-şekil değiştirme ilişkisiyle veya betondaki kısalmanın belirli seviyeleri için uygun bir dikdörtgen gerilme bloğuyla belirlenebilir. Gerilme bloğu için boyutsuz parametreler aşağıda verilmiştir.

$$\beta_1 = 2 - \frac{4\left[(\varepsilon_c/\varepsilon'_c) - \tan^{-1}(\varepsilon_c/\varepsilon'_c)\right]}{(\varepsilon_c/\varepsilon'_c)\ln\left(1+\varepsilon_c^{\,2}/\varepsilon'^{\,2}_c\right)} \tag{6.17}$$

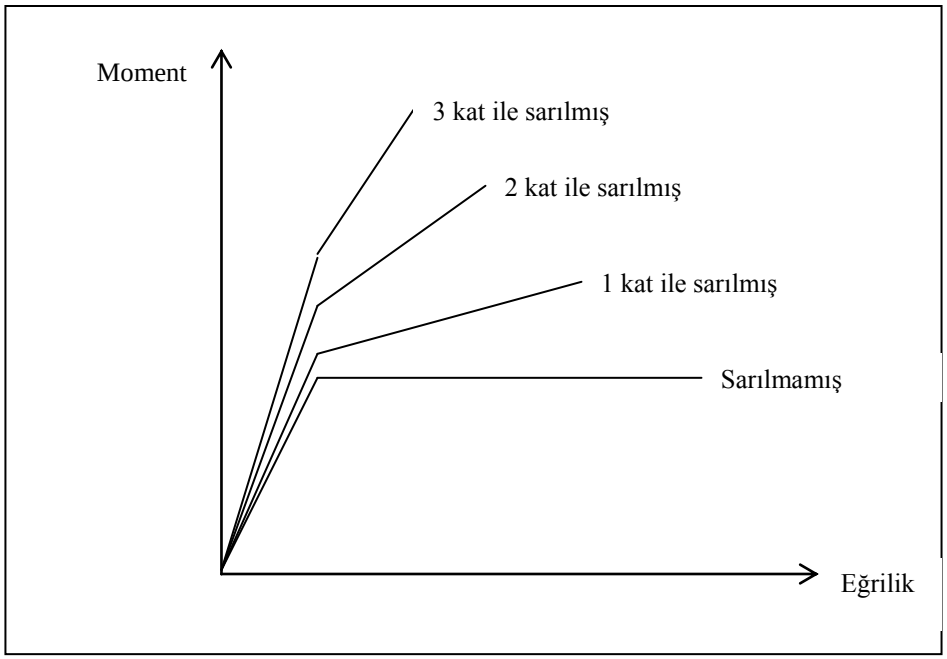
$$\gamma = \frac{0.90\ln\left(1+\varepsilon_c^{\,2}/\varepsilon'^{\,2}_c\right)}{\beta_1\,\varepsilon_c/\varepsilon'_c} \tag{6.18}$$

Burada $\varepsilon'_c = \frac{1.71 f'_c}{E_c}$ ve $\tan^{-1}\left(\varepsilon_c / \varepsilon'_c\right)$ radyan cinsinden hesaplanır. Eşdeğer gerilme bloğu metodu kullanılarak iç kuvvet dengesi ifadesi aşağıda çıkarılmıştır. Bu ifade yine tahmin edilen tarafsız eksen derinliğini kontrol için kullanılır.

$$c = \frac{(A_s f_s) - (A_s' f'_s) + (A_f f_{fu})}{\gamma * f_c' * \beta_1 * b} \tag{6.19}$$

6.1.5 Süneklik

Eğilme dayanımı arttırmak için kullanılan FRP, sistemin sünekliğini düşürür. Şekil 6.3 FRP ile güçlendirilmiş kirişin idealleştirilmiş moment eğrilik ilişkisini göstermektedir. FRP levhalı kirişin moment kapasitesindeki önemli artışların hatırına bu süneklik kaybına katlanılabilir. Bir çok durumda süneklik kaybı ihmal edilebilir. Bununla birlikte önemli bir süneklik kaybına uğramış kesitler mutlaka belirlenmelidir. Süneklik düzeyi düşük bir kesit, daha yüksek dayanımlı yedeğiyle karşılanmalıdır. Daha yüksek dayanımlı bu yedek kat sünek kesitlerde 0.90, gevrek kesitlerde 0.70 lik bir dayanım azaltma katsayısı uygulanarak sağlanır.



Şekil 6.3 Çeşitli seviyelerde güçlendirilmiş betonarme kirişler için idealleştirilmiş tipik moment eğrilik ilişkisi [7]

Donatının akmaya başlamadan betonun ezilmesi veya FRP'nin kopması göçmelerinin ikisi de gevrek göçme modlarıdır. Betonun ezilmesini takiben çeliğin

akması, akma şekil değiştirmesinin üzerine daha ne kadar şekil değiştirebileceğine bağlı olarak süneklik seviyesini belirler. FRP kopmasını takiben donatının akması genellikle sünekdir. Çünkü FRP kopmasına neden olan şekil değiştirmenin seviyesi donatının akmasına neden olan şekil değiştirme seviyesinden oldukça fazladır. Buna ek olarak, çekme donatısı ve FRP tekstili tarafsız eksenden benzer uzaklıktadır.

Nihai sınır durumunda göçme modlarına ilave olarak süneklik, servis koşulları tarafından etkilenir. Eğer çekme donatısı servis yükleri altında akarsa hem süneklik hem de kalan gerilmeler sorun olur. Bu gibi durumlara karşı önlem almada gerilme için işletme gerilmeleri sınırları kullanılmalıdır [7].

6.1.5.1 Donatısız beton

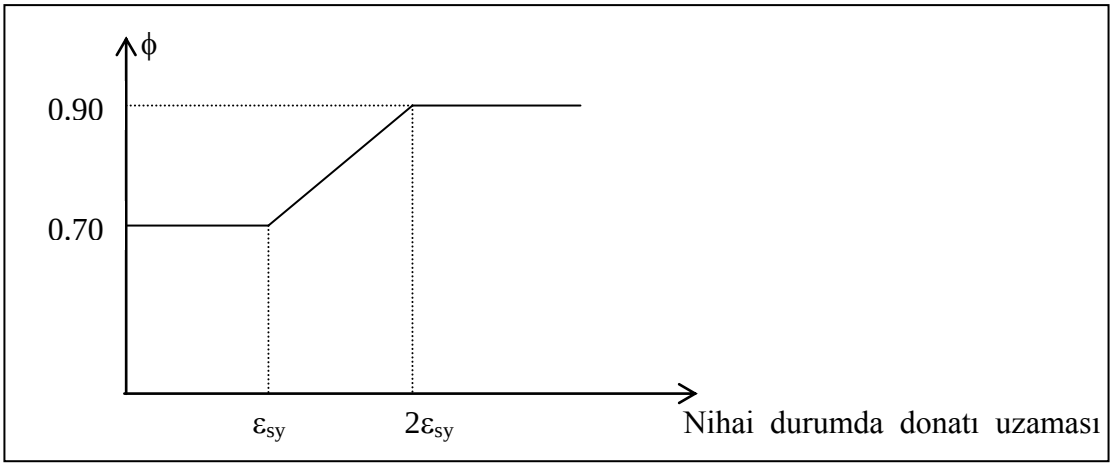
Her ne kadar ana donatı olarak harici yapıştırılmış FRP kullanımı tavsiye edilmese de tasarım aşamasında donatının katsayısı ihmal edilebilir. Eğer güçlendirme sisteminin tasarımında donatı hesaba katılmazsa kırılma gevrek olur. Bundan dolayı, dayanım azaltma katsayısı ϕ yeterli bir dayanım sağlayabilmek için 0,7 alınmalıdır.

6.1.5.2. Betonarme

Betonarmede yalnız betonun ezilmesi, gevrek kırılmaya yol açar. Bu nedenden dolayı bir dayanım azaltma katsayısı kullanılması tasviye edilir. Burada ε_s nihai sınır durumunda çelikteki uzamadır ve $\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d-c}{c}\right)$ formülüyle bulunur.

$$\phi = \begin{cases} 0.90 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \varepsilon_s \geq 2\varepsilon_{sy} \ldots\ldots\ldots için \\ 0.50 + 0.20\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{sy}} \ldots\ldots\ldots\ldots \varepsilon_{sy} \langle \varepsilon_s \langle 2\varepsilon_{sy} \ldots\ldots için \\ 0.70 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \ldots\ldots\ldots için \end{cases} \quad (6.20)$$

Bu ifade kendi akma uzamasının iki katının üzerinde çeliğin uzadığı sünek kesitler için 0,90'lık azatma katsayısını, çeliğin akmadığı gevrek kesitler için 0,70'lik bir azaltma katsayısını belirler. Ayrıca bu iki uç arasında azaltma katsayısı için bir doğrusal geçiş sağlar.



Şekil 6.4 Sünekliğin bir fonksiyonu olarak dayanım azaltma katsayısını temsil eden grafik

6.1.6 Kullanılabilirlik gereksinimleri

Kullanılabilirlik sınır durumları iyi tasarlanmış bir güçlendirme sistemi elde etmek için çok önemlidir. FRP takviyesi tarafından sağlanan kesitin nihai yük taşıma kapasitesindeki artış rijitlikteki önemli artıştan dolayı değildir. Bir eğilme elemanı üzerindeki talep artarsa, servis yük gerilmeleri ve sehimleri üzerindeki sahip olacağı artışın etkilerini belirlemek önemli olur.

6.1.6.1 İşletme gerilme analizi

Servis yükleri altında çeliğin akması mutlaka önlenmelidir. Geleneksel betonarme tasarımından farklı olarak, nihai sınır durumuna ilaveten emniyet gerilmelerinin de kontrol edilmesi gerekir.

Emniyet gerilmeleri

Çeşitli malzemeler için emniyet gerilmeleri tablo 6.1'de gösterilmiştir. Beton ve yumuşak basınç çeliği için verilen değerler standartlardan alınmıştır. Yumuşak çekme çeliği için (FRP gibi) çekme gerilmesi taşımaya yatkın ilave bir malzemenin bulunmasından dolayı daha yüksek bir gerilme alınabilir. FRP malzemeleri için emniyet gerilmeleri uzun dönem performasyonlarını sürdürebilecekleri şekilde belirlenmiştir. Daha ileri azaltmalar için süre ve çevre katsayıları C_D ve C_E kullanımı tavsiye edilir. Nihai gerilmelerinden (cam lifler için %30'dan, karbon lifler için %95'den) daha büyük devamlı yüklemeye maruz kaldıklarında sünme kırılmasından dolayı göçme meydana gelebilir. Süre katsayısı bu davranışı ifade eder. Çevre

katsayısı koruma kaplaması olmadan yapılan uzun dönem testlerden elde edilen sonuçlardan belirlenir. Bu katsayı en uç koşullar altında ve çevresel etkilere maruz malzemelerin performanslarının hesaplarda daha doğru şekilde kullanılmasını sağlar [7].

Tablo 6.1 Güçlendirmede kullanılan malzemelerin emniyet gerilmeleri [7]

Malzeme	**Emniyet Gerilmeleri**
Beton(Basınç)	$0.45f_c$
Yumuşak Çekme Çeliği	$0.80f_y$
Yumuşak Basınç Çeliği	$0.40f_y$
Öngerme Çeliği	$0.74f_{pu}<0.82f_{py}$
Karbon FRP (Çekme)	$0.33C_DC_Ef_{fu}$
Cam FRP (Çekme)	$0.33C_DC_Ef_{fu}$

Tablo 6.2 FRP için süre ve çevre katsayıları tablosu [7]

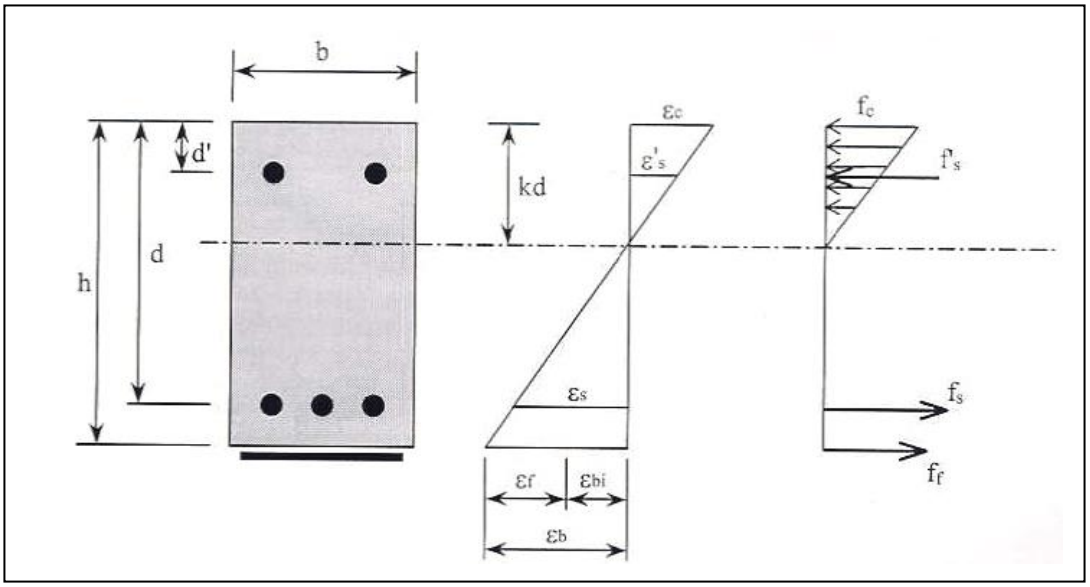
FRP Tipi	**Süre Katsayısı, C_D**	**Çevre Katsayısı, C_E**
Karbon FRP	1.00	0.65-1.00
Cam FRP	0.30	0.60-1.00

Betonarmede işletme gerilmeleri

Betonarmedeki işletme gerilmelerinin hesabı çatlamış kesitin tarafsız eksen derinliğini belirlemeyi (bütün malzemelerin lineer elastik davrandığı kabulüyle) ve servis momentleri esas alınarak her bir malzemedeki gerilmeleri hesaplamayı içerir (Şekil 6.5). Geleneksel betonarme hesaplarına benzer şekilde, işletme gerilmeleri altında tarafsız eksen derinliği dönüştürülmüş kesitin alanlarının birinci momenti alınarak hasaplanabilir. FRP'nin dönüştürülmüş alanı FRP'nin alanı ile FRP'nin betona modüler oranının çarpımıyla elde edilebilir. Bu yöntem FRP'nin başlangıç şekil değiştirme seviyesindeki farklılığı ihmal etse de, başlangıç şekil değiştirme seviyesi elastik tarafsız eksen derinliğini çok etkilemez.

$$f_s = \frac{\left\lfloor M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - kd/3\right)\right\rfloor (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - kd/3\right)(d - kd) + A'_s E_s \left(kd/3 - d'\right)(kd - d') + A_f E_f \left(h - kd/3\right)(h - k_d)} \tag{6.21}$$

$$f_c = f_s \left(\frac{E_c}{E_s}\right) \frac{kd}{d - kd} \tag{6.22}$$



Şekil 6.5 İşletme gerilmesi analizi için gerilme ve şekil değiştirme dağılımı [7]

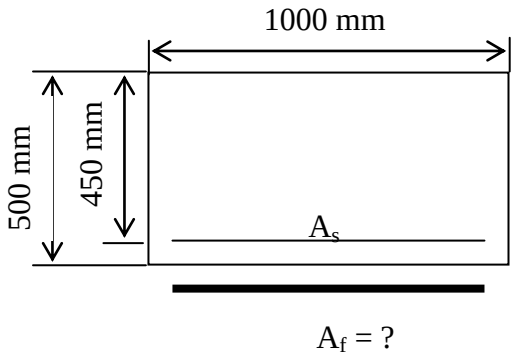
$$f'_s = f_s \frac{kd - d'}{d - kd} \tag{6.23}$$

$$f_f = f_s \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \tag{6.24}$$

6.1.7 Bir köprü tabliyesinin eğilme dayanımının arttırılmasının hesabı

İstenilen: Mevcut bir betonarme köprü tabliyesinin ilâve yükten dolayı takviye edilmesi istenmektedir [7].

Verilenler:



Şekil 6.6 Kesit geometrisi

f_y = 210 MPa

f'_c = 20 MPa

M_s = 190000000 Nmm

M_u = 298000000 Nmm

E_c = 28500 MPa f_{fu} = 3790 MPa

M_{ip} = 28000000 Nmm $I_{cr} = 10{,}7x10^8$ mm^4

k = 0,326 $A_s = \phi$ 22/12 = 3167 mm^2/m

- Mevcut Eğilme Kapasitesinin Tayini

$$a = \frac{A_s * f_y}{0.85 * f'_c * b} \qquad a = \frac{3167 * 210}{0{,}85 * 20 * 1000} \qquad a = 39.12mm$$

$$\phi M_n = \phi A_s * f_y * \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 0.90 * 3167 * 210 * \left(450 - \frac{39{,}12}{2} \right) = 257640000Nmm = 257{,}64kNm$$

$\phi M_n = 257{,}64kNm \langle M_u = 298kNm$ olduğundan güçlendirme yapılması gerekir.

Kesitin mevcut kapasitesi tasarım moment kapasitesinden %14 aşağıdadır. Güçlendirilme amacıyla devamlı ve tekrarlı yüklemeler altında yüksek dayanıma sahip CF130 kullanımı uygundur.

- Gerekli CF130 Miktarının Hesabı

FRP alanını tasarlamak için ilâve çekme kuvvetini(T), esas alan gerekli alan kabaca hesaplanır.

$$T = \frac{M_u - \phi M_n}{0.90 * d} \qquad T = \frac{298000000 - 257640000}{0.90 * 450} = 99654N$$

$$A_{f,tah\min} = \frac{T}{\phi 0.85 * f_{fu}} \qquad A_{f,tah\min} = \frac{99654}{0.90 * 0.85 * 3790} = 34{,}37mm^2$$

Bu alan esas alınarak FRP'nin kalınlığı hesaplanabilir. Tabliyeler için genellikle eşit aralıklı şeritler kullanılır. Böylece tahmin edilmiş genişlik aşağıdaki yöntemle hesaplanabilir.

$$w_f = \frac{A_f}{n * t_f} \qquad w_f = \frac{34{,}37}{1 * 0.165} \qquad w_f = 208.3mm$$

1 kat 25 cm genişlikte seçilirse ; $A_f = 250 * 1 * 0.165 = 41.25mm^2$

- Beton Yüzündeki Şekil Değiştirme Durumunun Bulunması

FRP montajı sırasındaki toplam moment $M_{ip} = 28000000 Nmm$'dir. Kesitin çatladığı varsayımıyla bu moment için şekil değiştirme bulunabilir.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{ip} * (h - kd)}{I_{cr} * E_c}$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{28000000 * (500 - 0.326 * 450)}{1070000000 * 28500} = 0.00032$$

- Tarafsız Eksen Derinliğinin Tahmini

İlk yaklaşım olarak c = 0.15d seçilebilir. Böylece $c = 0.15 * 450 = 67.5mm$
Bu c değerine göre kırılma modunun bulunması;

$$\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi} \langle \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) \quad \Rightarrow \quad 0.017 + 0.00032 \langle 0.003 \left(\frac{500 - 67.5}{67.5} \right)$$

$$\Rightarrow 0.01732 \langle 0.0192 \Rightarrow \text{kırılma modu FRP kopmasıdır.}$$

- Her bir malzemedeki şekil değiştirme seviyelerinin bulunması

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} = 0.017$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{h-c} \right) \qquad \varepsilon_c = (0.01732) \left(\frac{67.5}{500 - 67.5} \right) = 0.0027$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fu} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \qquad \varepsilon_s = (0.01732) \left(\frac{450 - 67.5}{500 - 67.5} \right) = 0.0153$$

- FRP ve donatıdaki gerilme seviyelerinin bulunması

$$f_f = f_{fu} = 3790 MPa$$

$$f_s = f_{sy} = 210 MPa \qquad \text{çünkü} \qquad \varepsilon_s \rangle \rangle \varepsilon_{sy}$$

- Bir eşdeğer beton gerilme bloğu tanımlamak için parametrelerin bulunması

$$\varepsilon'_c = \frac{1.71 * f'_c}{E_c} \qquad \varepsilon'_c = \frac{1.71 * 20}{28500} \qquad \varepsilon'_c = 0.00120$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} = \frac{0.00270}{0.00120} \qquad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} = 2.25$$

$$\beta_1 = 2 - \frac{4\left[\left(\varepsilon_c / \varepsilon'_c\right) - \arctan\left(\varepsilon_c / \varepsilon'_c\right)\right]}{\left(\varepsilon_c / \varepsilon'_c\right)\ln\left(1 + \varepsilon^2{}_c / \varepsilon'^2{}_c\right)} = 2 - \frac{4\left[(2.25) - \arctan(2.25)\right]}{(2.25) * \ln(1 + (2.25)^2)} = 0.918$$

$$\gamma = \frac{0.901\ln\left(1 + \varepsilon_c{}^2 / \varepsilon'_c{}^2\right)}{\beta_1 * \varepsilon_c / \varepsilon'_c} = \frac{0.901\ln\left(1 + (2.25)^2\right)}{0.918 * 2.25} = 0.785$$

- Tahmin Edilen c'nin Kontrolü

$$c = \frac{(A_s f_s) - (A_s{}' f'_s) + (A_f f_{fu})}{\gamma * f_c{}' * \beta_1 * b} = \frac{(3167 * 210) - 0 + (41.25 * 3790)}{0.785 * 20 * 0.918 * 1000} = 56.98mm$$
$$\neq 67.5mm$$

Dolayısıyla c'nin değeri değiştirilerek işlemlerin tekrarlanması gerekir. Yapılan deneme-yanılma metodunun özeti tabloda verilmiştir.

Tablo 6.3 c'nin elde edilmesi için deneme-yanılma hesaplamalarının özeti

c_{tahmin} (mm)	Kırılma Modu	ε_f	f_f MPa	ε_s	f_s MPa	ε_c	β_1	γ	$c_{bulunan}$ (mm)
67.5	FRP	0.017	3790	0.01532	210	0.00270	0.918	0.785	56.98
62.5	FRP	0.017	3790	0.01534	210	0.00247	0.897	0.807	56.73
57	FRP	0.017	3790	0.01537	210	0.00223	0.874	0.828	56.78

Böylece c'nin değeri 57 mm olarak alınır.

- Nominal Moment Kapasitesinin Hesabı

$$M_n = A_s f_s\left(d - \frac{\beta_1 * c}{2}\right) + A'_s f_s\left(\frac{\beta_1 * c}{2} - d'\right) + 0.85A_f f_f\left(h - \frac{\beta_1 * c}{2}\right)$$

$$M_n = (3167 * 210)\left(450 - \frac{(0.874 * 57)}{2}\right) + 0 + (0.85 * 41.25 * 3790)\left(500 - \frac{(0.874 * 57)}{2}\right)$$

$$M_n = 345848629Nmm = 345{,}85kNm$$

- Tasarım Moment Kapasitesinin Hesabı

Nihaî durumda donatıdaki şekil değiştirme kendi akma uzamasının iki katından daha büyük olduğundan kesit yeterli sünekliğe sahiptir. Bu yüzden ϕ dayanım azaltma katsayısı 0.90 alınır.

$$\phi M_n = 0.90 * 345848629$$

$$\phi M_n = 311260000 Nmm \rangle M_u = 298000000 Nmm$$

İşletme Gerilmelerinde Kullanılabilirliğin kontrolü

- Çatlak Durumda Elastik Derinliğin Tarafsız Eksene Mesafesi, k_d 'nin hesabı

Betonun, çeliğin (betona dönüştürülmüş) ve FRP'nin (betona dönüştürülmüş) alanlarının birinci momentleri alınarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\left[\frac{(kd)^2 * b}{2}\right] - \left[(n_s A_s) * (d - kd)\right] - \left[(n_f A_f) * (h - kd)\right] = 0$$

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{28500} = 7.02 \qquad n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{230000}{28500} = 8.07$$

$$\left[\frac{(kd)^2 * 1000}{2}\right] - \left[(7.02 * 3167) * (450 - kd)\right] - \left[(8.07 * 41.25) * (500 - kd)\right] = 0$$

$$kd = 166.2mm \qquad \Rightarrow \qquad k = \frac{166.2}{450} = 0.369$$

- M_s = 190000000 Nmm'lik kullanım momenti altında çelikdeki gerilmenin hesabı

$$f_s = \frac{\left\lfloor M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - kd/3\right)\right\rfloor * (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - kd/3\right)(d - kd) + A'_s E_s \left(kd/3 - d'\right)(kd - d') + A_f E_f \left(h - kd/3\right)(h - k_d)}$$

$$f_s = 150MPa \quad \langle \quad 0.8 f_y = 168MPa$$

- Kullanım Durumunda FRP'deki Gerilme

$$f_f = f_s \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f$$

$$f_f = 150 \left(\frac{230000}{200000}\right) \frac{500 - 166.2}{450 - 166.2} - (0.00032 * 230000)$$

$$f_f = 129.3MPa \quad \langle \quad 0.33 * C_D * C_E * f_{fu} = 0.33 * 0.95 * 0.65 * 3790 = 772MPa$$

- Kullanım Durumunda Betondaki En Fazla Basınç Gerilmesinin Hesabı

$$f_c = f_s\left(\frac{E_c}{E_s}\right)\frac{kd}{d-kd}$$

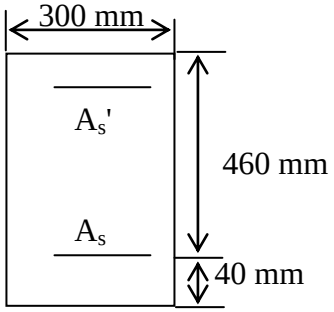
$$f_c = 150*\left(\frac{28500}{200000}\right)*\left(\frac{166.2}{(450-166.2}\right) = 12.5MPa \rangle\ 0.45 f_c' = 9MPa$$

Mevcut beton kalitesi emniyet gerilmesi tahkikini sağlamamıştır. Kullanılabilirlik sınır durumu için böyle bir takviye yapılmasının uygun olmayacağı anlaşılmıştır.

6.1.8 Bir kirişin eğilme dayanımının arttırılmasının hesabı

İstenilen: Çift donatılı dikdörtgen kesitli bir kirişin moment taşıma gücünün FRP laminatı kullanılarak ne kadar arttırılabileceğinin hesabı.

Verilenler: Malzeme bilgileri ve kesit geometrisi



b/h=300mm/500mm

C/16/S220 $E_s = 2*10^5$ MPa

$A_s = 5Ø22$ $A_s' = 3Ø14$

Şekil 6.7 Kesit geometrisi

$$\rho = \frac{1901}{300\times 460} = 0{,}01378 \qquad \rho' = \frac{462}{300\times 460} = 0{,}00335$$

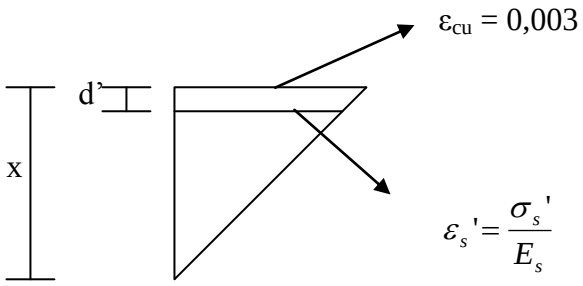
$$\rho - \rho' = 0{,}01043$$

$$\rho_b = 0{,}85 * k_1 * \frac{f_{cd}}{f_{yd}} * \frac{600}{600 + f_{yd}} \Rightarrow \quad 0{,}85*0{,}85*\frac{11}{191}*\frac{600}{600+191} = 0{,}0316$$

$$\rho_m = 0{,}85 * \rho_b \Rightarrow \qquad \rho_m = 0{,}85*0{,}0316 = 0{,}0268$$

$$\rho - \rho' = 0{,}01043 < \rho_m$$

$$\rho - \rho' = 0{,}01043 < 0{,}0268 \qquad \rightarrow \qquad \text{Çekme donatısı akıyor.}$$



Şekil 6.8 Şekil değiştirmelerin oranlanması

$$\frac{\varepsilon_s'}{\varepsilon_{cu}} = \frac{x - d'}{x} \qquad x = \frac{a}{k_1} \qquad (a = k_1 * x)$$

$$\frac{\frac{\sigma_s'}{\varepsilon_s}}{\varepsilon_{cu}} = 1 - \frac{d'}{a/k_1} \quad \Rightarrow \quad \sigma_s' = 60 * (1 - \frac{k_1 * d'}{a}) \quad \Rightarrow \quad \sigma_s' = 600 * (1 - \frac{0{,}85 * 40}{a})$$

$$\sigma_s' = \frac{600a - 20400}{a}$$

$$A_s * f_{yd} = (0{,}85 * f_{cd} * b_w * a) + (A_s' * \sigma_s')$$

$$1901 * 191 = (0{,}85 * 11 * 300 * a) + (462 * \frac{600a - 20400}{a})$$

$$2805a^2 - 85891a - 9424800 = 0 \quad \Rightarrow \quad a_1 = 74{,}8mm \qquad a_2 = -44{,}9mm$$

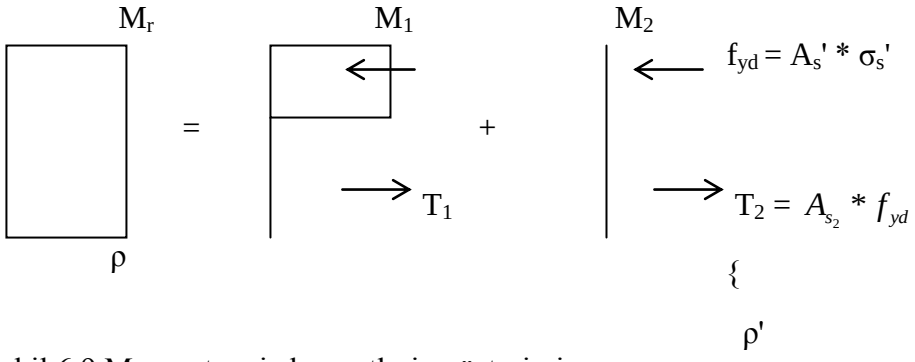
$$\sigma_s' = \frac{600a - 20400}{a} \quad \Rightarrow \quad \frac{(600 * 74{,}8) - 20400}{74{,}8} \quad \Rightarrow \quad \sigma_s' = 327{,}3 \text{ MPa}$$

$\sigma_s' = 327{,}3$ MPa> f_{yd} =191 MPa Basınç donatısı akıyor $\sigma_s' = f_{yd}$

$A_s' = A_{s_2} = 462 \text{ mm}^2$

$A_{s_1} = A_s - A_{s_2} \quad \Rightarrow \quad A_{s_1} = 1901 - 462$

$\Rightarrow \quad A_{s1} = 1439 \text{ mm}^2$



Şekil 6.9 Moment ve iç kuvvetlerin gösterimi

$$M_1 = A_{s_1} * f_{yd} * (d - \frac{a}{2}) \qquad a = \frac{A_s * f_{yd}}{0{,}85 * f_{cd} * b_w}$$

$$a = \frac{1439 * 191}{0{,}85 * 11 * 300} \qquad \Rightarrow \qquad a = 98{,}0 \text{ mm}$$

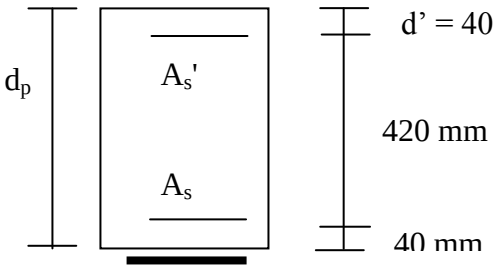
$$M_1 = A_{s_1} * f_{yd} * (d - \frac{a}{2}) = 1439 * 191 * (460 - \frac{98}{2}) = 112962939 \text{ Nmm} = 112{,}96 kNm$$

$$M_2 = A_s' * \sigma_s' * (d - d') = 462 * 191 * (460 - 40) = 37061640 \text{ Nmm} = 37{,}06 kNm$$

$$M_r = M_1 + M_2$$

$M_r = 112962939 + 37061640 = 150024579$ Nmm= 150,02kNm (Levhasız kirişin taşıma gücü momenti)

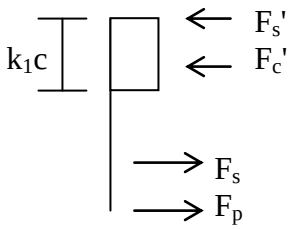
t_p = 1,4 mm olan Sika Carbodur M 914 tipi bir FRP laminat, kirişin altına yapıştırılırsa kirişin taşıyabilecegi eğilme momentinin hesabı ise şu şekilde yapılabilir.



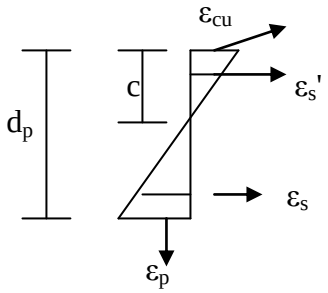
Şekil 6.10 Kesite FRP'nin ilâvesi

A_p = 126 mm^2 E_p= 230000 MPa $c = \frac{a}{k_1} = \frac{98{,}0}{0{,}85} = 115{,}3$ mm

$d_p = 500 + \frac{0{,}14}{2} = 500{,}7$ mm w_p=9 mm



Şekil 6.11 Kuvvet dengesi



Şekil 6.12 Şekil değiştirmelerin oranlanması

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{cu} * \frac{d_p - c}{c} = 0{,}003 * \frac{(500{,}7 - 115{,}3)}{115{,}3} = 0{,}010$$

$$\varepsilon_s' = \frac{\sigma_s'}{E_s} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{191}{2.10^5} = 0{,}00095$$

$$M_u = [\ A_s * f_y * (d - \frac{k_1 * c}{2})\ ] + [\ A_p * E_p * \varepsilon_p * (d_p - \frac{k_1 * c}{2})\ ] + [\ A_s' * E_s' * \varepsilon_s' * (\frac{k_1 * c}{2} - d')\ ]$$

$$M_u = \left[1439 * 191 * (460 - \frac{98}{2})\right] + \left[126 * 230000 * 0{,}010 * (500{,}7 - \frac{98}{2})\right]$$

$$+ \left[462 * 200000 * 0{,}00095 * (\frac{98}{2} - 40)\right]$$

$M_u = 112962939 + 130902660 + 790020 = 244655619$ Nmm=244,5kNm olarak elde edilir.

FRP laminatı eklenerek bulunan momentle laminat eklenmeden bulunan moment karşılaştırılabilir. Böylece FRP laminatı ilavesinin moment taşıma kapasitesinde sağladığı artış yüzdesi $\frac{244655619 - 150024579}{150024579} * 100 = \%63$ 'dür.

6.2 Kayma Dayanımını Arttırmak

Enine olarak yönlendirilmiş FRP'nin kirişe tamamen ya da kısmi olarak sarılması, kirişin kayma dayanımını arttırır. İlâve dayanımın miktarı sarma şekline, FRP tipine ve miktarına, mevcut beton dayanımına, yükleme durumuna ve mesnet koşullarına bağlıdır. Ayrıca beton ve FRP arasındaki yapışma da kirişin kayma dayanımı için oldukça önemlidir. Kazanılan kayma dayanımı miktarı kullanılan FRP miktarı ile orantılı değildir. Optimum bir kat sayısı vardır.

Kompozitle dayanım arttırılması sistemi (aynen etriye gibi diyagonal çekme gerilmelerini karşılayıp, çatlakları önlemek için) liflerin enine doğrultuda beton kesite sarılması suretiyle gerçekleştirilir. Bu genel yaklaşımdan çeşitli sarma şekilleri araştırılmıştır. Anlaşılması için bütün şekillerde basit mesnetli tablalı kirişler kullanılmıştır [7].

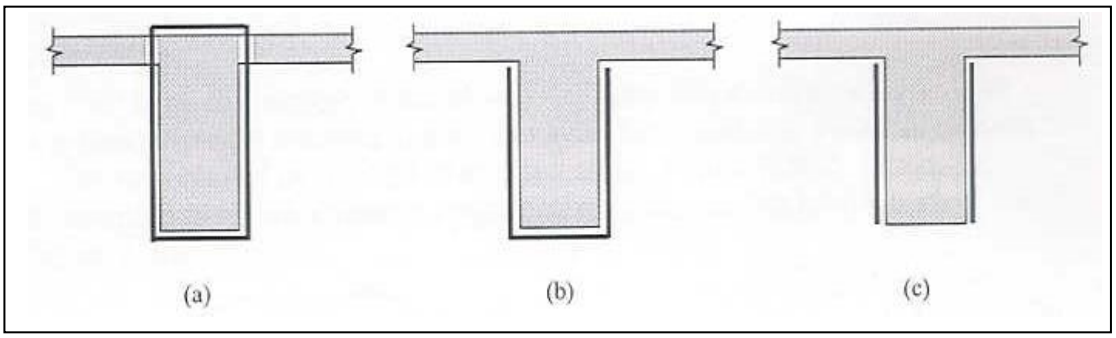
6.2.1 Kayma dayanımı seçenekleri

6.2.1.1 Çeşitli sarma tipleri

Kayma dayanımını arttırıcı en etkili yöntem, kesitin tamamını FRP ile sarmaktır (Şekil 6.2.1a). Ancak bu pratikte oldukça güçtür. Monolitik döşemeler veya diğer mesnetlenmiş elemanlar bu sarma işlemine engel olur. Buna çözüm olarak döşemede delikler açmak suretiyle FRP şeritleri kesitin etrafını sarabilir. Ancak bu uygulama açısından hem karmaşık hem de maliyetli olur.

En yaygın yöntem kesitin yanlarını ve altını U şeklinde sarmaktır (Şekil 6.2.1b). Bu metod hem etkili hem de pratiktir. Pozitif moment bölgelerinde etkili olmasına karşın, negatif moment bölgelerinde döşeme yanında kesitin üzerinden kayma çatlağı başlar. Uygulama döşemenin altında bittiğinden, döşeme üstündeki bu çatlakların başlamasını kontrol edemez. Bir kere bu çatlaklar oluşursa, FRP'nin güçlendirme etkisi olmaksızın kesit boyunca çatlağın devam etme ihtimali vardır.

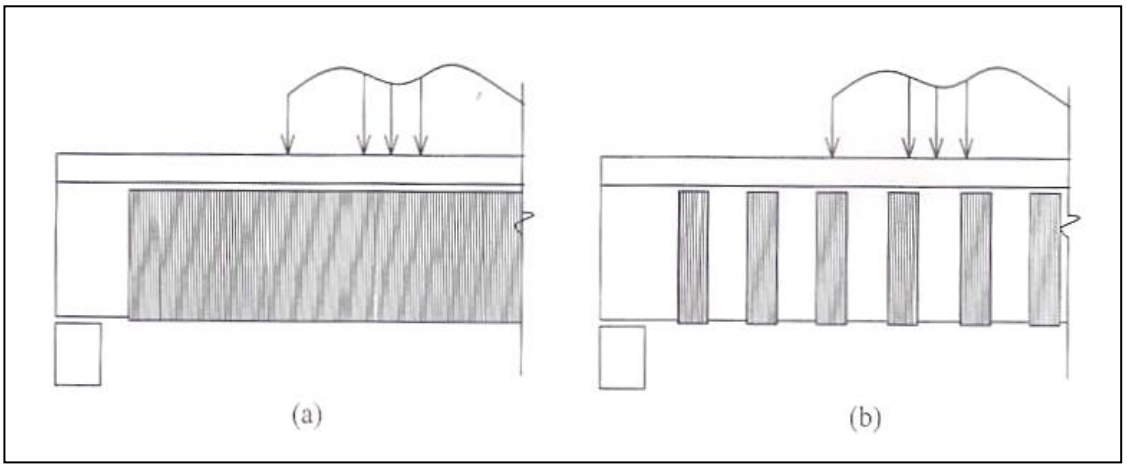
Bazı durumlarda kesitin altını veya üstünü sarmak mümkün olmaz. Kesitin yanlarına konacak levhalarla yine kayma dayanımının arttırılması sağlanır (Şekil 6.2.1c). Ancak etkisi sınırlı kalmaktadır [7].



Şekil 6.13 FRP takviyesinin çeşitli sarma şekilleri [7]

6.2.1.2 Kayma takviyesi aralığı

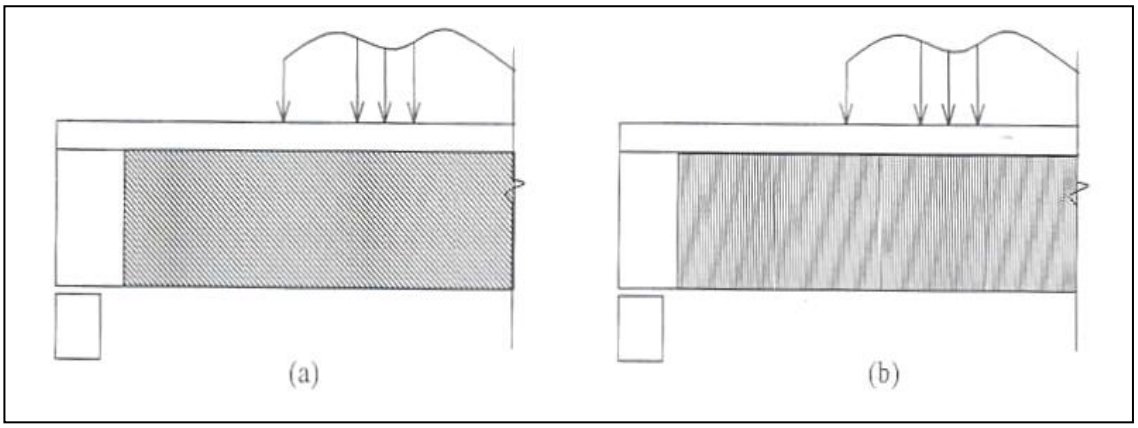
Enine donatı olarak kullanılacak FRP (devamlı) kumaş şeklinde (Şekil 6.14a) veya şerit şeklinde olabilir (Şekil 6.14b). Şeritlerin kullanılması, kullanılan malzeme miktarı bakımından optimum etkiyi sağlayabilir. Dahası, eğer bütün kirişin sarılması gerekiyorsa, şeritlerin kullanılması beton boyunca daha iyi bir nem çıkışına izin verir.



Şekil 6.14 FRP kayma takviyesi tipleri [7]

6.2.1.3 Lif yönü

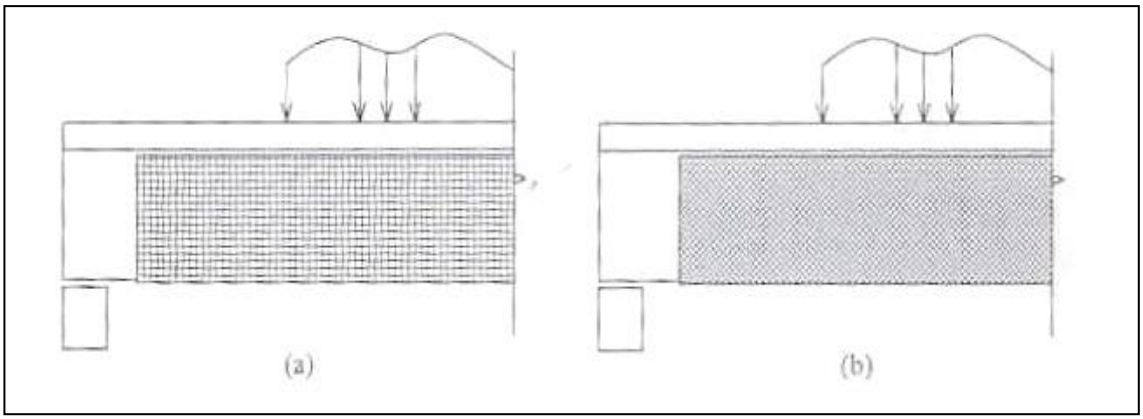
FRP, ancak liflerin doğrultusunda yüksek mukavemet sağlayan anizotropik bir malzeme olduğundan, lifler diyagonal çekme çatlaklarını en iyi şekilde önleyecek doğrultuda yönlendirilmelidir. Bu da (45°) eğri şeritler kullanılarak sağlanabilir (Şekil 6.15a). Ancak, düşey olarak (90°) yönlendirilmiş katların montajı kolaydır ve toplam sarma uzunluğunu azaltabilir (Şekil 6.15b).



Şekil 6.15 FRP tekstillerinin yönlendirme açıları [7]

6.2.1.4 İki eksenli donatı

İki eksenli FRP donatısının kullanımının sistemin performansını arttırdığı görülmüştür. İki eksenli FRP donatısı, karşılıklı birbirine dik yönlerde tek yönlü iki kat FRP'nin yerleştirilmesiyle elde edilir (Şekil 6.16). Birincil yöndeki kat, donatı görevinin çoğunu yerine getirir, ikincil yöndeki kat da kesme çatlaklarını sınırlar ve birincil yöndeki kat için ankraj sağlar.



Şekil 6.16 İki eksenli FRP tekstili (a) 0°/90° (b) ± 45° [7]

6.2.2 Tasarım

Nihai sınır durumunda kayma dayanımı güçlendirilmesinde FRP'nin tam mukavemetine ulaşması mümkün değildir. Ya gerilme birikiminden dolayı nihai gerilme seviyesinin altındaki ortalama gerilme seviyelerinde levhanın kopması, beton yüzünden FRP levhasının sıyrılması ya da agrega kenetlenme kaybından dolayı çatlak sonrası beton kayma mukavemetindeki önemli azalış nedeniyle göçme gerçekleşir.

6.2.2.1 FRP ile güçlendirilmiş kesitin kesme kuvveti taşıma kapasitesi

Betonarme bir kirişin nominal kesme dayanımı betonun kesme dayanımı ile donatının kesme dayanımının toplamıdır. FRP ile güçlendirilmiş kirişin kesme dayanımı ise bu toplama FRP donatısının katkısı da eklenerek elde edilir. Bu onarım teknolojisinin yeniliğinden dolayı FRP'nin katkısının 0,85 katsayısı ile azaltılarak kullanılması daha güvenli sonuç vermektedir.

$$V_n = V_c + V_s + 0{,}85V_f \tag{6.25}$$

Tasarım kesme dayanımı, ϕV_n, nominal kesme dayanımının bir dayanım azaltma katsayısı ile çarpımından elde edilir. Bu katsayı ACI 318-95'te kesme için 0,85 olarak önerilmektedir. Mevcut yapının durumundan emin olunamadığı durumlarda bu katsayılar daha da düşürülmektedir [7].

6.2.2.2 Kesme kapasitesine FRP donatısının katkısı

FRP kesme donatısı tarafından sağlanan ilâve kapasitenin genel ifadesi aşağıdaki denklemdeki gibidir. Bu ifadenin tayini, enine donatının kesme dayanımına katkısındakine benzerdir. ACI denklemindeki gibi kesme katkısı 45° açılı kesme çatlağı varsayımı ile bulunan donatı alanı ile malzemenin dayanımının çarpımı yoluyla hesap edilir.

$$V_f = \frac{A_{fv} * f_{fe}(\sin\beta + \cos\beta)d_f}{s_f} \le \frac{2}{3}\sqrt{f_c'}\,b_w d - V_s \tag{6.26}$$

FRP tarafından sağlanan ilâve kesme dayanımı, betonun ve donatının kesme dayanımları cinsinden sınırlandırılmıştır. Diyagonal basınç gerilmelerinin neden olduğu ezilmeye karşı yeterli güvenlik sağlamak amacıyla bu sınıra uyulması istenir [28]. Potansiyel bir 45°'lik kesme çatlağına karşı kullanılacak FRP alanını bulmak için A_{fv}, d_f, s_f ve β terimleri gereklidir. A_{fv} kirişin iki tarafını kaplayan enine FRP donatısının bir şeridinin alanıdır. Bu alan denklem (6.27)'deki gibidir. Burada n uygulanan kat sayısı, t_f bir katın kalınlığı ve w_f de şeridin genişliğidir.

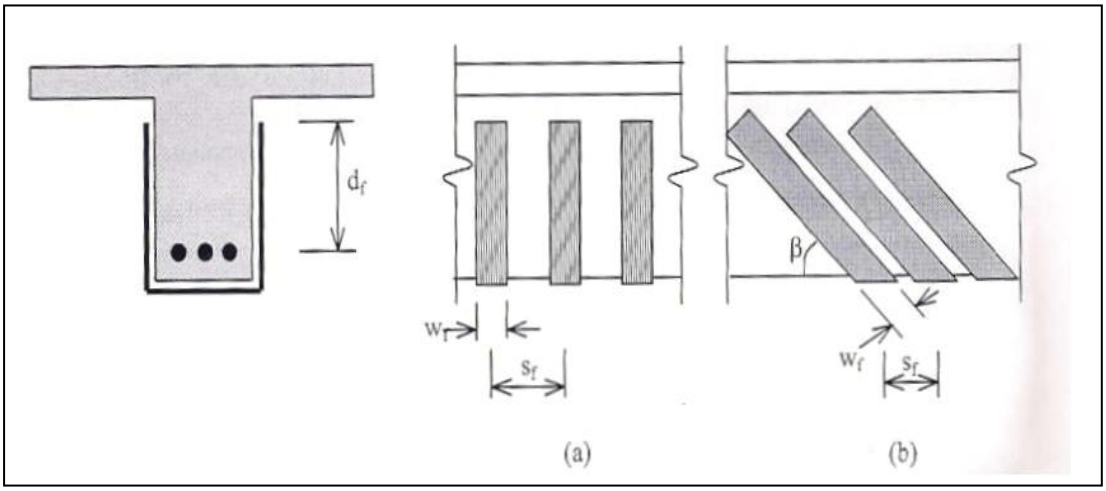
$$A_{fv} = 2n*t_f*w_f \tag{6.27}$$

Kesme çatlakları genelde boyuna donatıya ulaşıncaya kadar düşey çatlaklar olarak gelişir. FRP şeridinin etkili derinliği kesitin altındaki donatının merkezinden

ölçülebilir. Genellikle şeritler kirişin döşeme ile birleştiği yere kadar uzatılır. Böylece FRP şeridinin etkili derinliği, donatı derinliğinden (d), döşeme kalınlığının çıkartılması ile hesaplanabilir.

Şeritler arasındaki mesafe, s_f, bir şeridin orta noktasından bitişiğindeki şeridin orta noktası arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Devamlı kumaş şeklinde olan FRP'lerdeki s_f mesafesi ve w_f genişliği birbirine eşit olur.

β açısı kirişin boyuna ekseni ile ana lif doğrultusunun yönlendirilme açısını tanımlar. Ana lifler muhtemel çatlağa dik yönde yönlendirildikleri zaman üst düzeyde etkili olurlar. Muhtemel kesme çatlağına karşı koyacak FRP alanını tanımlamak için kullanılan değişkenler Şekil 6.17'de özetlenmiştir.



Şekil 6.17 Kesme dayanımı hesabında FRP alanını tanımlamak için kullanılan ölçüler [7]

Denklem 6.26'daki son değişken levhanın kırılma anındaki etkili gerilmesidir. Daha önce de belirtildiği gibi, kayma dayanımı durumunda tekstil nihaî dayanımına erişemez. Bu nedenle etkili gerilme bir azaltma katsayısı ile çarpılarak hesap edilir.

$$f_{fe} = R * f_{fu} \qquad (6.28)$$

Azaltma katsayısı göçmenin hakim modu tarafından belirlenir. Kiriş kesitini tamamen saramayan levhalar için etkin göçme modu levhanın betondan sıyrılmasıdır. Kesitin tamamı sarılarak yeterli ankraj boyu sağlanır ve yapışma daha az kritik olur.

Diğer bir göçme modu ise betondaki agrega kenetlenmesinin kaybıdır. Eğer kesme çatlağı genişliği çok fazla olursa, agrega kenetlenmesi kaybolur. Bu da betonun kesme dayanımının azalmasına yol açar.

Kesme çatlağı genişliğini kontrol etmek için, FRP levhasının deformasyonu (ve böylece gerilmesi) sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırma katsayısı, çoğunlukla tamamı sarılmış kiriş için uygulanırsa da diğer sarma şekilleri için de kullanılabilecek genel bir katsayıdır.

$$R = \frac{k_1 * k_2 * L_e}{11900\varepsilon_{fu}} \leq \frac{0{,}005}{\varepsilon_{fu}} \tag{6.29}$$

Denklemin birinci kısmı FRP levhasının sıyrılmasına karşılık gelir. Bu ifade betonla FRP arasındaki yapışma dayanımını saptayan deneysel çalışmalardan ve amprik kombinasyonlardan geliştirilmiştir.

Denklemin ikinci kısmı agrega kenetlenme kaybını ifade eder. Agrega kenetlenmesi çatlak oluşumunu sınırlayarak korunabilir. Bunun da FRP'deki deformasyonun 0,004 ile 0,005 mm/mm değerinde sınırlandırılmasıyla başarılabileceği önerilmektedir.

Diğer bir göçme modu olan FRP kopması burada ele alınmamıştır. Çünkü bu göçme modu genelde deformasyonun 0,005 mm/mm'nin üzerindeki durumlarda görülür. Bundan dolayı bu göçme sadece agrega kenetlenme kaybı olduktan sonra görülecektir.

Yapışma için sınırlama katsayısının belirlenmesinde etkili aderans boyu (L_e) tespit edilmelidir. Deneysel bulgulara göre CFRP şeridinin taşıdığı nihaî çekme kuvveti toplam yapışma boyuna bağlı değildir. Bunun nedeni yük sadece aktif yapışmadaki toplanmış alanda bulunan aderans tarafından devam ettirilir. Tekstilin kalan kısımdaki aderans gerilmeleri nispeten küçüktür. Eğer ayrılma bu bölgede meydana gelirse, aktif yapışma alanı yeni bir alana değişir. Bu olay, ayrılma CFRP tekstilin uzunluğu boyunca tamamen yayılıncaya kadar tekrarlanır. Bu yüzden aktif yapışma bölgesindeki aderans gerilmeleri tarafından taşınabilen en büyük kuvvet, tekstilin taşıyabileceği en yüksek çekme kuvvetini etkiler. Etkili aderans boyu ile şerit genişliğinin çarpımı bu aktif yapışma alanını tanımlar.

Etkili aderans boyu FRP'nin rijitliği (kat sayısı) arttıkça düşer. Fiziksel olarak bu levhadaki gerilmenin betonun daha küçük bir alanına iletilmesine neden olur ve

betondaki gerilme artar. Böylece daha fazla kat ilâvesi dayanımı arttırır ama FRP sisteminin etkinliğini azaltır [7].

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} L_o \tag{6.30}$$

Burada L_o, FRP'nin bir katı için etkili aderans boyudur. Örneğin Wabo Mbrace Lif donatı sistemleri için bu değerler aşağıdaki gibidir[3].

L_o = 2 inch (50mm) CF130 için

L_o = 1,5 inch (40mm) CF530 için

L_o =2,5 inch (65mm) EG900 için

Etkili aderans boyu beton mukavemetinden ve yapıştırılma şekillerinden etkilenir. Bu etkileri telafi etmek için iki ilâve katsayı, k_1 ve k_2 uygulanır.

k_1 katsayısı beton mukavemetini ifade eder.

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27} \right)^{2/3} \tag{6.31}$$

k_2 katsayısı kullanılan sarma şeklini izah eder.

$$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} \tag{6.32}$$

FRP kesitin etrafına sarılarak ankre edilmezse FRP takviyesinin derinliği azalacaktır. Etkili derinlik aşağıda verilen sarma şekli kriterleri esas alınarak hesaplanabilir.

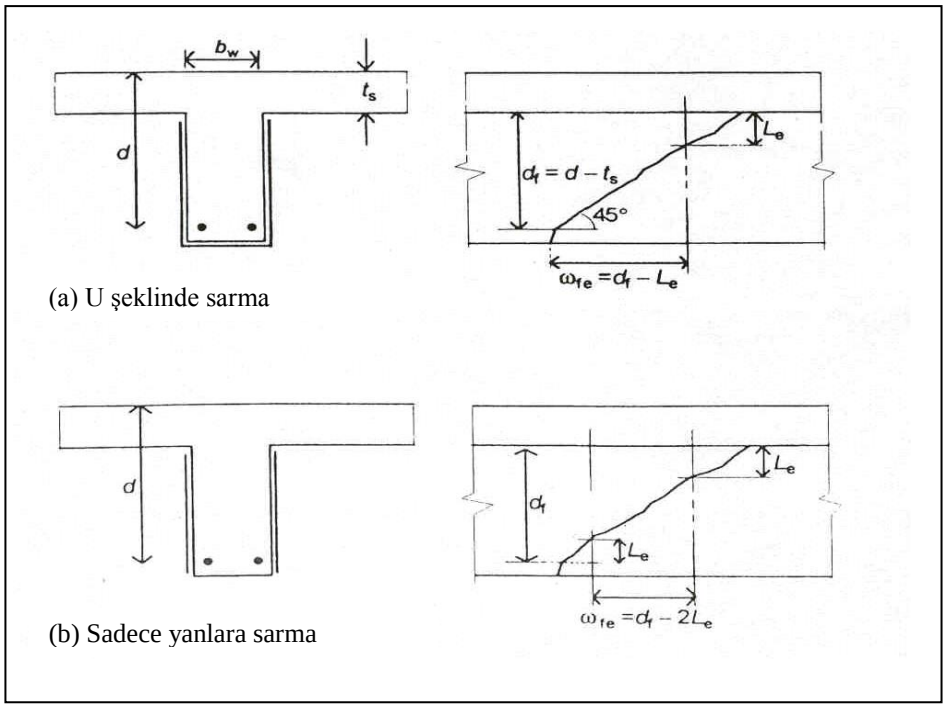
$d_{fe} = d_f - L_e$ FRP şeridi U şeklinde sarılmış ise

$d_{fe} = d_f - 2L_e$ FRP şeridi yalnız kirişin iki yanına yapıştırılmış ise

Daha önce de bahsedildiği gibi, FRP şeridi kiriş kesitinin tamamına sarıldığında yapışma daha az önem taşır. Bu durumda yapışma için sınırlama katsayısı ihmal edilebilir ve azaltma katsayısı, R, en yüksek değerini alabilir.

---

[3] Genellikle FRP'nin bir katının etkili aderans boyu $L_o = \frac{2500}{\left(t_f^{\ inch} E_f^{\ psi} \right)^{0.,58}}$ [inch] ifadesi ile de hesaplanabilir [29]



Şekil 6.18 Sarma şekillerine göre etkili derinlik hesabı [7]

$$R = \frac{0{,}005}{\varepsilon_{fu}} \tag{6.33}$$

6.2.3 Tasarım tavsiyeleri

6.2.3.1 İki eksenli FRP donatısı

Bu bölüme kadar verilen denklemler birbirine dik iki yönde yönlendirilmiş liflerden oluşan iki eksenli FRP levhalarının kullanımını içermemektedir. Bu levhaların etkisine değinilmemiş olmasına rağmen kullanımı şiddetle tavsiye edilmektedir. Çünkü kesme çatlakları oluşurken, genellikle deplasmanın düşey yönde olduğu ve donatı tarafından sağlanan karşı koyucu kuvvetin düşey bileşeninin bunda etkili olduğu varsayılır. Bununla birlikte, gerçekte deplasmanın yatay bileşeni de vardır. Eğer sadece FRP'nin düşey katları ($\beta = 90°$) kullanılırsa bu yatay yer değiştirme bileşenine karşı etkin olamaz (Çelik etriye halinde bu bileşen, etriyenin mil etkisi sayesinde karşılanır). Bu sebepten bu harekete karşı koymak ve çatlak açılımını daha fazla sınırlamak için ilâve yatay kat ($\beta = 0°$) kullanılması tavsiye edilir.

Yatay kat aynı zamanda boyuna donatı merkezinin altında (pozitif eğilme için) kesitin alt kısmında başlayan düşey çatlakları da durdurmakta rol oynar. Bu çatlak kontrol mekanizmasından dolayı, ilave yatay kat, pozitif eğilme için kesitin alt

kısmına, negatif eğilme için ise kesitin üst kısmına mümkün mertebe en yakın şekilde yerleştirilmelidir.

Kullanılması gereken yatay katın miktarı tam olarak hesaplanmasa da, genel bir yaklaşımda bulunmak yeterli olacaktır. Genellikle bir yatay kat bir düşey kat kullanıldığında, diğer bir yatay kat da ilâve her iki düşey katta kullanılabilir. Örneğin 3 düşey katlı tasarımın 2 yatay kat içermesi tavsiye edilir. Katların yerleştirilmesinde öncelik ana doğrultuda olan kata verilmelidir [7].

6.2.3.2 Ara mesafe gereksinimleri

Kayma donatısı olarak kullanılan etriyelere benzer şekilde, FRP şeritleri arasındaki mesafe de çok geniş olmamalı, diyagonal çatlakları engellemelidir**.** Bu nedenle ara mesafe aşağıdaki ifadeden bulunacak değeri geçmemelidir.

$$S_{f,\max} = w_f + \frac{d}{4} \tag{6.34}$$

6.2.3.3 Toplam kayma donatısı sınırı

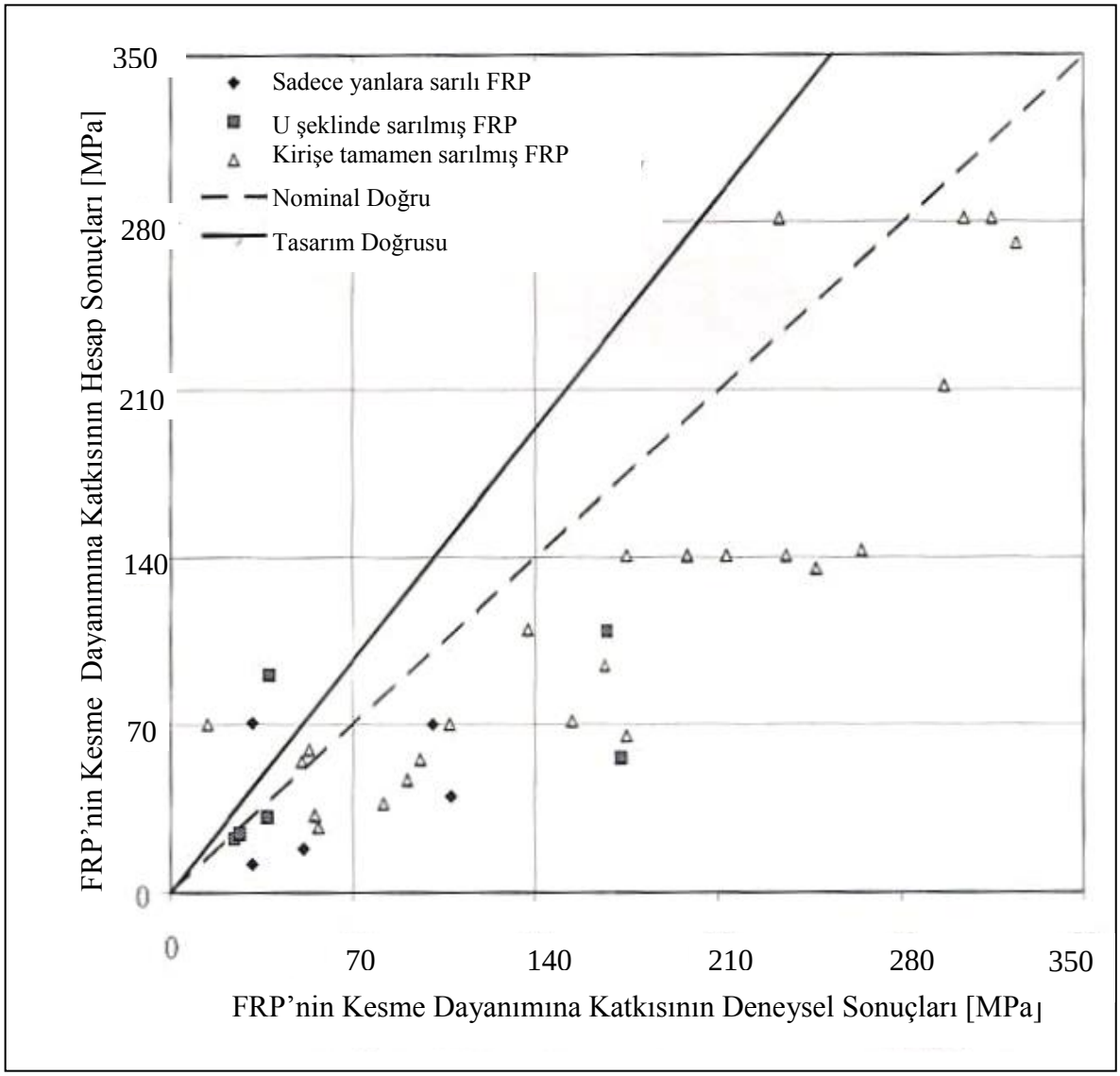
ACI 318-95'de birden fazla kayma donatısı tarafından sağlanan toplam kayma dayanımı için bir sınır getirilmiştir. FRP kayma donatısı da bu sınır içinde olmalıdır.

$$V_s + V_f \leq 32{,}5 * \sqrt{f'_c} * b_w * d \tag{6.35}$$

6.2.4 Deneysel verilerle karşılaştırma

Burada ele alınan tasarım işlemi literatürde bulunan çeşitli deneysel programların verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Şekil 6.19'da görülmektedir.

"Nominal doğru" olarak adlandırılan çizgi FRP tarafından sağlanan hesaplanmış kayma dayanımı, V_f, ile deneysel kayma dayanımı arasındaki karşılıklı ilişkiyi temsil eder. "Tasarım Doğrusu" olarak adlandırılan çizgi ise FRP tarafından sağlanan hesaplanmış tasarım kayma dayanımı ϕ $(0{,}85V_f)$, ile deneysel kayma dayanımı arasındaki karşılıklı ilişkiyi temsil eder. "Tasarım Doğrusu" çizgisinin altında kalan noktalar hesaplanmış tasarım değerinden daha yüksek kayma dayanımına sahip kirişleri gösterir. Bu veriler, tasarım işleminin hemen hemen her koşulda tutarlı olduğunu gösterir [7].



Şekil 6.19 Deneysel sonuçlarla tasarım yöntemiyle hesaplanmış sonuçların karşılaştırması [7]

6.2.5 T kesitli bir kirişin kayma dayanımının arttırılmasının hesabı

İstenilen: Uygulama aşamasında etriye aralıklarına özen gösterilmemiş ve yer yer atlanmış olan, (kesiti ve malzeme özellikleri aşağıda verilmiş) kirişin Wabo MBrace CF130 kullanılarak onarımının yapılması [7].

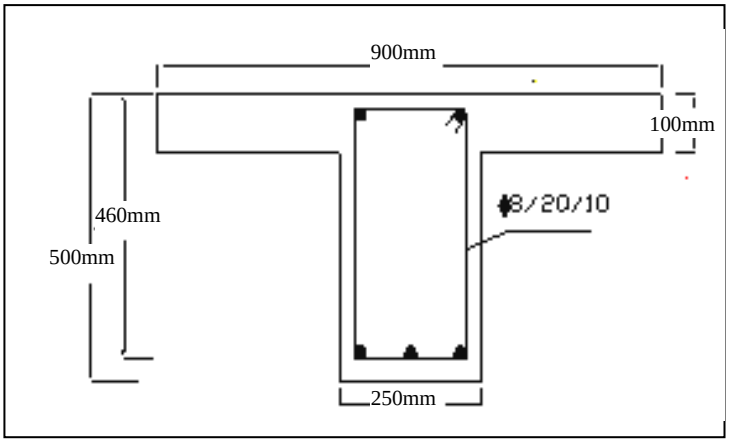
Verilenler:

Malzeme C20/S420

$V_n=V_u/\Phi=200000N$

A_{sw} = 50 mm^2

l_n = 9000 mm



Şekil 6.20 T-kesitli kiriş ölçüleri

- Mevcut kesitin kapasitesi

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\, b_w d = \frac{1}{6}\sqrt{20} * 250 * 460 = 85716N$$

$$V_s = A_{sw} * f_{ywd} * \frac{d}{s} = 2 * 50 * \frac{420}{1{,}15} * \frac{460}{200} = 84000N$$

$$V_{n_{mevcut}} = 85716 + 84000 = 169716N$$

$$V_{n_{gerekli}} = 200000N$$

$$V_f = \frac{V_{n_{gerekli}} - V_{n_{mevcut}}}{0{,}85} = \frac{200000 - 169716}{0{,}85} = 35650N$$

- 1 kat CF130'un kullanılacağı varsayılıp etkili aderans boyunun hesaplanması

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} * L_0 = \frac{1}{\sqrt{1}} * 50 = 50mm$$

- FRP kayma donatısının etkili derinliği

FRP tekstili sadece döşeme altına kadar sarılabilir. Bundan dolayı FRP, U şeklinde sarılmalıdır. FRP'nin toplam derinliği ve etkili derinliği;

$$d_f = d - h_s = 460 - 100 = 360mm$$

$$d_{fe} = d_f - L_e = 360 - 50 = 310mm$$

- FRP'nin nihaî dayanımının azaltma katsayısının bulunması

$$R = \frac{k_1 * k_2 * L_e}{11900 * \varepsilon_{fu}} \leq \frac{0{,}005}{\varepsilon_{fu}}$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{20}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = 0{,}82$$

$$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} = \frac{310}{360} = 0{,}86$$

$$R = \frac{k_1 * k_2 * L_e}{11900 * \varepsilon_{fu}} \leq \frac{0{,}005}{\varepsilon_{fu}}$$

$$R = \frac{0{,}82 * 0{,}86 * 50}{11900 * 0{,}017} \leq \frac{0{,}005}{0{,}017}$$

$$R = 0{,}174 \leq 0{,}294$$

$R = 0{,}174$ olarak kabul edilebilir.

- FRP tekstilindeki etkili gerilme seviyesi

$$f_{fe} = R * f_{fu} = 0{,}174 * 3790 = 659{,}46 MPa$$

- Gerekli CF130 miktarı

İnşaa edilebilirlik ve malzemeleri korumak için FRP düşey (β = 90°) yönde yönlendirilecektir. FRP miktarı (6.26) ifadesinden bulunabilir.

Şeritler arası mesafe, s_f, ve şerit genişliği, (w_f), tasarımda gerekli iki değişkendir. $\frac{w_f}{s_f}$ oranını hesaplamak yararlı olacaktır. Bu oranı esas alarak aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir:

Eğer $\frac{w_f}{s_f} \langle 1{,}0$ ise bir kat şerit kullanmak uygundur.

Eğer $\frac{w_f}{s_f} = 1{,}0$ ise bir kat devamlı dokuma (tekstil) kullanmak uygundur.

Eğer $\frac{w_f}{s_f} \rangle 1{,}0$ ise bir kat yeterli olmayacatır, daha fazla kat uygulaması gerekecektir.

$A_{fv} = 2 * n * t_f * w_f$ ile bu oran aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$V_f = \frac{A_{fv} * f_{fe} * (\sin\beta + \cos\beta) * d_f}{s_f} = \frac{2*1*0{,}165 * w_f (659{,}46) * 360}{s_f} = 35650\,\text{N}$$

$\frac{w_f}{s_f} = 0{,}455$ $< 1{,}0$ olduğundan bir kat şerit kullanılması yeterlidir.

- FRP Şeritlerinin Genişlik ve Ara Mesafe Tasarımı

CF130 şeritleri 50 cm genişliğinde rulolar halinde bulunur. Bunlar 50'nin katları (50, 25, 10, 5 cm) şeklinde firesiz kesilip kullanılabilirler. Buna ek olarak mevcut kayma donatılarının yeri de gözönünde tutulmalıdır. FRP şeritlerinin bu donatıların aralarına yerleştirilmesi en faydalı durumu meydana getirir. Hem bu durumu hem de dayanım ölçütünü birlikte yerine getirebilecek şekilde 25 cm genişliğinde, 30 cm aralıklı şeritler seçilmiştir. Böylece $\frac{w_f}{s_f} = \frac{25}{30} = 0.833$ olarak gerekli oranı da sağlamış olmaktadır.

- Kapasite Kontrolü ve Ara Mesafe Gereksinimleri

$$V_f = \frac{A_{fv} * f_{fe} * (\sin\beta + \cos\beta) * d_f}{s_f}$$

$$V_f = \frac{2*1*0{,}165*250*659{,}46*(1+0)*360}{300} = 65286{,}5\text{N}$$

üst sınır;

$$\left[\frac{2}{3}\sqrt{f'_c}\,b_w d - V_s\right] = \left(\frac{2}{3}\sqrt{20} * 250 * 460\right) - 84000 = 258863.7N = 258.86kN$$

$$s_{f_{max}} = w_f + \frac{d}{4} = 250 + \frac{460}{4} = 365mm \; > \text{s}_\text{f} = 300\text{ mm}$$

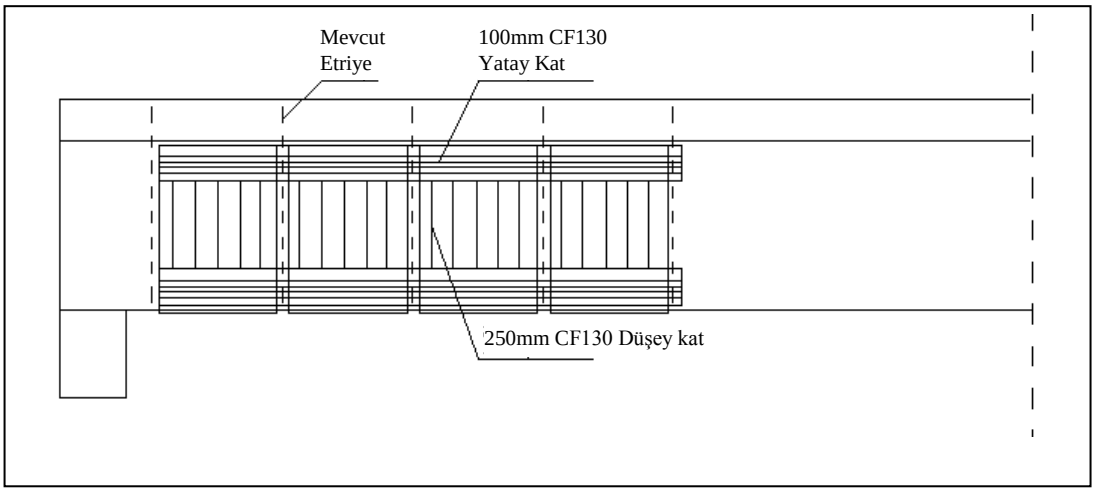
- Kesitin Toplam Kapasitesi

$$V_n = V_c + V_s + 0{,}85V_f = 85716 + 84000 + (0{,}85 * 65286{,}5) = 225200N = 225.2\ kN$$

$$V_n = 225200N \rangle \frac{V_u}{\phi} = 200000\text{ N}$$

- Boyuna doğrultudaki katların detaylandırılması

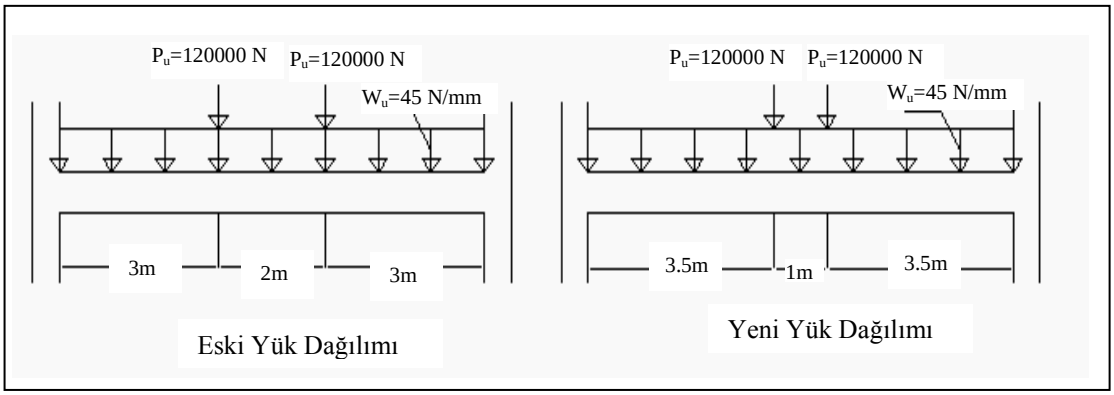
Düşey şeritlere ek olarak kesme çatlağı ilerleyişini engellemek ve düşey şeritlere ankraj sağlamak için boyuna doğrultuda şeritler yerleştirilebilir. Bu şeritler en az 10 cm genişliğinde kesitin iki yanında, düşey şeritlere ankraj sağlaması için üste, çatlakları kontrol altında tutmak için de alta yerleştirilmelidir.



Şekil 6.21 Hesap sonucu bulununan FRP şerit yerleşimi [7]

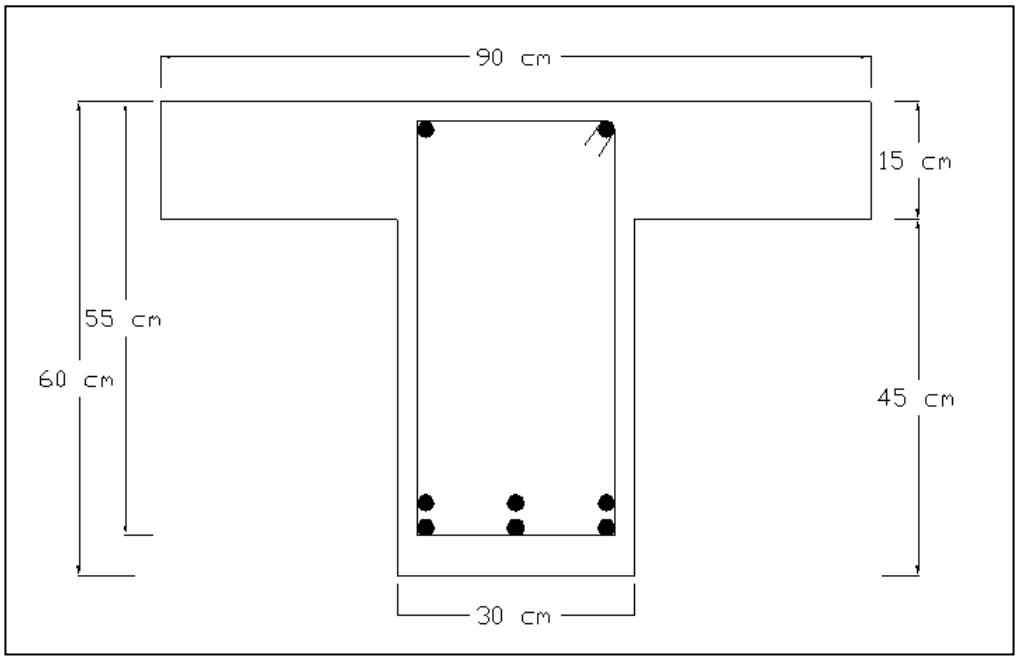
6.2.6 İlâve kayma donatısı hesabı

İstenilen: Şekilde gösterilen kiriş, başlangıçta birbirlerinden 2 m uzaklıkta olacak olan iki ağır makinaya göre tasarlanmış olup daha sonra bu makinaların yerleri zorunlu olarak değiştirilmiştir. Yeni yük dağılımına göre kesiti yetersiz olan yerlerin güçlendirilmesi.



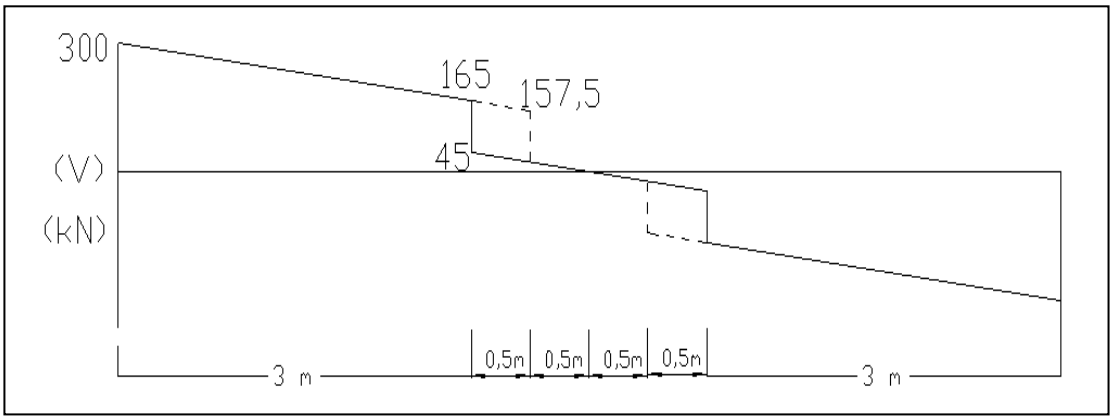
Şekil 6.22 Yük dağılımı değişimini gösteren kiriş görünüşü [7]

Verilenler: Malzeme C30/S420



Şekil 6.23 Orta açıklıktaki kiriş enkesiti

$$MesnetTepkisi = \frac{1}{2} * (120 + 120 + 45 * 8) = 300\ kN$$



Şekil 6.24 Kesme kuvveti diyagramı

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_c'}\, b_w d = \frac{1}{6}\sqrt{30} * 300 * 550 = 150623N$$

$\frac{\phi V_c}{2} = 64010N > V_u = 45000N$ olduğundan güçlendirme gereken kirişin bu kısmında kayma donatısı (etriye) yoktur.

Ancak yeni yük durumunda;

$V_u = 165000N \; > \; \frac{\phi V_c}{2} = 64010N \qquad \Rightarrow$ ilâve kayma donatısı gerekmektedir.

- FRP tarafından sağlanacak kesme kuvveti

$V_u = \phi * (V_c + 0{,}85V_f) \qquad 165000 = 0{,}85 * (150623 + 0{,}85V_f)$

$V_f = 51170N$

- Malzeme seçimi

Kesme dayanımını arttırmak için Wabo Mbrace CF130 donatısı seçilebilir. Geometri göz önüne alınırsa, kesme kuvveti dayanımı yetersiz olan 50 cm'lik iki kısım U şeklinde sarılacaktır. Bir kat uygulama yapılmasının yeterli olacağı varsayımıyla işlemlere başlanabilir. Yeterli dayanım sağlanmaması durumunda kat sayısı arttırılıp, hesaplar tekrardan yapılır.

- Etkili kenetlenme boyu hesabı

$L_0 = 50mm$ Wabo Mbrace CF130 için ve 1 kat için n = 1

$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} * L_0 \; = \frac{1}{\sqrt{n}} * 50 = 50mm$

- Tekstilin nihaî mukavemetindeki azaltma katsayısı hesabı

$R = \frac{k_1 * k_2 * L_e}{11900 * \varepsilon_{fu}}$

$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{30}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = 1{,}07$

$d_f = d - h_s = 550 - 150 = 400mm$

$d_{fe} = d_f - L_e \; = 400 - 50 = 350mm$

$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} = \frac{350}{400} = 0{,}875$

$R = \frac{k_1 * k_2 * L_e}{11900 * \varepsilon_{fu}} = \frac{1{,}07 * 0{,}875 * 50}{11900 * 0{,}017} \; = 0{,}232$

- Liflerdeki nihaî gerilme seviyesi hesabı

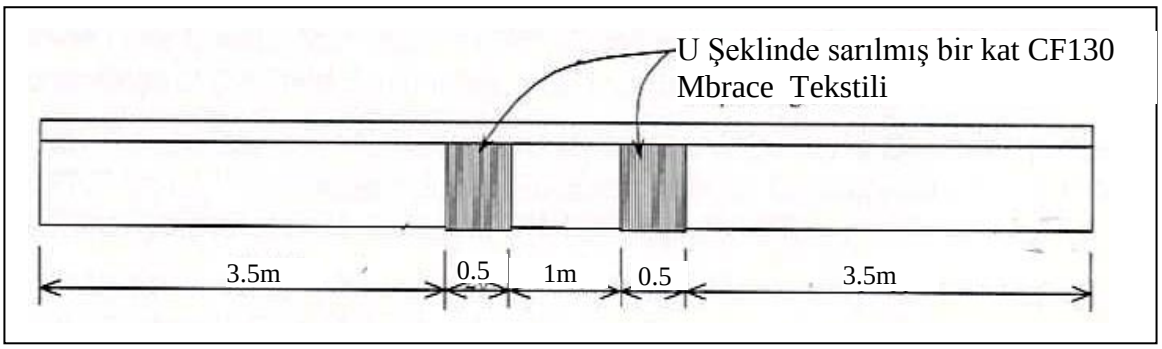
$$f_{fe} = R * f_{fu} = 0{,}232 * 3790 = 879.28MPa$$

- FRP'nin kayma dayanımına katkısı

$$V_f = \frac{A_{fv} * f_{fe} * (\sin\beta + \cos\beta) * d_f}{s_f} \le \frac{2}{3}\sqrt{f_c'}\, b_w d$$

$$V_f = \frac{2 * 1 * 0{,}165 * 500 * 879.28 * (1+0) * 400}{300} \le \frac{2}{3}\sqrt{30} * 300 * 550 = 602492N = 602.5kN$$

$$V_f = 193441N > V_{fgerekli} = 51170N \quad \Rightarrow \quad \text{1 kat yeterli}$$



Şekil 6.25 FRP takviyesinin kiriş üzerindeki yeri

6.3 Eksenel Yük Taşıma Gücünün Arttırılması

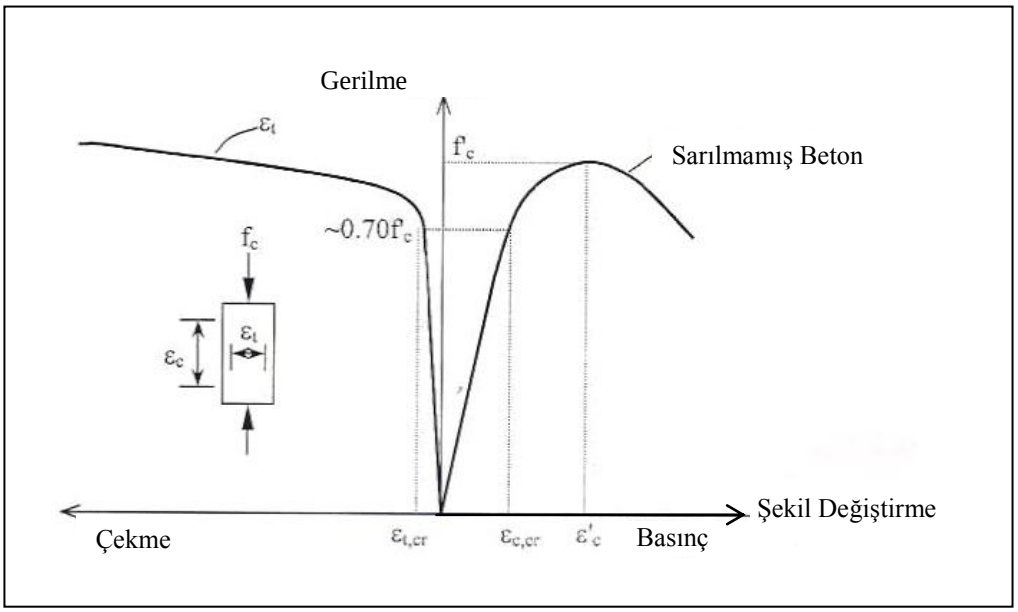
Bir beton kolonun FRP ile sarılmasıyla kesme kuvveti, moment ve eksenel yük taşıma kapasitesinin yanında kesitin sünekliği de önemli ölçüde artar. Kolona manto gibi enine doğrultuda yönlendirilmiş liflerin sarılması, onun mekanik performansını geliştirmesini sağlar.

Hem cam hem de karbon FRP'ler kolonun eksenel yük taşıma performansını arttırmada etkili rol oynar. Cam FRP'nin (GFRP) sünme kopması ihtimali kolon sarılmasında bir problem yaratmaz. Çünkü devamlı servis yükleri altında FRP mantosu hemen hemen hiç gerilme almaz [7].

6.3.1 FRP ile sarılmış betonun davranışı

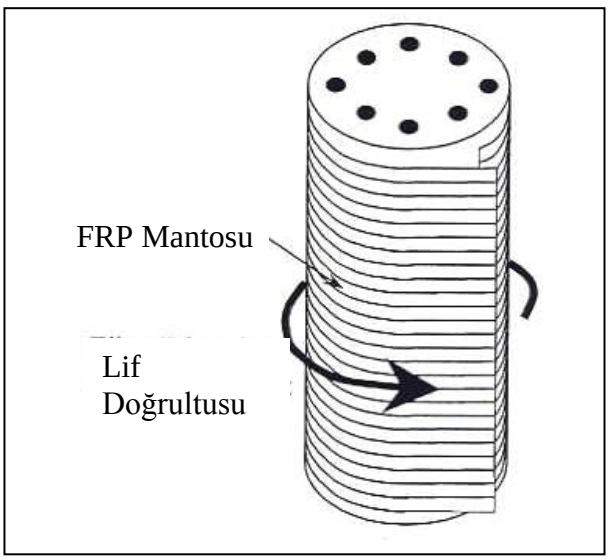
Boyuna şekil değiştirmenin düşük seviyelerinde beton elastik olarak davranır ve enine şekil değiştirme, boyuna şekil değiştirmenin poisson oranı ile orantılıdır. Boyuna gerilmenin kritik bir değerinde (genellikle f_c'nin % 75-80'i), agregalar arasındaki beton hamurunda oluşan çatlaklar boyuna gerilmedeki küçük artışlara

oranla enine şekil değiştirmede büyük artışlara neden olur. Enine şekil değiştirmedeki bu hızlı artış aynı derecede bir hacimsel genleşmeye sebep olur. Bu davranış şekil 6.26'da özetlenmiştir [7].



Şekil 6.26 Sarılmamış betona tek eksenli yüklenmiş tipik gerilme-boyuna, enine ve hacimsel şekil değiştirme ilişkisi [7]

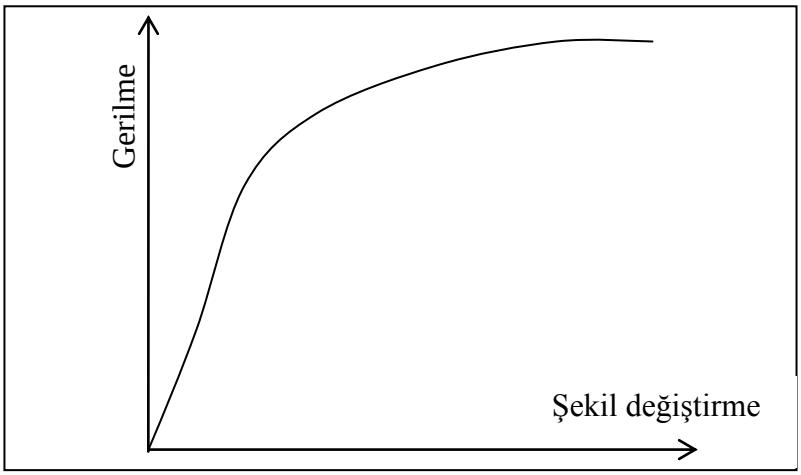
Bir FRP manto ile betonun sarılmasıyla lifler betonun enine genleşmesine karşı koyar. Bu direnç betona bir sargı basıncı sağlar. Boyuna gerilmenin düşük seviyelerinde, enine şekil değiştirmeler çok düşüktür. FRP manto az bir sargıya neden olur. Bununla birlikte, kritik gerilmenin üzerindeki boyuna gerilme seviyelerinde enine şekil değiştirmelerdeki artış FRP mantosunu zorlar ve sargı basıncı önemli hale gelir.



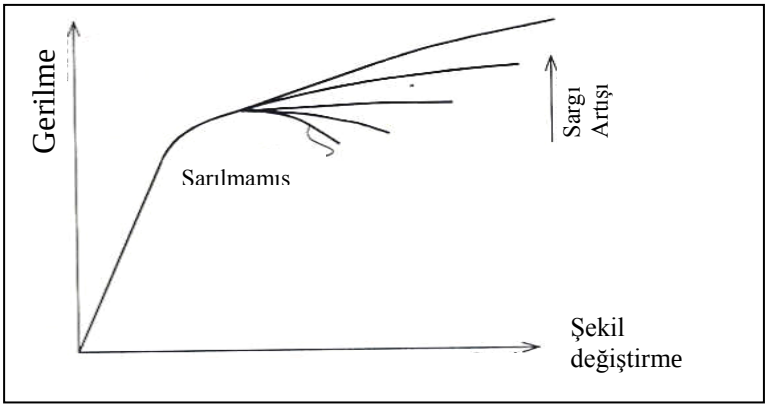
Şekil 6.27 Lif yönlendirmesini gösteren FRP ile sarılmış bir kolonun şekli [7]

Sargı basıncının etkisi betonda üç eksenli gerilme durumuna neden olur. Üç eksenli basınç gerilmesi altındaki betonun tek eksenli basınç altındaki betondan hem dayanım hem de süneklilik davranışı bakımından daha üstün bir davranış gösterdiği bilinmektedir.

Betonun davranışındaki bu gelişme, bir bilineer gerilme-şekil değiştirme davranışı ortaya koyan FRP mantosu ile kaplanmış betonun gözlemlenmesi esas alınarak ölçülür**.** Başlangıçta gerilme-şekil değiştirme davranışı sarılmamış betonunkinden farklı olmaz. Ancak, sarılmamış beton için gerilme en yüksek değerini aştığında, sarılmış kolondaki gerilme seviyesi şekil değiştirmenin artmasıyla artmaya devam eder. Artış oranı kabaca sargı mantosunun rijitliğiyle orantılıdır. Çünkü FRP mantosu betonun hasarlı kesitlerini kapsamak için harekete geçer. Betondaki en fazla kullanılabilir şekil değiştirme seviyesi sadece FRP mantosundaki elde edilebilir nihai şekil değiştirmeyi sınırlar. FRP mantosu ile sarılmış betonun genelleştirilmiş gerilme- şekil değiştirme davranışı 6,28'de gösterilmiştir.



Şekil 6.28 Bir FRP manto ile sarılmış betonun genelleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [7]



Şekil 6.29 Çeşitli sargı seviyeleri altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi [7]

Şekil 6.29'da gösterildiği gibi betonun davranışındaki gelişmeler sağlanan sargı derecesi ile orantılıdır.

6.3.1.1 Daire kesitli betona FRP sarılmasının davranışdaki etkisi

Bir FRP mantosu ile kaplanmış betonun davranışını ölçmek için, FRP mantosunun sağladığı sargı basıncının miktarını belirlemek gerekir. Sargı basıncı, mantonun rijitliğinin ve betonun enine genişlemesinin bir fonksiyonudur.

Şekil değiştirme uyumluluğu dolayısıyla mantodaki şekil değiştirme betondaki enine şekil değiştirmeye eşittir. Sargı basıncı ise denklem (6.37)'deki ifade ile bulunabilir (Şekil 6.30).

$$\varepsilon_f = \varepsilon_t \tag{6.36}$$

$$f_{cp} = \frac{0.85 E_f \varepsilon_t \rho_f}{2} \tag{6.37}$$

Burada $\rho_f = \frac{4nt_f}{h}$ olarak alınır. (6.38)

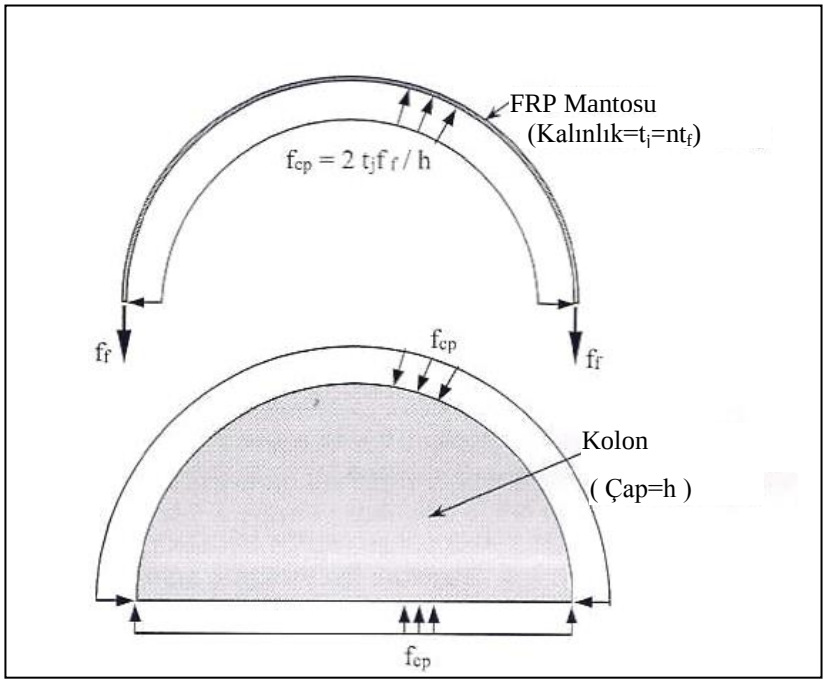
Sargı basıncı ifadesindeki 0,85'lik katsayı manto ile betondaki şekil değiştirmeler arasındaki uyuşmazlığın sebep olabileceği yerel ayrılmaları hesaba katmak amacıyla uygulanmaktadır. Manto tarafından sağlanan sargı basıncı altında betonun basınç mukavemetindeki artış denklem (6.39) sayesinde belirlenebilir. Gerilmenin bu pik (en yüksek) değerinin karşılığı olan şekil değiştirme denklem (6.39)'da verilmiştir.

$$f'_{cc} = f'_c \left(2.25 \sqrt{1 + \frac{7.9 f_{cp}}{f'_c}} - \frac{2 f_{cp}}{f'_c} - 1.25 \right) \tag{6.39}$$

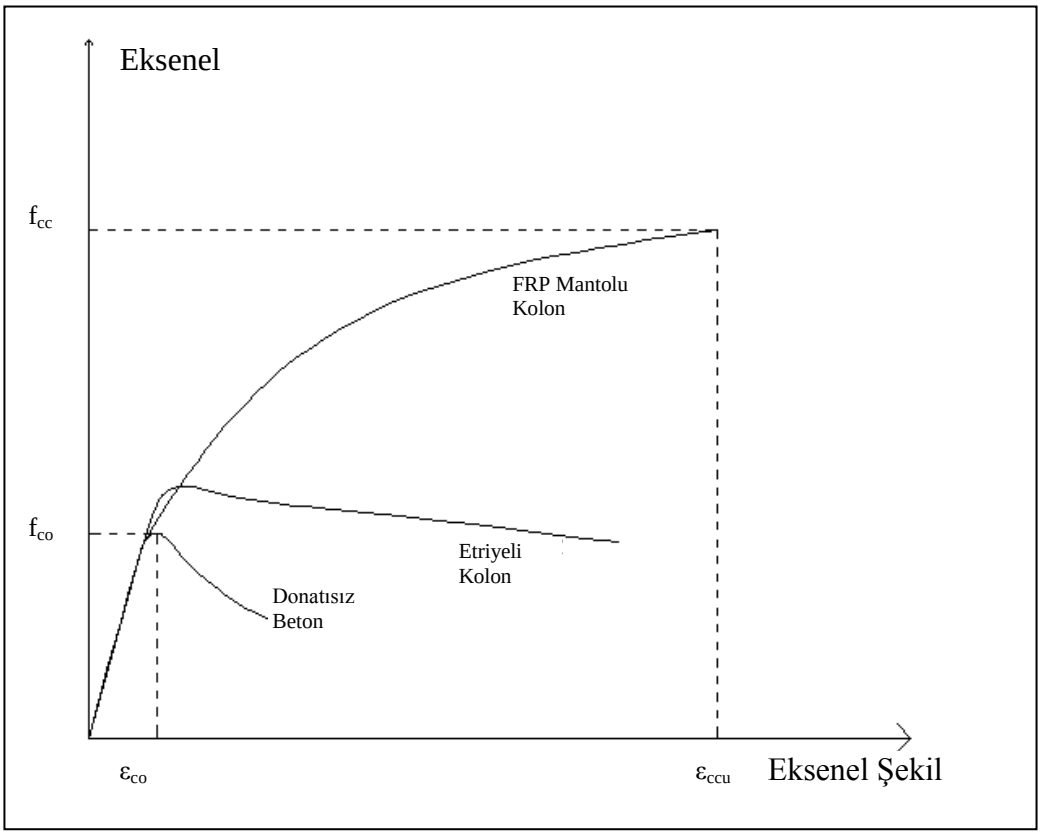
$$\varepsilon'_{cc} = \varepsilon'_c \left(6 \frac{f'_{cc}}{f'_c} - 5 \right) \tag{6.40}$$

Yukarıdaki ifadelerde bulunan f'_c ve ε'_c, sarılmamış betonun özellikleridir. ε'_c terimi sarılmamış betonun basınç gerilmesinin en yüksek değerine karşılık gelen şekil değiştirmedir ve aşağıdaki 6.41 formüllü ile bulunabilir.

$$\varepsilon'_c = \frac{1.71 f'_c}{E_c} \tag{6.41}$$



Şekil 6.30 FRP mantosu ve beton kolondaki harici ve dahili kuvvetler diyagramı [7]



Şekil 6.31 Donatısız, etriyeli ve FRP mantolu beton kolonların basınç etkisindeki tipik davranışı [7]

6.3.1.2 Boyuna şekil değiştirmenin bir fonksiyonu cinsinden sargı basıncı

FRP'deki uzama (ve bundan dolayı sağladığı sargı basıncı) betondaki enine şekil değiştirmeye eşittir. Betonun enine genişlemesi betondaki boyuna şekil değiştirmeye bağlıdır. Böylece eksenel şekil değiştirme arttığı zaman, enine ve boyuna şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi tanımlamak gerekir. Bunun gibi bir ilişki üç eksenli gerilme altında beton davranışı esas alınarak geliştirilmiştir. FRP mantosunun özelliklerine bağlı olarak değişken bir sargı basıncı için eksenel şekil değiştirme (ε_c) bağıntısı enine şekil değiştirme (ε_t) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir [7].

$$\varepsilon_c = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon_t}{\nu_c} + \dfrac{(1+2\nu_c) f_{cp}}{E_c \nu_c} & \varepsilon_t \le \varepsilon_{t,cr} \quad \text{için} \\ \varepsilon_{c,cr} - \dfrac{\nu_c \left(\varepsilon'_{cc} - \varepsilon_{c,cr}\right)}{(1-2\nu_c)} \left[\dfrac{\left(\varepsilon'_{cc} - \varepsilon_{c,cr}\right)}{\varepsilon'_{cc}} + g(\varepsilon_t) \right] & \varepsilon_t \rangle \varepsilon_{t,cr} \quad \text{için} \end{cases} \tag{6.42}$$

$$g(\varepsilon_t) = \sqrt{1 + \frac{1-2\nu_c}{\nu_c{}^2 \varepsilon'_{cc}} \left[\varepsilon_{t,cr} + 2\varepsilon_t + \nu_c \varepsilon_{c,cr} \left(\frac{\nu_c \varepsilon_{c,cr} - 1}{1-2\nu_c} - 1 \right) \right]} \tag{6.43}$$

Bu ifade, enine ve boyuna şekil değiştirmenin başlangıçta poisson oranıyla baglantılı olduğunu belirtir. Betondaki ilk enine çatlağın başlamasından sonra, enine şekil değiştirme hızla artar. Çatlağın başladığı andaki enine şekil değiştirme denklem (6.44)'de ve boyuna şekil değiştirme de denklem (6.45)'de verilmiştir.

$$\varepsilon_{t,cr} = \varepsilon'_t + \frac{f_{cp}(1-2\nu_c)}{E_c} \tag{6.44}$$

$$\varepsilon_{c,cr} = \frac{\varepsilon_{t,cr}}{\nu_c} \tag{6.45}$$

6.3.1.3 FRP sarılı beton için yapılan düzenleme

Boyuna şekil değiştirmenin herhangi bir değerine ilişkin gerilme denklem (6.46)'deki gibi hesaplanır.

$$f_c = \frac{1.8 f'_{cc} \left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)}{1 + \left(\dfrac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_{cc}} \right)^2} \tag{6.46}$$

FRP ile sarılmış betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı, FRP'de bir şekil değiştirme (veya betonda enine şekil değiştirme) seçilmesi, sağlanan sargı basıncı hesaplanarak bu sargı basıncı için gerilmenin en uç değerinin hesaplanması, enine şekil değiştirmeye bağlantılı olan boyuna şekil değiştirmenin bulunması ve son olarak boyuna şekil değiştirmenin bu değerine ilişkin gerilmenin hesaplanması ile geliştirilebilir. Bu işlem, FRP lif malzemesinin sıfırdan nihai uzamasına (ε_{fu}) kadar olan FRP 'deki şekil değiştirmenin bütün değerleri için geçerlidir [7].

6.3.2 Eksenel kuvvet ve eğilme momentleri

FRP ile sarılmış kolonun normal kuvvet ve moment dayanımı etkileşimi şekil değiştirme uygunluğu ve gerilme dengesi uygulanarak hesaplanabilir. FRP matosu betonarme hesaplarını sadece geliştirme etkisine sahiptir.

6.3.2.1 Nihai dayanım analizi

Teorik olarak, betondaki nihai boyuna şekil değiştirme, kopma anında FRP malzemesindeki şekil değiştirmeye benzer bir şekil değiştirme tarafından sınırlanır. Yine de betonun kayma bütünlüğünü sürdürmek için enine şekil değiştirme 0,005'de sınırlandırılmalıdır.

Gerilmelerin belirlenmesi işleminde, beton gerilmesinin yeri ve büyüklüğünü bulmak için dairesel kesitli bir kolon ile kaynaştırmak gerekir. Hesaplar oldukça karmaşık olduğundan bilgisayar programları ya da karşılıklı etkileşim diyagramları kullanılabilir. Eğer FRP sarılması yetersiz fretlerin yerine yapılması amacı ile uygulanacaksa, daha düşük azaltma çarpanı ϕ, kullanılması tavsiye edilir.

6.3.2.2 Kullanılabilirlik

Nihai duruma yakın yük seviyelerinde, betonda radyal doğrultuda önemli çatlak şekilleri oluşabilir. FRP manto kolonun yapısal bütünlüğünü sağlar ve hasarı bastırır. Yine de servis yükleri seviyelerinde bu çeşit hasardan sakınılmalıdır. Bunun için FRP mantosu sadece geçici aşırı yükleme boyunca etki yapacaktır.

Servis yükleri altında radyal çatlakların oluşmamasını sağlamak için, betondaki şekil değiştirme ε_{cr}'nin altında kalmalıdır. Bu da betonda sınır gerilmesinin 0,65 f'_c olmasına bağlıdır. Buna ilâve olarak sürekli ve tekrarlı yükler altında plastik defermasyondan sakınmak için donatıdaki gerilme de 0,60 f_y'nin altında kalmalıdır.

Betondaki bu gerilme seviyesinde FRP mantosundaki gerilme sıfır olacaktır. FRP mantosu sadece, beton enine genişlemesinin büyük olduğu durumlarda ε_{cr} 'nin üzerinde şekil değiştirme yaptığı zaman gerilme alır [7].

6.3.3 Kesme kapasitesinde artış

FRP mantosu enine doğrultuda ilave dayanım sağlandığından dolayı, kesme dayanımı da geliştirilmiş olur. Enine FRP donatısı ile sarılmış kirişin kesme dayanımına benzer şekilde FRP ile sarılmış kolonun kesme kapasitesi de denklem (6.47)'den belirlenebilir.

$$V_n = V_c + V_s + 0.85V_f \tag{6.47}$$

Kesme kapasitesine FRP mantosunun katkısı aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$V_f = \frac{\pi}{2} n t_f R f_{fu} h \tag{6.48}$$

FRP mantosu kolonu tamamen kapladığı için azaltma katsayısı R de aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R = \frac{0.005}{\varepsilon_{fu}} \tag{6.49}$$

6.3.4 Dairesel bir kolonun nihaî yük taşıma kapasitesinin arttırılması hesabı

İstenilen: Normal kuvvet ve moment etkisi altındaki bir kolona, tasarım yüklerinin %20 fazlasını taşıyabilmesi için sarılması gereken CF130 kat sayısının bulunması [7]

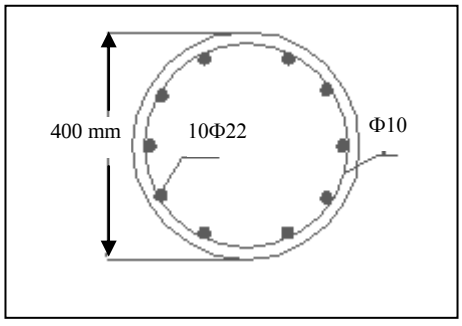
Verilenler:

N = 2590000N

M = 185000000 Nmm

f'_c = 35 MPa

f_y = 420 MPa



Şekil 6.32 Kolon enkesiti

- Mevcut donatı oranı

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{10 * 2{,}2^2 * \pi/4}{40^2 * \pi/4} = 0{,}03$$

- %20 ilâve edilmiş normal kuvvet ve eğilme momenti değerlerinin bulunması

$$N_u = 1{,}2 * 2590000 = 3108000N = 3108\ kNm$$

$$M_u = 1{,}2 * 185000000 = 222000000Nmm = 222\ kNm$$

Diğer hesaplamalarda aşağıda şekil (6.33) ve (6.34)'de verilen boyutsuz etkileşim diyagramları kullanılacaktır.

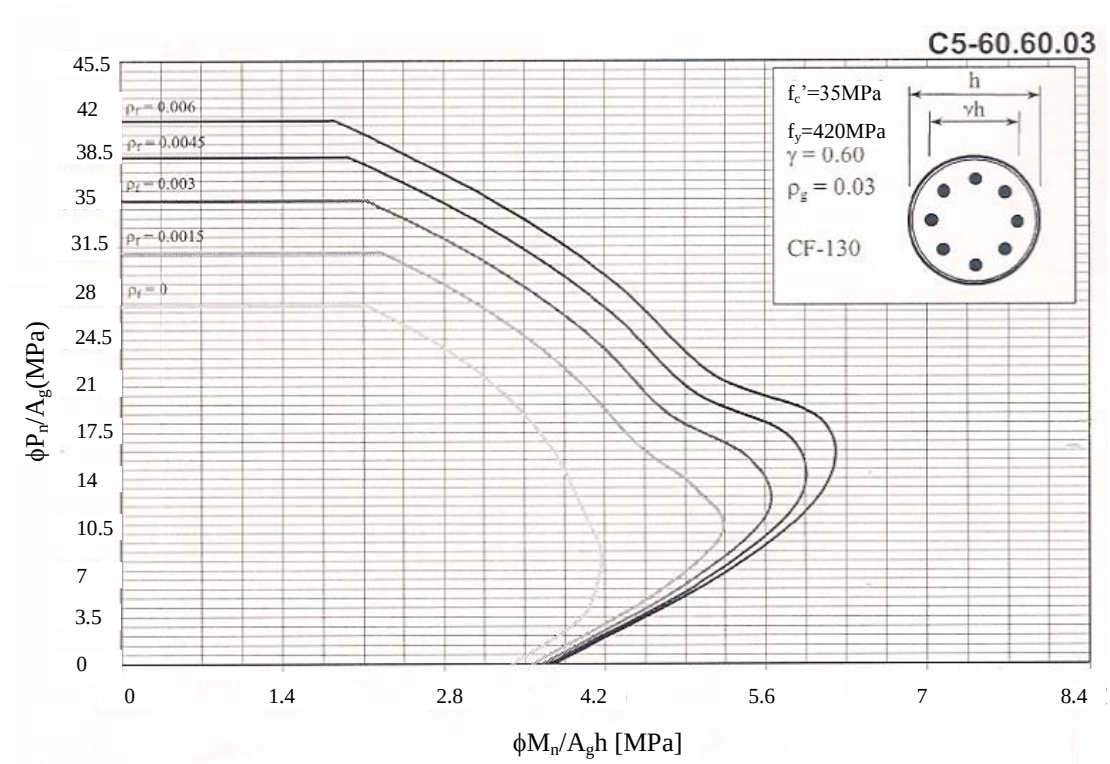
Donatı merkezi tanımlanarak dairenin çapının hesabı

$$\gamma h = 400 - (2 * 40) - (2 * 10) - 22 = 278mm$$

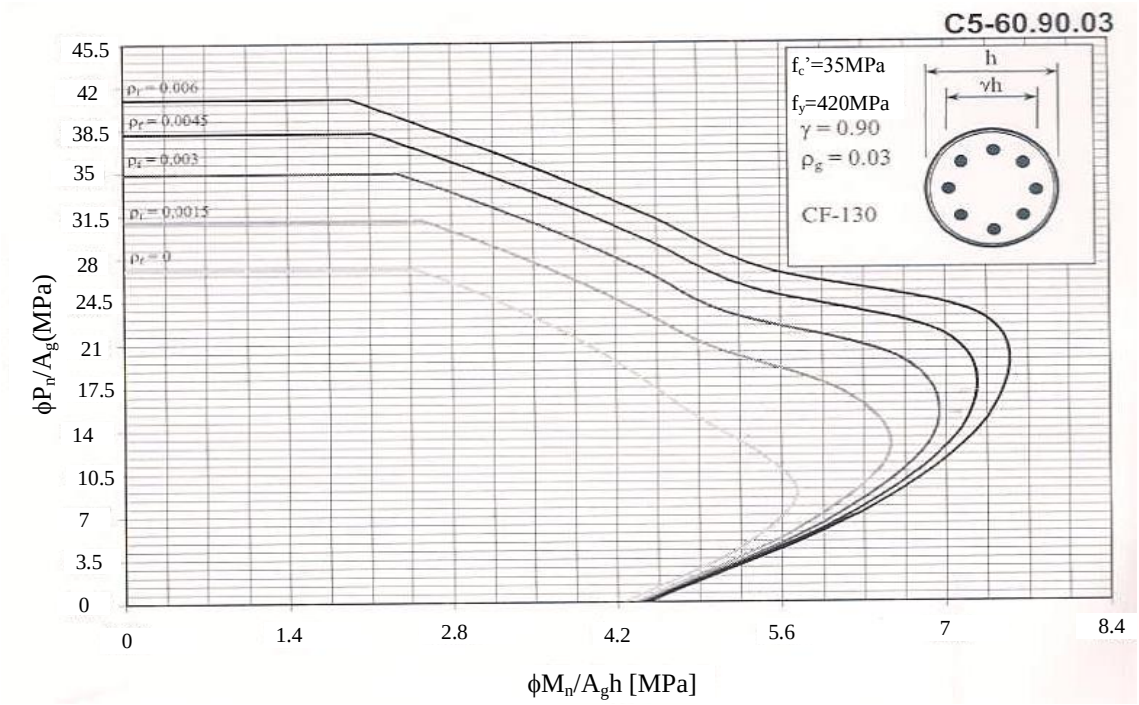
$$\gamma = \frac{\gamma h}{h} = \frac{278}{400} = 0{,}695$$

- Birim normal kuvvet ve eğilme momentinin bulunması

$$\frac{N_u}{A_c} = \frac{3108000}{125663{,}7} = 24{,}73MPa$$



Şekil 6.33 γ = 0.60 için karşılıklı etkileşim diyagramı



Şekil 6.34 γ = 0.90 için karşılıklı etkileşim diyagramı

$$\frac{M_u}{A_c * h} = \frac{222000000}{125663{,}7 * 400} = 4{,}42 MPa$$

Bulunan bu değerlerle yukarıdaki etkileşim diyagramından yararlanılarak gerekli FRP donatı oranı bulunabilir.

Şekil 6.33'den $(\gamma = 0{,}6)$ ve $(\rho_g = 0{,}03) \Rightarrow \rho_f = 0{,}0030$

Şekil 6.34'den $(\gamma = 0{,}9)$ ve $(\rho_g = 0{,}03) \Rightarrow \rho_f = 0{,}0015$

Doğrusal enterpolasyondan $\gamma = 0{,}7$ için $\rho_f = 0{,}0025$ bulunur.

- Gerekli sargı kalınlığı hesabı

$$nt_f = \frac{\rho_f * h}{4} = \frac{0{,}0026 * 400}{4} = 0{,}26 mm$$

- Gerekli kat sayısı hesabı

$$n = \frac{0{,}26 mm}{0{,}165 mm/kat} = 1{,}57 kat \quad \Rightarrow \quad 2 \text{ kat}$$

Böylece %20'lik bir yük artışını karşılamak için 2 kat CF130 kullanılmasının yeterli olduğu görülür.

7.İŞÇİLİK VE MONTAJ

7.1 Malzeme Depolaması

Kalın lifli kompozit levhalar sahaya genellikle montaj için istenen boyda taşınırlar. Daha ince levhalar ve tekstiller sahada istenilen boyda kolayca kesilebilecek uzun rulolar halinde taşınırlar. Malzemeler hasar ya da kirlenmeden kaçınacak şekilde depolanmalıdır.

Yapışkanlar, en fazla ve en az depolanma sıcaklıklarına dikkat edilerek üreticinin açıklamalarıyla uyumlu bir biçimde kuru koşullarda depolanmalıdır. Yapışkan ve malzeme taşıma tarihleri kaydedilmelidir [4].

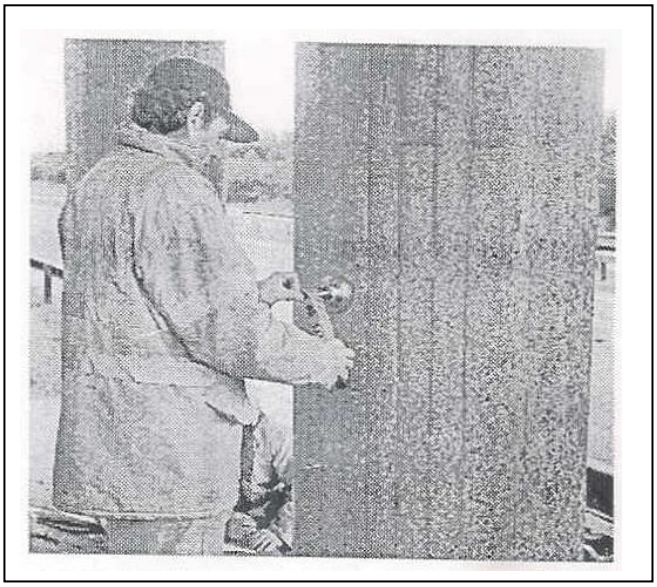
7.2 Saha Koşulları

Sıcaklık, relatif nem ve montaj zamanındaki yüzey rutubeti FRP sisteminin performansını etkiler. Bundan dolayı yüzey hazırlığı, yapışkanın uygulanması ve sonraki kür dönemi süresince çalışma alanında uygun ortam elde etmek gerekmektedir.

Kür dönemi süresince uygun değerde ve belirli limitlerde yapışkanda sıcaklığı sağlamak gereklidir. Belirli maksimum sıcaklığın aşılması, birleşim yerinde uzun vadede etkinliğin azalmasına sebep olur. Belirli minimum sıcaklığın altındaki kür sıcaklıkları, yapışkanda düşük mukavemete sebep olabilir [4].

7.3 Mevcut Beton Kalitesinin Belirlenmesi

Güçlendirmenin yapılmasına karar vermeden önce yapının durumunun belirlenmesi gerekir. Bu araştırma, yapışmanın yapılacağı beton yüzeyin iyice incelenmesini, beton mukavemetinin hesaplanmasını (Şekil 7.1), kimyasal analizi ve hasar tespiti için bir dizi incelemeyi içerir. Eğer hasarlar belliyse, onarımlar üreticinin istekleri ile uyum sağlayan uygun bir beton onarım sistemi kullanılarak yapılmalıdır. Çimentolu onarımlar, kürlerini tamamlayabilmeleri için yapıştırma işine başlamadan en az 28 gün önce yapılmalıdır.



Şekil 7.1 Beton dayanımının tayini için çekme testinin kullanılması [4]

7.4 Yüzey Hazırlığı

7.4.1 Beton yüzeyi

Yapıştırma ve güçlendirme işleminin uzun süreli başarısı için beton yüzeyinin iyi hazırlaması son derece önemlidir. Yapışkan uygulanmadan önce beton yüzeyi gevşek malzemeden, kalıp şişmesinden, yağdan, boyadan, korozyon ürünlerinden, önceki kaplamalardan ve yeni beton halinde ise kalıp ayırma katkılarından ve kürleme membranlarından temizlenmelidir.

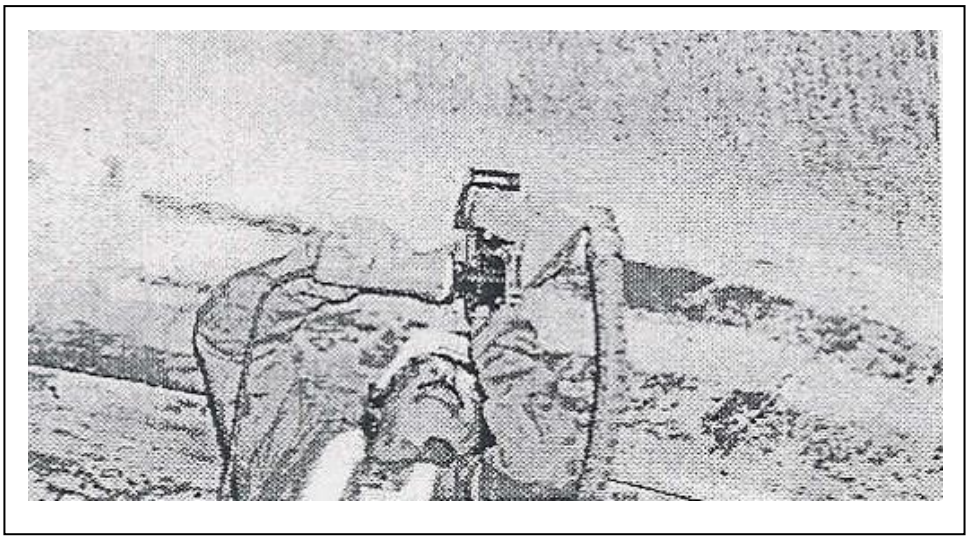
Yüzey cilalanmış ya da aşırı pürüzlü olmamalıdır. Keskin kenarlar, kalıp izleri ya da diğer düzensizlikler düzgün bir yüzey elde etmek için ortadan kaldırılmalıdır [4].

7.4.2 Hazırlık teknikleri

Etkili hazırlık tekniği şunları içerir:

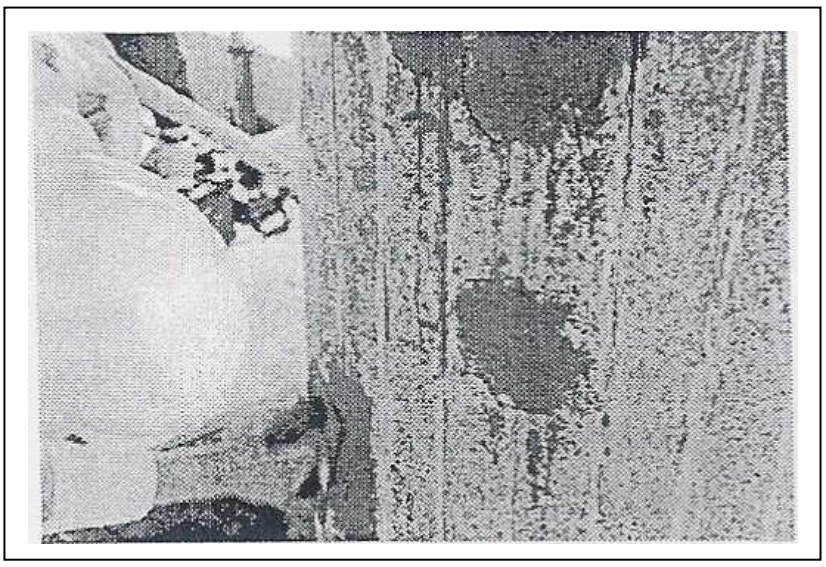
- Islak, kuru ve hava aşınma tahribi.
- Deterjan emülsiyonu(sürülmesi) yapılarak ya da gerekli yerlerde biyositler kullanarak yüksek basınçta yıkama.
- Deterjanlarla birlikte ya da tek olarak duman temizlemesi.
- Daha küçük alanlar için mekanik lastik fırçalaması ya da yüzey taşlaması.

Mekanik yöntemler derinlere girmiş yağ, katran ve boyaları yoketmede etkili olabilirler.



Şekil 7.2 Yüzey taşlaması [4]

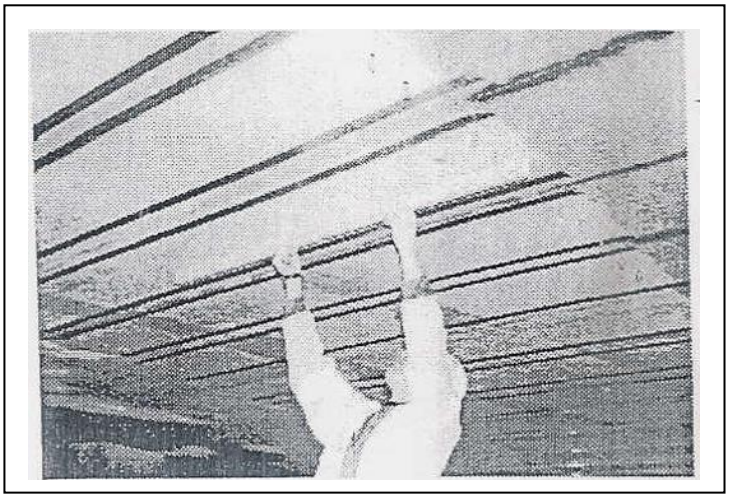
Yıkama teknikleri yararlı olmayabilir ve kirletici maddeyi daha da yayabilir. Bu gibi durumlarda çözücü bazların ve jel veya lapa formundaki sodyum hidroksit bazlı ürünlerin kullanımı kirletici maddelerin uzaklaştırılmasında etkili olabilir.



Şekil 7.3 Çabuk kür alan tamir harçlarıyla yüzey kusurlarının doldurulması [4]

Hangi yöntem seçilirse seçilsin malzeme üreticisiyle birlikte tekniği seçmek için denemelerin yapılması tavsiye edilir. Yüzeyin düzgünlüğü, 1 m'lik düz bir sopanın altındaki boşluk 5mm'yi aşmayacak şekilde olmalıdır. Yapışkan katmanın kalınlığı, malzemeye bağlı olarak genellikle 1 ile 5 mm arasında olur.

Tekstil köşe etrafına sarılırken liflere zarar vermemek için köşeler min. 15 mm yarıçapla ya da üreticinin önerdiği gibi yuvarlatılmalıdır.



Şekil 7.4 Düz sopa ile yüzeyin kontrolü [4]

Beton yüzeyindeki ufak düzensizlikler bu bölümde zayıf katmanlara uygulanan epoksi malzemeleriyle iyileştirilebilir. Bazı birleşim sistemleri yüzey hazırlığının tamamında bir astar kullanımı ister.

Yüzey kalitesinin son hesabı, bir çekme deneyleri serisi halini alır. Alttaki tabakanın çekme dayanımını ve yüzey hazırlığının kalitesi hakkında bir bilgi edinmek için en az 3 test yapılır. Normal uygulamalarda beton yüzeyi kuru olmalıdır [4].

7.5 Yapışkanın Karıştırılması ve Uygulanması

7.5.1 Genel

Yapışkan ve malzemelerin karıştırılmasında ve uygulanmasında kullanılan ekipmanlar temiz bir şekilde korunmalıdır.

Malzemelerin miktarı belirli miktarı aşmamalıdır. Reçine ve sertleştirici belirli oranlarda beraber karıştırılmalıdır aksi takdirde kür edilmiş yapışkanın özellikleri zayıflayacaktır. Bunun için reçinelerin ve sertleştiricilerin önceden bölümlenmiş miktarları kullanılmalıdır.

Karışımın içerdiği maddeler tam olarak birlikte karıştırılmalıdır. Bazı yapışkanlar değişik renklerde reçine ve sertleştirici karışımı ile meydana gelir. Renk değişimi karışımın tam olarak gerçekleşip gerçekleşmediğini kontrol etmeyi kolaylaştırır [4].



Şekil 7.5 Uygun bir ekle bir elektrikli araç kullanılarak karıştırılan yapışkanı gösteriyor [4]

7.5.2 Levha montajından önce alt tabakanın uygulanması

Beton yüzeyi FRP levhaları ile güçlendirildiği zaman, karıştırılmış yapışkan birleşim bölgesine bir mala yardımıyla el ile sıvanarak uygulanır(Şekil 7.6). Yapışkan kalınlığı 1-2 mm civarında tutulmalıdır.



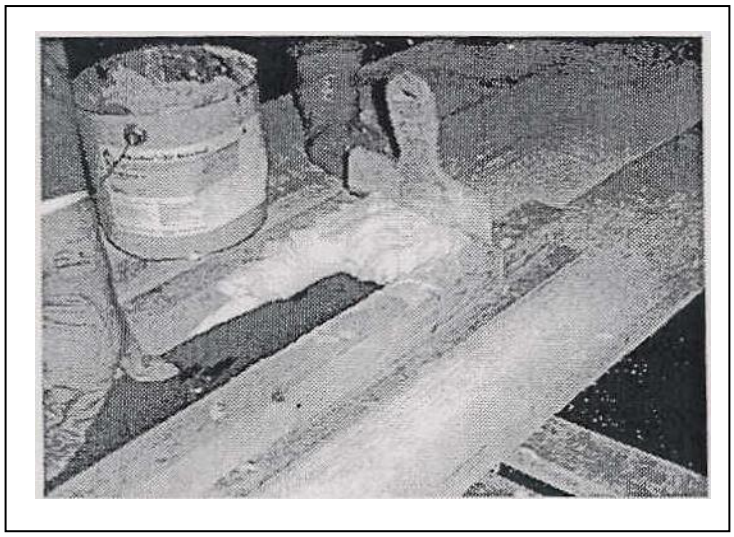
Şekil 7.6 Beton yüzeye yapışkanın uygulanışı [4]

7.5.3 FRP levhaların uygulanması

Eğer lifli kompozit levhalar kullanılırsa, yapışkan uygulamasından hemen önce levhaların yüzeyleri hazırlanmış olmalıdır. Bu hafif aşındırma ve bir çözücü ile temizleme işlemlerini içerir. Bazı malzemeler kaldırıldığında uygun pürüzlülükte

temiz bir yüzeye rastlanan kabuk katmanıyla üretilirler. Bu sahada hiçbir iyileştirme gerektirmediği için tercih edilen bir yoldur.

Yapışkan katman, levhaların bir ucundan diğer ucuna kadar hafif bir tümsek şeklinde görünüş vermek için uygulanır. Orta çizgi boyunca fazla kalınlık boşluk şekillenmesi riskini azaltmaya yarar. Uygulama yöntemi Şekil 7.7'te gösterilmiştir.



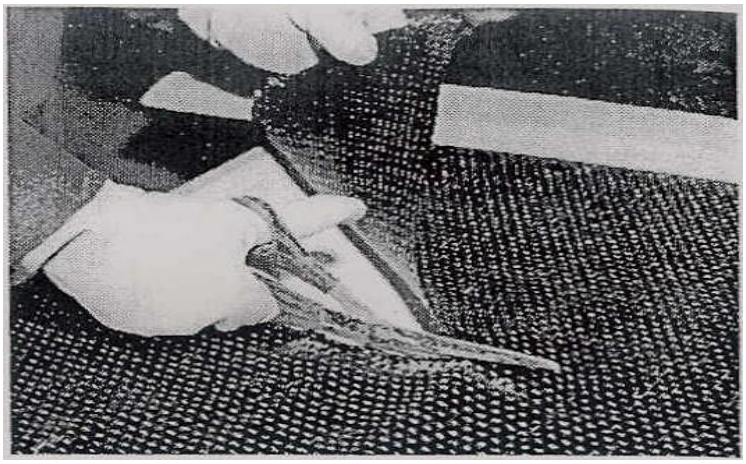
Şekil 7.7 Kompozit lifli levhanın üzerine yapışkanın uygulanışı [4]

7.5.4 Tekstil uygulanmasından önce alt tabakanın uygulanması

Beton yüzeyi FRP tekstili kullanılarak güçlendirildiği zaman, elle tutulan köpük silindir(rulo) ya da fırça kullanılarak uygulanır. Bu beton yüzeyini doyurmak ve tekstil malzemesinin yapışkanının tutmasını sağlamak için düzenli olarak yapılmalıdır [4].

7.5.5 FRP tekstillerinin uygulanması

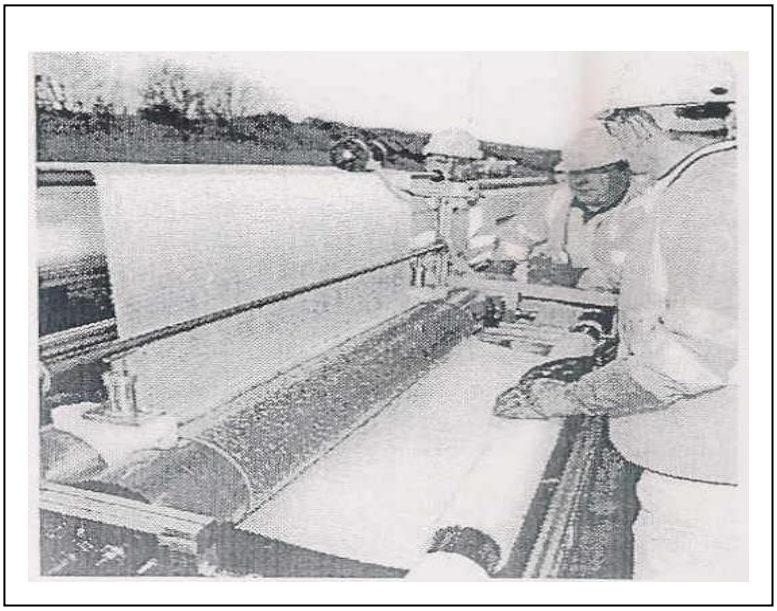
Tekstil, Şekil 7.8'da görüldüğü gibi basit aletler kullanarak istenen ölçülerde kesilebilir. Kuru tekstil kullanıldığında yapışkan tekstile uygulanmadan reçine doyurulmuş beton yüzeyine doğrudan uygulanır. Islak tekstil kullanıldığında ise tekstil monte edilmeden reçine tekstile uygulanır. Bu reçine el ruloları (Şekil 7.9), fırçalar ya da emdirici makinelerle (Şekil 7.10) tekstile uygulanır.



Şekil 7.8 Tekstilin makas ile düzgünce kesilişi [4]



Şekil 7.9 Rulo kullanarak reçinenin uygulanışı [4]



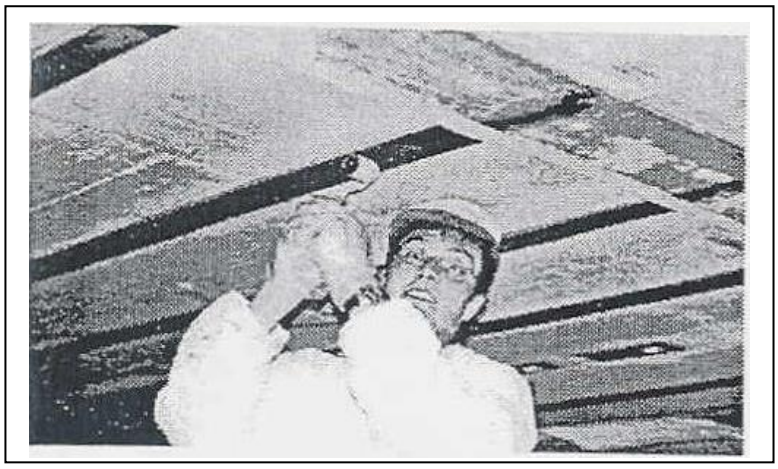
Şekil 7.10 Tekstilin emdirilme işlemi [4]

7.6 Montaj ve Görsel Kontrol

7.6.1 FRP levhalarının montajı

Yapışkan uygulamasından hemen sonra lifli kompozit levha beton alt tabakası ile temasa geçirilmelidir.

Kenarlardaki artık yapışkanları almak ve yapıştırıcı bir hat oluşturmak için merkez hat boyunca sondan başlayarak ve dıştan çalışarak rulo yardımıyla eşit bir basınç uygulanır (Şekil 7.11). Çoğu durumda en son yapışkan kalınlığı için 1.5-2 mm idealdir. Artık yapışkan raspa, bez ya da çözücü kullanılarak ortadan kaldırılır.



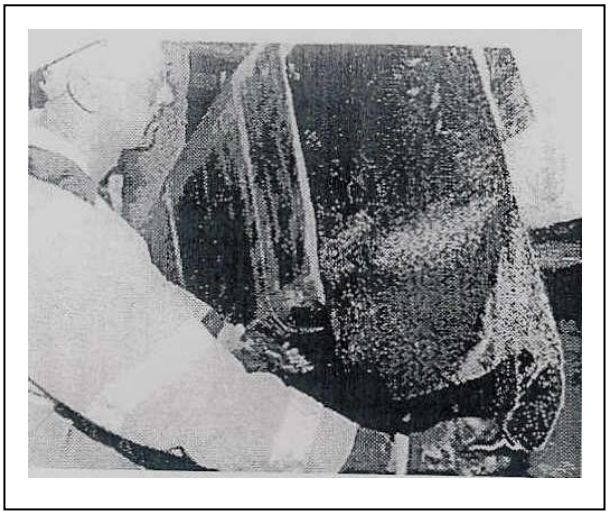
Şekil 7.11 Rulo ile basınç uygulayarak levhaların yerlerine monte edilmesi [4]

Levhaların üst üste eklendiği yerde liflerin doğrultusundaki minimum bindirme boyu 200 mm'den az olmamalıdır. Bir döşemenin üst yüzeyi veya alt tabakasındaki FRP levhalarının aralığı 0.2x açıklık veya 5x döşeme kalınlığı değerlerini aşmamalıdır.

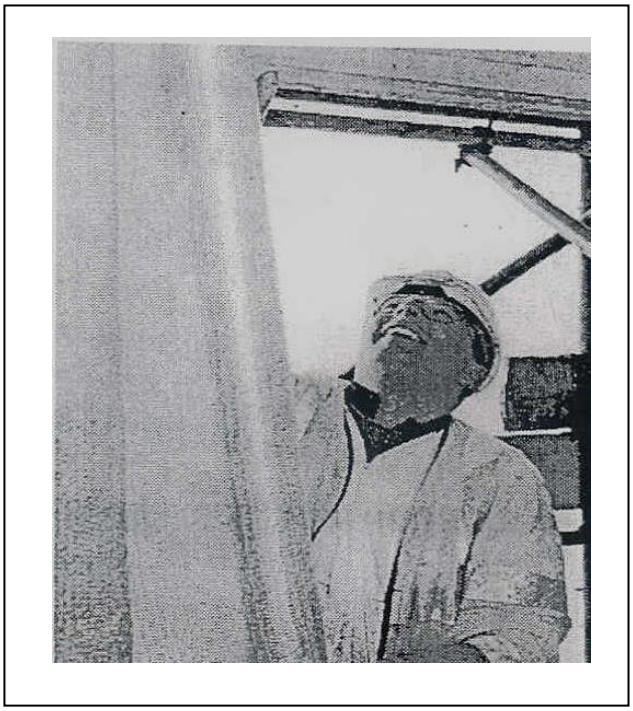
Montajdan hemen sonra birleşim yeri kontrol edilmelidir. Amaç devamlı ve uniform yapışkan katman olup olmadığını kontrol etmektir. Bazı durumlarda yapışkanın sağlamlığı demir para gibi ufak bir maddenin kenarı ile hafifçe vurarak da kontrol edilebilir. Boşluk ya da açıklıklar kendilerine has karakterde ses verirler. Kusurlar bulunursa reçine enjeksiyonu ya da levha eklemesi gibi teknikler onarma için kullanılabilir [4].

7.6.2 FRP tekstillerinin montajı

Kuru tekstil beton alt tabakası üzerine buruşturulmadan sarılır. Şekil 7.12 bir kirişe sarılan tekstili ve Şekil 7.13 de kolona sarılan tekstili göstermektedir.



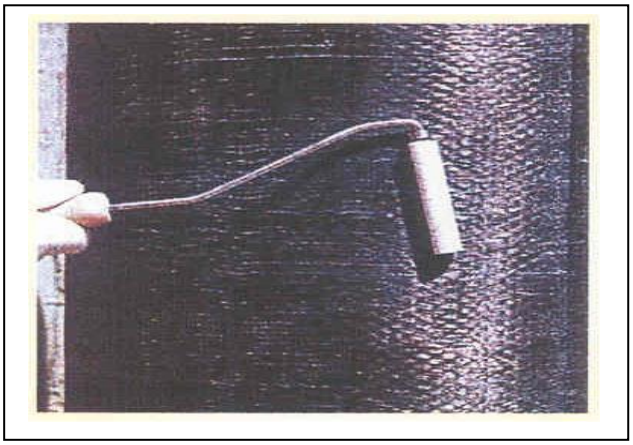
Şekil 7.12 Köşeli bir elemanın çevresine tekstil sarılması [4]



Şekil 7.13 Kolon çevresinin tekstil ile sarılması [4]

Uygulamadan sonra, havayı boşaltmak ve lifler arasındaki yapışkanı kuvvetlendirmek için rulo ile tekstilin üzerinden geçilir (Şekil 7.14).

İstenirse, tekstilin ikinci ve diğer katmanları da aynı tarzda yapılabilir. Son olarak, kompozit malzemeyi kapsül içine almak ve korumak için bir epoksi yapışkan katmanı uygulanır. Alternatif olarak, tekstile reçine emdirilir ve sonra elemanın etrafına sarılır. Daha önce de olduğu gibi, yüzey buruşukluklarını yoketmek ve havayı boşaltmak için rulo ile üzerinden geçilir.



Şekil 7.14 Hava boşluklarını almak için rulonun tekstil üzerinde lif doğrultusunda gezdirilmesi [28]

Tekstil malzemeleri için liflerin doğrultusunda minimum ekleme üretici şartnamesiyle aynı olmalı ve 200 mm'den az olmamalıdır. Bir doğrultuda en fazla 5 katman tavsiye edilmiştir. Ama bir sistemde, 10 katmana kadar kullanılması durumunda etkinlikte bir değişme olduğu da görülmemiştir [4].

7.7 Tahribatsız Deneyler

Tahribatsız deneyler tam ve kürlenmiş bir birleşmeyi incelemek için yapılabilirler. En genel olanı akustik ses deneyidir (çekiç vuruşudur). Termografi geniş alanları araştırmak için kullanılabilir. Ultrasonik test gibi diğer metodlar geliştirilmektedir. Ancak, uzun dönemde birleşim yerinin ayrılmasına yol açan zayıf yapışmayı araştırabilen tahrip edici olmayan yöntemler yoktur. Uzun dönem performansta güven sağlamak için güçlendirme sırasında perçin kolları monte edilebilir. Yapışkan ve alt tabaka arasındaki yapışmayı kontrol etmek için daha ileriki dönemde çeşitli zamanlarda bunlar üzerinde çekme testleri yapılabilir. Benzer bir şekilde, sahada güvenli bir şekilde yapılan ek çift kat kayma test numuneleri güçlendirme sırasında hazırlanabilir ve ileriki dönemde çeşitli zamanlarda FRP malzemesi ve yapışkan arasındaki yapışmayı kontrol etmek için test edilebilirler.

ACI 440 Guide gibi bazı dokümanlar kabul edilebilir levha sıyrılma mertebesini belirtirler. Ancak kabul edilebilir mertebe, yapıdaki güçlendirme ve bölgeye bağımlı olacaktır. Örnek olarak, bir kirişin üzerinde bilhassa yüksek kayma olan noktalardaki bir levhanın sıyrılması önemli bir etkiye sahipken, bir kolon mantolanmasında levhanın yapışma bölgesinde yeryer sıyrılması performansa az bir etki yapacaktır [4].

7.8 Üst Kaplama Uygulanması

Üst kaplamalar yapılırken, bunlar alt kısımdaki kompozit malzeme ile bir bütünlük göstermelidir. Bu üst kaplamalar aşağıdaki sebeplerden dolayı yapılırlar:

- Yangın koruması : Yönetmelikler bir üst kaplama katmanı uygulanmasını gerektirebilir.
- Tahribe karşı koruma : FRP malzemesi hasarda zedelenebileceği zaman, çimento veya harç ya da sprey ve elle kapsüllenebilir.
- Görünüş : Yapıyla uyum sağlaması için kompozit malzemeye güzel görünümlü bir üst kaplama yapılabilir.
- Ultraviyole radyasyona karşı koruma : UV koruması istenirse çimentolama veya üst kaplama uygulanabilir.
- Geçirimliliğe karşı yalıtım : Eğer geçirimliliğe karşı yalıtım önerilirse, bir üst kaplama katmanı yapılabilir. Bu çimento veya epoksi esaslı bir harçla el veya sprey kullanılarak yapılır.
- Diğer sebepler : Belli durumlarda FRP malzemesi yapısal düzeltmelerle ya da köprü üstlerinde su geçirmez malzemeyle korunabilir [4]

Şekil 7.15, Duelly Port Köprüsünün üst kısmındaki FRP levhalarına uygulanan spreyli harç üst kaplamasını göstermektedir.



Şekil 7.15 Üst kaplama harcının sprey ile uygulanması [4]

Yaklaşık bir gün sonra reçine kürünü alınca boya veya sıva uygulanabilir. Sıva yapılacaksa, sarılma işlemi biter bitmez kuvarz kumu ile serpme yapılmalıdır.

8. DÜNYADAKİ UYGULAMALARDAN ÖRNEKLER

1996 yılından 1999 yılına kadar olan zamanda yapılmış güçlendirme metodları incelendiğinde, sadece İngiltere'de resmî kayıtlara geçmiş yaklaşık 150 yapının FRP kullanılarak güçlendirildiği bilinmektedir. Örnek olarak Tablo 8.1 incelenebilir [4].

Tablo 8.1 İngiltere'de FRP ile güçlendirilmiş yapılara bazı örnekler [4]

Tarih	Yapı Türü	Yer	Güçlendirme hakkında kısa bilgi	Malzeme
1996	Bina	King's Kolej Hastahanesi, Londra	İlâve katların taşınabilmesi amacıyla döşemenin alt tabanına	Karbon levha
1996	Köprü	Haversham Köprüsü	Yük taşıyan duvarların kaldırılmasını takiben döşemenin alt tabanına	Karbon levha
1997	Bina	Nestlé Fabrikası, Staffordshire	Kirişlerin alt tabanına	Karbon levha
1997	Bina	Nükleer Güç Binası, Arazisi	Kazara meydana gelebilecek yüklemelere karşı koruma amaçlı duvarlara	Karbon levha
1998	Köprü	Greenbridge Metrosu, Wiltshire	Döşeme alt tabanına	Karbon levha
1998	Köprü	Bible Christian Köprüsü, Cornwall	Kolonların sarılmasına	Karbon, aramid ve cam levha

8.1 Binalardaki Uygulamalar

8.1.1 Kirişler ve döşemelerdeki uygulamalar

8.1.1.1 İlâve yük kapasitesi

Geleneksel güçlendirme metodunda ilâve bir eleman yapılacağı zaman, güçlendirmeyi sağlamak amacıyla kullanılan bulonlar, mevcut yapıya zarar verirler. Karbon FRP (CFRP) levhalar kullanıldığında ise yeterli güçlendirilme, bu levhaların döşemelerin altına yerleştirilmesiyle sağlanmaktadır. Örnek olarak Tablo 8.1'de yer alan Londra'daki King's Kolej Hastahanesi'nin bir bölümünde bu metodun kullanıldığı bilinmektedir.

Benzer şekilde Karbon FRP (CFRP) levhaları ile güçlendirme metodu, bir fabrika binasında duvarları destekleyen kirişlerin yeni teçhizat ve ekipmanların montajı için ihtiyaç duyulan eğilme kapasitesinin %30 arttırılmasında da kullanılmıştır. Güçlendirme uygulaması sırasında fabrikanın çalışmasına hiç ara verilmeden devam edilebilmiştir[4].

8.1.1.2 Yapısal değişiklikler

İngiltere'de Oxfordshire'da bir kütüphane binasında, yük taşıyan duvarın kaldırılması gerektiğinde, döşemenin artan hareketli ve ölü yükleri taşıyabilmesi için karbon FRP levhaları ile güçlendirme metodu kullanılmıştır.

8.1.1.3 Yetersiz donatı

Balkonlarda yetersiz donatıdan dolayı aşırı sehimin neden olduğu çatlakların önlenmesinde Almanya ve İtalya karbon lifleri ile güçlendirme metodunu tercih etmiştir.

Pittsburg Uluslararası Havaalanı'nda bulunan çok katlı araba parkında prefabrik öngermeli kirişlerin uçlarındaki kesme kapasitesi karbon lifli tekstiller kullanılarak güçlendirilmiştir.

8.1.1.4 Yanlış yerleştirilmiş donatılar

Lincoln Yarborough Okulu'nda yanlış yöne monte edildiklerinden prekast merdiven basamakları karbon lifli şeritler kullanılarak güçlendirilmiştir.

8.1.1.5 Yapısal hasar

İtalya'da öngermeli çift eğrilikli beton kabuk çatının bütün yüzlerine iki yönde karbon lifli şeritler yapıştırılmıştır. Yapı, öngerme yeteneğinde bazı kayıpların olması sonucu hasara uğramıştır. Geleneksel onarım tekniklerinin uygun olmayacağına karar verilmiştir. Bir sergi salonunun ana çatı kirişlerinin hem eğilme hem de kesme kapasitelerini arttırmak amacıyla güçlendirmesi için karbon lifli şeritler kullanılmıştır [4].

8.1.1.6 Onarım

Chicago, Amerika'da bir araba parkında korozyondan dolayı çelik-beton kompozit döşemesinde oluşan hasar, mesnetlerin üzerindeki döşemenin üst yüzeyine karbon lifli levha yapıştırılmak suretiyle onarılmıştır. Yaklaşık 3 mm genişliğindeki mevcut çatlakların bazıları pik gerilmeleri azaltması için mesnedin her iki yanında levhalar ile yapıştırılmıştır.

8.1.2 Kolonlardaki uygulamalar

8.1.2.1 İlâve yük kapasitesi

1998 yılında Manchester'da 7 katlı bir otoparkın ana kolonlarını güçlendirmede karbon lifli levhalar kullanılmıştır. Malzeme, montajın hızlı olabilmesi ve kolon çapının artışının en az düzeyde olabilmesi için, kolon etrafına ilâve beton katmanı dökümü gibi geleneksel yaklaşıma alternatif olarak seçilmiştir [4].

8.1.2.2 Yanlış tasarım

Aşırı yer hareketleri ve taban yüklemesi Dublin'de bir otelin otoparkının en alt katında bulunan yeni inşaa edilmiş kare kolonlarda kesme kırılmasına yol açmış, kesme kırılmasının onarımından sonra kolonlar karbon lifli plakalarla sarılmak suretiyle güçlendirilmişlerdir. Bu yaklaşımın geleneksel güçlendirme metodlarından daha hızlı olduğu anlaşılmıştır.

8.1.2.3 İlâve sismik kapasitesi

Kanada'da hasar görmüş kolonların yüzeyleri, yük taşıma kapasitelerinin arttırılması amacıyla Cam FRP (GFRP) levhalar ile yapıştırılmıştır. Amerika'da ve Japonya'da ise depremden sonra hasar görmüş kolonlar Karbon FRP'lerle (CFRP'lerle) sarılmak

suretiyle güçlendirilmiştir. Benzer şekilde yüzeye yapıştırma metodu kullanılarak aramid lifle sarılan kolonlar güçlendirilmiştir.

8.1.3 Kolon - kiriş birleşimlerindeki uygulamalar

Florida'da Palm Beach Hilton Oteli'nin garajında kolon-kiriş bağlantılarının güçlendirilmesinde kirişlerin köşelerine karbon lifli malzemelerin yapıştırılması metodu uygulanmıştır. O dönemde yapıştırıcılı birleşme onarımının klasik metodlara nazaran %35 daha ucuz olduğu iddia edilmiştir [4].

8.1.4 Duvarlardaki uygulamalar

İngiltere'de 1997 yılında ilk kez bir nükleer güç istasyonu yapımında pultrasyon yöntemiyle imal edilmiş karbon lifli laminatların montajı gerçekleşmiştir. Sadece 1 metre uzunluğundaki laminatlar, betonarme duvarlardaki yapısal çatlaklar boyunca bir çok yere yapıştırılmışlardır. Amerika ve İngiltere'deki denemeler göstermiştir ki, beton duvarların yüzeylerine aramid liflerin yapıştırılması onların tahrip direncini büyük ölçüde arttırmıştır [4].

8.2 Köprülerdeki Uygulamalar

8.2.1 Kirişler ve tabliyelerdeki uygulamalar

8.2.1.1 İlâve yük kapasitesi

1997 yılında Great Missenden'da A413 yolunun altındaki küçük betonarme geçit, karbon lifli kompozit levhalar ile güçlendirilmiştir. Hounslow'daki Gardens River Köprüsü'nün tabanının karbon lifli plakalarla güçlendirilmesi, hareketli yük kapasitesini arttırmak ve endüstriyel mülkteki ağır taşıtlara izin verilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Karbon lifli hasırların uygulanma yöntemi Avrupa'da ilk defa Fransa'da görülmüştür. Fransa'daki A10 otoyolu üzerindeki köprünün güçlendirilmesi amacıyla dokunmuş karbon lifli hasırlar doğrudan köprünün tabanına bağlanmıştır [4].

8.2.1.2 Yetersiz donatı

Amerika'da Wilminghton'un kuzeyinde bir köprüde; öndökümlü(prekast) kutu kesitli kirişlerin altındaki enine donatıların yetersizliğinden dolayı oluşan

uzunlamasına kırıklar farkedilmiştir. Çözüm olarak karbon lifli plakalar kullanılarak onarım sağlanmıştır.

8.2.2 Kolonlardaki uygulamalar

Kolonların FRP ile güçlendirilmesi sırasındaki uygulamalar genellikle el ile uygulama şeklinde olmuştur. Köprü kolonları gibi büyük yapılarda ise özel üretim makinalar tercih edilmiştir.

8.2.2.1 Lif ile sarma

İngiltere'de bulunan Bible Christian Köprüsü'nün 6 m yüksekliğinde ve 800 mm çapındaki kolonlarının güçlendirilmesinde üç farklı sistem uygulanmıştır. Malzemeler; cam, karbon ve aramidin hem tekstil hem de şerit şeklinde olanlarıdır. Beton yüzey önce temizlenmiş ve onarılmıştır. Daha sonra, lifin ilk tabakasının uygulanmasından önce, tiksotropik reçine emdirilmiştir. Her durumda, eğilme kapasitesinin arttırılabilmesi için bir çok lif katmanı dikey olarak, kayma dayanımının arttırılabilmesi için ise yatay olarak uygulanmıştır.

Sismik direncin gelişmesi için kolonların etrafında FRP sargılarının kullanılması California Ulaştırma Departmanı tarafından onaylanmıştır ve çok sayıda farklı sistemler prototip geliştirmek için denenmektedir [4].

8.2.2.2 Tekstil ile birleştirilmiş genleşen harç

Toronto'daki Leslie Street köprüsünün tamirinin bir bölümünde, çürümüş kolonun etrafına genleşen harç dökülmüştür. Onarım cam lifle sarmayı takiben plastik bir tekstil ile de sarılmıştır. Bu sayede harç genleşmeye devam ederken, cam lifleri çekme alır, asıl beton da iki eksenli basınca maruz kalır.

8.3 Diğer Yapılardaki Uygulamalar

8.3.1 Kuleler ve bacalardaki uygulamalar

Japonya'da tahrip olmuş beton bacaların güçlendirilmesinde karbon ya da aramid liflerinin yüzeye yapıştırılması metodu uygulanmaktadır. Genellikle sismik direnci arttırmak için tercih ediliyor olsalar da bir diğer amaç da ısısal yüklemelere ve rüzgâra da direnç göstermeleridir [4].

8.3.2 Tünellerdeki uygulamalar

Karbon lifli tekstiller betonun iç kaplamasındaki çatlakları onarmak ve dayanımını arttırmak için otoyol ve demiryolu köprülerinde defalarca kullanılmıştır. 1996 yılında Japonya'da yaklaşık 25 yerde bu tip uygulamalar yapıldığı rapor edilmiştir**.**

Kanada'da bulunan Frontenac Hidroelektrik Enerji Santrali'nin bir bölümü olan geniş çaplı su odalarının güçlendirilmesi, 1998 yılında, yüzeyin hem içinde hem de dışında olmak suretiyle Cam FRP uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede çok yüksek nem ortamında betonun gözenekli yapısında su sızmasını da önlemiş olmaktadır.

8.3.3 Su/Kıyı yapılarındaki uygulamalar

Kuzey Denizi'nde bulunan çeşitli fenerlerde güçlendirme malzemesi olarak karbon lifli tekstil kullanılmıştır. Bu sayede, çelik parçaların ağırlıklarından dolayı helikopter kullanarak yerlerine yerleştirilmesi maliyeti ortadan kaldırılmış ve projede ekonomi sağlanmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri Deniz Kuvvetleri beton iskeleleri güçlendirmek için çeşitli kompozit malzemelerin denemelerini yapmaktadır. Gelgit bölgelerinde özel olarak su altı kullanımına uygun olarak imal edilmiş özel epoksiler kullanarak iskele kazıklarını sararak güçlendirmişlerdir. Daha sonra güçlendirilen alan reçine tam olarak kürünü alıncaya kadar bir kat plastik tekstil ile korunmuştur [4].

9. SONUÇ

9.1 FRP'nin Üstünlükleri ve Sakıncaları

Her yapısal problemin birden fazla teknik çözümü vardır. Sonuçta alternatiflerin içinden en ekonomik olan seçilir. Bilinçli kullanıcılar minimum başlangıç maliyeti olan proje seçiminden ziyade, gerekli servis süresi boyunca uğrayacağı toplam maliyetin tahminini içeren değerlendirmenin daha akılcı olduğunu bilirler. Ürün ziyanı ve işletim gecikme maliyeti gibi önemli maliyetler kadar toplam maliyet gelecekteki bakımı da içerecektir [6].

9.1.1 Levhaların dayanımı

FRP kompozit levhaları belli bir amacı karşılamak için parçalarla tasarlanabilir ve çeşitli oranlarda farklı liflerden oluşabilir. Levhaların taşıma gücü böylece çeşitlilik gösterebilir. Ancak güçlendirme projeleri için levhaların taşıma gücü aynı kesit alanlı çeliğinkinden en az 3 kat daha fazladır.

9.1.2 Levhaların ağırlığı

FRP kompozit levhaların yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun sadece %20'si kadardır. Böylece kompozit levhalar aynı nihai dayanıma sahip çeliğin ağırlığının %10'undan daha hafifdir. Kompozit levhaları yerlerinde tutturmak ve hareket ettirmek için büyük kriko ve destek sistemleri gerekmez. Yalnızca yapışkanlar bu desteği sağlayabilirler. Buna karşın, çelik levhaların tutturulmasına çalışmak, önemli bir işçilik masrafı doğurur [6].

9.1.3 Levhaların taşınması

Levhaların ağırlığı çok azdır. Öyle ki 20 m uzunluğundaki kompozit levha bir işçi tarafından taşınabilir. Bazı levhalar 1,5 m çaplı halka şeklinde kıvrılmış bir saç içine bükülebilir(Şekil 9.1). Böylece kamyon veya vinç kullanmak yerine bir araba veya kamyonete sığdırılması sağlanabilir. Levhaların esnekliği güçlendirme projelerinde kuşatılmış boşlukların tamamlanmasını mümkün kılar.



Şekil 9.1 Karbon FRP levhalarının sahaya getirilme şekli [6]

9.1.4 Sistemlerin çok yönlü tasarımı

Çelik levhaların ağırlık ve kullanma zorlukları bakımından uzunlukları sınırlıdır. Yapışkanlara zarar vereceğinden sahada kaynaklanması imkansızdır ve pahalı sabitleme elemanları gerektirir. Buna karşılık, kompozit levhaların uzunlukları sınırsızdır ve güçlendirme koşullarına uymak için tabaka tabaka sabitlenebilir. Hatta o kadar incedirler ki iki doğrultudaki sabitleme çeşitli yapışkan kalınlıkları ile sağlanabilirler.

9.1.5 Kolay ve güvenilir yüzey hazırlığı

Çelik levhalar, kumlama işlemini gerektirir. Bunu takiben montaj öncesine kadar dikkatli koruma sağlanır. Buna karşılık, ROBUST projesi göstermiştir ki kompozit levhalar yapıştırma uygulanmadan hemen önce kolaylıkla kaldırılabilecek koruyucu bir katmanla üretilebilir.

9.1.6 Azaltılmış mekanik sabitleştirme

Kompozit levhalar kendine denk kapasitedeki çelik levhalardan çok daha incedir. Bu da levhaların uçlarındaki soyulma etkilerini azaltır. Böylece uçlarda ihtiyaç duyulacak bir sabitleştirme elemanı olasılığını düşürür. Güçlendirme projesinin kapsamını azaltır, dış görünüşü geliştirir [6].

9.1.7 Güçlendirme sisteminin dayanıklılığı

Çelik levhaların birleştirilmiş yüzlerinde korozyon ihtimali mevcuttur. Özellikle sabitlendirildiği yerdeki beton çatlak ise veya klorid bulaştırılmışsa uzun vadede

birleşimin etkisini düşürür. Kompozit levhalarda ise bunun gibi bozulmalar görülmez.

9.1.8 Yangın güvenliğinin arttırılması

Kompozit levhalar çelik ile kıyaslandığında ısıyı az iletirler. Bu da alttaki yapışkanlara gelen ısı etkisini azaltır. Kompozitin kendisi alev alev yanmaktansa yanarak kömürleşir. Böylece sistem çelik levhalı birleşimden çok daha uzun bir süre etkili kalır [6].

9.1.9 Donma/erime hasar riskinin düşürülmesi

Eğer doğru monte edilirse her ne kadar görülmeyecek olmasına rağmen teorik olarak suyun levha sisteminin arkasına sızabilme riski vardır. Pratikte bunun bir problem yarattığı görülmemiştir. Yine de eğer su bir şekilde sızarsa, kompozit malzemelerin yalıtım özellikleri donmaya/erimeye karşı betonun bozulma riskini azaltır. Birleşimin gördüğü zarar hafifçe kompozite vurarak anlaşılır, ancak bu ziyan çelikte çok daha zor farkedilir.

9.1.10 Takviye sisteminin bakımı

Çelik levhalar bakım ve boya gerektirir, bu da işletmenin çalışmasını aksatır ve üretim kaybına neden olur. Bir kere monte edildikten sonra CFRP, bakım gerektirmez. Plakanın kendisinde bir korozyon riski yoktur. Paslanmaz çelikten ankraj bulonlarının kullanımı, çok zor çevre şartlarında bile çok uzun süre dayanım gösterecektir. Dış tahriplere karşı korumak için katlamak ve montaja yangın koruması uygulamak gereklidir. Monte edilen plakalar kolaylıkla elle veya püskürtülerek uygulanan çimento karışımı ile kapatılabilir. Boyanarak güçlendirilmiş sistemin, dışardan görünmesi engellenebilir [6].

9.1.11 İnşaat süresini düşürmesi

Yukarıda tariflenen birçok pratik avantajı çeliğe nazaran kompozit levhaların montajda harcanan süreyi azaltmasını mümkün kılar. Sözleşme maliyetini düşürdüğü gibi işletmenin gecikme maliyetini de en aza indirir. Taşınabilir platformlardan montajı mümkün olur. Ayrıca sınırlı çalışma ortamlarında pratiklik sağlar.

9.1.12 Öngerme yeteneği

Levha birleşimi öngerme kayıplarının giderilmesinde kullanılabilir ve kesitlerin kesme kapasiteleri boyuna gerilmeleri tarafından arttırılabilir. Böylece çatlakların şekli kısıtlanacak ve yapının kullanılabilirliği artacaktır. Dökme çelik gibi malzemelerin güçlendirilmesi de daha pratik olur.

9.1.13 Levha maliyeti

Denk yük kapasiteli çeliğe nazaran lif donatılı kompozit levhalar daha pahalıdır. CFRP'nin kaba malzeme maliyeti genellikle çeliğin dört katıdır. Buna rağmen, bu iki malzeme arasındaki fark üreticilerin sayıcı arttıkça üretim hacmi ve rekabetten dolayı azalacaktır. (Tarafsız değerlendirmeler gösteriyor ki FRP kompozit levha birleşimi dayanıklılık gibi ilave avantajları hesaba katılmaksızın hemen hemen bütün test şartlarında en ekonomik çözümü vermiştir) [6].

9.1.14 Mekanik hasar

FRP kompozit levhalar hasara uğramaya çelik levhalardan daha hassastır. Balta gibi kesici bir aletle hasara uğrayabilirler. Ancak zedelenebilir alanlar örtü benzeri birşeyle kaplanırsa bu risk azalır. Herhangi bir hasar oluşursa bunun onarımı çelikten daha kolaydır. FRP kompozit levha birleşimi ile hasar muhtemelen daha yerel olacaktır çünkü levha daha ince ve daha esnektir. Hasarlı kısım kesilerek yerine rahatlıkla yeni birleşim yapılabilir.

Özel yapıların ihtiyacı olan güçlendirme projelerine yeni bir biçim vermek için bilgili tasarımcılara geniş çapta seçenekler sunabilmesi, bir avantaj ve fırsat olarak görülebilir. Ancak tecrübesiz tasarımcılar tarafından yapılan uygulamalarda potansiyel bir tehlike mevcuttur. Şu aşamada bütün durumları içeren bir şartname hazırlamak oldukça zordur. Betonarme şartnameler ilk uygulamalarından yüzyıllar sonra bile hala uzmanlar tarafından geliştirilmektedir. Neyse ki FRP'nin gelişimi daha hızlı olacağı umulmaktadır. Analiz yöntemleri yapının davranışını anlama sürecini hızlandırmaktadır.

- Lif donatılı kompozit levha birleşimi güçlendirme uygulamalarının büyük çoğunluğu için çelik levha birleşiminin üstüne önemli avantajlar sunar.
- Yapısal analiz ve yapısal gerileme mekanizmalarını içeren ne yapım ne de onarım metodlarının hiçbirinin tamamen anlaşıldığı söylenemez. Bununla

birlikte, özen gösterilmek koşulu ile FRP levha birleşimini sahada güvenli bir şekilde uygulayabilecek teknikleri mümkün kılmak için yeteri kadar araştırma yapılmıştır.

- FRP kompozit levha birleşim metodu aktif olarak pazarlanmaktadır. Dünya çapında uygulanma sayısı hızla büyümektedir. Yararları, yetersiz veya kötü detaylandırılmış uygulamaların başarısızlığından dolayı gözardı edilmemelidir [6].

KAYNAKLAR

[1] **ACI 440**, 1996. Guide for the design and strengthening of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, *American Concrete Institute*, USA.

[2] **Triantafillou, T.**, 1998. Shear Strenghtening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites, *ACI Structual Journal*, Vol. 95, No. 2, pp. 107-115

[3] **Saadatmanesh, H. and Malek, M.**, 1998. Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC Beams with FRP Plates, *Journal of Composites fir Construction, ASCE,* Vol. 2, No. 4, pp. 158-164

[4] **Technical Report No:55**, 2000. Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials, *The Concrete Society,*UK.

[5] **Kachlakev, D., Green, B. K. and Barnes, W.**, 2000. Behavior of Concrete Specimens Reinforced With Composite Materials, *The Oregon Department of Transportation Research Group,* Oregon.

[6] **Hollaway, L.C and Leeming, M. B.**, 2000. *Strenghtening of reinforced concrete structures*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

[7] **Tysl S., Gold, W. and Sinider, R.**, 2002. Composite Strenghtening System, Wabo Mbrace, New York..

[8] **Feldman, D.**, 1989. Polymeric Building Materials, *Elsevier Science Publishers, Essex.*

[9] **Hull, D.**, 1981. An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge.

[10] **Perkins, P. H.**, 1976. Concrete Structures: *Repair, Waterproofing and Protection*, Applied Science Publishers LTD, London.

[11] **Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K. and Saleh, K. R.**, 1999. Strenghtening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates, *ACI Structural Journal,* Vol. 96, No. 5, pp. 865-874.

[12] **Triantafillou, T. C. and Plevris, N.**, 1992. Strengthening of RC Beams with Epoxy-Bonded Fibre-Composite Matewrials, *RILEM Materials and Structures,* Vol. 25, pp. 201-211.

[13] **Büyüköztürk, O. and Hearing, B.**,1998. Failure Behaviour of Precracked Concrete Beams Retrofilled with FRP, *Journal of Composites for Construction, ASCE,* Vol. 2, No. 3, pp. 138-144.

[14] **Triantafillou,T. C.**, 1999. Guidelines for the Dimensions of Reinforced Concrete Elements Strengthened with Sika Carbodur / Skawrap, Sika A. C. Publishment, Zurich.

[15] **El-Mihilmy, M. and Tedesco, J. W.**, 2000. Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates, *Journal of Structural Engineering, ASCE,* Vol. 126, No. 6, pp. 684-691.

[16] **ACI 318-95**, 1995. Building Code Requirements for Reinforced Concrete, *American Concrete Institue*, Detroit, Michigan.

[17] **Ziraba, Y. N., Baluch, M. H., Basunbul, I. A., Sharif A. M., Azad A. K. and Al-Sulaimani G. J.**, 1994. Guidelines Toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates, *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 6, pp. 639-646.

[18] **Sharif, A., Al-Sulaimani, G. J., Basunbul, I. A., Baluch M. H. and Ghaleb B. N.**, 1994. Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates, *ACI Structural Journal.*

[19] **Hamoush, S.A. and Ahmad, S. H.**, 1990. Debonding of Steel Plate-Strenghtened Concrete Beams, *Journal of Structural Engineering, ASCE,* Vol. 116, No. 2, pp. 356-371.

[20] **Spadea, G., bencardino, F. and Swamy R. N.**, 1998. Structural behavior of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP, *Journal of Composites for Construction, ASCE,* Vol. 2, No. 3, pp. 132-137.

[21] **David, E.**, 1999. Mechanical Behaviour of RC Beams Strengthened or Repaired by CFRP Sheets Bonding: Experimental and Numerical Study, *Ph. D. Thesis*, University d'Artois

[22] **Spadea, G., Bencardino, F. and Swamy, R. N.**, 2000. optimizing the Performance Characteristics of Beams strenghtened with Bonded CFRP Laminates, *RILEM Materials and Structures*, Vol. 33, pp. 119-126.

[23] **Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R.**, 1997. Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets, *Journal of Structural Engineering, ASCE,* Vol. 123, No. 7, pp. 903-911.

[24] **Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W. and Hughes, M. L.**, 1999. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates, *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 2, pp. 212-220.

[25] **Ann, W., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R.**, 1991. RC Beams Strengthened with FRP Plates. II: Analysis and Parametric Study, *Journal of Structural Engineering, ASCE,* Vol. 117, No. 11, pp. 3434-3455

[26] **Sierra-Ruiz, V., Destrebecq, J. F. and Grediac M.**, 2002. The Transfer Length in Concrete Structures Repaired with Composite Materials: a survey of some analytical models and simplified approaches, *Composite Structures*, Vol. 55, pp. 445-454.

[27] **Malek, A. M., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R.**, 1998. Prediction of Failure Load of R/C Beams Strenghtened with FRP Plate Dur to Stress Concentration at the Plate End, *ACI Structural Journal*.

[28] **Khalifa, A. and Nanni, A.**, 2000. Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, No:2, pp. 165-174.

[29] **Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T. and Kakuta, Y**., 1997. A Study on Bond Mechanisim of Carbon Fiber Sheet, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium*, Vol.1, pp. 265-270.

Özgeçmiş

1978 yılında İstanbul'da dünyaya gelen yazar ilk öğrenimini Barbaros İlkokulu'nda tamamlamıştır. Sonra ortaokul ve liseyi Özel Şişli Terakki Lisesi'nde okumuş ve aynı liseden 1995 senesinde mezun olup o sene Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek tahsiline başlamıştır. İlk senesinde kendi tercihi üzerine İngilizce hazırlık sınıfına devam etmiş ve dört senelik mühendislik eğitimi sonunda 2000 senesinde üniversitesinden İnşaat Mühendisi ünvanıyla mezun olmuştur. Aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Yapı Anabilim Dalı Deprem Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa başlamış ve derslerini 3,5 not ortalamasıyla tamamlamıştır. Mayıs 2002'den beri bir yapı denetim firmasında yardımcı kontrol elemanı sıfatıyla çalışıyor olup, vatani görevini henüz yapmamıştır.