

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME YAPILARIN
ONARIMI, GÜÇLENDİRİLMESİ VE
LİFLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLİMERLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Elbruz KESKİN**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2005

**BETONARME YAPILARIN
ONARIMI, GÜÇLENDİRİLMESİ VE
LİFLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLİMERLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Elbruz KESKİN
(501021193)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Nisan 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2005**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Abdullah GEDİKLİ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ertaç ERGÜVEN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Faruk YÜKSELER (Y.T.Ü.)**

MAYIS 2005

ÖNSÖZ

Betonarme yapılara etkiyen en büyük hasar nedeni depremdir. Ülkemizde depreme dayanıklı tasarlanmış yapıların az olması, hatalı projelendirme, projeye uyulmaması ve yönetmeliklerin değişmesi sonucu yapıların önemli bir kısmı onarım ve güçlendirmeye gerek duyar.

Bu çalışmada betonarme yapılarda oluşan hasar nedenleri, onarım ve güçlendirme malzemeleri, yöntemleri ve bu yöntemler arasında kullanımı yaygınlaşmaya başlayan lifle güçlendirilmiş polimerler yani FRP'ler anlatılmıştır.

Lifle güçlendirilmiş polimerlerin çeşitleri, üretim metotları, kullanım alanları, uygulama yöntemleri ve malzeme özellikleri anlatılarak diğer malzemelerle olan farkları belirtilmiştir.

Bu tez çalışmamda, değerli zamanını bana ayıran ve sonsuz desteğinden dolayı başta danışman hocam sayın Yard.Doç.Dr. Abdullah Gedikli'ye şükranlarımı sunarım.

Yoğun çalışma temposuna rağmen, yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Yard.Doç.Dr. Alper ilki'ye teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmam sırasında beni her zaman destekleyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Mayıs 2005

Elbruz KESKİN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1.GİRİŞ	1
1.1 Tanıtım	1
1.2 Betonarme Yapılarda Oluşan Hasar Nedenleri	1
2. DEPREMDEN DOLAYI BETONARME YAPILARDA OLUŞAN ÇATLAK VE HASAR ÇEŞİTLERİ	2
2.1 Taşıyıcı Yapı Elemanlarında Çatlak ve Hasar Tipleri	2
2.1.1 Kolonlarda görülen hasarlar	2
2.1.2 Kirişlerde görülen hasarlar	5
2.1.3 Kolon-Kiriş ek yeri hasarları	8
2.1.4 Perdelerde görülen hasarlar	10
2.1.5 Döşeme hasarları	12
2.2 Taşıyıcı Olmayan Yapı Elamanlarında Hasarlar	13
2.3 Betonarme Yapılarda Deprem Hasar Düzeyi Belirleme	16
2.3.1 Depremin büyüklüğü	16
2.3.2 Hasarlı elemanlarda çatlak boyutu	16
2.3.3 Hasarlı elamanlarda biçim ve boyut değişiklikleri	16
2.3.4 Hasar düzeyi belirleme	17
3. BETONARME BİNALARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME	18
3.1 Onarım	18
3.2 Güçlendirme	18
3.2.1 Güçlendirme kararının verilmesi	18
3.2.2 Güçlendirmenin minimum koşulları	19

3.3 Yapılarda onarım ve güçlendirmenin gerekliliği	20
3.4 Onarım ve güçlendirme kriterleri	20
3.5 Onarım ve güçlendirmede kullanılan malzemeler	22
3.5.1 Tamir harçları	22
3.5.2 Epoksi reçineleri	23
3.5.3 Yerinde döküm normal beton	26
3.5.4 Rötresiz betonlar	27
3.5.5 Polimerli betonlar	27
3.5.6 Reçineli betonlar	27
3.5.7 Püskürtme betonları	28
3.5.8 Çelik şeritler	28
3.5.9 Lif takviyeli plastik levhalar	29
4. YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRME METODLARI	30
4.1 Yapı Elemanlarının Onarım ve Güçlendirmesi	30
4.1.1 Kolonların onarım ve güçlendirmesi	30
4.1.2 Kirişlerin onarım ve güçlendirmesi	34
4.1.3 Kolon-Kiriş birleşim yerlerinin onarım ve güçlendirmesi	39
4.1.4 Perdelerin onarım ve güçlendirmesi	41
4.1.5 Döşemelerin onarım ve güçlendirmesi	43
4.2 Betonarme Yapının Güçlendirilmesi	44
4.2.1 Yeni kolon veya perde eklenmesi	44
4.2.2 Çerçeve boşluklarının donatılı duvarlarla Doldurulması	46
4.2.3 Çelik diyagonal elemanlar yerleştirilmesi	46
5. LİFLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLİMERLER (FRP)	48
5.1 Tanım	48
5.2 Kompozitler	49
5.2.1 Kompozit malzemeleri	50
5.2.1.1 Matriksler	50
5.2.1.2 Donatılar (Güçlendirme elemanları)	55
5.2.1.3 Dolgu malzemeleri	57
5.2.1.4 Katkı malzemeleri	59
5.2.2 FRP çeşitleri	60
5.2.2.1 Karbon	61
5.2.2.2 Cam	62
5.2.2.3 Aramid	63

5.2.2.4 Diğer	64
5.2.3 Liflerle güçlendirilmiş polimerlerin (FRP) üretim metotları	64
5.2.3.1 Pultrüsyon	65
5.2.3.2 İplik sarma (Filament winding)	66
5.2.3.3 Örme (Braiding)	66
5.2.3.4 Kalıpla reçine transferi	67
5.2.3.5 Elle birleştirme (Hand Lay-up)	69
5.2.4 FRP'lerin sınıflandırılması	70
5.2.5 FRP'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri	71
5.2.6 FRP'lerin durabilitesi	74
5.2.7 Anizotropi	75
5.2.8 FRP'lerin Dünyada kullanımı ve ekonomik durumu	77
5.2.8.1 FRP'lerin kullanım sektörleri ve miktarları	77
5.2.8.2 FRP'lerin ekonomik analizi	78
5.3 FRP'lerin Güçlendirme Sistemine Uygulanması	80
5.3.1 Güçlendirme sisteminde kullanılan CFRP çeşitleri	80
5.3.1.1 Karbon lif ipliği	80
5.3.1.2 Karbon lif teli	81
5.3.1.3 Karbon şerit ve levhalar	82
5.3.2 FRP'nin uygulanma şekli	84
5.3.3 FRP ile güçlendirilmiş sistemlerde tasarım prensipleri	86
5.3.3.1 Esneme kırılması	87
5.3.3.2 Kesme kırılması	87
5.3.3.3 Ayrılma kırılması	88
5.3.4 FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde kesme dayanımı	88
5.3.4.1 Sarım şekilleri	88
5.3.4.2 Kesme dayanım hesabı	90
5.3.5 FRP kesme dayanım deneyleri	94
5.3.5.1 Test numuneleri	95
5.3.5.2 Test sonuçları	99
5.3.5.3 Deney numunelerinin analitik çözümü	103
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	110
KAYNAKLAR	112
EKLER	116
ÖZGEÇMİŞ	125

KISALTMALAR

MSK	: Medvedev-Sponheur-Karnik Şiddet Cetveli
FRP	: Lifle Güçlendirilmiş Polimer
CFRP	: Karbon Lifle Güçlendirilmiş Polimer
GFRP	: Cam Lifle Güçlendirilmiş Polimer
AFRP	: Aramid Lifle Güçlendirilmiş Polimer
HDT	: Isı Bozulma Sıcaklığı
Tg	: Cam Geçiş Sıcaklığı
Mpa	: Mega Pascal
Gpa	: Giga Pascal
UHMW	: Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı
UV	: Ultra Viyole
HM	: Yüksek Modüllü
HS	: Yüksek Dayanımlı
HT	: Yüksek Dayanımlı
E-Glass	: Elektrik Geçirmez Cam Lif
AR-Glass	: Alkali Geçirmez Cam Lif
S-Glass	: Çok Güçlü Cam Lif
RTM	: Reçine Transfer Kalıbı
VARTM	: Vakumlayarak Kalıba Reçine Transferi
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü Standardı
LVDT	: Lineer Değişken Diferansiyelli Transformatör
BT	: Deney Numunesi Olarak Kullanılan T Kirişler
sg	: Şekil Değiştirme Ölçer
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü Standardı

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. FRP'lerin diğer güçlendirme yöntemleriyle karşılaştırılması	48
Tablo 5.2. Polyester ve epoksinin fiziksel özellikleri	51
Tablo 5.3. Polyester ve epoksinin mekanik özellikleri	52
Tablo 5.4. FRP'lerde kullanılan Termoset reçinelerin kimyasal yapısı.....	52
Tablo 5.5. FRP'lerde kullanılan Termoplastik reçinelerin kimyasal yapısı	54
Tablo 5.6. Dolgu malzemelerinin Dünyada kullanılan miktarları	58
Tablo 5.7. Katkı Malzemelerin Dünyada kullanılan miktarları	60
Tablo 5.8. Karbon Liflerin Özellikleri	61
Tablo 5.9. Cam liflerin özellikleri	62
Tablo 5.10. Aramid liflerin özellikleri	63
Tablo 5.11. FRP'lerin özellikleri	72
Tablo 5.12. Liflerin kendi aralarında kıyaslanması.....	73
Tablo 5.13. Liflerin kimyasal dirençlerinin karşılaştırılması	73
Tablo 5.14. Reçinelerin Dünyadaki ortalama fiyatları	79
Tablo 5.15. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri	95
Tablo 5.16. Numunelerin deneysel ve analitik sonuçlarının karşılaştırılması	108

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Kolonda kesme kuvveti etkisinde oluşan eğik çatlaklar.....	3
Şekil 2.2 : Kolonda basınç kırılmaları	3
Şekil 2.3 : Kısa Kolon Hasarları	4
Şekil 2.4 : Kolonlarda Burulma Hasarları.	5
Şekil 2.5 : Kirişlerde moment hasarı.....	5
Şekil 2.6 : Kiriş Hasarları	6
Şekil 2.7 : Saplanan yan kirişin ana kirişte moment hasarı	7
Şekil 2.8 : Kolon kiriş ek yeri Hasarı	8
Şekil 2.9 : Kiriş-kolon Hasarları	9
Şekil 2.10 : Kiriş-kolon Hasarları	9
Şekil 2.11 : Perde Duvarda Eğilme Çatlakları	10
Şekil 2.12 : Perde Duvarda Hasar Çeşitleri.....	11
Şekil 2.13 : Döşemedeki hasarlar.	12
Şekil 2.14 : Kirişsiz Döşemelerde zımbalama Hasarı.....	13
Şekil 2.15 : Dolgu Duvarda Tesisat Borusu Üzerinde Oluş.Sıva Çatlağı	14
Şekil 2.16 : Duvar ile Çerçeve Arasında Oluşabilecek Sıva Çatakları.....	14
Şekil 2.17 : Dolgu Duvar da Sıva ve Duvar	15
Şekil 2.18 : Düz.Dik Doğr.Devrilme Olasılığı Yüksek Dolgu Duvarlar.....	15
Şekil 3.1 : Epoksi Enjeksiyonu.....	24
Şekil 3.2 : Epoksi Enjeksiyonu Uygulaması.....	25
Şekil 3.3 : Yığma Duvarlara Epoksi Enjeksiyonu.....	26
Şekil 4.1 : Yerel Hasarlı Kolonlarda Onarım.....	30
Şekil 4.2 : Kolonların 1,2,3,4 yüzünden mantolanması.....	31
Şekil 4.3 : Kolonların mantolanmasına çeşitli örnekler.....	32
Şekil 4.4 : Betonarme Kolonun çelik kafesle güçlendirilmesi.....	33
Şekil 4.5 : Betonarme Kolonun çelik levha kılıfla güçlendirilmesi.....	34
Şekil 4.6 : Betonarme Kirişlerin Bir yüzünden Mantolanması.....	35
Şekil 4.7 : Betonarme Kirişlerin iki yüzünden Mantolanması.....	36
Şekil 4.8 : Betonarme Kirişlerin Üç yüzünden Mantolanması.....	36
Şekil 4.9 : Betonarme Kirişlerin Dört yüzünden Mantolanması.....	37
Şekil 4.10 : Kirişlerin Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi.....	38
Şekil 4.11 : Kolon-Kirişlerin Birleşim Yerl. Mantolama İle Güçlendirilmesi.....	40
Şekil 4.12 : Perdelerin Kesit Kalınlaştırarak Güçlendirilmesi.....	42
Şekil 4.13 : Döşemelerin Kalınlaştırılarak Güçlendirilmesi.....	43
Şekil 4.14 : İlave Perdelerle Güçlendirme Yapılması.....	45
Şekil 4.15 : Dolgu Duvarların donatılı betonla güçlendirilmesi.....	46
Şekil 4.16 : Çelik Diyagonallerle Betonarme Sistemin Güçlendirilmesi.....	47
Şekil 5.1 : Kompozit Malzemelerin Üretim Şeması.....	49
Şekil 5.2 : Karbon Lifli Kompozit Malzeme.....	50
Şekil 5.3 : Reçinelerin Yüksek sıcaklık altındaki rölatif dayanımları	53

Şekil 5.4	: Termoplastik matriks malzemelerin çeşitli formları.....	54
Şekil 5.5	: Dikilmiş üç eksenli ve dört eksenli bezler.....	56
Şekil 5.6	: İki eksenli Örülmüş Bez.....	56
Şekil 5.7	: Üç eksenli Örülmüş bez.....	57
Şekil 5.8	: CFRP'nin görünüşü.....	61
Şekil 5.9	: GFRP'nin görünüşü.....	62
Şekil 5.10	: AFRP'nin görünüşü.....	63
Şekil 5.11	: Pultrüsyon İşlemi.....	65
Şekil 5.12	: İplik sarma yöntemi.....	66
Şekil 5.13	: Örme Yöntemi.....	66
Şekil 5.14	: RTM Yöntemi.....	67
Şekil 5.15	: VARTM Yöntemi.....	68
Şekil 5.16	: Elle Birleştirme Yöntemi.....	69
Şekil 5.17	: FRP'lerin malzemeye göre sınıflandırılması.....	70
Şekil 5.18	: FRP'lerin şekle göre sınıflandırılması.....	70
Şekil 5.19	: FRP'lerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	71
Şekil 5.20	: FRP'lerin Dünyada kullanım alanları.....	77
Şekil 5.21	: FRP'lerin Dünyada Kullanılma Miktarları.....	78
Şekil 5.22	: FRP'lerin Dünyadaki ortalama m2 fiyatları.....	79
Şekil 5.23	: Karbon Lif İpliği.....	81
Şekil 5.24	: Karbon lif teli.....	82
Şekil 5.25	: CFRP Şeritler.....	82
Şekil 5.26	: CFRP Levhalar.....	83
Şekil 5.27	: Beton yüzeyin üzerine astar sürülmesi.....	84
Şekil 5.28	: Astarın mala yardımıyla yüzeye yedirilmesi.....	85
Şekil 5.29	: Reçinenin yüzeye sürülmesi.....	85
Şekil 5.30	: FRP'nin Reçineli yüzeye yapıştırılması.....	85
Şekil 5.31	: FRP'li yüzeyin sonlanması.....	86
Şekil 5.32	: FRP'lerin sarılma şekilleri.....	88
Şekil 5.33	: FRP'lerin Kiriş Boyunca sarılım Şekilleri.....	89
Şekil 5.34	: Liflerin dizilim Yönü.....	90
Şekil 5.35	: İki eksenli Liflerin dizilim Yönü.....	90
Şekil 5.36	: FRP'nin alanını bulmak için kullanılan ölçüler.....	91
Şekil 5.37	: Kesme dayanımı FRP şeritlerle artırılmış betonarme kesit.....	92
Şekil 5.38	: Deneyde kullanılan numunelerin ölçüleri.....	95
Şekil 5.39	: BT6 numunesinin ankraj detayı.....	96
Şekil 5.40	: Ankrajlı BT6 numunesinin hazırlanması.....	97
Şekil 5.41	: Deneyde kullanılan numuneler ve sarılma şekilleri	98
Şekil 5.42	: Deneyde kullanılan numunelerin kırılmaları.....	101
Şekil 5.43	: Deney numunelerinin yük altında açıklık ortası çökmeleri.....	102
Şekil 5.44	: BT4 numunesi için yük altında dikey şekil değiş. miktarları.....	102
Şekil 5.45	: BT2 ve BT6 numunelerinin yük altında dikey şekil değiş.....	103

SEMBOL LİSTESİ

A_c	: Beton alanı
A_{fv}	: FRP'nin alanı
A_s	: Çekme donatısı
d	: Çelik donatının derinliği
d	: Çelik donatının derinliği
d_f	: FRP şeridin derinliği
d_f	: FRP şeridin derinliği
d_{fe}	: FRP'nin etkin derinliği
d_{fe}	: FRP'nin etkin derinliği
E_f	: FRP'nin elastisite modülü
E_k	: Kompozitin bir yöndeki elastisite modülü
E_m	: Matriksin elastisite modülü
E_λ	: Lifin elastisite modülü
f_{ck}	: Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{fe}	: FRP'nin etkin gerilimi
f_{fu}	: FRP'nin gerilimi
h_s	: Döşemenin derinliği
h_s	: Döşemenin derinliği
L_o	: FRP katmanının etkin bağlanma uzunluğu
n	: katman sayısı
N_d	: Hesap normal kuvveti
R	: Redüksiyon katsayısı
$R.C$	: Reçinenin ağırlıkça oranı
s_f	: FRP şeritlerin merkezden merkeze aralığı
T_{des}	: Yapının tasarım ömrü
t_f	: FRP şeridin kalınlığı
T_{rem}	: Yapının kalan ömrü
V_B	: Yeni bina süneklik düzeyindeki tasarım kesme kuvveti
V_c	: Betonun kesme dayanımı
V_f	: FRP'nin kesme dayanımı
V_n	: Kesme kuvveti
V_s	: Çeliğin kesme dayanımı
V_{str}	: Güçlendirme tasarım taban kesme kuvveti
W_f	: FRP katmanının lif ağırlığı
w_f	: FRP şeridin genişliği
ϵ_{fu}	: FRP'nin şekil değiştirmesi
Φ	: Redüksiyon katsayısı

BETONARME YAPILARIN ONARIMI GÜÇLENDİRİLMESİ VE LİFLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLİMERLER

ÖZET

Bu çalışmada öncelikle betonarme yapılara etkiyen hasar tipleri açıklanmış ve ülkemizin jeolojik konumu sebebiyle bu hasar tipleri arasında en çok zararı veren “deprem” üzerinde durulmuştur.

Depreme karşı önlem alabilmek için öncelikle depremden dolayı oluşan hasar şekillerini bilmemiz gerekir. Betonarme yapılarda, özellikle taşıyıcı sistem elemanları üzerinde oluşan hasarlar nedenleriyle beraber açıklanmıştır.

Deprem bölgesinde olan ülkemizde yapıların büyük bir çoğunluğu gerekli standartları sağlamamaktadır. Bu tip yapıların yıkılarak tekrar yapılması çok büyük bir maliyet gerektirir. Bu yüzden hasar görmüş yapılar mümkünse onarılmalı, ileride hasar görebilecek durumda olan yapılar ise güçlendirilmelidir.

Onarım ve güçlendirme, yapının özelliklerine göre farklı yöntemlerle ve malzemelerle yapılabilir. Bu çalışmada ülkemizde yaygın olarak kullanılan yöntemler ve malzemeler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Onarım ve güçlendirme malzemelerinden biri olan ve hem dünyada hem de ülkemizde kullanımı yaygınlaşmaya başlayan, FRP’ler üzerinde özellikle durularak içyapısı, mekanik ve fiziksel özellikleri, çeşitleri, uygulanış şekilleri ve diğer sistemlerden ayrılan özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca deneysel davranışları incelenmiş, FRP ile sarılmış elemanların, analitik çözümleri yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

REPAIRING AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS AND FIBRE REINFORCED POLYMERS

SUMMARY

First of all, the types of damages that effects the reinforced concrete buildings are told and especially “earthquake” , the most harmful damage type for our country because of its geological location, is explained.

To avoid the earthquakes harmful effects, we should know the damages occurred in R/C buildings elements. The damages on the load carrying elements are expressed with the reasons.

For our country, which is in earthquake region, a very large amount of building is not suggesting the essential standarts. Demolishing these buildings is highly costed. For this reason damaged buildings, if possible, should be repaired and the buildings which have risks for the future should be strengthened.

Repairing and strengtheninig can be done by various ways and materials. The study expresses the ways and materials that are used in our country.

As a repairing and strengthening material, FRP usage in world and in our country is increasing. The aim of this study is to show the types, mechanical and physical properties and the difference between other systems. In addition to this, experimantally known behaviours of FRP wrapped elements are compared with analytical solutions.

1.GİRİŞ

1.1 Tanıtım

Betonarme yapılar bugün tüm dünyada çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok insanın hayatını geçirdiği bu yapıların hasarlara karşı dayanıklı olmaları gerekir. Yeterli dayanımı gösteremeyerek hasarlardan etkilenmiş binalar mümkünse onarılmalı, onarılamayacak durumda olan yapılar ise kesinlikle kullanılmamalıdır. Hasarsız mevcut yapılarda da hasar görülmesi riski varsa, bu yapılarında hasar görmeden önce güçlendirilerek daha güvenli hale getirilmesi gerekmektedir.

1.2 Betonarme Yapılarda Oluşan Hasar Nedenleri

Betonarme yapılarda meydana gelen çatlak ve hasarların sınıflandırılmasından önce bu hasarlara neden olan etkenleri açıklamak gerekir. Yapı hasarları, aşağıda belirtildiği gibi ani etkilere veya sürekli etkilere bağlı olabilir.

- Yerbilimsel Etkenler: Deprem, sel, yangın, çökmeler, göçükler, yıldırım düşmesi, çığ düşmesi, don olayları, toprak kayması, erozyon, hortum, gel-gitlerin yapıların altını oyması gibi,
- Hava Koşullarına Bağlı Etkenler: Sıcaklık ile soğukluk arasında büyük farkların, genleşme ve büzülmenin sürekli tekrarlanması, nem oranı, ısınım koşulları gibi,
- Fiziksel Etkenler: Çarpma, vurma, aşırı yükleme, patlama gibi,
- Kimyasal Etkenler: Paslanma, çürüme, oksitlenme, tuzların, bazların ve asitlerin yapı öğelerini bozması gibi,
- Biyolojik Etkenler: Mantarlar, likenler, küfler, kara ve su yosunları, çatlaklara kaçan tohumlar, bitki köklerinin zarar vermesi gibi,
- İnsana Bağlı Etkenler: Yanlış bakım ve koruma önlemleri, kötü kullanma, çevrede yapılan bayındırlık çalışmaları, kazık çakma çalışmaları, hatalı hafriyat çalışmaları gibi,
- Yapının Yerine Bağlı Etkenler: Zemin hareketleri, yapıda farklı temel oturmaları gibi [1].

BÖLÜM 2 DEPREMDEN DOLAYI BETONARME YAPILARDA OLUŞAN ÇATLAK VE HASAR ÇEŞİTLERİ

Hasar çeşitlerinin arasında, özellikle ülkemizde, en önemli yeri depremin oluşturduğu hasarlar alır. Deprem betonarme yapı sistemindeki bütün elemanları doğrudan etkiler. Betonarme yapılardaki elemanları sınıflandırırsak taşıyıcı elemanlar ve taşıyıcı olmayan elemanlar olarak ikiye ayırabiliriz.

2.1 Taşıyıcı Yapı Elemanlarında Çatlak ve Hasar Tipleri

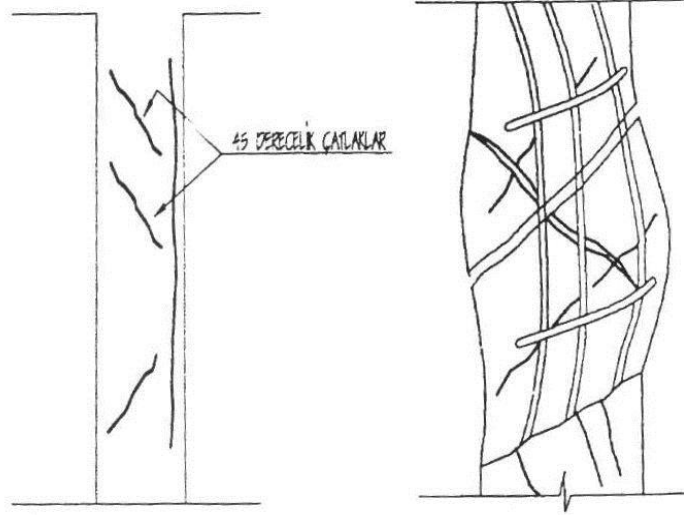
Yapılarda taşıyıcı sistemlerin belirlenmesi yapının kullanım amacı, coğrafi konumu, emniyetliliği, ekonomikliği gibi çeşitli nedenlere bağlıdır. Depremden dolayı oluşabilecek çatlak ve hasarlar da, bu nedenlerden dolayı belirlenmiş taşıyıcı sistemlerde meydana gelmektedir. Aşağıda betonarme yapılardaki taşıyıcı elemanlarda oluşan hasarlar anlatılmıştır.

2.1.1 Kolonlarda görülen hasarlar

- Kolonlarda Kesme Hasarı

Kolon uçlarının mafsallaşması ve etriyelerin açılması ile kolonun kesme kuvveti taşıma gücü azalır. Kolonun kesme kuvvetinin yetersiz olduğu durumlarda 45 derece eğimli kesme çatlakları meydana gelir. Beton ile donatının arasında yeterli aderansın olmaması durumu da bu betonun basınç dayanımının yeterli olmadığını gösterir. Böyle durumlarda betonun kabuk kısmı çatlamakta ve ileri boyutlarda betonunun düştüğü görülmektedir.

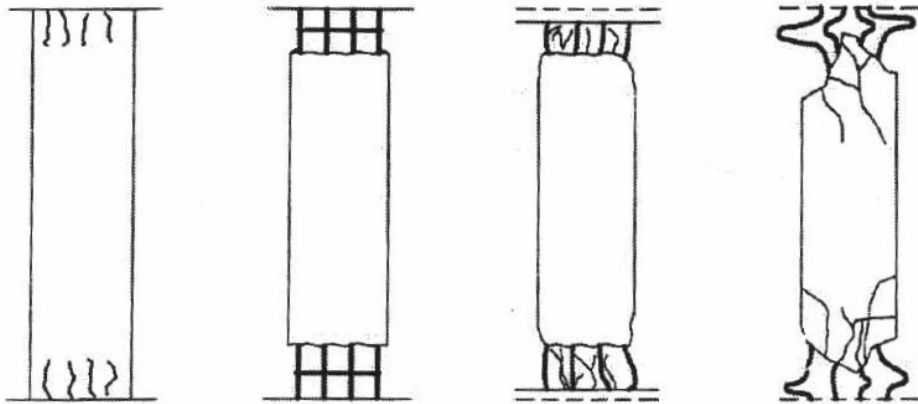
Kolon boyuna donatılarının paslanmış olması da ayrıca beton ile donatı arasındaki aderansın yeterli düzeyde olmamasına yol açmaktadır. Bu tip aderans yetersizliği beton ile donatının beraberce çalışmasına engel olacak, donatı akma gerilmelerine ulaşmadan betondan ayrılacak ve betonda kendinden beklendiği ölçüde moment taşıyamayacaktır [2].



Şekil 2.1 Kolonda kesme kuvveti etkisinde oluşan eğik çatlaklar

- Kolonlarda Basınç Hasarı

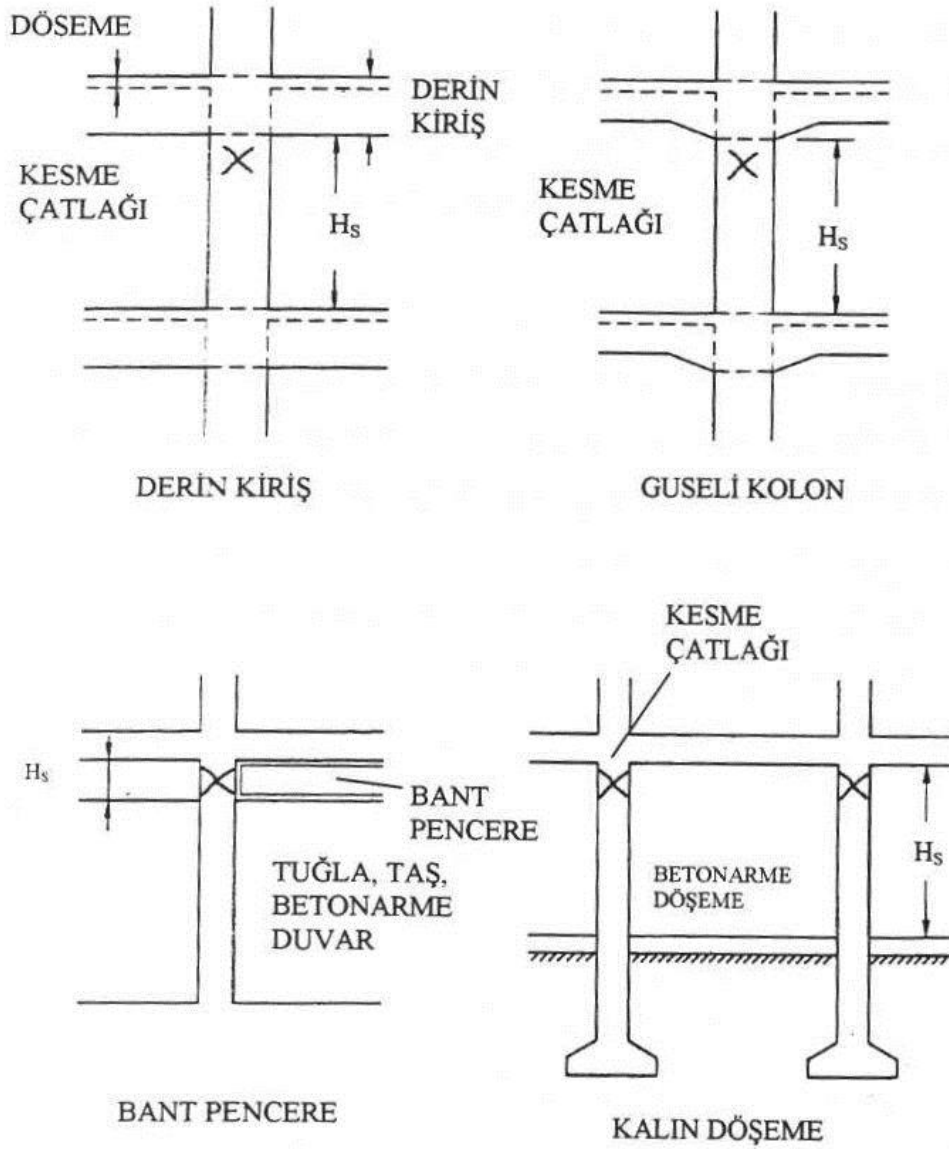
Kolona etkiyen eksenel yüklerin artması ve eksenel yük taşıma kapasitesini aşması sonucunda kolonda ani ve gevrek bir kırılma biçimi oluşur. Kolon boyuna donatısı akma gerilmesine ulaşmadan beton ezilir ve basınç kırılması meydana gelir. Boyuna donatılar dışarı doğru burkulur, dış beton çatlar. Kolonlarda basınç hasarı yapının ani yıkılmasına sebep olabilir. Hasar sonrası, hemen hasarlı kolona yük aktaran kiriş ve döşeme elemanlarının askı elemanlarıyla desteklenmesi ve derhal onarılıp güçlendirilmesi gerekmektedir [1].



Şekil 2.2 Kolonda basınç kırılmaları

- Kısa Kolon Hasarı

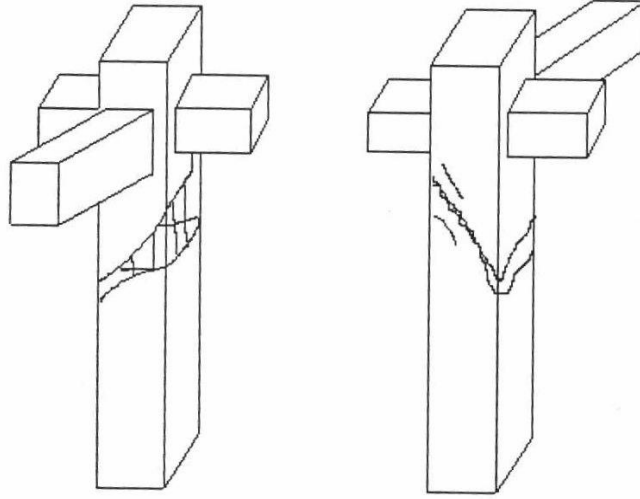
Kolon boyunun çeşitli nedenlerden dolayı projede öngörülenden daha kısa olması, derin kiriş, guseli kolon, bant pencere, kalın döşeme veya taşıyıcı olmayan bölme duvarı gibi elemanların kolonun yatay deplasmanını önlemesi veya ilgili kolonun sönüm katsayısının oldukça düşük olması gibi sebepler kolonun daha rijit olmasına neden olur. Böylece daha büyük bir kesme kuvveti ile zorlanır ve kesme kırılması oluşur [2].



Şekil 2.3 Kısa Kolon Hasarları

- Kolonlarda Burulma Hasarı

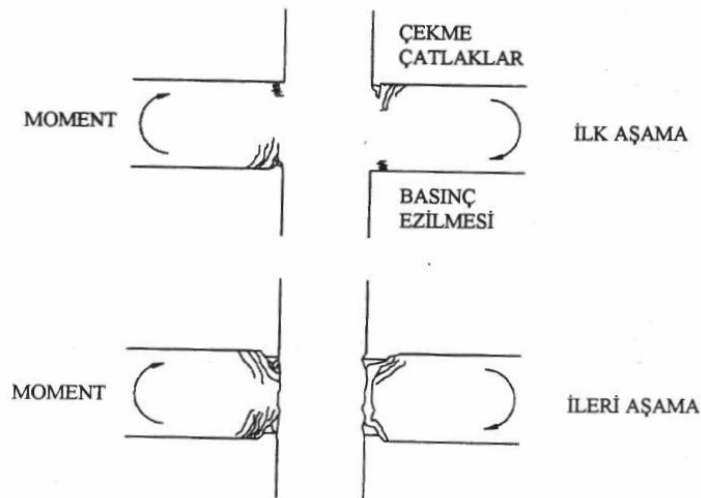
Burulma momentlerinden dolayı meydana gelen hasarlardır. Kolonun bir tarafında diyagonal çatlaklar ve betonda dökülmeler, diğer tarafında ise diyagonal şeklinde basınç ezilmeleri meydana gelmektedir.



Şekil 2.4 Kolonlarda Burulma Hasarları

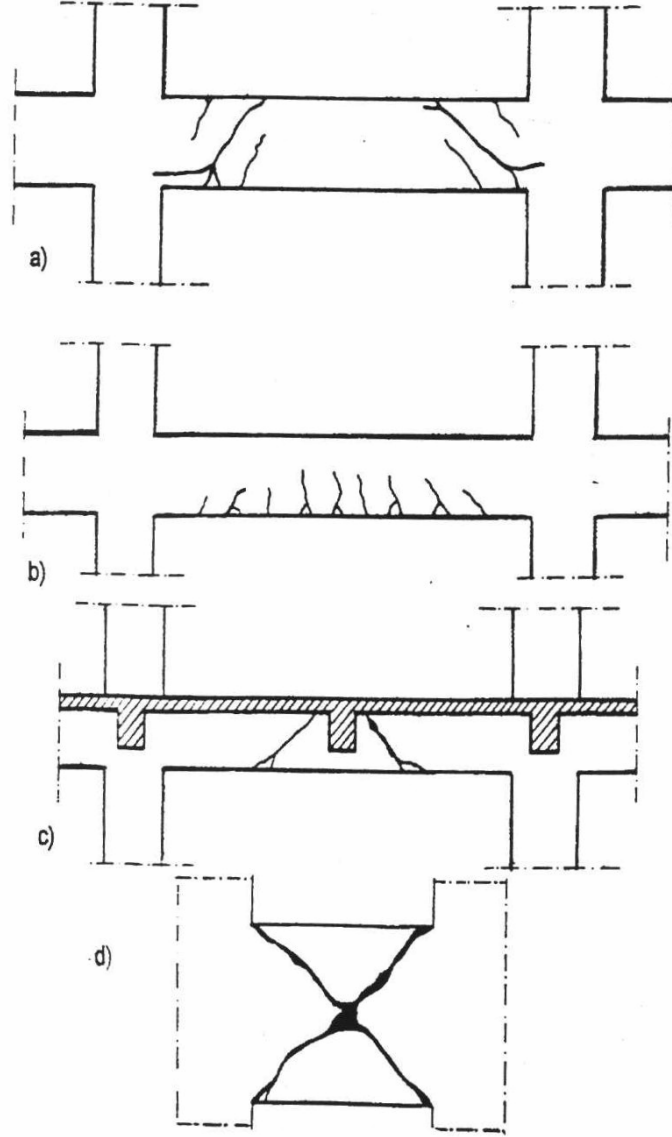
2.1.2 Kirişlerde görülen hasarlar

Betonarme kirişlerde, düşey yüklerden dolayı en çok görülen hasar şekli açıklıkta eğilme kırılması olmasına karşın, yatay ve düşey yüklerin birlikte etkidiği durumlarda hasar genellikle kolonlara yakın yerlerde meydana gelir [2].



Şekil 2.5 Kirişlerde moment hasarı

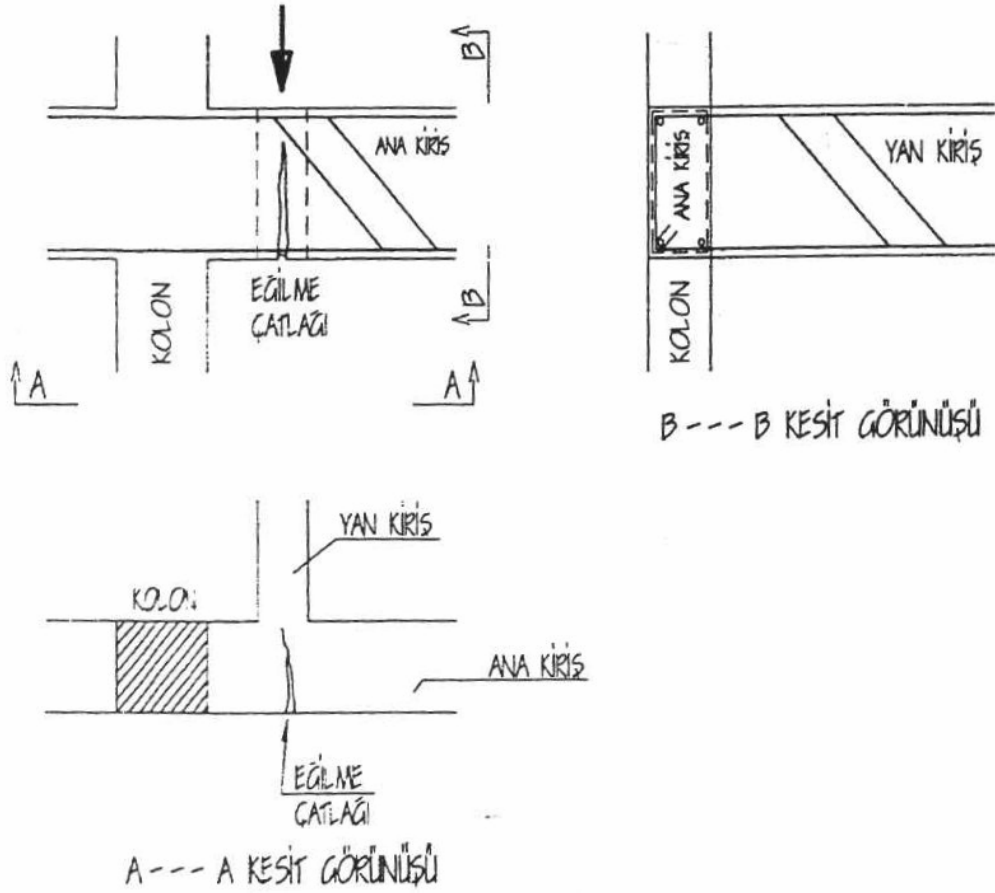
Eğilme kırılması, kirişte boyuna donatının yetersiz miktarda oluşu sonucu kiriş ortasındaki çekme bölgesindeki çatlakla belirlenir. Bu çatlak, buradaki donatının akma bölgesine girdiğini de göstermektedir.



Şekil 2.6 Kiriş Hasarları

- a) Eğilme ve köşegen kayma çatlakları
- b) Çekme Çatlağı
- c) Mesnetlenen kirişin oluşturduğu çekme ve eğilme çatlakları
- d) Kiriş perde birleşiminde kayma çatlağı

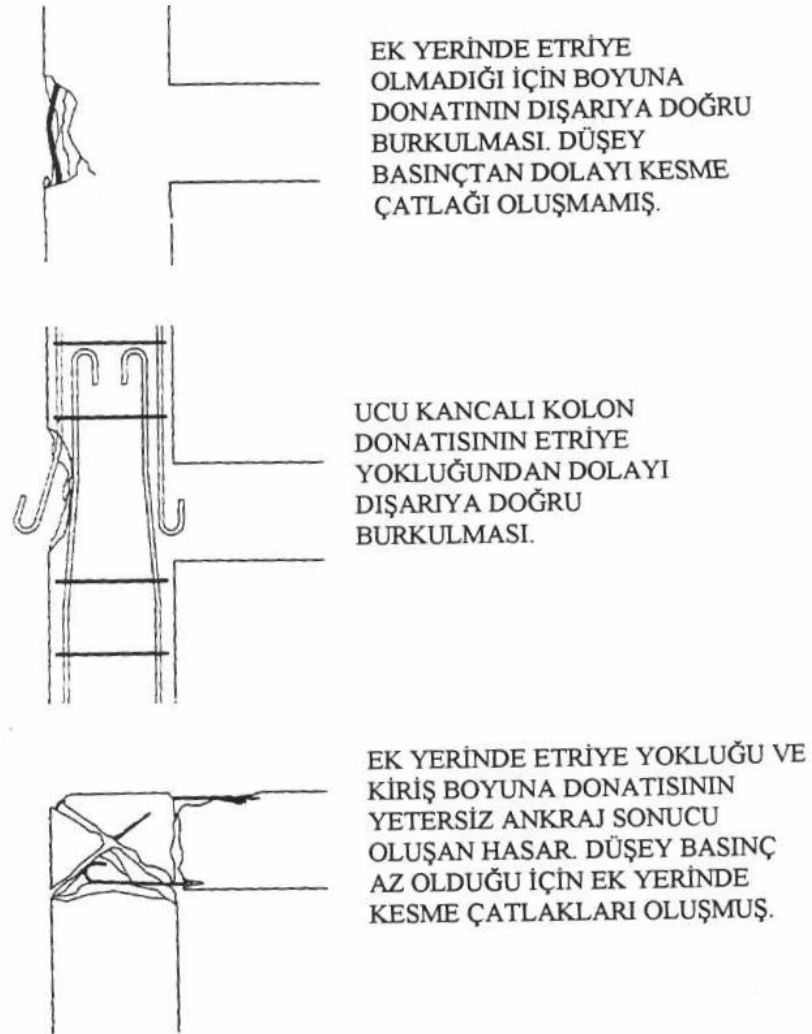
Bir kirişin başka bir kirişe saplandığı yerde, kiriş mesnet reaksiyonunun ana kirişe tekil yük olarak etkidiği ve bu noktada pozitif eğilme momentinin yol açtığı çekme çatlakları oluşmaktadır. Yalnızca düşey yüklere karşı yapılmış bir hesapta, kirişte mesnet bölgelerinde negatif moment daha büyük olduğundan, kiriş uçlarının alt taraflarına çok az bir miktarda boyuna donatı yerleştirilir. Bu donatılar pilye gibi bükülür ve kirişin üst yüzeyine geçirilir. Deprem esnasında oluşan pozitif uç momentlerini karşılamak için aslında kirişin alt ucunda da donatı olması zorunluluğu vardır. Kirişin alt yüzünde bu donatılar yoksa, deprem etkisi altında kirişte hasar meydana gelir. Bu donatı negatif moment kapasitesinin %50 si kadar olmalıdır [2].



Şekil 2.7 Saplanan yan kirişin ana kirişte moment hasarı

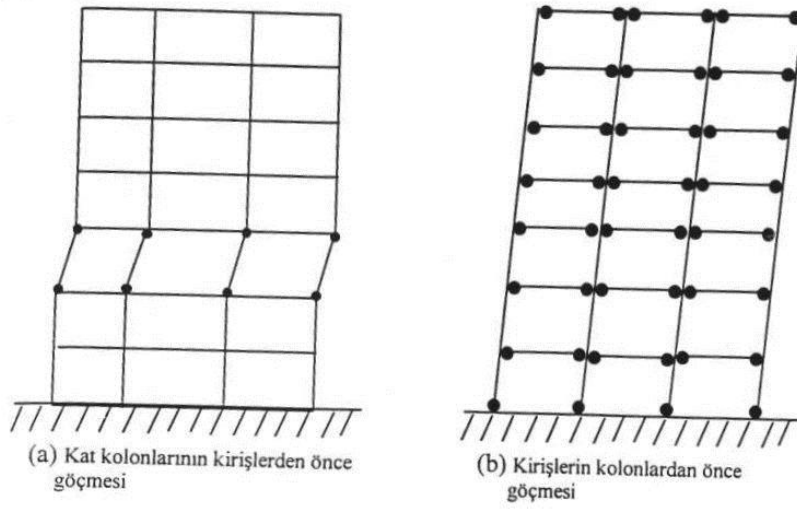
2.1.3 Kolon-kiriş ek yeri hasarları

Genellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde az sayıda etriye kullanılması yani etriye aralığının yetersiz oluşu ve hatta hiç etriye kullanılmaması, kiriş donatılarının kolon donatılarına ankrajının yeterli yapılmaması gibi nedenlerle bu bölgedeki kolon ve kiriş donatıları sıyrılmakta ve beklenen taşıma gücüne ulaşılmadan ilgili elemanlarda plastik mafsallar meydana gelerek hasar oluşturmaktadır [2].

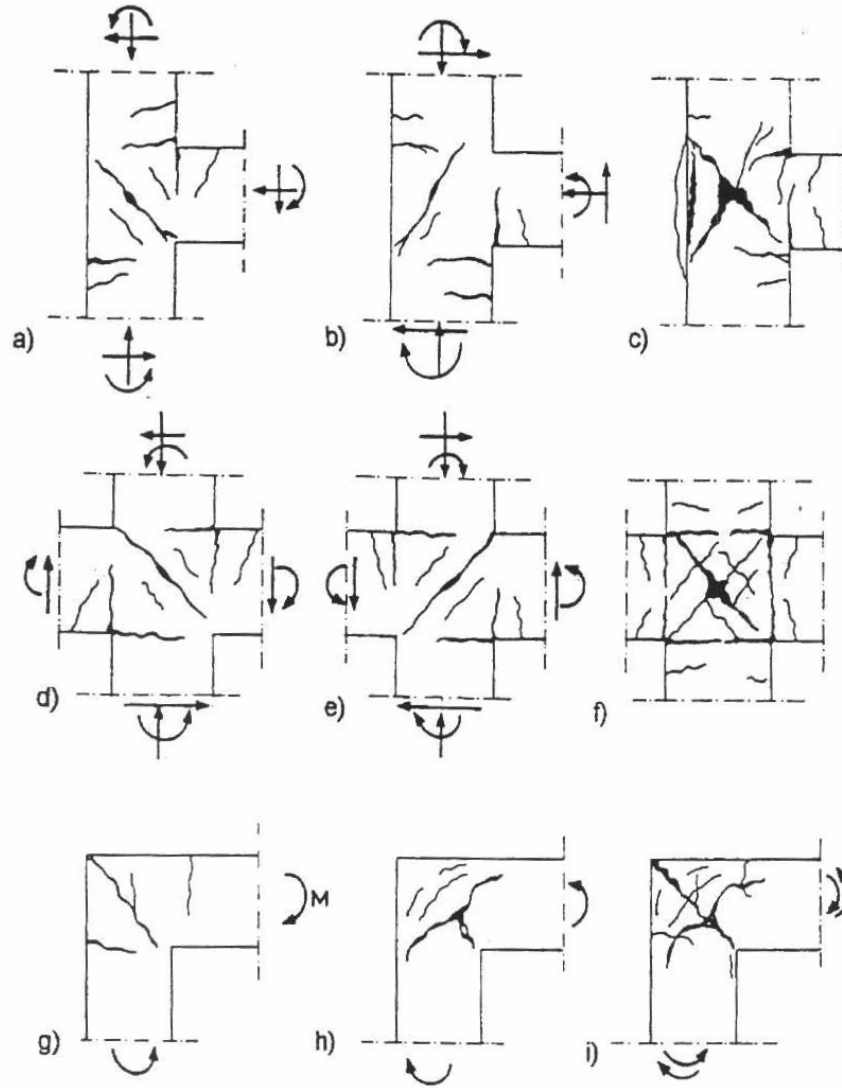


Şekil 2.8 Kolon kiriş ek yeri Hasarı

Kiriş uçlarının mafsallı olarak davranması sonucu kirişlerin ucunun ankastre olduğu kabulü gerçekleşmemektedir. Bu durum kolonların yatay stabilitesini de etkilemekte ve binanın yana doğru yıkılmasına sebep olmaktadır [2].



Şekil 2.9 Kiriş-kolon Hasarları

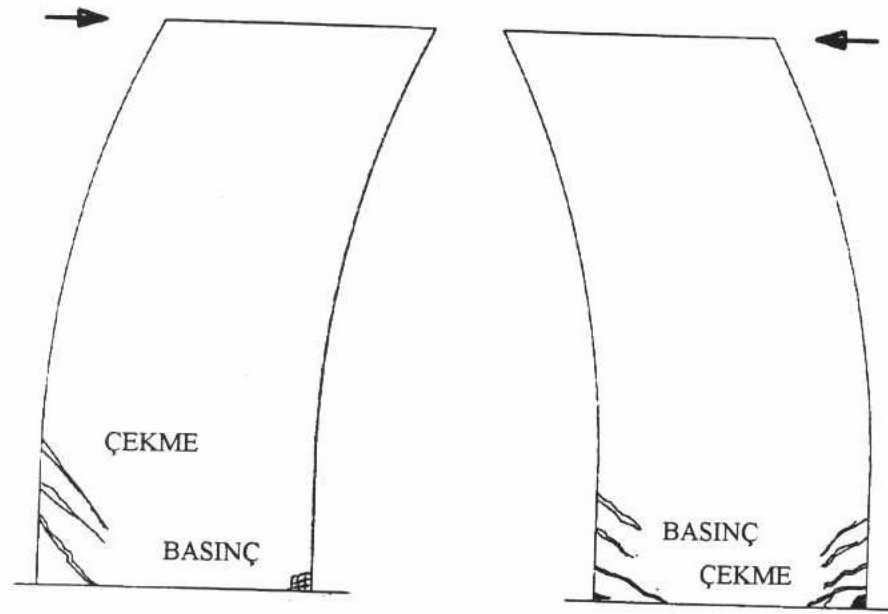


Şekil 2.10 Kiriş-kolon hasarları

2.1.4 Perde duvar hasarı

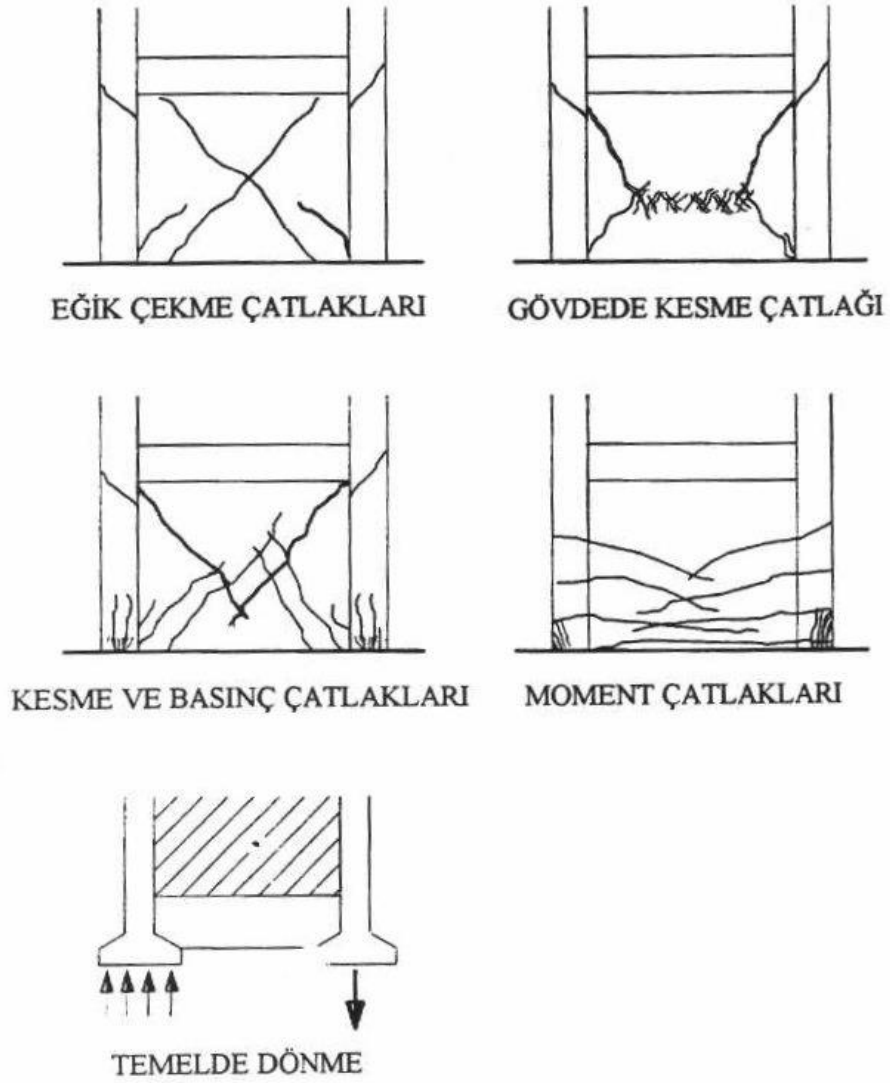
Perde duvarlarda oluşan hasar biçimleri ise yapıdaki kat sayısına göre değişmektedir. Alçak yapıların perdelerinde genelde yatayda ve düşeyde 45 derecelik bir açı ile kesme çatlakları oluşmaktadır. Bunun nedeni perdelerin diğer elemanlara göre çok rijit olmalarından kaynaklanmaktadır.

Çok katlı yapılarda ise zemin ve alt katlarda eğilme çatlakları oluşmaktadır. Kesiti ve kesme dayanımı yetersiz olan kısa perde duvarlarda eğik çekme kırılması olmaktadır [1].



Şekil 2.11 Perde Duvarda Eğilme Çatlakları

Perdelerin zayıf ve kolon uç elemanlarının kuvvetli olması durumunda gövdede kesme kırılması olur. Kolon uç elemanlarının kuvvetli olması durumunda ise kolonlarda perdenin dönmesi ile oluşan büyük basınç kuvvetleri, kolon boyuna donatılarının burkulmasına ve betonda basınç ezilmesine neden olur. Perde hasarlarında beklenen en ideal durum perdenin eğilme momenti altında kırılma biçimidir.



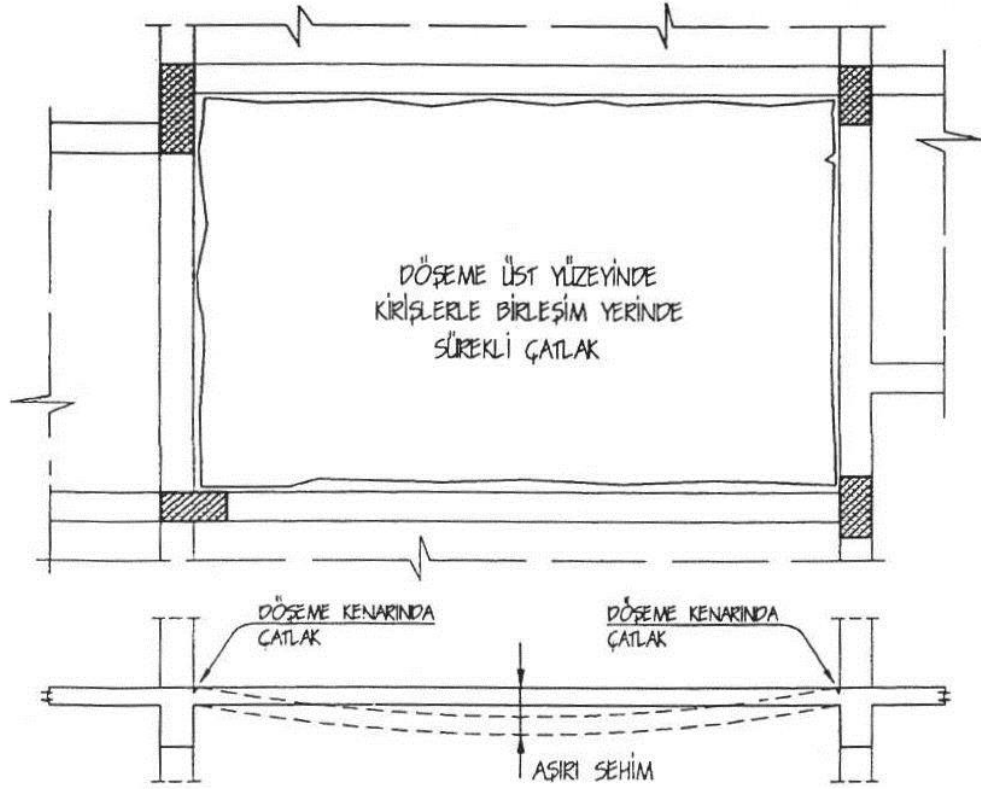
Şekil 2.12 Perde Duvarda Hasar Çeşitleri

Boşluklu perdelerde hasar oluşumu ise ilk önce iki dolu perdeyi bağlayan bağ kirişlerin uçlarında kesme ya da eğilme kırılması ile başlar. Hasarların ileri aşamasında iki dolu perde duvar bağımsız çalışır ve en son olarak iki perdenin de tabanında eğilme kırılması oluşması muhtemeldir [1].

Perdeli-çerçevesel betonarme yapılarda ise hasar önce perde duvarlarda gelişir ve daha sonra yanal ötelenmeler sonucu çerçeve elemanlarda da hasar başlar. Yıkılma mekanizması, perde ile çerçeveyi birbirine bağlayan bağ kirişlerin uçlarının mafsallaşması ve daha sonra zemin katta perde ve kolonların tabanında mafsallaşma biçiminde olacaktır [1].

2.1.5 Döşeme hasarları

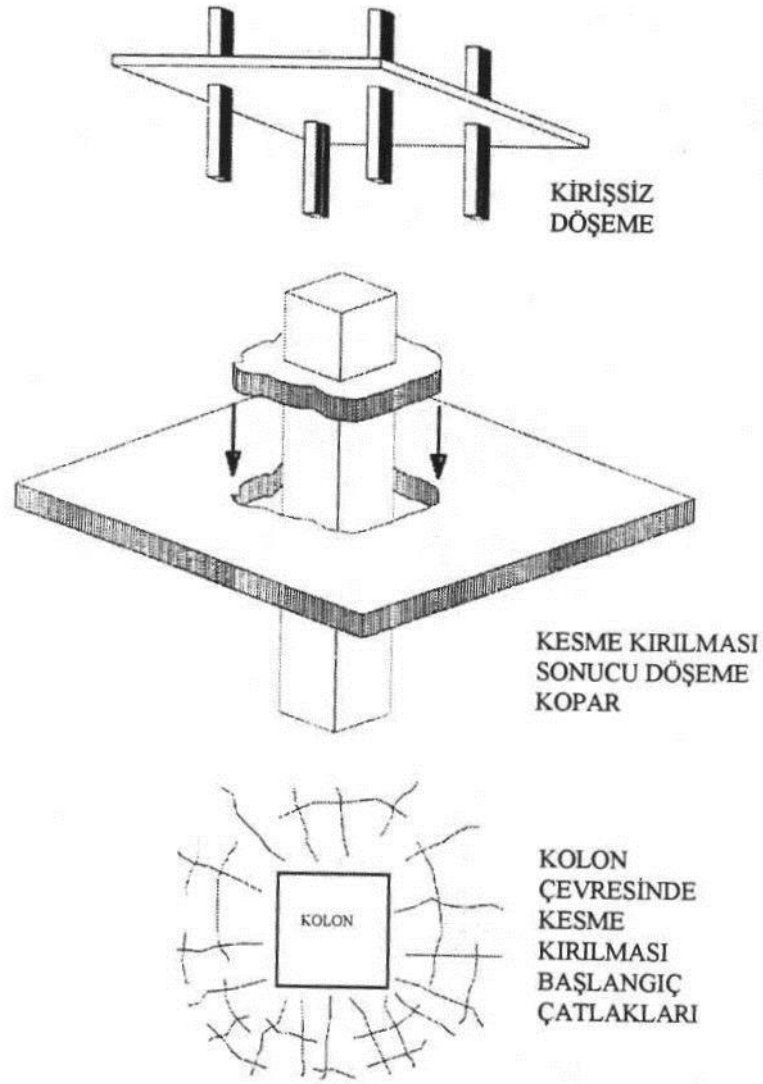
Döşeme elemanlarında karşılaşılan hasarlar daha çok, döşemenin ortasında aşırı sehim ve döşemenin kirişle birleştiği bölgede, üst yüzeyde çatlak hasarları olarak ortaya çıkmaktadır [1].



Şekil 2.13 Döşemedeki hasarlar

Diğer bir hasar ise çok ince ve zayıf döşemelerin titreşim yapmasıdır. Perde duvarlarda, perdelerin yanal kuvvetlerden dönmesi sonucu döşemeye moment aktararak döşemeyi dönmeye zorlaması ile çatlak hasarları oluşmaktadır.

Başka bir döşeme hasarı ise kirişsiz döşemelerde ortaya çıkmaktadır. Bu tip döşemelerde kesme kuvvetlerinin kolonlara yeteri derecede aktarılamaması sonucu zımbalama kırılması denen hasar meydana gelmektedir [1].



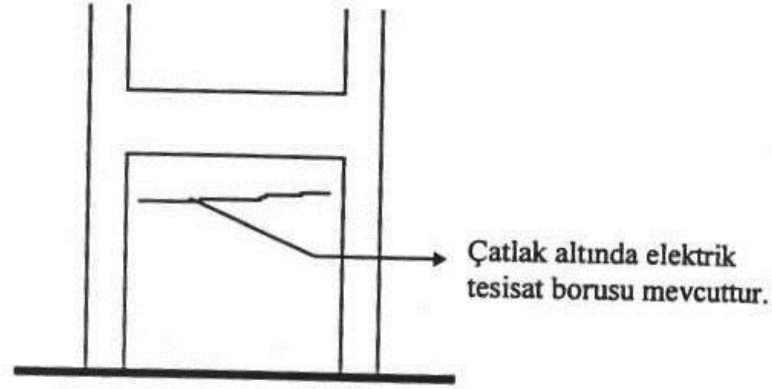
Şekil 2.14 Kirişsiz Döşemelerde zımbalama Hasarı

2.2 Taşıyıcı Olmayan Eleman Hasarları

Betonarme yapılarda taşıyıcı olmayan elemanlar denildiğinde tuğla ya da diğer malzemelerden yapılmış duvarlar anlaşılmaktadır.

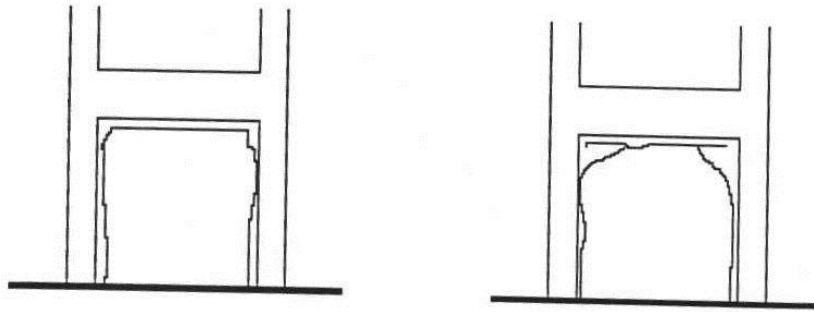
Betonarme yapılarda yatay yüklerin belirli bir kısmının göçünceye kadar duvarlar tarafından taşındığı bilinmektedir. Ancak, Türkiye’de dolgu duvarların taşıyıcı olmadığı kabul edilmekte ve yatay yüklerin düşey taşıyıcı elemanlar tarafından karşılandığı kabul edilmektedir.

Betonarme yapılarda deprem hasarı sıvaların çatlaması ile başlamaktadır. Sıva çatlakları eğer su ve elektrik tesisat kanalları üzerinde oldukça ince (1-2 cm.) bir sıva tabakası varsa ilk olarak buralarda görülmektedir [3].



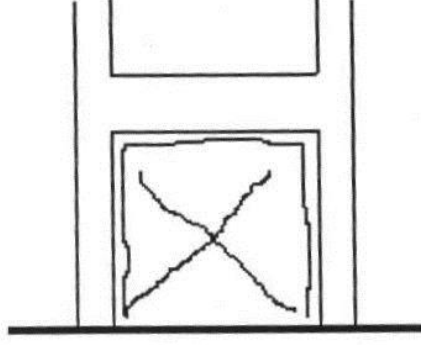
Şekil 2.15 Dolgu Duvarda Tesisat Borusu Üzerinde Oluşabilecek Sıva Çatlağı

Daha sonra sıva çatlakları betonarme çerçeve ile dolgu duvar arasındaki yüzeylerden ilk önce kiriş ile dolgu duvarı arasında ortaya çıkmakta ve bu düzeydeki hasarlar genellikle taşıyıcı sistem açısından önemli olmamaktadır. Bu düzeye kadar olan hasar deprem şiddeti ölçeğine (MSK) göre V-VI şiddeti olarak nitelendirilmektedir.



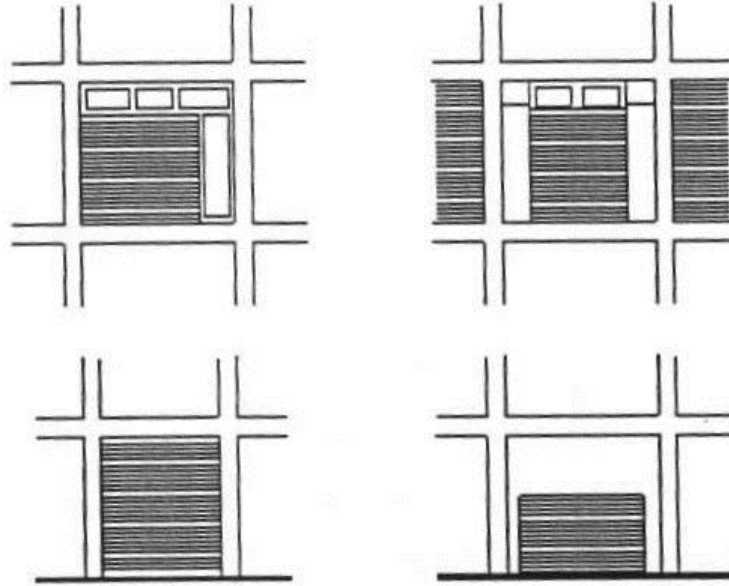
Şekil 2.16 Dolgu Duvar ile Çerçeve Arasında Oluşabilecek Sıva Çatakları

Daha büyük şiddetli depremlerde yada dolgu duvarların boşluklu beton briket gibi daha küçük dayanımlı malzemedan yapılan elemanlarla inşa edilmiş olduğu yapılar da dolgu duvar hasarları X biçiminde oluşmaktadır. Bu durumda çatlağın dolgu duvar enkesiti boyunca da sürdüğü bilinmektedir. Bu hasarın ileri aşamalarında duvarın hasar düzeyine bağılı olarak tuğla yada briket parçaları kırılmakta ve parçalanıp dökülmektedir [3].



Şekil 2.17 Dolgu Duvar da Siva ve Duvar Hasarı

Diğer taraftan betonarme çerçeve ile çevrilmiş dolgu duvarların bir bütün olarak düzlemlerine dik doğrultuda devrilme olasılığı çok yüksektir. Burada bahsedilen dolgu duvar hasarları MSK şiddet cetveline göre VI ve daha yüksek şiddetli depremlerde oluşabilmektedir[3].



Şekil 2.18 Düzlemine Dik Doğrultuda Devrilme Olasılığı Yüksek Dolgu Duvarlar

2.3 Betonarme Yapılarda Deprem Hasar Düzeyi Belirleme

Depremden sonra yapılan hasar düzeyi belirleme çalışmaları, betonarme yapıların kullanılıp kullanılmayacağını, onarım ve güçlendirmeye gerek olup olmadığını, gerek varsa hangi tekniklerin kullanılması gerektiğini belirlemeye yarar.

Bu çalışmalarda öncelikle yapının taşıyıcı elemanlarında hasar düzeyi belirlenir. Aynı hasar düzeyindeki aynı cinsten eleman sayısının toplam eleman sayısına oranı o yapıya ait hasar düzeyi hakkında bilgi verir [2].

Hasar düzeyi belirlemede dikkat edilmesi gereken kriterler şunlardır;

- a) Deprem büyüklüğü
- b) Hasarlı elemanlardaki çatlak boyutu
- c) Hasarlı elemanlarda biçim ve boyut değişimi
- d) Hasar düzeyi belirleme

2.3.1 Deprem büyüklüğü

Taşıyıcı elemanları etkileyen depremin büyüklüğü, o elemanların deprem etkilerine karşı ne derece güvenliği olduğunu gösterir. Hafif şiddetli bir deprem oluşacak ağır hasar ve şiddetli depremde oluşacak hafif hasar o elemanın tehlikeli olup olmadığını belirtmektedir [2].

2.3.2 Hasarlı elemanlarda çatlak boyutu

Hasarlı elemanlarda milimetre mertebesine kadar olan çatlaklar, o yapı elemanında taşıma gücü kaybının olmadığı yada çok az olduğunu gösterir. Eğer bu çatlaklar santimetre mertebesine ulaşıyorsa o yapı elemanında taşıma gücü kaybı olduğu anlamına gelmektedir [2].

2.3.3 Hasarlı elemanlarda biçim ve boyut değişimi

Eleman boyunun 1/500'ini aşan deplasman ve dönmeler, kabuk betonu haricinde çekirdek betonunda kopmalar, boyuna donatıda burkulmalar, etriyelerin açılması, kolonda beton ezilmesi ve donatı burkulması sonucunda oluşan boy kısaltmaları, kirişlerde dönme ve aşırı sehim gibi hasarlar deprem sonrasında taşıyıcı elemanlarda rastlanabilecek tipik boyut ve biçim değişiklikleridir. Bunların bir

kısımının yada tamamının bir arada bulunması ilgili elemanlardaki hasarın düzeyini gösteren belirtilerdir [2].

2.3.4 Hasar düzeyi belirleme

Depremden sonra yapının hangi düzeyde hasar gördüğünün belirlenmesi için hasar sınıfının saptanması gerekir. Bu sınıflar dört ana grupta incelenebilir.

- a) *Hasarsız yada az hasarlı yapılar*: Bu tür yapılar depremden sonra herhangi bir onarım gerektirmeden kullanılabilir yapılar. Bu tip yapılarda gözle görülebilen hiçbir büyük çatlak yoktur. Bazı taşıyıcı elemanlarda 1mm'den küçük ince kılcal çatlaklar görülebilir.
- b) *Az Hasarlı Yapılar*: Az hasarlı yapılar onarım gerektiren yapılardır. Bu tip hasar görmüş yapıların kolon, kiriş, perde gibi taşıyıcı olan elemanlarında hasar yoktur. En fazla sıva çatlakları, cam kırılmaları görülmektedir. Tuğla, asmolen gibi dolgu duvarlarında X şeklinde çatlaklar ve sıva dökülmeleri de olabilir.
- c) *Taşıyıcı sistemin onarımı ve güçlendirilmesi gereken Yapılar*: Bu düzeyde hasar gören yapılarda yapının taşıyıcı sisteminde hasar mevcuttur. Hasar ve buna bağlı olarak onarım ve güçlendirme, yapının durumuna göre çeşitli düzeylerde olabilmektedir. Taşıyıcı elemanların birkaçında veya çoğunda çatlak, deformasyon ve kısmi deplasmanlar mevcuttur.
- d) *Onarılmaz yapılar*: Bu tip yapılarda hasar miktarı ağır olmaktadır. Fakat yapı tümüyle yıkılmamıştır. Yapı içinde insanlar tümüyle tahliye edildikten sonra, yapıya tekrar giriş izni verilemez. Bu tip yapıların artçı sarsıntılar esnasında yıkılma oranı çok yüksektir. Onarılması ve güçlendirmesi fiziki olarak imkansız yada maliyetinin %50'inden fazla olduğu için bu yapılara onarım ve güçlendirme yapılmamaktadır. Bu nedenle, binada yaşayan insanlar tahliye edildikten sonra yapı yıkılmalıdır. Bu tip yapılar kısmen veya tamamen mekanizma durumuna gelmiş yapılardır [2].

3.BETONARME YAPILARDA ONARIM VE GÜÇLENDİRME

3.1 Onarım

Görünüş veya kullanım bakımından hasar görmüş bir yapıda veya onun bir veya birkaç elemanında önceki haline getirmek için yapılan çalışma ve değişikliktir. Bir önceki haline getirme onun görünüşü, kullanımı, yük taşıma kapasitesi, rijitliği, sünekliği ve dayanımı bakımlarından olabilir. Onarımda amaç önceki duruma geri getirmektir [4].

Onarımın yapılabilmesi için, deprem yükünün etkidiği o kısa süre içinde yapıya hasar gelmiş olması gerekir. Bu kısa süre zarfında yapıda meydana gelen kalıcı deformasyonlar ve hasar, yapı elemanlarının normal düşey yükleri taşımadaki emniyet katsayısını azaltmış olmaktadır. Elemanları deprem öncesi dayanımlarına kavuşturmakla yani onarmakla yapının normal işlevini güvenli bir şekilde yürütmesinde bir sakınca olmaması gerekmektedir. Yani yapıda meydana gelen hasar, normal kullanım yükleri gibi sürekli etkiyen yükler değil de geçici anlık deprem yükü ise bu bina onarılabilir. Çünkü binada deprem öncesinde sürekli yükleri taşımasında bir problem olmamıştır. Zaten yapının hasar görmüş olduğu şiddetli deprem sayesinde, tekrar bir deprem olması, o yapının ekonomik ömrü içinde çok da yüksek olmayan bir ihtimaldir [2].

3.2 Güçlendirme

Bir yapının yük taşıma kapasitesini, rijitliğini, sünekliğini ve stabilitesini veya bunlardan bazılarını önceki veya mevcut durumun üzerine çıkarmak amacıyla yapılan değişikliktir. Güçlendirmede amaç dayanım ve benzeri karakteristikleri hasardan önceki veya mevcut düzeyin üzerine çıkarmaktır. Bunun için yapının hasar görmüş olması gerekmez. Deprem riskinin artmış olması, yapının fonksiyonunun değişmesi güçlendirme nedenleri arasında önde gelenleridir [4].

3.2.1 Güçlendirme kararının verilmesi

Bina ile ilgili mevcut durumu belirlemeye ilişkin işlemlerin (mevcut durumun proje ile uyumu, gerekirse taşıyıcı sistem rölevesinin hazırlanması, yapı malzemesine ait tespitler, geoteknik inceleme) yapılmasını takiben, mevcut taşıyıcı sistemin çözümlenmesi yapılarak seçilecek güçlendirme düzeyi belirlenebilir.

Binanın taşıyıcı sisteminin durumu, hasarı ve varsa deprem hesabı incelenmelidir. Bu incelemede binanın köşe ve kenar kolonları ve her iki doğrultudaki yatay yük taşıyan çerçeve sayısı özel olarak gözden geçirilmelidir. Taşıyıcı sistemin depremde Bayındırlık ve İskân Bakanlığı ölçütlerine göre orta hasar görmüş olması veya mevcut sistemde yüklerin iletilmesinde açıkça belirlenen önemli bir eksiklik (taşıyıcı sistem elemanlarından birinin kaldırılması) güçlendirme kararının verilmesi için yeterli olabilir. Ayrıca, beton kalitesi proje değerlerinin altında olup kabul edilebilir sınırlardan da düşük ise veya bina projesinde tasarlanandan daha fazla katlı yapılmış ise taşıyıcı sistemin güçlendirilmesi gerekir.

Güçlendirme maliyetinin binanın yeniden yapılması bedelinin önemli bir oranı (örneğin %40 veya daha fazla) olması, önemli güçlendirme gerektiren ve ekonomik ömrünün önemli bir kısmını tamamlamış herhangi bir tarihi değeri veya prestiji olmayan binalar ile Bayındırlık ve İskân Bakanlığı ölçütlerine göre ağır hasarlı sınıfa giren binalar için yıkım kararı verilebilir [4].

3.2.2 Güçlendirmenin minimum koşulları

Mevcut kolonların yalnızca düşey yükleri yeterli güvenlikle taşımaları yeterlidir. Bu değer TS500'de öngörülen değer olarak alınabilir ($N_d=0,6f_{ck}A_c$)Düşey yükleri yeterli güvenlikle taşıyamayan kolonlar yalnızca düşey yükleri taşımada yetersiz oldukları katlarda, çelik veya betonarme mantolama yoluyla güçlendirilebilir. Yerel olarak ağır hasarlı kolonlarda mantolanmalıdır.

Güçlendirilmiş binada, mevcut kolon ve kiriş gibi mevcut taşıyıcı sistem elemanlarının kontrolünde, aşağıda verilen koşulların sağlanmaması durumunda kolon ve kirişlerin güçlendirilmesi tavsiye edilebilir.

$$A_s(\text{gerekli}) < (1,20 \sim 1,50) \times A_s (\text{mevcut}) \quad (\text{kolon-donatı biliniyorsa})$$

$$A_s(\text{gerekli}) \leq (0,012 \sim 0,015) \times A_c (\text{mevcut}) \quad (\text{kolon-donatı bilinmiyorsa})$$

$$A_s(\text{gerekli}) < (1,20 \sim 1,50) \times A_s (\text{mevcut}) \quad (\text{kiriş-donatı biliniyorsa})$$

$$A_s(\text{gerekli}) \leq (0,015 \sim 0,020) \times A_c (\text{mevcut}) \quad (\text{kiriş-donatı bilinmiyorsa})$$

A_c eleman kesit alanı, A_s kolonlarda toplam donatı alanı ve kirişlerde açıklık ve ortalama mesnet çekme donatılarının toplamıdır. Hesaplarda mevcut elastisite modüllerinin farklılığı göz önüne alınacaktır [4].

3.3 Onarım Ve Güçlendirmenin Gerekliliği

Depreme dayanıklı yapı tasarımının ilkelerine göre yapılan yapılar, normal ekonomik ömürleri içinde en az bir kez olması beklenen yüksek şiddetteki depremde can kaybını önleyecek dayanımda yapılırlar. Depreme dayanıklı olarak nitelendirilen yapıda şiddetli bir deprem sonrasında hasar olabileceği beklendiğine göre, yeterli deprem güvenliği olmadan yapılmış veya eski teknolojiyle yapılmış yapılarda bu depremler sonucunda etkilerin çok daha fazla olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu tip eski yapıların kullanım süresini devam ettirebilmek için onarım ve güçlendirme tekniklerinden faydalanmak gerekmektedir.

Proje ve yapım hatası sonucu onarım ve güçlendirilmesi gereken yapılar her zaman mevcuttur. Ayrıca yapının taşıyıcı sisteminin bir takım mimari ve kullanma gerekçeleri ile yapı bittikten sonra değiştirilmesi sebebi ile de onarım ve güçlendirme tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yani bir yapının onarılması ve güçlendirilmesi için yalnızca depremden hasar görmesi gerekmemektedir. Hatalı ve eksik projelendirilmesi, uygulama sırasında yapılan hatalar, yapının kullanım amacının değişmesi, zamanla ortaya çıkan hasar ve zayıflık belirtileri sonucunda da yapılara onarım ve güçlendirme gereksinimi duyulmaktadır. [2]

3.4 Onarım ve Güçlendirme Kriterleri

Yapıya müdahale türünü belirlemek üzere aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır:

- a) Yapısal elemanların düzeni (iyi, kabul edilebilir, belirsiz)
- b) Yapının dayanımı ($R_c > 0,8$ Onarım, $0,8 > R_c > 0,5$ Güçlendirme $0,5 > R_c$ Yapının güvenliği açıkça yetersiz)
- c) Yapının esnekliği (V_B kuvveti için katlar arası göreceli yer değiştirme değeri δ_R/h)

Yapısal elemanlar için

$$\frac{\delta_c}{h} = \frac{0,02}{R} \quad (3.1)$$

Dolgu elemanları için (R taşıyıcı sistem davranış katsayısıdır.)

$$\frac{\delta_D}{h} = \frac{0,015}{R} \quad (3.2)$$

d) Yapının sünekliği: Süneklikle ilgili olarak yeni ve çağdaş deprem yönetmeliklerinde verilmiş olan koşullar ancak yakın zamanda yapılmış yapılarda göz önünde bulundurulmuştur. Bu koşullar,

- Kuvvetli kolon-göreceli olarak zayıf kiriş tasarımı
- Uygun kayma donatısı, etriye sıklaştırılması yapılması (eğilme göçmesine daha önce ulaşılması amaçlanmaktadır.)
- Kolon-kiriş birleşim bölgesinde sıklaştırılmış etriye ve çirozlarla kuşatılmış basınç bölgelerinin teşkili şeklindedir.

Binaların çok büyük çoğunluğu bu koşulları sağlamadığı için müdahale durumunda yapının normal süneklik düzeyinde olduğu varsayımı ile R değeri küçük tutulacağından V_B kuvveti artırılmalıdır [4].

Müdahale tipi ve derecesi için karar:

Yukarıdaki faktörlere göre 4 ayrı müdahale tipi önerilebilir;

- 1.Tip: Mevcut yapının süneklik özelliğinin iyileştirilmesi (örneğin kolonlara sık etriyeli ince mantolamaların yapılması)
- 2.Tip: Mevcut yapının rijitlik ve dayanımının artırılması (örneğin perde duvar kalınlıklarının artırılması)
- 3.Tip: Mevcut yapısal elemanların rijitlik, dayanım ve sünekliklerinin artırılması (örneğin duvar kalınlıklarının artırılması ve kolonların mantolanması)
- 4.Tip: Yeni elemanlar ilavesiyle rijitlik, dayanım ve sünekliğin artırılması (Yeni perde duvarların eklenmesi, kolonların mantolanması, mevcut perde duvarların bir kenardan güçlendirilmesi)

Yapının yaşının dikkate alınması için önerilen bağıntı güçlendirme için tasarım kuvveti aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir:

$$V_{str} = \left(\frac{T_{rem}}{T_{des}} \right)^{0,50 \sim 0,67} \cdot V_B \quad (3.3)$$

V_{str} güçlendirme tasarım taban kesme kuvvetini, T_{rem} yapının kalan ömrünü, T_{des} yapının tasarım ömrünü, V_B yeni bina için süneklik düzeyindeki tasarım kesme kuvvetidir.

Burada verilenler genel bir algoritma yolu göstermekte olup özel problemlerde farklılıklar olabilir. Zira güçlendirme işinde V_C 'nin hesabı için yapı sisteminin modellenmesi, yapı sisteminin plandaki durumunun sınıflandırılması ve güçlendirme tipinin seçimi gibi bazı tasarımcı ya da sezgiye bağlı özel durumlar söz konusu olabilir.

Güçlendirme düzeyi ve güçlendirilecek elemanlar seçildikten sonra analiz ve tasarım safhasına geçilir [4].

3.5 Onarım Ve Güçlendirmede Kullanılan Malzemeler

3.5.1 Tamir harçları

Betonarme yapılarda yerel beton hasarlarının giderilmesinde yaygın biçimde kullanılırlar. Kiriş, kolon, perde ve döşemelerde, korozyon ve yapım kusurları sebebiyle beton dökülmesi meydana gelmiş, donatı ortaya çıkmış ise, hazır tamir harcı uygulaması tavsiye edilir.

Yüksek basınç dayanımına ve aderans özelliğine sahip olan bu harçların seçiminde, uygulandığı beton yüzeyle iyi yapışması, alt tabak ile aynı elastik modülü, sıcaklık genleşme katsayısına sahip olması beklenir. Bu nedenle yükleme durumunda ve sıcaklık değişimiyle ek gerilmelerin çıkması önlenmiş olur. Tamir harcı uygulanan yüzey dışı açık olduğu için, atmosfer koşullarına dayanıklı olması ve düşük geçirimliliğe sahip olması tercih edilmelidir. Kururken büzülmesinin düşük olması ve işlenebilme için su/çimento oranını düşürmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı içermesi de tercih sebebidir. Kolon veya perdelerde karot alınmasıyla açılan boşluklar da, hazır tamir harcı ile doldurulmalıdır.

Tamir harcı uygulamasından önce, yüzeydeki harç, gevşek parçalar, bozulmuş hasar görmüş beton, yağ, boya kalıntıları, kireç, toz ve kir temizlenmeli, yüzey pürüzlenmelidir. Kesitte bulunan donatı çeliği kumlanarak, üzerindeki pas temizlenmeli ve üzerine korozyona karşı koruyucu bir kimyasal sürülmelidir. Mevcut donatının kesiti korozyon sebebiyle küçülmüşse, yeni donatı çubukları ilave edilmelidir. Tamir harcı uygulanacak yüzeyde su sızıntısı mevcutsa, bu sızıntı durdurulmalıdır. Eğer tamir harcı uygulaması 20mm.den kalın olacaksa ve etriye yoksa harç kalınlığındaki gerilmeleri alabilmek için, yüzeye tel veya çelik hasır bağlanmalıdır. Konulan hasırla yüzey arasında tamir harcının nüfuz edebilmesi için biraz boşluk bırakılmalıdır. Donatısız yüzeydeki veya donatı üzerindeki harç kalınlığı en az 10 mm. olmalıdır.

Donatı çubukları veya hasır donatı yerleştirildikten sonra, tamir harcı uygulamasından önce yüzey suya doymun hale getirilmelidir. Tamir harcı mala ile sürülebileceği gibi, püskürtülerek de uygulanabilir. Harç yüzeyinin düzeltme işleminden sonra, sıcaklık veya rüzgâr gibi nedenlerle hızla kuruyarak içindeki hidrotasyon suyunu kaybetmemesi için, bitmiş kesite bakım yapılmalıdır [5].

3.5.2 Epoksi reçinesi ile onarım ve güçlendirme

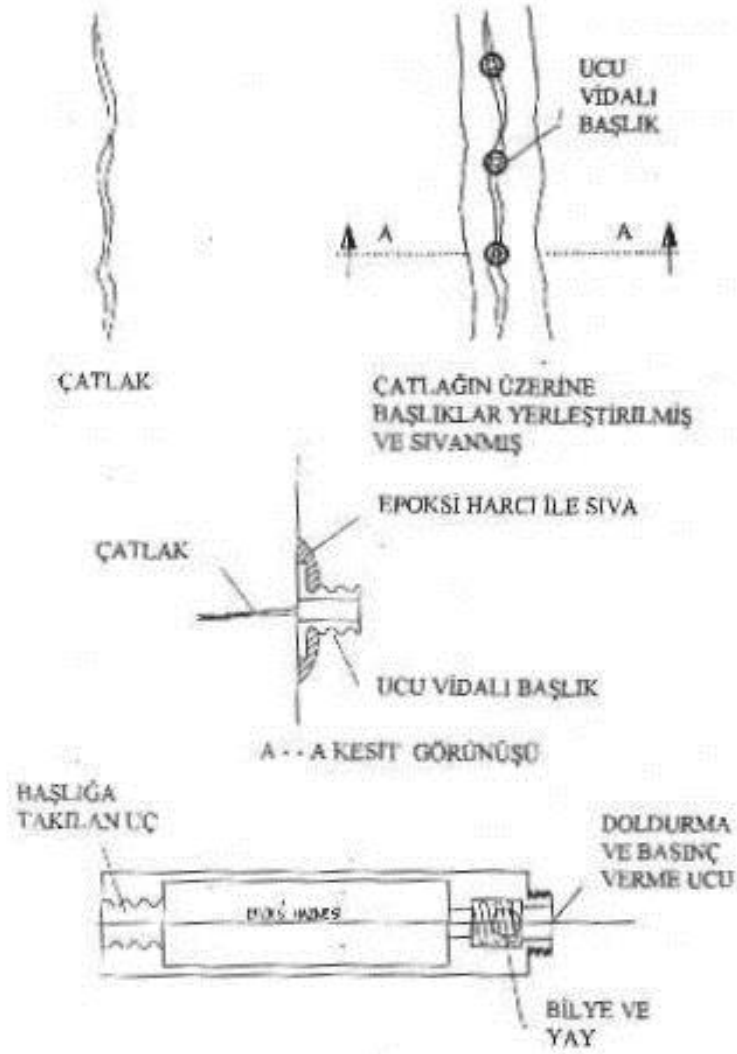
Epoksi ve benzeri reçineler; betonarme perdeler, kolonlar, döşemeler ve kirişlerdeki beton çatlaklarının doldurulmasında ve ince çelik elemanları betona yapıştırmak için kullanılır. Epoksi uygulaması taşıyıcı sistemde rijitlik dağılımını dolayısıyla iç kuvvet dağılımını değiştirmez.

Uygulamada epoksi; bu türden olan sıvı reçineler (epoksi, poliester, poliüretan, akrilik gibi) için genel anlamda kullanılır. Reçineyi oluşturan kimyasal birleşenlerin çeşitlerine ve kimyasal yapılarına, kullanılma oranlarına ve eklenen maddelere bağlı olarak pek çok türleri mevcuttur. Bu nedenle amaca uygun reçinenin seçilmesi önemlidir.

Genel olarak reçinenin kullanım sırasındaki sıvı döneminin uzun olması ve hemen kapta sertleşmeye geçmemesi istenir. Reçinenin betona, yığma duvara ve çeliğe yapışma özelliği çok iyidir ve bu bağ nemle azalmaz. Uygulamadaki nem ve sıcaklığa bağlı olarak, enjeksiyondan sonra kür uygulanarak sertleşme çabuklaştırılabilir. Reçinenin viskozitesinin enjekte edilecek çatlak kalınlığına uygun olması gerekir [5].

Bu metod genişliği 0.002 in.'ten dar olan çatlaklar için kullanılır. Bu metotta çatlak boyunca yakın aralıklarla delikler açılır ve buralardan basınçlı epoksi enjekte edilir.

Epoksi enjeksiyonu binalardaki, köprülerdeki, barajlardaki ve diğer betonarme yapılardaki çatlakları onarmada çok etkili bir yöntemdir. Fakat çatlak oluşumu için yapısal herhangi bir önlem alınmamışsa çatlaklar tekrar oluşabilir [6].



Şekil 3.1 Epoksi Enjeksiyonu

Epoksi enjeksiyonun adımları:

-Çatlakların temizlenmesi: İçi dolmuş çatlaklar mutlaka temizlenmelidir. Yağ, kir ve beton parçacıkları epoksinin çatlakların içine işlemesini ve kenetlenmesini engeller. Temizleme işlemi tazyikli su ile veya başka bir solvent kullanılarak yapılır. Daha sonra basınçlı hava tutularak bu çatlaklar kurutulur.

-Yüzeyin yalıtımı: Epoksinin dışarı sızmasını önlemek için yüzeydeki çatlakların önceden kapatılması gerekir. Bu kapatma işleminde epoksi çatlak boyunca yüzeyden sürülür ve sertleşmesi beklenir.

Eğer yüksek basınçlı enjeksiyon yapılacaksa çatlağın 1,2 cm. Derinliğinde ve 2 cm Genişliğinde V şeklinde açılması ve epoksi ile doldurulması gerekir. Eğer enjeksiyonun basıncı azsa çatlaklar bantla kapatılabilir.

-Epoksi yerinin hazırlanması:

- a. Enjeksiyon yerinin delinmesi ilk kullanılmaya başlanan metoddur. Daha çok çatlakların V şeklinde açıldığı yerlerde kullanılır. 2cm. Genişliğinde ve 1,2 cm. ile 2,5cm arasındaki çaplarda delikler açılır. Delerken çıkan tozları vakumlamak gerekir.
- b. Diğer bir yöntemde ise yalıtımın bir bölümü açılarak giriş yeri sağlanır. Bu yöntemde yalıtımın çok iyi olması ve epoksi sızıntısının önlenmesi gerekir.

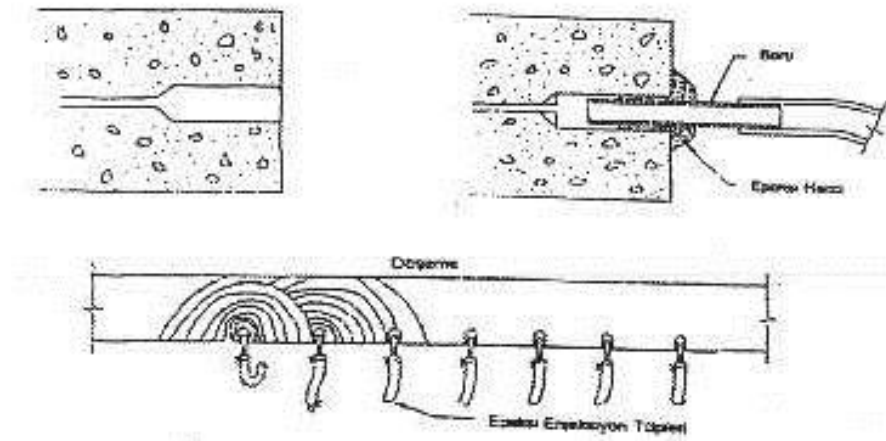
-Epoksinin Enjeksiyonu:

Hidrolik pompalar ve hava tabancaları kullanılabilir. Enjeksiyon için basınç çok iyi ayarlanmalıdır. Yüksek basınç çatlağın açılmasına neden olabilir.

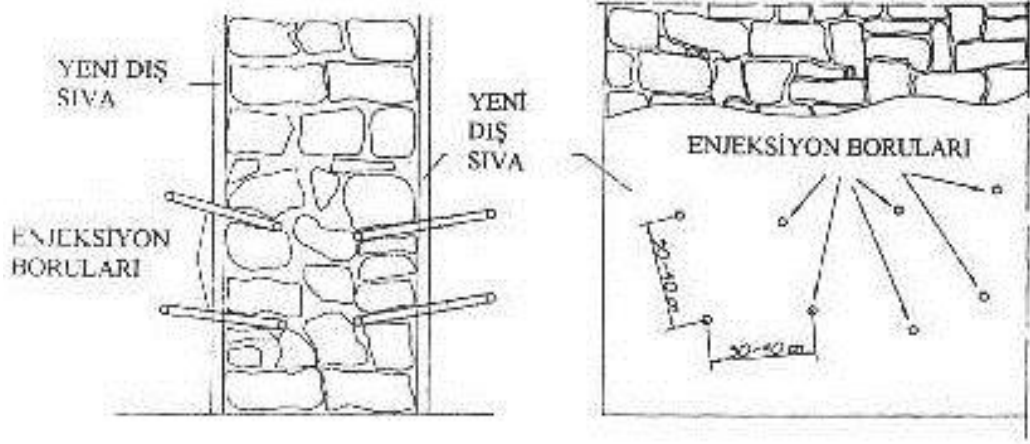
Çatlak dikineyse alt noktaların iyice dolması beklenir daha sonra üst tabakalar geçer. Çatlak yataysa bir uçtan sıkılan epoksinin diğer uçtan çıkması beklenir. Diğer uçtan basınç alınabiliyorsa çatlak dolmuş demektir.

-Yalıtımın kaldırılması: epoksi enjeksiyonu bittikten sonra sızıntıyı önlemek için yapılmış yalıtım kaldırılmalıdır ve buralar epoksiyi kapatan boyalarla boyanmalıdır.

Epoksi kullanımı ile yerel çatlak onarımı yapıldığı unutulmamalıdır. Bir elemanı veya bir bölgeyi güçlendirmek için genellikle tek başına kullanılmaz. Güçlendirme işleminde diğer yöntemlerle beraber epoksi uygulaması tercih edilir. Yangına karşı dayanıksızlığı epoksinin bir zayıf tarafıdır. Epoksi 80°C'nin üstünde dayanımını kaybettiği için ilgili durumlarda epoksinin yangına karşı korunması gerekir [6].



Şekil 3.2 Epoksi Enjeksiyonu Uygulaması



Şekil 3.3 Yığma Duvarlara Epoksi Enjeksiyonu

3.5.3 Yerinde döküm normal beton

Yerinde döküm normal beton onarım ve güçlendirme işlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu betonlarla yapılan onarım ve güçlendirmede başarılı sonuçlara ulaşabilmek için rötrelerini minimuma indirmek gerekmektedir. Rötre dolayısıyla oluşabilecek hacim değişiklikleri mevcut betonla yeni beton arasındaki temasın kaybolmasına sebep olmakta dolayısıyla temas yüzeyinde gerilme geçişi azalmakta veya yitirilmektedir. Ayrıca onarım ve güçlendirmede kullanılan beton dayanımının en az mevcut beton dayanımına eşit olması gerekmektedir. Yeni betonun eskisiyle kenetlenmesinin istenen düzeyde sağlanabilmesi ve dayanımının en az mevcut beton dayanımına eşit olması için,

- Yeni betonla temas edecek eski beton yüzeylerini pürüzlendirip temizlenmesi,
- Kalıpların temizliğinin denetlenmesi ve mevcut beton yüzeylerinin ıslatılması
- Betonun boşluk oranını azaltmak için kalıplara dıştan vibratör uygulanması,
- Yeni dökülen betonun kürünün uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir [3].

3.5.4 Rötresiz betonlar

Bu tür betonlar genleşen çimentolarla yapılmakta, dolayısıyla başlangıçta betonda bir hacim artışı oluşturulması ve daha sonra meydana gelen rötre ile oluşturulan hacim artışının pratik olarak yok edilmesi planlanmaktadır. Ancak bunun için, rötresiz betonların üretiminde aşağıdaki hususların gereğinin de yerine getirilmesi zorunlu olmaktadır.

-Rötrenin yok edilmesi için, katkı maddesi dahil, beton bileşimi yeterli laboratuvar deneyleriyle ayarlanmalıdır.

-Beton dayanıklılığı yönünden, genleşen çimentonun agrega ile uyumlu olduğunun belirlenmesi gerekmektedir [3].

3.5.5 Polimerli betonlar

Normal çimentonun bir kısmının yerine bağlayıcı özellikte bazı polimerlerin konulmasıyla elde edilir. Normal betonun daha iyi işlenebilirlik özelliğinde, su ve çimento oranı ve rötresi daha küçük olan betonlar yapılabilir. Eski ile yeni elemanlar arasında aderans iyileştirilebilir. Betonun bağlayıcı sistemi içerisine, plastik halkalar veya bağlar katarak, sertleşmiş betonun mukavemetini yükseltirler. Ayrıca alkalilik özellikleri normal betona göre çok daha azdır [7].

3.5.6 Reçineli betonlar

Bu tür betonlarda çimento yerine bağlayıcı madde olarak bileşenlerinde biri epoksi, polyester, poliüretan, akrilik gibi sıvı reçineler, diğeri ise sertleştirici olan iki bileşenli bir reçine kullanılmaktadır. Bu betonlar az hasarların onarılmasında ve küçük çaplı güçlendirmelerde kullanılmaktadır. Kullanılmaları durumunda aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir [3].

- Reçine donmadan uygulama tamamlanmalıdır.

- Nem ve sıcaklığa karşı duyarlı olduklarından, uygun koşullarda kullanılmalıdırlar.

- Bu tür betonların geleneksel betonla kenetleşmelerinin tam olarak sağlanması için mevcut beton yüzeyine uygun kalınlıklı sıvı reçine sürülmelidir.

- Bu betonların dayanımları normal betonlara göre daha yüksek olduğundan elastisite modüllerinin farklılığından doğabilecek problemler irdelenmelidir.

Burada, başarı ihtimalini artırmak için, bu tür betonları kullanmadan önce gerekli incelemelerin tam olarak yapılması ve inşaatta bu betonu daha önce kullanmış kişilerin bulundurulması gerekir [7].

3.5.7 Püskürtme betonları

Püskürtme beton, onarım veya yapım amacı ile önceden hazırlanmış olan betonun hava basıncı yardımı ile yüksek hızla uygulama yüzeyi veya uygulama alanına püskürtülerek elde edilen betondur. Mantolama yöntemi ile yapılacak güçlendirmede, beton kalınlığının az olduğu durumlarda, kalıp yapılması ve betonun yerleştirilmesi zor olduğundan daha çok püskürtme beton tercih edilir. Başarılı bir püskürtme beton elde edilmesi, donatının uygun seçilmesi ve yerleştirilmesine bağlıdır. Uygulaması için ekipman ve özel olarak yerleştirilmiş iş gücüne ihtiyaç vardır.

-Kuru Karışımli Püskürtme Beton: Beton karma suyunun betona püskürtme başlığında ilave edilerek karışımın basınçlı hava ile yüzeye püskürtülmesi sonucu elde edilen betondur.

-Islak Karışımli Püskürtme Beton: Priz Hızlandırıcı katkı maddeler hariç, bütün karışım elemanlarının püskürtme başlığına gelmeden önce birlikte karıştırılarak karışımın basınçlı hava ile yüzeye püskürtülmesi sonucu elde edilen betondur.

Onarım ve güçlendirme işlerinde mevcut bazı avantajlarından dolayı püskürtme beton olarak kullanılır. Eğer püskürtme betonun uygulanacağı yüzey iyi temizlenmiş ve pürüzlendirilmiş ise iyi bir püskürtme neticesinde yeni betonla mevcut beton arasında iyi bir aderans temin edilebilir. Ayrıca püskürtme beton eğik, düşey ve alt yüzeylere de uygulanabilir. Fazla büzülme (rötre) özelliğinden dolayı oluşacak çatlaklara karşı uygun düzen ve miktarda donatı kullanarak ve betonun kürüne(bakımı) gerekli özen gösterilecek önlem alınabilir [7].

3.5.8 Çelik şeritlerle onarım ve güçlendirme

Betonarme elemanlar enine ve boyuna doğrultusunda çelik şeritler kullanılarak onarılıp güçlendirilebilir. Dayanımı yüksek ve kalınlığı 1,0~1,5mm. olan şeritler, kirişin alt ve yan yüzlerine, kolonların düşey yüzlerine ve kiriş-kolon birleşim bölgesine epoksi reçinesi ile yapıştırılır. Uygulamada önce beton yüzeyi düzeltilerek, yıkanır ve kurutulur. Yüksek viskoziteli epoksi reçinesi beton ve çelik şeridin yapışma yüzeyine sürülür. Basınç uygulayarak 24 saat yapıştırma sağlanır.

Şeritlerin uygulanmasında beton yüzeyle bütünleşmesi için beton dayanımının yeterli olması gerekir. Hazır çelik şeritler yerine çelik lamalar da kullanılarak da uygulama yapılabilir.

Şerit uygulamasında elemanların rijitliklerinde değişiklik oluşmadığı kabul edilir. Eleman kesitlerinin eğilme momenti ve kesme kuvveti kapasiteleri artırılırken; sarılan çelik şeritler bu bölgede enine basınç oluşturularak, deprem etkisi durumunda betonun dolayısıyla elemanın sünekliğini artırır. Şerit düzeninin seçiminde elemandaki kuvvet akışı göz önünde tutulmalıdır. Betonda enine basıncın yeterli şekilde oluşması için şeritlerin dar olmaması (~50mm. uygun genişlik) ve birbirlerinden ayırık yerleştirilmemesi (0~,20m. Uygun aralık)gerekir.

Çelik şeritler beton yüzeyine yapıştırılırken, bunlar basınç ve çekme kuvvetini alacak şekilde düzenlenmelidir. Çelik şeritlerin üzeri tamir harcı ile örtülerek hem korozyona ve hem de sınırlı ölçüde yangına karşı korunabilir. Basınç etkisinde şeritlerin burkulmaması ve çekme kuvveti durumunda çelik şeritlerin betondan ayrılmaması gerekir. Bu uygulama türünün pahalı olduğu unutulmamalıdır [8].

3.5.9 Lif takviyeli plastik levhalarla onarım ve güçlendirme

Bu uygulama çelik şerit yapıştırma işlemine benzer. Hafif olması, korozyon tehlikesinin bulunmaması, köşelerde bükülebilmesi ve büyük boyutlarda bulunması üstünlükleridir.

Ayrıca, elastiklik modülünün küçük olduğu için, güç tükenmesi durumunda büyük şekil değiştirmeler yapabilir. Ancak, güç tükenmesine kadar elastik davranışı sebebiyle, malzeme düşük sünekliktedir.

Sürekli yük altında başlangıç mukavemetinde %15~60 a varan önemli azalmaların olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle depreme karşı ve sürekli olmayan yük için güçlendirme uygulamalarında yararlıdır. Bu tür plastik levhalar uygulamada bir ve iki doğrultuda takviyeli olarak bulunur. Özellikleri kullanılan malzemeye göre değişir.

Özellikle betonarme perde ve döşeme ile yığma bina duvarı gibi geniş düz yüzey uygulamaları ve dairesel kolon, baca, hazne ve tank gibi elemanların onarım ve güçlendirmesinde tercih edilir. Bu plastik levhalar, çelik levhalar yerine elemanların eğilme momenti ve kayma dayanımını arttırmak için başarılı bir şekilde kullanılır. İnce olduklarından dolayı elemanın rijitliğini ve taşıyıcı sistemdeki kuvvet dağılımını değiştirmezler. Bu durum yerine göre olumlu veya olumsuz bir özellik olarak ortaya çıkar [5].

4. YAPILARIN ONARIM VE GÜÇLENDİRME METODLARI

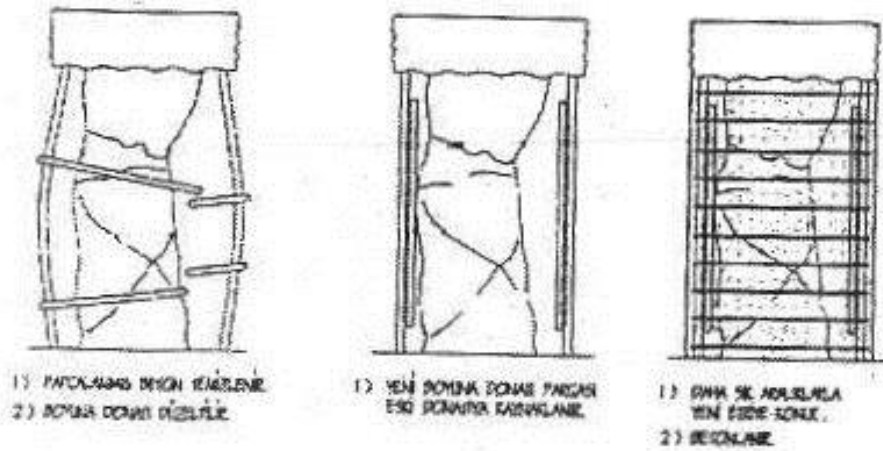
4.1 Yapı Elemanlarının Onarım ve Güçlendirmesi

4.1.1 Kolonların onarım ve güçlendirilmesi

Hasar görmüş bir kolonun deprem etkilerini taşıyabilir duruma getirilmesi veya yatay yük taşıma kapasitesinin artırılması için kolonların güçlendirilmesi gerekmektedir. Kolonun eğilme dayanımı kesit alanının büyütülmesiyle ve yeni boyuna donatılar ilave edilerek sağlanır. Buna karşılık kesme kuvveti dayanımı ve sünekliliği, enine donatının sıklaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Binanın planında kolonların kesitlerini birbirine yaklaştırmak sistemin davranışının dengeli olmasını sağlar. Kolonlarda hasar durumuna göre çeşitli onarım ve güçlendirme türü söz konusu olabilir [5].

Hafif çatlak bulunan kolonların onarımında genellikle enjeksiyon tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte çatlak genişliğine bağlı olarak 20~100cm. aralıklarla açılmış olan ağızlara reçine yada çimento harcı enjekte edilmektir [3].

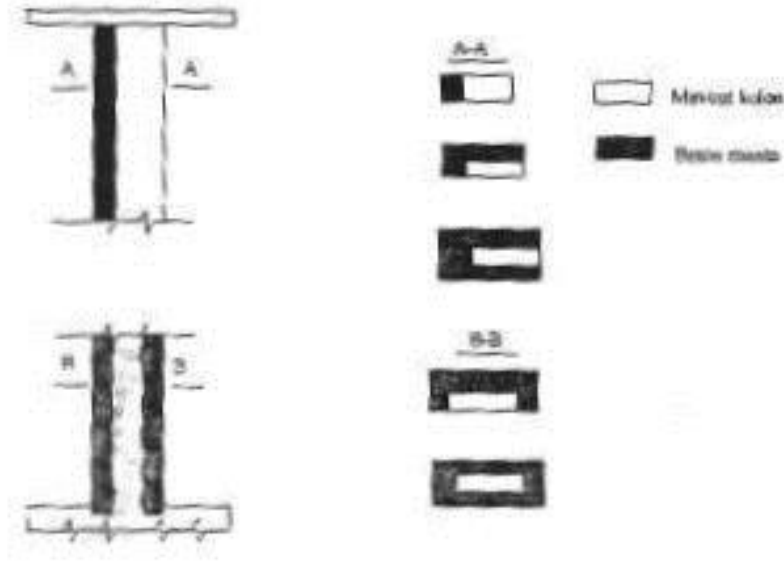
Yerel ezilme bulunan kolonlarda, ezilmenin olduğu bölgedeki hasarlı betonun kaldırılması, beton yüzeyinin pürüzlendirilerek temizlenmesi, yeni betonun dökümünden önce hasarlı bölgede mevcut betonun suya doyurulması gerekmektedir. Bu onarım için bir miktar boyuna ve enine donatı kullanılabilir. Hasarın daha fazla olması durumunda (boyuna donatının aşırı derecede burkulması, etriyelerin kopması, betonun ezilmesi gibi) hasarlı kısım tamamen kaldırılarak yerine yenisinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 4.1 Yerel Hasarlı Kolonlarda Onarım

Hasarı fazla yada dayanımın yetersiz olduğu durumlarda kolonun genel olarak mantolama tekniği ile betonarme manto ve çelik manto kullanmak suretiyle onarım ve güçlendirilmesi gerekmektedir [3].

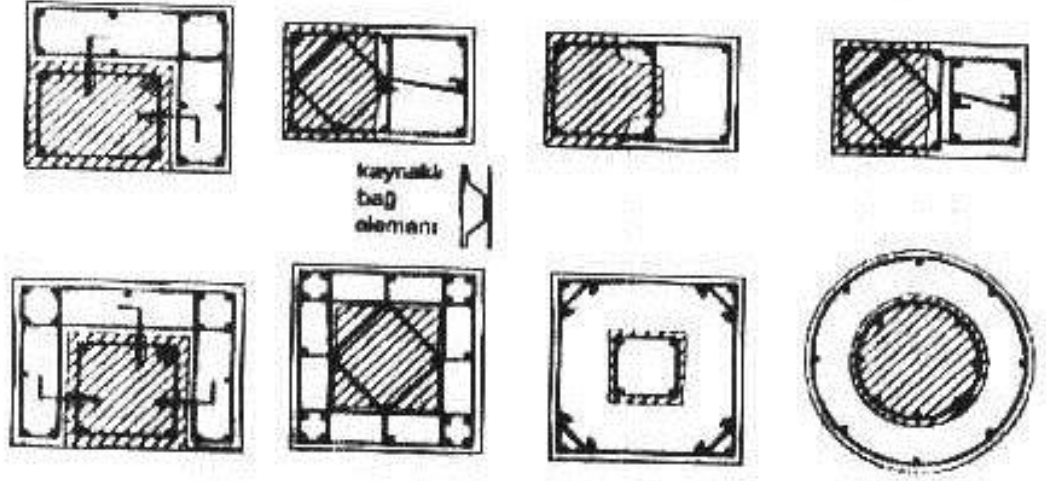
Mantolamada mevcut kolona, beton kesiti ve donatı eklenir. Mevcut ve yeni kolonun bütünleşmesini sağlamak için 10 cm.den az olmaması gerekir. Uygulamadaki durumuna göre kolon bir, iki, üç ve dört tarafından mantolanabilir [9].



Şekil 4.2 Kolonların 1,2,3,4 yüzünden mantolanması

Ancak tüm çevreyi kaplayan bir mantolama tercih edilmelidir. Bu suretle mevcut ve yeni beton arasında tam bir kuvvet iletişimi sağlanabilir. Tüm çevrenin mantolanmaması durumunda, mevcut kolonun boyuna donatısının ve etriyesinin meydana çıkarılarak, yeni etriyelerin bunlara doğrudan veya bir bağ parçası ile kaynaklanması gereklidir.

Dört taraftan mantolamada yüz pürüzlendirilmesini genellikle yeterli olursa da, büyük etkiler söz konusu olduğunda beton örtü tabakasının kaldırılması uygundur. Özellikle bir, iki ve üç taraflı mantolamada mevcut kolonla manto kısmının bütünleşmesine özen gösterilmelidir. Bu amaçla L şeklindeki kenetlenme donatısı kullanılabilir [9].

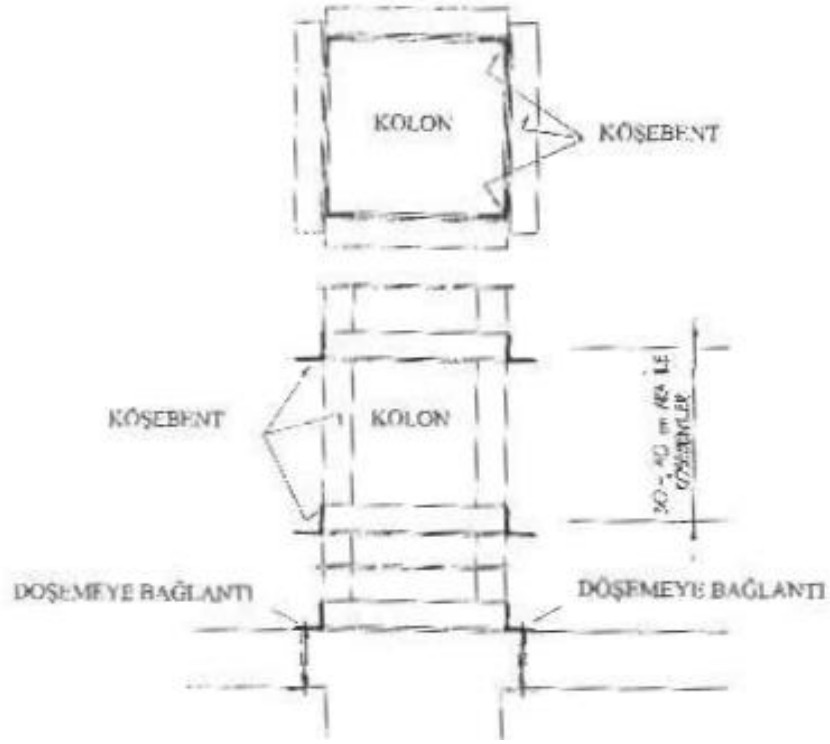


Şekil 4.3 Kolonların mantolanmasına çeşitli örnekler

Güçlendirme için yeniden eklenen bölümlerde enine donatıların bağlanması, betonu ve boyuna donatıları sıkıca sarması gerekir. Bilindiği gibi etriyelerin, boyuna donatıların burkulmalarını önlemek, kesme gerilmelerini taşımak, betonu sararak yanıl destek sağlayarak basınç dayanımını artırmak gibi görevleri vardır. Bunun için yeniden sarılan etriyelerde kanca yerinde kaynak ya da bulonla sıkıştırırmalı bağlantı yapmak çok daha etkili olacaktır.

Kolon mantolanması durumunda ek donatıların da basınç ve çekme kuvveti alabileceğini düşünerek, bunların kenetlenmesinin sağlanması ve manto gereken katlar arasında donatının sürekliliğinin sağlanması önemlidir.

Çelik profil iskelet geçirme yöntemi ile kolonların dört tarafına köşebent profili yerleştirilir. Bu köşebent profiller birbirlerine enine kuşaklarla bağlanır. Enine kuşaklar bir iskelet görevi yapar [2].

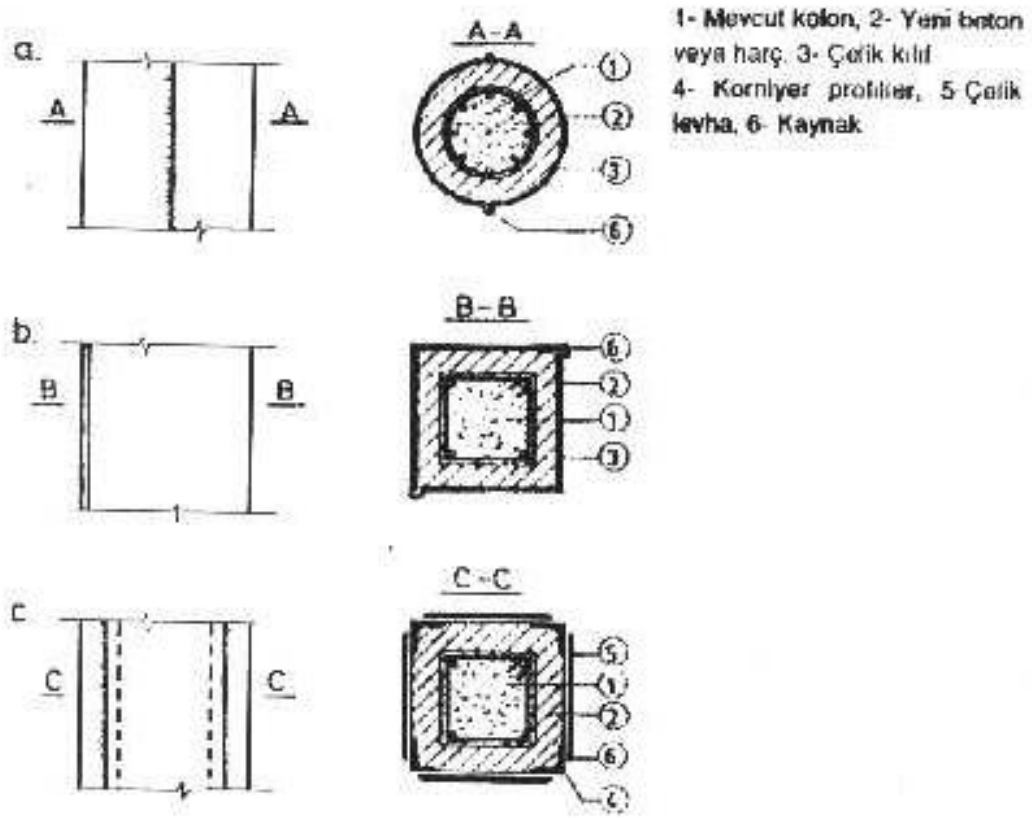


Şekil 4.4 Betonarme Kolonun çelik kafesle güçlendirilmesi

Korniyer ile mevcut beton arası boşlukları rötre yapmayan çimento harcı veya reçine harcı ile doldurulur. Çelik elemanlara, yangına karşı korumaları amacıyla püskürtme betonu ile örtü geçilir. Bu yöntemle yük taşıma kapasitesinin artışı yanında, kolonun sünek davranışında da bir iyileşme elde edilir. Ancak rijitlik yönünden bir değişme olmamaktadır [2].

Çelik korniyerlerle dört köşesinden yüksüz olarak onarılmış ve güçlendirilmiş betonarme kolonların eksenel yük altında davranışları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çelik korniyerlerle dört köşesinden yüksüz olarak onarılmış ve güçlendirilmiş betonarme kolonlar, eksenel yük altında dayanımı olumlu olan sonuçlar vermiştir. Kolonların dayanımları, güçlendirme durumunda monolitik kesitin %92 sine ulaşmıştır.
- Yalın kolonun güçlendirme sayesinde rijitliğinde %32 oranında artış olduğu gözlenmiştir.
- Onarılan ve güçlendirilen kolonlarda, süneklik ve enerji tüketimi bakımından belirgin bir iyileşme görülmüştür [2].



Şekil 4.5 Betonarme Kolonun çelik levha kılıfla güçlendirilmesi

Çelik levha kılıf geçirme yönteminde mevcut kolonun tamamı çelik levha ile çevrilip örtülür. Kolon ile kılıf arasında, genleşen ve rötire yapmayan çimento harcı kullanılmalıdır. Çelik levha kılıf geçirme yöntemi ile betonarme kolonların süneklik ve eksenel yük taşıma mukavemetinde artış olmaktadır. Çelik kılıflar döşeme içinden geçirilemediğinden dolayı, eğilme momenti yönünden bir artış olmamaktadır. Bu yöntemde de çelik elemanlara püskürtme beton yardımıyla ince bir tabaka halinde örtü geçirilmesi, yangına önlem almak açısından önem taşımaktadır [9].

4.1.2 Kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi

Kirişlerdeki hasarlar da kolonlarınkine benzer olarak betonun çatlaması, ezilmesi, donatının kopması ve sıyrılması şeklinde olduğu için, bunların onarım ve güçlendirmeleri ilke olarak kolonlarınkine benzemektedir.

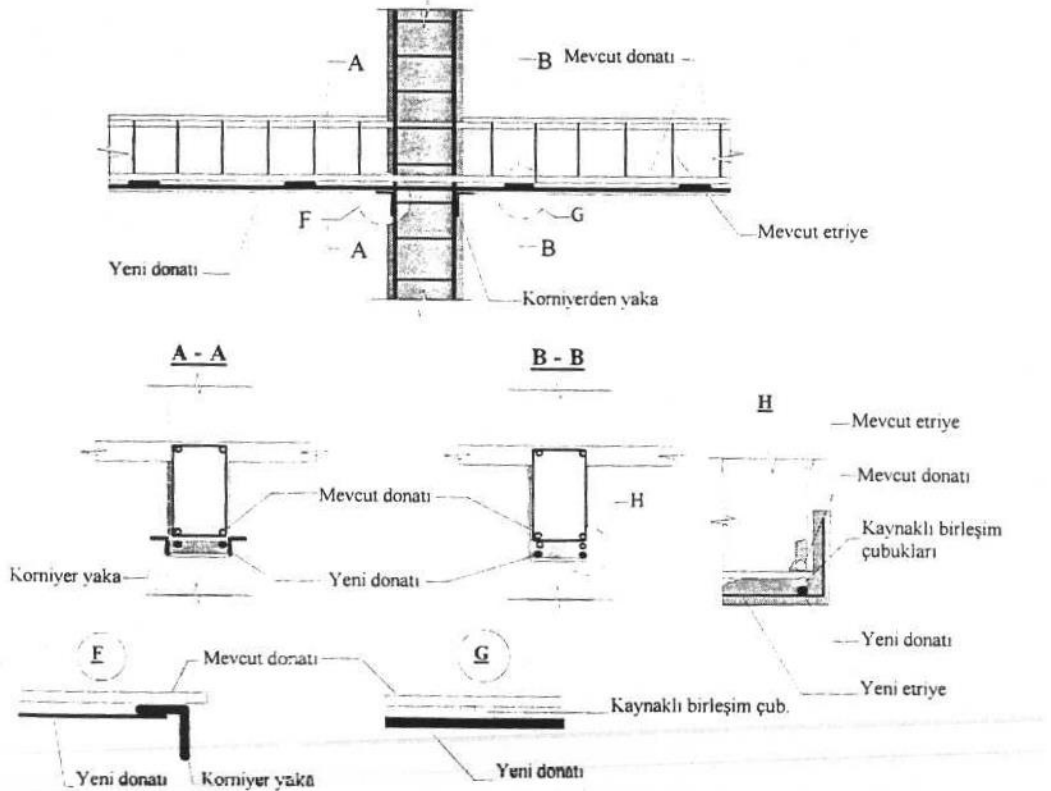
Hafif çatlak bulunan kirişlerin onarılmasında enjeksiyon tekniği kullanılmaktadır. Yerel hasarlar ağırsa (beton kırılması, ezilmesi, aderans sökülmesi, donatı kopması gibi) kolonlarda olduğu gibi bu kısmın kaldırılması ve yerine yenisinin yapılması

gerekmektedir. Bu işlem sırasında kullanılan betonun iyice sıkıştırılmasına dikkat edilmelidir.

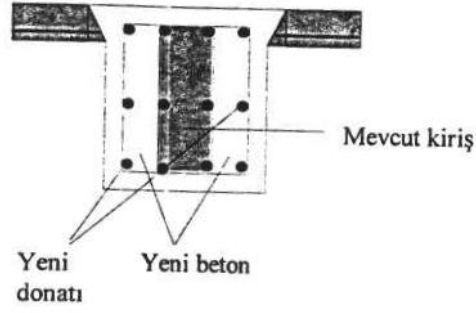
Hasarın yerel olmaması ve dayanımın yetersiz olduğu durumlarda kirişlerin mantolama tekniği ile betonarme manto ya da çelik manto kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi gerekmektedir.

Betonarme mantolama tekniği kirişin bir, iki, üç ya da dört yüzüne yeni betonarme tabaka eklemek suretiyle gerçekleştirilmektedir. Kirişlerin betonarme olarak onarım ve güçlendirilmesinde ilave edilecek donatının betonla aderansının, donatının ankrajının ve mevcut betonun yeni betonla kenetleşmesinin sağlanmasına dikkat etmek gerekmektedir. Bu kolonların onarım ve güçlendirilmesindeki yolu izlemek suretiyle sağlanabilmektedir [3].

Kirişlerin genellikle eğilme dayanımını artırmak için kullanılan bir yüzden mantolamada yeni donatı ile mevcut boyuna donatı arasındaki bağlantı, genellikle kaynaklı bağlantı çubuklarıyla sağlanmaktadır.

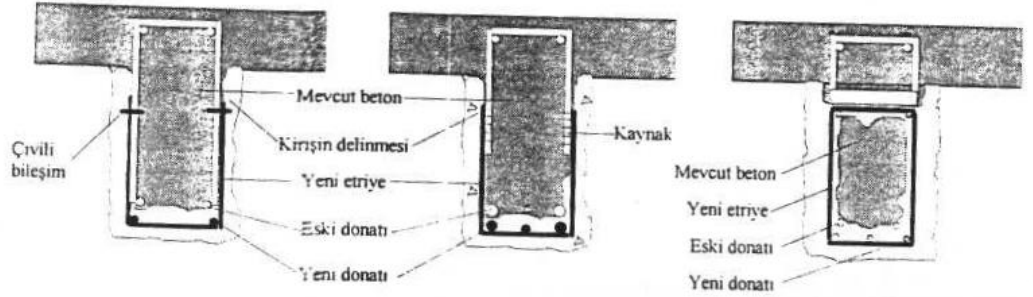


Şekil 4.6 Betonarme Kirişlerin Bir yüzünden mantolanması



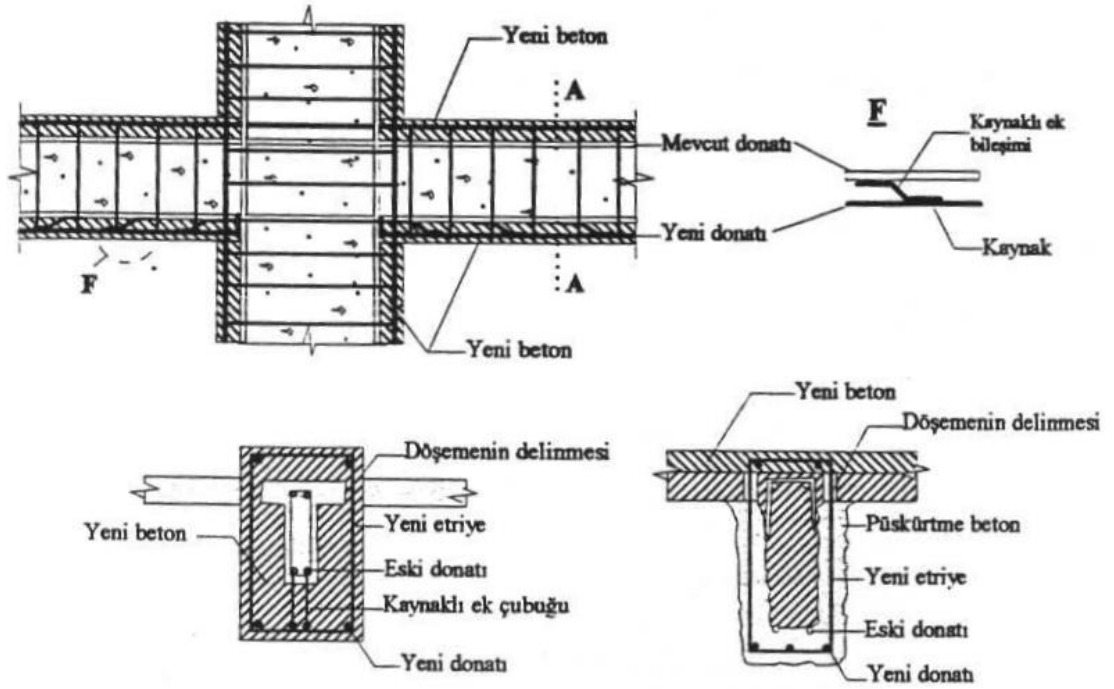
Şekil 4.7 Betonarme Kirişlerin iki yüzünden mantolanması

Kirişlerin üç yüzünden mantolanmasında püskürtme beton uygun bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tür yeni etriyelerin mevcut etriyelerle bağlantısı zayıf olduğundan, bir engel yoksa, kirişlerin bu teknikle mantolanması yerine dört yüzden mantolanması tercih edilmelidir.



Şekil 4.8 Betonarme Kirişlerin Üç yüzünden Mantolanması

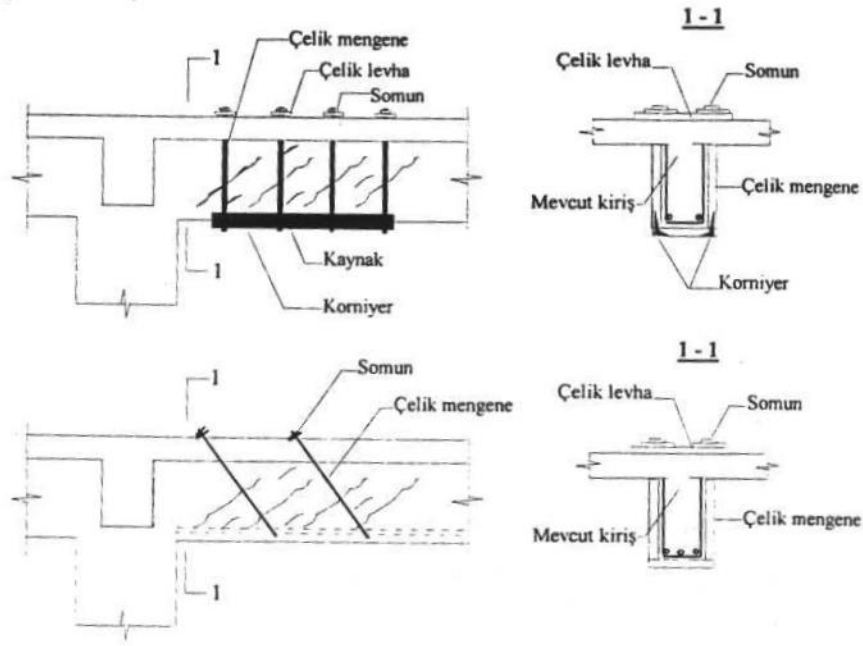
Kirişlerin dört yüzünden mantolanması eğilme ve kesme dayanımlarını önemli derecede artırmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, yeni etriyeler döşemelerin delinmesi suretiyle geçirilmekte, betonlama işlemi de bu boşluklardan yapılabilir.



Şekil 4.9 Betonarme kirişlerin dört yüzünden mantolanması

Çelik levha ile donatma statik yüklere maruz olan kirişlerin yan yüzlerine uygulanarak kesme mukavemetini ve alt yüzüne uygulanarak açıklıkta eğilme mukavemetini artırmak için kullanılabilir. Bu teknikte çelik levhalar, betonarme elemanların yüzüne dıştan epoksi reçinesi ile yapıştırılmakta ve epoksi reçinesi sertleşinceye kadar bu levhalar beton yüzüne doğru mengenerlerle sıkıştırılmaktadır. Bunların betona ankrajının yapılması tercih edilmelidir.

Çelik levhalar genellikle 2-10 mm kalınlığında olmakla beraber kalınlığı 3 mm.'den fazla olan levhaların kullanılması halinde kiriş yüzü, genleşen çimento hamuruyla düzeltilmeli, kama ankraj civataları kullanılmalı ve bunların yangın ile korozyona karşı emniyetleri de sağlanmalıdır. Çünkü epoksiler belli bir sıcaklıktan sonra dayanımlarını kaybederler. Diğer taraftan, bu güçlendirme tekniğinin yön değiştiren kesit etkilerine maruz kalabilecek deprem bölgelerindeki kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılmaları tercih edilmemelidir [3].



Şekil 4.10 Kirişlerin Çelik Levhalarla Güçlendirilmesi

Kirişlerde kesme kuvvetlerini taşıma kapasitesi yetersizliği sonucu olan eğik çekme çatlakları mesnet yakınlarında olmaktadır. Uygulama yapılmadan önce çatlaklar enjeksiyonla kapatılmalıdır. Bu uygulama çatlakların çatlağın mekanik bağlayıcılarla bir nevi "dikilmesi" işlemidir. Bu dikişler çatlağı kesen çubuklar ve çubukların uçlarının uygun biçimde bağlanması ile oluşur. Bu tür mekanik bağlayıcılar süresiz olduklarından gerilme birikimi yapabilir. Uçlarındaki sıkıştırılmış somunlar dayandıkları yerlerde yerel ezilme ve kırılmalara yol açabilir.

Mekanik bağlayıcılar bağladıkları yüzeyler arasında oluşturdukları sürtünme kuvveti ile aktarımı yaparlar. Mekanik bağlayıcılar ile çatlak yüzeylerine dik yönde bir kuvvet uygulandığı zaman, diğer bir deyişle vidalar sıkıştırıldığı zaman etkili olarak çalışmaya başlarlar! Eğer çatlağın genişleme eğilimi varsa, çatlağa dik yöndeki çubuklarda ek gerilmeler oluşmaya başlar. Çatlak, çubuklarda oluşan ek gerilmelere karşılık olan birim uzama miktarları kadar açılabilir [9].

Kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde aşağıdaki hususlara da dikkat edilmelidir :

Kirişlerin onarımında mevcut bölümün krika ile kaldırılarak üzerindeki yükün alınması, onarılan bölümdeki beton tam dayanıma ulaştıktan sonra krikolar yada destekler kaldırılarak yükün hem eski hem de yeni bölümlere aktarılması sağlanır. Yapılmış çeşitli deneylerde kirişin askıya alınarak yükünün boşaltılmış durumda yapılan onarım ve güçlendirmenin daha yüksek dayanım sağladığı ve yük altında

deformasyonların daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle kiriş onarımında kiriş yükünün boşaltılmasında yarar vardır.

Projelendirme aşamasında, güçlendirilmiş elemanda yeterli eğilme ve kesme mukavemeti sağlanmalı ve hesapla kontrol edilmelidir. Deprem etkilerine maruz çerçevelerde kiriş ve kolonların rijitlik değerlerinin sınırları incelenmeli ve plastik mafsalların kolonlarda değil kirişlerde oluşacağı hususunda emin olunmalıdır [9].

4.1.3 Kolon-Kiriş birleşim bölgelerinin onarım ve güçlendirilmesi

Kiriş-kolon birleşim bölgeleri; depremde en fazla hasar gören, taşıyıcı sistemin en çok zorlanan ve güçlendirilmesi en zor olan kısımlarıdır.

Gerilmelerin yüksek, birleşen elemanların sayısının fazla, güçlendirme parçalarının birleşim, ekleme, ankraj ve sürekliliğinin temini zor olduğundan bu bölgeleri güçlendirmek yoğun dikkat ve çaba ister. Deprem yükleri altında bu bölgede kesme kuvveti dayanımının ve donatı kenetlenmelerinin yeterli olmaması en çok rastlanan hasar türlerini oluşturur.

Ayrıca, büyük şiddetteki depremlerde birleşim bölgesine birleşen kesitlerde meydana gelen plastik mafsallar sonucu büyük dönmeler, donatı aderans çözülmesi sonucu da kaymalar ve geniş çatlaklar oluşabilir. Deprem etkisinde birleşim bölgesinin iki tarafındaki eğilme momentinin farklı işarette olması, kiriş kesitinde zıt gerilme durumları doğmasına yol açar. Bu nedenle donatı kenetlenmelerine ve eklerine özen göstermek gerekir [9].

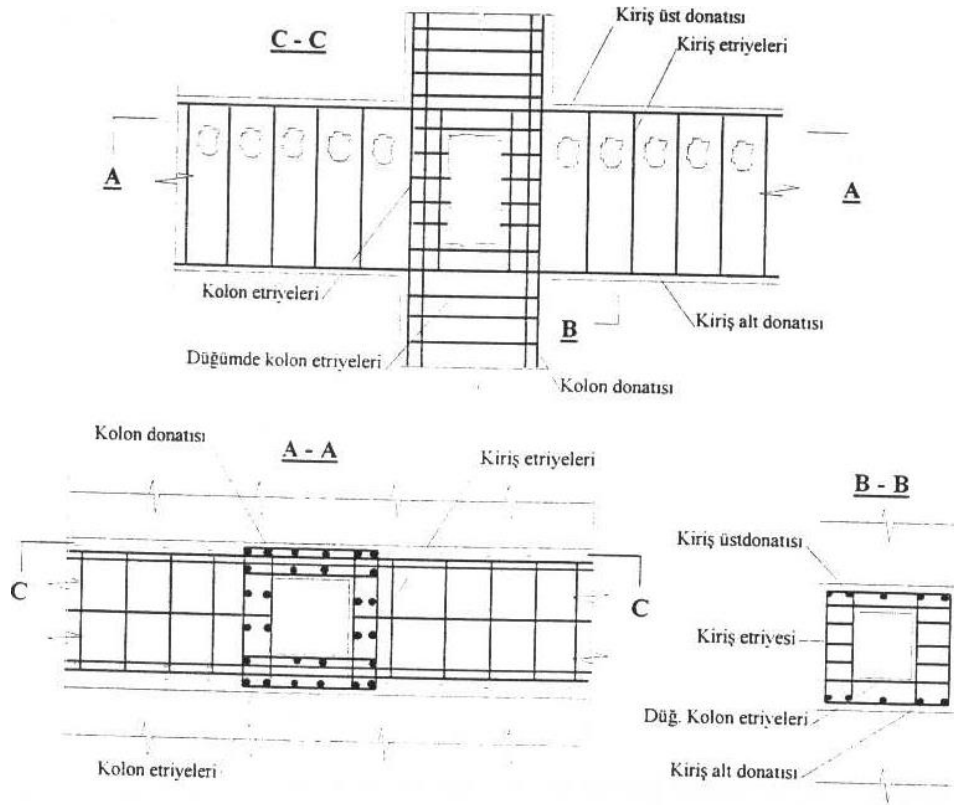
Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin yerel onarımı da kolon ve kirişlerdekine benzer şekilde yapılabilir.

Hafif çatlaklarda epoksi reçinelerin kullanılması uygundur. Bu şekilde donatı ile beton arası aderansın eski düzeye getirilmesi sağlanır. Donatı ile beton arasında çözülmüş aderansın çimento enjeksiyonu ile geri getirilmesi yeterli ve güvenilir değildir. Hasarlı kısmın kaldırılması ve yerine yenisinin konması ise betonun ezilmesi veya donatının kırılması durumunda uygulanır [7].

Kiriş ve kolon birleşimlerinde onarım ve güçlendirme, düğüm noktasında birleşen hem kolon, hem kirişin mantolanması ile yapılır. Yeni donatıların mevcut donatıya kaynaklanabilmesi için beton örtü uzaklaştırılır. Düşey, yatay donatı çubukları ve etriyeler bir iskelet oluşturacak şekilde birbirlerine bağlanmalıdırlar. Burada mantolama yoluyla birleşen elemanların bütünleşmesi sağlanmaktadır. Kısa donatıların kenetlenmesi için kaynak kullanılması ve mevcut ve yeni betonun

bütünleşmesi için beton örtü tabakasının kaldırılması gerekli olabilir. Mantonun rijitliği de yeterli olmalıdır. Düğüm noktasında yeterli bir kesme dayanımı elde etmek için bu bölgede yatay ve düşey etriyeler konmalıdır [1].

Hasarın yerel olması ve çatlaklar şeklinde görülmesi durumunda, kiriş-kolon birleşim bölgesi, çelik şeritler yapıştırılarak ve sarılarak da güçlendirilebilir. Böylelikle eğilme momenti kapasitesi ve süneklik artırılır. Daha çok endüstri tip taşıyıcı sistemlerde kullanılan bu yöntemde, uygulama için bölgede ezilen beton temizlenir, yüzeyler düzeltilir düğüm boyutlarına göre hazırlanmış levhalar beton yüzeye epoksi reçinelerle yapıştırılır. Betonda enine basıncın yeterli şekilde oluşması için şeritlerin geniş (~50 mm uygun genişlik) olması ve birbirlerine yakın (~0,20m uygun aralık) yerleştirilmesi gerekir. Bütün bu işlemlerden sonra, bölgenin sıvanması ve şeritlerin kapatılması gerekir. Dikkat edilmesi gereken en önemli nokta sistemin yangına ve korozyona karşı korunmasıdır [5].



Şekil 4.11 Kolon-Kirişlerin Birleşim Yerlerinin Mantolama İle Güçlendirilmesi

4.1.4 Perdelerin onarım ve güçlendirilmesi

Perdelerinin onarım ve güçlendirmesi, yatay yük taşıma kapasitesinin artırılması veya burulma etkilerine karşı düzensizliklerinin giderilmesi amacıyla yapılır [1].

Hasar görmeleri durumunda, onarım ve güçlendirilmeleri özenle yapılmalıdır. Deprem yükü taşımak üzere düzenlenen betonarme perdelerde hasarlar, kayma ve eğilme taşıma gücünün yetersizliğinden veya büyük boşluklu perdelerde bağ kırışlarının yetersizliğinden kaynaklanabilir [5].

Deprem perdelerindeki çatlaklar epoksi reçineleri ile onarılmaktadırlar. Bir aderans bozulması veya beton kırılması durumunda epoksi reçine enjeksiyonu sonucu deprem perdesinin eğilme ve kesme mukavemeti bir önceki düzeyine getirilebilir. Fakat önceki rijitlik kazanılmaz. Bunun nedeni ince çatlaklarının hepsinin içine epoksi enjekte edilememesidir.

Perdede beton ezilmesi veya donatı burkulması varsa, kolonlarda uygulanan onarım ve güçlendirme yöntemi burada da uygulanır. Hasar derecesine göre hasarlı kısmın temizlenmesi, ek donatı yerleştirilmesi ve bu kısmın betonlanması gerekebilir. Bunun gibi, perdenin düşey yüzeyine çelik şeritler veya lif takviyeli levhalar yapıştırılarak kolay bir onarım ve güçlendirme yapılabilir. Bu işlemten önce çatlakların epoksi enjeksiyonunun yapılması ve yüzeyin temizlenmesi önemlidir [7].

Eğer mevcut perde yetersiz kalırsa; kesme mukavemetini artırmak için gövdeye ilave yapmak (gövdeyi kalınlaştırmak), eğilme mukavemetini artırmak için uçlara ilave yapmak (uç bölgelerinde başlık oluşturmak), her ikisini de artırmak için hem gövdeye hem de uçlara ilave yapmak gerekir [9].

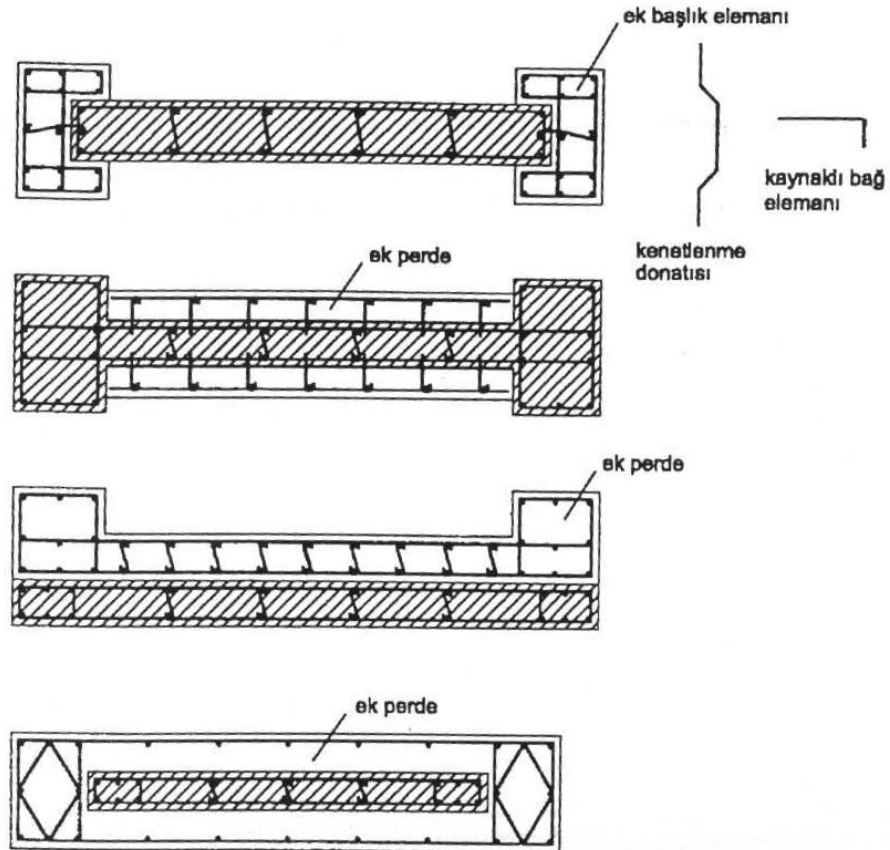
Deprem perdelerinin kalınlıklarının artırılmasında şu hususlara da dikkat edilmelidir:

- Yeni malzemenin mukavemetleri mevcut perdedekilerden az olmamalıdır.
- İlave perde kalınlığı en az 5 cm, ilave başlık kalınlığı en az 10 cm olmalıdır.
- Hem düşey, hem yatay donatının brüt beton alanına oranı 0,0025'ten az olmamalıdır.
- Perde uçlarında toplanmış olan düşey donatının alanı perdeyi kalınlaştırmak için yeni eklenen beton brüt alanının 0,0025 katından az olmamalıdır.
- Perde ucundaki etriyelerin çapı 8 mm den ve o bölgedeki boyuna donatı çapının 1/3 ünden küçük olmamalıdır. Aralıkları ise uçtaki betonarme ilavenin cidar kalınlığından ve ilk iki katta 10 cm diğer katlarda 20 cm değerinden fazla olmamalıdır.

- Mevcut perdenin yüzü tamamen pürüzlendirilmeli ve yeni beton mevcut betona her doğrultuda en çok 60 cm aralıklarla epoksi ile tespit edilmiş kancalı dübeller vasıtasıyla ankre edilmelidir.[9]

Projelendirme yapılırken de aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Güçlendirilecek deprem perdesi, mevcut perde ile yeni ilave kalınlık arasındaki aderansın etkinliğine ve boyutlandırılacak ve donatı hesabı yapılacaktır.
- Kuvvetlerin temellere aktarılması uygun ve yeterli olarak gerçekleştirilmelidir. Bu, projelendirmede ve uygulamada dikkatli çalışmayı gerektirir.
- Güçlendirilmiş perdenin rijitliğindeki artma hesaba katılmalıdır. Çünkü bu artış taşıyıcı sistemde deprem perdeleri arasında öncekinden farklı yeni bir yatay kuvvet dağılımına sebep olur.[9]



Şekil 4.12 Perdelerin Kesit Kalınlaştırarak Güçlendirilmesi

4.1.5 Döşemelerin onarım ve güçlendirilmesi

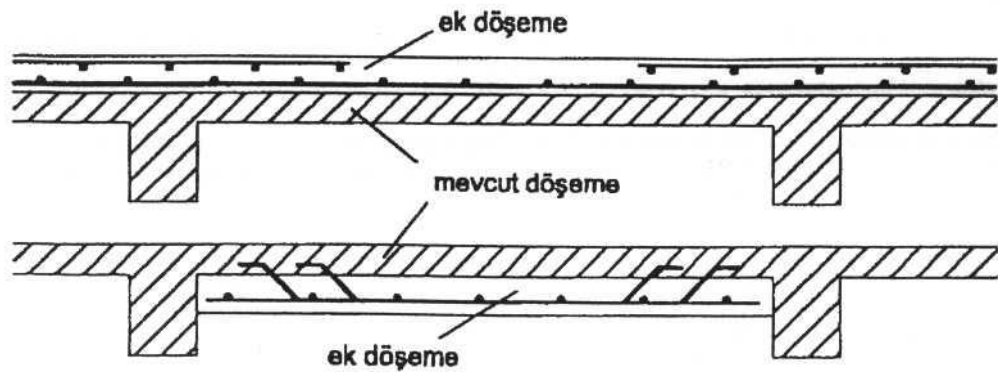
Döşemelerde güçlendirme döşemenin mukavemetinin yetersiz olduğunda veya yeni eklenen deprem perdelerinin birleşim bölgelerinde mukavemetinin artırılması gerektiğinde yapılır. Hasarlar genellikle düzensizlik yerlerinde, doğrudan perdeye mesnetlendiği yerlerde, boşluklarda ve merdiven sahanlıklarında oluşur [1].

Yerel çatlak veya hasarların onarımında epoksi, çimento şerbeti veya püskürtme beton kullanılabilir. Parçalanmış beton veya kırılmış, burkulmuş donatının olduğu yerlerde hasarlı kısım kaldırılarak, yerine yenisi konur. Yeni donatı ile mevcut donatının ankraji sağlanmalıdır.

Döşemelerin güçlendirilmesi döşemelerin kalınlıklarının artırılması ile yapılır. Bu kalınlaştırma ilave döşemenin, mevcut döşeme üstüne veya altına eklenmesi ile olur. Üstüne eklenme durumunda faydalı yüksekliğin artmasının yanı sıra mesnetlerde negatif moment için donatı ilave etme imkanı doğar. Kalınlaştırma mevcut döşemenin üstüne doğru yapıldığında döşeme rijitliği artmakta ve diyafram özelliği iyileşmektedir.

Kalınlaştırmanın alta doğru yapıldığı durumlarda, yerleştirilen çekme donatılan döşemenin eğilme mukavemetini artırır. Fakat betonun püskürtme yöntemi ile uygulanması gerekmektedir. Kum danelerini epoksi reçineleri ile yapıştırmak suretiyle veya kum püskürterek pürüzlü bir yüzey oluşturulur.

Döşeme-deprem perdesi birleşimlerinin güçlendirilmesi için dübeller kullanılır. Bunun için döşeme içinde deprem perdesini dikine delip geçen ve bu doğrultuda uzun delik açılır. Deprem perdesi içinden döşeme düzlemi içinde olmak üzere donatı çubukları alt ve üst yüze yakın olmak üzere gerekli ölçülerde yerleştirilir. Son olarak delik yüksek mukavemetli ve genişlen betonla doldurulur [2].



Şekil 4.13 Döşemelerin Kalınlaştırılarak Güçlendirilmesi

4.2 Betonarme Yapının Güçlendirilmesi

4.2.1 Yeni kolon veya perde eklenmesi

Mevcut binaya yeni yapısal elemanlar eklemek yapıların sismik direncini arttırmada en etkili yöntemdir. Binayı depreme karşı güçlendirmede yeni ve eski elemanların uyum ve birleşimi önemlidir.

Yapının yanal rijitliği çok yetersizse, kolon ve kirişlerin uç bölgeleri sık etriye ile sarılmamışsa bu elemanların onarım ve güçlendirilmesi pratik ve ekonomik olmaz. Bu gibi durumlarda sistemin yatay yük taşıma kapasitesi yeni taşıyıcı elemanlar eklemek suretiyle artırılabilir. İlave elemanlar, uygun bir projelendirme ile deprem yüklerinin büyük bir kısmını karşılayarak mevcut sistemin yükünü önemli derecede azaltırlar.

Deprem yüklerinin tamamını karşılayacak şekilde ilave eleman koymak da mümkündür. Yapının taşıyıcı sistemine, planına ve hasar durumuna bağlı olarak ilave elemanların tip, sayı ve boyutları seçilebilir. Yatay yükler için rijitlikleri eski yapınıniki ile yaklaşık aynı mertebeden olan elemanlar ilave edilebileceği gibi rijitliği eski elemanlara göre çok yüksek olan deprem perdeleri de ilave edilebilir. Mevcut yapıya yeni taşıyıcı elemanların ilave edilmesi tüm sistemin deprem davranışı değiştirir. Güçlendirme için öngörülen yeni elemanlarla sistemin rijitliği arttırılacağı için genellikle deprem kuvvetleri de artar ve etkiler sistemde değişik bir dağılımla ortaya çıkar. İlave elemanların yapı içinde üniform ve uygun şekilde dağıtılmalarıyla etkilerin belirli bir bölgede yığılması ve istenmeyen burulma etkilerinin oluşması önlenmiş olur [4].

Betonarme yapıların yatay yüklere karşı dayanımlarını arttırmak için değişik güçlendirme yöntemleri mevcuttur. Bunlar içinde en uygun ve tavsiye edilen çözüm, yapıya perde duvar ilave edilmesidir.

Yeni deprem perdelerinin eklenmesi sırasında döşeme ve çatı diyaframları ile temellere uygun bir birleşim ve bağlarının temin edilmesine önem gösterilmelidir. Döşeme ile perde arasında kesme kuvvetinin aktarımı, planda köşegenel olarak yerleştirilmiş bağ çubuklarının döşemeye ankre edilmesiyle sağlanır. Uygulamada yerinde dökme beton veya püskürtme beton kullanılabilir.

Perdelerin yerleri, deprem yükleri altında ek burulma momenti meydana getirmeyecek, kütle ve rijitlik merkezlerini mümkün olduğunca birbirine yaklaştıracak şekilde seçilmelidir. İlave perdelerin yerleri, mevcut perde ve kolon düzeni dikkate

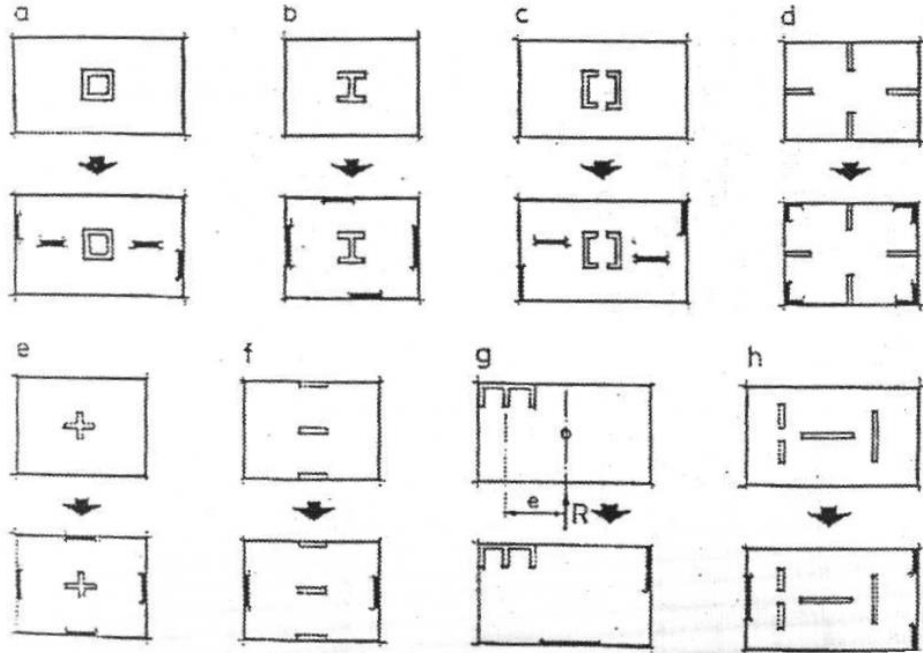
alınarak belirlenmelidir. İki kolon arasında olması tercih edilmekle beraber bazı durumlarda kolona bir taraftan birleşmesi de kabul edilebilir.

Dış betonarme perdeler :

Bina dışına yerleştirilen perdeler, iç hacimleri bozmayacağından mimari açıdan tercih edilir. Pencere yüzünden dolu perde yapmak zor olduğundan ancak boşluklu perde yapılabilir. Dolu perdelere oranla daha sünek olmalarına karşın inşası ve donatı detayları daha fazla özen ister. Mevcut kolon ve kirişlerle bağlantılarının yapılarak sistemin bütünleşmesi sağlanmalıdır. Komşu kolonların mantolanarak perde ile birleştirilmesi tavsiye edilir. Yeni perdenin temeli mevcut temeller kullanılarak veya yeni temel eklenerek oluşturulabilir.

İç betonarme perdeler :

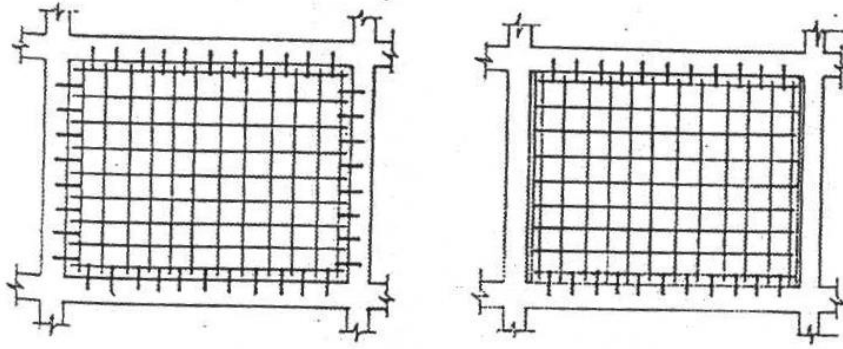
Binanın iç kısımlarında bulunurlar. Sistemle bütünleşmesi bakımından dış betonarme perdelerde olduğu gibi iki yandaki kolonların mantolanarak perde ile birleştirilmesi tavsiye olunur. Kapı ve pencere boşluğu bulunması durumunda perde bir uçtan komşu kolona bağlanırken diğer taraftan perde için bir uç bölgesi oluşturulur. Kat döşemelerinin perde hizasındaki kısımları delinerek başlık donatılarının sürekliliği sağlanır. Perdenin bir ucu kolonu dört taraftan mantolayarak bağlanmıyor, sadece kolonun bir kenarı ile birleşiyorsa kolon ile perde arasındaki bütünleşmeyi kolon yüzeylerine belli aralıklarla yerleştirilecek bağ (dikiş) donatıları ile sağlamak mümkün olur.



Şekil 4.14 İlave Perdelerle Güçlendirme Yapılması

4.2.2 Çerçeve boşluklarının donatılı duvarlarla doldurulması

Betonarme yapının çerçeve gözlerini donatılı beton veya kagir duvarla doldurma yoluyla uygulanan bir yöntemdir. Kolonlar büyük kesme kuvvetlerini taşımak zorunda kalırlar. Bu nedenle çerçeve elemanlarının ilave gelecek kuvvetleri taşıyabilecek kapasitede olmaları gerekir. Mevcut kirişlerde çentikler açılarak, dişler oluşturulur. Köşegenel ankraj çubukları ve etriyeler, mevcut donatı ve etriyelere kaynaklanmalıdır. Yerinde dökme perde duvarların donatılan hem kirişlerde hem de kolonlarda ankraj edilebileceği gibi yalnızca kirişlere bağlantılı yapıp perde duvar ile kolon arasında derz bırakılabilir [1].

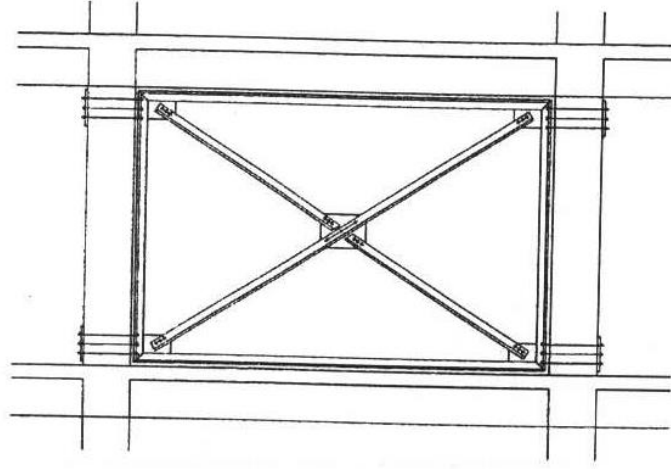


Şekil 4.15 Dolgu Duvarların donatılı betonla güçlendirilmesi

4.2.3 Çelik diyagonal elemanlar yerleştirilmesi

Betonarme yapılara perde duvar konulması yapının ağırlığını artırır. Bunun sonucunda yapıya etki eden yatay deprem yükleri de artar. Yapıya gelen deprem yüklerinin etkisini azaltmak, yapının ağırlığını arttırmadan rijitliğini ve sünekliğini arttırmak amacıyla, çerçeve boşlukları arasına çelik çerçeveler ya da diyagonal elemanlar da konulabilir. Bu tip güçlendirme diğer yöntemlere göre daha az işçilik gerektiren, daha kolay ve çabuk bir güçlendirme şeklidir. Çerçevenin betonarme kolonlara özel bir biçimde bağlanması gerekir. Şekilde görüldüğü gibi çelik diyagonal elemanlar birbirlerine ve kolonlara bulonla bağlanabilirler. Ancak bulonlu bağlantı yerine kaynakla bağlantı da tercih edilebilir. Fakat bulonlu bağlantı yapılarak daha iyi bir sıkıştırma sağlanır. Bulonlu bağlantı, kolonun dış yüzeyine yapılabileceği gibi,

betonarme kolon delinerek, içinden geçirmek suretiyle de bağlantı yapılabilir. elik ereveler ve diyagonal elemanlar, betonarme perde duvarlara göre yatay kuvvet taşıma gücü bakımından daha gcszdrlr. Maliyetleri oldukça yüksektir. Ancak diyagonalı elik çerçevelerin pencere ya da kapı boşluları kapatılmadan yerleştirilebilme özellikleri vardır. İstenildiği şekilde yerleştirilerek konulabilir. Deprem sonrasında acil olarak yapıların hasarlı bölümlerinin desteğe alınması amacıyla da kullanıldığı yerler vardır [2].



şekil 4.16 elik Diyagonallerle Betonarme Sistemin Güçlendirilmesi

5. LİFLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLİMERLER (FRP'LER)

5.1 Tanım

Deprem bölgesindeki ülkelerde birçok betonarme yapıda düşük kalitede beton kullanımı ve elverişsiz yapılanma vardır. Bu gibi durumlarda sismik performansı sağlamak için aksenal kapasiteyi ve dikey yapısal elemanların dayanımını artırmak gerekir. Ayrıca betonarme yapılarda çelik donatının korozyona uğraması istenmeyen bir durumdur. Çelik yerine paslanmayan bir malzeme kullanmak her zaman aranmış ve tartışılmıştır [11].

Lifle güçlendirilmiş polimerler (FRP) çoğu kişi tarafından kompozit olarak adlandırılır. Kompozit kelimesi Latince *componere* kelimesinden türemiştir ve birleştirmek anlamına gelmektedir. Kompozit aralarında ayırt edici özellikleri olan iki veya daha fazla farklı parçadan oluşmuş bir malzemedir [12].

Lifli kompozitler 1960'lı yıllardan beri kullanımdadır. Bu teknolojinin kullanım alanı oldukça geniştir. Birçok eski betonarme yapıda aşınma ve çelik donatılarında korozyon görülmektedir. Genellikle bu yapıları yıkıp tekrar yapmak yerine güçlendirmek daha ucuzdur. Aynı şekilde kullanım amacı değişmiş ve daha fazla yüke maruz kalan yapılar için de geçerlidir. Depremle ilgili her yeni araştırma ve buluş yeni güçlendirme yöntemleri araştırmaya neden olur.

Kullanılan diğer yöntemlerde malzeme ve eleman eklemesi yapıldığı için yapıda alan daralması oluşur. FRP sistemler bunlara göre daha uygundur. Bir kirişin altına uygulanan tek sıra FRP o kirişin esneme kapasitesini %35 artırır. Aynı artırmayı elde etmek için çok fazla çelik levhaya veya kalın bir mantolamaya gerek vardır ve bu yöntemleri kullanabilmek için birçok adama ve zamana ihtiyaç vardır [13].

Tablo 5.1 FRP'lerin diğer güçlendirme yöntemleriyle karşılaştırılması

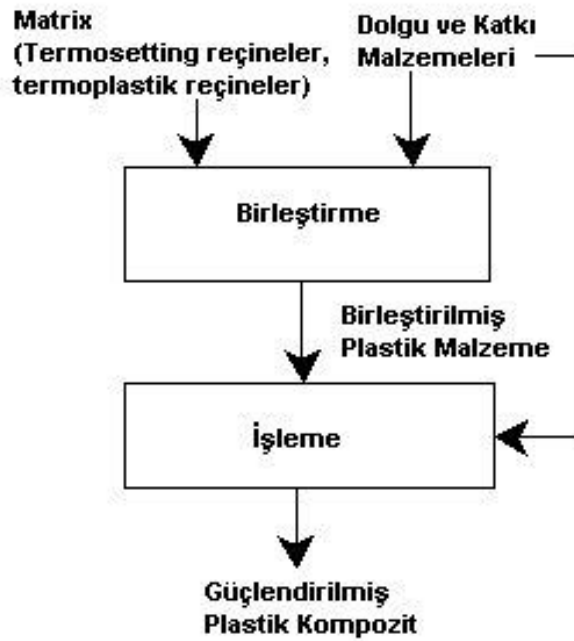
	FRP	Malzeme Ekleme	Ard-Germe
Deneyim	+	++	++
Çevre	+	0	+
Durabilite	+	++	-
Esneklik	++	+	0
Üretim metodları	+	++	++

++ çok iyi derece, + iyi derece, 0 normal derece, - kötü derece [12]

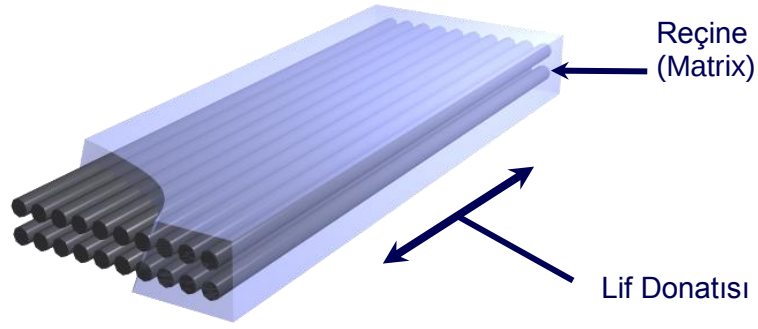
5.2 Kompozitler

Kompozitler reçineler (matriksler), güçlendirme elemanları, dolgu malzemeleri ve katkı malzemelerinden oluşurlar. Bu bileşenlerin her biri işlem sırasında ve oluşacak ürünün göstereceği performansta çok önemli roller oynar. Reçine veya polimer, kompoziti bir arada tutan ve oluşacak ürünün fiziksel özelliklerini etkileyen bir “yapıştırıcı” görevi görür. Güçlendirme elemanı mekanik dayanımı sağlar. Dolgu ve katkı malzemeleri ürünün değişik özellikler kazanması için işleme veya performansa yardımcı olarak kullanılır [20].

Güçlendirilmiş plastik kompozitlerin en temel üretim şekli birleştirmek ve işlemektir. Matriksler ve güçlendirme malzemeleri, reçine gereksinimini azaltan dolgu malzemeleri ve istenilen kompozitin fiziksel özelliklerini değiştiren katkı malzemeleri ile birleştirilir [21].



Şekil 5.1 Kompozit Malzemelerin Üretim Şeması



Şekil 5.2 Karbon Lifli Kompozit Malzeme

5.2.1 Kompozit Malzemeleri

5.2.1.1 Matrisler

Liflerin etrafını saran ve lifleri bir arada tutan malzemelerdir. Matrisin ana görevi gerilmeleri liflere aktarmaktır. Bunun dışında lifleri dış etkenlerden (nem, kimyasallar ve oksitlenme gibi) korur, lif yüzeylerin birbirine çarparak veya dış etkilerle hasar görmesini engeller, çünkü cam ve karbon lifleri yüzey çentiklerine karşı duyarlı malzemelerdir [14].

Reçineler termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır. Termoplastik reçineler ısıtıldığı zaman yumuşar, ısıtılıp yarı akışkan hale geldiğinde şekillendirilebilir, soğuduğu zamanda rijit hale gelir. Diğer yandan termoset reçineler ilk hallerinde çoğunlukla sıvı halde veya düşük erime noktalı katı halde bulunur. Termosetting reçineler kullanıldığı zaman kürlenmesi için bir katalizatör, ısı veya ikisinin birleşimi kullanılır. Bir kere kürlendiği zaman termoset reçineler tekrar orijinal sıvı hallerine geri dönemezler. Kürlenmiş termosetler ısıtıldığı zaman erimezler fakat yumuşar ve sertliklerini kaybederler ve bir kere form aldıklarında tekrar şekil değiştiremezler. Kürlenmiş reçinenin yumuşaklığını ölçmek için ısı bozulma sıcaklığı (Heat distortion temperature-HDT) ve cam geçiş sıcaklığı (Glass Transition-Tg) kullanılır. İki test metodu (HDT ve Tg) kürlenmiş reçinenin yük altında yumuşayarak akacağı yaklaşık sıcaklığı ölçer [20].

Kompozitin sürekli ortamını oluşturan matrisin malzemesi genellikle bir termoset plastiktir. Bazı ürünlerde termoplastik polimerler de kullanılmaktadır. Ancak

termosetlerin düşük sıcaklıklarda sıvı halde, düşük viskozite ile çalışmaya olanak vermesi bir tercih nedenidir, çünkü matriks malzemesinin lifleri ıslatması iyi bir aderans elde edilmesini sağlar.

1- Termoset Reçineler

Matriks malzemesi olarak doymamış poliestерler (ortoftalik, izoftalik polyesterler, vinil esterler, klorendikler) ve özellikle epoksi reçineleri kullanılmaktadır. Epoksi reçineleri arasında yaygın olarak DGEBA (Di Gliserid Eter Bisfenol A) ilkel maddesi ve karşılıklı bağ oluşturan DETA (Di Etilen Tri Amin) kür maddesi tercih edilmektedir. Epoksilerin sertleştiricileri poliamin, poliamit ve poliasit anhidriti olur. DETA amin kökenli olduğundan, sertleştirici fonksiyonu da görür. Epoksi reçinelerin polyesterlere oranla 3 kata yakın daha pahalı olduğu da söylenebilir [16].

Tablo 5.2 Polyester ve epoksinin fiziksel özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Çekme dayanımı (Mpa)	Çekme Modülü (Gpa)	Kopma Gerilmesi (%)
Polyester	1000-1450	20-100	2,1-4,1	1,0-6,5
Epoksi	1100-1300	55-130	2,5-4,1	1,5-9,0

a) Doymamış Polyester Reçineler

Polimerik reçine malzemeleri arasında en yaygın kullanılanı polyesterlerdir. Polyesterlerin en büyük avantajı oda sıcaklığında kür alabilmesidir. Bu özelliği sayesinde fırında kürlenmesi mümkün olmayan büyük ve karmaşık yapılara uygulanabilir. Genellikle stiren içinde erimiş, oldukça düşük moleküler ağırlığa sahip doymamış polyesterlerden oluşur. Kürlenme stiren 'in polyesterdeki doymamış bölümleriyle, çapraz bağlar oluşturarak polimerleşmesinden meydana gelir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise kürlenme reaksiyonunun ekzotermik olmasıdır, aşırı ısı oluşması durumunda işlem oranları etkilenebilir ve bunun sonucunda son laminat zarar görebilir [17].

Bu sistemlerin yaygın olarak kullanılmaya başlamasından sonra spesifik özelliklere sahip çeşitli reçineler üretilmiştir. Bunlar arasında en önemlileri kimyasal etkilere dayanımı olanlardır.

b) Epoksi Reçineler

Gelişmiş yapısal uygulamalarda en çok kullanılan reçinelerdir. Genellikle epoksi reçinesi ve, amin veya anhidritten oluşan bir sertleştirici ile beraber kullanılan iki parçalı sistemlerdir. Yüksek performanslı epoksilere, en iyi özelliklerini gösterebilmeleri için kürlenme sırasında ısı uygulanır. Polyesterlere oranla epoksiler oda sıcaklığında daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler ve daha yüksek performans verirler [17].

Tablo 5.3 Polyester ve epoksinin mekanik özellikleri

Özellik	Polyester	Epoksi
Sertlik	M70 - M115	M100 - M110
Darbe Dayanımı (Izod J/m)	16-32	8-80
Isı İletkenliği (W/m/K)	-	0.17-0.21
Özgül Isısı (kJ/kg/°C)	-	1.25-1.80
Ses Geçirmezliği (Ohm cm)	10^{15}	10^{17}
Yalıtkanlık sabiti (@60 Hz)	3.0 - 4.4	2.5-4.5
Esneme Dayanımı (MPa)	60-160	125

c) Fenolik Reçineler

Fenolikler kendilerine özgü yangına dayanım özelliğinden dolayı yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Ve bu kullanım sırasında, her ne kadar alevin yayılmasını engellese de, duman oluşumunu artıran dolgu malzemesine gerek kalmaz. İki tane önemli dezavantajı vardır. Bunlar, düşük dayanımı ve kürlenme reaksiyonu sırasında suya gereksinimidir. Eğer kompozit malzemenin, arkasında kalırsa bu problem yaratabilir. Çünkü herhangi bir yangında buhar oluşabilir ve malzemenin ana yapısı bozulur [17].

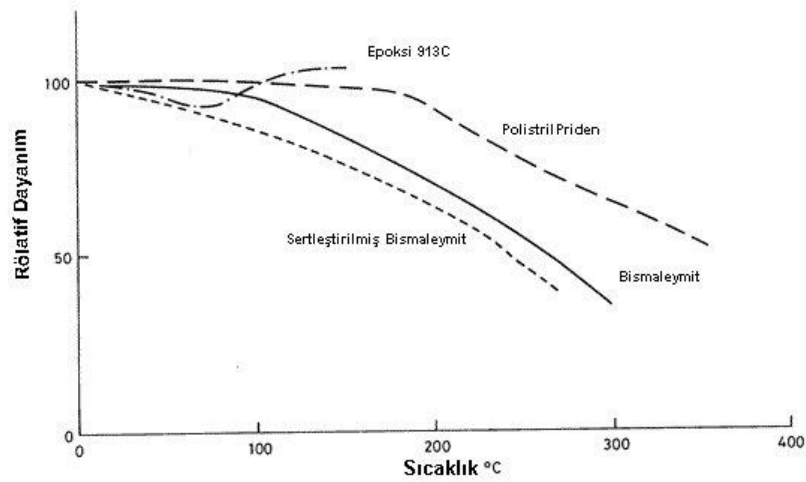
Tablo 5.4 FRP’lerde kullanılan Termoset reçinelerin kimyasal yapısı

Polymer	Yapısı
Polyester	$\left[R - O - \underset{\text{O}}{\underset{ }{C}} - CH = CH - \underset{\text{O}}{\underset{ }{C}} - O \right]$
Vinyl Ester	$\left[-CH_2 - \overset{\text{O}}{\underset{ }{C}} - CH_2 - O - \overset{\text{R}'}{\underset{ }{C}} = CH_2 \right]$
Epoxy	$R \left[CH_2 - \overset{\text{O}}{\underset{ }{C}} - CH_2 \right]$
Phenolic	$\left[\text{C}_6\text{H}_4 - \text{CH}_2 - \text{C}_6\text{H}_3(\text{OH}) \right]$

d) Yüksek Sıcaklıktaki Termosetting Reçineler

Kompozit malzemeleri yüksek sıcaklıklarda da iyi performansa kullanabilmek için organik matrikslerde geliştirme yapılmıştır. 200°C civarında çalışma kapasitesine sahip çeşitli örnekler vardır. Bunlar; çok yönlü epoksiler, polimitler, bismaleymitler, polistril piridenler, PMR (monomerik tepki vericilerle polimerleşme)

Birçok epoksi reçine sistemleri normal kullanımda 100-120°C sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlar. Yüksek sıcaklık uygulamaları çoğunlukla epoksi novolac' a veya viskoziteyi ve dayanımı kontrol için yapılmış bazı eklentilerle tetrafunctional reçineye dayanır. Polimitler polimer ailesindendir ve hazır bir polimer sistemine eklendiğinde en iyi yüksek ısıda çalışma olanağı sağlarlar (~300°C). Fakat pahalıdır ve kürlendikten sonra mikro çatlaklar oluşmasına elverişli hale gelirler. Bismaleymitlerde termosetting reçinelerin başka bir çeşididir, polimitlere göre daha karmaşık kimyasal yapıları vardır. Bu sistemlerin epoksilere göre yüksek sıcaklıklarda çalışma koşulları daha iyidir, fakat kürlenmiş reçineleri daha gevrekler. [17]



Şekil 5.3 Reçinelerin Yüksek sıcaklık altındaki rölatif dayanımları

2- Termoplastik Matriksler

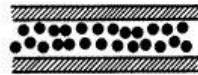
Termoplastik reçine sistemlerin termosetlerle arasında temel farklılıklar vardır. Ters çevrilebilen çapraz bağlantı reaksiyonları yapmazlar. Fakat buna rağmen ısı ve basınç uygulandığı zaman erir ve akarlar.

Polymer	Glass Transition Temp. °C	Structure
Poly (Phenylene Sulphide)	85	
Poly (Ether Ether Ketone)	143	
Poly (Ether Ketone)	165	
Poly (Sulphone)	190	
Poly (Ether Imide)	216	
Poly (Phenyl Sulphone)	220	
Poly (Ether Sulphone)	230	
Poly (Amide Imide)	249-288	
Poly (Imide)	256	

Tablo 5.5 FRP'lerde kullanılan Termoplastik reçinelerin kimyasal yapısı

Termoplastiklerin termosetlere göre çeşitli avantajları vardır. Bunlar; dayanımının iyi olması, daha uzun raf ömrü olması ve işlemler sırasında sadece fiziksel değişimlere gerek olmasıdır. Kimyasal işlemle olmadığı için kürlenmeyi uzatmaya gerek olmaz. Sonuç olarak basit, kaliteli bir kontrol altında daha çabuk ve ucuz üretim sağlanabilir. Sonradan yapılan işlemlerle malzemeye esneklik kazandırmak da mümkündür. Fakat burada işlem için, gereken sıcaklığın fazla olması ve kompleks şekiller elde etmek için kullanılacak aletlerin pahalı olması gibi zorluklar ortaya çıkar. Termoplastiklerin bir avantajı da yüksek sıcaklıklarda iyi performans göstermesidir [17].

Film Sarma



Toz Kaplama



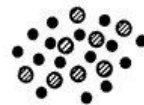
Çeperli Toz Kaplama



Dokuma



Hibritasyon



Şekil 5.4 Termoplastik matris malzemelerin çeşitli formları

5.2.1.2 Donatılar (Güçlendirme elemanları)

Donatıların en önemli amacı lif boyunca yük taşıyarak tek yönde dayanımı ve rijitliği sağlamaktır. Donatıları yük yönünde yerleştirilerek kompozitin özelliklerini artırır. Güçlendirme elemanları doğal yada el yapımı olabilir. Örnek olarak ahşaptaki selüloz doğal güçlendirme elemanı olarak sayılabilir. Kompozit güçlendirme elemanları olarak karbon, cam, aramid, UHMW(ultra yüksek molekül ağırlıklı) polietilen, polipropilen, polyester ve naylon sayılır. Kompozitin ilk üretilme aşamalarında güçlendirme elemanı olarak tekstil ve kumaş da kullanılmıştır.

Donatılar, geniş bir işlem kapasitesine ve istenilen son ürünün türüne göre çeşitli formlarda bulunabilirler. Donatı olarak kullanılan malzemeler serbest lifler, öğütülmüş lifler, tiftiklenmiş teller, sürekli veya ayrılmış hasırlar şeklinde olabilir. Ürün isteğine ve üretim şekline göre güçlendirme elemanı şekillendirilir.

a) Çok sonlu ve tek sonlu serbest lifler

Serbest lifler genelde termoset bileşiklerde kullanılır ama termoplastiklerle de kullanılabilir. Çok sonlu serbest lifler birçok tekli telden ya da iplik (filament) demetlerinden oluşur, bunlar daha sonra rasgele reçine matrisle birleştirilir. Çok sonlu serbest lifler kalıp yönteminde, filament (iplik) sarma da ve pultrüsyon yöntemlerinde kullanılırlar. Tek sonlu serbest liflerde birçok ayrı filamentin tek bir tel oluşturmak için sarılmasından meydana gelir. Genelde tek yönlü güçlendirme isteyen filament sarma ve pultrüsyon yöntemlerinde kullanılır.

b) Hasırlar

Güçlendirme hasırları genelde birim alandaki ağırlığına göre nitelendirilir. Hasırı bir arada tutan bağlayıcının türü ve miktarı hasır ürünler arasındaki farkları belirler. Elle sarma gibi yöntemlerde bağlayıcının çözünmesi daha uygundur. Diğer işlemlerde özellikle basınçla kalıplamada bağlayıcı kalıplama sırasında hidrolik kuvvetlere ve matris reçinenin çözünme işlemine dayanmalıdır.

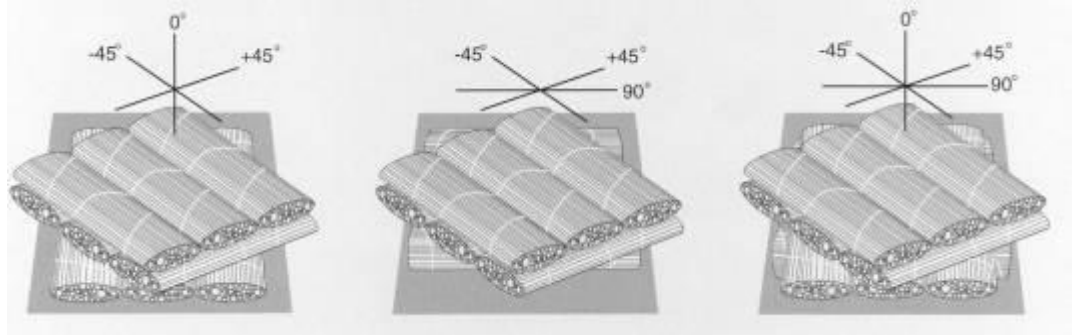
c) Dokunmuş, dikilmiş ve örülmüş bezler (fabrics)

Kompozitteki reçineleri güçlendirmek için çok çeşitli bezler kullanılır. Çok yönlü donatılar sürekli liflerin dokunarak, örülerek ya da dikilerek bez haline gelmesinden oluşur. Bezler neredeyse bütün liflerin işlenmesinden oluşabilir. En çok kullanılanlar karbon, cam ve aramiddir. Bezler 0,025 mm. ile 1 cm arasında değişen kalınlıklarda ve farklı dokumalarda bulunabilirler.

Bezler genellikle 20-250 m. Uzunluğunda ve 2,5-300 cm. genişliğinde alınabilir. Düzgün tasarımlanırsa reçine uygulandığında çabuk ıslanabilir ve reçineyle adhezyonu sağlanır.

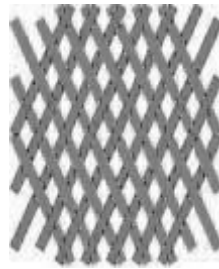
Dokunmuş bezler çeşitli ağırlıklarda, dikimlerde ve genişliklerde dokuma tezgâhlarında üretilir. Dokuma sisteminde lifler birbirlerinin altından ve üstünden geçirilerek dokunur.

Dikilmiş bezler, dokunmamış bezler olarak da adlandırılır. Lif mimarisinden dolayı çok iyi dayanım özelliklerine sahiptir. Dokunmuş bezlerde iki set birbirine dolanmış sürekli lifler 0° veya 90° yönlü desenlenir ve burada lifler düz değil dalgalı hale gelir. Dikilmiş bezlerde ise düzgün hizalı liflerle derlenmiş katmanlar elde edilir. Lif desenlerinin yönü $0^\circ, 90^\circ$ ve 45° olabilir. Derlenmiş bu katmanlar daha sonra birbirlerine dikilir. Bu tip birleştirme yüklerin lifler arasında paylaşılmasını sağlar; böylece yüksek çekme ve esneme modülü elde edilir. Bu lif yerleşimi kompozit üretilirken en uygun reçine akışı oluşmasını sağlar.

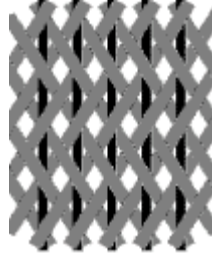


Şekil 5.5 Dikilmiş üç eksenli ve dört eksenli bezler

Örülmüş bezlerde iki veya daha fazla lif optimum yük dağılımı için birbirlerine çok iyi dolanır. İki eksenli örgülerde iki eksen yönündeki güçlendirme sadece lifler arasındaki açılar 15° ve 95° arasında değişirse oluşur. Üç eksenli örgülerde güçlendirme iki eksenin lifleri arasındaki açı 10° ile 80° arasındaysa ve diğeri 0° ise oluşur [20].



Şekil 5.6 İki eksenli Örülmüş Bez



Şekil 5.7 Üç eksenli Örülmüş bez

5.2.1.3 Dolgu malzemeleri

Kompozitlerde inorganik dolgu malzemelerinin kullanımı artmıştır. Dolgu malzemeleri; sadece kompozitlerin fiyatının düşürmekle kalmayıp, güçlendirme ve reçine bileşenlerinin yalnız başına ortaya koyamayacağı performans artışları sağlar. Dolgu malzemeleri kompozit laminatlardaki organik bileşen oranını azaltarak ateş ve duman gibi mekanik özellik dayanımlarını artırır. Önemli özellikleri su geçirimsizliği, yüzey pürüzsüzlüğü, rijitliği, boyutsal stabilitesi ve sıcaklık dayanımı gibi özellikler dolguların düzgün kullanımı ile artar.

Kompozit sanayisinin termosetting reçine kullanan bölümü katkıların avantajlarını yıllarca kullanmıştır. Termoplastik sanayi de son zamanlarda inorganik dolgu malzemesi kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Dolgu malzemesi Çeşitleri

Kompozitlerle beraber kullanılan çok sayıda inorganik dolgu malzemesi vardır.

- Kalsiyum Karbonat: En yaygın kullanılan inorganik dolgudur. Düşük maliyetlerde ve çeşitli boyutlarda bulmak mümkündür. En çok kullanılan kalsiyum karbonat katkı malzemeleri kireç taşı ve mermerden elde edilir.
- Kaolin (Hidro-alüminyum silikat) : İkinci olarak en çok kullanılan dolgu malzemesidir. Sanayide en çok kullanılan ismi “kil”dir. Madenden çıkarılan killer flotasyon veya yıkama yöntemiyle temizlenir ve kompozit kullanımı için uygun hale getirilir. Çok yaygın miktarda parça büyüklükleri bulunabilir.
- Alümin trihidrat: Çok gelişmiş ateş ve duman dayanımı istenildiğinde kullanılır. Yüksek ısıya maruz kaldığında dışarıya su verir (hidrotasyon), böylece alevin yayılmasını ve dumanın artmasını engeller. Kompozit tesisat uygulamalarında (banyo küveti, duş ve bunun gibi bina ürünleri) bu sebepten dolayı genellikle alümin trihidrat kullanılır.

- Kalsiyum sülfat: Ateş ve duman geciktirici esas katkı malzemesidir. Çok az su hidrotasyona uğrar ve su düşük sıcaklıklarda ortaya çıkar. Düşük maliyetli dolgu malzemesidir [20].

Diğer çok kullanılan dolgu malzemeleri; Mika, Feldspat, Silika, Talk, Öğütülmüş Cam Lifleri, Cam mikrosferdir.

Tablo 5.6 Dolgu malzemelerinin Dünyada kullanılan miktarları [21]

Ürün	Miktar (10 ³ ton)
İnorganikler	
Mineraller	
Kalsiyum karbonat	1.450
Kaolin	84
Talk	66
Mika	15
Diğer mineraller	205
Diğer İnorganikler	
Cam küreler	10
Doğal	90
TOPLAM	1.920

Dolguların Kompozitlerle beraber kullanılması

İnorganik dolgular kompozit laminatlarda kullanıldıkları zaman ağırlıkça %40–65 oranında etki eder. Betondaki silika dumanı gibi işlev görürler. Reçine ve güçlendirme elemanlarına göre maliyetleri çok düşüktür.

- Kompozit bölümlerin büzülmesi azaltır.
- Laminatların yangına dayanımını artırır.
- Dolgular kompozitin maliyetini, pahalı reçineyi seyrelterek ve gerekli güçlendirme elemanı miktarını azaltarak düşürürler.
- Kompozitlerin mekanik dayanımlarını etkilerler.
- Kompozit laminatın bileşenleri arasında (güçlendirme elemanı ve reçine) arasındaki gerilmelerin dağılımını sağlar.
- Laminatın üniformluğu katkıların efektif kullanımı ile geliştirilir.

- Dolgulu reçine sistemlerinde çatlaktan korunma ve çatlak dayanımı özellikleri artar.
- Düşük yoğunluklu Dolgular genellikle denizcilik ve nakliyat sektöründe kullanılır. Ağırlığı artırmadan ve performansını kaybettirmeden çok düşük maliyetlerde elde edilebilir [20].

5.2.1.4 Katkı malzemeleri

Malzeme özelliklerini ve performanslarını artırmak için kompozitlerde çok çeşitli katkı malzemeleri kullanılır. Her ne kadar reçinelere, güçlendirme elemanlarına ve dolgu malzemelerine kıyasla çok az miktarda kullanılsalar da hava geçirimi, renk, yangına dayanım, kayganlık, hızlı kurlenme, yüzey pürüzsüzlüğü ve ısı iletkenliği gibi önemli özellikleri vardır [21].

Düşük Büzölme: yüzeyi pürüzsüz parçalar el edilmek istendiğinde reçine büzülmesini ayarlayan katkıları reçineye eklenebilir.

Yangına dayanım: Yanma dayanımı doğru reçine seçimi, dolgu malzemesi kullanımı veya alev geciktirici katkıları sayesinde artırılabilir. Bu malzemeler bromin, klorin, borat ve fosfor içerir.

Hava geçirimi: İşleme ve uygulama sırasında ince katmanlı reçineler, jel kaplamalar ve diğer polyester reçineler havayı hapsedebilirler. Bu hava boşlukları oluşmasına ve liflerin tam olarak ıslanmamasına neden olur. Hava geçiren bu katkıları havanın hapsolmasını engeller ve liflerin tamamen ıslanmasını sağlar.

Emisyon kontrolü: Açık kalıp uygulamalarında düşük emisyonlarda hava kalitesi sağlamak için stirenler kullanılır.

Viskozite kontrolü: Birçok kompozit türünde düşük, çalışılacak viskozite elde etmek zordur. Bu tip sistemlerde düşük viskozite, katkı maddelerini ıslatarak ve dağıtarak olur.

Elektrik iletimi: Çoğu kompozit elektrik iletmez. Metal, karbon parçacıkları veya iletken lifler ekleyerek elektrik iletkenliği sağlamak mümkündür.

Katılma: Güçlendirme elemanı eklenerek yapılır. Kauçuk ve elastomerik malzeme gibi özel katkıları sayesinde de geliştirilir.

Antioksidan: Plastikler bazen polimer oksidasyonunu engelleyen ya da geciktiren antioksidanlarla yenilenir. Böylece polimerin bozulması engellenir.

Anti statiklik Gereçleri: Polimerlere eklenerek elektriksel yüklenmeyi azaltır. Statik elektriğin kontrolü plastik işleme ve elde etme işlemlerinde gereklidir. Plastiklerdeki statik yükler sarsıntı oluşturma, yangın tehlikesi ve toz çekme gibi riskler içerir.

Plastikleştiriciler: Termoset ve termoplastik kompozitler cıvanın kaybolmasını, rengin bozulmasını, elektriksel karakteristiğinin değişmesini, gevrekleşmesini ve ultraviyole (UV) radyasyon altında bozulmasını engellemek için özel malzemeler kullanılır. Kompozitleri UV'leri emerek koruyan katkılara ultraviyole emiciler denir.

Tablo 5.7 Katkı Malzemelerin Dünyada kullanılan miktarları [21]

Katkı Malzemesi	Miktar (10 ³ ton)
Plastikleştiriciler	820
Alev Geciktiriciler	300
Renk Vericiler	200
Darbe Dayandırıcılar	75
Kayganlaştırıcılar	50
Dengeleyiciler	45
Organik Peroksitler	20
Antistatikler	5
Diğerleri *	60
TOPLAM	1575

5.2.2 FRP çeşitleri

Liflerin kompozit özellikleri genellikle seçilen life göre adlandırılır. İnşaat mühendisliğinde üç çeşit lif ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Bunlar karbon, cam (glass) ve aramid lifleridir. Her birinin farklı özellikleri ve fiyatları olduğu için birbirlerinden daha uygun oldukları kullanım alanları vardır. Güçlendirme uygulamalarında en uygun lifler karbon liflerdir. Bütün liflerin çeliğe göre daha yüksek gerilme kapasiteleri vardır ve kopma noktasına kadar lineer elastiktirler [12].

Lif halindeki bu malzemeler büyük hacimli durumlarına göre yüksek dayanıma sahiptirler. Cam lifleri, büyük hacimli durumdaki gibi yüzey kusurları içermediklerinden dayanımları yüksektir. Karbon Liflerinde tüm bağlar kovalent türdendir ve büyük hacimli durumdaki tabakalanma söz konusu değildir. Aramid liflerinde ise moleküllerin yönlenmesi ve kristalleşme nedeniyle mekanik özellikleri artmıştır [14].

5.2.2.1 Karbon

Karbon liflerin esası grafittir. Ancak uygulanan piroliz yöntemiyle grafit, tabakaları arasındaki zayıf bağlardan arındırılır. Proses sıcaklığı 1000°C'ı aşar. Farklı iki hammaddeden üretilirler: PITCH-karbon lifleri ve PAN-karbon lifleri. Birincisi petrol ürünü ziftten (pitch), ikincisi ise poliakrilonitril' den elde edilmiştir. Bir diğer gruplandırma dayanım ve elastisite modülüne göredir. Tip I, elastisite modülü (E) yüksek, dayanımı düşük karbon lifleri, Tip II elastisite modülü düşük, dayanımı yüksek karbon lifleri [16].

Tablo 5.8 Karbon Liflerin Özellikleri

	PAN HT	PAN HM	Pitch HT	Pitch HM
	(High tension)	(High modulus)	(High tension)	(High modulus)
Çekme Dayanımı (MPa)	3500	2500-4000	780-1000	3000-3500
Elastisite Modülü (GPa)	200-240	350-650	380-400	400-800
Uzama Miktarı (%)	1.3-1.8	0.4-0.8	2.1-2.5	0.4-1.5
Yoğunluk (kg/m³)	1700-1800	1800-2000	1600-1700	1900-2100
Çap (µm)	5-8	5-8	9-18	9-18



Şekil 5.8 CFRP'nin görünüşü

Diğer FRP türlerine kıyasla CFRP'ler güç, dayanım, esneklik, yorulma gibi yönlerden daha uygundur. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans gösterir.

Karbon lifler en yüksek elastisite modülüne sahiptir (200–800 Gpa). En yüksek uzama değeri 0,4-2,5% arasındadır. Uzama oranı gevreklikle ters orantılıdır [12].

Karbon lifler su emmez ve birçok kimyasal birleşimi geçirmezler. Bu yüzden dış etkenlere maruz kalabilecek ortamlar için oldukça uygundur. Yorulma göstermezler ve çürüme, sünme, gevşeme yapmazlar. Karbon lifler elektriği iletirler ve bu yüzden çelikle beraber kullanıldığında galvanik korozyon etkisi yapar [23].

5.2.2.2 Cam

Cam izotropik bir maddedir ve hammaddesi kalsiyum oksit, boron, sodyum, demir ve alüminyum gibi eklentilerle beraber silika (SiO_2) ya dayanır [23].

Cam lifler karbon ve aramid liflerden daha ucuzdur. Bu nedenle cam lif uygulaması tekne yapımı gibi çeşitli sektörlerde çok yaygın bir uygulama olmuştur. Cam liflerin çeşitli türleri vardır. E-glass (Elektrik geçirmez), S-glass (çok güçlü) ve AR-glass (alkali geçirmez).Lif çeşidine göre modülü 70–85 Gpa arasında ve en yüksek uzama miktarı da 2–5% arasında değişir. Bunların arasında en çok kullanılan E-glass cam lifleridir.

E-glass silis, alümin ve kireçten, S-glass ise silis alümin ve magnezi den oluşmuştur. Cam lifleri bükülmüş iplik, dokuma, keçe şeklinde satışa arz edilir [16].



Şekil 5.9 GFRP'nin görünüşü

Tablo 5.9 Cam liflerin özellikleri

GFRP	E-glass	S-glass	AR-glass
Çekme dayanımı (MPa)	3500-3600	4100	1800-3500
Elastisite Modülü (GPa)	74-75	85	70-76
Uzama Miktarı (%)	4.8	4,2-5,4	2-3
Yoğunluk (kg/m ³)	2600	2500	2270
Çap(μm)	8-12	8-12	8-12

Yüksek gerilmelerde cam lifler aşınmaya elverişlidir ve esnemeler gösterebilir. AR-glass hariç diğer lifler neme ve alkaliye karşı oldukça hassastır.

5.2.2.3 Aramid

Aramid aromatik polyamid liflerin genel adıdır. Aramidler bu yüzden teknik olarak termoplastik polimerlerdir. Aramid Liflerin kimyasal maddesi Poli Para Fenilen Tereftalamid'dir. En çok kullanılan aramid lifler Kevlar, Twaron, Technora ve Rus aramid lifleri SVM dir [23].



Şekil 5.10 AFRP'nin görünüşü

Tablo 5.10 Aramid liflerin özellikleri

	Kevlar 49 ve Twaron	Technora	Rus Aramid SVM
Çekme Dayanımı (MPa)	2800	3500	2500-3800
Elastisite Modülü (Gpa)	130	74	130
Uzama Miktarı (%)	2,3	4,6	3,5
Yoğunluk (kg/m³)	1450	1390	1430
Çap (µm)	12	12	15

Kırılma enerjisi çok yüksek olduğu için kask ve kurşungeçirmez giysi yapımında kullanılır. Aramid lifler yüksek sıcaklıklara, neme ve ultraviyole radyasyonlara karşı hassastır. Ayrıca aramid liflerin esneme ve gerilme altında çürüme problemleri vardır. Bu yüzden inşaat mühendisliğinde fazla kullanılmaz.

5.2.2.4 Diğer

Gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan çeşitli diğer lifler de vardır. Fakat bunların kullanımı fazla yaygın değildir.

Polyester: Düşük yoğunluklu ve darbe dayanımı iyidir; fakat düşük modüllüdür. Rijitliğinin az olması kompozit malzemesi olarak çalışmasını engellese de düşük ağırlıklı, yüksek darbe ve aşınma dayanımına sahip olduğu ve birçok reçineyle beraber iyi çalıştığı için yüzey malzemesi olarak kullanılır.

Polietilen: Çok yüksek molekül ağırlıklı polietilenler rasgele desenlenince düşük mekanik özellikler gösterir. Fakat çözünerek bir solüsyondan filamente (ipliğe) dönüşürse, moleküller filament yönünde hizalanır. Moleküllerin dizilişi filamentlere ve oluşan life çok yüksek çekme dayanımı kazandırır.

Bu lifler arasında en yüksek dayanıma sahiptir. Çekme modülü E-glasstan biraz yüksek, aramid ve karbondan düşüktür. Laminat halde çok düşük basınç dayanımına sahiptir. Bu faktörler, yüksek maliyet ve donatı-matriks arasındaki bağlanmanın zor olması polietilenlerin kompozit malzemelerde az kullanılmasına neden olur.

Kuvars: Camın daha çok silikalı versiyonudur, daha iyi mekanik özellikleri ve mükemmel bir yüksek ısıya dayanımı vardır(100°C). Fakat üretim işlemi ve düşük hacimde malzeme elde edilmesi çok pahalıdır.

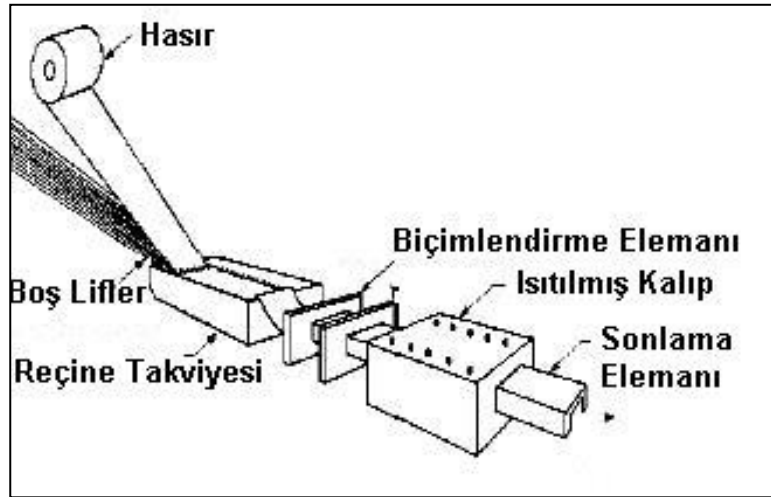
Boron: Karbon ve metal lifler lif özelliğini artırmak için boronla kaplanır. Bu lifler oldukça pahalıdır ve özel spor gereçleri ile uzay gereçleri yapımında kullanılır [28].

5.2.3 FRP'lerin üretim teknikleri

FRP'lerin üretiminde önemli bir aşama liflerin matriks malzemesi ile bir araya getirilme operasyonudur. İnşaat mühendisliğinde kompozit üretiminde en çok kullanılan 5 yöntem vardır. Bunlar pultrüsyon (pultrusion), iplik sarma (filament winding), kalıpla reçine transferi (resin transfer moulding) ve elle birleştirme (hand lay-up) dır.

5.2.3.1 Pultrüsyon (Pultrusion)

Pultrüsyon termosetting reçine ile lifleri birleştiren sürekli bir kalıplama işlemidir. Kompozitlerin sürekli, sabit kesitli ve sınırsız uzunlukta üretilmesini sağlar. Lifler; reçine, polimerizasyon katalizatörü ve katkı malzemeleri ile beraber ıslak banyoda emdirilir. Islanmış lifler pultrüsyon kalıbına girmeden önce fazla sıvı reçine uzaklaştırılır ve tekrar banyoya alınır. Reçine kalıptan çıkarken polimerleşmiş ve son şeklini almış olur. İşlem bittikten sonra bıçak yardımı ile kompozit istenilen uzunlukta kesilir. FRP çubukları, ön germe tendonları, ankraj sistemleri ve profiller genellikle bu yöntemle üretilir [16,19].



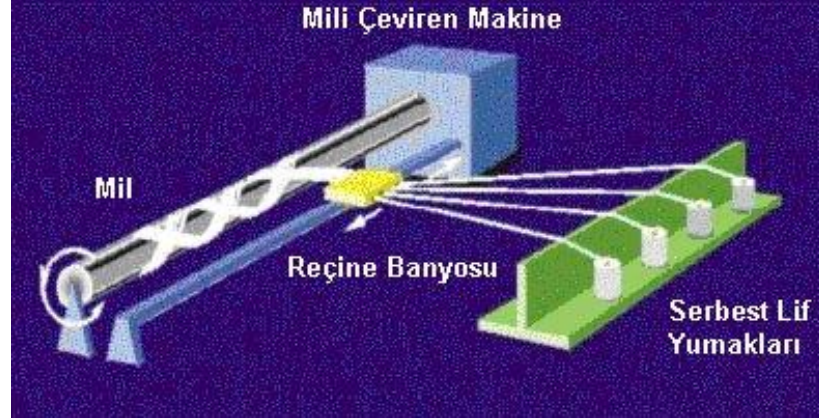
Şekil 5.11 Pultrüsyon İşlemi

Bu yöntem prefabrikasyon bir üretimi içerdiği için ürün kalitesi yüksek ve üretim kontrollüdür. Ancak yapıştırma işlemi şantiyede gerçekleşmektedir. Yapıştırma sırasında özen gösterilerek, yapı elemanının yüzeyi ve kompozit yüzeyi yabancı maddeler ve nem içemeyecek şekilde hazırlanmalı ve çevreden etkilenmeyecek şekilde yapıştırılmalıdır. Burada yapıştırıcı-kompozit-yapı elemanı uyumuna özen gösterilmelidir [14].

Başlangıçtaki sermaye harcaması açık kalıp ve elle toplama yöntemlerine göre çok daha fazladır. Pultrüsyonla üretim yapanların en büyük harcamaları malzeme temininde ve kalıp üretiminde olur. Çok büyük miktarlarda üretim için ise oldukça düşük maliyeti vardır [20].

5.2.3.2 İplik sarma (Filament winding)

İplik sarma yöntemi, emdirilmiş paralel ve sürekli liflerin dönen bir lifin üzerine sardırılmasına dayanır. Reçineyle emdirilmiş lif telleri milin uzunluğu boyunca öne ve arkaya hareket ettirilir. Böylece mili çıkarmadan önce lifle güçlendirilmiş reçinenin kurlenmesi ve kabuk oluşturması engellenir. İplik sarma yöntemiyle kompozit borular, depolama tankları, tüpler üretilir [19].

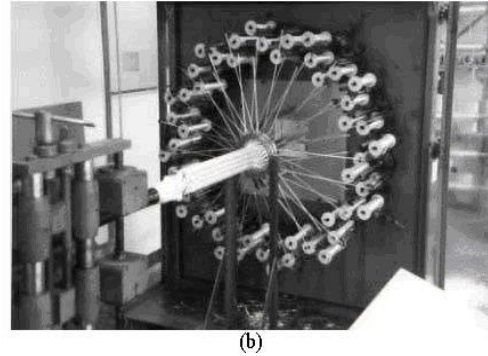
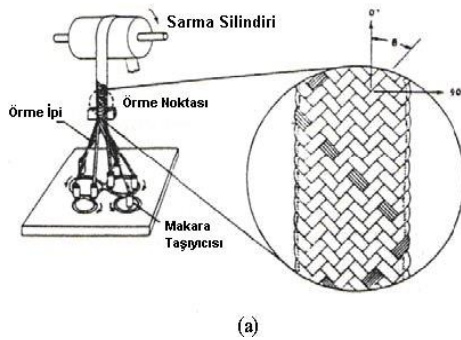


Şekil 5.12 İplik sarma yöntemi

Bu yöntem açık kalıp yöntemine göre anapara harcaması daha fazladır. İplik sarma işleminde yapılan en büyük harcama sarma milinin uygulamaya göre değişmesidir [20].

5.2.3.3 Örme (Braiding)

Bu yöntemle, birçok çeşit lifle güçlendirilmiş reçineli parça elde etmek mümkündür. Örme işleminin temel kavramı iki veya daha fazla ipliğin birbirine kenetlenmesini sağlamaktır [19].

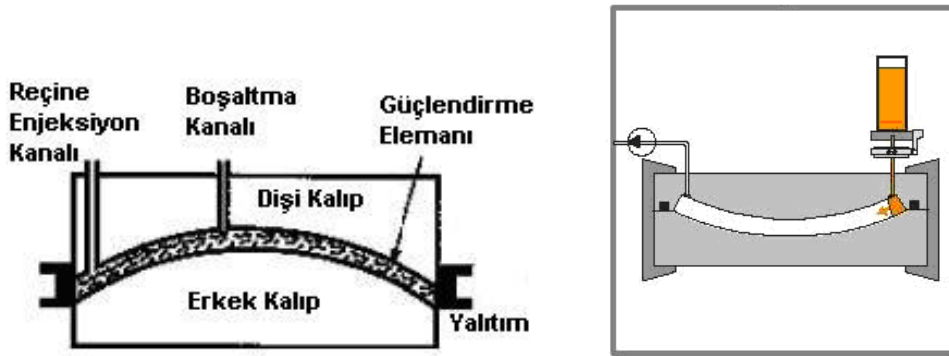


Şekil 5.13 Örme Yöntemi

5.2.3.4 Kalıpla reçine transferi

a) Reçine Transfer Kalıbı (Resin Transfer Moulding-RTM)

RTM aynı zamanda kapalı kalıp olarak da adlandırılır. Kapalı kalıbın içindeki kovuğa istenilen miktarda güçlendirme malzemesi yerleştirilerek yapılır. Düşük viskoziteli sıvı reçine normal basınç altında, kalıbın kovuğuna enjekte edilir. Reçinenin kurlanmadan önce güçlendirme lifinin bütün yüzeyini ıslatması ve kalıp içindeki bütün boşlukları doldurması sağlanır. RTM yöntemi karmaşık şekillerde kompozit üretmede büyük avantaj sağlar [19].



Şekil 5.14 RTM Yöntemi

RTM; polyester, vinyl ester, epoksi, fenolik, akrilik ve hibrid reçineleri gibi pek çok reçineyle uyum gösterebilen bir işlemdir. Kalıbın bütün kovuklarını doldurabilmesi için 200 ile 600 cps (centerpoise) arasında reçine viskozitesi gerekmektedir.

RTM işleminin avantajları:

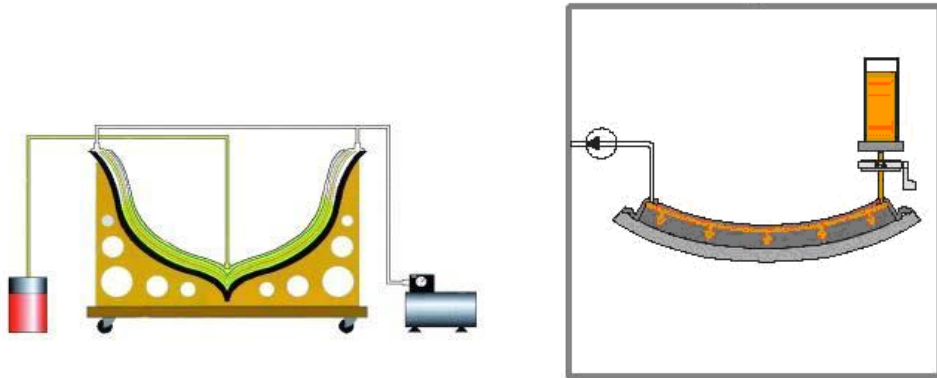
- Kapalı kalıp sistemi olduğu için emisyon işlemi açık kalıp sistemine göre daha azdır.
- Kalıp sayesinde yüksek kalitede katmanlar elde edilebilir.
- Açık kalıp yöntemine göre 5 ile 20 kat arası daha çabuk parça üretilir.
- RTM'de $\pm 0,01$ cm gibi çok küçük toleranslardaki ölçülerde üretim yapılabilir.
- Kalıplar sayesinde çok kompleks şekiller elde edilebilir.

RTM işleminin dezavantajları:

- Yüksek ekipman fiyatlarını karşılaması için çok büyük miktarda üretim yapmak gerekir.
- Güçlendirme malzemeleri akışkanlık ve reçine doygunluğu yüzünden sınırlıdır.
- Parçaların ölçüleri kalıp ölçüleriyle sınırlıdır [20].

b) Vakumlayarak Kalıba Reçine Transferi (Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding –VARTM)

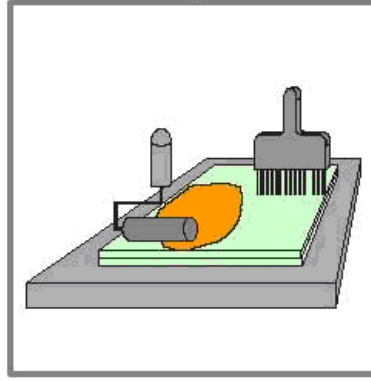
VARTM’de RTM gibi hatasız bir şekilde çok ince ve kompleks şekillerde kompozit üretimi yapmayı sağlar. VARTM’nin RTM’den ayrılan bazı temel farkları vardır. VARTM’de açık kalıp kullanılır ve reçinenin enjeksiyonu vakumlamayla beraber yapılır. Kuru lifler kalıba yerleştirildikten sonra açık yüzeyine vakum uygulanır, aynı zamanda ürün tamamen kürlenene kadar reçine liflerle emdirilir. VARTM yüksek kalitede ürün elde edildiği için genellikle havacılıkta kullanılır.



Şekil 5.15 VARTM Yöntemi

5.2.3.5 Elle birleştirme (Hand Lay-up)

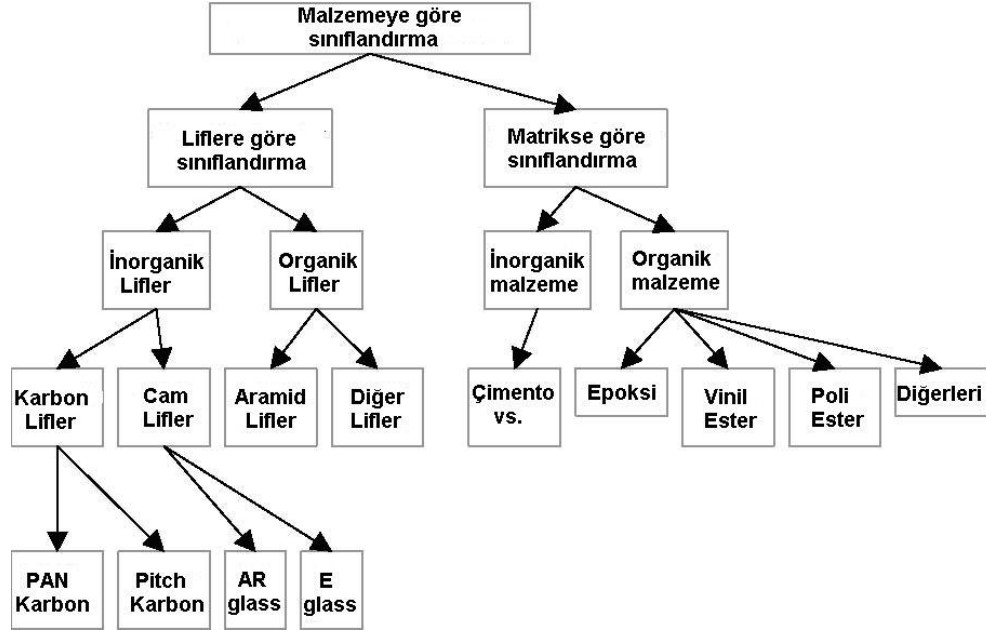
FRP Laminatları üretirken kullanılan en eski ve en basit metottur. İki veya daha fazla laminenin bir araya getirilerek bağlanması yada birleştirilmesi ile yeni bir laminat elde etme işlemidir. Bu işlemde ahşap veya köpük gibi bir malzeme kullanılarak kompozitin bağlantıları ve ara boşlukları sağlanır. Bazı durumlarda çevresine plastik sarılarak darbe ve çevresel etkilerden korunur. Bu yöntemle sınırsız ölçülerde laminat elde edilebilir.



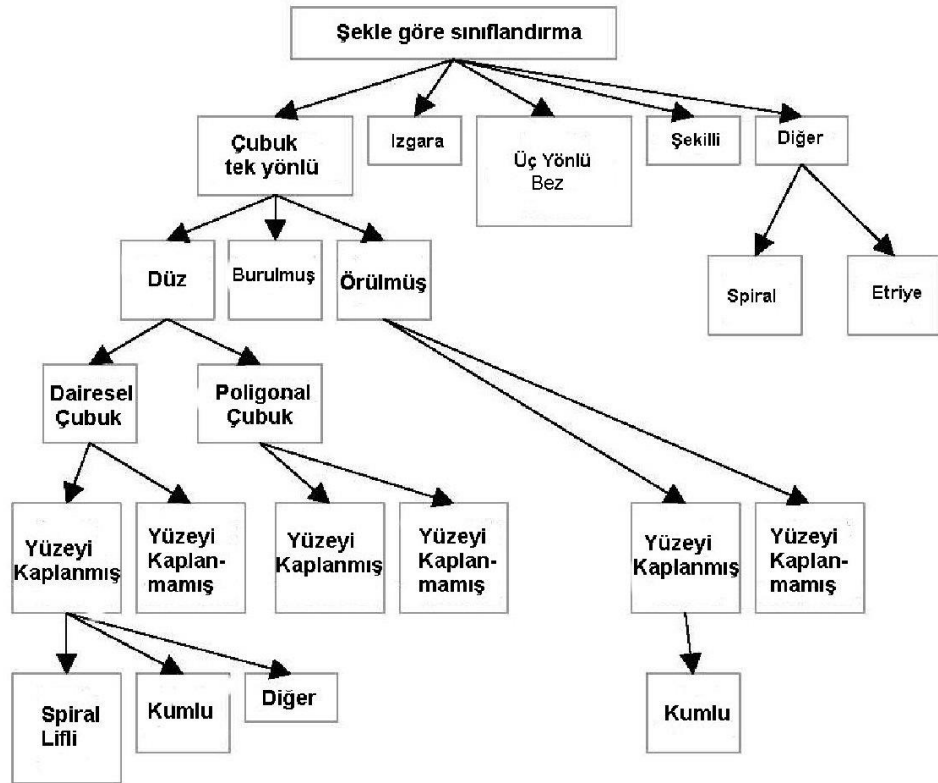
Şekil 5.16 Elle Birleştirme Yöntemi

Bu işlemde maliyet diğer yöntemlere göre oldukça düşüktür. En çok tutarı reçine sprey tabancası oluşturur. Bazı uygulamacılar reçineyi fırçayla sürerek sprey tabancasına gerek duymadan işlemi tamamlarlar.

5.2.4 FRP'lerin sınıflandırılması



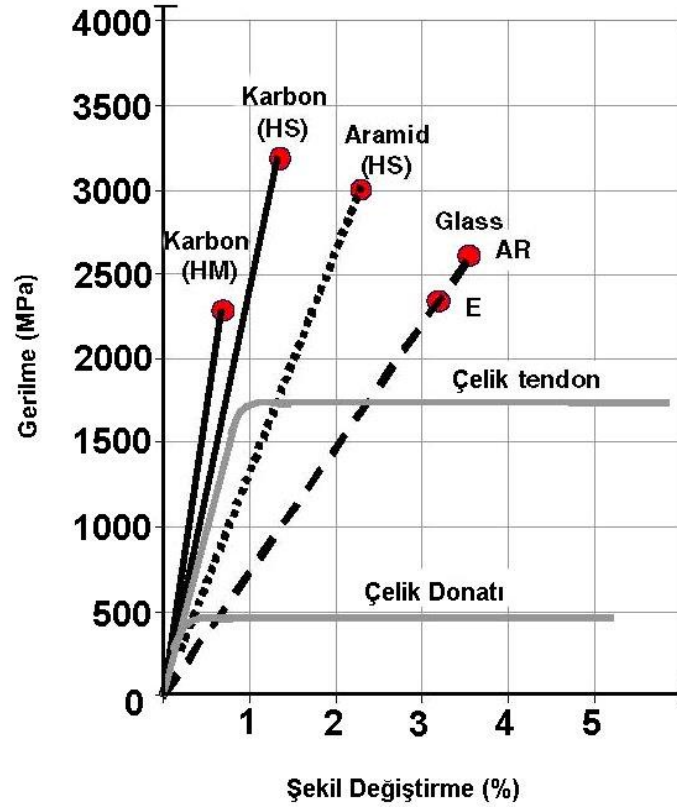
Şekil 5.17 – FRP'lerin malzemeye göre sınıflandırılması [23]



Şekil 5.18 – FRP'lerin şekle göre sınıflandırılması [23]

5.2.5 FRP'lerin mekanik ve fiziksel özellikleri

FRP'lerin mekanik özellikleri çelikten farklıdır. Bu farklılıklar lif ve reçine türünün özelliklerine göre değişir. FRP'lerin çeliğe göre daha düşük ağırlıkları ve Young Modülleri vardır, fakat dayanımları daha yüksektir. Ayrıca FRP'lerin gerilme-şekil değiştirme eğrisi kopmaya kadar düzgündür, malzeme gevrekleşip kopar.



Şekil 5.19 – FRP'lerin gerilme-şekil değiştirme grafiği [12]

- Yoğunluk: FRP'lerin özgül ağırlığı çeliğe göre yaklaşık dört kat daha azdır. Buda kolay taşınmasını ve kısa sürede monte edilebilmesini sağlar.

- Çekme Dayanımı: FRP donatıları kopmaya kadar elastiktir ve gevrek olarak koparlar. Uzunlamasına doğru dayanımı çeliğinkinden oldukça fazladır. Fakat FRP'nin çekme dayanımı çubuğun yarıçapının bir fonksiyonudur. Bu etki "shear lag" (kesme gecikmesi) olarak da tanımlanır. Burada yüzeye yakın lifler merkezdeki liflere göre daha fazla gerilir. Bu shear lag'den dolayı FRP'lerin gerçek çekme dayanımını bulmak zordur.

- Termal genleşme: Betonarme eleman da bir kompozit malzemedir. Burada çelik donatılar güçlendirme elemanı, beton da matriks olarak çalışır. FRP'lerin termal genleşmeleri $-1.0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ile $9.9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ arasında değişir. Betonda $6-11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, çelikte ise $11,7 \cdot 10^{-6}$ dır.

Tablo 5.11 FRP'lerin özellikleri

	Çelik Donatı	Çelik tendon	GFRP donatı	GFRP tendon	CFRP tendon	AFRP tendon
Çekme Dayanımı (MPa)	450-900	1300-1900	500-1200	1300-1700	1650-2400	1200-2000
Elastisite Modülü (GPa)	200	185-200	40-55	45-65	150-165	50-75
Uzama Miktarı (%)	10	4	3.5-5	3-4.5	1-1.5	2-2.6
Yoğunluk (kg/m ³)	7900	7900	1500-2000	2400	1500-1600	1250
Eksenel Termal genleşme Katsayısı ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	11.7	11.7	9.9	9.9	0.0	-1.0

- Çekme Elastik Modülü: GFRP'ler de boyuna elastisite modülü çeliğin %25' i kadardır. CFRP'nin Young modülü ise çelikten çok az daha düşüktür.

- Kesme Dayanımı: FRP'lerin kesme dayanımı oldukça düşüktür. Fakat FRP'lerin donatıları, etki eden yükleri eksenel çekme dayanımlarıyla karşılayacak şekilde desenlendirilmelidir.

- Sünme ve Gevşeme: Lifli kompozitler için sünme ve gevşeme, yükleme yönüne ve lif yönüne bağlıdır. CFRP ve GFRP'lerin sünme ve gevşemesi çelikte eşit ya da daha düşüktür. AFRP'lerin sünme ve gevşeme değerleri ise daha belirgindir. Bir AFRP için kısa dönem dayanımının %40'ı 50 yıl boyunca yük olarak etkilirse %7 oranında sünme oluşur. Diğer bir AFRP de kısa dönem dayanımının %50'si 30 yıl boyunca etkilirse çeliğinkinden daha fazla olan %15'lik bir gevşeme elde edilir.

- Yorulma: AFRP ve CFRP'ler çelikten daha yüksek yorulma direnci gösterirler. Fakat GFRP'lerin yorulma direnci çeliğe göre biraz daha düşüktür [23].

Tablo 5.12 Liflerin kendi aralarında kıyaslanması

Kriter	Önem Katsayısı	Lifli Şeritlerin Ağırlıklı Ortalamaları		
		Karbon	Aramid	Cam
Çekme dayanımı	3	9	9	9
Basınç dayanımı	2	6	0	4
Young Modülü	3	9	6	3
Uzun Süreli Davranış	3	9	6	3
Yorulma	2	6	4	2
Yoğunluk	2	4	6	2
Alkali geçirimsizliği	2	6	4	0
Fiyat	3	6	6	9
Toplam Puan		55	41	32
Sıralama		1	2	3
3: çok iyi , 2: iyi ,1: normal, 0:kötü				

Tablo 5.13 – Liflerin kimyasal dirençlerinin karşılaştırılması [23]

Ortam		Karbon Lifler				Aramid Lifler		Cam Lifler	
		GP grade pitch	HP grade pitch	HT type PAN	HM-type PAN	Kevlar -49	Tecch nora	E glass	AR-glass
	Hidroklorik Asit	B	A	A	A	D	B	D	-
Asit Direnci	Sülfürik Asit	A	A	A	A	D	B	D	-
	Nitrik asit	B	A	A	A	D	B	D	-
Alkali Direnci	Sodyum hidroksit	A	A	A	A	B	B	C	B
	Tuzlu Su Direnci	A	A	A	A	B	B	C	-
Organik	Aseton	A	A	A	A	A	-	A	-
Çözücü	Benzen	A	A	A	A	A	B	A	-
Direnci	Benzin	A	A	A	A	A	B	A	-

A=mükemmel, B=iyi, C=orta ve D=kötü.

Lif ve matriksin birleşmesinden kompozit adı verilen yeni bir malzeme ortaya çıkar. Kompozitlerin mekanik özellikleri liflere, matrikslere, lif miktarlarına ve lif yönlerine bağlıdır.[12]

Lifler sürekli ya da kesikli olabilirler. Sürekli lifler tek yönde yüklendikleri gibi iki dik yönde de bulunabilirler. Betonarme yapıların takviyesi amacı ile kullanılan kompozitlerde kalınlık küçüktür ve lifler bir düzleme paralel olarak yer alırlar. Süreksiz liflerde yönlenme düzlemde rasgele olabilir. Kompozitin bir yöndeki elastisite modülü bileşenleri cinsinden şu şekilde yazılabilir.

$$E_k = \eta_1 \eta_2 E_\lambda \nu_\lambda + E_m (1 - \nu_\lambda) \quad (5.1)$$

Burada E_k , E_λ ve E_m sırası ile kompozitin, lifin ve matriksin elastisite modüllerini gösterir. ν_λ ise liflerin kompozit içindeki hacimsel oranlarıdır. η_1 süreksiz liflerde etkinlik katsayısını gösterir ve sürekli lifler için 1'e eşittir. η_2 ise liflerin yönlenme etkisini simgeler ve sadece kompozit eksenine paralel liflerin bulunması durumunda 1'dir. Yönlenmiş lifler için ise 0–1 arasında değerler alır.

Bazı kompozitlerde tüm lifler ana eksene paralel olacak şekilde yönlenmiştir, bu kompozitlerin bu yöndeki verimlilikleri maksimum değerlerdir. Ancak liflere dik doğrultuda sadece matriks çalışmaktadır, bu nedenle mekanik özellikler büyük oranda düşer. Bazı kompozitlerde ise birbirine dik iki yönde ($0^\circ/90^\circ$) lifler bulunabilir.

E-glass lifler ile takviye edilmiş bir kompozitin %65 oranında tek doğrultuda yönlenmiş lifler içermesi durumunda, liflere paralel dayanımı 1300 Mpa ve elastisite modülü 45 Gpa olabilir. Aynı kompozitin liflere dik doğrultudaki dayanımı ise 50–100 Mpa ve elastisite modülü 4Gpa değerine düşer.

Epoksi veya vinilester matriksli ve karbon lifli kompozitlerin dayanımları (çekme) 2500–3000 MPa ve elastisite modülleri 155–165 GPa değerlerine kadar çıkabilir. Buna karşılık maksimum şekil değiştirme oranları %1,5'un altındadır.

Aramid lifli kompozitlerin mekanik özellikleri cam lifli olanlar ile karbon liflilerin arasında yer alır [14].

5.2.6 FRP'lerin Durabilitesi

Yapısal uygulamalarda yeni ve pek bilinmeyen bir malzeme kullanıldığı zaman durabilite en önemli özelliklerden birisi olur. FRP'lerin inşaatlarda kullanımı yeni olduğu için uzun süreli davranışının nasıl olacağı kesin olarak bilinmez. Çeşitli laboratuvar testleri yapılsa da bunlar uzun süreli davranışı gözlemlemek için yapılan hızlandırılmış testlerdir [29].

Karbon lifli polimerler birçok duruma karşı oldukça dayanımlıdır. Kompozitin en büyük avantajı korozyona uğramamasıdır. Karşılaşılan durabilite problemlerinin çoğu da matriksten kaynaklanmaktadır. Epoksiler bir çok durumda bozulmaya karşı çok iyi dayanımlıdır. Epoksi diğer polimerler gibi su emmez. Fakat matriks ultra viyole radyasyondan zarar görür. Bazı özel eklentilerle epoksinin UV'ye karşı dayanımı da sağlanır. Eğer kompozit boyanırsa yine tatminkâr bir koruma elde edilmiş olur.

Ayrıca matriks yüksek sıcaklıklara oldukça hassastır. Eğer yangın riski varsa kompozit mutlaka özel önlemlerle korunmalıdır. Kompozitin ısı iletkenliği düşük olduğu için yangına dayanım süresi çelik levhalara göre daha uzundur.

Eğer saf karbon lifler çelikle temas haline geçerse galvanik korozyon riski oluşur. Fakat kompozit ve çelik arasında matriks varsa hiçbir sorun çıkmaz. Ayrıca elektrik iletmesinden dolayı teorik olarak yıldırım çarpmasında yok olma riski vardır, fakat güçlendirme sistemi topraktan olmadığı için bu pek olası değildir, zaten böyle bir bozulmaya da bu zamana kadar hiç rastlanmamıştır [12].

5.2.7 FRP'lerin anizotropisi

Bir yapının güçlendirme hesapları yapılırken kullanılacak kompozit malzemenin anizotropik davranışı gözönüne alınmalıdır. Kompozitler yüksek dayanım ve rijitliklere lif yönünde sahip olurlar, lif yönüne dik yönde zayıftırlar. Eğer malzeme anizotropik ise yanlış yönde kullanılması çok kötü sonuçlara neden olabilir. Esnemeye karşı güçlendirmede gerilme yönlerini bulmak kolaydır ve lifler buna göre en efektif yönde yerleştirilir. Fakat kesme gerilmelerinde gerilme yönleri nadiren lif yönüyle çakışır. Bu yüzden kompozitin, lif yönünün dışında kesme veya gerilme yüklemesine maruz kaldığında nasıl davranacağını bilmek gerekir. Agarwal ve Boutman(1990)'ın bulduğu bağıntıya göre gerilmeler boyuna lif yönüyle, boyuna kiriş yönü arasındaki θ açısına dönüştürülebilir. Burada L ve T liflerin boyuna eksenleri, x ve ye ise dikine eksenlerdir [12].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_{LT} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.2)$$

Burada T dönüşüm matrisidir.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$m = \cos\theta$ ve $n = \sin\theta$. Şekil değiştirmeler içinde aşağıdaki bağıntı kullanılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \left([T]^{-1} \right)^T \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.4)$$

İzotropik malzemeler için yapılmış Hook kanununu kompozit malzemelerle karşılaştırsak gerilme-şekil değiştirme ilişkisi daha karmaşık olur.

$$\{\sigma\} = [Q]\{\varepsilon\} \quad (5.5)$$

[Q] rijitlik matrisidir ve aşağıdaki değerlerden oluşur.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (5.6)$$

Gerilmeden dolayı şekil değiştirme değerleri de;

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \quad (5.7)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad S_{21} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad S_{33} = \frac{1}{G_{12}} \quad (5.8)$$

5.2.8 FRP'lerin Dünyada kullanımı ve ekonomik durumu

5.2.8.1 FRP'lerin kullanım sektörleri ve miktarları

Güçlendirilmiş plastik kompozitler oyuncaktan uzay malzemelerine kadar birçok sektöre kullanılmaktadır. Bunları sınıflandırıp örnekler verirsek:

Havacılık ve uzay: Uçak yüzeyleri, kabinler, uzay araçları, askeri miğferler, roket fırlatıcıları

İş Ekipmanları: Buzdolapları, derin dondurucular, mikrodalga fırınlar, hesap makineleri

İnşaat: Yüzme havuzları, yağmur dereleri, betonarme kalıpları, banyo küvetleri, küpeşteler ve diğer mimari uygulamalar.

Tüketici Ürünleri: Oltalar, golf sopaları, kayaklar, tenis raketleri

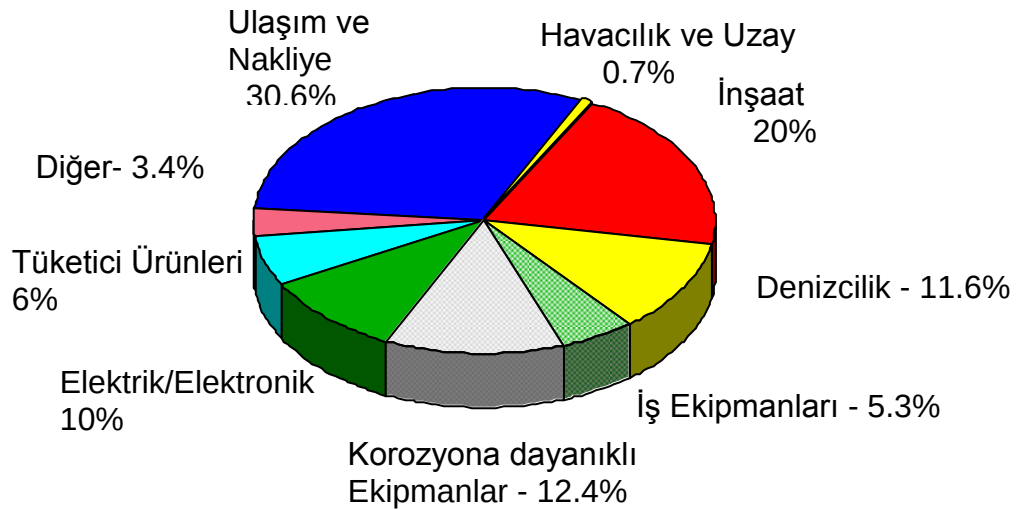
Korozyona Dayanıklı Ürünler: Su tankları, pompalar, oluklar

Elektrik/Elektronik:: Devre Kutuları, elektronik bağlantılar, mikrodalga antenler ve diğer elektrik/elektronik uygulamalar.

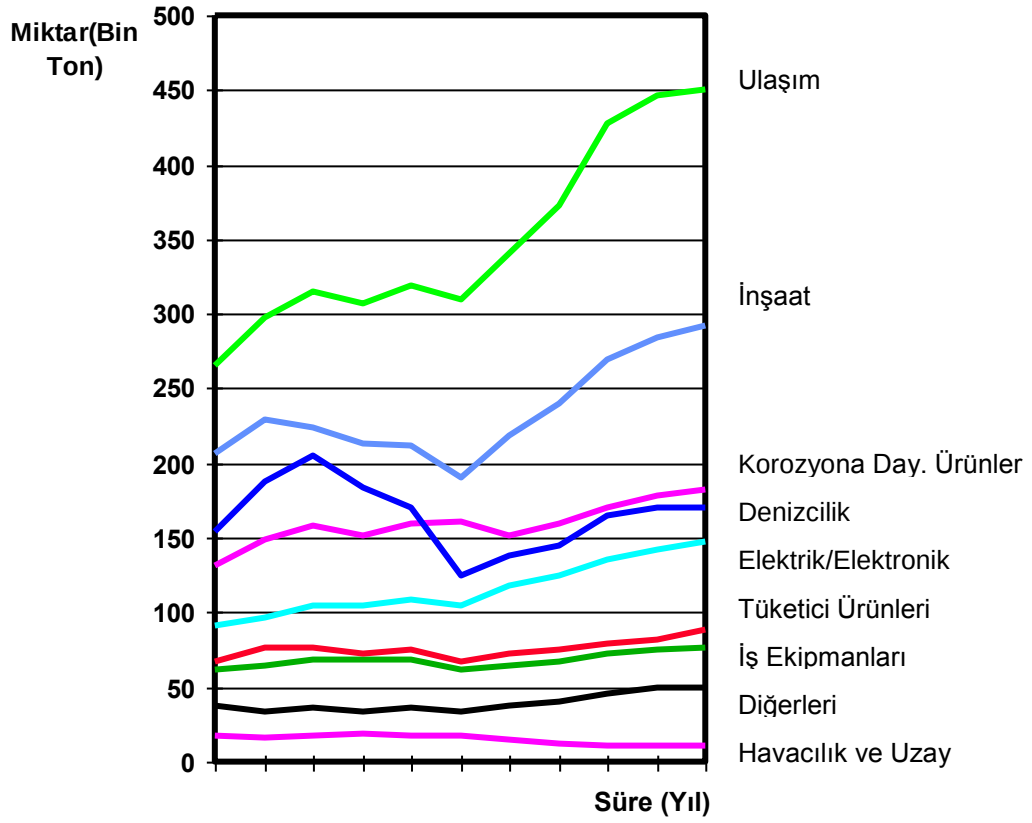
Denizcilik: Bot yüzeyleri, kanolar, dubalar

Ulaşım: Araba kaportaları, römorklar, metro ekipmanları, çamurluklar ve diğer yer taşımacılığı araçları ve parçaları

Diğer: Diğer bütün kompozit uygulamalar. Çoğunlukla yapı tamir ve güçlendirme malzemeleri [21].



Şekil 5.20 FRP'lerin Dünyada kullanım alanları [24]



Şekil 5.21 FRP'lerin Dünyada Kullanılma Miktarları [25]

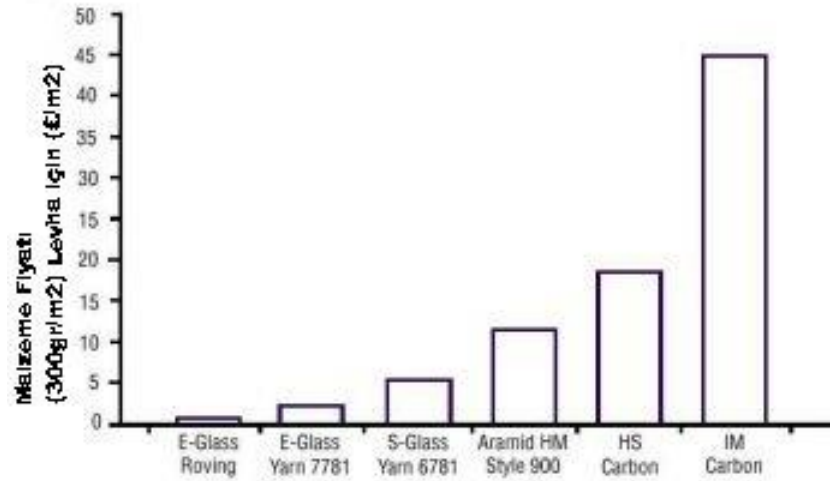
Zamanla yüksek performanslı uygulamalar için dayanım, rijitlik ve gerekli mekanik özellikler gösteren hafif malzeme gereksinimi artmıştır. Ve bu yüzden ürünlerde geliştirmeler yapılmıştır. Ürün özellikleri kullanıldığı sektörler göre çeşitlikler gösterir. Mesela bazı metal parçaların sökülerek kalıpla üretilmiş kompozitle yer değiştirilmesi ulaşım ve iş ekipmanları sektöründe çok önemli yer tutar.

Güçlendirilmiş plastik kompozitlerin kimyasal direnç özellikleri denizcilik ve inşaat sektöründe kullanılan metal ve ahşap elemanların yüksek bakım maliyetini de önlemiş olur [21].

5.2.8.2 FRP'lerin ekonomik analizi

Güçlendirilmiş plastik kompozit üretiminde üç önemli maliyet kalemi vardır. Bunlar hammadde, işçilik ve enerjidir. Hammadde reçine, donatı, dolgu malzemeleri ve katkıları içerir. İşçilik ve enerji ise malzemenin üretim aşamasını sağlarlar [21].

Lifle güçlendirilmiş polimerlerin fiyatları arasında bir kıyaslama yaparsak en düşük fiyatlar cam liflerindir. Bunları sırasıyla aramid ve karbon lifli polimerler karşılar.



Şekil 5.22 FRP'lerin Dünyadaki ortalama m2 fiyatları [26]

Termoset reçinelerin fiyatları 1996 yılından beri artmaya başlamıştır. Bu sırada termoplastiklerin fiyatlarının çoğunda da düşüş gözlenmiştir. Termoset reçineler arasında doymamış polyester ve fenoliklerin fiyatları birbirlerine yakın sayılır, fakat epoksinin fiyatı bunlardan daha pahalıdır. Termoplastikler reçineler arasında da PVC ve propilenler en ucuzlarıdır. Fakat naylon bunların yaklaşık 4 katı daha pahalıdır [21].

Tablo 5.14 Reçinelerin Dünyadaki ortalama fiyatları [27]

Reçine fiyatları (\$/lb)	1996	2001	2005
Doymamış Polyester	78,5	82,5	87,5
Fenolik	77	79	85
Poliüretan	110	115	115
Vinil Ester	169	171	173
Epoksi	131	106	106
Naylon	147	151	155
SMA/Yanmayı Geciktirici	179	179	179

FRP sistemler gereken reçine miktarının hesaplanması:

$$\text{Gerekli reçine miktarı}(g) = \frac{A_f \times n \times W_f \times R.C}{(1 - R.C)} \times 1,5 \quad (5.9)$$

A_f : FRP'nin alanı m^2

n : Katman sayısı

W_f : Bir katmanın lif ağırlığı g/m^2

$R.C$: Reçinenin ağırlıkça oranı

Elle birleştirme yönteminde $RC_{CFRP}=0,55$, $RC_{GFRP}=0,46$, $RC_{AFRP}=0,61$ alınır. [28]

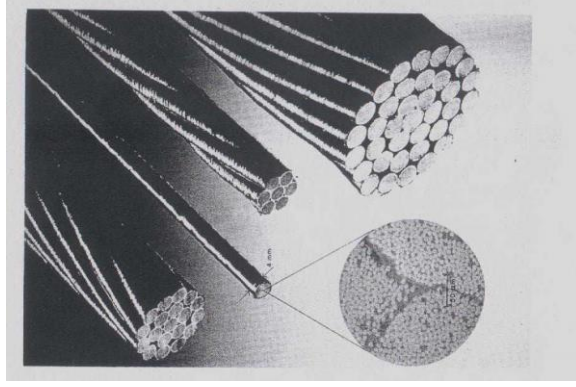
5.3 FRP'lerin Güçlendirme Sistemlerinde Uygulanması

5.3.1 Güçlendirme sistemlerinde kullanılan CFRP çeşitleri

5.3.1.1 Karbon lif ipliği (Filament)

Yüksek performanslı karbon lif iplikleri organik ve moleküler bileşim olan Rayon veya Polyacrylic-Nitrile (PAN), ve petrol veya sıvı kök kömürü ziftinden oluşan organik Mesophase-Pitch'den kimyasal işlemler sonucu elde edilir. Uzatılmış ve sağlamlaştırılmış Rayon 2500-3000°C sıcaklıkta karbonize edilir ve yüksek performanslı karbon fiber filament elde edilir. Bu iplikler 7-10 μm . çapındadır ve aynı yönde sıralanmış moleküler lifler içerir. Mesophase-Pitch'in içeriği aynı yönde moleküler liflerden oluştuğu için 2500-3000°C'de karbonize edilerek yüksek performanslı karbon fiber filamente dönüşmesi daha kolaydır.

Yüksek performanslı karbon lif filamentlerin anizotropi, yüksek yoğunluk, çeliğin dörtte biri olan birim ağırlığı, çeliğin 8–10 katı olan yüksek gerilme dayanımı ve çelik ile aynı olan Young modülü gibi çok iyi mekanik özellikleri vardır. Çözeltiler, pas, korozyon gibi kimyasal etkilere ve sıkıştırılma, donma, buzların çözülmesi gibi doğal etkilere dayanımından dolayı çelik ile arasında önemli farklar vardır.



Şekil 5.23 – Karbon Lif İpliği

Karbon lif filamentin 5000Mpa gibi mükemmel bir çekme dayanımı vardır. Fakat gerilme halinde yük taşıma kapasitesi o kadar iyi değildir. Her tel 0,2N. taşır, bunun sebebi 7–10 μm . çaplı küçük kesit alanına sahip olmasıdır [15].

Birçok karbon fiber filament bir araya getirilerek, epoksi reçinesi gibi birleştirici bir malzeme ile emdirilerek tekyönlü birleştirilir ve çok büyük bir çekme kapasitesine sahip olunur. Son yıllarda karbon liflerle güçlendirme sistemlerinde sadece karbonun yapı yüzeyine yapıştırılması değil, karbon fiber filamentlerin reçinelerle uygun doğal atmosferik koşullarda yeterli derecede emdirilmesi de araştırılmıştır.

Karbon fiber filamentlerin, yapıştırılmasının ve reçineyle emdirilmesinin geliştirilmesi yüksek karakteristikli çekme dayanımı ve daha yüksek Young modülü elde etmek içindir.[18]

5.3.1.2 Karbon lif teli (Strand)

12000 yüksek performanslı karbon lif ipliğinden oluşmuştur. Mekanik, kimyasal özellikleri ve esneme kabiliyetleri çok iyidir. Karbon fiber strand kolonları ve kirişleri sararak onları güçlendirmede kullanılır [15].

Karbon fiber strand epoksi reçine emdirilerek bina kolonlarına ve köprü ayaklarına sarılır. Reçine sertleştikten sonra CFRP strand (Karbon lifle güçlendirilmiş polimer strand) olarak güçlendirme sisteminde yer alır. 12000 filamentten oluşan CFRP strandın yük taşıma kapasitesi gerekli miktarda karbon fiber filamentle yapılan sarmaya bağlıdır.



Şekil 5.24 – Karbon lif teli

Yaralı bir CFRP strand'ın güçlendirme etkisi karbon fiber strandın beton yüzeye yapışabilmesine değil epoksi reçineyi yeterli derecede emmesine ve sıklığının sürekliliğine bağlıdır [18].

5.3.1.3 Karbon lif şeritler ve levhalar

Karbon şeritlerin betonarme yapıların yüzeyine epoksi reçine ile yapıştırılıp ve normal sıcaklıkta sertleşmesinde üç çeşit şerit başrolü oynar, bunlar Torayca-Cloth, Forca-Tow-Sheet ve Replark'dır. Yüksek performanslı karbon lif teli içerdikleri için çekme dayanımları ve esneklikleri çok yüksektir. Torayco-Cloth şeritler karbon lif telleri kullanılarak elde edilen tekstil ürünü gibi imal edilir. Forca-Tow-Sheet tek yönlü kuru karbon lif telinin yapıştırıcı reçine ile ince cam lifine sarılmasından oluşmuştur. Replark gerilmiş tek yönlü karbon lif tellerinin ısınmış epoksi reçinesi ile doyurulmasından oluşur [15].



Şekil 5.25 – CFRP Şeritler

Yapıştırılmış karbon fiber levhalar epoksi reçine sertleştikten sonra CFRP levhalar olarak çalışırlar. CFRP levhanın yük taşıma kapasitesi karbon fiber levhanın katmanları tarafından kontrol edilir. CFRP levha kullanılarak güçlendirmenin etkisi, beton yüzey ve CFRP levha arasındaki sınırdaki epoksi reçineyi yapıştırmaya bağlıdır.



Şekil 5.26 CFRP Levhalar

Yapışabilme özelliği beton yüzeyin katman özelliğine de bağlıdır. Bu yüzden beton yüzeyde çeşitli işlemler yapılmalıdır.

- 1) Toz, harç, sıva içeren zayıf katmanların temizlenmesi
- 2) Epoksi reçinesi veya tamir harcı ile gerekli yerlerin tamir edilmesi
- 3) Kesme hasarlarını engellemek ve CFRP'nin köşelerde de tam çekme dayanımı göstermesini sağlamak için kolonun keskin köşelerine 30 mm. çaplı yuvarlamalar yapılması

Beton yüzeyinde ön (primer) boyama yapmanın iki tane önemli amacı vardır. Biri beton yüzeyin emdirilerek güçlendirilmesi. diğeri ise karbon fiber levha tarafından emilip, epoksinin yapışkanlığını efektif hale getirmektir. Boyama uygun nem ve 5 °C'den yüksek uygun sıcaklıkta dikkatlice yapılmalıdır [18].

5.3.2 FRP'lerin uygulanma şekli

FRP ile güçlendirilecek yüzeydeki zayıf ve gevşek malzeme mümkünse kumlama ile değilse uygun başka bir metotla uzaklaştırılmalı ve tabandaki yüzey bozukluğu minimuma indirilmelidir. Eğer donatı açığa çıkarsa, donatıyı çevreleyen betonun karbonatlaşma ve klor açısından incelenmesi uygun olur. Donatı korozyona uğramış ve betona pas bulaşmışsa donatı temizlenmeli ve pasa karşı koruyucu solvent uygulanmalıdır.

Yüzey hazırlanırken birbirini takip eden yüzeyler arasındaki kademe farkı 1mm'i geçmemelidir. Yüzeyde herhangi bir yükselti veya çukur kalmamalıdır. Keskin köşeler yuvarlatılmalıdır. Yuvarlanmış köşelerin yarıçapı 10 mm.den az olmamalıdır. Primer astar uygulanmadan önce yüzey temizlenmelidir.

Hazırlanacak astar miktarı malzemenin çalışma zamanı içinde kullanılacak kadar olmalıdır. Karıştırılmış astar çalışabilme süresi geçildiği zaman kullanılmamalıdır.

Primer astar fırça ya da rulo ile düzgün bir şekilde yüzeye uygulanmalıdır. Eğer gerekli ise ikinci kat astar ilk kat betona nüfuz ettikten sonra uygulanmalıdır. Kullanılacak astar miktarı beton yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. İkinci kat astarı uygulamadan önce ilk katın parmaklara bulaşmayacağı kadar beklemek gerekir. Bir gece beklemek en uygun süredir.



Şekil 5.27 Beton yüzeyin üzerine astar sürülmesi

FRP sisteminde yüzeylerin pürüzsüzlüğüne kavuşturulması için, yüzeyde yapılan ön hazırlık ve astar uygulaması sonrası istenirse dolgu malzemesi düz mala yardımıyla, yüzeyin pürüzlerini düzeltecek miktarda çekilip sıyırılmalıdır. Yüzeye dolgu malzemesi uygulaması yapmadan önce astarlanmış yüzeyde, parmakla hafif dokunulduğunda astar parmağa bulaşmıyor ancak hala yapışkanlığını koruyor olmalı.



Şekil 5.28 Astarın mala yardımıyla yüzeye yedirilmesi

Dolgu malzemesi uygulandıktan sonra reçine tatbik edilir. Reçine beton yüzeye fırça ya da rulo kullanılarak uygulanmalıdır. Kullanılacak malzeme miktarı yüzeyin emiciliğine bağlı olarak değişir. İç köşelerde kullanılan malzeme miktarı FRP sisteminin alt tabakaya yapışmasını garanti altına almak için düz yüzeyde kullanılan malzemeden daha çok olacaktır.



Şekil 5.29 Reçinenin yüzeye sürülmesi

İstenilen ölçülerde kesilmiş FRP kumaşlar önceden hesaplanmış değerlere göre güçlendirilecek elemana sarılır.



Şekil 5.30 FRP'nin Reçineli yüzeye yapıştırılması

FRP kumaşın içinde kalan hava boşluklarını uzaklaştırmak ve reçinenin malzeme içine işlemesini artırmak için lastik dişli rulo ile lifler yönünde üzerinden bastırarak iki üç kere geçilmelidir. Bindirme bölgesinde daha önce uygulanan malzemenin üstüne reçine sürülmeli ve eklenecek bölüm uygulanmalıdır. Bindirme lifler doğrultusunda yapılmalıdır, liflere dik yönde bindirme yapılmasına gerek yoktur. İlk kat reçine uygulamasından sonra malzemeye en az 30 dakika dokunulmaması gerekir. Herhangi bir şekilde yerinden oynayan veya ayrılan malzeme bu süre içinde rulo veya spatula yardımı ile tekrar yerleştirilebilir. Reçinenin uygulandığı yüzeyin üzerinden iki-üç kez bastırılarak geçilmelidir. Bu işlem sırasında rulo ya da spatula kullanılmalıdır. İki veya daha fazla kat reçine uygulanacağı zaman yukarıdaki işlemler tekrarlanmalıdır. Reçine uygulaması bittikten sonra isteğe göre ya reçine kumlanır ve sıva yapılarak boyanır ya da özel bir solvent sürülerek üzerine boya yapılır.[14]



Şekil 5.31 FRP'li yüzeyin sonlanması

FRP levhaların, mevcut bina üzerindeki uygulaması Ek A da gösterilmiştir.

5.3.3 FRP ile güçlendirilmiş betonarme sistemlerde tasarım prensipleri

FRP malzemeleri betonarme yapıları güçlendirmek için kullanırken beklenmedik felaketlerle karşılaşmamak için tasarım aşamasında yeterli güvenlik önlemlerinin alınması gerekir. FRP ile güçlendirilmiş betonarme yapılarda tasarım gereksinimleri bazı sınır durumlara dayanır. Bu sistemlerde ilk olarak gerekli dayanım hesaplanır, daha sonra işe yararlılığı, yorulma dayanımı ve sünme dayanımı kontrol edilir. Birçok durumda işe yararlılık, yorulma dayanımı ve sünme dayanımı tasarımı doğrudan etkiler.

Kesitte esneme oluşturan yüklere karşı çelik donatı, akma özelliğinden dolayı, her zaman önemli ölçüde güvenlik seviyesini sağlar. FRP malzemelerin lineer elastik davranışından dolayı esneme, kesme ve bağlanma kopmaları ani ve gevrek olur.

Maksimum ayanım sınır durumunda FRP üç şekilde kırılır.(esneme, kesme kopması ve ayrılma)

5.3.3.1 Esneme kırılması

FRP ile güçlendirilmiş betonarme yapılarda esnemeye göre tasarım en kesitteki basit dengelere ve beton ile FRP arasındaki davranışa bağlıdır. FRP'deki gerilmeler, FRP kopana kadar şekil değiştirme ile beraber artar.

Çeşitli araştırmalarda görülmüştür ki; düzgün tasarlanmış FRP ile güçlendirilmiş betonarme sistemlerde yada çelik donatı ile güçlendirilmiş sistemlerde, eğilmeden dolayı oluşan kırılmalarda ya çelik donatı aktıktan sonra FRP kopar yada çelik donatı aktıktan sonra beton ezilir. Çeliğin ve FRP'nin alanı eğer çok yüksek olursa, bu seferde üçüncü bir kırılma şekli olan beton ezilmesi oluşur.

FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarda, çekme sırasında FRP koparsa ani ve gevrek kırılma olur. Eğer kırılma, çelik donatı aktıktan sonra betonda ezilme şeklinde oluşuyorsa daha aşamalı ve daha az tehlikeli kırılma gerçekleşir.

Bu yüzden yüksek dayanımlı beton kullanmak hem yüksek dayanım özellikleri gösteren FRP malzemeleri daha iyi kullanmayı sağlar, hem de çatlamış kesitin rijitliğini artırır. Fakat yüksek dayanımlı betonun gevrekliği de normal betonla kıyaslanırsa esneyen elemanın şekil değiştirebilme özelliğini azaltır. FRP ile güçlendirilmiş bu sistemlerde en uygun yüksek dayanımı elde etmek için, çeşitli azaltma katsayıları kullanılmalıdır [32].

5.3.3.2 Kesme kırılması

Kesme kırılmaları genelde gevrek ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarda önlenmesi gereken bir kırılma şeklidir. Kesme kırılmaları en genel olarak 2 şekilde sınıflandırılır. Bunlar kesme-gerilme şekli (FRP kesme donatısının kopması) ve kesme-basınç şekli (beton gövdenin ezilmesi). Birinci şekil kırılma daha gevrek ve sonraki aşamasında daha büyük şekil değiştirmeler olur.

Kesme kapasitesi FRP ile artırılmış betonarme elemanlarda maksimum lif şekil değiştirmesinden az olan değerlerde betonda agrega ayrılması görülmüştür. Bu yüzden maksimum lif şekil değiştirmesine çeşitli sınırlamalar getirilmiştir.

5.3.3.3 Ayrılma kırılması

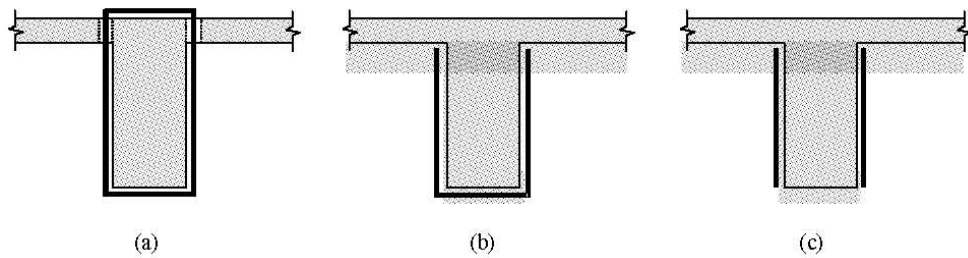
Ayrılma kırılmaları FRP ile dışarıdan güçlendirilmiş betonarme elemanlarda çok görülen bir kırılma şeklidir. Bu tip kırılmalar genelde gevrek olur, gözle görülen belirtiler olmaz ve güçlendirilmiş sistemin esneme ve kesme dayanımlarının altındaki yük seviyelerinde oluşur. FRP şeritlerle ya da levhalarla güçlendirilmiş eğilme altındaki sistemlerde, FRP levhanın/şeridin herhangi bir başlangıç tarafından, çelik donatının alt kısmında yatay çatlak olarak başlar ve açıklık ortasına kadar uzanır. Böylece FRP'nin betondan ayrılma işlemi başlamış olur [32].

5.3.4 FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde kesme dayanımı

Güçlendirmeden elde edilen ek dayanım sarma şekline, miktarına, FRP'nin çeşidine, mevcut betonun dayanımına, yüklenme biçimine ve mesnetlenme şekline bağlıdır. Ayrıca unutulmaması gereken diğer nokta ise kirişin kesme dayanımı, esas olarak beton ve FRP arasındaki bağlanmaya bağlıdır.(Özellikle parçalı sarılmış kirişlerde).

5.3.4.1 FRP levhaların sarım şekilleri

FRP levhalarla yapılan en etkin kesme güçlendirme metodu, kirişin en kesitinin tamamen FRP ile sarılmasıdır(Şekil a).Fakat bu uygulama sırasında çok da pratik bir yöntem değildir. Döşemeler ve diğer mesnetlenmiş elemanlar kesitin üst tarafının sargıya dahil edilmesini engeller. Çözüm yöntemi olarak döşemeye delikler delerek şeritlerin kesiti sarması sağlanır. Fakat bu yöntem de çok karmaşık ve pahalıdır.



Şekil 5.32 – FRP'lerin sarılma şekilleri (a- tam sarma, b- U sarma, c- 2 yandan)

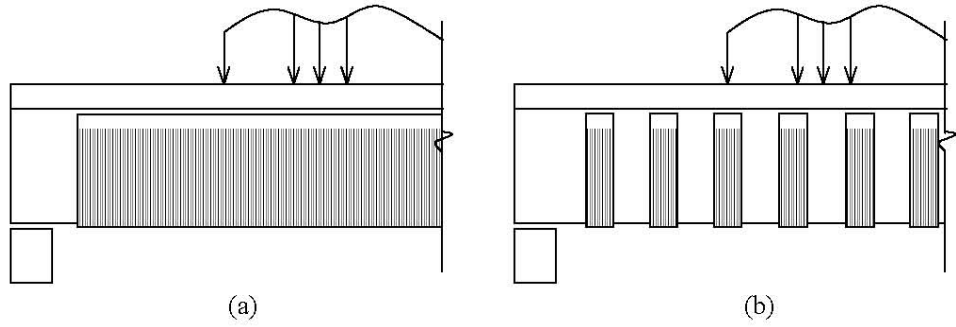
En çok kullanılan kesme güçlendirmesi metodu kirişi iki yanından ve altından sarmaktır. Bu metoda şeklinden dolayı “U sarma” denir. U sarma sadece pozitif momentli bölgelerde etkindir. Negatif moment bölgelerinde kesme çatlakları kesitin

üst kısmında döşemenin yanından başlar. Döşemenin altındaki yerinden dolayı FRP bu çatlakların oluşmasını engelleyemez. Bu çatlaklar bir kere oluştuğundan sonra FRP güçlendirme etkisine rağmen kesitin içine doğru ilerleme potansiyeli vardır.

Bazı durumlarda kesitin üstünü ve altını sarmak mümkün değildir. Bu gibi durumlarda kesitin iki yanını sararak da kesme güçlendirmesi elde edilebilir (Şekil c). Fakat bu yöntemin etkinliği FRP şeridin ankraj probleminden dolayı sınırlıdır[30],[31].

a) Kesme güçlendirmesinde şerit aralığı

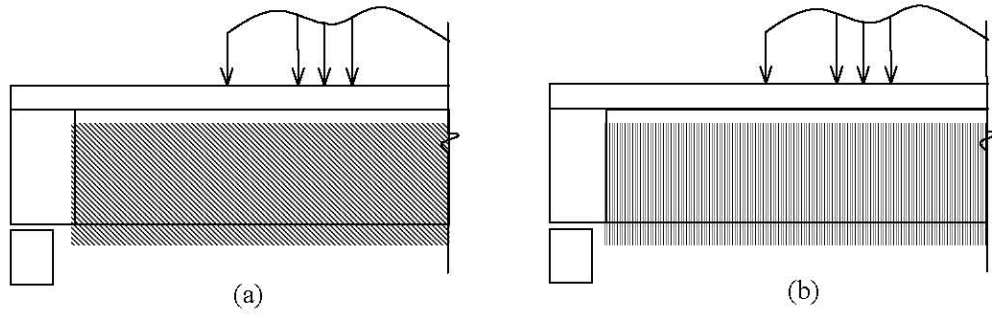
FRP donatıların enine yerleşimi sürekli ya da boşluklu şeritler halinde olabilir. Şeritler halinde yerleştirmek malzemenin en iyi ve en etkin şekilde harcanmasını sağlar. Ayrıca eğer kiriş uzunluğu boyunca sarılacaksa, şeritlerin olması beton içindeki nemin daha kolay dışarı çıkmasını sağlar.



Şekil 5.33 – FRP'lerin Kiriş Boyunca sarılım Şekilleri (a- sürekli, b- şeritli)

b) Lif Dizilim yönü

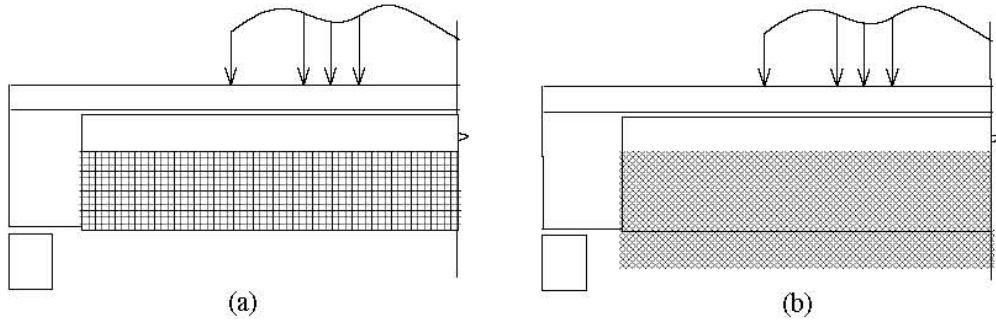
FRP anizotropik malzeme olduğu için lif yönünde yüksek dayanımı vardır. Bu yüzden liflerin desenlenme şekli ayarlanarak diyagonal çekme çatlaklarına karşı koyması sağlanabilir. Bu da şeritlerin açılı yerleşimiyle olur. Fakat dikey desenlenmiş katmanların montajı daha kolaydır ve toplam sargı uzunluğunu da azaltmış olur [30],[31].



Şekil 5.34 – Liflerin dizilim Yönü (a- diyagonal, b- dikey)

c) İki eksenli Donatı

İki eksenli FRP donatısının kullanılması sistemin performansını daha çok artırır. İki eksenli FRP donatısı iki tane tek eksenli FRP katmanının birbirine dik yönde birleşmesinden oluşur. Böylece 2. katman 1. katman için hem ankrajı sağlar hem de kesmeden dolayı açılmış çatlakların genişlemesini engeller [30].



Şekil 5.35 – İki eksenli Liflerin dizilim Yönü (a- dikey, b- diyagonal)

5.3.4.2 Kesme dayanım hesabı

Betonarme bir kesitin taşıyabileceği kesme kuvveti miktarı ACI 318-95 standardına göre betonun kesme dayanımı ve çelik donatının dayanımının toplamıdır. FRP'lerle güçlendirilmiş kirişlerde bu toplama FRP'nin kesme dayanımı da eklenir.

$$V_n = V_c + V_s + V_f \quad (5.10)$$

Hesap kesme dayanımı ΦV_n normal kesme dayanımının redüksiyon katsayısıyla çarpılmasından bulunur. Çelik ve beton için ACI standardında bu değer 0,85 dir. CFRP için ise 0,70 önerilir.

$$\Phi V_n = 0,85(V_c + V_s) + 0,7V_f \quad (5.11)$$

FRP Donatıların kesme kapasitesine etkisi

FRP kesme donatısından elde edilen kapasite [5.12]. denklemde gösterilmiştir. Bu denklem çeliğin kesme dayanımı denklemine benzerdir. Bu ACI denkleminde kesme çatlağının 45° 'lik açıyla oluştuğu kabul edilerek malzemenin dayanımı ile bu çatlak üzerindeki donatı alanı çarpılır.

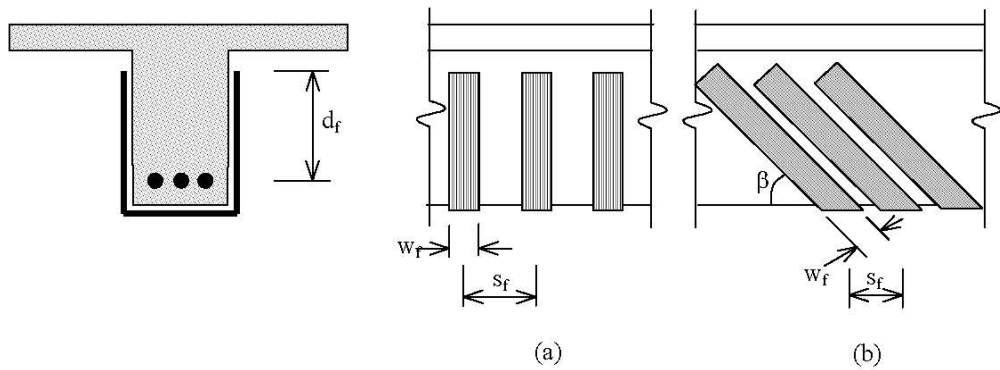
$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f} \leq 10,5 \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (5.12)$$

Burada A_{fv} FRP kesme donatısının alanıdır; yani şeridin kalınlığı (kirişin her iki tarafında da olursa $2t_f$ alınır.) ile FRP sarımının enidir (w_f) .

$$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (5.13)$$

n katman sayısı ve w_f ise şeridin enidir. Sürekli ve dikey kesme donatılarında sarımların arasındaki boşluk (s_f) ile sarımın genişliği (w_f) eşit olur. FRP şeritlerin arasındaki boşluklar (s_f) diyagonal çatlak oluşturmayacak şekilde geniş olmalıdır; bu yüzden aşağıdaki şartı sağlamalıdır.

$$s_f \leq w_f + \frac{d}{4} \quad (5.14)$$



Şekil 5.36 – FRP'nin alanını bulmak için kullanılan ölçüler

Pozitif moment bölgesinde şeridin derinliği (d_f); kesme çatlağının (45° varsayılır) yatay izdüşümü eksi, çatlağın üst noktasından şeridin üstüne olan mesafedir. Çünkü kesme çatlakları boyuna çelik donatıya ulaşana kadar dikey çatlaklar. Bu yüzden FRP şeridin etkin derinliği alttaki çelik donatının merkezinden itibaren alınmalıdır. Genelde şeritler döşemenin altında kirişin üst kısmına kadar uzanır. Bundan dolayı FRP şeridin etkin derinliği, döşemenin derinliğini (h_s) çeliğin derinliğinden (d) çıkararak bulunur.

β açısı, liflerin kirişin uzun eksenine yaptığı açıdır. Lifler potansiyel çatlaklara dik şekilde dizilirlerse daha etkin olurlar [30,31].



Şekil 5.37 – Kesme dayanımı FRP şeritlerle artırılmış betonarme kesit [33]

Kesme dayanımı hesabında, FRP levhaların ve şeritlerin maksimum gerilmesi elde edilemez. Bu yüzden etkin gerilmeyi bulmak için maksimum gerilme bir R redüksiyon katsayısıyla çarpılır.

$$f_{fe} = R \cdot f_{fu} \quad (5.15)$$

Redüksiyon katsayısı (R) kırılma şekline göre değişir. Kiriş kesitini tamamen sarmayan FRP sistemlerde, FRP donatının beton yüzeyden ayrılması 1. kırılma şeklidir. Diğer bir kırılma şekli betonda agrega bağlantısının kaybolmasıdır. Eğer kesme çatlağı genişliği çok olursa, betonun kesme dayanımını (V_c) sağlayan agrega bağlantısının kaybolur. Kesme çatlağı genişliğini kontrol etmek için FRP şeridin şekil değiştirmesi sınırlandırılmalıdır. Normal dayanımın altındaki ortalama gerilme düzeyinde, gerilme yoğunluğundan dolayı FRP donatısının kopması da diğer bir kırılma şeklidir.

İki kırılma şekli de dikkate alınarak R redüksiyon katsayısını bulmak için denklem geliştirilmiştir. Buna göre;

$$R = \frac{k_1.k_2.L_e}{11900\varepsilon_{fu}} \leq \frac{0,005}{\varepsilon_{fu}} \quad (5.16)$$

Bu denklemde 1. kısım, FRP'nin beton yüzeyden ayrılmasını gösterir. FRP'nin beton yüzeyden ayrışması ile ilgili kesme kapasitesi; FRP'nin rijitliğine, betonun dayanımına, FRP donatısının efektif derinliğine ve yüzeye bağlanma şekline bağlıdır.

Denklemdeki $0,005/\varepsilon_{fu}$ sınır değeri agrega bağlantısının kaybolmasını gösterir. Agrega bağlantısını sağlamak için kesme çatlaklarının açılmasını sınırlamak gerekir. FRP'nin şekil değiştirme değerlerini 0,004 ile 0,005 mm/mm arasında tutarak bu sınırlama gerçekleşir.

Diğer bir kırılma şekli olan FRP kopması göze alınmamıştır. Çünkü bu kırılma 0,005 mm/mm'nin üstündeki şekil değiştirmelerde oluşur, bu da agrega bağlantısının kaybolmasından sonra oluşur.

Bağlanma için redüksiyon katsayısının hesaplanmasından önce etkin bağlanma uzunluğu L_e bilinmelidir.

Etkin bağlanma uzunluğu, şeridin rijitliği arttıkça (daha çok katmanla) azalır. Bu da FRP levhanın gerilmesinin beton küçük bir alanına aktarılmasına ve betondaki gerilmelerin artmasına neden olur. Bu yüzden daha çok katman eklemek genel dayanımı artırsa da FRP sistemin verimini düşürür. Etkin bağlanma uzunluğunun denklemi şu şekildedir.

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} L_o \quad (5.17)$$

Bu denklemde L_o FRP'nin tek katmanının etkin bağlanma uzunluğudur.

$$L_o = \frac{461}{(t_f.E_f)^{0,58}} \quad (5.18)$$

Burada t_f şeridin kalınlığı, E_f ise FRP'nin elastisite modülüdür.

[5.16]. denklemdeki k_1 ve k_2 değerleri;

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} \quad (5.19)$$

Kesme çatlağı oluşuktan sonra, sadece FRP'nin çatlak üzerindeki etkin bağlanma uzunluğu kesmeyi taşır. Bu yüzden FRP donatının derinliği; FRP, kesiti tamamen sararak ankrajlanmıyorsa azaltılır. Sarma sistemine göre efektif derinliğin hesaplanması aşağıdaki denklemlere göre olur;

$$d_{fe} = d_f - L_e \quad \text{FRP U şeklinde sarılmışsa,} \quad (5.20)$$

$$d_{fe} = d_f - 2L_e \quad \text{FRP kirişin sadece iki tarafından bağlanmışsa,} \quad (5.21)$$

Daha önceden belirtildiği gibi eğer FRP kiriş kesitinin tamamını sarıyorsa bağlanma için sınır değer kullanmaya gerek yoktur ve R redüksiyon katsayısı maksimum değer alınabilir. [30],[31]

$$R = \frac{0,005}{\varepsilon_{fu}} \quad \text{Kiriş tamamen sarılmışsa ,} \quad (5.22)$$

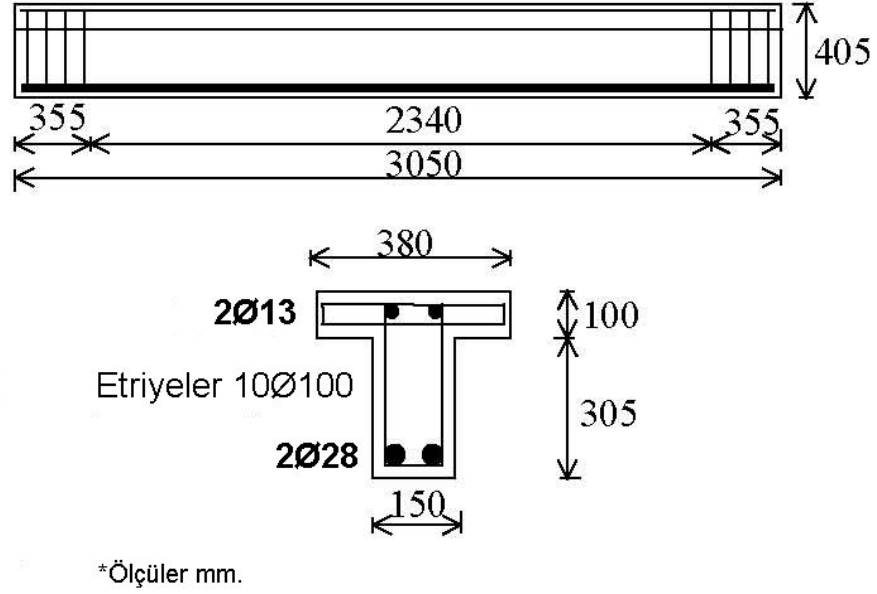
5.3.5 FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde kesme dayanımı deneyleri

Amerika Missouri Üniversitesinden Ahmed Khalifa ve Antonio Nanni'nin yaptığı bu deneysel çalışmada farklı parametreler kullanılmıştır. Bunlar;

- a) CFRP miktarı ve yerleşimi (sürekli levha ve şeritler)
- b) Bağlanma şekli (2 yüzünden ve U şeklinde)
- c) Lif yönü (90° ve 0°)
- d) Ankrajla sonlama (U sarmanın ankrajla sonlanmış ve sonlanmamış hali)

5.3.5.1 Test numuneleri ve malzemeleri

Testler 6 adet T kesitli betonarme kiriş üzerinde yapılmıştır. Numunelerin özellikleri aşağıda verilmiştir.

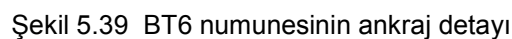


Şekil 5.38 Deneyde kullanılan numunelerin ölçüleri

Tablo 5.15 Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri

Malzeme	Ölçüler (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Beton	----		35		
Çelik donatı	Ø 28	470		730	200
	Ø 13	350		530	200
	Ø 10	350		530	200
CFRP	$t_f = 0.165$			3,790	228

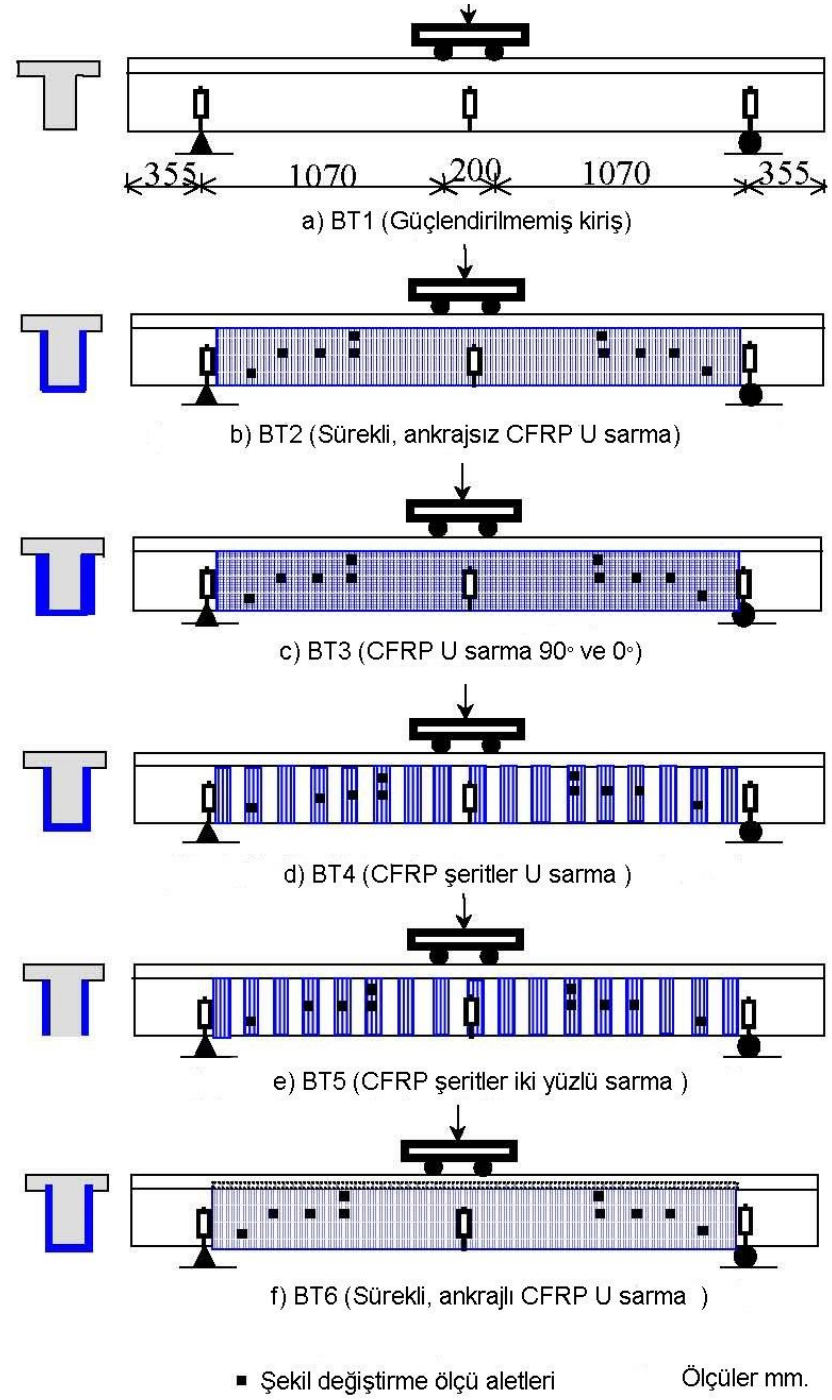
BT6 numunesi sistem olarak BT2 numunesi ile aynı şekilde güçlendirilmiştir. Fakat BT6 numunesinde U sarmaların sonları her iki taraftan da ankrajlanmıştır. Ankraj işleminde 15x15 mm.'lik bir kanal açarak CFRP levhanın uç kısımları bu kanal içine yapıştırılmıştır. Reçine emdirildikten sonra kanala 10 mm. çaplı cam FRP çubuk yerleştirilmiştir. Kanal daha sonra epoksi ile doldurularak betonla hem yüz hale getirilmiştir.[31]





Şekil 5.40 Ankrajlı BT6 numunesinin hazırlanması

Bütün numuneler basit kiriş olarak dört aşamalı yüklenmiştir. 1800 kN kapasiteli yükleme makinesi ile yük dağıtıcı çelik kiriş üzerine yükleme yapılmıştır. Böylece iki ayrı konsantre yük elde edilmiştir. Yük aşamalı olarak ve artarak etkilmiştir. İlk aşama betonun çatlamasından önce mekanik ve elektronik ekipmanların doğru çalışıp çalışmadığını kontrol etmek için yapılmıştır. 2. ve 3. aşamalar maksimuma erişilmeden yapılmıştır. Bu yüklemelerle sistemin stabilitesi kontrol edilir. Etkiyen yük karşısındaki çökme miktarı eğrileri bu yüklemelerin zarf eğrileridir. Dikey yer değiştirmeleri ölçmek için dört adet lineer değişken diferansiyelli transformatör (LVDT) kullanılmıştır. İki LVDT açıklık ortasına kirişin 2 yüzüne, diğer ikisi de mesnetteki çökmeyi ölçmek için mesnetlere yerleştirilmiştir. Şekil değiştirme ölçerler kiriş yüzeyindeki FRP'lere, lif yönünde bağlanmıştır. Her kiriş için 10'ar tane şekil değiştirme ölçücü kullanılmıştır. BT1'de oluşan kesme çatlaklarının yerine göre, kesme çatlak oluşabilecek yerlere yerleştirilmişlerdir.



Şekil 5.41 Deneyde kullanılan numuneler ve sarılma şekilleri

5.3.5.2 Test sonuçları

BT1 kirişi yüklendiği zaman 110 kN'da kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. İlk oluşan kesme çatlakları açıklığın ortasında oluşmuştur. Bu ilk oluşan kesme çatlağı kiriş için kritik çatlaktır. Çünkü yük arttıkça çatlak açılmaya başlamıştır ve 180 kN' da kopmuştur.

BT2 kirişinde kopma başlangıcı, CFRP levhanın ayrılmasından sonra BT1'de kesme çatlağının olduğu yerde olmuştur. Bunu 310 kN'da kesme basınç kopması izlemiştir. Kirişi CFRP'lerle U şeklinde sarma kesme kapasitesinde %72 oranında artma sağlamıştır. FRP levhada elde edilen en büyük şekil değiştirme miktarı 0,0045 mm/mm olmuştur. Bu değer de CFRP'nin maksimum şekil değiştirmesinin %28 'ine denk gelmektedir. Eğer ayrılma engellenebilseydi, güçlendirme malzemesinden daha çok yararlanılırdı ve daha yüksek kesme kapasitesi elde edilebilirdi.

CFRP'leri 90° ve 0° sarılan BT3 kirişinde kopma şekli BT2' ye benzer şekilde olmuştur. BT2' ye göre kesme kapasitesinde fazla artış olmadan 315 kN'da kopma olmuştur. 90° yönündeki katman üzerine 0° yönlü katman eklemenin kesme kapasitesine hiçbir etkisi olmamıştır. Fakat yatay katman belki açıklığın, derinliğe oranı daha az olursa etkin olabilir ya da gövdenin dağılmasını engelleyebilir.

CFRP şeritlerle U şeklinde sarılmış olan BT4 kirişinde, diyagonal kesme çatlakları 140 kN' da görülmeye başlanmıştır. Çatlağın ilerlemesi BT1' de olduğu gibi yük arttıkça artmıştır. Kopma CRFP'nin ayrılmasından (beton yüzeyle beraber) dolayı diyagonal kesme çatlağında, kesme çatlağının merkeziyle üst kısmı arasında oluşmuştur. Böylece bu iki şerit kesme basınç kopmasından önce kırılmıştır. CFRP şeritte elde edilen maksimum şekil değiştirme değeri 0,01 mm/mm. dir. Bu değer de sürekli CFRP ile sarılan BT2 kirişinin şekil değiştirmesinin 2 katıdır. Etkiyen yük- CFRP şekil değiştirme grafiği aşağıda gösterilmiştir. Burada şekil değiştirme ölçü aletleri sg6,sg7,sg8,sg9 ve sg10 mesnetten sırasıyla 20, 450, 575, 700 ve 700 mm. uzaklıklarla yerleştirilmiştir. BT4 kirişinin ani kopması 324 kN' da olmuştur. Kesme kapasitesi, sürekli CFRP ile sarılmış BT2 kirişine yakın çıkmıştır. Buradan FRP miktarları için optimum bir değer olduğunu ve bu değerden sonra güçlendirme etkisinin artmadığını görüyoruz [31].

U sarmalı sürekli levhalarda CFRP'nin betondan ayrılması diyagonal kesme çatlağının gelişme uzunluğu yeterli olmayan üst noktasından başlar. Bu da ani yük artışlarının çevresi tarafından taşınmasına yol açar. Bundan dolayı, kirişin kopmasıyla beraber, kiriş çatlağı üzerindeki levhanın ayrılması, FRP miktarı ne olursa olsun, hızla yaygınlaşır.

Kirişin sadece iki yüzüne CFRP şerit uygulanan BT5 kirişinde, 140 kN'da geniş diyagonal kesme çatlağı oluşmuştur ve bunun yayılması BT1 ve BT4 gibi yük arttıkça artmıştır. 243 kN'da CFRP şeritlerin ayrılmasından sonra oluşan kesme basınç kopmasıyla gevrek kırılma meydana gelmiştir. CFRP'nin ayrılma yeri BT4' e göre farklıdır. Burada ayrılma kesme çatlağıyla alt sonu arasında oluşmuştur. CFRP şeritlerle kirişi iki tarafından güçlendirmek kesme kapasitesini %35 oranında artırmıştır.

Ankrajlı U sarma yapılan BT6 kirişinin kesme kapasitesinde belirgin bir artış olmuştur. Ayrıca kopma şekli diğerlerinden farklı olarak esnemenin dolaylı olmasıdır. CFRP sarmada ölçülen maksimum dikey şekil değiştirme değeri 0,0063 mm/mm dir, bu da maksimum değerin %40'ıdır. Bu değer kesin değildir çünkü şekil değişimi ölçerler çatlağa göre yerleştirilmişlerdir. BT2 ve BT6 kirişleri için yük-CFRP şekil değiştirme ilişkisi aşağıda gösterilmiştir. İki kirişte de kesme çatlağı aynı yükleme değerinde başlar fakat BT6'ya uygulanan maksimum yük daha fazladır. BT6 kirişinin CFRP sarmasında ayrılma hiç gözlenmemiştir. Esnemenin dolaylı kırılma koptuktan sonra, kesme çatlağının sonunda mesnedin yakınında CFRP sarmada kopma görülmüştür.

BT6 kirişinin yük taşıma kapasitesi 442 kN dur ve benzer şekilde güçlendirilmiş ankrajsız BT2 kirişinden %42, güçlendirilmemiş BT1 kirişinden %145 daha fazladır. Ayrıca BT6 kirişi, BT2 kirişinden daha rijit ve daha sünektir. Açıklık ortasındaki çökme miktarı ise, BT2'deki kopmadan önceki çökme miktarının 3 katıdır.



a) BT1



b)BT2



c) BT3



d)BT4

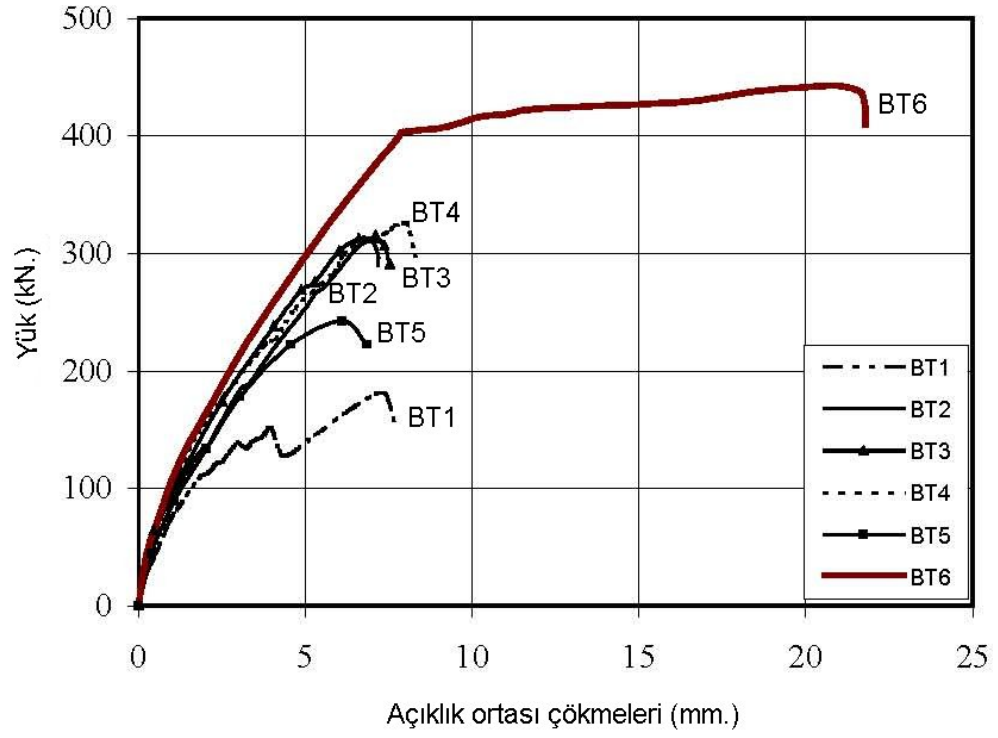


e) BT5

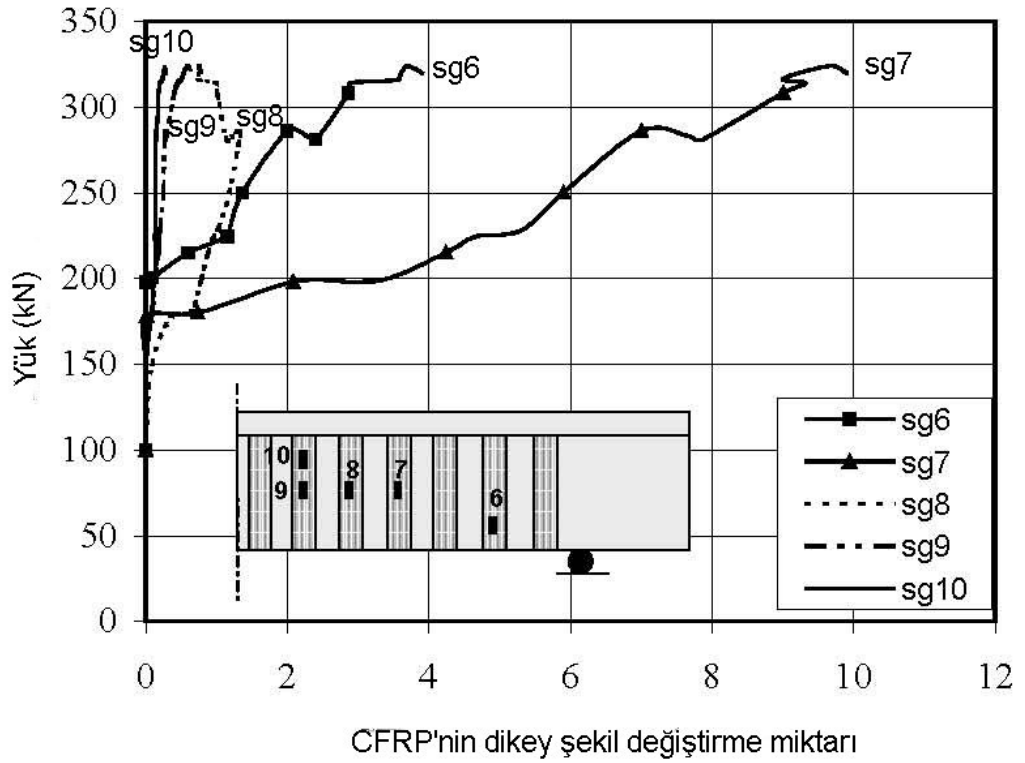


f)BT6

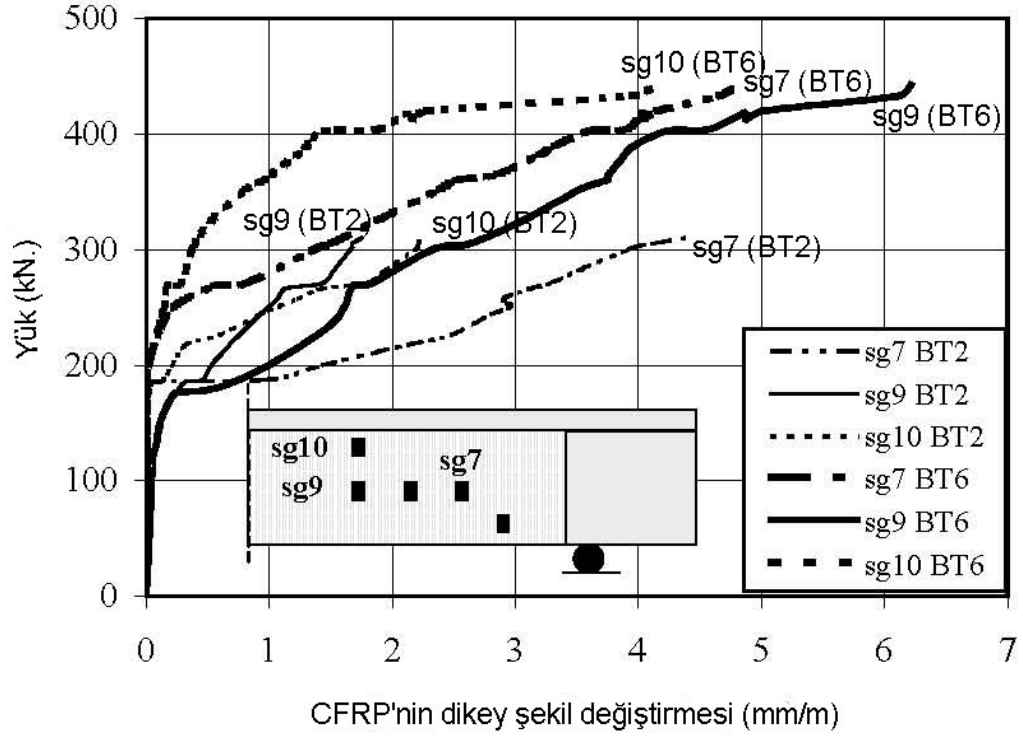
Şekil 5.42 Deneyde kullanılan numunelerin kırılmaları



Şekil 5.43 Deney numunelerinin yük altında açıklık ortası çökmeleri



Şekil 5.44 – BT4 numunesi için yük altında dikey şekil değiştirme miktarları



Şekil 5.45 BT2 ve BT6 numunelerinin yük altında dikey şekil değiştirmeleri

5.3.5.3 Deney numunelerinin ACI standardına göre çözümü

a) Sürekli ve U sarmalı CFRP Levha ile (BT2 numunesi)

Redüksiyon katsayısının hesaplanması için önce efektif derinlik bulunur,

$$d_{fe} = d_f - L_e \quad (\text{U sarmalı sistemlerde})$$

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot L_o \quad n = 1 \rightarrow L_e = L_o$$

$$L_o = \frac{461}{(t_f \cdot E_f)^{0,58}} = \frac{461}{(0,165 \cdot 228)^{0,58}} = 56,22 \text{ mm.}$$

$$d_f = d - h_s = 36,5 - 10 = 26,5 \text{ cm.}$$

$$d_{fe} = 26,5 - 5,6 = 20,9 \text{ cm.}$$

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

Redüksiyon katsayısının hesabı için k_1 ve k_2 katsayıları bulunur,

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27} \right)^{2/3} = \left(\frac{35}{27} \right)^{2/3} = 1,19 \quad k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} = \frac{20,9}{26,5} = 0,79$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\sigma}{E_f} = \frac{3790}{228000} = 0,0166$$

$$R = \frac{1,19 \cdot 0,79 \cdot 56,22}{11900 \cdot 0,0166} \leq \frac{0,005}{0,0166} \rightarrow 0,267 \leq 0,3 \quad \checkmark$$

Bu değer maksimum sınırdan düşük çıktığı için kullanabiliriz.

FRP'nin çekme gerilme değeri redüksiyon katsayısıyla çarpılarak etkin gerilme bulunur.

$$f_{fe} = R \cdot f_{fu} = 0,267 \cdot 3790 = 1012 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f}$$

$$V_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f}$$

Sürekli levhalarda $w_f = s_f$ olduğu için denklemde birbirlerini götürürler.

$$\beta = 90^\circ \rightarrow \sin \beta = 1 \quad \cos \beta = 0$$

$$V_f = 2 \cdot 1 \cdot 0,165 \cdot 1012 \cdot 265 = 88499 \text{ N} = 88,50 \text{ kN}$$

b) U sarmalı CFRP şerit ile (BT4 numunesi)

$$d_{fe} = d_f - L_e$$

$$L_e = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot L_o \quad n=1 \rightarrow L_e = L_o$$

$$L_o = \frac{461}{(t_f \cdot E_f)^{0,58}} = \frac{461}{(0,165 \cdot 228)^{0,58}} = 56,22 \text{ mm.}$$

$$d_f = d - h_s = 36,5 - 10 = 26,5 \text{ cm.}$$

$$d_{fe} = 26,5 - 5,6 = 20,9 \text{ cm.}$$

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

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} = \left(\frac{35}{27} \right)^{2/3} = 1,19 \quad k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} = \frac{20,9}{26,5} = 0,79$$

$$\varepsilon_{fu} = \frac{\sigma}{E_f} = \frac{3790}{228000} = 0,0166$$

$$R = \frac{1,19 \cdot 0,79 \cdot 56,22}{11900 \cdot 0,0166} \leq \frac{0,005}{0,0166} \rightarrow 0,267 \leq 0,3 \quad \checkmark$$

$$f_{fe} = R \cdot f_{fu} = 0,267 \cdot 3790 = 1012 \text{ MPa}$$

$$A_f = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f = 2 \cdot 1 \cdot 0,165 \cdot 50 = 16,5 \text{ mm}^2$$

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f} = \frac{16,5 \cdot 1012 \cdot 1,265}{125} = 35399 \text{ N} = 35,4 \text{ kN}$$

Şerit aralığı kontrolü:

$s_f = 125 \text{ mm.}$, $w_f = 50 \text{ mm.}$

$$s_f \leq w_f + \frac{d}{4} \rightarrow 125 \leq 50 + \frac{365}{4} = 141,25 \quad \checkmark$$

c) İki yüzden CFRP şeritler ile sarma (BT5 numunesi)

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

İki yüzden sarılan kesitlerde etkin derinlik hesaplanırken etkin bağlanma uzunluğunun iki katı çıkarılır.

$$d_{fe} = d_f - 2 \cdot L_e = 26,5 - 2 \cdot 5,6 = 15,3$$

$$k_2 = \frac{d_{fe}}{d_f} = \frac{15,3}{26,5} = 0,577$$

$$R = \frac{1,19 \cdot 0,577 \cdot 56,22}{11900 \cdot 0,0166} \leq \frac{0,005}{0,0166} \rightarrow 0,195 \leq 0,3$$

$$f_{fe} = R \cdot f_{fu} = 0,195 \cdot 3790 = 739 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f} = \frac{16,5 \cdot 739 \cdot 1 \cdot 265}{125} = 25850 \text{ N} = 25,85 \text{ kN}$$

d) U sarmalı, sürekli ve ankrajlı CFRP levhalar ile (BT6 numunesi)

Bu numune mevcut standartlara göre hesaplanamaz. Fakat ankrajlı olduğu için tam sarma sistemlere yakın bir dayanımı çıkar. Eğer sistemi tam sarılmış olarak çözersek;

$d_{fe} = d_f$ kabul edilir.

$$R = \frac{0,005}{\varepsilon_{fu}} = \frac{0,005}{0,0166} = 0,3$$

$$f_{fe} = R \cdot f_{fu} = 0,3 \cdot 3790 = 1137 \text{ MPa}$$

$$V_f = \frac{A_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f}$$

$$V_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f}{s_f}$$

$$w_f = s_f \text{ (sürekli levhalarda)}$$

$$\beta = 90^\circ \rightarrow \sin \beta = 1 \quad \cos \beta = 0$$

$$V_f = 2 \cdot 1 \cdot 0,165 \cdot 1137 \cdot 305 = 114439 \text{ N} = 114,44 \text{ kN}$$

Numune	Güçlendirme Şekli	V_f deney (deneyle bulunan)	V_{fhesap} (hesapla bulunan)	ΦV_{fhesap} (hesapla bulunanx0,7)	Kopma Şekli
BT2	Sürekli ve U Sarma	65	88,5	61,95	CFRP ayrılması
BT3	2 Katmanlı (90°/0°)	67,5	88,5	61,95	CFRP ayrılması
BT4	U sarma, şeritli	72	35,4	24,78	CFRP ayrılması
BT5	İki yüzden sarma, şeritli	31,5	25,85	18,09	CFRP ayrılması
BT6	Sürekli ve Ankrajlı U sarma	131	114,44	80,10	Esname kırılması

Tablo 5.16 – Numunelerin deneysel ve analitik sonuçlarının karşılaştırılması

e) TS 500' e göre Betonarme kesitin kesme kapasitesi

$$V_r = V_c + V_s$$

1- Betonun taşıdığı kesme kuvveti

$$V_c = 0,8.V_{cr}$$

$$V_{cr} = 0,65.f_{ctd}.b_w.d$$

$$V_{cr} = 0,65.1,35.150.365 = 48043 \text{ N} = 48 \text{ kN}$$

$$V_c = 0,8.48 = 38,4 \text{ kN}$$

2- Etriyenin taşıdığı kesme kuvveti

$$V_s = A_{ss}.f_{ysd} .(\sin \alpha + \cos \alpha). d / s$$

$$A_{ss} = 2.A_0$$

$$V_s = 2.0,79.35.36,5 / 10 = 201,8 \text{ kN}$$

Numunelerin hesap kesme dayanımları

$$\Phi V_n = 0,85(V_c + V_s) + 0,7V_f$$

$$BT1 \quad \Phi V_n = 0,85(38,4 + 201,8) + 0,7 \cdot 0 = 204,17 \text{ kN.}$$

$$BT2 \quad \Phi V_n = 0,85(38,4 + 201,8) + 0,7 \cdot 88,5 = 266,12 \text{ kN.}$$

$$BT3 \quad \Phi V_n = 0,85(38,4 + 201,8) + 0,7 \cdot 88,5 = 266,12 \text{ kN.}$$

$$BT4 \quad \Phi V_n = 0,85(38,4 + 201,8) + 0,7 \cdot 35,4 = 228,95 \text{ kN.}$$

$$BT5 \quad \Phi V_n = 0,85(38,4 + 201,8) + 0,7 \cdot 25,85 = 222,27 \text{ kN.}$$

$$BT6 \quad \Phi V_n = 0,85(38,4 + 201,8) + 0,7 \cdot 114,44 = 284,28 \text{ kN.}$$

Bu deneye göre;

- CFRP ile sarılmış sistemlerde yeterli ankraj sağlanırsa önemli derecede performans artışı elde edilir.
- Kesitin sadece iki tarafını sarmak U sarmaya göre daha az kesme dayanımı kazandırır.
- 0°'lik katmanın kesme kapasitesine etkisi yoktur. Tasarım aşamasında yük yönü ile lif yönüne mutlaka dikkat edilmelidir.
- BT4'deki CFRP miktarı BT2'nin %40 'ı olmasına rağmen birbirlerine yakın sonuçlar çıkmıştır. Buradan FRP miktarının bir optimum değeri olduğunu anlıyoruz.
- CFRP şeritler her ne kadar CFRP levhalara yakın performans gösterebilirler de kullanılması pek tavsiye edilmez. Çünkü şeridin tekinde oluşabilecek bir problem bütün sistemi etkiler.

6.SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada öncelikle betonarme yapılarda depremten dolayı oluşan hasar çeşitleri nedenleriyle beraber incelenmiştir. Betonarme yapı elemanlarındaki hasarları sınıflandıracak olursak taşıyıcı yapı elemanlarındaki hasarlar ve taşıyıcı olmayan yapı elemanlarındaki hasarlar olarak 2'ye ayırabiliriz.

Ülkemizdeki yapıların birçoğu gerekli yapı standartlarını sağlamamaktadır. Bu yüzden taşıyıcı elemanlar ya hasarlıdır ya da beklenen bir deprem için gerekli dayanımı sağlamamaktadır. Bu tip yapıların yıkılarak tekrar yapılması oldukça büyük maliyet tutacağı için bu yapıların mümkünse onarılması ya da güçlendirilmesi gerekir.

Fakat bu kararın verilmesi, tecrübeli ve bilgi sahibi kişilerin onayına sunulmalıdır. Yapıların onarım ve güçlendirilmesi çoğu zaman bir yapıyı yeni baştan yapmaktan daha karmaşıktır. Hasar düzeyi belirlenerek, onarım ve güçlendirmenin yapıda nerelere ve ne şekilde yapılacağına karar verilmelidir.

Yapılarda onarım ve güçlendirme, çeşitli yöntem ve malzemelerle yapılabilir. Onarım ve güçlendirmeden önce çok iyi projelendirme yapılmalı ve yapı için en uygun yöntem seçilmelidir. Kullanılacak bu yöntemler yapının mevcut durumuna göre farklılıklar gösterebilir. Uygun yöntemin seçilmemesi, gerekli fiziksel ve mekanik özellikleri sağlamayacağı gibi bazen de yapının tekrar yapım maliyetinden fazla olur. Ayrıca bu yöntemlerin çoğunun, uygulamasının fazla zaman alması da pek istenmeyen bir durumdur.

Bu malzemeler arasında oldukça yeni olan ve ülkemizde kullanımı yaygınlaşmaya başlayan bir diğer malzeme de "Lifle Güçlendirilmiş Polimerler" (FRP) dir. FRP'ler hızlı ve rahat uygulanabilmesinin yanında birçok özellikleriyle diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. En büyük dezavantajları ise pahalı olmalarıdır.

FRP sistemler donatılar, matriksler, katkı malzemeleri ve dolgu malzemelerinden oluşur. Donatı malzemesi olarak inşaat mühendisliğinde 3 çeşit lif kullanılmaktadır. Bunlar arasında en iyi performansı karbon lifler gösterir. Cam lifler de çok ucuz oldukları için karbon liflere alternatif olarak kullanılabilir. Matriks

malzemeleri; donatıları bir arada tutan, gerilmeleri onlara aktaran ve dış etkenlere karşı koruyan bir yapıştırıcı olduğu için çok iyi seçilmelidir. Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybettikleri unutulmamalıdır.

FRP'ler çelik donatılar gibi paslanmazlar ve onlardan daha yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi lineerdir ve gevrek olarak koparlar. Çelik akma özelliğinden dolayı bir miktar güvenlik seviyesini sağlar; fakat FRP'lerin kopması ani ve gevrek olduğu için hesaplamalarda dikkatli olmak gerekir. Çelikten daha az yoğunluğa sahip oldukları için uygulama sırasında taşınması çok kolaydır.

FRP'ler onarım ve güçlendirme alanında yeni sayılabilecek bir malzeme olduğu için durabilitesi konusunda kesin bir şey söylenemez. Durabilite testlerinin çoğunun hızlandırılmış laboratuvar testleri olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca karşılaşılan durabilite problemlerinin çoğunun matriksten kaynaklanması da reçine seçiminin önemini vurgulamaktadır.

FRP uygulamalarından önce yüzeyin çok iyi temizlenmesi ve gerekli yerlerin tamir harçları ve epoksi reçinelerle tamir edilmesi gerekir. FRP'lerin kesme kuvvetleri altında, oldukça dayanımsız olduğu göz önüne alınarak kolon ve kirişlerin köşeleri yuvarlatılmalıdır.

FRP sistemlerin tasarımındaki en önemli ve dikkat edilmesi gereken konu lif yönleridir. FRP'ler lif yönünde çok büyük çekme dayanımları gösterirler fakat lif yönüne dik yönde çok zayıftırlar.

FRP'lerle güçlendirilmiş sistemlerde en çok görülen kopma şekli FRP'nin beton yüzeyden ayrılmasıdır, bu bazen beton tabakanın içinde ayrılma şeklinde de görülebilir. FRP sistemlerden en iyi şekilde faydalanmak için elemanlar mutlaka tamamen sarılmalıdır. Eğer tam sarma yapılamıyorsa en azından ankrajın tamamlanması gerekir.

Tasarımı ve işçiliği iyi yapılmış, FRP ile onarılmış ve güçlendirilmiş yapı sistemlerinde çok iyi sonuçlar alınmaktadır. Bu yöntemin kullanımını kontrol etmek ve yapılarımızın güvenliğini arttırmak için ülkemizde FRP sistemler için bir yapım ve uygulama standardının gerekli olduğunu görüyoruz. FRP sistemlere olan ilginin artması bu malzemenin yaygınlaşmasını ve maliyetinin düşmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ergin, C.**, 1998. Betonarme yapıların onarım ve güçlendirme teknikleri ve çok katlı bir yapıya uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Dörttepe, U.**, 2001. Betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Öztürk, H.**, 1998. Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme teknikleri ve çeşitli tekniklerle onarılıp güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışlarının karşılaştırılması olarak incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Aydoğan, M. ve Güler K.**, 2003. Ders Notları, Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi Dersi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İstanbul.
- [5] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı İkinci Baskı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [6] **REMR**, 2001. Repair Evaluation Maintenance Rehabilitation Technical Note CS.-MR.-3.9, USA
- [7] **Yerci, N.**, 2001. Betonarme binalarda onarım, güçlendirme ve bir betonarme yapının güçlendirme yönünden incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Celep, Z.**, 2000. Mevcut Betonarme Binaların Deprem Güvenliğinin Belirlenmesi ve Güçlendirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- [9] **Yiğit, Y.**, 2002. Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme yöntemleri ve bir güçlendirme uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **YKS**, 2004. Yapkim Yapı Kimya Sanayi A.Ş Onarım ve Güçlendirme Tanıtım Kitapçığı, Degussa Construction Chemicals, İstanbul.
- [11] **İlki, A. and Kumbasar N.**, 2003. Compressive Behaviour of carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-Circular Cross-Sections, Journal Of Earthquake Engineering **Vol.7** No.3, Imperial College Press, İstanbul.

- [12] **Carolin, A.**, 2001. Strengthening of Concrete Structures with CFRP, *Licentiate Thesis*, Lulea University Of Technology, Sweeden.
- [13] **Bohot, D.**, 1999. Material Properties of CFRP, Research Experiences for Undergraduates, Washington University, USA.
- [14] **Taşdemir, M.A. ve Özkul, M.H.**, 2002. Betonarme Yapılarda Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri, Prof. Dr. Kemal Özden'i Anma Semineri Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi alanında Gelişmeler Bildiriler Kitabı 2. Baskı, Maya Basın, İstanbul.
- [15] **Atmaca, S.**, 1997. Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Bonded FRP Plates, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi , İzmir.
- [16] **Akman, M. S.**, Taşıyıcı beton elemanlarda donatı, ön veya art germe kablosu olarak kullanılan lif takviyeli polimer çubuklar, İ.T.Ü., İstanbul.
- [17] **www.admc.aeat.co.uk** , 2005
- [18] **Koga, M. and Ohtsu, M.**, A Retrofitting System For Concrete Structures with CFRP-Sheet and CFRP-Strand, Japan.
- [19] **ESCWA**, 2001. Review of Science and Technology in ESCWA Member countries Issue No:4, Economic and social Commission for Western Asia.
- [20] **www.mdacomposites.org** , 2005
- [21] **OAQPS**, 2001. Economic Impact Analysis of Proposed Reinforced Plastics NESHAP Final Report, Office Of Air Quality Planning and Standarts-OAQPS U.S Environmental Protection agency, USA.
- [22] **Kleineberg, M., Wenner, U. and Hanke, M.**, Cost Effective CFRP-Fuselage Manufacturing with Liquid Resin Infusion Technologies, DLR Institute Of Structural Mechanics Lilienthalplatz , Germany.
- [23] **Dejke, V.**, 2001. Durability of FRP Reinforcement in Concrete, *Licentiate Thesis*, Chalmers University Of Technology, Sweeden.
- [24] **Kachlakev, D.I.**, Strengthening Structures Using FRP Composite Materials, California Polytechnic State University, USA.

- [25] **Busel, J.**, Introduction to Composites, ACI Subcommittee 440E Education, Charles Godspeed University of New Hampshire, USA.
- [26] **www.netcomposites.com** , 2005
- [27] **www.plasticnews.com** , 2005
- [28] **www.spsystems.com** , 2005
- [29] **Nordin, H.**, 2003. Strengthening of Concrete Structures with CFRP, *Licentiate Thesis*, Lulea University Of Technology, Sweden.
- [30] **Wabo**, Mbrace Composite Strengthening System Design Guide
- [31] **Khalifa, A. and Nanni A.**, 2000. Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP, University of Missouri at Rolla, USA.
- [32] **Rizkalla, S., Hassan, T. and Hassan N.**, 2001. Design Recommendations for The Use of FRP as Reinforcement and Strengthening of Concrete Structures, North Carolina State University, USA
- [33] **www.sika.com** , 2005
- [34] **Khalifa, A., Gold, W.J, Nanni, A. and Abdel Aziz M.I.**, 1998 Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of flexural Members, ASCE Journal of Composites for Construction, Vol.2 No.4, USA.
- [35] **Deuring, M.**, CFRP Laminates in The Construction Industry, Sika,
- [36] **Meier, H.**, 1998. Shear Strengthening with CFRP L-shaped Plates, EMPA, Zurich.
- [37] **Sika** 1999. Carbodur Structural Strengthening System Teknik Dökümanları, İstanbul.
- [38] **Carolín, A. and Taljsten B.**, 2003. Experimental Study on Strengthening For Increased Shear Bearing Capacity, Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements, Sweden
- [39] **Nanni, A.**, 2003. North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues, Construction and Building Materials, USA.

- [40] **Sonobe, Y., Fukuyama, H., Okamoto, T and Kani N.**, 1997. Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures, Journal Of Composites for Construction.
- [41] **İlki, A., Kumbasar, N. And Koç, V.**, Güçlendirilmiş Hasarlı ve Hasarsız Yapı Elemanlarının Eğilme ve Eksenel Yükleme Deneyleri, YKS Malzeme Tanıtım Kitapçığı, İstanbul.
- [42] **Bayülke, N.**, 2001. Depremlerde Hasar Gören Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 9. Baskı, İzmir.
- [43] **Berktaş, İ.**, 1995. Betonarme 1 Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Baskı, İstanbul.
- [44] **Almakt, M.M., Balazs L.G. and Pilakoutas K.** 1998. Strengthening of RC Elements by CFRP Plates Local Failure, Technical University of Budapest , Budapest.
- [45] **Khalifa, A., Alkhrdaji, T., Nanni, A. and Lansburg, S.**, 1999. Anchorage Of Surface Mounted FRP Reinforcement, Concrete International: Design and Construction Vol.21 No.10, USA.
- [46] **www.mbrace.com** , 2005
- [47] **TMMOB**, 1998, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İnşaat Mühendisleri Odası 9. Baskı, İzmir.
- [48] **Van Gemert, D., Ignoul, S. and Brosens, K.** 2004. Strengthening of Concrete Constructions with Externally Bonded Reinforcement , Lecce.

EKLER

EK A



Eminönü Yeni Camii arkasındaki Türkiye İş Bankasına ait binaya CFRP ile güçlendirme yapılmıştır.



Yığma yapı olan bu binanın iç yüzeyindeki sıva sökül müştür.



Güçlendirme yapılacak bölgelere dolgu malzemesi sürülerek, projede belirtilmiş yerlere ankraj için delikler açılmıştır.



Dolgu malzemesinin üzerine reçine sürülür.



FRP Levhalar istenilen ölçülerde kesilir.



Levhalar reçine sürülen yerlere yapıştırılır.



FRP levha üzerine tekrar reçine sürülür.



50 cm. lik FRP parçaları kesilir.



Bu FRP parçaların içine reçine sürülür.



Reçineli bu parçalar sarılarak rulo haline getirilir.



Enejsiyon aletinin içine reçine doldurulur.



Önceden açılmış deliklerin içine reçine enjekte edilir.



FRP Rulo parçalar, yarısı dışarıda kalacak şekilde, bu deliklerin içine yerleştirilir.



Rulonun dışarıda kalan kısmı parça parça kesilerek açılır.



Parçalar halinde açılmış FRP, yüzeye yapıştırılarak ankraj tamamlanmış olur.



Bütün ankrajlar tamamladıktan sonra yüzeye son kat solvent sürülür.



Solvent sürölürken bir yandan da kumlama işlemi başlar.



Kumlamadan sonra yüzey sıvanır ve yüzey boyaya hazır hale gelir.

ÖZGEÇMİŞ

14 Eylül 1980 tarihinde Trablus-Libya’da doğdum. İlköğretimimi İlhami Ahmed Örnekal İlkokulunda tamamladıktan sonra 1991–1998 yılları arasında Ümraniye Anadolu lisesinde okudum.

Lisans eğitimimi 1998–2002 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamlayarak, 2002 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesinde yüksek lisans programına başvurdum. Halen İstanbul Teknik Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği anabilim dalı Deprem Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimimi sürdürmekteyim.