

T.C.
ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI
DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNİK ARAŞTIRMA VE KALİTE KONTROL DAİRESİ BAŞKANLIĞI

YAYIN NO : MLZ - 878

ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON



(İKİNCİ BASKI)

TEMMUZ, 1999
ANKARA

T.C.
ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI
DEVLET SU İŞLERİ GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
TEKNİK ARAŞTIRMA VE KALİTE KONTROL DAİRESİ BAŞKANLIĞI

YAYIN NO : MLZ - 878

ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON

DAİRE BAŐKANI : Doç. Dr. Ergün DEMİRÖZ
DAİRE BAŐKAN YRD. : Dr. Yusuf Z. GÜRESİNLİ
FEN HEYETİ MÜDÜRÜ : İnŐ. Müh. Ali ÖZTÜRK
YAZAN : Kim. Müh. Ali UĞURLU

(İKİNCİ BASKI)

TEMMUZ, 1999
ANKARA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
TABLULARIN LİSTESİ	iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	v
1. GİRİŞ	1
2. LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KOMPOZİTLERİ	2
2.1 Liflerin (Fiber) Tanımı	7
2.2 Kompozitler	14
2.3 Liflerle Güçlendirilmiş Kompozitler	16
2.3.1 Matris Özellikleri	16
2.3.2 Liflerle Donatılı Kompozitler	17
3. ÇELİK LİFLERİN BETON İÇERİSİNDEKİ DAVRANIŞI	21
3.1 Betonun Yük Altındaki Davranışı	22
3.2 Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı	26
3.2.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Yük Altındaki Davranışı	27
3.3 Çelik Liflerin Betona Kazandırdığı Nitelikler	30
4. ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN TEKNİK ÖZELLİKLERİ	34
4.1 Taze Beton Özellikleri	36
4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri	48

4.2.1 Enerji Emme Kapasitesi (Tokluk)	48
4.2.2 Eğilmede Çekme Dayanımı	68
4.2.3 Basınç Dayanımı	74
4.2.4 Kaviyasyon Hasarları Dayanımı	79
4.2.5 Yorulma Dayanımı	85
4.2.6 Darbe Dayanımı	86
4.2.7 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonlarda Rötre	89
4.2.8 Dayanıklılık	100
5. ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN TASARIMI, ÜRETİMİ, TAŞINMASI, YERLEŞTİRİLMESİ VE BAKIMI	102
5.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Tasarımı, Üretimi Ve Taşınması	102
5.1.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Tasarımı	102
5.1.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Karışım Esasları, Karışım Teknikleri ve Taşınması	104
5.1.2.1 Karışım Esasları	104
5.1.2.2 Karışım Sırasında Dikkat Edilecek Hususlar ve Karışım Teknikleri	112
5.1.2.3 Taşıma	120
5.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Yerleş- tirilmesi Ve Tesviye Edilmesi	124
5.3 Kalite Kontrol	127

6. ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN KULLANIM ALANLARI VE ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ PÜSKÜRTME BETON	131
6.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton Uygulamaları..	131
6.1.1 Endüstriyel Döşemeler	133
6.1.2 Havaalanı Kaplamaları	137
6.1.3 Liman Kaplamaları	138
6.1.4 Ateşe Dayanıklı Beton Yapılar	139
6.1.5 Önyapımlı Beton Elemanlar	140
6.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Püskürtme Beton Uygulamaları	141
6.2.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Püskürtme Betonun Teknik Performansı	149
6.2.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Püskürtme Betonun Uygulama Farklılıkları ve Ekonomik Avantajları	151
7. ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN SU YAPILARINDA KULLANILMASI	154
7.1 Giriş	154
7.2 Su Yapılarındaki Deneysel Uygulamalar	159

TABLOLARIN LİSTESİ

Tablo	Sayfa
2.1 Değişik cins liflere ait fiziksel özellikler.....	9
2.2 Çelik liflere ait fiziksel özellikler.....	10
4.1 Tokluk (Elastik şekil değiştirme) indekslerinin değerlendirme kriterleri.....	59
5.1 Çelik lifli beton karışımlarında kum içerisinde bulunması gerekli 0,25 mm'den küçük ince malzeme miktarı	107
5.2 Değişen agregaya maksimum tane çapına göre betonda kullanılması gerekli lif miktarı	108
5.3 Çelik lifli betonlar için önerilen tane dağılımı değerleri.....	111
6.1 Endüstriyel döşemeler için önerilen çelik lif tipleri ve dozajları	135
6.2 Çelik lifli püskürtme beton için önerilen tane dağılımı değerleri	145
6.3 Çelik lifli püskürtme beton için kullanılan değerlendirme kriterleri	148
7.1 Çelik liflerle güçlendirilmiş beton ile inşa edilen ve onarılan barajlar	160

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
2.1 Çelik lif tipleri ve kesitleri	11
2.2 Değişik çelik liflerin enkesitleri	12
2.3 Kırılğan lif - sünek matrisli sistemlerde tipik gerilme - deformasyon davranışı	18
2.4 Kırılğan matris - sünek lifli sistemlerde tipik gerilme deformasyon davranışı	19
2.5 Kırılğan matris - sünek lifli sistemlerde lif hacmi oranı(V_f)'na bağlı olarak mukavemetin değişimi	20
3.1 Betonun yük altındaki gerilme - deformasyon davranışı	23
3.2 Çelik liflerle güçlendirilmiş bir betona ait gerilme - deformasyon eğrisi	28
3.3 Çelik liflerle güçlendirilmiş beton ile lifsiz betonun yük - deformasyon davranışlarının karşılaştırılması	30
3.4(a,b) Çelik lifli betonlarda liflerin çatlak sonlarını takviye etmesi sonucu çatlak yayılmalarının durdurulması	31
3.5 Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda lifler aracılığıyla gerilmenin dağıtılması	32

4.1	Çelik lifli ve lifsiz betonlarda ters koni yöntemi ile yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının karşılaştırılmaları	39
4.2	Çelik lifli betonlar üzerinde değişik yöntemler kullanılarak yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının değerlendirilmesi	40
4.3	Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda işlenebilirliğin lif hacmi ile değişimi	42
4.4	Lifle güçlendirme indeksine göre işlenebilirliğin değişimi	43
4.5	Lif şekli ve lif görünüş oranına göre işlenebilirliğin değişimi	44
4.6	Lif hacmi ve görünüş oranının büyümesiyle işlenebilirlikteki azalmalar	45
4.7	Lifle güçlendirme indeksi ve lif tipleri esas alınarak ölçülmüş işlenebilirlik değerleri.....	46
4.8	Betonda katkı(akışkanlaştırıcı)kullanımının işlenebilirlik üzerine olan etkisi	49
4.9	Çelik lifli betona ait tipik bir yük - deformasyon eğrisi	52
4.10	Tokluk deneyi yükleme şekli ve deney düzeneği	53
4.11	Tokluk indekslerinin hesaplanması için çizilmiş gerilme-deformasyon eğrisi	56
4.12	Tokluk indekslerinin hesaplanması için şematize edilmiş gerilme-deformasyon eğrisialanlar	58

4.13,4.14 Lif hacmi fraksiyonuna ve lif tipine göre tokluğun değişimi	61
4.15,4.16 Lif tipi ve lif görünüş oranına göre tokluğun değişimi	62
4.17,4.18 Lif tipi ve lif görünüş oranına göre tokluğun değişimi	63
4.19,4.20 Lifle gçlendirme indeksi ve lif tipine göre tokluğun değişimi	65
4.21,4.22 Yüksek dayanımlı betonlarda lif hacmi ile değişen betonun tokluğu	66
4.23,4.24 Yüksek dayanımlı betonlarda lif hacmi ve lif boyu ile değişen tokluk indeksleri	67
4.25 Yüksek ve normal dayanımlı betonlarda lif hacmi ile tokluk indeksi arasındaki ilişki	68
4.26 Lif hacmi fraksiyonu ve numune yüksekliği ile değişen eğilmede çekme dayanımı	71
4.27 Liflerin beton içerisindeki yoneliimi ile değişen eğilmede çekme dayanımı	72
4.28 Eğilmede/Yarmada ekme dayanımı oranı ile lif hacmi arasındaki ilişki	72
4.29 Harçlar üzerinde yapılan çekme dayanımı sonrasında ölçülen çatlak genişlikleri	73
4.30 Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi.....	74
4.31,4.32 Lif tipi ve lif görünüş oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	75

4.33 Basınç gerilmesi altında lif hacmi ile değişen deformasyon davranışı	
4.34 Lif görünüş oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	77
4.35 Katkılı ve lifli betonlarda lif hacmi ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	78
4.36 Değişik lif hacmi fraksiyonu ve hacim/yüzey oranlarındaki betonların kuruma rötresi	91
4.37 Değişik lif hacmi fraksiyonu ve hacim/yüzey oranlarındaki betonların kuruma rötresi	92
4.38 Lif hacmi fraksiyonu ile kuruma rötresi arasındaki ilişki	94
4.39,4.40 Lif hacmi fraksiyonu ve lif görünüm oranının rötre üzerindeki etkisi	95
4.41,4.42 Lif hacmi fraksiyonu ve lif boyunun rötre üzerindeki etkisi	96
4.43,4.44 Lif hacmi fraksiyonu ve zamanla değişen beton çatlakları	98
4.45,4.46 Lif hacmi fraksiyonu ile plastik rötre arasındaki ilişki	99
4.47 Lifle güçlendirme indeksi ve lif tipi ile plastik rötre arasındaki ilişki	100
5.1 Ortalama tane boyutunun lif dağılımına etkisi	112

5.2 Beton santralinde liflerin karıştırılması yöntemi	116
5.3 Transmikserde çelik liflerin karıştırılması yöntemi	119
6.1 Çelik lifli ,çelik hasırlı ve lifsiz püskürtme betonun mukayese edilmesi	149
6.2 Çelik lifli püskürtme betonlara uygulanan blok düşmesi deneyinin değişik durumları	150
6.3 Çelik lifli ve çelik hasırlı püskürtme betonun gerilme-deformasyon davranışları	151
6.4 Çelik lifli ve çelik hasırlı püskürtme betonun karşılaştırılması	152

1. GİRİŞ

Günümüzde betonun değişik alanlarda kullanılma ihtiyacının ortaya çıkması, beton teknolojisinde bazı gelişmelerin yaşanmasına neden olmuştur. Özellikle 1800'lü yılların ikinci yarısından itibaren çeliğin beton içerisinde kullanılması ile yaşanan betonarme olayı, bir yapı malzemesi olarak betonun kullanım alanlarını oldukça genişletmiştir. Ekonomik oluşu, kolay işlenebilirliği ve teknik özellikleri sonucu yaşamın çok değişik alanlarında kullanılan betondan, geleneksel işlevi **taşıma gücü** kavramının ötesinde kullanıldığı ortama uyum sağlaması da beklenilir olmuştur. Bu uyumu, şüphesiz ki betonarmenin "uyum" olarak adlandırdığımız zorlanan lif ve elemanlara diğer liflerin ve elemanların (yada kesitlerin) yardım ederek zorlamaları paylaşması olarak tanımlayamayız. Vurgulanmak istenen; betonun kullanıldığı ortamdaki etkilere ve zorlamalara karşı zamana bağlı olağan deformasyonunun yanısıra değişik etkileri karşılayabilecek özellikte davranış gösterebilmesidir. Bu olay değişik kimyasal etkilere karşı koyabilme özeliğinden başlayıp deprem ve rüzgar gibi tekrarlı yüklemeler altında betonun özelliklerini sürekli koruyabilme yeteneğinin yakalanmasına kadar geniş bir yelpazeyi kapsar. Değişik ortamlarda çeşitli etkilere karşı betonun gösterdiği davranışları yada bu davranışlardan herhangi birini tek bir matematik modelle açıklamak mümkün değildir. Bu nedenle yapılması gereken, beton hangi etkiye yada hangi zorlamaya karşı çalışacaksa bu durumun açıkça tanımlanarak betonun bu yönünün güçlendirilmesi gereklidir. Beton tanımlanırken, esas alınan basınç yada çekme gerilmesi

kriterleri gibi temel karakteristikleri kullanarak betonun bütün davranışlarını (tokluk, darbe dayanımı, rötire, sünme, vs.) açıklamak mümkün değildir. Betonun bir çok davranışının beton özellikleri ile çok yakından ilgili olduğu bilinen bir gerçek olmakla birlikte bazı davranışlarının ise bu temel karakteristiklerin dışında geliştiği de yadsınmaz bir gerçektir.

Beton teknolojisindeki en büyük gelişmelerin 1900'lü yılların başında otomobil ve enerji sektörlerindeki gelişmelere koşturucu olarak yaşanan beton yol, köprü, baraj yapımı ile ilgili olduğu bilinir. Bu tip yapılar beraberlerinde taşıdıkları yeni sanayileşmelerle birlikte yeni beton yapıların da (sanat yapıları, sulama kanalları, kanaletler, viyadükler, vs.) ortaya çıkmasına neden olarak, üretimde öngerme, prefabrik gibi yeni teknolojilerin ortaya çıkmasını zorlamışlardır. İçinde yaşadığımız yüzyılın ikinci yarısında ise betonun yerini alabilecek ve çok değişik ortamlarda kullanılacak başka bir yapı malzemesinin henüz keşfedilememiş olması ve betonun açık deniz platformlarından, gaz tanklarına kadar çok değişik ortamlarda kullanılması sonucu beton teknolojisinde bir anlamda zorunlu gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler sonucu beton, yeni teknolojiler ve yeni malzemeler yardımıyla kullanıldığı ortamda karşılaştığı fiziksel ve kimyasal etkilere karşı güçlendirilerek ondan beklenen klasik niteliklerinin çok çok üzerinde hizmet verebilecek bir yapı malzemesi haline gelmiştir.

Kompozit malzeme teorilerinin pratikte yaşanan teknolojik

gelişmelerle ve yeni malzemelerin betonda kullanılması ile gelişmesi sonucu ilk çağlardan beri kırılğan yapı malzemele-
rinin takviyesinde liflerin kullanılması pratiği de gözönüne
alınarak betonda da saman, yonca lif, plastik-cam bazlı lif ve
çelik lifler kullanılmaya başlanmıştır.

Günümüzde kompozit malzeme üretiminde çokça kullanılan
cam liflerin üretiminin ilk olarak MÖ.1600'lü yıllarda eski
Mısır'da yapıldığı ve XVIII.hanedan devrinden kalma, çeşitli
kalınlık ve renkte cam lifleri ile bezenmiş amorfların varlı-
ğından anlaşılmaktadır,[1]. Liflerin (cam) sanayinde kullanımı
ile ilgili ilk kayıt 1877 tarihlidir. Hidrolik bağlayıcılar ve
elyaf malzeme kullanılarak yapay taş plakların üretilmesi yön-
temleri ile ilgili olarak bu yüzyılın başında alınmış patent-
lere rastlanmaktadır,[1,2]. Aynı şekilde, halen Anadolu'nun
birçok yerinde saman+kerpiç ve alçı+bitkisel lif yada hayvan
kılları ile yapılmış kompozitlerin kullanıldığı bilinmektedir.

Her yıl milyonlarca metreküp beton, baraj ve barajların
değişik yapılarında, konutlarda, yollarda ve diğer alanlarda
kullanılmaktadır. Bu yapılarda gerekli dayanımı elde etmek
nispeten kolaydır, esas olan gerekli stabilite ve dayanıklılıkta
bu yapıların en ekonomik şekilde nasıl yapılacağıdır.Bununla
birlikte, bu yapılarda büyük hacimde malzeme gerektirmeyen ama
yüksek kalite ve dayanımda betonu gerekli kılan yerler vardır.

Geleneksel beton tipik olarak; yorulma dayanımı,kavi-
tasyon ve aşınma dayanımı, çarpma dayanımı, çekme dayanımı,
deformasyon kapasitesi,kayma dayanımı,çatlama sonrası yük
taşıma dayanımı ve tokluk (enerji tutabilme kapasitesi) açı-

sından zayıf performans gösterir. Betonun bu özelliklerinin belirgin olarak gerektiği yerlerde beton içerisine değişik malzemelerden üretilmiş ve teknik özellikleri yüksek liflerin (fiber) katılması sonucu betonun yukarıda anılan zayıf özellikleri iyileştirilerek beton güçlendirilmiştir, foto-1.1

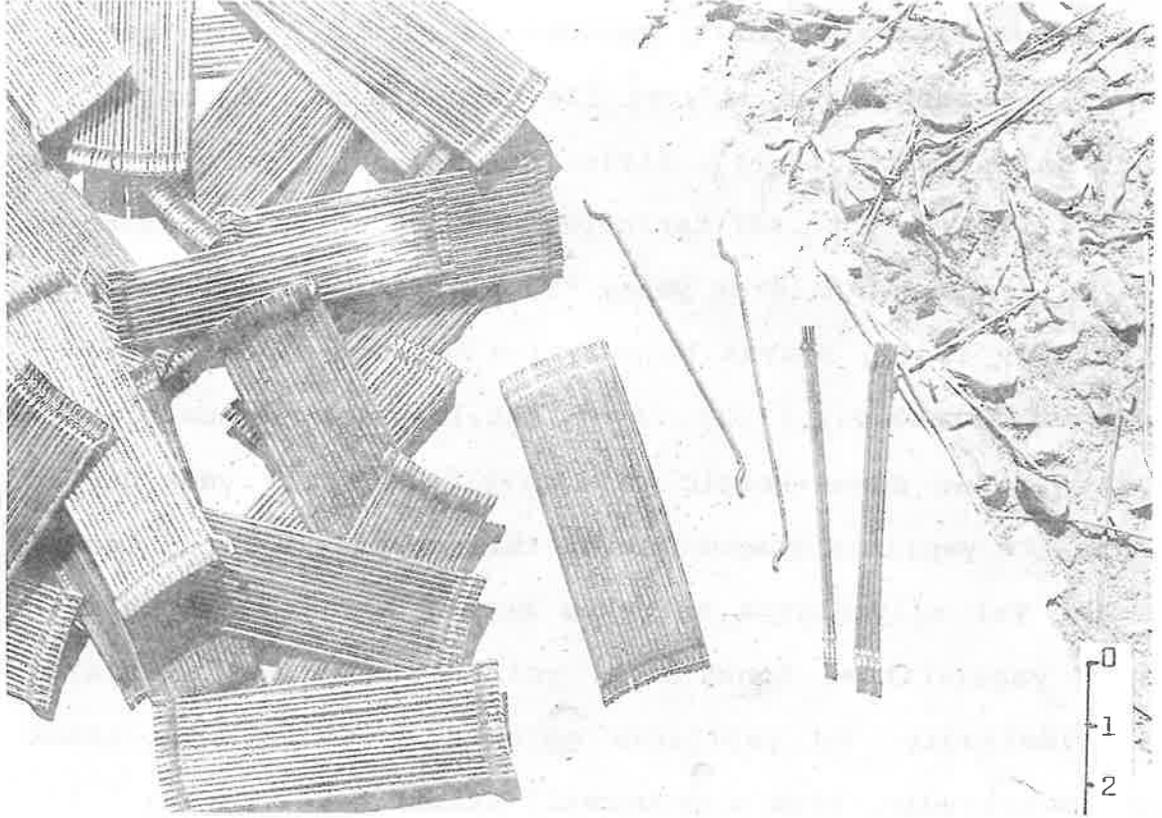


Foto-1.1 Çelik liflerle güçlendirilmiş beton ve çelik lifler

Adına lifli beton dediğimiz bu kompozit malzemenin kullanılması sonucu belli bir yapı için gerekli beton kütle daha narinleştirilerek tasarımlanabilme olanağına kavuşmuştur.

2. LIFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETON KOMPOZİTLERİ

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan beton içerisine çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda (çelik, plastik, cam, vb.) liflerin katılması ile elde edilen malzemeye lifli beton denilmektedir, foto-2.1. Yanlızca hidrolik çimento ve liflerden oluşan kompozitler de lifli beton terimi kapsamı içerisine girmektedir.



Foto-2.1 Çelik liflerle güçlendirilmiş beton
(Yüzeyi tesviye edilmiş ve edilmemiş)

Sakat,matris olarak yalnızca çimento hamurunun kullanılması,hacim kararsızlığı nedeniyle sakıncalı olmaktadır.Bundan dolayı lifli beton kompozitlerin bileşiminde, asbest-çimento ürünleri hariç, genellikle agrega bulunmaktadır,[3]. Bağlayıcı olmayan bileşeni ince taneli olan kompozitleri tanımlamak için lifli betondan daha çok lifli çimento terimi kullanılmaktadır. Ancak lifli beton terimi bu malzemeleri de kapsamaktadır,[3].

Belirli özellikleri olan liflerle homojen olarak takviye edilmiş olan lifli beton, ilk görünüşte normal beton karışımlarına benzemesine rağmen değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklı bir özellik gösterir. Liflerin beton içerisinde gelişmiş güzel dağılımına rağmen lifli beton yük altında homojen bir malzeme olarak davranır.

Bilindiği üzere beton içerisinde bulunan değişik gerilmeler,malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdirler. Beton içerisine katılan lifler çimento matrisini (yada harç fazını) takviye ederek beton içerisinde, üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içerisine dağılmış olan liflerin çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı lifler, matrisdeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine ve çatlamamış bölgelere naklederler. İletilen bu gerilmeler çatlağın diğer yanına daha düşük kuvvetler olarak nakledilir.Özellikle çelik liflerin kullanılması durumunda yukarıda açıklanan kompozit davranışı, çelik liflerin yüksek çekme gerilmesi nedeniyle daha belirgindir.Kısacası liflerle güçlendirilmiş beton;

-Yüksek elastik mukavemet ve çatlamaya karşı yüksek dayanım,

-Çok yüksek enerji tutma kapasitesi (toughness) ve darbe dayanımı,

-Yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım,

-Yüksek plastik deformasyon derecelerinde yük taşıyabilme kapasitesi demektir.

Beton içerisindeki lifler, statik hesaplarda eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Beton içerisindeki çelik lifleri, betonun yapısını değiştiren ve ona plastik davranış özeliği kazandıran bir malzeme olarak görebiliriz. Çelik lifli betonun özeliği, onun arttırılmış plastik davranışı ve enerji tutma yeteneğidir. Özellikle kritik yüklemelerde beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin beton içerisindeki işlevi daha iyi anlaşılır.

2.1.Liflerin (Fiber) Tanımı

Betonun özelliklerini değiştirerek iyileştirmek amacıyla taze beton içerisine çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda katılan lifler (çelik, plastik, cam gibi) değişik malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmişlerdir, foto-2.2.

Tablo 2.1 ve 2.2'de değişik malzemelerden üretilmiş lifler ve bunlara ait özellikler görülmektedir, [4,3].

Çalışmamıza konu olan çelik lifler birbirinden farklı değişik yöntemlerle üretilirler, [5,6].

Genellenecek olursa;

- Soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi,
- Çelik plakaların kesilmesi yöntemi,
- Sıcak çekme yöntemi,
- Çelik tellerin öğütülmesi yöntemi.

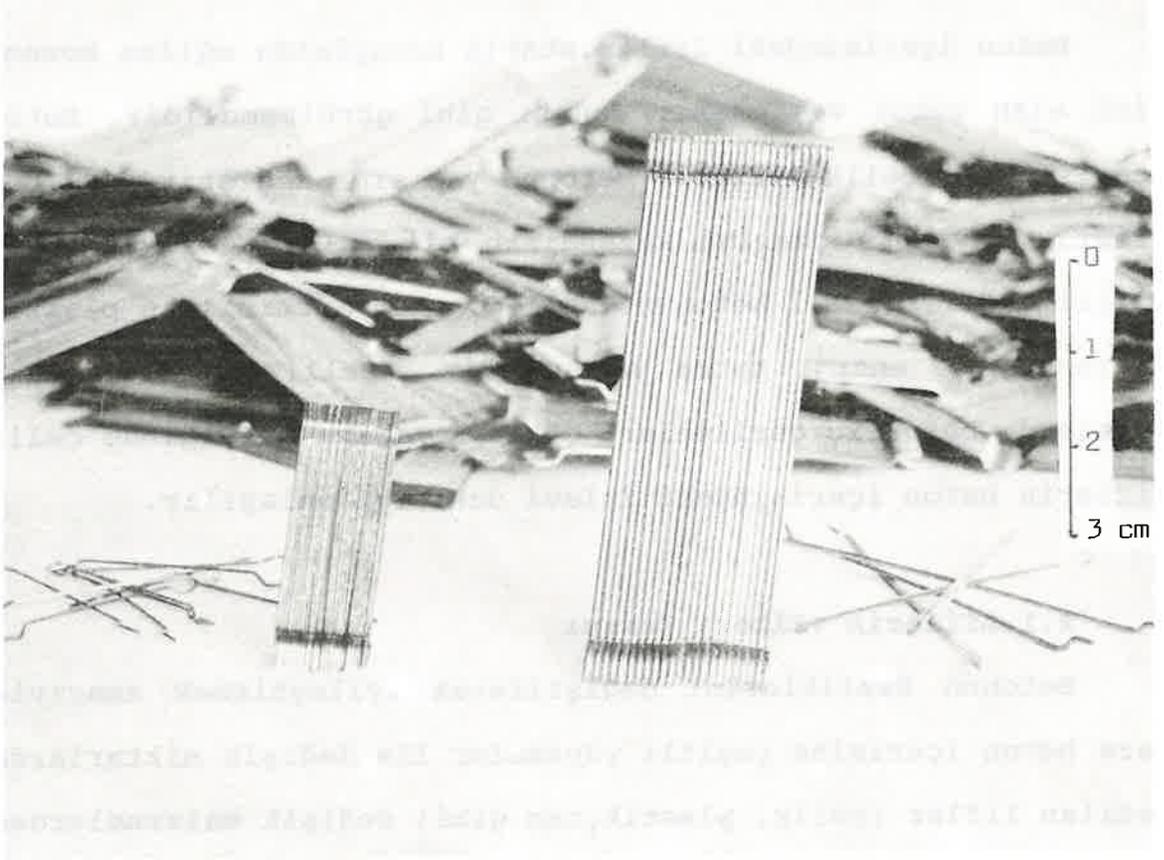


Foto-2.2 Demet halinde ve tek tek çengelli tipte çelik lifler

Tablo-2.1 Değişik cins liflere ait fiziksel özellikler,[4,3]

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

Lifleri tanımlayan en önemli öge lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan biçimsel özellikleridir. Özetlersek;

- Görünüm oranı (lif uzunluğu/lif çapı),
- Geometrik yapı,
- Lifin çekme gerilmesi' dir.

Çelik lifler, düşük karbonlu çelik C 1008'den üretilmişlerdir. En önemli nitelikleri yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özellikleridir.

Tablo-2.2 Çelik liflere ait fiziksel özellikler,[4,3]

Lif Türü	Özgül Kütle ($10^3 \cdot \text{kg/m}^3$)	Elastisite Modülü (kN/mm^2)	Çekme Mukavemeti (kN/mm^2)	Kopma Uzunluk Oranı (%)
Asbest:				
(a) Krisotil	2,55	164	3,1	2-3
(b) Krokidolit	3,37	196	3,5	2-3
Karbon:				
(a) Tip I	1,90	380	1,8	0,5
(b) Tip II	1,90	230	2,6	1
Polipropilen	0,9	5	0,5	20
Naylon (Tip 242)	1,14	4	0,9	15
Kevlar:				
(a) PRD 49	1,45	133	2,9	2,6
(b) PRD 29	1,44	69	2,9	4,0
Kenevir	1,5	-	0,8	3
Cam	2,6	80	2-4	2-3,5
Çelik	7,8	200	1-3	3-4

Çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 N/mm^2 (12000 kgf/cm^2) olup elastik limitleri $\%0,2$ 'nin altındadır. Çelik liflelerin geometrik şekilleri, çekme gerilmeleri, çap ve uzunlukları arasında belli bir oran vardır. Kullanılan çelik liflerin çapları $0,13$ ile $1,0 \text{ mm}$ arasında olup uzunluk/çap oranları 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm 'den 70 mm 'ye kadar değişmektedir. **Lif hacmi fraksiyonu (V_f)** diye tanımlanan ve betonda belirli bir yüzey alandaki lif alanını gösteren lif hacmi de $\% 0,5$ ile $\%3$ arasında değişmektedir,[7].

Lifler; düz, dalgalandırılmış (kıvrımlı) olabileceği gibi uçları bükülmüşde olabilir, şekil-2.1,2.2

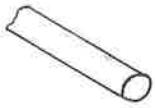


Düz Çengelli Çiftkenar form Tekkenar form Kıvrımlı

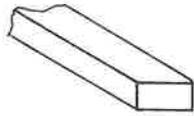


Paletli Sonlanmış Düzensiz Oyuklu

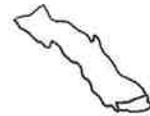
Çelik Lif Tipleri



Yuvarlak



Dikdörtgen



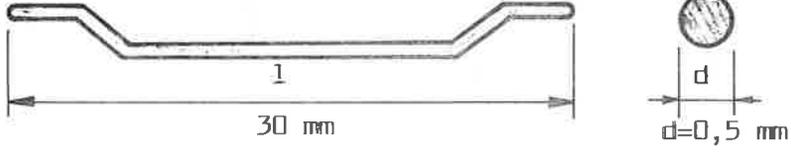
Düzensiz

Çelik Lif Kesitleri

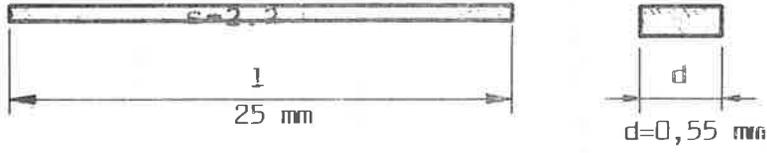
Şekil-2.1 Çelik lif tipleri ve kesitleri

Çelik liflerin beton içerisindeki performansı bu malzemelerin uzunluk/çap oranı, beton içerisindeki konsantrasyonu

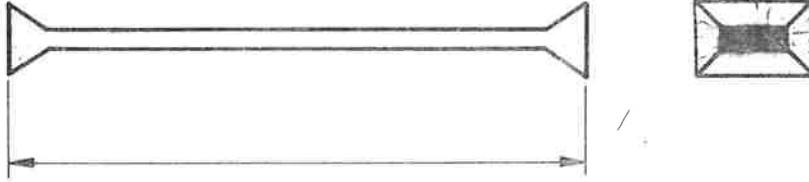
ve liflerin geometrik yapısı ile de yakından ilgili olduğu için piyasada değişik lifler bulunmaktadır.



$$\text{Uzunluk/Bay} (l/d) = 30 \text{ mm}/0,50 \text{ mm} = 60$$



$$(l/d) = 25 \text{ mm}/0,55 \text{ mm} = 45$$



Şekil-2.2 Değişik çelik liflerin enkesitleri

Özellikle çekme ve kesme kuvvetlerine çalışan liflerin beton ile aderansı lifli betonun işlevini olumlu yada olumsuz yönde etkiler. Dalgalandırılmış ve uçları bükülmüş liflerin çekme kuvvetleri etkisi ile matristen ayrılması düz liflere

göre daha zordur. Çelik liflerin yüksek çekme mukavemetleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu liflerin yükün belli bir gerilme değerinden sonra matristen sıyrılması lifli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli öğedir. Bu olay harç fazının (matris) yapısı ile ilgili olmakla birlikte kullanılan liflerin geometrik yapısı ile de yakından ilgilidir.

Çelik lifler ile güçlendirilmiş betonların genel uygulamalarında yüzeyi kaplanmamış çelik teller kullanılır. Bu tellerin tek sakıncası, özellikle beton vibrasyonlu master ile yerleştirilmiyorsa açıkta kalan tellerin paslanarak yüzeyde kırmızı pas lekeleri meydana getirmesidir. Aşırı paslanmanın olabileceği ortamlarda yada estetik kaygının ağır bastığı kaplamalarda ve ön yapımlı beton elamanlarda galvanizlenmiş liflerin kullanılması daha uygundur. Isıya dayanıklı ve su ile doğrudan temas eden betonlarda ise paslanmaz çelik liflerin kullanılması tavsiye edilir. Bu liflerin teknik özellikleri diğerleri ile aynı olup sadece korozyona karşı daha dirençlidirler.

Taşıma ve kullanmada kolaylık açısından liflerin 10 yada 30 adedi suda eriyebilen ya da mekanik etkiler ile kopabilen bir tutkal ile birbirine yapıştırılmıştır, foto-2.2. Tutkal tipi, kullanıma ve karışıma bağlı olarak iki çeşit olup çözülme süreleri:

P Tipi : Birkaç saniye,

C Tipi : 30-60 saniyedir,[4].

ASTM A 820/85 ve TS 10513/93 (Çelik Teller-Beton takvi-

yesinde kullanılan) beton takviyesinde kullanılacak çelik tellerin sınıflandırılmalarına, özelliklerine, test edilme-lerine ve piyasaya sunumlarına ait iki önemli standarttır. TS 10513/93 ve ASTM A 820/85 incelendiğinde çelik lifler ile ilgili literatürde verilen yada kullanılan parametrelerin anılan standartlarda bulunmadığı görülecektir. Bununla birlikte çelik lifleri tanımlayan belli başlı parametrelerin ise bu standartlarda tanımlandığı görülecektir.

TS 10513/93'de lif özellikleri ile ilgili iki önemli parametre mevcut olup bunların birincisi her bir lifin çekme dayanımının 310 N/mm^2 (3100 kgf/cm^2)'den az olamayacağı zorunluluğudur. Diğeri ise 16°C 'nin üzerindeki ortamda $3,18 \text{ mm}$ 'lik bir iç çap çevresinde yapılan lif eğilme deneyinde teste tabi tutulan liflerin % 90'nının kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi koşuludur. Bu özellikler, betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine olanak sağlar. Çelik liflerin sünek davranış göstermesi betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi için de gerekli bir parametredir, [8].

2.2 Kompozitler

Mühendislik malzemeleri iç yapılarına bağlı olarak;

- Metaller,
- Seramikler,
- Polimerler,
- Kompozitler

olarak dört ana sınıfa ayrılırlar,[9].

İlk üç ana malzeme grubu,birbirlerine elektron vererek ya da elektronları ortak kullanarak kovalent bağlarla birbirine bağlanmış olan malzemelerdir. Bu üç sınıfa giren maddelerin beraber veya karışık kullanılmalarından doğan malzemelere de kompozit malzemeler adı verilir.Kompozit malzemelerin faydası iki veya daha fazla ayrı malzeme sınıfına ait faydalı özellikleri birleştirmesidir. Örneğin betonla çeliğin bir arada kullanılması gibi,[9].

Kompozit malzemeler ise kendi aralarında

- Lifli kompozitler,
- Tabakalı kompozitler,
- Partiküllü kompozitler

diye sınıflandırılır.

Betonun herhangi bir lifle takviye edilmesi donatılı malzemeler sınıfına girmektedir. Bu tür kompozitler malzemenin mekanik direncini arttırmak, çatlama ve gevrek kırılmayı önlemek amacıyla tasarımlanır. Bu amaçla lif, çubuk veya örgü şeklinde malzemeler kullanılır. Bu malzemelerin kullanıldıkları malzemeyi güçlendirebilmesi için ,fiziksel özelliklerinin **matris malzemesi** adı verilen ortam malzemesi fiziksel özelliklerinden daha yüksek olması gereklidir. Aksi takdirde malzeme gelececek mekanik etkilerin büyük kısmı liflerin (ya da benzeri malzemelerin) payına düşmez ve donatı etkili olmaz. Ayrıca mekanik etkinin matristen life iletimi kayma kuvveti yolu ile olacağı için bu iki bileşen arasında kayma kuvvetine karşı koyabilecek yeterli bir aderans (yapışma) ve matris

kalitesi de bulunmalıdır.

2.3. Liflerle Güçlendirilmiş Kompozitler

2.3.1 Matris Özellikleri

Lifli beton literatüründe matris (matrix) diye tanımlanan yapı lifin etrafını saran ortam malzemesidir. Kısacası, çimento hamuru matris diye tanımlanır. Lifli beton kompozitlerinde matrisin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak onları korumak (sarmalamak) ve liflerle veya liflerden gerilme transferini sağlamaktır, [3]. Lifli beton kompozitlerinin kalitesi kullanılan lifin olduğu kadar ortam malzemesi matrisin özellikleri ile de yakından ilgilidir. Özellikle kırılğan matris-sünek lifli kompozitlerde gerilme-deformasyon davranışı lif ile matris arasındaki aderansın güçlü ya da zayıf olmasından oldukça etkilenir.

Lifli betonların üretiminde, şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğunda portland ya da katkılı portland çimentosu kullanılmıştır. Matrisin nitelikli olmasını sağlamak üzere lifli beton karışımlarının su/çimento oranları 0,55 den küçük olacak şekilde karışımlar hazırlanarak betonun çimento dozajı minimum 300 kg/m^3 tutulmuştur. Yine bu amaçla, yapılan çalışmalarda matrisi güçlendirmek amacıyla betonda silika tozu da kullanılmaktadır.

Matriste portland çimentolarının kullanılmasında çeşitli yararlar olmasına rağmen önemli bir sakınca da vardır. Bu da çimento hamurunun kırılma birim uzamasının çoğu liflerinkinden % 0,02-0,06 mertebesinde düşük olması sonucu bir yükleme

durumunda, elastik limitin ötesinde çimento hamuru matrisinde çatlakların oluşmasıdır,[3]

Diğer yandan, çimento matrisi bilindiği üzere alkali bir ortamdır. Cam ve çelik lifler bu ortamdan kimyasal olarak etkilenip korozyona uğrayabilirler. Bunun sonucunda lifin malzeme içerisindeki etkisi oldukça azalabilir. Bu duruma karşı korozyona dayanıklı kaplanmış çelik lifler kullanılabileceği gibi çimento içerisinde puzzolanik maddeler de katılabilir.

2.3.2 Liflerle Donatılı Kompozitler

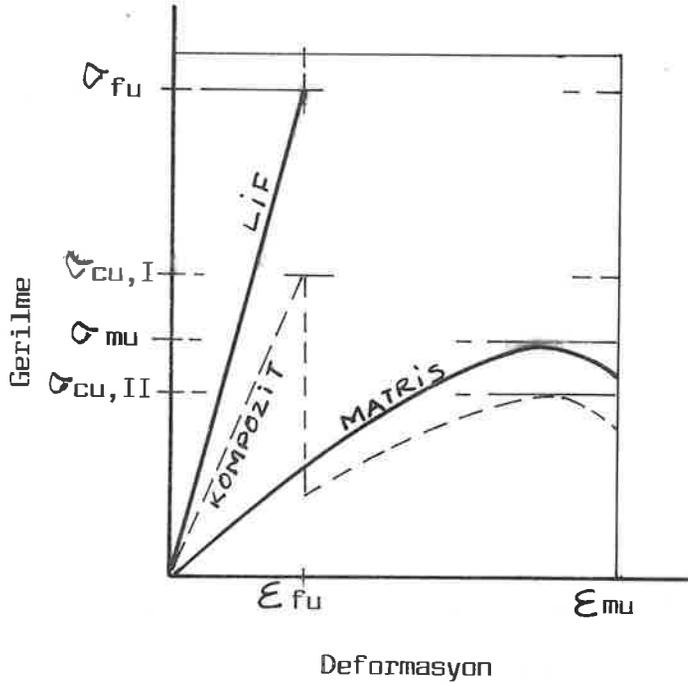
Liflerle donatılı kompozitler, matrisin ve lif fazının davranışına bağlı olarak iki ana başlık altında toplanabilir;

-Kırılğan lif-sünek matrisli sistemler

-Kırılğan matris-sünek lifli sistemler

Kırılğan lif-sünek matrisli sistemler; matris fazını epoksi, poliester, melamin reçinesi gibi organik polimer esaslı malzemelerin oluşturduğu ve lif olarak da cam, asbest, seramik, metal tel gibi liflerin kullanıldığı kompozitleri örnek verebiliriz.

Bu tür kırılğan lif ve sünek matrisli malzemenin gerilme-deformasyon davranışı şu şekilde tezahür eder; şekil-2.3'de görüleceği üzere, kompozit, liflerin etkisi ile ilk yüklemde lif miktarına bağlı olarak matris mukavemetinin üzerinde yük taşımaktadır. Ancak gerilmenin belirli bir sınırı aşması ile lifler göçmekte ve kompozit mukavemeti matris mukavemetinin bir miktar altına düşmekte ve kompozit, matris davranışına benzer bir davranış göstermektedir,[10].



Şekil-2.3 Kırılğan lif - sünek matrisli sistemlerde tipik gerilme - deformasyon davranışı,[3]

Kırılğan matris-sünek lifli kompozitlerde genellikle cam, plastik ve metalik lifler kullanılır. Bu tür kompozitlerde lif/hacim oranı, sünek matris-kırılğan lifli kompozitlere göre çok daha düşüktür.

Kırılğan matris-sünek lifli sistemlerdeki gerilme-deformasyon davranışı, lif ile matris arasındaki aderansın tam olduğu kabülü ile, şekil-2.4'deki gibi karakterize edilebilir,[10].

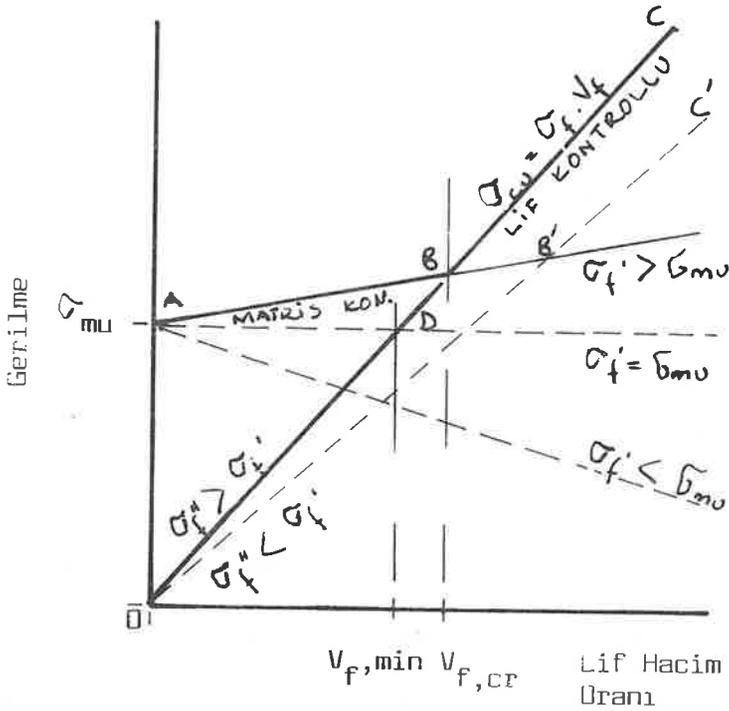
Burada;

σ_f :Kompozit deformasyon oranınının matris kırılma deformasyon oranına ulaştığı anda lifte oluşan gerilme

σ_{mu} :Matrisin kırılma deformasyon oranına ulaştığı andaki gerilme

$V_{1,cr}$:Toplam hacimdeki kritik lif oranı

$V_{1,min}$:Toplam hacimdeki minimum lif oranı



Şekil-2.5 Kırılğan matris - sünek lifli sistemlerde lif hacmi oranı(V_f)'na bağlı olarak mukavemetin değişimi,[3]

Kırılğan matris-sünek lifli kompozitlerde üç farklı kırılma şekli görülmektedir. Lif oranı, kritik lif oranınının üzerinde ise ($V_1 > V_{1,cr}$) matris kırıldıktan sonra kompozit daha yüksek bir seviyede mukavemet gösterir. Mevcut uygulamalarda

m^3 'deki lif oranı bu tip kırılma arzu edilecek şekilde seçilmektedir. Lif hacim oranı, kritik lif hacim oranının altında ise ($V_l < V_{l,cr}$) matris kırıldıktan sonra kompozit daha düşük seviyede yük taşır. Süreksiz liflerle donatılmış kompozitlerde görülen üçüncü halde ise matris kırıldıktan sonra kompozitin davranışı liflerin matristen sıyrılması ile belirlenmektedir,[3].

Birinci kırılma şeklinde, yani lif hacim oranının kritik lif hacim oranının üzerinde olduğu durumda; matris kırılmadan önce gerilme matris ve lifler tarafından birlikte taşınmakta matrisin göçmesi ile birlikte bir anda, kompozit bünyesindeki gerilme, lif içeriğine bağlı olarak bir miktar düşmektedir. Daha sonra lifler tarafından, lif miktarına bağlı olarak kompozit daha yüksek bir gerilmeyi taşır.

Liflerle güçlendirilmiş kompozitlerde betonun performansı üzerinde matrisin boşluk yapısı, çimento dozajı, su/çimento oranı, lif-matris aderansı gibi özellikler de oldukça etkilidir.

3. ÇELİK LİFLERİN BETON İÇERİSİNDEKİ DAVRANIŞI

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun teknik özelliklerini, çelik liflerin beton içerisindeki davranışını ve çelik liflerin betona kazandırdığı performansı açıklayabilmek için öncelikle betonun teknik özelliklerinin ve yük altındaki davranışının bilinmesinde fayda vardır. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton, yük altındaki davranışı itibariyle geleneksel betondan oldukça farklı davranış gösterir. Yük altındaki bu

farklı davranış sonucu betonun kırılma mekaniği değişerek, gerilme-deformasyon özeliğine duyarlı elastisite, tokluk, deformasyon, sünme, vs. gibi özelliklerinin performansları da değişir.

3.1 Betonun Yük Altındaki Davranışı

Şekil 3.1'den görüleceği üzere (d_0) çapında bir beton silindir presin tablaları arasına yerleştirilip silindir eksenini boyunca (düşey doğrultuda) bir P_1 kuvveti uygulandığında silindir eksenine dik kesitlerde

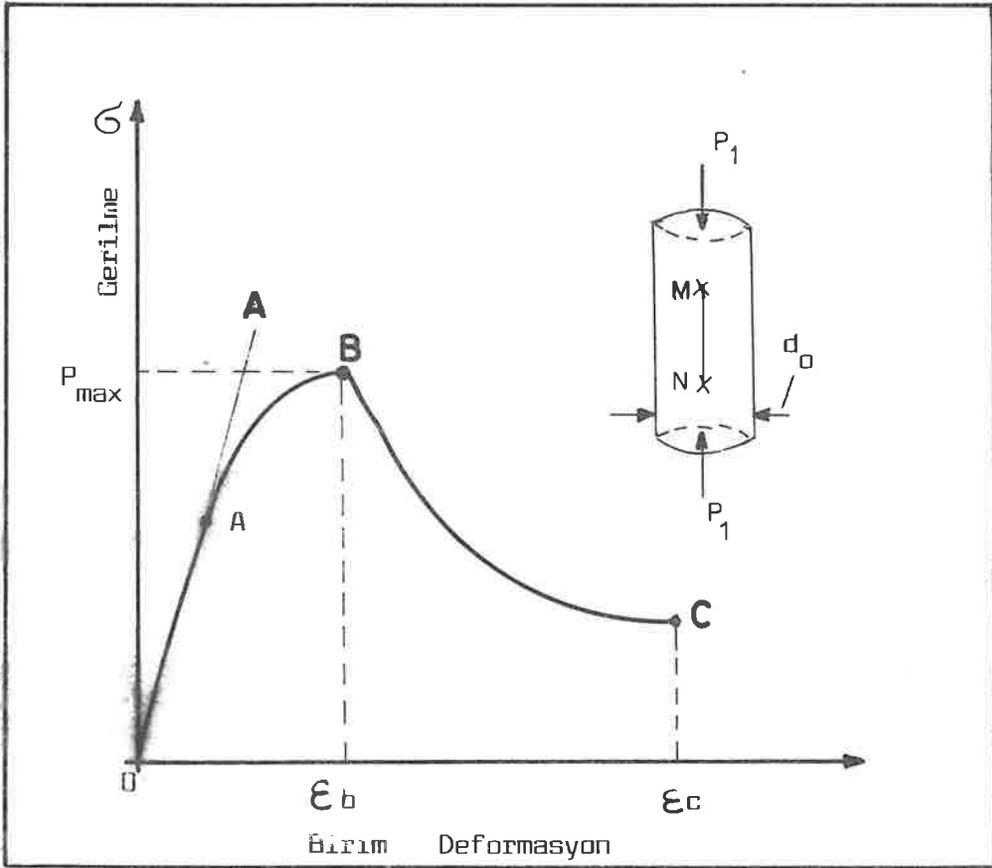
$$\sigma_1 = \frac{P_1}{\pi d_0^2 / 4} \quad (3.1)$$

denklemleri ile hesaplanan bir basınç gerilmesi meydana gelir.

Bu basınç gerilmesi uygulandığı anda silindir boyunda (cismin uygulanan kuvvet altında deformasyon yapması sonucu) bir kısalma meydana gelir. Silindir yüzeyinde, eksene paralel doğrultuda üzerinde bulunan M ve N noktaları arasındaki mesafe kuvvet uygulanmadan önce l_0 ise P_1 kuvveti altında bu iki noktanın arasındaki mesafe l_0 'dan daha küçük bir l_1 değeri alır. Böylelikle beton σ_1 gerilmesi altında

$$\epsilon = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \quad (3.2)$$

birim kısalmasını yapmış olur. Uygulanan kuvveti arttırarak ve her bir kuvvetin yeni değeri için deformasyon ölçülmek suretiyle her bir gerilme değeri için deformasyonlar (ϵ) tayin edilir.



Şekil-3.1 Betonun yük altındaki gerilme - deformasyon davranışı, [12]

Betonun gerilme-birim deformasyon özelliklerini bir çok değişkenin etkilediği bilinmektedir. Bu değişkenlerin etkilerinden dolayı beton için tek ve kesin bir $\sigma - \epsilon$ eğrisi tanımlamak olanaksızdır,[11]. Bu nedenle şekil-3.1 'de gösterilen $\sigma - \epsilon$ eğrisi, sadece betonun genel davranışı hakkında bir fikir vermek amacıyla hazırlanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, $\sigma - \epsilon$ eğrisinin düşük gerilmeler altındaki eğimi çok az değiştiğinden eğrinin bu bölümü doğrusal kabul edilebilir. Bu duruma göre bu bölgede meydana gelen deformasyonlar doğrudan doğruya uygulanan gerilmelerle orantılıdır,[12]. Bu sonuç Hooke bağıntısı ile ifade edilebilir;

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.3)$$

Burada, E betonun elastisite modülü olup OA doğrusunun eğimine ($E=\tan\alpha$) eşittir.

A noktasından sonra eğri büyük ölçüde doğrusallıktan sapar ve eğrinin B maksimum noktasında, yani beton gerilmesinin maksimum olduğu noktada (P_{max}), beton mukavemetini kaybeder. Bu noktanın ordinatı (P_{max}) doğrudan doğruya betonun basınç mukavemetidir. Yine, aynı noktanın apsisi ise betonun mukavemetini kaybetmeden yapabileceği maksimum birim kısalma olup ϵ_0 sembolü ile gösterilir. Literatürlere göre 28 günlük

mukavemeti $160-350 \text{ kgf/cm}_2$ arasında olan betonlar için ϵ_0 'ın aldığı değerler $0,8 \times 10^{-3}$ mm ile 2×10^{-3} mm arasında değişmektedir, [11,12].

Şekil 3.1'de gösterilen eğrinin bir diğer özeliği de maksimum gerilmeye karşı gelen birim deformasyon aşıldığında, artan deformasyon altında gerilmelerin azalmasıdır. Kırılma noktasındaki (C) birim kısalmaya (ϵ_c) karşı gelen gerilme, maksimum gerilmeden çok düşüktür. Betonun yük altındaki bu davranışında P_{max} 'dan sonraki yük boşalması ani ve hızlıdır.

Betonun gerilme-deformasyon eğrisinin kuyruk kısmı ya da gerilme-deformasyon eğrisi altında kalan alan ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Bu davranış sayesinde betonarme bir elemanda maksimum gerilmeye ulaşan bir lif, artan birim kısalma ile gerilmeleri başka liflere aktarabilir. Bu durumda en fazla zorlanan dış lifteki ezilme, maksimum gerilmeye karşı olan ϵ_0 birim kısalması değil, ϵ_c 'de oluşacaktır. Betonda, $\sigma - \epsilon$ eğrisinin kuyruk bölümünün varolması nedeni ile fazla zorlanan liflerin daha az zorlanan liflere gerilme aktarabilme özeliği **gerilme uyumu** olarak adlandırılır, [11].

Gerilme-deformasyon eğrisinin bir başka yönü de bu eğri altında kalan alanın büyüklüğüdür. Betona P kadar bir kuvvet uygulandığında $\delta \epsilon$ deformasyonun oluşabilmesi için meydana gelen işe deformasyon işi denilir ve $(P \times \epsilon)$ diye anılır. Deformasyonun $\Delta \epsilon$ gibi bir değer alması halinde yapılan deformasyon işi

$$W = \int_0^{\Delta \epsilon} P_x \delta \epsilon \quad (3.4)$$

denklemlerle ifade edilir. Bu ifade aynı zamanda gerilme deformasyon eğrisi altındaki alanın tanımlanmasıdır. Bu alanın büyüklüğü yada küçüklüğü deformasyon sırasında yapılan iş için harcanan enerjiyi yada betonun enerji tutabilme kapasitesini (tokluğunu) gösterir. Lifsiz beton ve betonarmede bu değer çok küçüktür.

3.2 Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı

Çelik liflerin beton içerisindeki işlevi ile betonda kullanılan çeliğin (donatının) işlevi hiçbir zaman birbirine karıştırılmamalıdır. Bir çok yerde donatı ve çelik lif belli bir yere kadar aynı işlevi görebilir. Fakat bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır, [13].

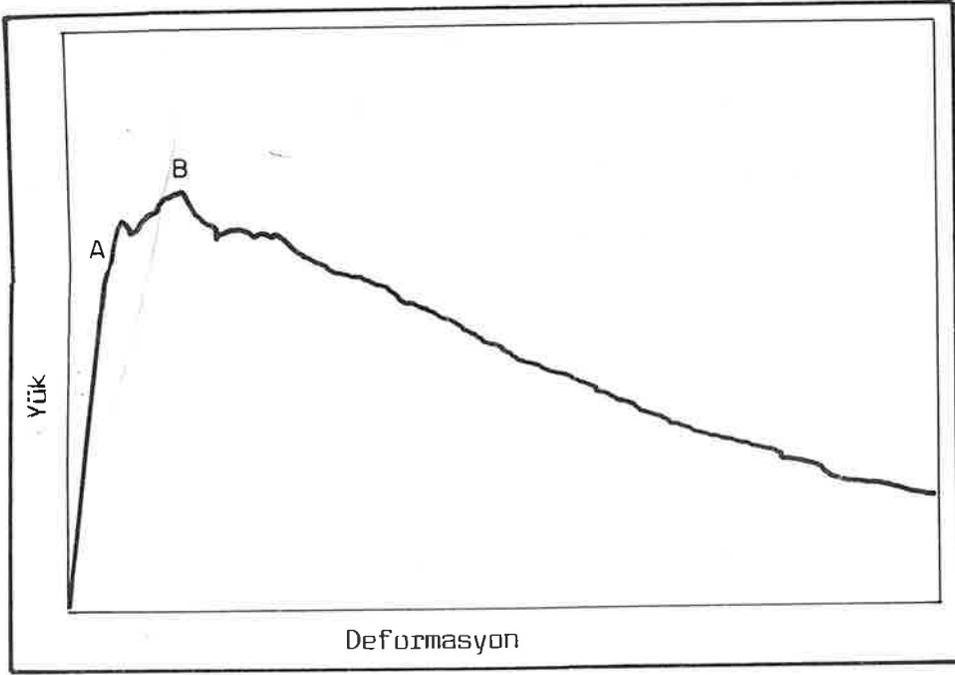
Statik hesaplamalarda, homojen bir malzeme olarak çelik lifler eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Çelik lifleri betonun yapısını değiştiren ve onu plastik davranışa zorlayan bir malzeme olarak görebiliriz. Çelik lifli betonun özeliği, onun arttırılmış elastikiyet ve enerji tutma yeteneğidir. Özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik

liflerin beton içerisindeki davranışı daha iyi açıklanır.

Çelik lifler en büyük etkiyi, çatlakların ilk oluşum anında, çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üstlerine ve sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirirler. Ayrıca içerisinde çelik liflerin katılması ile performansında büyük artışlar görülen betonun tokluk, ilk çatlak dayanımı, kavitasyon-erozyon dayanımı, yorulma dayanımı ve çarpma dayanımı gibi özellikleri, işlev açısından daha farklı davranış gösterecek ve onun matris özelliklerini değiştirecek bir malzeme olan çelik liflere karşı daha duyarlıdır.

3.2.1. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Yük Altındaki Davranışı

Şekil 3.2'de çelik lifler ile takviye edilmiş bir betona ait bir yük-deformasyon eğrisi görülmektedir. Şekildeki eğriden de görüleceği üzere çelik liflerle güçlendirilmiş beton yüklendiği zaman yük-deformasyon eğrisi orijinden A noktasına kadar aşağı yukarı doğrusaldır. A noktasından sonra eğri doğrusallıktan önemli derecede sapar ve maksimum yükün taşındığı B noktasına erişir. A noktası veya bu noktaya uygun düşen gerilme "ilk çatlama kuvveti", "elastik limit" veya "orantılı limit" olarak adlandırılır. Gerilme B'ye eriştiğinde nihai dayanım olarak tanımlanır. İlk çatlak dayanımı, nihai dayanım ve yükün B noktasından sonraki azalma hızı önemli ölçüde betonda kullanılan liflerin miktarına, uzunluk/çap oranına, beton içerisindeki yönelimine ve mekanik özelliklerine bağlıdır.



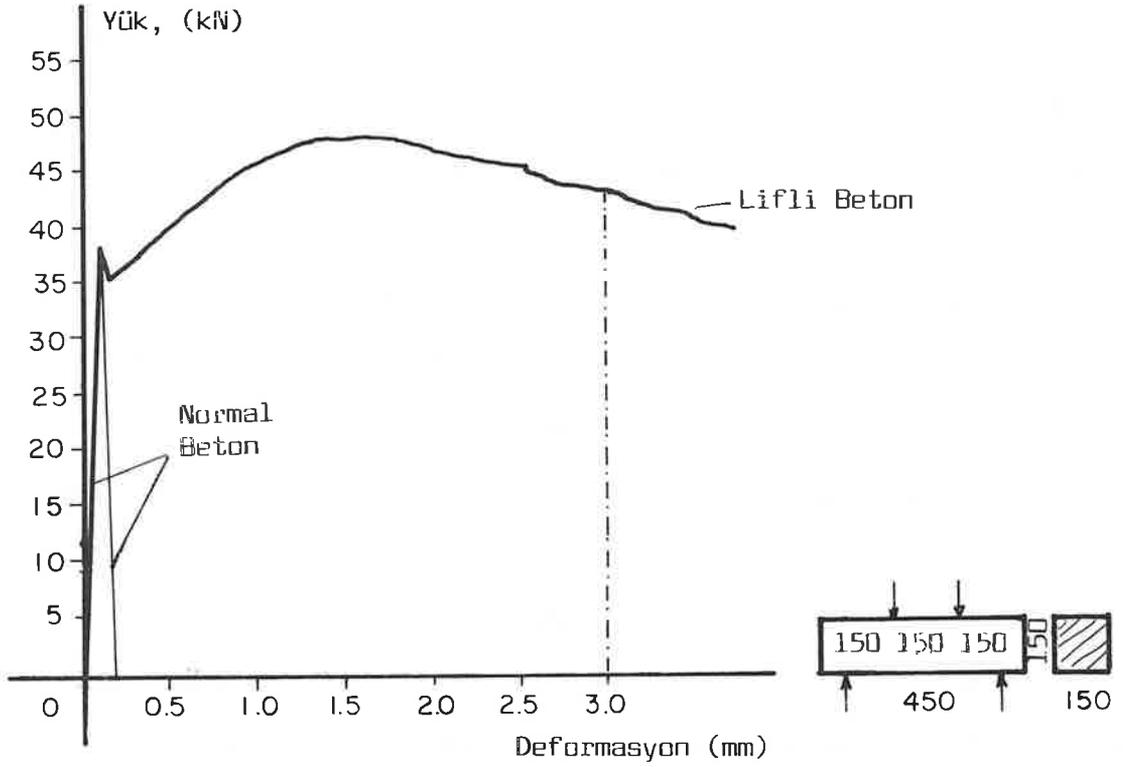
Şekil-3.2 Çelik liflerle güçlendirilmiş bir betona ait gerilme - deformasyon eğrisi,[4]

Şekil 3.2'den görüleceği üzere çelik lifli betonda yükün P_{max} 'dan sonraki azalma hızı çok düşüktür. Bu, 3-4 mm deformasyona kadar P_{max} 'ın % 70-80'i arasındadır. Olayı daha iyi açıklayabilmek amacıyla şekil-3.3 incelendiğinde görüleceği üzere lifsiz betonun maksimum yükte kırılma sonrası gösterdiği yükün azalma hızı çok yüksek olup yapabileceği maksimum deformasyon da çok düşüktür,[14]. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonda ise maksimum yükten sonra gerilmenin daha da arttığı görülecektir. Bu kullanılan çelik liflerin çekme dayanımının betonunkinden daha yüksek olması ile ilgilidir. Beton maksimum

yükte kırıldıktan sonra kısa bir aralıkta ani olarak düşer, bu düşme matrisin dağılması ile ilgilidir. Bu düşmeden sonra matris üzerinden boşalan gerilme çelik lifler tarafından taşınır. Yani matristen çelik liflere bir gerilme transferi söz konusudur. Çelik liflerin çekme dayanımlarının yüksek olması sonucu gerilme taşıma kapasiteleri daha fazla olup, yük altında sünek bir davranış gösterirler. Bu nedenle beton, P_{max} 'dan sonra şekilden de görüleceği üzere belli bir deformasyon değerine kadar maksimum yükten daha fazla yük taşır.

Lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok yavaştır, [15]. Dolayısıyla, liflerin matristen ayrılması ve uzamaları nedeniyle emilen enerji ya da başka bir deyişle meydana gelen deformasyon işi çelik lifli betonlarda oldukça büyüktür. Bu durum ,şekil-3.3'deki normal ve lifli betonlara ait yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanların karşılaştırılmalarından da görülebilir.

Hatta betonun kırıldığı maksimum yükün % 50 altındaki yüklemelerde bile 4-5 mm deformasyon yapacak kadar bu alan büyüyebilir. Özetle, beton içerisindeki çelik lifler, yüksek çekme dayanımları ve beton matrisle aralarındaki sürtünme sonucu oluşan aderans nedeniyle yük eksenine dik olan liflerin yanal deformasyonları azaltmaları sonucu betonun tokluğu arttırarak büyütürler.



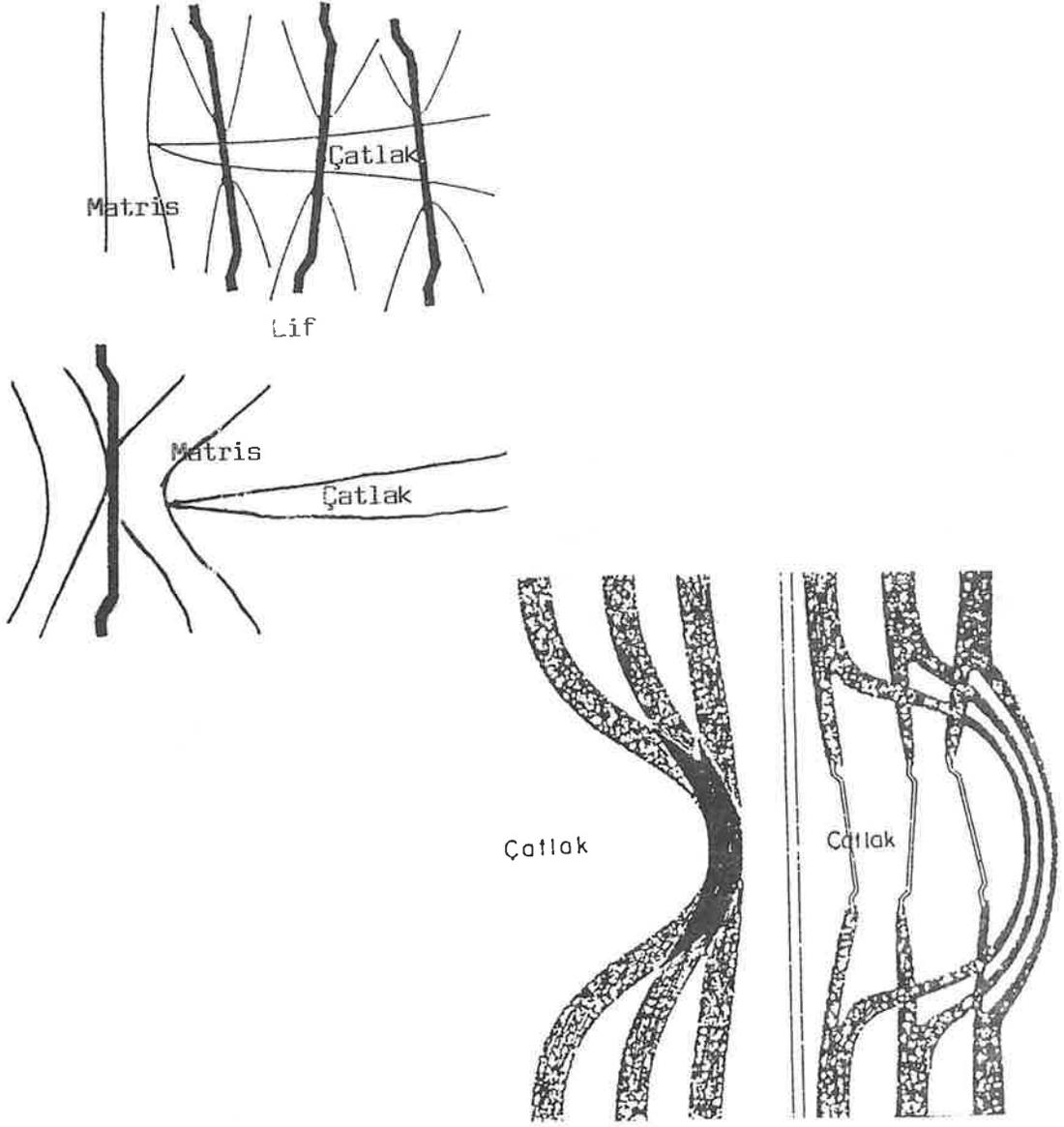
Çimento	: 350 kg/m ³	Su	: 185,5 kg/m ³
Kum(0-5)mm	: 822 kg/m ³	Lif:	40 kg/m ³
Çakıl(4-7)mm	: 456 kg/m ³	Tipi:	ZCX 60/0,80
(7-14)mm	: 547 kg/m ³	Numune Yaşı:	28 Gün

Şekil-3.3 Çelik liflerle güçlendirilmiş beton ile lifsiz betonun yük - deformasyon davranışlarının karşılaştırılması,[14]

3.3 Çelik Liflerin Betona Kazandırdığı Nitelikler

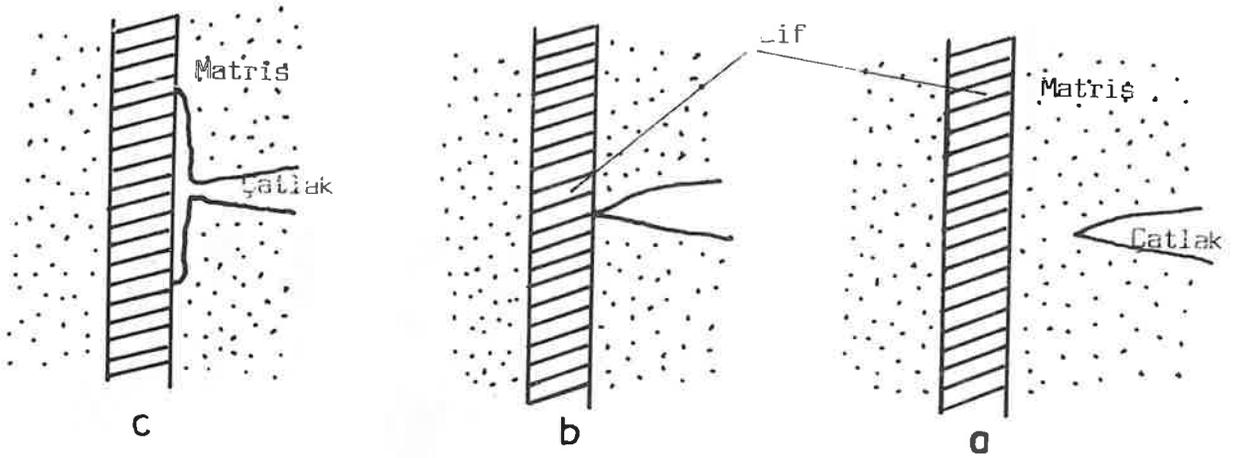
Çelik liflerle güçlendirilmiş beton; özellikle kavitasyon - erozyon dayanımı, darbe dayanımı, ilk çatlak oluşum dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, deformasyon kapasitesi ve tokluk açısından lifsiz betondan çok daha iyi performans gösterir. Betonun bu özelliklerindeki performans

artışı liflerin beton içerisindeki davranışı, betonun bu özelliklere karşı tepkisi, betonda ilk çatlak ve nihai yükte meydana gelen kopma olayı ile açıklanabilir. Yukarıda sıralanan özellikler liflerden en fazla etkilenen kompozit özellikleridir.



Şekil-3.4(a),(b) Çelik lifli betonlarda liflerin çatlak sonlarını takviye etmesi sonucu çatlak yayılmasının durdurulması

Liflerle güçlendirilmiş betonda, değişik gerilmeler ya da değişik nedenlerle meydana gelmiş çatlaklardan her biri çatlak ucuna yakın bir yerdeki bir lif ile takviye edilmiştir, şekil 3.4(a)-(b),3.5. Beton içerisinde lif bulunmaması durumunda, betona herhangi bir gerilme uygulandığında meydana gelen mikro çatlaklar gerilmenin artması ile birlikte çeşitli yönlere doğru yayılarak belli bir gerilme değerinde betonun parçalanmasına neden olurlar.



Şekil-3.5 Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda lifler aracılığıyla gerilmenin dağıtılması

Liflerle güçlendirilmiş beton kompozitlerinde ise betonun kırılma mekaniği değişiktir. Bu kompozitlerde ilk çatlağın oluşmasından sonra çimento hamuru fazından çelik liflere doğru bir gerilme transferi meydana gelir. Bunun sonucunda beton içerisindeki miktar ve geometrik özelliklerine bağlı olarak

çelik lifler, bu gerilmelerin bir kısmını kendi üzerlerinde taşıdıkları gibi bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine transfer ederek yayarlar.

Lifsiz betonda başlangıçta meydana gelen bir çatlağın (gerilmenin artması ile) yayılması için gereken enerji düşüktür ve genellikle böyle bir çatlağın başlatılması için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kadardır. Beton içerisinde lif bulunması halinde ise başlangıçtaki mikro çatlağı meydana getiren enerji lifler aracılığı ile çatlağın yanındaki sağlam çimento hamuru fazı bölgelerine aktarılır, şekil-3.4,3.5.

Bu nedenle çatlağın yayılması (yada büyümesi) için daha fazla enerji gerekir. Böyle bir enerjinin bulunması durumunda bile bu enerjinin büyük bir bölümü lifler tarafından taşınır ve bu taşıma, liflerin çimento hamuru matrisinden çekilip sıyrılması için gerekli enerji seviyesine kadar devam eder. Bu enerjinin sağlanması için çok büyük bir kuvvet gereklidir. Nihai yüke ulaştıktan (beton kırıldıktan) sonra bile, çelik lifler kırılan beton parçalarını bir arada tutmaya devam ederek nihai yükten bir miktar daha fazlasını da taşımaya devam ederler, [16].

4.ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN TEKNİK ÖZELİKLERİ

Normal beton içerisinde değişik miktarlarda ve belli özelliklerde çelik liflerin katılması ile elde edilen lifli beton teknik olarak normal betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını artırır.Bu iyileşmeleri özetlersek,[16,17,18,19]

Beton Özeliği	Artış %
Tokluk (Toughness)	100-1200
Darbe Dayanımı (Impact Resistance)	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı (First Crack Strength)	25-100
Çekme Dayanımı (Tensile Strength)	25-100
Nihai Eğilme Dayanımı (Ultimate Flexural strength)	50-100
Yorulma Dayanımı (Fatigue Endurance)	50-100
Deformasyon Kapasitesi (Strain Capacity)	50-100

Basınç Dayanımı (Compressive Strength)	± 25
Kavitasyon-Erozyon Dayanımı (Cavitation -Erosion Resistance)	300
Elastisite Modülü (Modulus of Elasti- city)	± 25

Yukarıda sıralanan bu değerlerin niceliği üzerinde, lifsiz betonda olduğu gibi agrega cinsi ve tane dağılımı, çimento cinsi ve miktarı, su/çimento oranı gibi faktörler de oldukça etkilidir. Bunların yanısıra kullanılan çelik liflerin şekli, teknik özellikleri, beton içerisindeki miktarı ve yönelimleri ile numune hazırlanması ve boyutları da deney sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Yukarıda sıralanan özellikler genellikle beton karışım hesabı yapılırken ihmal edilir. Ya da değişik bir yaklaşımla betonun basınç dayanımı arttırılarak diğer özelliklerinin de iyileşeceği varsayılır. Betonda lif kullanılmaksızın bu özelliklerin yukarıda verilen yüzde miktarlarda arttırılması mümkün değildir. İhmal edilmek zorunda kalınan bu özellikler betonun kiritik yapılarda kullanılması durumunda oldukça büyük bir öneme sahiptirler. Yani, yapıda çatlama ya da hasarın başlıca nedeni olabilirler.

4.1. Taze Beton Özellikleri

Beton içerisine çelik liflerin katılması sonucu taze beton özelliklerinde bazı değişiklikler gözlenir. Çelik liflerle güçlendirilmiş karışımların taze beton özelliklerini doğru tespit edebilmek için bu karışımların taze beton özelliklerinin de sağlıklı yöntemlerle tesbit edilmesi gerekir. Bu nedenle normal betonlarda taze beton özelliklerini tesbit etmede kullanılan bazı yöntemlerin lifli betonlar için yeniden gözden geçirilerek bulunacak deneysel sonuçlara göre izlenilmesi gerekli yöntemler ortaya çıkarılmalıdır.

Betonda işlenebilirlik olarak ifade edilen ve taze beton özeliği denince akla ilk gelen bu kavram betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve homojenitesi ile yakından ilgilidir. Yukarda anılan ve taze betonla ilgili olan bu unsurların sertleşmiş beton özellikleri ve betonun performansı üzerinde önemli derecede bir etkisi vardır. Şimdiye kadar yapılmış olan tüm çalışmalarda betona lif ilave edilmesiyle işlenebilirlikte önemli derecede azalmalar tesbit edilmiştir. Bu azalma üzerindeki en önemli iki parametre, karışımdaki lif hacmi ve lif görünüm oranı diye tanımlanan lifin uzunluk/çap oranıdır. Bu önemli parametrelerin dışında liflerin betona katılması, karıştırma teknikleri ve lifli betonun karışım tasarımları da lifli taze betonun özelliklerini önemli ölçüde değiştirir. Bu hususların betonu olumsuz etkilemesini önlemek üzere Bölüm V'de verilen ilkelere uyulduğu takdirde herhangi bir olumsuzluk ortaya çıkmaz.

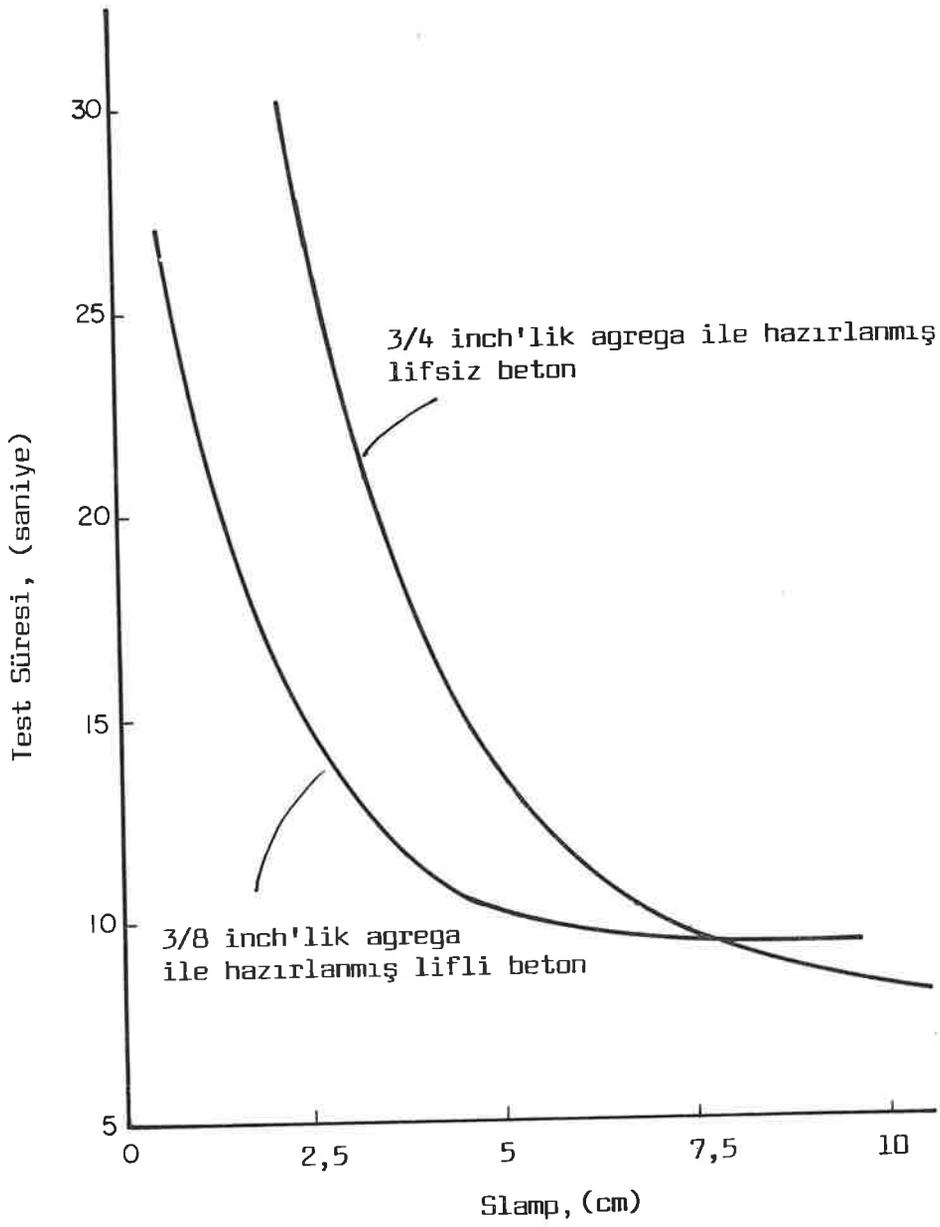
Lifsiz betonlarda işlenebilirliği ölçmek için pratik olması nedeniyle çok kullanılan slump (çökme) deneyi çelik liflerle güçlendirilmiş beton karışımlarında pek kullanılmaz. Slump yöntemi ile yapılan işlenebilirlik deneylerinde lifli betonun işlenebilirliği sağlıklı olarak tesbit edilememiştir,[4,16,20]. Bununla birlikte görece olarak slump yöntemi kullanılsa da işlenebilirliğin ölçüsü olarak değerlendirilmemeli yada dikkatle değerlendirilmelidir, [4,16,20].

Çelik lifler ile güçlendirilmiş betonların işlenebilirliğini ölçmek için en uygun yöntem Ve-Be deneyidir, [3,4,16,20]. Bu deney en sağlıklı yöntem olmasına rağmen şantiye koşullarına uygun olmaması nedeniyle şantiyelerde kullanılmaz. Ancak labaratuvar çalışmalarında kullanılabilir. Gerek şantiyelerde ve gerekse de laboratuvarında çelik liflerle güçlendirilmiş betonların işlenebilirliğini ölçmek için kolayca kullanılabilen ve sonuçları açısından sağlıklı veriler ortaya koyan ASTM C 995'de tanımlanan ters çevrilmiş koni deneyidir. Bu deneyde dahili vibratör hareketi ile ters koniden, koni ağzı açıklığı boyunca betonun akması için geçen süre ölçülür. Bu yöntem özellikle çelik lifli betonların işlenebilirliğini ölçmek için geliştirilmiştir. Bu deney yöntemi süper akışkanlaştırıcılar ile yüksek oranda akışkanlaştırılmış betonlar için uygun değildir, çünkü bu yöntemde beton vibrasyon ile akma eğilimindedir,[20].

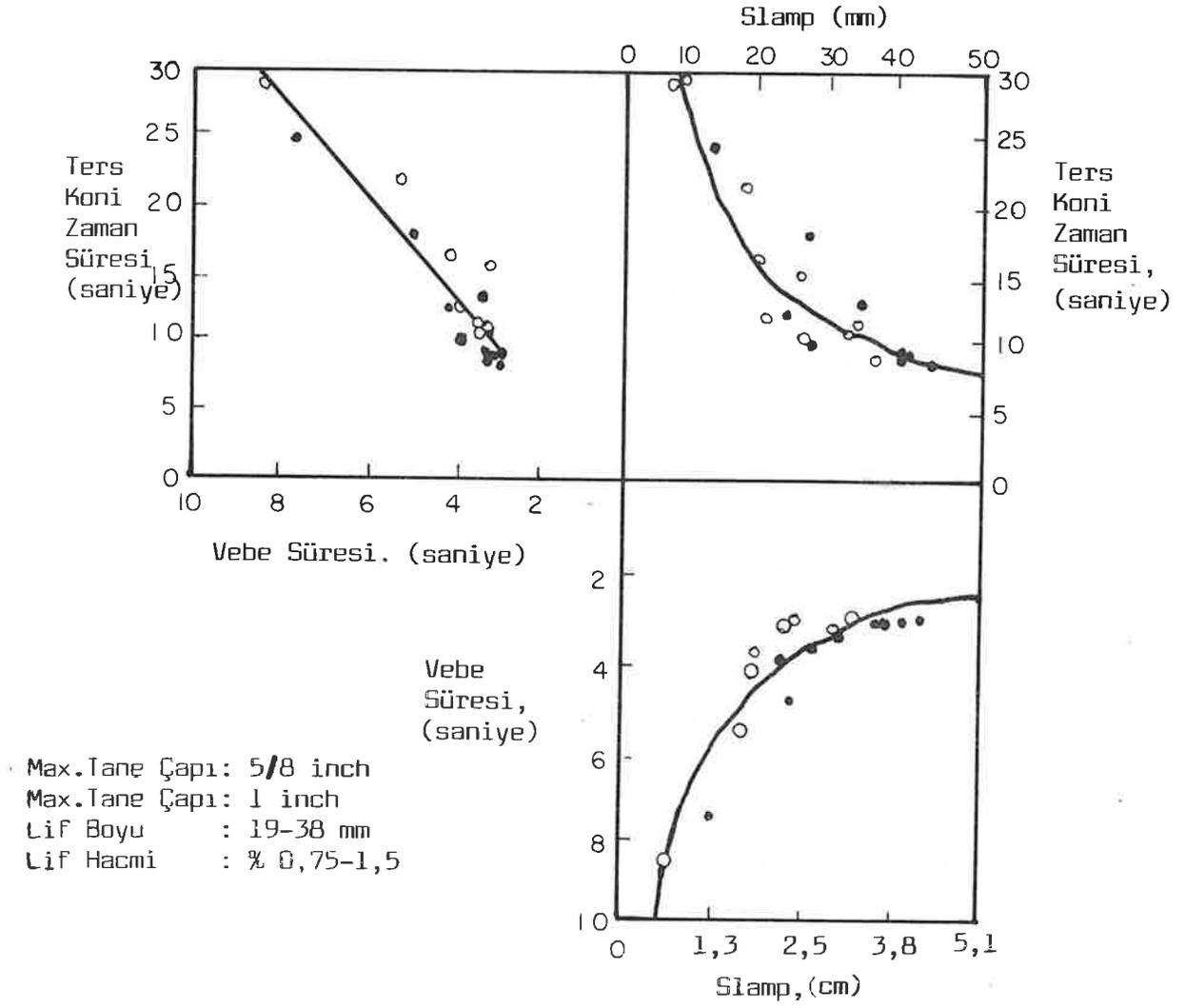
Şekil 4.1'de ters koni yöntemi ile lifli ve lifsiz betonlar üzerinde yapılmış çökme deneyi sonuçları görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere düşük çökme değerlerinde

bile lifli betonlar vibrasyona iyi cevap vermektedir. Çökme değerinin 5.0 - 7,5 cm olduğu aralıklarda bu eğrinin değişmediği görülecektir. Bu değerlerin üzerindeki çökme değerlerinde ise işlenebilirlikte herhangi bir değişme pek gözlenmez. Şekil 4.2'de ise Ve-be ve ters koni yöntemi ile yapılmış lifli betonların işlenebilirliği ve bu iki değişik yöntem arasındaki ilişki görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere ters koni yöntemi ile Ve-be yöntemi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu lineerlik doğru orantı ile ifade edilebilir. Bu nedenle her iki işlenebilirlik yöntemi kullanılarak bulunan taze beton özellikleri aşağı yukarı aynıdır. Bununla birlikte lifli betonun maksimum tane çapı, tane dağılımı, lif hacmi, tipi ve görünüş oranı ve hava içeriği şekil-4.2'deki eğrileri etkileyebilir, [20].

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonların taze beton özelliklerini etkileyen önemli parametrelerden biri de beton içerisindeki lif içeriği ile liflerin görünüş (uzunluk/çap) oranıdır, [3,21,22]. Bu konuda yapılan bir çalışmada 50 mm uzunluğunda ve 0,5 mm çapında çelik liflerin kullanıldığı 350 kg/m³ çimento dozajlı ve su/çimento oranının 0,58 olduğu karışımlar hazırlanarak, bu karışımların birisinde çimento ağırlığına oranla (NP 3) %0,3, diğerinde ise (NP 5) %0,5 su azaltıcı-akışkanlık verici katkıları kullanılmıştır. Maksimum tane çapının 16 mm olduğu bu karışımlarda üç değişik yöntem ile taze betonun işlenebilirliği ve hava yüzdesi ölçülmüştür.



Şekil-4.1 Çelik lifli ve lifsiz betonlarda ters koni yöntemi ile yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının karşılaştırılmaları, [4]



Şekil-4.2 Çelik lifli betonlar üzerinde değişik yöntemler kullanılarak yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının değerlendirilmesi, [20]

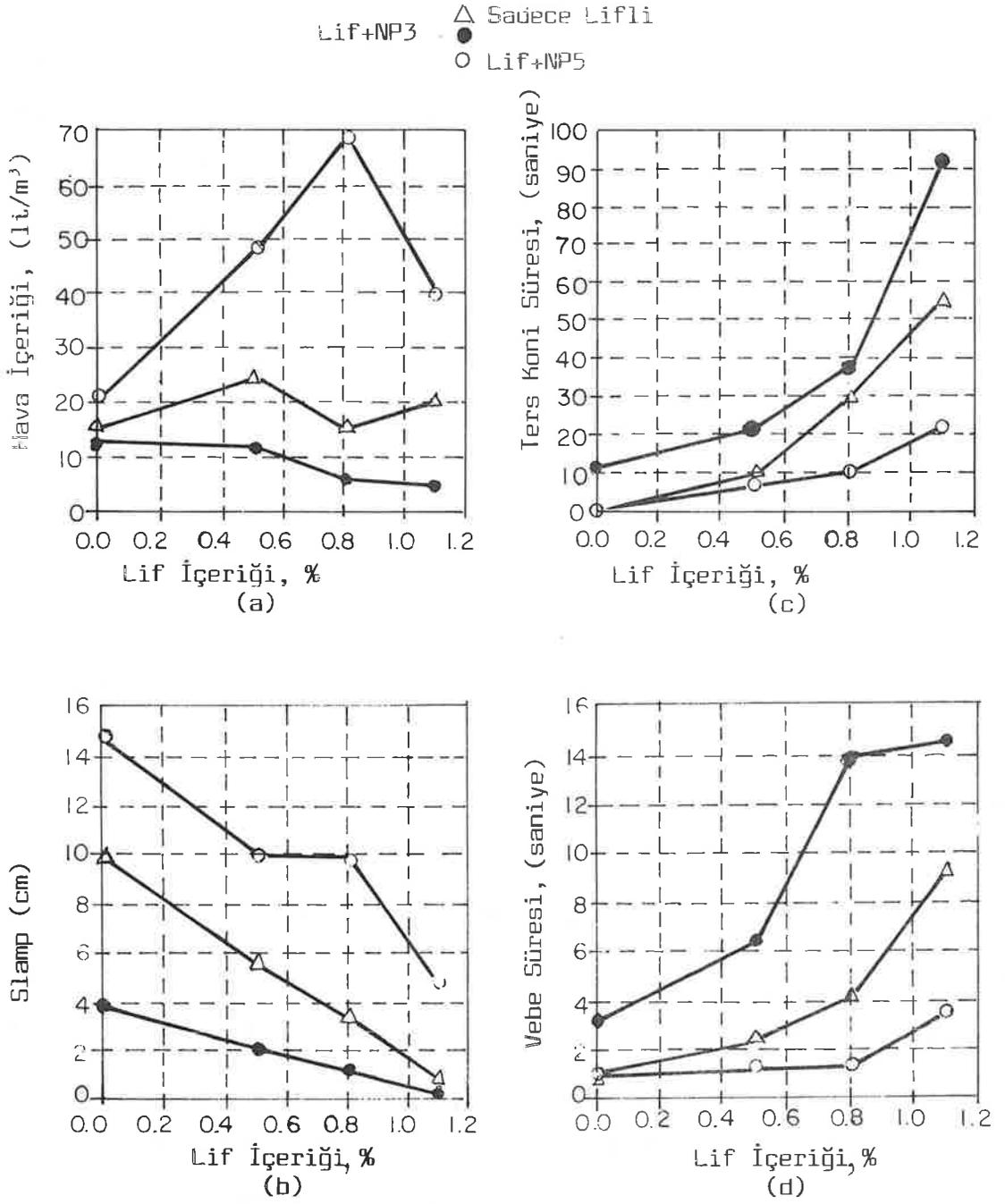
Şekil 4.3'ten görüleceği üzere beton içerisinde lif hacminin artmasıyla her üç yöntemde de işlenebilirliğin güçleştiği tesbit edilmiştir. Ve-be ve ters koni yöntemleri kullanılarak yapılan ölçümlerde lif yüzdesinin yaklaşık 0,6-0,8 aralığından sonra işlenebilirlikte önemli güçlükler görülmüştür. Lif içeriğinin %0.8 olduğu karışımlarda ise liflerin karışım sırasında topaklandığı tespit edilmiştir, [22].

Bu çalışmalardan elde edilen bir diğer sonuç da katkısız betonlarda lif içeriğinin artması ile taze betonda hava miktarının azalmasıdır, şekil-4.3

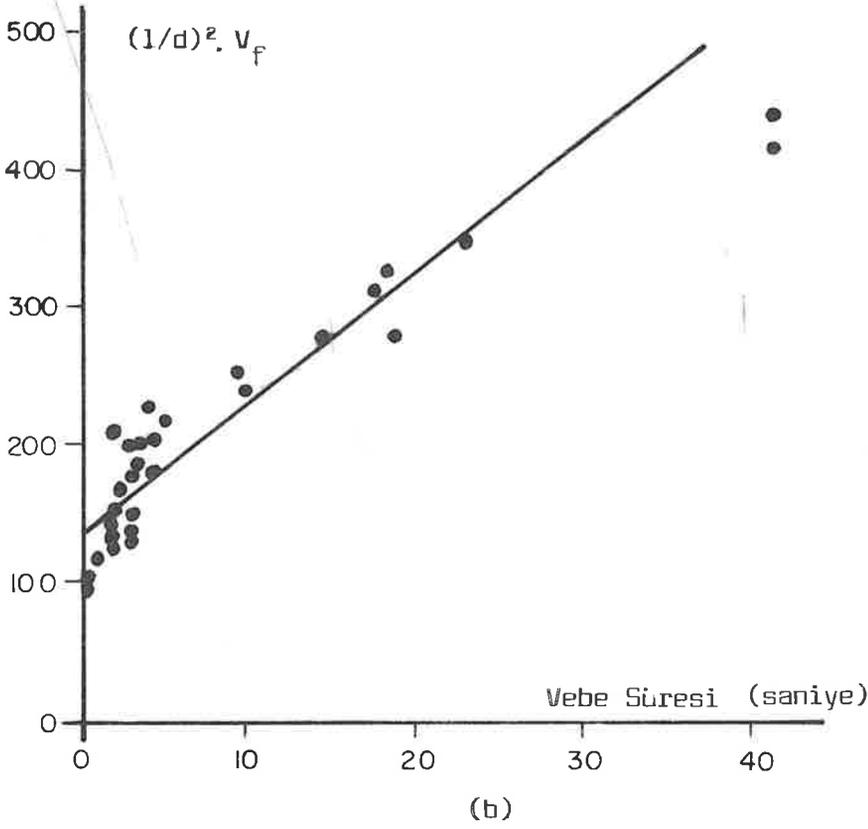
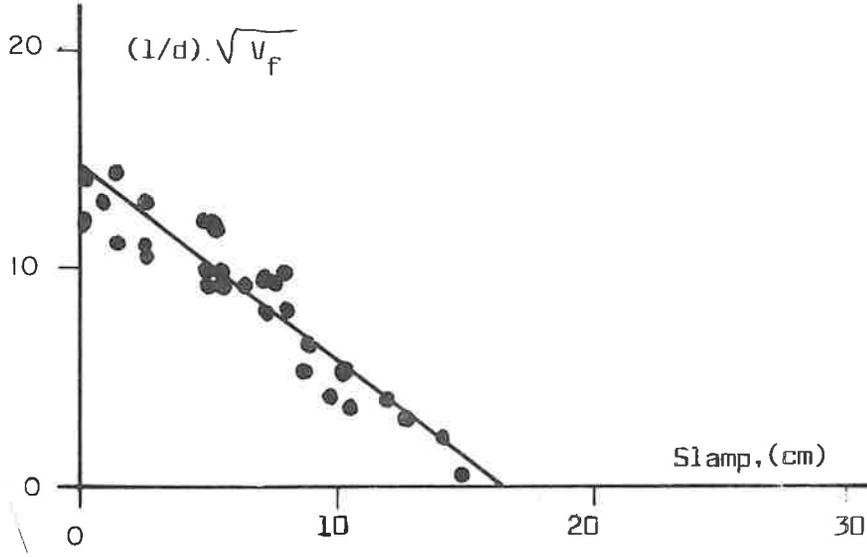
Literatür [21]'deki çalışmalarda ise lif içeriği ve görünüş (uzunluk/çap) oranının artması ile beton işlenebilirliğinde azalmalar tesbit edilmiştir, bu azalma lif içeriği ve geometrisi ile doğru orantılıdır, şekil-4.4.

Şekil 4.5'den görüleceği üzere lifli betonun işlenebilirliği lif şekli ve görünüş (uzunluk/çap) oranına göre değişmektedir,[21]. Bu çalışmada aynı lif içeriğinde şekli kıvrımlı olan liflerin katılmış olduğu karışımlar işlenebilirlik açısından en iyi sonucu vermiştir. Bu çalışmada işlenebilirlik şu sıraya göre azalmaktadır; kıvrımlı,düz,çift kenarlı ve çengelli. Görünüş (uzunluk/çap) oranının büyümesi ile de beton işlenebilirliğinde azalmalar tesbit edilmiştir,[21].

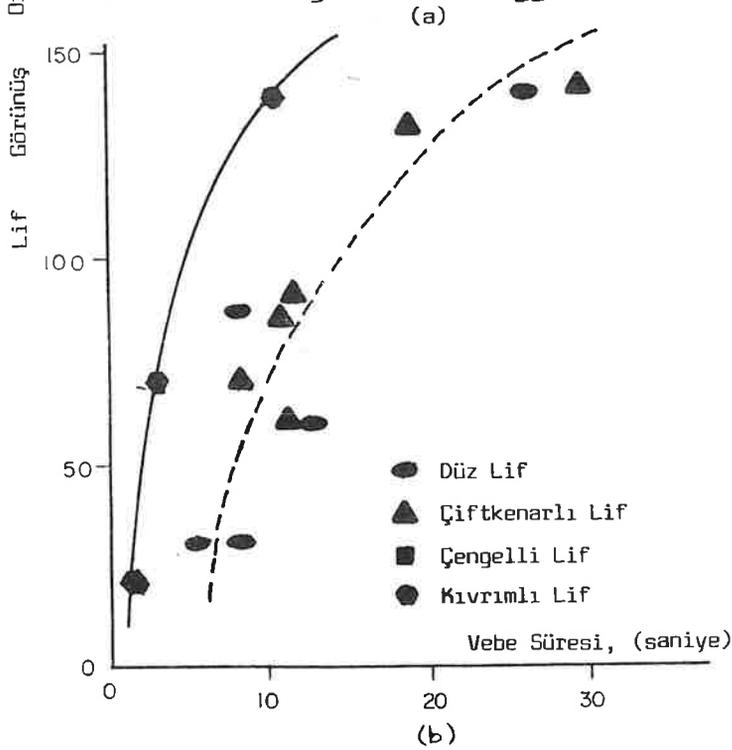
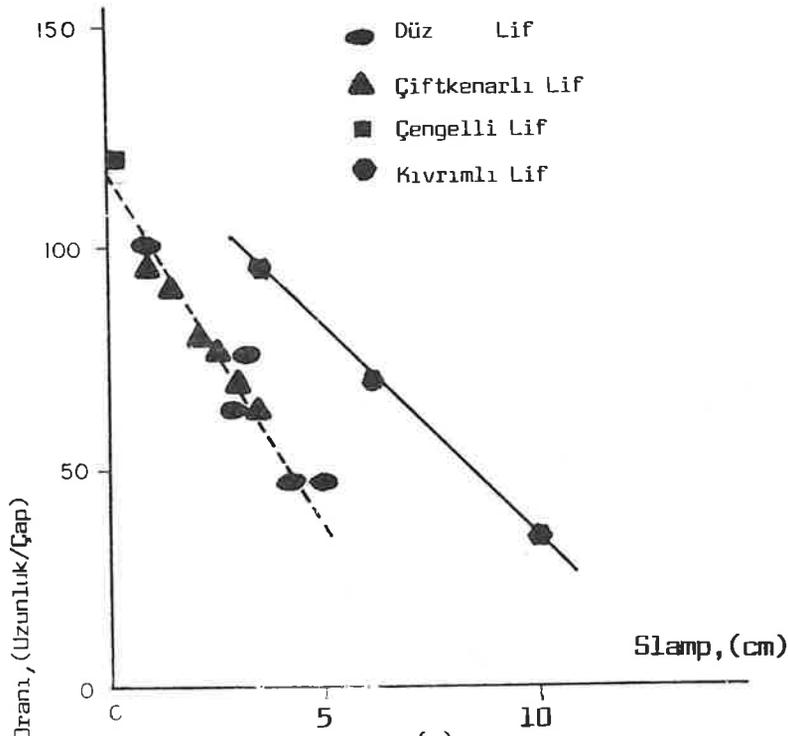
Şekil 4.6'da lif içeriğinin ve görünüş (uzunluk/çap) oranının artması ile işlenebilirlikte meydana gelen azalma görülebilir.



Şekil-4.3 Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda işlenebilirliğin lif hacmi ile değişimi, [22]

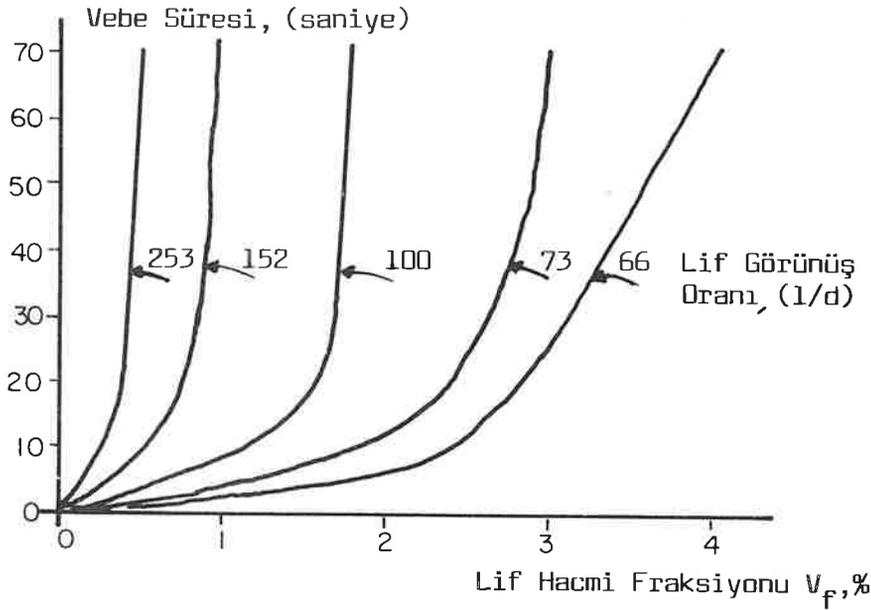


Şekil-4.4 Lifle güçlendirme indeksine göre işlenebilirliğin değişimi, [21]



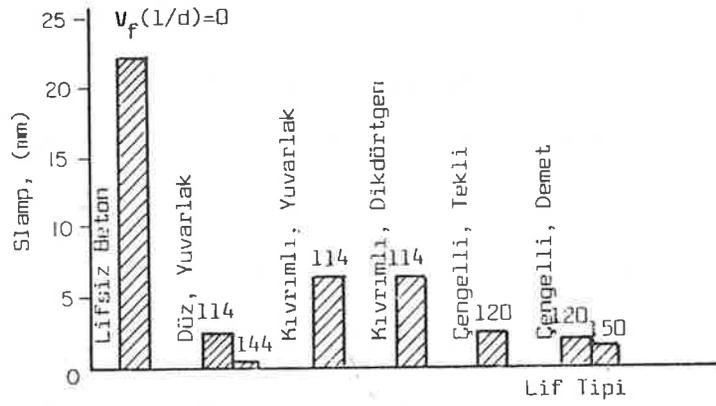
Şekil-4.5 Lif şekli ve lif görünüş oranına göre işlenebilirliğin değişimi, [21]

Bazı kaynaklarda [20,21,23] lifli betondaki lif hacmi (içeriği) ile uzunluk/çap oranını birleştiren ve **lifle güçlendirme indeksi** (Reinforcement index) diye anılan $V_f(l/d)$ bir kavram tanımlanmıştır. Liflerle güçlendirilmiş betonlarda taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin hem lif içeriği ve hem de görünüş oranı ile değiştiği dikkate alınacak olursa bu birleşik kriterin kullanılmasının değerlendirme açısından daha doğru olacağı açıktır.

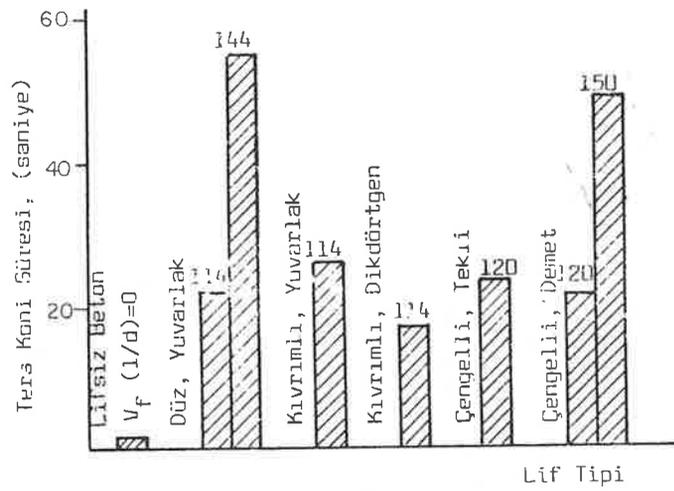


Şekil-4.6 Lif hacmi ve lif görünüş oranının büyümesiyle işlenebilirlikteki azalmalar,[21]

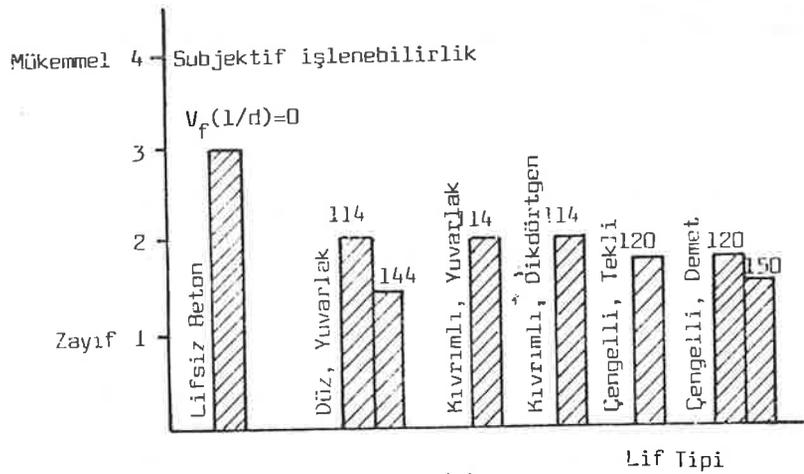
Lifle güçlendirme indeksi esas alınarak taze beton işlenebilirliğini ölçmek için yapılmış çalışmalar ve sonuçları şekil-4.7'den görülebilir, [23]. Şekil 4.7 (c) grafiğinde ise subjektif işlenebilirlik gibi yeni bir değerlendirme kriteri



(a)



(b)



(c)

Şekil-4.7 Lifle güçlendirme indeksi ve lif tipleri esas alınarak ölçülmüş işlenebilirlik değerleri, [23]

de mevcut olup, bu çalışmada işlenebilirlik lifle güçlendirme indeksine göre araştırılmıştır. Bu grafiklerden görüleceği üzere $V_f(l/d)$ indeksinin büyümesi ile işlenebilirlik azalmaktadır. Şekil 4.7 (a)'da ise kıvrımlı şekle sahip lifli betonların slump yöntemi ile yapılmış işlenebilirlik deneylerinde en iyi sonucu verdikleri tesbit edilmiştir. Ayrıca aynı şekilde görülen (b) ve (c) grafiklerinde ise işlenebilirlik daha farklı iki yöntem ile değerlendirilmişse de elde edilen sonuçlara göre lif tipinin işlenebilirlikteki etkisi başarılı bir şekilde tesbit edilememiştir.

Lif hacmi fraksiyonu (V_f), görünüş oranı (l/d) ve lifle güçlendirme indeksi $V_f(l/d)$ esas alınarak yapılan çalışmalar sonuçları itibarı ile özetlenecek olursa,

- Lifli beton çalışmalarında işlenebilirliği sağlıklı olarak tesbit etmek için şantiyede ters çevrilmiş koni, laboratuvarında ise Ve-be yöntemi kullanılmalıdır,

- Lif hacmi fraksiyonunun (V_f) yada beton içerisindeki lif içeriğinin artması sonucu işlenebilirlikte azalmalar meydana gelmektedir. Lifi geometrik şekli de işlenebilirliği olumlu yada olumsuz yönde etkilemektedir.

- Görünüş oranı dediğimiz (l/d)'nin büyümesi ile de işlenebilirlikte zorluklar meydana gelmektedir.

- Bu nedenlerle işlenebilirlik değerlendirilirken lifle güçlendirme indeksi $V_f(l/d)$ esas alınmalıdır.

-İşlenebilirlik şu lif şekli sırasına göre azalmaktadır; kıvrımlı, düz, çift kenarlı, çengelli.

Literatür [22]'de özetlenen çalışmalarda değişik V_f içe-

riklerindeki betonlarda işlenebilirlikteki güçlüklerin aşılabilmesi amacıyla betonda akışkanlaştırıcı katkı kullanılmış ve sonuçları şekil-4.8'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiği zaman akışkanlık verici katkı miktarının artması ile işlenebilirlikte artışlar meydana geldiği görülebilir. Özellikle çimento ağırlığının % 0,3'ü oranındaki katkı miktarından sonra işlenebilirlikte iyi artışlar tesbit edilmiştir.

4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Bölüm 4.1'de betona çelik liflerin katılması ile sertleşmiş beton özelliklerinde meydana gelen iyileşmeler % olarak özetlenerek verilmişti. Bu bölümde ise bu özelliklerin her birinin betona lif katılmasıyla performansının nasıl değiştiği ve bu değişikliğin lifli beton parametrelerinden nasıl etkilendiği tartışılacaktır.

4.2.1 Enerji Emme Kapasitesi (Tokluk-Toughness)

Betonun eğilme yükleri altında enerji absorblaması olarak tanımlanan bu kavram ilk olarak America Beton Enstitüsünde (ACI) Henager tarafından ortaya atılmıştır,[16]. Daha sonra Johnston tarafından ASTM C 1018'de standart haline getirilmiştir,[24]. Japon standartı olarak JCI SF4 ve JSCE SF4 ve Türk standartı olarak da TS 10515/Aralık 1992'de tanımlanan bu özellik gerek statik ve gerekse de dinamik yüklemelerde betonun eğilme kuvvetleri altındaki deformasyonu sırasında yapılan işi arttırarak betona aynı gerilme ölçeğinde daha yüksek

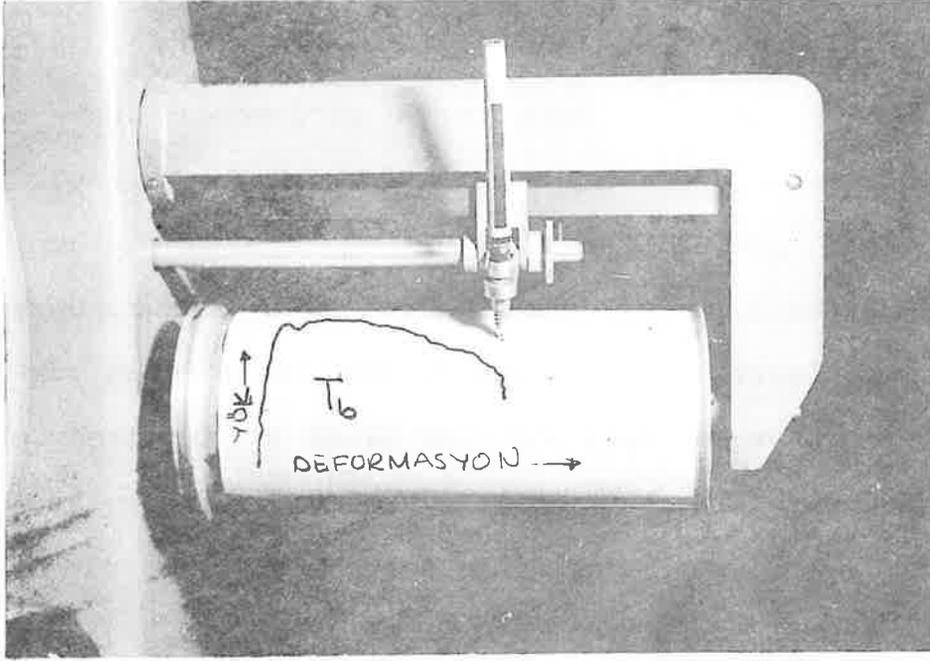
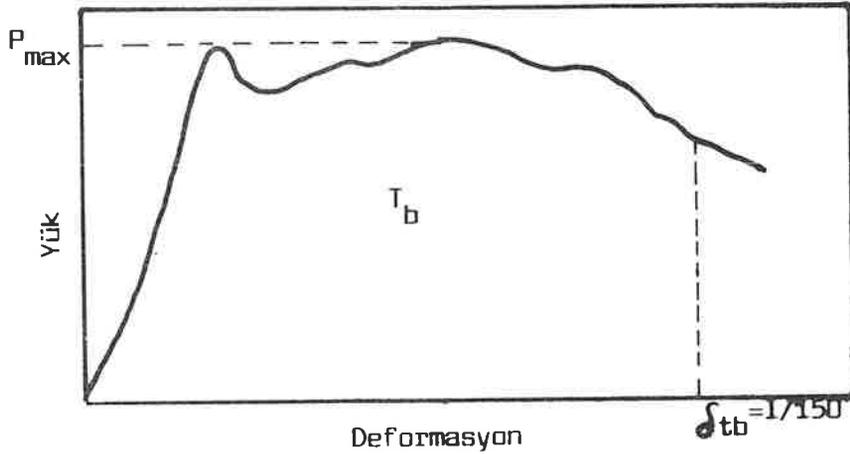


Foto-4.1 Tokluk deneyi sırasında çizilen yük - deformasyon eğrisi

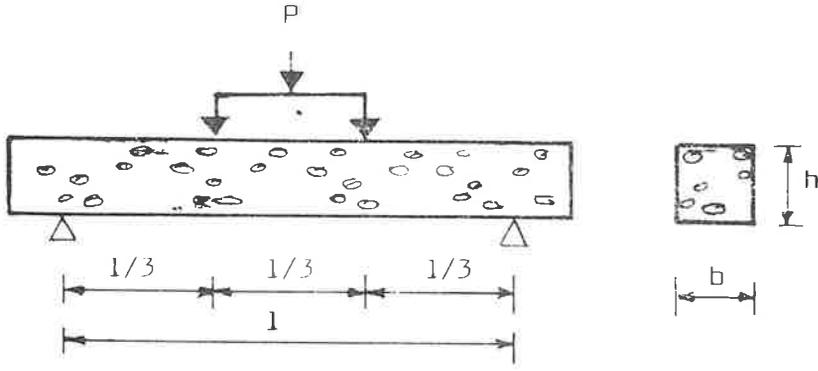
Lifli betonlarda maksimum yükten sonra betonun hala taşıma işlevini sürdürmesi sonucu malzemenin tokluğu değerlendirilirken deney numunesinin belli bir aralığına kadar olan deformasyon boyutu da işin içine katılıp değerlendirme yapılırsa lifli betonun yük altındaki davranışı daha iyi açıklanmış olunur.

Johston ve Barr [24,25] tanımladıkları tokluk indeksi ile çelik liflerle güçlendirilmiş betonların en önemli özelliklerini ölçmek için deney yöntemleri geliştirmişlerdir. ASTM C 1018, JCI SF4, JSCE SF4 ve TS 10515'de tanımlanan bu yöntemler deney yöntemi ve değerlendirme kriterleri açısından birbirlerinin aynısı olup sadece bazılarında ilave olarak daha

değişik kriterler ve değişik tokluk indeksi aralıkları vardır, Örneğin ASTM'deki I_{30} veya TS'deki I_{20} indeksleri gibi. Şekil 4.9'da çelik lifli betonun tipik bir yük - deformasyon eğrisi görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere maksimum çekme dayanımı (f_u) ve Rapture Modülü (R_u) nihai yük (P_{max})' dan; eşdeğer çekme dayanımı ise yük-deformasyon eğrisi altında kalan (T_b) alanın hesaplanması ile bulunur. Burada dikkat edilmesi gerekli bir husus da şekilde görülen yük- deformasyon eğrisi ve bu eğri altında kalan alanın deney numunesi boyutlarından, deney düzeneği yükleme tipinden ve yükleme hızından etkilenebileceği gerçeğidir. Bu nedenle verilen elastik şekil değiştirme indeksleri (I_5, I_{10}, \dots) ve çekme dayanımı kriterleri (F_u, R_u, F_e) standartlarda tanımlanmış olan deney prosedürleri kullanıldığında geçerlidir.



Şekil-4.9 Çelik lifli betona ait tipik bir yük - deformasyon eğrisi, [14]



Şekil-4.10 Tokluk deneyi yükleme şekli ve deney düzeneği

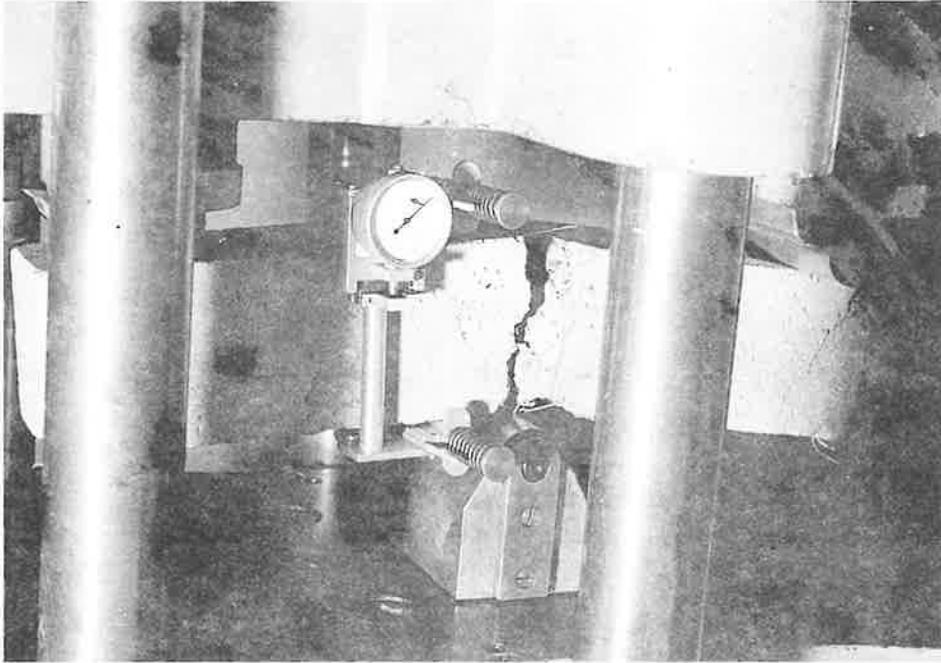


Foto-4.2 Kiriş üzerinde tokluk deneyinin yapılışı

Şekil 4.10'daki deney düzeneği (foto-4.2) ile yapılan deney sonucunda çizilen yük-deformasyon eğrisi grafiğinde eğilme kriterleri şu şekilde hesaplanır;

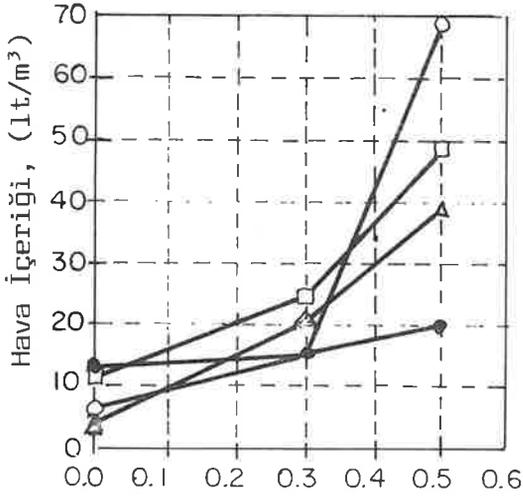
$$F_e = \frac{T_b}{tb} \cdot \frac{l}{b \cdot h^2} \quad (4.1)$$

$$F_u (R_u) = P_{\max} \cdot \frac{l}{b \cdot h^2} \quad (4.2)$$

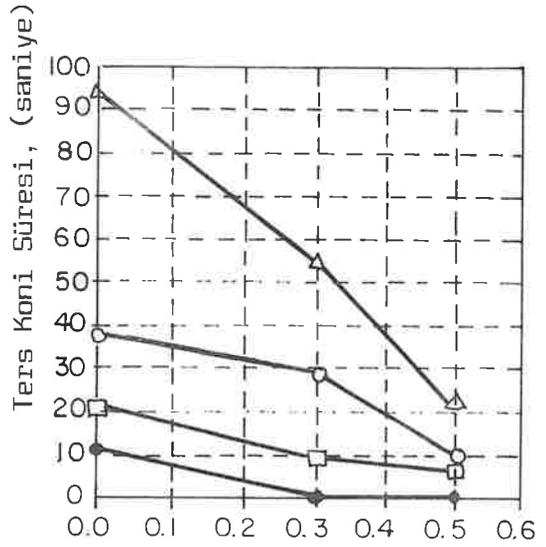
Burada ;

- F_e : Eşdeğer çekme dayanımı, (N/mm²)
- $F_u (R_u)$: Maksimum çekme dayanımı (Rapture Modülü), (N/mm²)
- P_{\max} : Maksimum yük, (N)
- T_b : 3 mm'lik eğilme deformasyona (sehim) kadar yük deformasyon eğrisi altında kalan alanın oluşması için harcanan enerji, (N.mm)

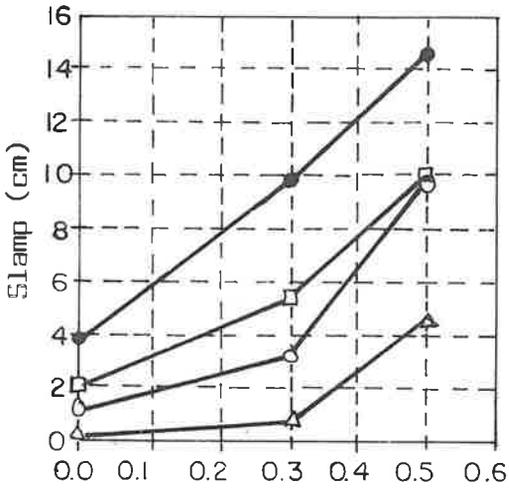
● Lifsiz
 □ % 0,5 Lif
 ○ % 0,8 Lif
 △ % 1,1 Lif



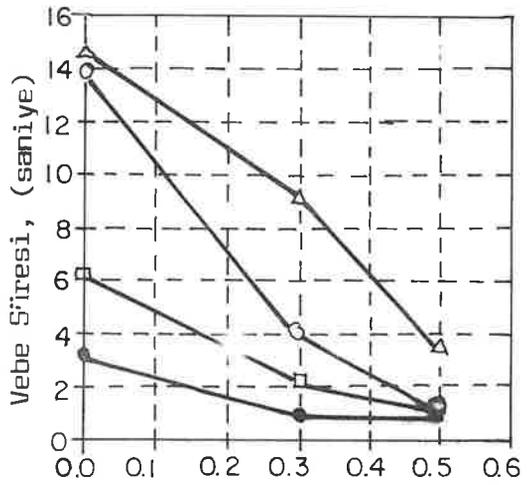
(a)



(c)



(b)



(d)

Şekil-4.8 Betonda katkı (akışkanlaştırıcı) kullanımının işlenebilirlik üzerine olan etkisi,[22]

deformasyon yapabilme yeteneği kazandırır.

Bölüm 4.1 incelendiği zaman çelik liflerle güçlendirilmiş betonun en önemli performans kazanımını darbe dayanımı ile birlikte tokluk özeliğinde sağladığı görülür.

Normal betonlar çekme mukavemetleri altında çok düşük taşıma ve deformasyon gösterirler. Bu betonun kırılğan yapısı ile açıklanabilir. Betonarme teorileri betonun çekme mukavemetlerine karşı gösterdiği bu performans düşüklüğünü beton içerisine çelik çubuklar koyarak aşmak durumunda idi. Şimdiye kadarki uygulamalar da hep bu yönde olmuş ve betonun çekme mukavemeti nispeten arttırılmıştır. Bu klasik çözüme rağmen beton matrisinin gerilmeler altında beton içerisindeki çelik gibi davranmaktan yoksun bir davranış göstermesi malzeme mühendislerini hem çekme mukavemetlerini arttıracak ve hemde yük altında betonda meydana gelen çatlakları önleyerek betonu sünek davranmaya zorlayacak, yani taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıyabilecek yeni bir malzeme aramaya yöneltmiştir.

Tokluk, beton değerlendirilmesinde kullanılan yeni bir kavram olup betonun yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur, foto-4.1

Lifli kompozitlerde tokluk daha çok **eşdeğer çekme dayanımı** (eğilmedeki tokluk, F_e) olarak değerlendirilir. Eşdeğer çekme dayanımı, betonun çatlama sırasındaki gerilmesidir, [14]. Lifli beton tokluğunu açıklamada; eşdeğer çekme dayanımı olarak adlandırılan kavram, **maksimum çekme dayanımı** (F_u) veya **Rupture modülü** olarak adlandırılan kırılma anındaki çekme gerilmesini gösteren kavramdan daha açıklayıcıdır.

δ_{tb} : Sehim, 3 mm (150 X 150 X 500 mm'lik numunede mesnetler arası açıklığın (450 mm) 1/150 ölçüsündeki deformasyonu)

l : Deneş numunesinin iki mesnet arasındaki uzunluğu, (mm)

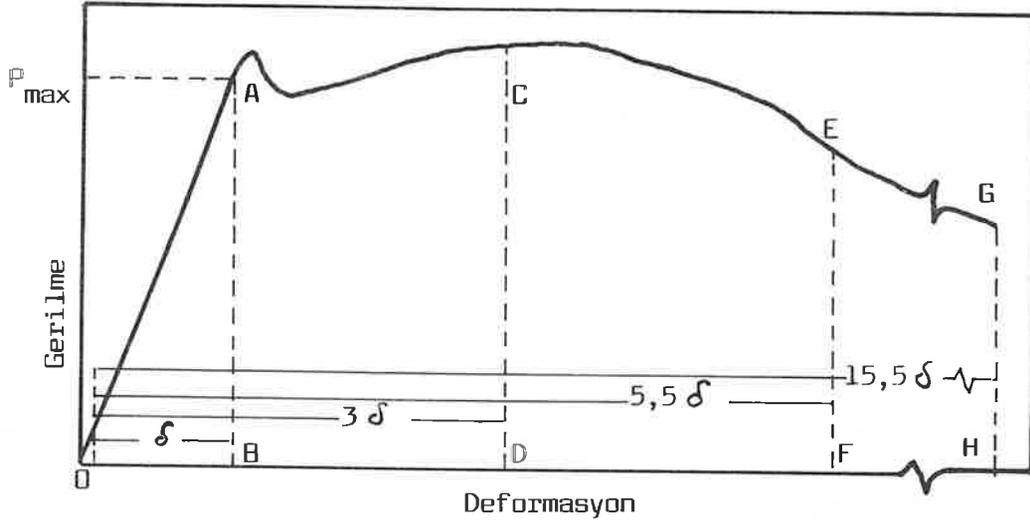
b : Kırılma yüzeyi kesit genişliği, (mm)

h : Deneş numunesi yüksekliği, (mm) ' dir.

Tokluk indeksi ise çelik lifli betonların elastik-plastik davranışını açıklayabilmek amacıyla geliştirilmiş bir kavramdır. Bu indeksler, numune özelliklerinden bağımsız oldukları için değerlendirme açısından daha anlamlıdır. Şekil 4.11 ve 4.12 incelenecek olursa ilk çatlama gerilmesi olan A noktasına kadar olan yük-deformasyon eğrisinin altındaki OAB üçgeninin alanı belirlenir. Jhonston'a göre bu alan ilk çatlak tokluğudur, [25]. İlk çatlak tokluğu şu şekilde hesaplanır;

$$\text{ilk çatlak tokluğu} = \frac{1}{2} P. \delta \quad (4.3)$$

Numune, anılan standartlar gereği, ilk çatlak gerilmesi alanının 3 katındaki deformasyon (sehim) değerine kadar yüklenerek OACD alanı belirlenir. Bu alan OAB ilk çatlak gerilmesi alanının 3 katıdır.



Şekil-4.11 Tokluk indekslerinin hesaplanması için çizilmiş gerilme-deformasyon eğrisi,[14]

Bulunan OACD alanı ilk çatlak alanına (OAB) bölündüğünde I_5 elastik şekil değiştirme indeksi hesaplanır;

$$I_5 = \frac{\text{OACD}}{\text{OAB}}$$

I_{10} ve I_{30} (TS10515'te I_{30} yerine kullanılan I_{20}) indeksleri ise ilk çatlak gerilmesinin 5,5 ve 15,5 (TS 10515'e göre 10,5) katı kadar yapılan deformasyonlar sonucu bulunan alanların ilk çatlak alanlarına bölünmesi ile bulunur.

Buradan ;

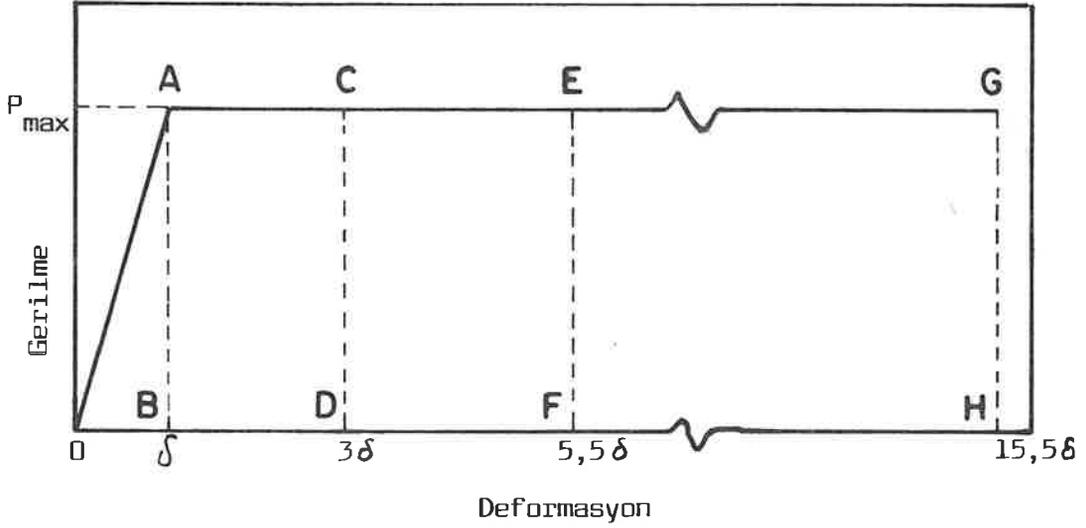
$$I_{10} = \frac{\text{OAEF}}{\text{OAB}}$$

$$I_{30} = \frac{\text{OAGH}}{\text{OAB}}$$

olarak hesaplanır.

Çelik lifli betonların yüksek deformasyon (sehim yapabilme) özeliği göstermesi sonucu standartlarda I_{30} olarak geçen son tokluk indeksinden sonra son yıllarda pratikte I_{90} gibi indeksler de kullanılır olmuştur.

Çelik lifli betonlarda deneyler sonucu çizilen yük-deformasyon eğrisi altında kalan alan üzerinden hesaplanan I_5 , I_{10} , I_{30} (I_{20}) elastik şekil değiştirme indeksleri gerçek performansın kolayca anlaşılabilirliğini ve referans betonla karşılaştırılmasını sağlar. I_5 , I_{10} , ve I_{30} indeksleri, ilk çatlak anına kadar doğrusal elastik davranış ve daha sonra da meydana gelen plastik davranışı açıklar. Elastik şekil değiştirme indeksleri değerlendirilirken tablo-4.1 esas alınır. Örneğin, I_{10}/I_5 için 2 değeri bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasındaki mükemmel plastik malzeme hareketini, yani yükte



$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad I_{30} = \frac{OAGH}{OAB}$$

Şekil-4.12 Tokluk indekslerinin hesaplanması için şematize edilmiş gerilme-deformasyon eğrisi alanları,[14]

herhangi bir değişiklik olmaksızın deformasyondaki (sehim) artışı gösterir. I_{30}/I_{10} oranı için 3 değeri, bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasındaki mükemmel plastik hareketi gösterir. Bu değerden küçük değerler ise düşük performansı ifade ederler.

Bu kriterlerin yanı sıra çelik lifli betonun tokluğunu değerlendirebilmek için, **tokluk faktörü** (mukavemet farkı değeri) adı verilen bazı ampirik bağıntılar da kullanılır.

Tablo-4.1 Tokluk (Elastik şekil değiştirme) indekslerinin değerlendirme kriterleri

Baz Alan	İndeks	Eğilme Kriteri	Lifsiz Beton	Elastik-Plastik Malzeme	Lifli Beton için aralık
QACD	I_5	3	1,0	5,0	1-6
QAEF	I_{10}	5,5	1,0	10,0	1-12
QAGH	I_{20}	10,5	1,0	20,0	1-25

Örneğin ASTM C 1018'de ,

$$R_{30/10} = 5(I_{30}-I_{10}) \quad (4.4)$$

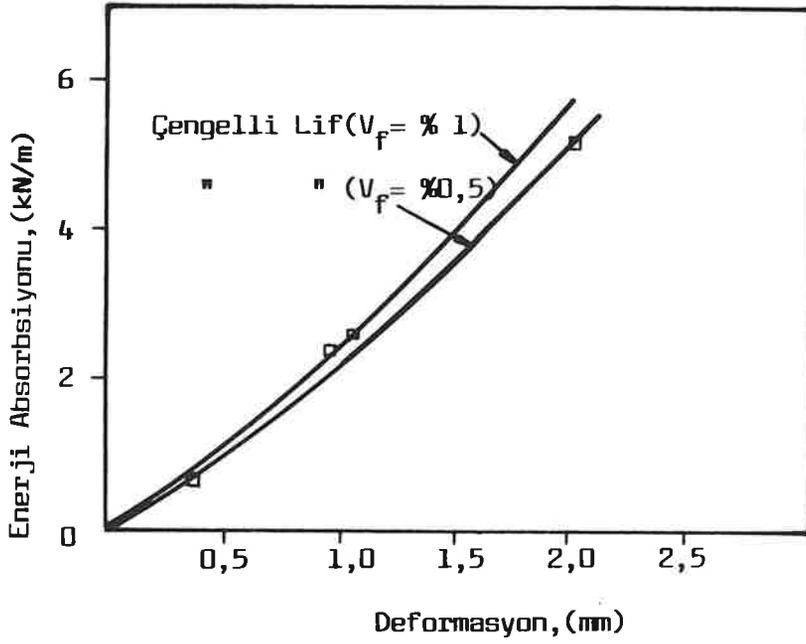
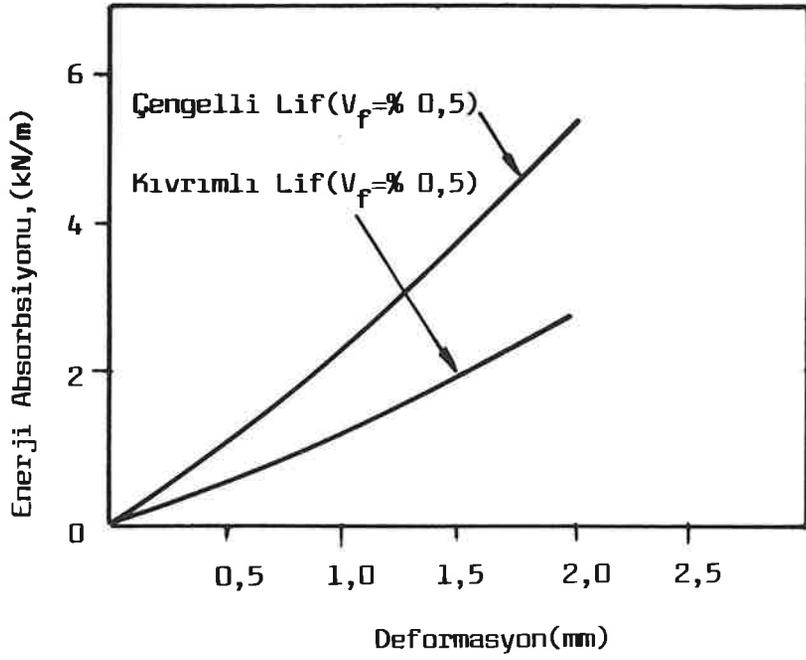
ve TS 10515'de ise

$$R_{10.20} = 10(I_{20}-I_{10}) \quad (4.5)$$

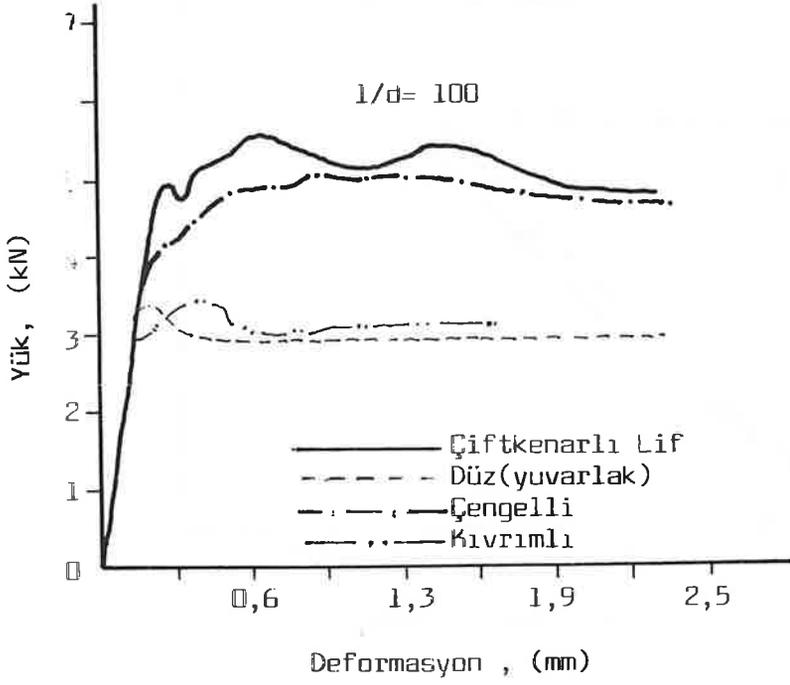
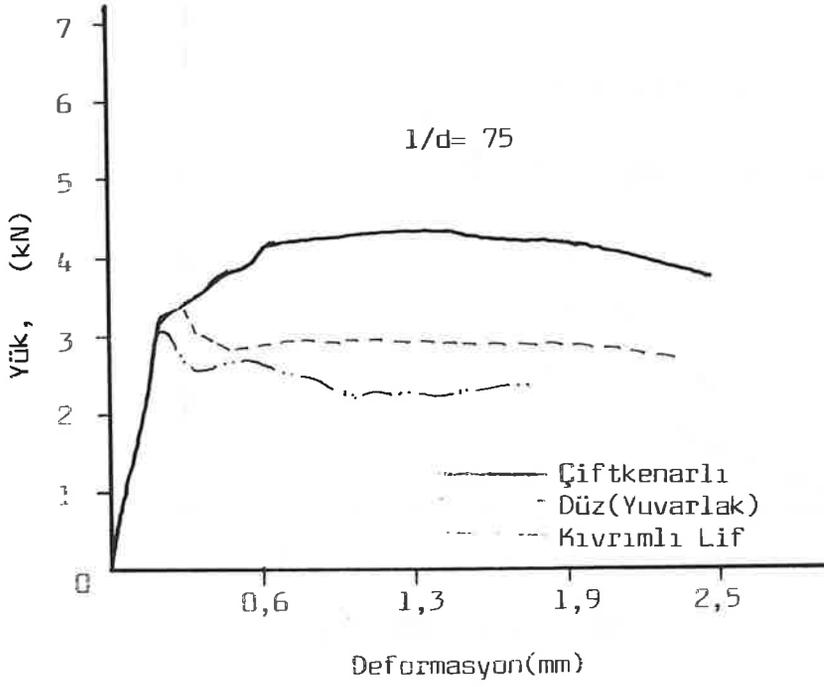
olarak verilen tokluk faktörü bağıntıları gibi.

Tokluk yada enerji absorblanması çelik liflerle güçlendirilmiş betonların en önemli özeliğidir. Bu nedenle lifli betonların işlevselliği değerlendirilirken esas alınan bir parametredir. Bu özellik de çelik lifli betonun diğer özellikleri gibi bileşim parametreleri (lif hacmi fraksiyonu, görünüş oranı, lif geometrisi, lif boyu, vs) ile yükleme hızı ve deney numunesi boyutları gibi bazı olgulardan etkilenir. Bu konuda yapılmış bir çok çalışma olmasına rağmen bu sonuçlar değerlendirildiğinde, her yeni çalışma için eğer sayısal sonuçların bilinmesi gerekiyorsa bu çalışmaların tekrardan yapılması zorunluluğu olmaktadır. Literatür [26]'ya göre yapılmış olan çalışmalar sonuçları itibari ile değerlendirildiğinde, çelik lifler ile güçlendirilmiş betonların enerji absorblamasının (tokluğun) lif hacmi fraksiyonuna ve tipine duyarlı olduğu şekil-4.13 ve 4.14'ten görülebilir. Bir başka çalışmada [23] ise değişik lif tipleri ve farklı uzunluk/çap oranlarındaki lifler ile hazırlanan betonlar üzerinde yapılan deneyler sonucu hazırlanan yük-deformasyon eğrilerinden (şekil-4.15 4.16,4.17,ve 4.18) çizilen enerji absorpsiyonu,grafik olarak şekil-4.19 ve 4.20'de daha açık olarak görülmektedir.

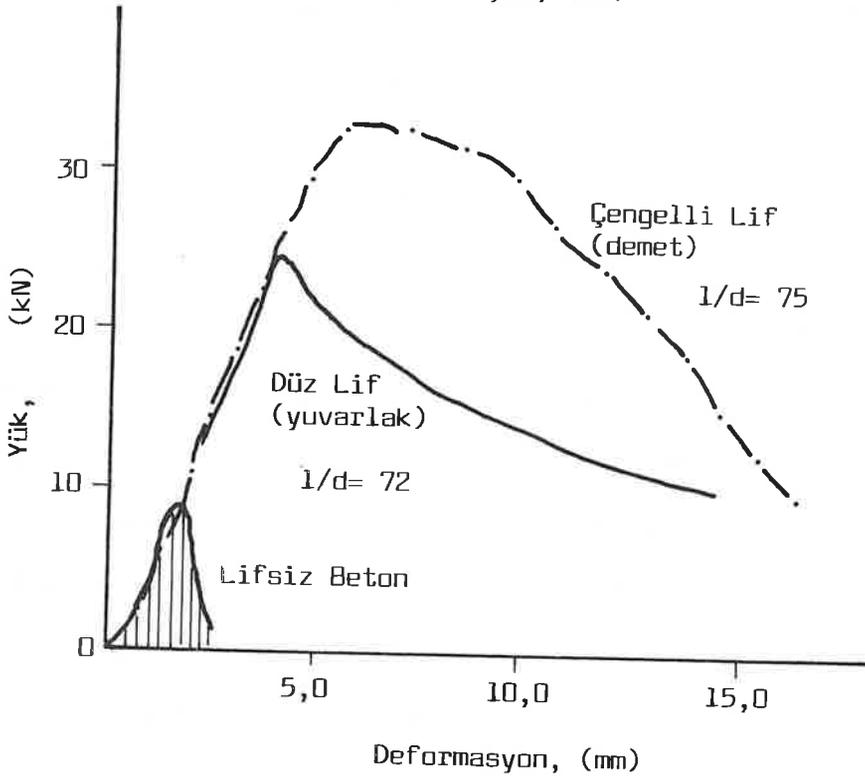
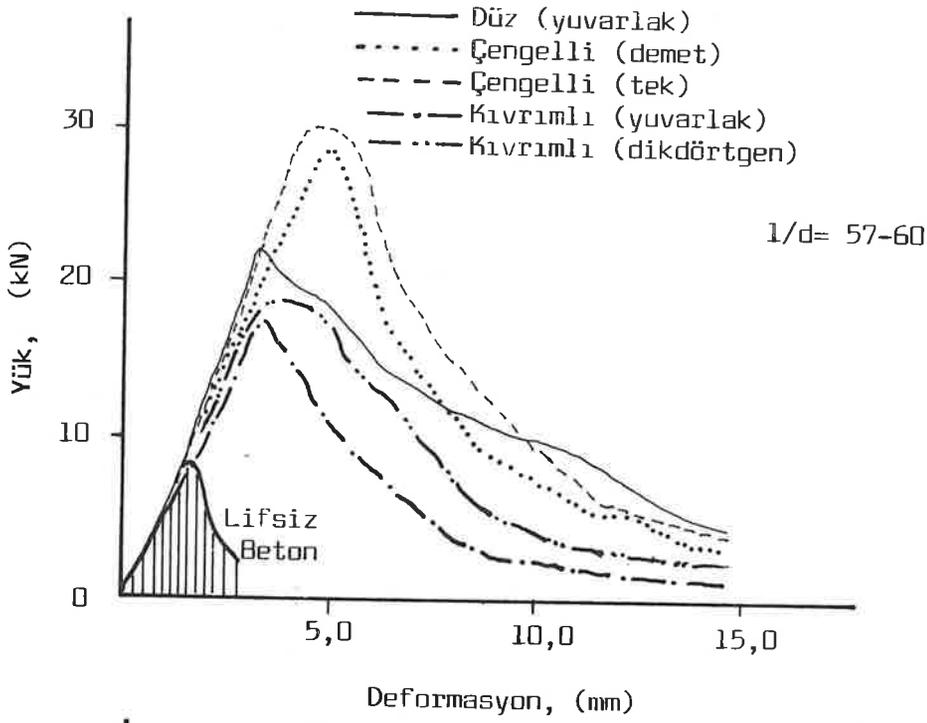
Literatür [27]'de ise çelik lifli betonların tokluk özelliklerinin lif hacmi-deformasyon ilişkisi ve lif hacmi-tokluk indeksi açısından normal ve yüksek dayanımlı betonlar için incelendiğini görüyoruz, şekil-4.21,4.22,4.23,4.24, 4.25.



Şekil-4.13,4.14 Lif hacmi fraksiyonuna ve lif tipine göre tokluğun değişimi,[26]



Şekil-4.15,4.16 Lif tipi ve lif görünüş oranına göre tokluğun değişimi, [23]



Şekil-4.17,4.18 Lif tipi ve lif görünüş oranına göre tokluğun değişimi,[23]

Bu çalışmalar değerlendirildiği zaman çelik liflerle güçlendirilmiş betonların tokluk özeliği açısından şu genel-lemeleri yapmak mümkündür:

- Çelik lifli betonda kullanılan lifin geometrisi, uzunluk/çap oranı ve lif hacmi fraksiyonu betonun tokluk karakterini doğrudan etkilemektedir.

- Çengelli liflerin kullanıldığı betonların tokluğu diğer lif tiplerinin kullanıldığı betonlardan daha yüksektir, şekil-4.14,4.16,4.17,4.18,4.19,4.20.

- Lif hacmi fraksiyonunun büyümesi ile betonun tokluğu artmaktadır, şekil-4.13,4.19,4.20,4.21,4.22, 4.23.

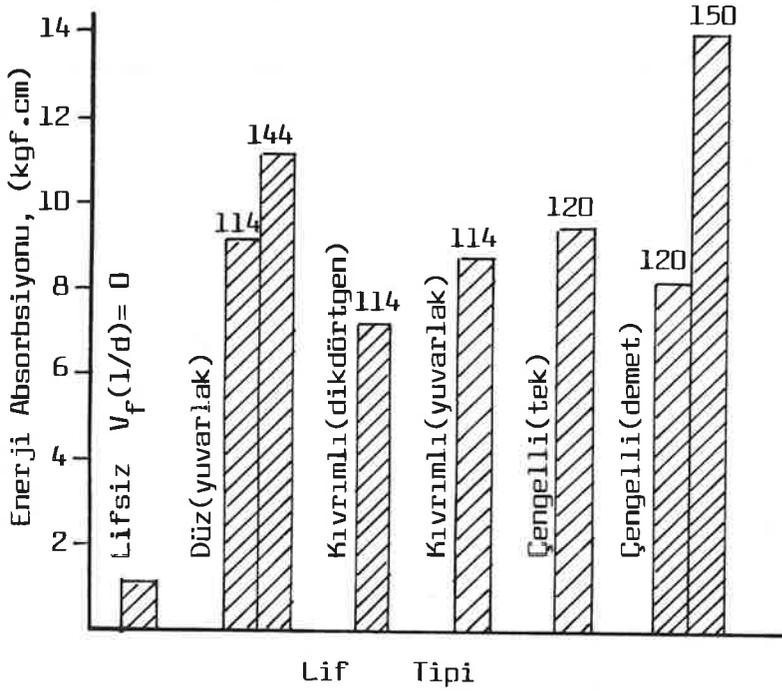
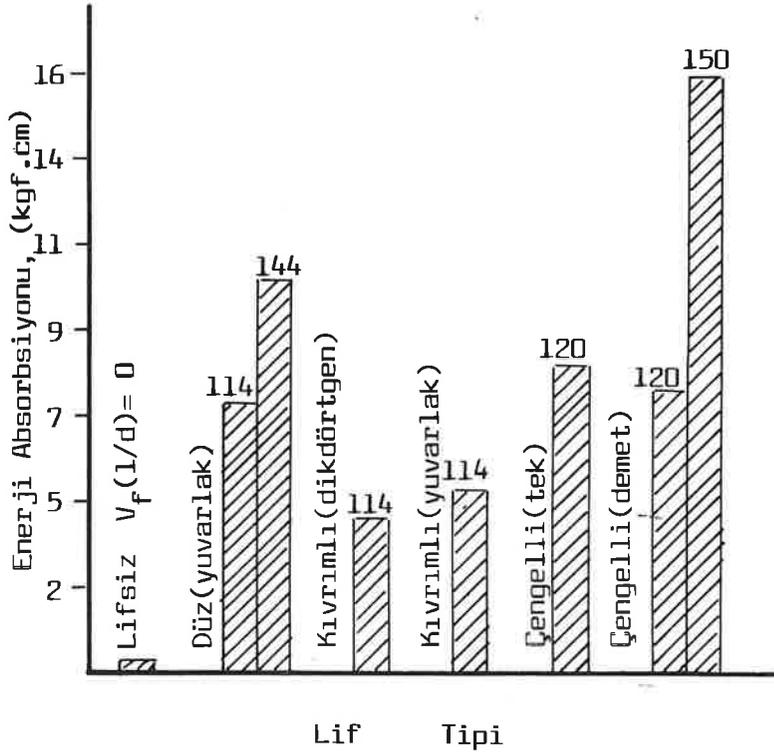
-Lif görünüş oranının (l/d) büyümesi ile betonun tokluğunda az da olsa bir artış meydana gelmektedir, şekil-4.5,4.16,4.17,4.18.

- Büyük tokluk indeksi değerlerinde (I_{20}) lif hacmi fraksiyonunun büyümesi ile betonun tokluğundaki artış daha somut olarak görülmektedir, şekil-4.23

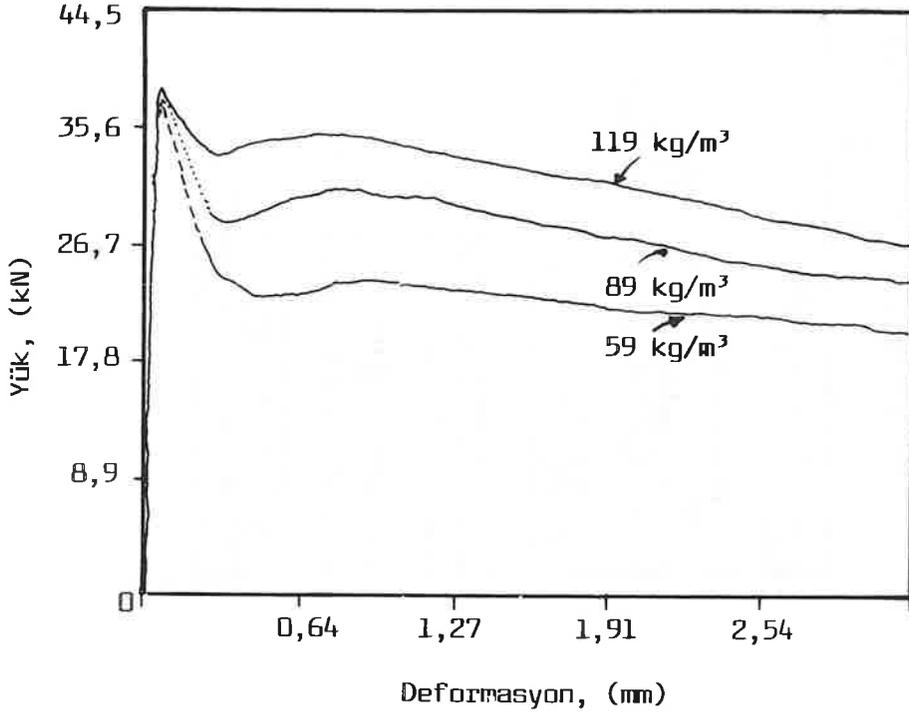
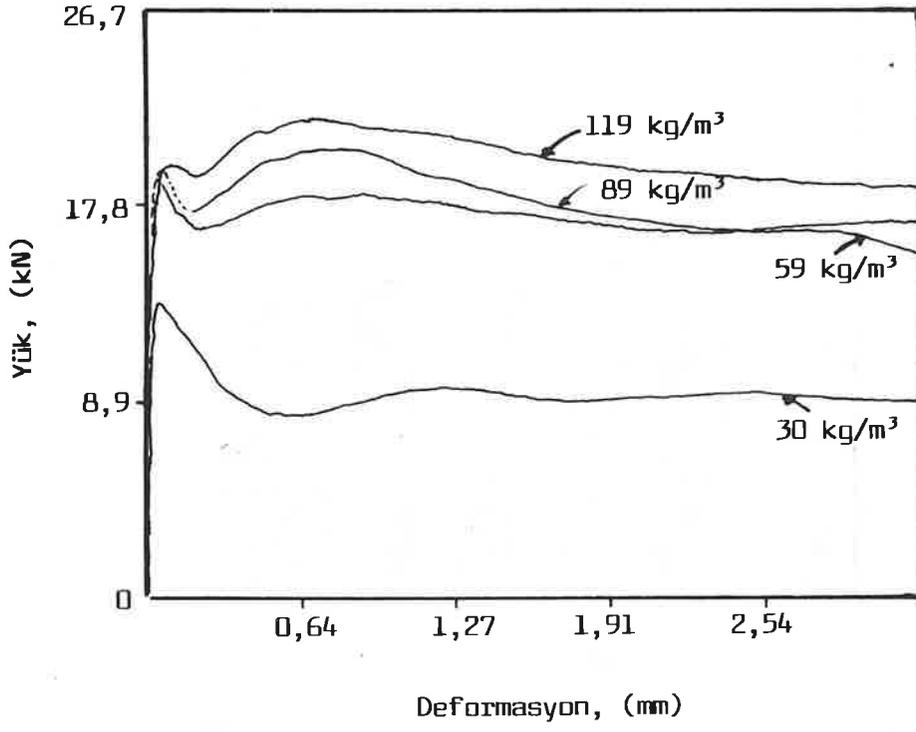
- Lif boyunun artması ile betonun tokluğunda görülen artış büyük indeks değerlerinde daha belirgindir, şekil-4.24.

-Aynı lif içeriğinde yüksek dayanımlı betonların tokluğu normal dayanımlı betonlara göre biraz daha azdır, şekil-4.25

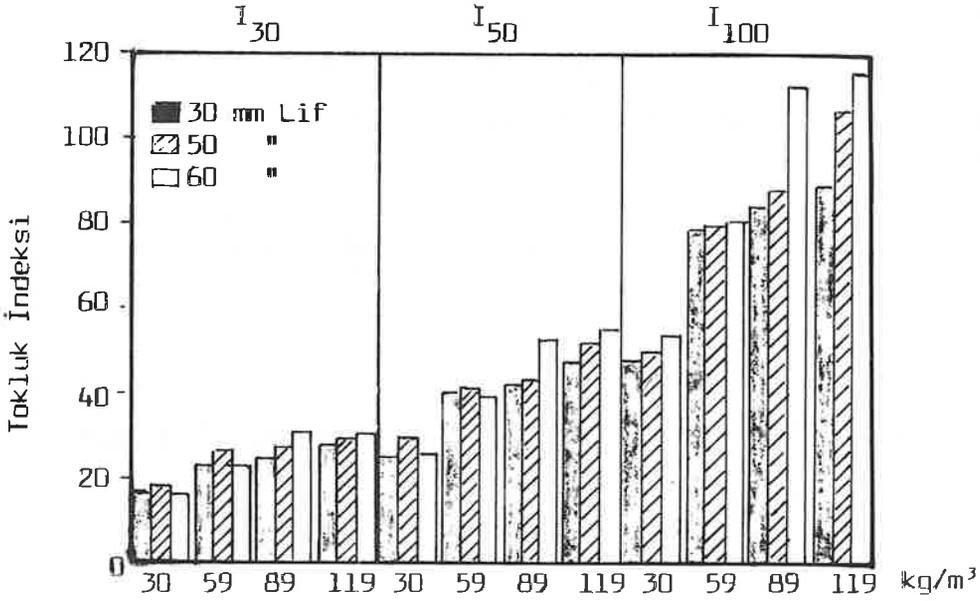
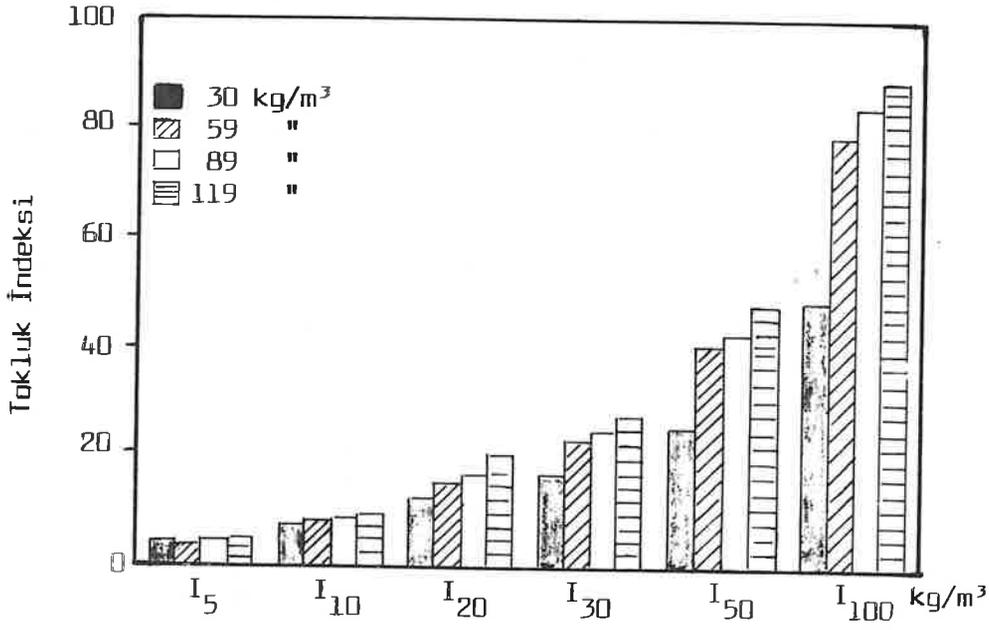
- Betonun lif içeriğinin artması ile tokluğu da artmaktadır, şekil-4.21,4.22.



Şekil-4.19,4.20 Lifle güçlendirme indeksi ve lif tipine göre tokluğun değişimi, [23]



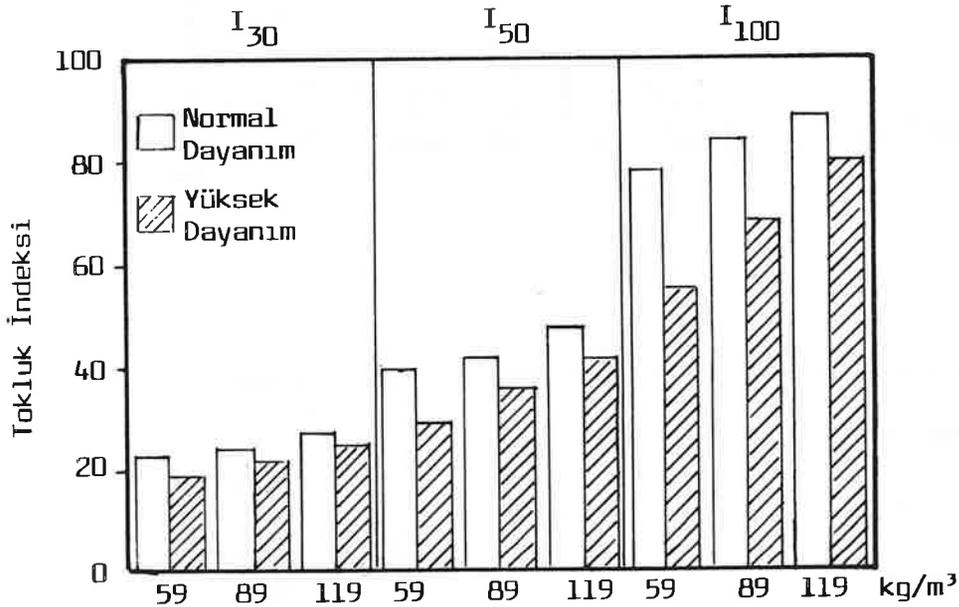
Şekil-4.21,4.22 Yüksek dayanımlı betonlarda lif hacmi ile değişen betonun tokluğu,[27]



Şekil-4.23,4.24 Yüksek dayanımlı betonlarda lif hacmi ve lif boyu ile değişen tokluk indeksleri,[27]

- Çelik lifler ile güçlendirilmiş betonun davranışını açıklayabilmek açısından I_5 ve I_{10} indeksleri sonuçları açısından yeterince açık değildir. Standartlarda olmamakla birlikte $I_{30}(I_{20})$ indeksinin üzerinde de ölçümler yapılarak kıyaslama yapılabilir.

- Ancak 30 kg/m^3 lif içeriğinden sonra betonun tokluğundaki artış açık olarak izlenebilmektedir.



Şekil-4.25 Yüksek ve normal dayanımlı betonlarda lif hacmi ile tokluk indeksi arasındaki ilişki, [27]

4.2.2 Eğilmeye Çekme Dayanımı (Flexural Strength)

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarla ilgili standartlarda Rapture Modülü olarak tanımlanan bu özellik betonun yük-deformasyon eğrisi çizilirken maksimum yükte meydana gelen

gerilmenin bulunması ile belirlenir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere ASTM C 78 (veya TS 3284)ve ASTM C 1018 (veya TS 10515)'e göre yapılacak deney sonucunda nihai yük belirleni: şekil-4.9. Bundan sonra (4.2) denklemi kullanılarak eğilme dayanımı hesaplanır. Bu hesaplama maksimum momentte lifli betonun çekme kuvveti altındaki elastik davranışını açıklar,[20].

Bölüm 4.1'de verildiği üzere çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları normal betonlara göre % 50-100 arasında artış göstermektedir. Bu artış çelik liflerin yüksek çekme dayanımlarından ileri gelmektedir. Çimento hamuru matrisinin çatlamasından (ilk çatlaktan) sonra liflerin çatlak sonlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük , ilk çatlaktan sonra bir miktar daha artar. Bu durumda maksimum eğilme yükü lifsiz betonlara göre daha fazla olmaktadır,foto-4.3,4.4

Eğilme dayanımı da liflerle güçlendirilmiş betonların diğer özellikleri gibi lif hacmi fraksiyonundan, lif geometrisi ve uzunluğundan, deney numunesi (kiriş) yüksekliğinden ve liflerin beton içerisindeki yöneliminden etkilenmektedir, şekil-4.26,4.27,[28,3]

Literatür [28]'de eğilmede çekme dayanımı/yarmada çekme dayanımı oranı ile lif hacmi fraksiyonu arasındaki ilişki açıklanmaya çalışılmıştır, şekil-4.28. Buradan da görüleceği üzere lif hacmi fraksiyonunun artması ile çekme dayanımları oranında bir artış söz konusudur,foto-4.5 Harçlar üzerinde yapılmış bu çalışmalarda [28] aynı zamanda değişik gerilme seviyelerinde çatlak genişlikleri de ölçülmüştür, şekil-4.29

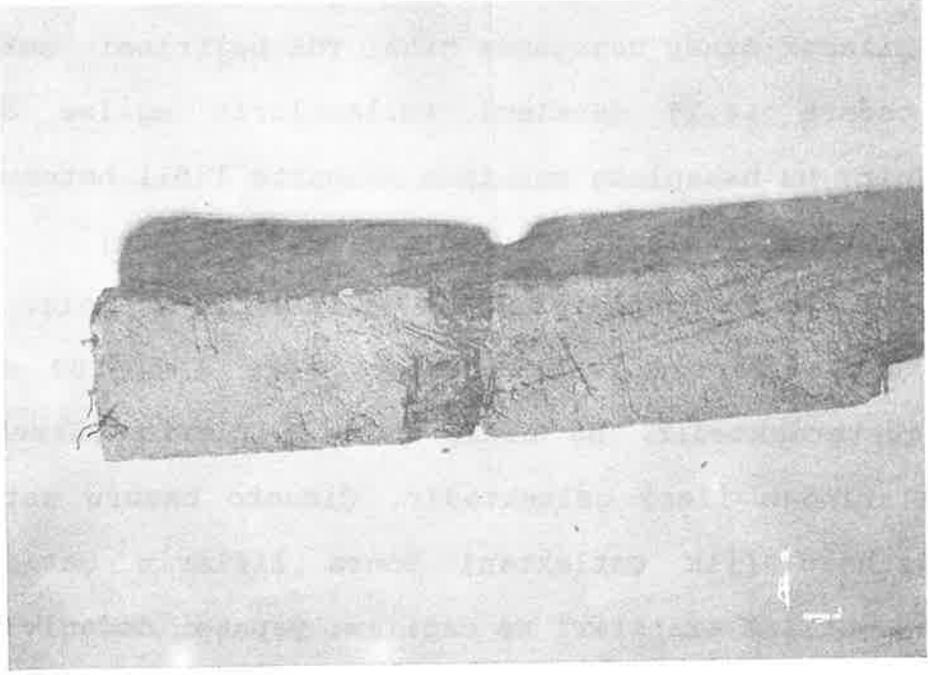
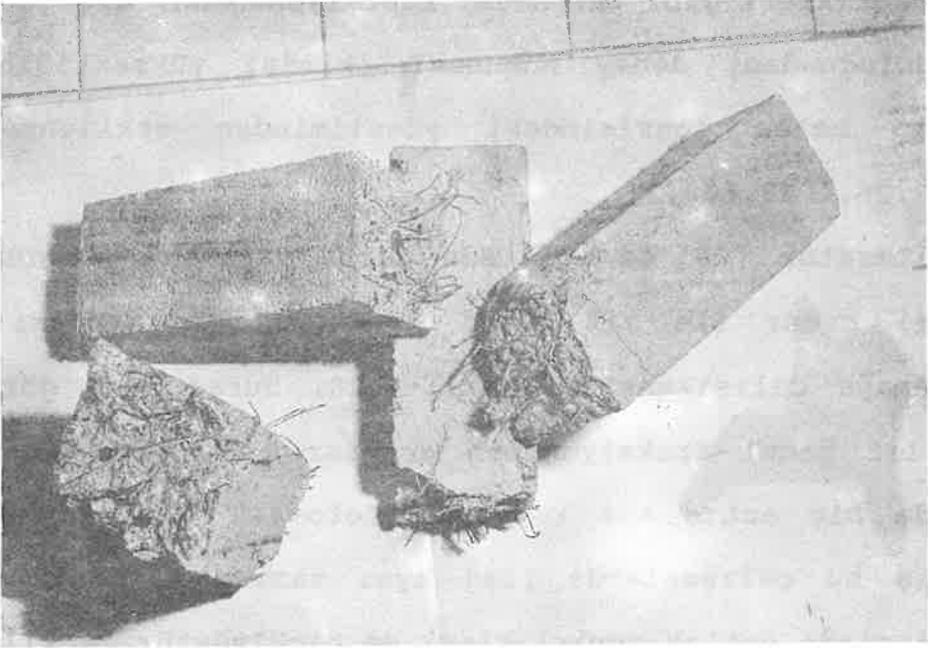
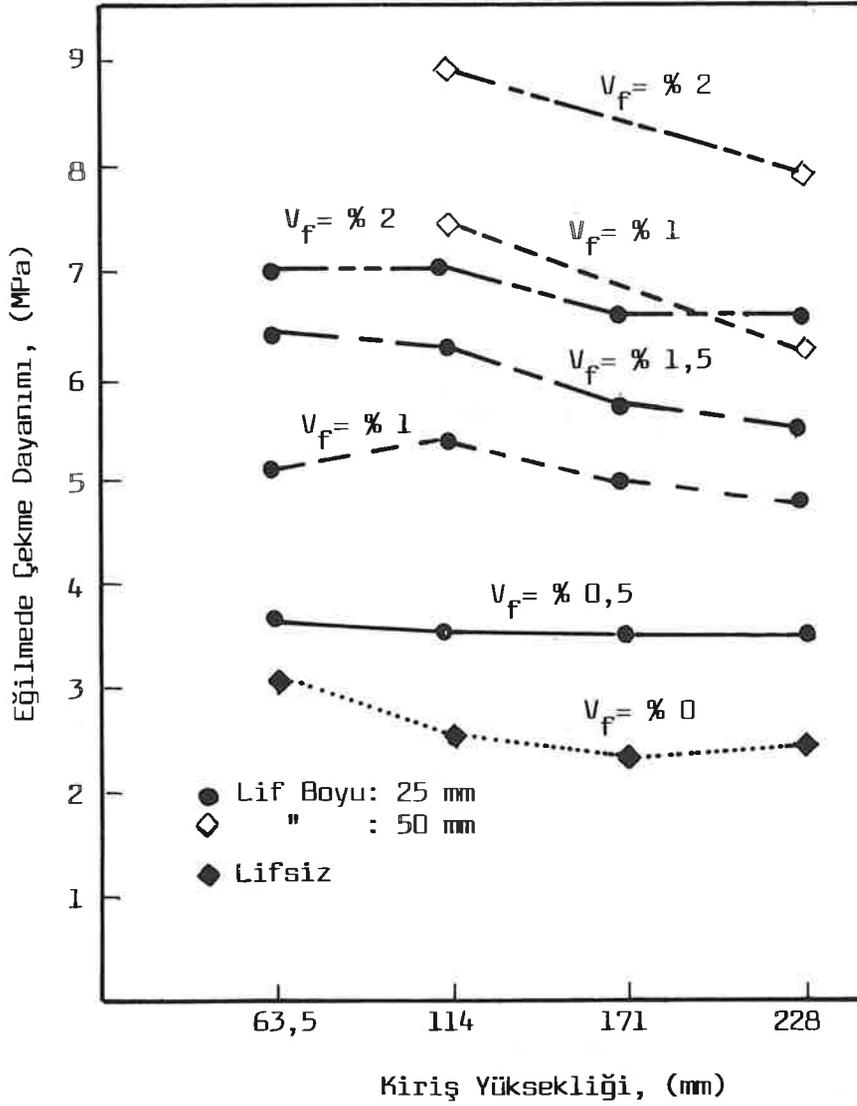
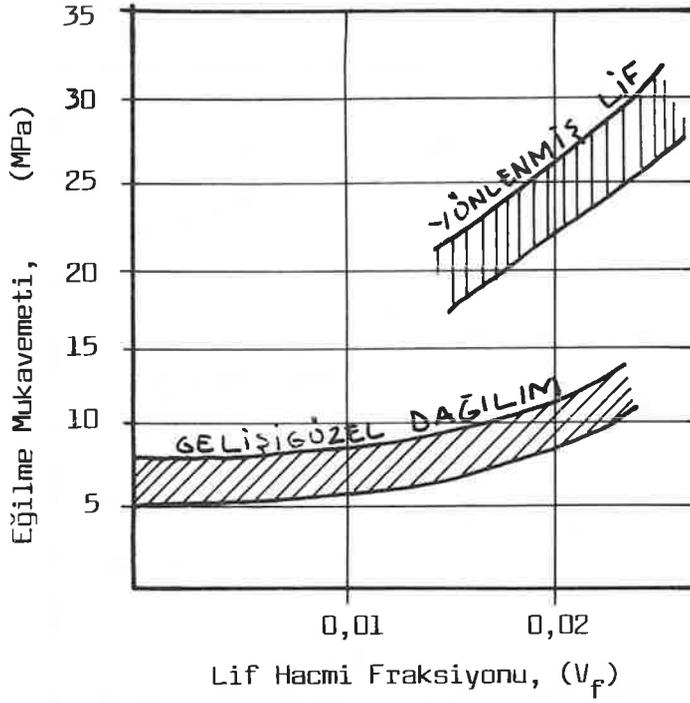


Foto-4.3,4.4 Eğilmede çekme dayanımı deneyinde kullanılmış
kiriş numuneler

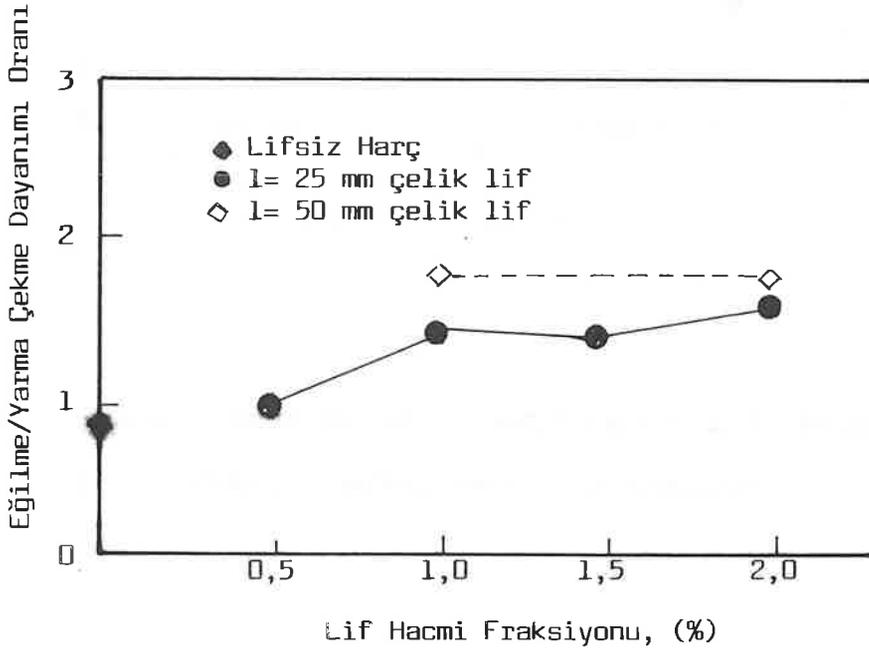




Şekil-4.26 Lif hacmi fraksiyonu ve numune yüksekliği ile değişen eğilmede çekme dayanımı,[28]



Şekil-4.27 Liflerin beton içerisindeki yönelimi ile değişen eğilmede çekme dayanımı,[28]



Şekil-4.28 Eğilmede/Yarmada çekme dayanımı oranı ile lif hacmi arasındaki ilişki,[28]

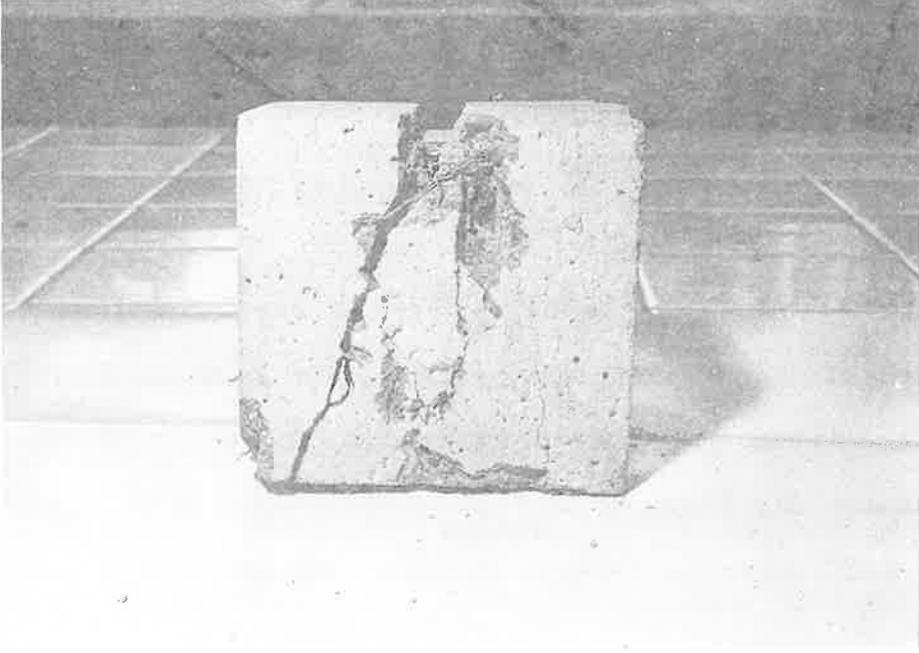
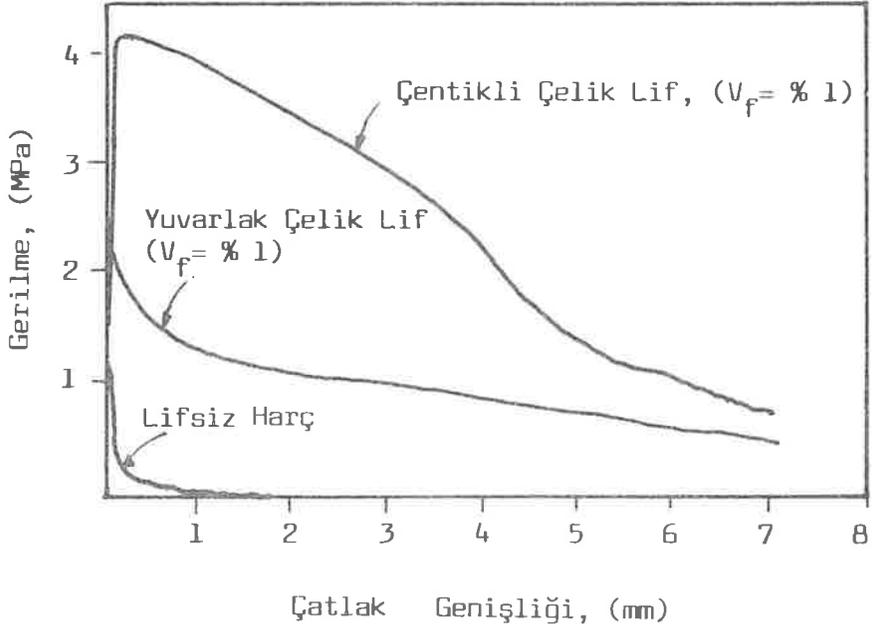


Foto-4.5 Yarmada çekme dayanımı deneyinde kullanılmış bir küp numune

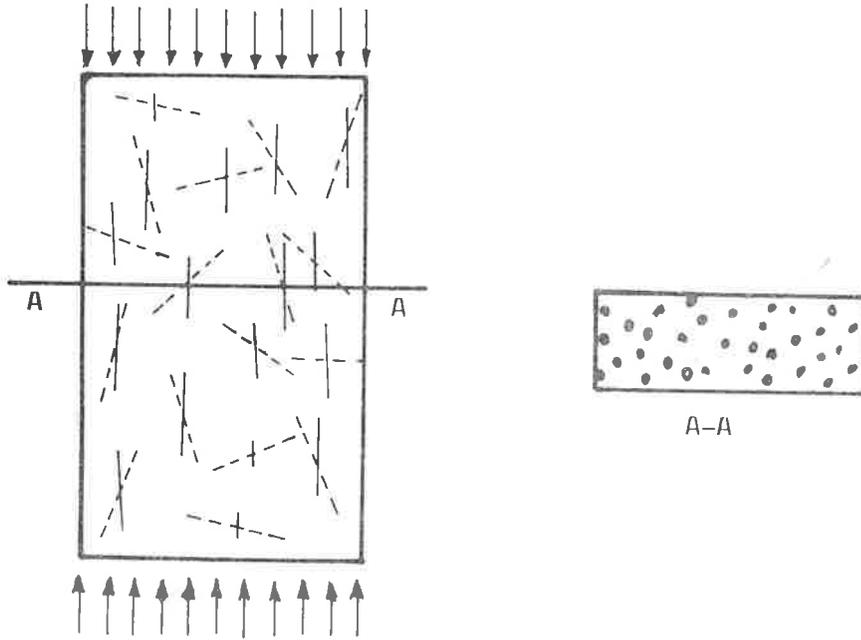


Şekil-4.29 Harçlar üzerinde yapılan çekme dayanımı sonrasında ölçülen çatlak genişlikleri, [29]

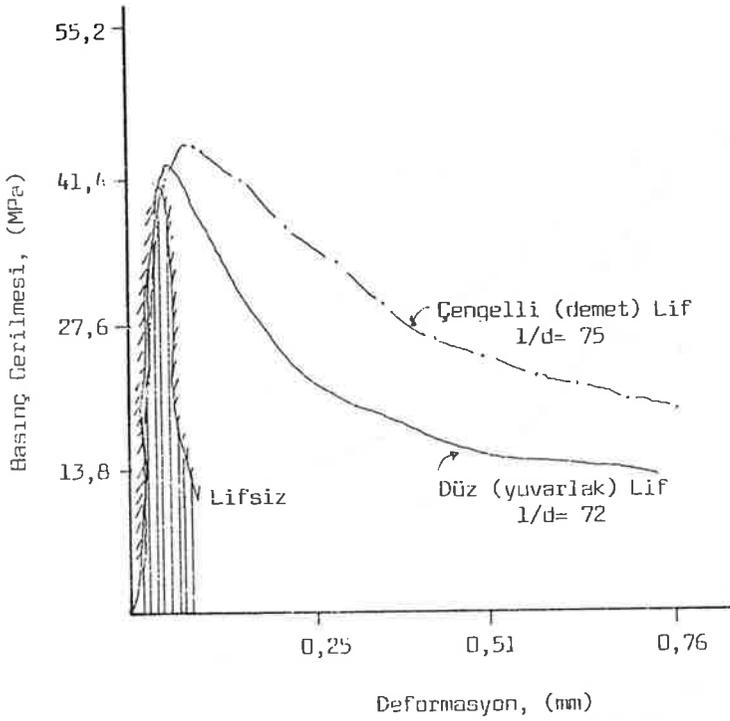
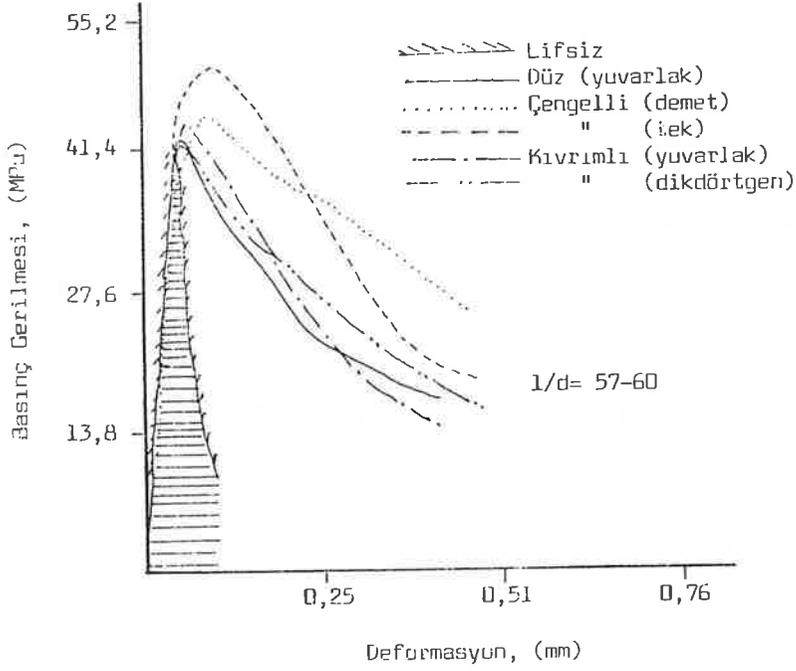
Yapılan çalışmalardan çıkan bir sonuçta; lifsiz betonlarda olduğu gibi; çelik lifli betonların eğilme kuvvetleri altındaki çekme dayanımları ile direkt çekme dayanımları arasında doğrudan bir ilişki olmadığı gerçeğidir,[20,28].

4.2.3 Basınç Dayanımı

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırma sonuçlarına göre, lifler betonun basınç dayanımını her zaman doğrudan olumlu etkilememekte, % 25 seviyesinde basınç dayanımı artışı görülebileceği gibi bazen de bu düzeyde bir dayanım kaybı ortaya çıkmaktadır,[4,16,17,18,19,29].

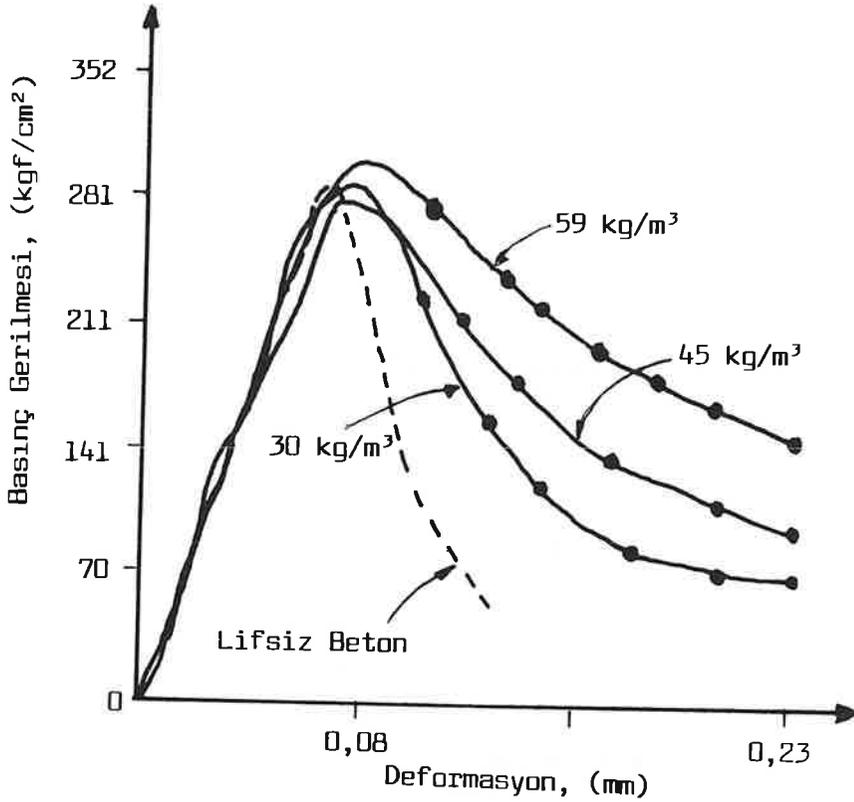


Şekil-4.30 Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi,[7]



Şekil-4.31,4.32 Lif tipi ve lif görünüş oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, [7]

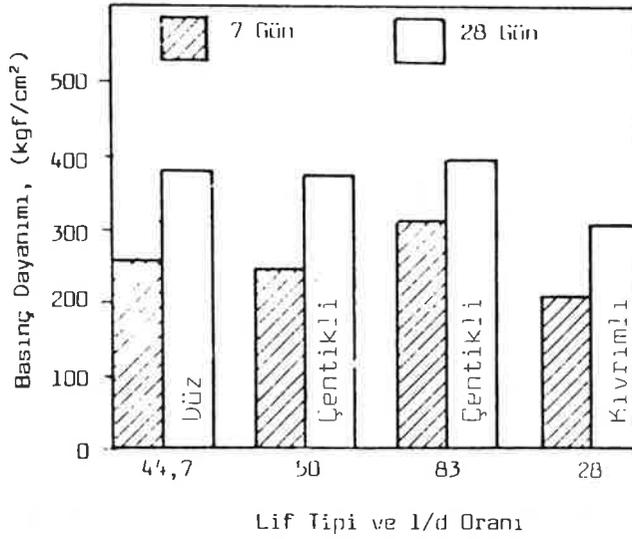
Şekil-4.30'dan da görüleceği üzere bu durum beton içerisine gelişi güzel dağılan çelik liflerin yönelimi ile doğrudan ilgilidir,[30]. Şekilden de görüleceği üzere yükleme düzlemine dik olan lifler betonun basınç gerilmesinde herhangi bir işlev yüklenmezler. Kesikli çizgiler ile gösterilmiş olan lifler ise yükleme düzlemine paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artmasına duyarlıdır. Basınç dayanımının nihai yükünde belirgin bir artış olmamasına karşın çelik lifli beton tek eksenli yükleme altında daha sünek davranabilmektedir, şekil-4.31,4.32,[7],4.33,[29].



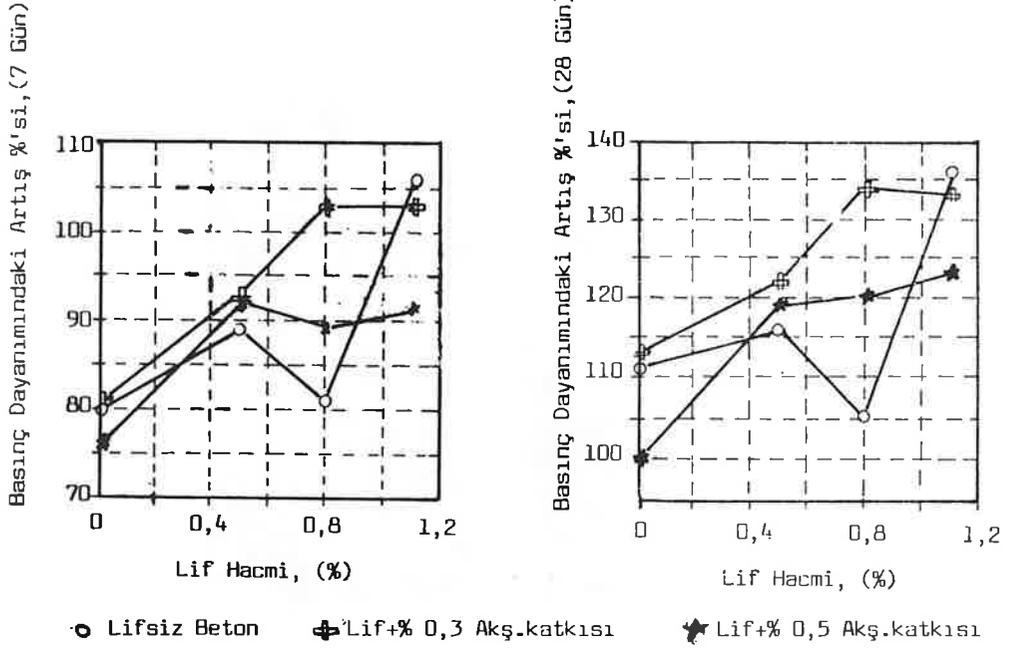
Şekil-4.33 Basınç gerilmesi altında lif hacmi ile değişen deformasyon davranışı,[29]



Foto-4.6 Yüksek deformasyonlarda çelik lifli betonun yük taşıyabilme özeliği



Şekil-4.34 Lif görünüş oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, [35]



Şekil-4.35 Katkılı ve lifli betonlarda lif hacmi ile basınç dayanımı arasındaki ilişki,[22]

Hatta numune boyunun % 10 kadar kısaldığı yüklemelerde bile numune hala yük taşıyabilmekte ve parçalanmamaktadır, foto-4.6

Şekillerden de görüleceği üzere gerilme-birim uzama (stress-strain) grafikleri incelenecek olursa basınç gerilmesinin çok az arttığı buna karşılık malzemenin daha çok birim uzama yaptığı görülecektir. Çelik lifli betonların diğer özelliklerinde görüleceği üzere burada da lif hacminin artması, l/d oranının büyümesi, lif şekli ile eğrinin gelişimi değişmektedir, şekil-4.34, 4.35

4.2.4 Kavitasyon Hasarları Dayanımı

Dolusavaklar gibi serbest yüzeyli fakat oldukça büyük akım hızlarının yer aldığı su yapılarında karşılaşılan sorunların en önemlilerinden biri kavitasyon ve bunun neden olduğu hasarlardır. Kavitasyon, akım hızının ve düşünün yüksek olduğu barajların dolusavak boşaltım kanallarında, akım içindeki basıncın buhar basıncına düşerek suyun buhar haline geçmesi ve akım içinde buhar kabarcıkları oluşturması olarak tanımlanır,[32]. Akım içindeki bu basınç azalması, hızın çok büyük değerlere ulaşması sonucu meydana gelebileceği gibi daha küçük fakat yeteri kadar büyük hızlarda, akımı sınırlayan yüzeyin üzerinde akımın sürekliliğini bozacak yerel veya sürekli düzensizlikler bulunması nedeniyle de meydana gelebilir,[32].

Akım yönünde , akımla birlikte sürüklenen buhar kabarcıkları , daha büyük basınç bölgelerinde patlayarak yoğunlaşırlar. Bu yoğunlaşmada kabarcık çevresinde kinetik enerjiye sahip olan sıvı ,kabarcık merkezine doğru hareket eder ve burada ani olarak durur,[33]. Bunun sonucu olarak sıvının sahip olduğu kinetik enerji çok kısa bir sürede basınç enerjisine dönüşür. Eğer bu durum akımı çevreleyen yapı yüzeyine yakın bölgelerde oluşursa yapıda hasar meydana gelir. Kavitasyonun ve bunun sonucu olarak patlamaların sürekli devam etmesi halinde ise kavitasyonun yer aldığı bölgenin hemen mansabında ortaya çıkan hasar giderek büyür ve yapının tahrip olmasına neden olur,[33].

Bu bakımdan su yapılarının öngörülen işletme şartlarında kavitasyon oluşturmayacak biçimde projelendirilmesi gerekir.

Buna rağmen yapım sırasında kullanılan teknik, malzeme, işçilik ve iklim şartları nedeniyle akımı sınırlayan yüzeyler üzerinde arzu edilmeyen şekil bozukluklarının ve yüzey pürüzlülüklerinin olduğu ,bunların meydana getirdiği kavitasyonun da önemli hasarlara neden olduğu sık sık görülmektedir ,foto-4.7,4.8,7.1,[31,32,33,34].

Yukarıdaki açıklamadan da anlaşılacağı üzere ortaya çıkan bu gerilmeler karşısında normal betonun dayanması mümkün değildir. Bu nedenle kavitasyon hasarının olabileceği su yapılarında şimdiye kadar şu önlemler önerilmiştir;

-Derzlerin düzenlenmesi konusunda yeni yaklaşımların denenmesi: dolu savaktan boşaltım kanalına geçişte genişleme derzi düzenlenerek donatılı plakalar pasif ankajlar ile kayaya bağlanmaktadır.

-Dayanım arttırıcı önlemler alınması: bu çalışmalar, boşaltım kanalının çelikle kaplanmasından başlayıp, beton dayanımının arttırılması, içerisindeki teçhizatın yüzeye yakın konulması ve epoksi kaplamalar ile beton yüzeyinin kaplanması gibi uygulamaları kapsar.

-Boşaltım kanalında yapım yada işletme süreci içerisinde ortaya çıkan, akımın ani olarak hızlanmasına, ayrılmasına ve alt basınç bölgelerinin oluşmasına neden olan düzensizliklerin giderilmesi.

-Tabana yakın havalandırıcılar inşa ederek su akımı içerisinde hava katılmak suretiyle akış sırasında meydana gelen basınç şoklarının sönmülenererek enerjilerinin kırılmasıdır,[32,33,34].



Foto-4.7,4.8 Dolusavak boşaltım kanalında kavitasyon sonucu oluşmuş hasarlar, (Aslantaş Barajı)



Günümüzde düşüleri yüksek olan barajlar yapılmaktadır. Bu nedenle kavitasyon-erozyon olasılığı daha da artmaktadır. Yukarıda kavitasyon önleyici tedbirler olarak sayılan uygulamalardan biri yada birkaçı boşaltım kanallarında uygulanmasına rağmen bazı yapılarda yine de hasar oluşması oldukça düşündürücüdür. Su yapılarında kritik yapılar olarak tanımlanan dolu savak, dolu savak boşaltım kanalı, dolu savak saptırıcıları, sıçratma eşiği, dipsavak, enerji kırıcı havuz, kıyı, emniyet duvarı , kuyruk suyu kanalı gibi yapılar gerek yapım sırasında gerekli kalite kontrolun yapılmaması ve projedeki bazı olumsuzluklar (statik hesapların yanlışlığı, havalandırıcıların uygun olmayan yerlerde projelendirilmesi, vs.) yüzünden potansiyel olarak kavitasyon-erozyon tehlikesi taşırlar, foto-4.9, 4.10, 4.11, 4.12. Bu nedenle, oluşabilecek hasarlara karşı çelik lifler ile güçlendirilmiş betonlar su yapılarında hasarın önlenmesi amacıyla alınan tedbirlerden biri olarak kullanılmaktadır. Hasarı önlemek için, hasarın meydana geldiği malzemenin kalitesinin yükseltilmesi çözüm için önemli bir adımdır. Çeşitli nedenlerle kavitasyona maruz kalmış bu yapılarda eğer beton, akım hızının yüksek olması nedeni ile ortaya çıkan çekme kuvvetlerine karşı dayanamıyorsa hasar bölgelerinin onarılmasında daha güçlü, darbe dayanımı, çekme dayanımı ve tokluğu (enerji absorblama kapasitesi) yüksek bir malzemeye ihtiyaç vardır. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton pratiğinden önce bu tip hasarların onarımında şimdiye kadar epoksi esaslı tamir harçları kullanılmasına karşın uygulamada başarı kazanılamamıştı.

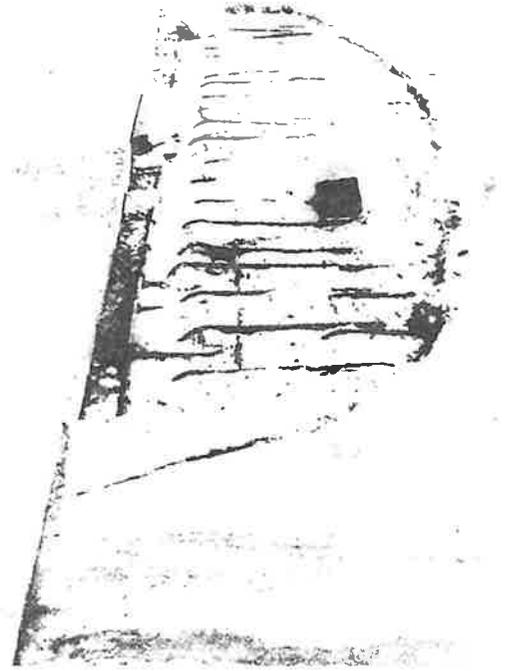


Foto-4.9,4.10

Keban Barajı dolusavak
boşaltım kanalında derzlerde
mevcut eşik nedeniyle
oluşan kavitasyon hasarı
ve onarım çalışmaları

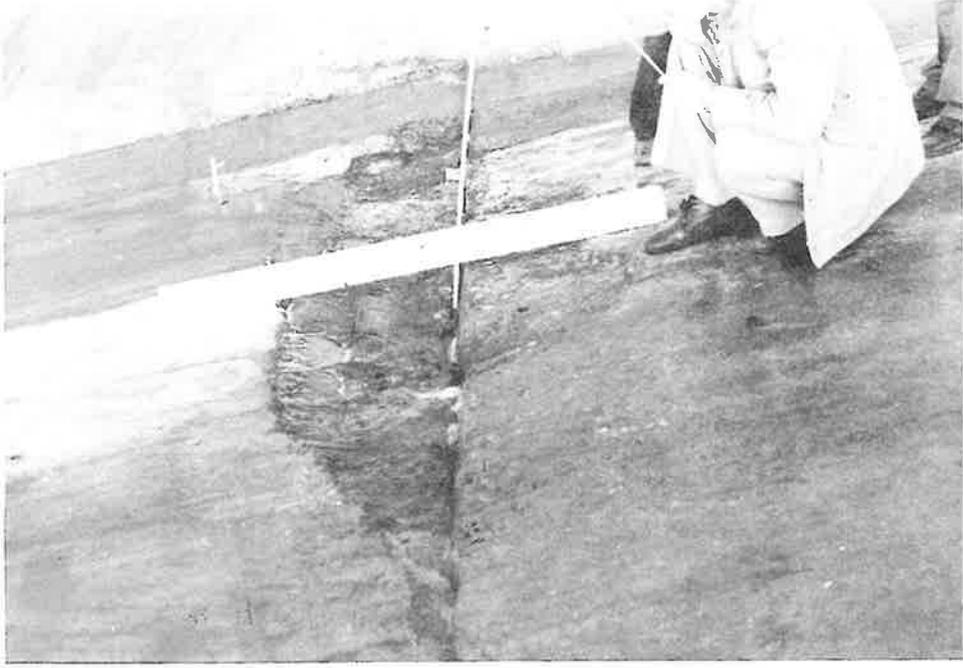
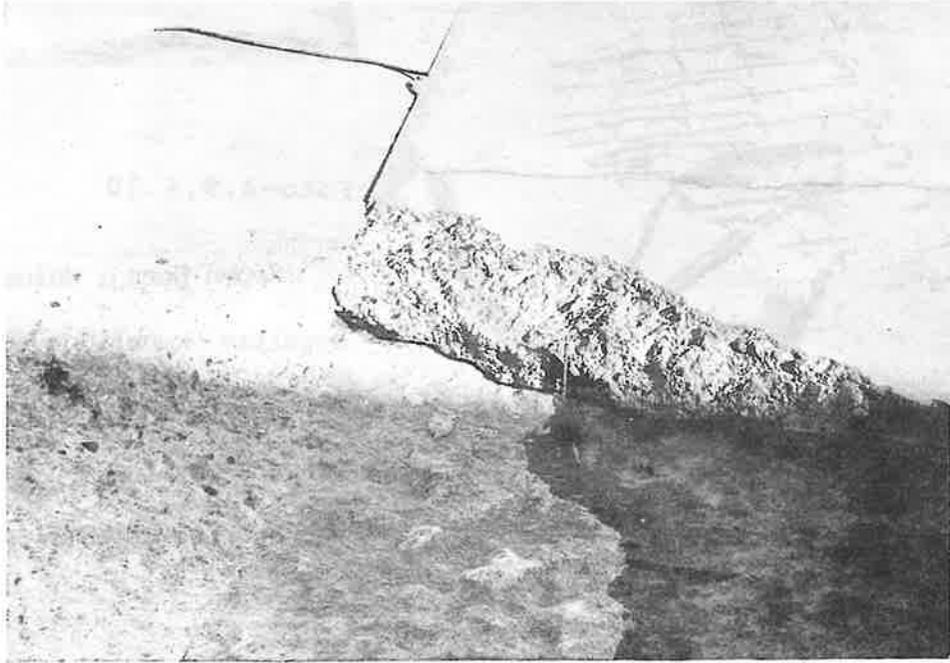


Foto-4.11,4.12 Kavitasyonu önlemek üzere yapılmış havalandırıcıların varlığına rağmen betonun kalitesizliği nedeniyle ortaya çıkmış oyulmalar,(Arslantaş Brj.)



Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun yüksek darbe ve çekme direnci onun yüksek seviyede enerji absorblama kabiliyetinin bir sonucudur. Kavitasyon, oluşum mekanizması açısından dinamik bir etki olup zamanla şiddetini arttırarak hasarı büyütür. Bu nedenle bulunacak çözümlerin yada iyileştirmelerin bu dinamik etkiyi sönmüleyebilecek veya geciktirebilecek bir özeliğe sahip olması gereklidir. Bu tip yapılarda çelik liflerle güçlendirilmiş betonu kırmak için, malzemenin yüksek tokluğu nedeni ile daha çok iş yapmak gereklidir. Betonun dinamik etkiler altındaki kırılma işi yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın büyüklüğü ile ölçülür. Bu özellik betonun çarpma mukavemeti ile de yakından ilgili olup çelik lifli betonlarda çok yüksektir.

Bölüm 4.2.1'de açıklandığı üzere çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar, liflerin çatlak sonlarına bitişik olması nedeniyle donatının yüklenmiş olduğu çekme gerilmesini alma işlevinin yanısıra betonun kırılma mekaniğini de değiştirerek çatlak yayılmasını da önlerler. Bu nedenle dinamik etkiler sonucu malzemenin çabucak çatlayıp parçalanması güçleşir. Bölüm VII'de çelik lifli betonlarla inşa edilmiş su yapıları ve bu yapılardaki onarımlardan ayrıntılı bir şekilde bahsedilecektir.

4.2.5 Yorulma Dayanımı

Malzemeyi normal olarak kırmaya yetmeyen (elastik limitin altındaki) gerilmelerin arka arkaya tekrarlı bir şekilde çok kere uygulanması sonucunda meydana gelen ve sonunda malzemenin

ani ve gevrek kırılmasına yol açan yorulma olayı da dinamik yüklemelerdeki kırılmanın başka bir örneğidir. Çelik lifli betonlar üzerinde yapılmış çalışmalarda yorulma dayanımının lifsiz betonlara göre % 50 ila % 100 arasında arttığı gözlenmiştir, [4,16,17,18,19].

Lifsiz betonlarda yorulma mukavemeti limiti, genel olarak statik eğilme gerilmelerinin % 50'sidir. Çelik lifli betonlarda beton içerisine ortalama 30-40 kg/m³ lif katılması sonucu bu limit % 80'lere çıkartılmıştır. Çelik lifli betonlarda çatlak yayılmasının durdurulması ve oluşan çatlakların ilerlemesi gibi özellikler nedeni ile tekrarlı yükler altında kırılma engellenir veya en azından kırılma süreci geciktirilir.

Çelik lifler ile güçlendirilmiş betonlar üzerinde yapılmış yorulma deneylerinde lif hacmi fraksiyonunun artması ile yorulma mukavemetinin arttığı gözlenmiştir. Eğilme yorulması deneylerinde 10 x 10⁶ tekrar yüklemeye % 2 çelik lif hacmindeki betonların yorulma dayanımları statik mukavemetin % 50'si civarında bulunmuştur, [3].

Özellikle tekrarlı yükler ve tekrarlı ağır yükler altında kalan endüstriyel döşemeler ve plaklarda yorulma dayanımının arttırılması önemli bir hadisedir.

4.2.6 Darbe Dayanımı

Betonun ani olarak dinamik bir kuvvetle yüklenmesi anlamına gelen darbe dayanımı çelik lifler ile güçlendirilmiş beton özellikleri içerisinde önemli derecede (% 100-1200 arasında) performans artışının kaydedildiği bir özelliktir.

Darbe dayanımı betonun tokluğu (enerji tutma kapasitesi) ve kırılma işi ile yakından ilgilidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda beton içerisindeki çelik lifler matris üzerine gelen dinamik yükleri kendi üzerlerine alarak matrisin çarpma mukavemetinden daha yüksek bir çarpma mukavemeti meydana getirirler.foto-4.13,4.14.

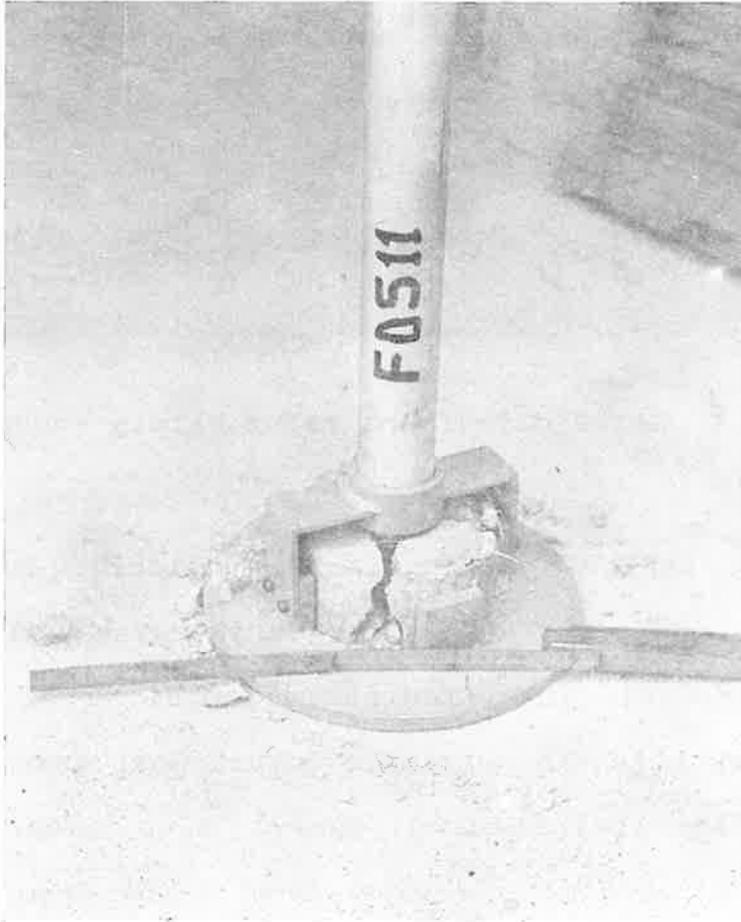


Foto-4.13 Çelik lifli betonlar üzerinde darbe dayanımı deneyinin yapılması

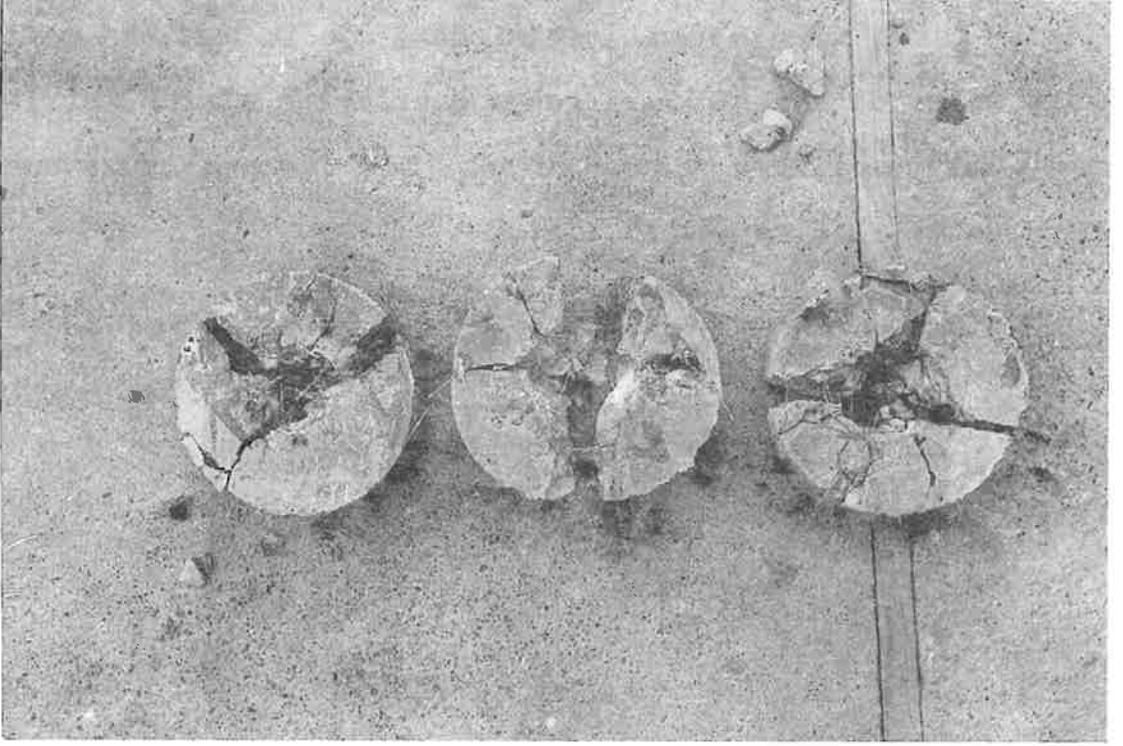


Foto-4.14 Darbe dayanımına maruz kalmış numuneler

ACI, çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar için değişik darbe (çarpma) dayanımı deneyleri tanımlamışsa da bunlardan sadece iki tanesini önermektedir. Birincisi lifli beton üzerinde bir çelik bilyanın defalarca düşürülmesi esasına dayanan Drop-weight (Ağırlık Düşürme) deneyi olup diğeri ise bir aletin çarpması yardımı ile malzemenin darbe dayanımı deneyleridir. Drop-weight deneyi pratikte daha çok kullanılır. Bu deneyde, ilk çatlak anındaki darbe sayısı ve malzemenin kırılma esnasındaki darbe sayısı referans (lifsiz) betona göre yorumlanarak değerlendirilir. Ortalama bir lif dozajında (yaklaşık 30 kg/m^3) çelik lifli betonun darbe direnci 10 ila 20 kat

lifsiz betondan daha yüksektir,[4,14].

4.2.7 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonlarda Rötire

Hacimsel büzülme anlamına gelen rötire betonda sıkça görülen bir hareket olup dört ana başlık ile katagorize edilir;

- Termik rötire
- Plastik rötire (Bünyesel- Erken rötire)
- Kuruma rötiresi (Hidrolik rötire-Şişme)
- Karbonatlaşma rötiresi

Bu dört farklı rötire oluşumunun mekanizmasında da betonun değişik priz süreçlerinde değişik nedenler ile meydana gelen çekme dayanımlarının karşılanamaması ve bu nedenle meydana gelen çatlakların artarak ve büyüyerek çoğalması gerçeği yatar. Bu nedenle priz süreci ve daha sonraki dönemlerde ortaya çıkan çekme gerilmelerini beton matrinden alabilecek ve gerilmeyi çatlak olmayan bölgelere de iletip dağıtacak lif gibi elamanlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle betonun serbest büzülme yapmasının engellendiği döşemelerde, yol kaplamalarında, havaalanlarında, farklı büzülme davranışlarının gerçekleştiği kütle betonlarında ve ani buharlaşmanın olduğu açık alan betonlarında (kanal,yol,vs.) beton içerisinde değişik lifler kullanılmaktadır. Günümüzdeki uygulamaların bir çoğunda, özellikle çok güçlü olmayan büzülmelere karşı polipropilen lifler tercih edilmektedir. Bununla birlikte kritik yapılarda ve güçlü büzülmelerin olabileceği yerlerde ise çelik liflerin kullanılması önerilmektedir, foto-4.15

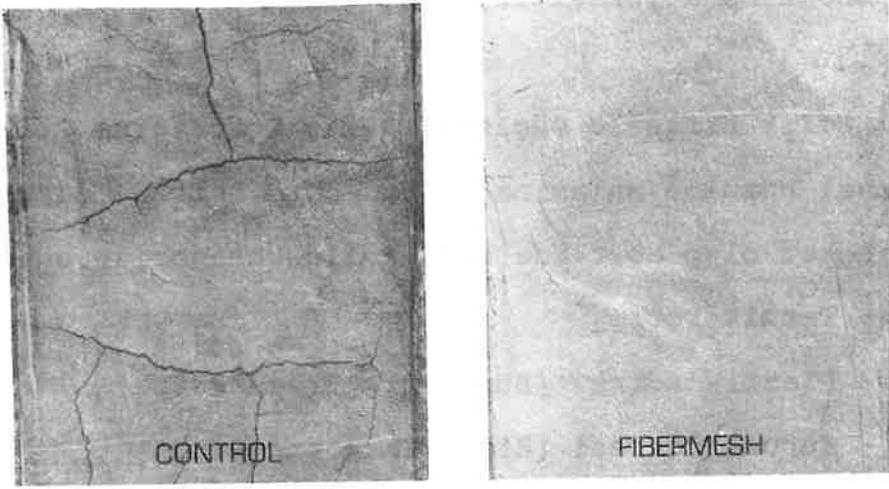
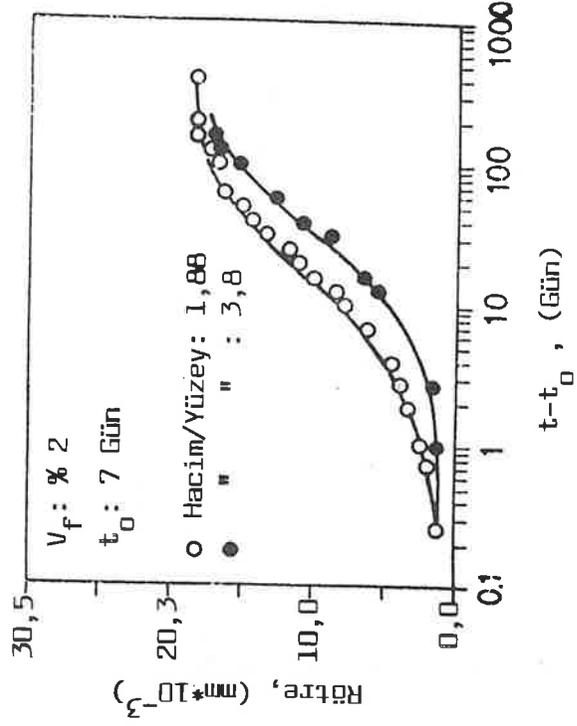
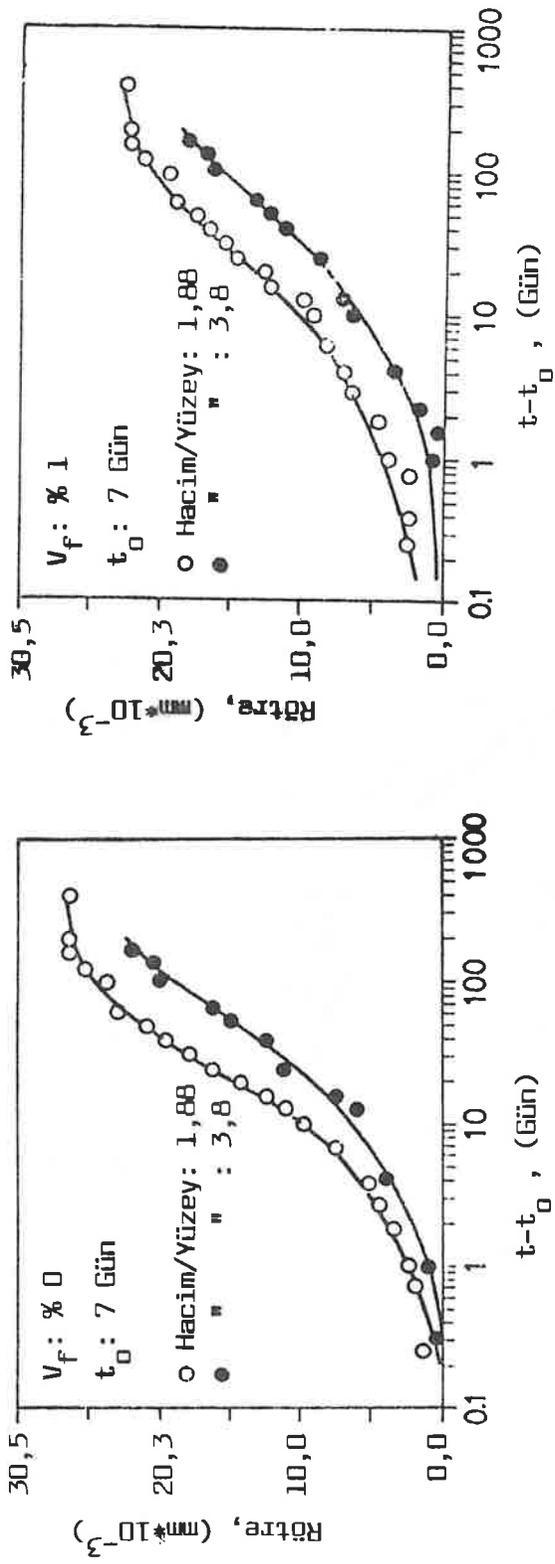


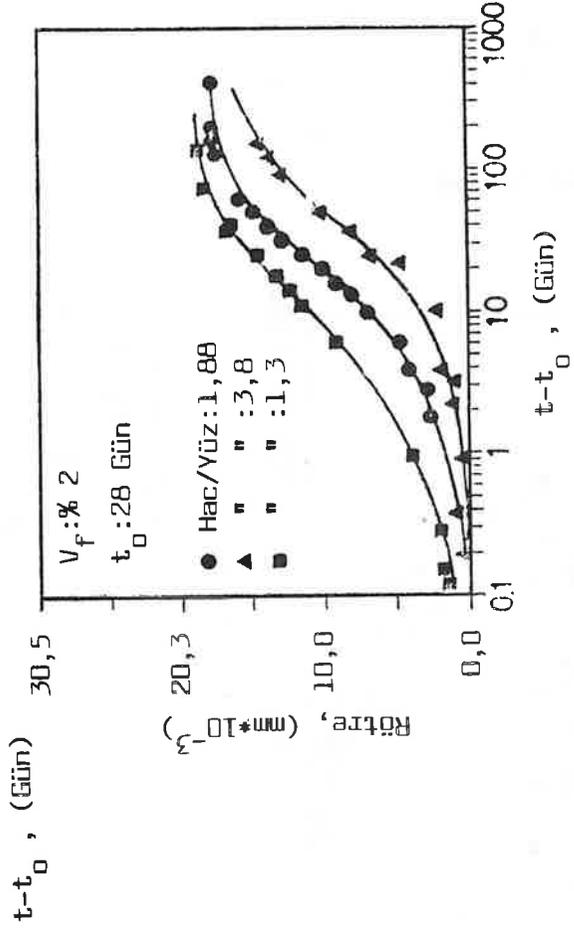
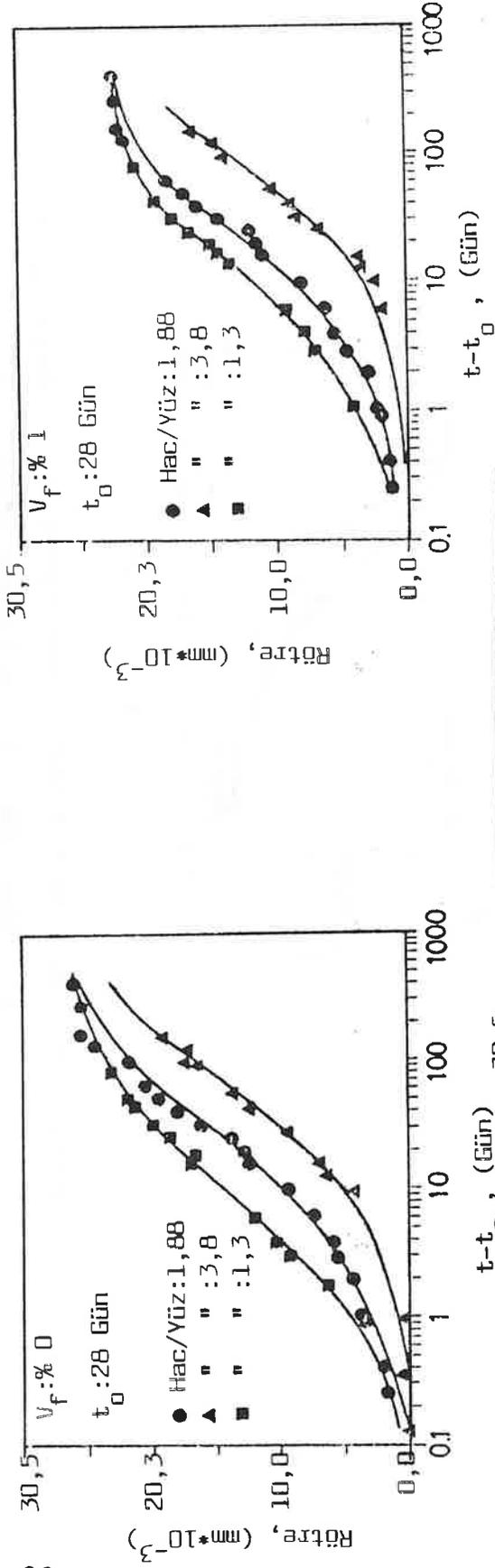
Foto-4.15 Çelik veya polipropilen liflerle betonda çatlamanın önlenmesi

ACI 544 nolu komitenin raporuna göre çelik liflere güçlendirilmiş betonlarda serbest rötre deneyi ASTM C 827'ye göre, serbest olmayan rötre deneyi de ASTM C 341'e göre test edilir. Deneylerin Türk Standartı karşılıkları sırasıyla TS 3322 ve TS 3453'tür.

Literatür [35]'de çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerinde çok ayrıntılı bir rötre çalışması yapılmıştır. Yapılan çalışmada çelik lifli beton kuruma rötresi koşullarına tabi tutulmuş ve daha sonra ASTM C 341'e göre betonun rötresi bazı parametrelere bağlı olarak değerlendirilmiştir. Düz liflerin kullanıldığı değişik çelik lif içeriklerinde farklı iki hacim/yüzey (v/s) oranında hazırlanan numunelerde meydana gelen kuruma rötresi üzerine numune boyutu ve şeklinin etkisi incelenmiştir, şekil-4.36, 4.37.



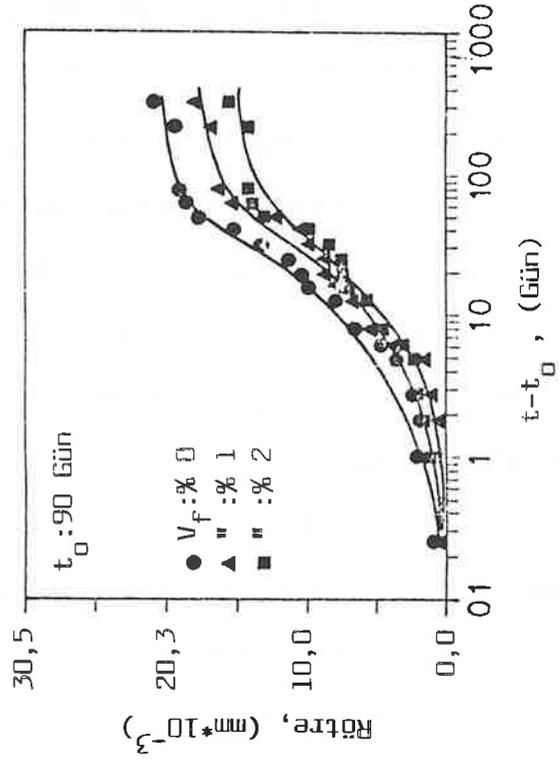
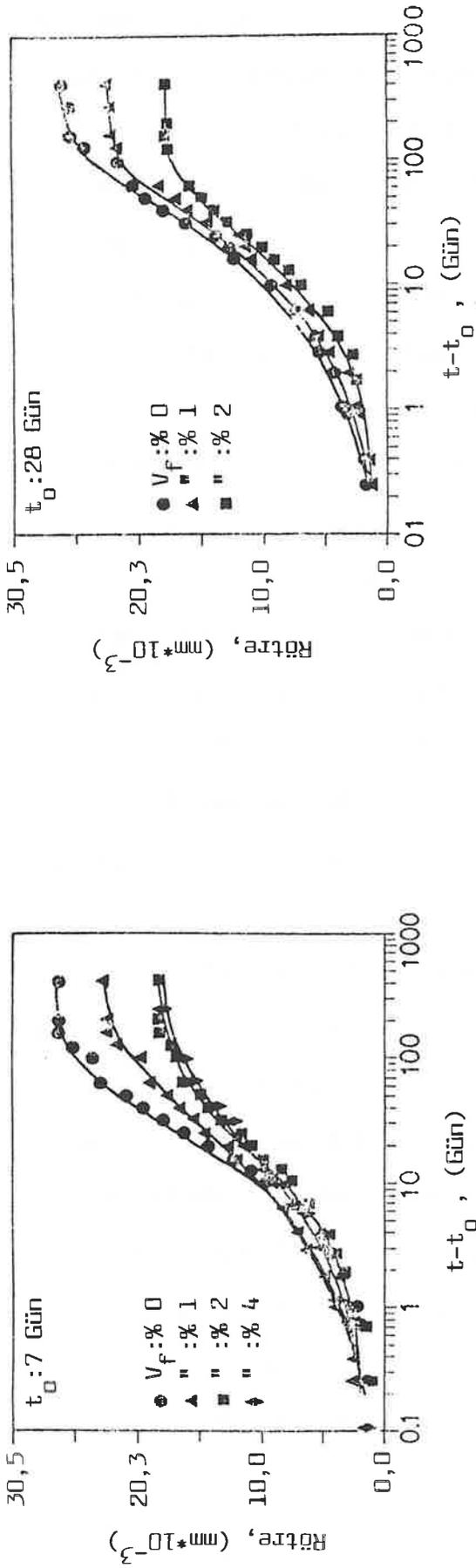
Şekil-4.36 Değişik lif hacmi fraksiyonu ve hacim/yüzey oran- larındaki betonların kuruma rötresi, [35]



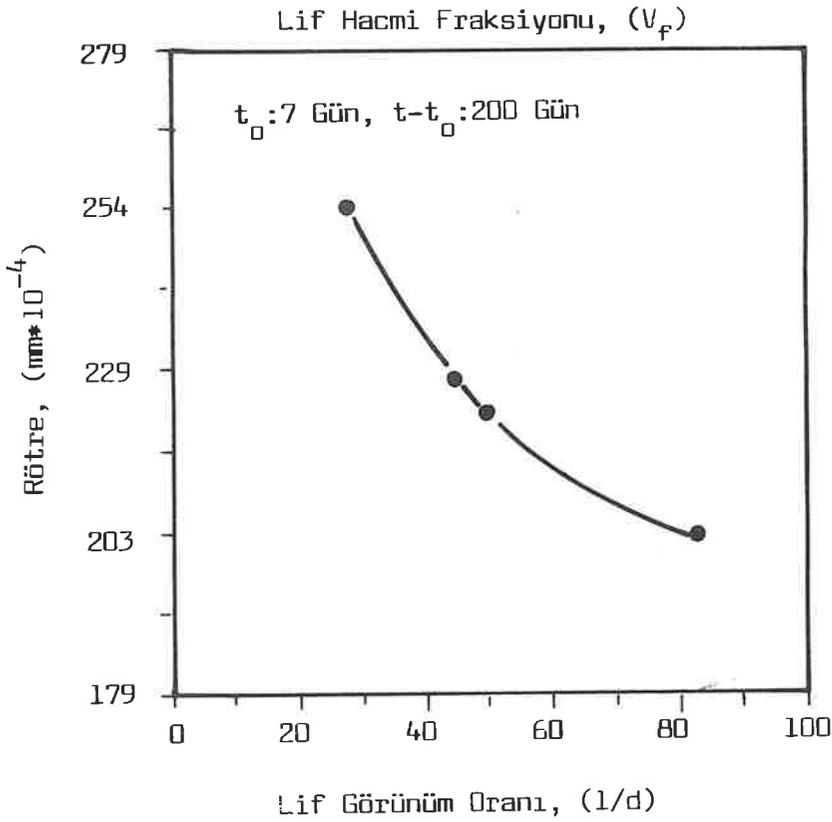
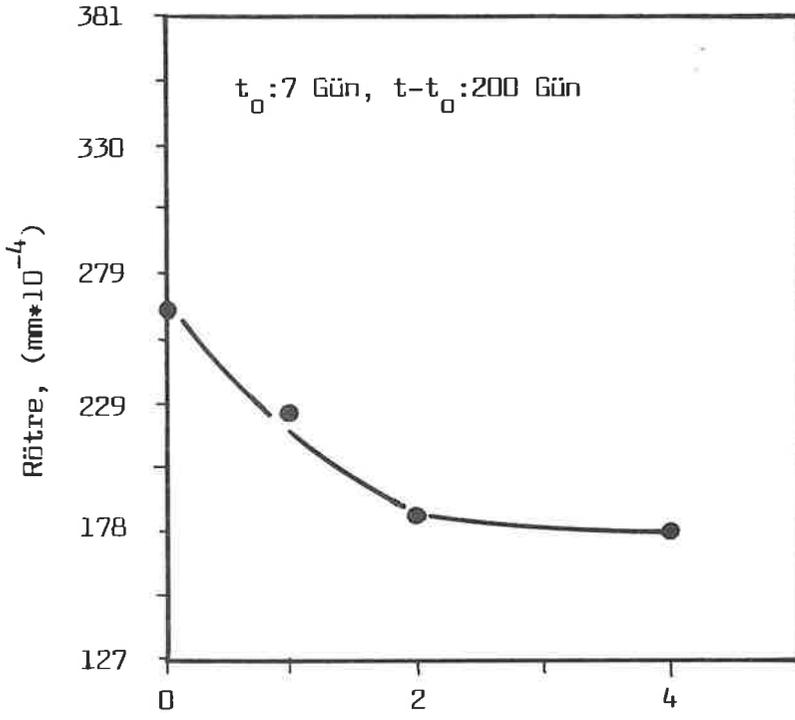
Şekil-4.37 Değişik lif hacmi fraksiyonu ve hacim/yüzey oranlarındaki betonların kuruma rötresi, [35]

Bu iki şekilden de görülebileceği gibi, kuruma süresinin artması ile doğru orantılı olarak artan büzülme, hacim/yüzey oranının büyümesi ile azalmaktadır. Yani, aynı hacimde numune yüzeyinin büyümesi ile betonda rötire artmaktadır. Aynı özellikteki numuneler üzerinde yapılan deneylerde de lif yüzdesinin artması ile kuruma rötresinde azalmalar meydana gelmiştir, şekil-4.38. Aynı şekilde büzülme sonucu meydana gelen birim deformasyon da lif hacmi fraksiyonun artması ile azalmaktadır, şekil-4.39. Kuruma rötresi üzerine lif tipi ve geometrisinin etkisi araştırılarak şekil-4.40, 4.41, 4.42'de verilmiştir, [35]. Şekil 4.40'dan lifin uzunluk/çap oranının büyümesi ile kuruma rötresindeki birim deformasyonun azaldığı görülebilir. Aynı şekilde uzunluk/çap oranının büyümesi ile rötrenin azaldığı şekil-4.41'den izlenebilir. Şekil 4.42'de ise lif uzunluğunun rötire üzerindeki etkisi incelenmiş ve lif uzunluğunun artması ile kuruma rötresinde azda olsa bir azalma tespit edilmiştir, [35].

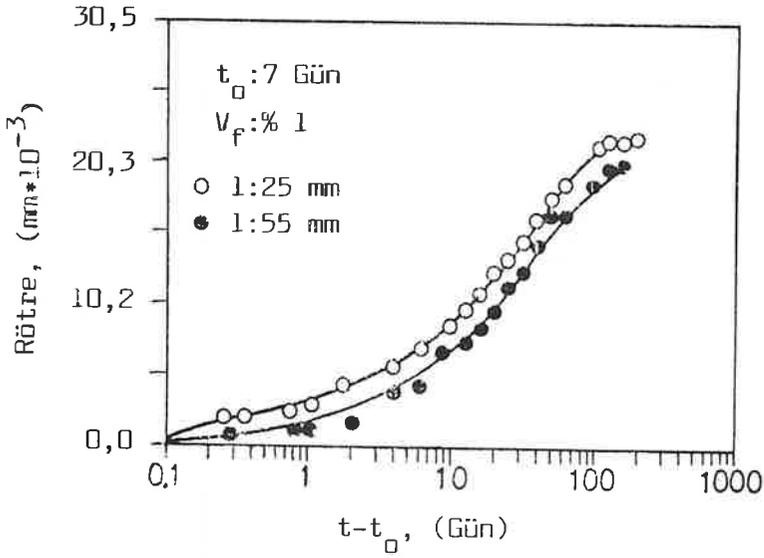
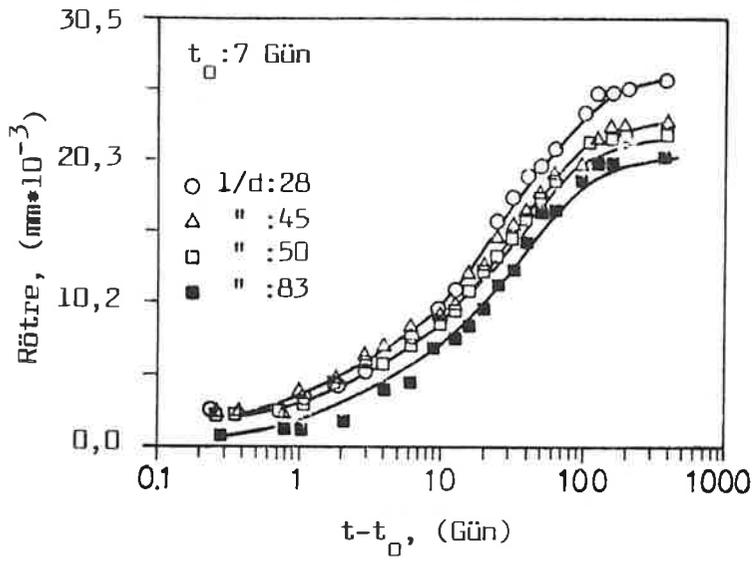
Çelik ve polipropilen lifler ile üretilen betonlar üzerinde yapılan bir çalışmada ise çatlak genişliklerinin lif hacmi ve zamana bağlı değişimi incelenmiştir, [36]. Şekil 4.43'den lifsiz ve hacimce % 0,25 çelik lif katılmış numunelerin rötire sonucu zamanla meydana gelen çatlak genişlikleri görülebilir. Yine aynı çalışma kapsamında lif hacmi ile rötire sonucu meydana gelmiş çatlak genişliklerinin değişimi şekil-4.44'de verilmiştir, [36]. Şekilden de görüleceği üzere lif hacminin artması ile çatlak genişliklerinin azaldığı görülecektir.



Şekil-4.38 Lif hacmi fraksiyonu ile kuruma rötresi arasındaki ilişki, [35]



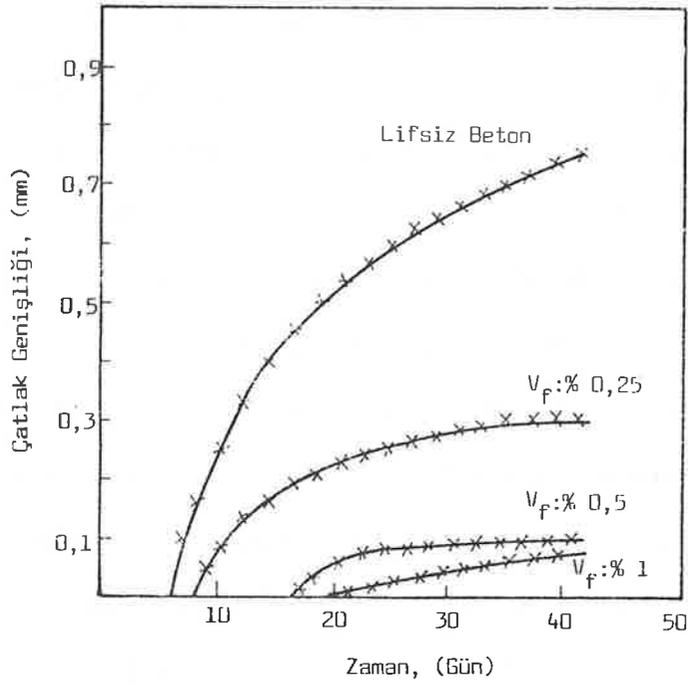
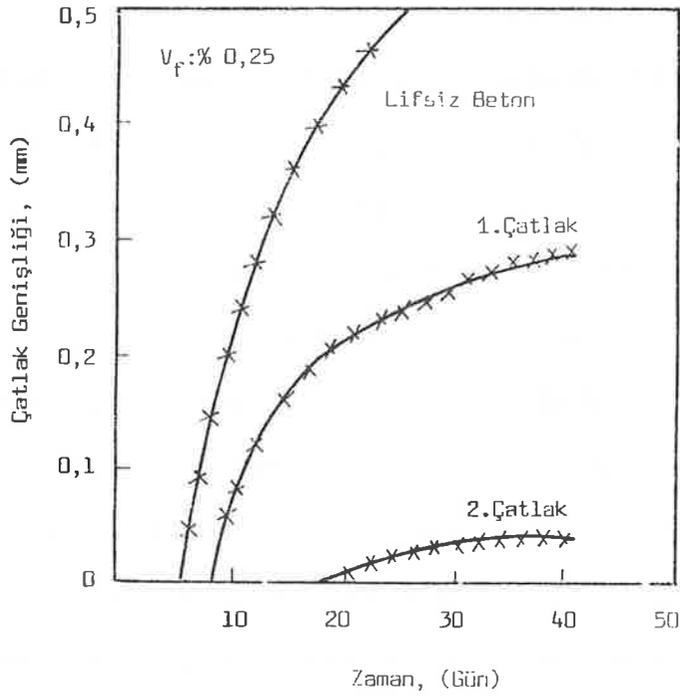
Şekil-4.39,4.40 Lif hacmi fraksiyonu ve lif görünüm oranının rötire üzerindeki etkisi, [35]



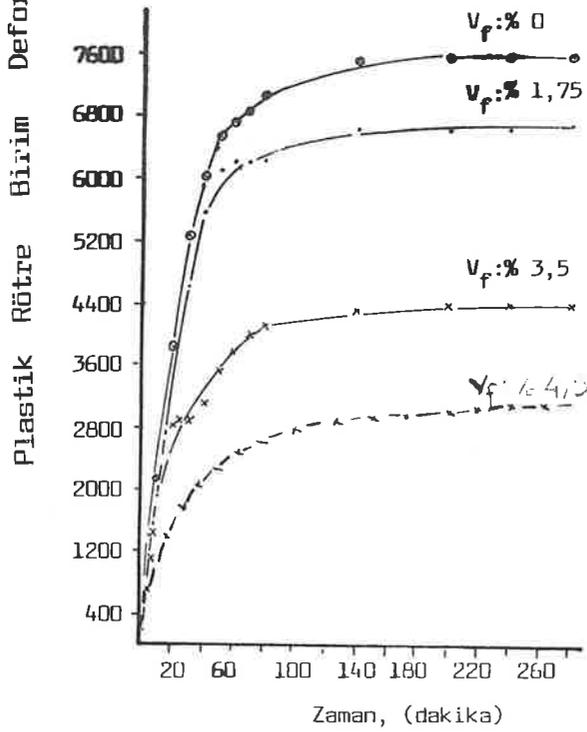
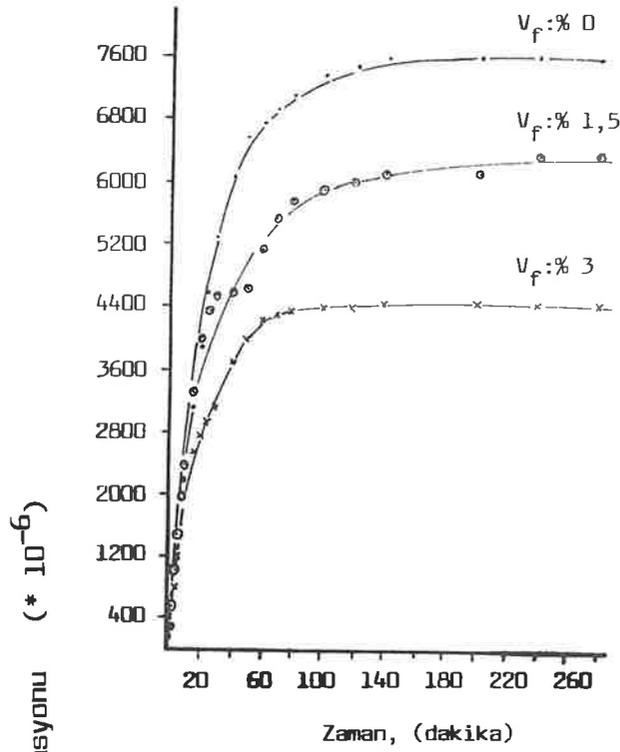
Şekil-4.41,4.42 Lif hacmi fraksiyonu ve lif boyunun rötire üzerindeki etkisi, [35]

Yine bu çalışma sonuçlarına göre, çelik lifli betonlarda rötire sonucunda görülen çatlak genişliklerinin aynı özellikte poli-propilen lif kullanılan betonlardaki rötire çatlaklarından daha az açıklıklı olduğu tespit edilmiştir.

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonların plastik (erken) rötire hareketi karşısındaki davranışını izlemek üzere de Mangat ve Azari tarafından bir çalışma yürütülmüştür, [37]. Şekil 4.45 ve 4.46'dan da görüleceği üzere üç farklı lif içeriğinde yapılan bu çalışmada ilk 40 dakika içerisinde rötire maksimum olmakta ve 140.dakikaya kadar bu durum devam etmektedir. Bu dakikadan deneyin tamamlandığı 280. dakikaya kadar ise rötirede önemli bir değişiklik olmamaktadır. Bu üç şekil incelendiği zaman lif hacmi fraksiyonunun artması ile beton rötiresinde önemli azalmaların kaydedildiği görülecektir. Aynı lif hacmi fraksiyonu ve aynı lif tipi ile hazırlanmış çimento dozajı farklı karışımlarda ise çimento dozajının azalması ile rötirede de azalmalar tespit edilmiştir. Çelik lifin geometrik şeklinin plastik rötire üzerindeki etkisi şekil-4.47'de incelenmiştir. Plastik rötire oluşumundan 20 ve 140 dakika sonra değişik lifle güçlendirme indeksi $V_f.(l/d)$ değerlerine göre farklı liflerin yapmış oldukları rötire değerlendirildiğinde sıcakta çekilmiş düzensiz lifler ile çengelli liflerin plastik rötreyi önlemede kıvrımlı liflere göre daha az performans gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin 140. dakikada 2,0 $V_f.(l/d)$ lifle güçlendirme indeksi değerinde sıcakta çekilmiş düzensiz lif ile çengelli liflerin betonun plastik rötiresini % 37 azalttığını buna karşılık aynı değerde kıvrımlı

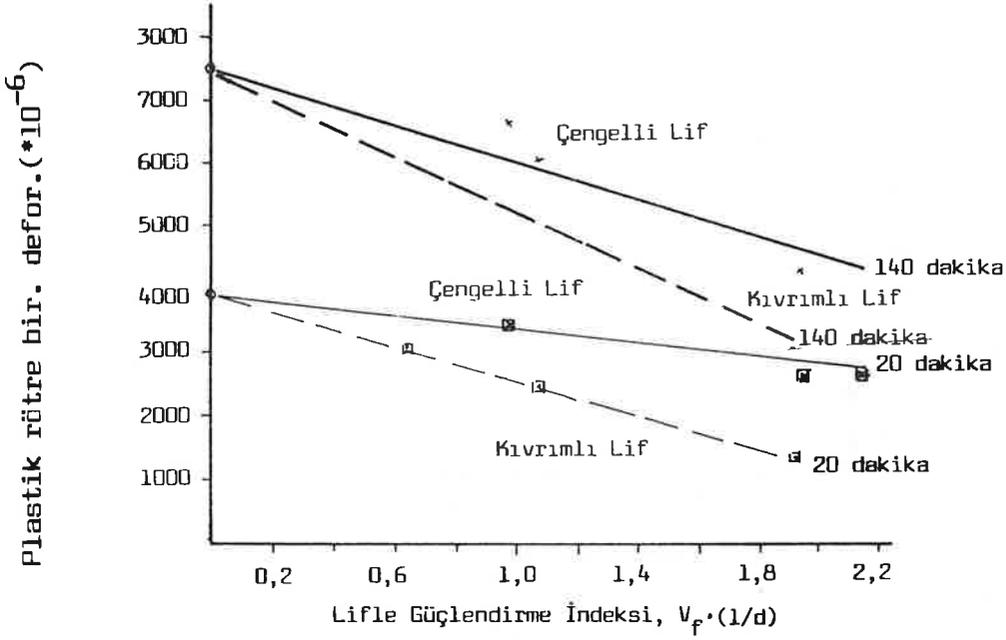


Şekil-4.43,4.44 Lif hacmi fraksiyonu ve zamanla değişen beton çatlakları, [36]



Şekil-4.45,4.46 Lif hacmi fraksiyonu ile plastik rötrey arasındaki ilişki,[37]

liflerin plastik rötrede % 56'lık bir azalma sağladığı görülecektir.



Şekil-4.47 Lifle güçlendirme indeksi ve lif tipi ile plastik rötre arasındaki ilişki, [37]

4.2.8 Dayanıklılık

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonların dayanıklılığını konusunda şimdiye kadar ayrıntılı bir çalışma yapılmamışsa da lifli beton kompozitlerinin dayanıklılık sorunu lifsiz betonlarda dayanıklılık problemi yaratan sorunlarla aşağı yukarı aynıdır. Yani betonun boşluklu yapısı, geçirgenliği, porozitesi, hacim/yüzey oranı ve dış kimyasal ve fiziksel etkilere karşı koyabilme yeteneği gibi. Özel olarak tek başına ifade edilebilecek bir lifli beton dayanıklılık problemi olmasa da

Özellikle su yapılarında paslanabilir çelik lif kullanılması bazı sorunlar yaratabilir. Bu tip yapılarda paslanmaz yada kaplanmış çelik liflerin kullanılması ile korozyon problemi ortadan kaldırılır. Lifli beton kompozitelerinde görülen ve betonda boşluk oluşmasına yol açan bir problem vardır ki o da demet halinde bulunan liflerin karışım sırasında tek tek tanelere ayrılmadan, beton yapısında kalması sonucu beton içerisinde boşluklu bir yapının doğması olasılığıdır. Bu şekilde ortaya çıkmış betonlar sıvı ve gazların beton içerisine nüfuz etmesine oldukça müsaittirler. Geçirgenlikteki olumsuz gelişme dayanıklılık problemlerinin en tehlikeli başlangıcıdır. Bu şekildeki bir gelişme sonrası beton içerisindeki çelik lifin korozyona uğraması yada liflerin kimyasal reaksiyon sonucu bozunmaları kolaylaşacaktır.

Polipropilen lifli betonlarda görülen ve matrisin alkalinitesi nedeni ile liflerin korozyonuna neden olan durum çelik lifler için sözkonusu değildir.

Yukarıda izah edilenlerle birlikte lifsiz betonlarda olduğu gibi lifli betonlarda da iyi bir karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma sonrasında yapılacak iyi bir kür sonucu lifli betonlarda ortaya çıkabilecek dayanıklılık sorunu önlenmiş olur.

5. ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN TASARIMI, ÜRETİMİ, TAŞINMASI, YERLEŞTİRİLMESİ VE BAKIMI

5.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Tasarımı, Üretimi Ve Taşınması

Bölüm III ve IV'de anlatılan çelik liflerle güçlendirilmiş betonun davranış ve özelliklerinin gerçekleşebilmesi için çelik lifli betonun planlanmasından başlayıp bakımı ile son bulan üretim süreçlerinin doğru tasarımıyla yaşanması gereklidir. Bu olgu lifsiz betonlar için de geçerli olmakla birlikte lifli betonlar için daha karmaşıktır. Bu durum başlangıçta karmaşık gibi görünse de tasarım ve üretim sırasında uyulması gerekli zorunluluklar yerine getirildiği zaman herhangi bir sorun ortaya çıkmamaktadır.

5.1.1. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Tasarımı

Çelik lifli betonlar üretilmeden önce, betonun nerede kullanılacağı, yapının esası yada bir parçası mı olacağı, yapıda hangi etkiler altında kalacağı , ondan beklenen özellikler, gibi parametreler açıkça belirlenmelidir. Daha sonra bu kullanıma uygun malzemelerin (çelik lif, çimento, agrega, vs) tespit edilerek sağlanması gereklidir. Bu üretimde, betonun sıradan bir beton üretimi olmadığı gerçeğinden hareketle mevcut ve beklenen koşullar açıkça tanımlanmalıdır ki betondan beklenen yüksek performans değerlerine ulaşmak mümkün olabilsin.

Çelik lifli betonun geleneksel kullanımları için döşeme ve kirişlerde (ya da benzer yapı elamanlarında) basit tasarım işlemleri geliştirilmiştir. Bununla birlikte lifsiz betonlarda olduğu gibi çelik lifli betonun değişik yapılarda kullanımı büyük çapta mühendislik yargı ve deneyimine ayrıca tasarımı yapan kişinin hem lifli betonu hemde onun kullanılacağı yapıyı ve yapıya gelen yükleri iyi tanıyıp doğru değerlendirmesine dayanır. Yani yapıya gelecek olan statik,dinamik veya başka bir deyişle tokluk, çekme, kesme, gerilmelerinin hesaplanmasına ve su yapılarda ise hidrolik hareketin tahminine dayanır. Lifsiz betonlarda olduğu üzere çekme, tokluk, yorulma, darbe gibi dayanımlar lifli betonlarda basınç dayanımının belli bir fonksiyonu gibi algılanmamalıdır. Bölüm IV'te sıralanan çelik liflerle güçlendirilmiş beton özellikleri duyarlılıkları açısından malzeme özellikleri ile birlikte değerlendirilerek, yapı (yada beton) hangi etkiye maruz kalacaksa ona göre tasarım kriterleri (lif seçimi, uzunluk/çap oranı, geometrisi, çimento dozajı,agrega, vs) belirlenmelidir.

Döşeme ve benzeri yapılarda çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanımında üzerinde durulması gerekli bir husus da lifli betonun bir alt tabaka betonuna bağlanmasıdır. Özellikle barajların boşaltma yapılarındaki döşemelerde üst tabakaya lifli beton dökülmeden önce alt döşeme üzerinde ve döşeme donatısına bağlı bağlantı demirleri (ankraj çubukları) bırakılmalıdır. Burada kullanılan bağlantı demirleri,üzerinde durduğu taban malzemesi ve lifli beton arasındaki kaldırma basıncını karşılayabilecek ve lifli beton yüzeyine gelebilecek

olan (Örneğin dolusavak boşaltım kanallarında meydana gelen) negatif basıncı alıp altdöşemeye dağıtabilecek özellikte olmalıdır. Bu arada alt döşemenin de çelik lifli betondan kendisine aktarılan gerilmeyi (kesme kuvvetlerini) taşıyabilecek nitelikte olması gerekmektedir. Aksi durumda iki farklı beton arasında gerilme transferi sırasında farklı davranışlar ortaya çıkacak ve alt döşeme tahrip olacaktır.

Pek başarılı olunmasa da bu konuda kullanılan başka bir ankraj tekniği de eski ve yeni döşeme arasında epoksi esaslı veya benzeri kuvvetli bir bağlayıcı kullanmaktır,[38]. Epoksi türü bağlayıcıların kullanılması durumunda bu malzemenin betondan farklı bir malzeme olması nedeni ile yük altındaki davranışı sırasında betonla gösterdiği uyumsuzluk sonucu arada zayıf bir tabaka meydana gelecektir. Bu arada alt döşeme ile lifli beton arasında basınç düşürücü boşluklar (delikler) bırakılarak kaldırma kuvveti bir miktar azaltılabilir,[38].

Dolusavak gibi dik eğimlerde çelik lifli betonun tam sıkışmasını sağlamak üzere beton priz boyunca sabit yada kayar kalıplar kullanılarak sürekli takviye edilebilir.

5.1.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Karışım Esasları, Karışım Teknikleri Ve Taşınması

5.1.2.1 Karışım Esasları

Karışım işlemleri,lifli beton uygulamalarının başarılı olabilmesi için yani betona lif katılması sonucu elde edilmesi düşünülen teorik performansın yakalanabilmesi için dikkat edilmesi gerekli olan en önemli süreçtir. Çelik lifli beton

üretimi normal beton üretimi ile benzeşimler gösterse de gerek karışım hesaplarının tasarımı açısından ve gerekse de çelik lifin betonda kullanılması sonucu yeni karıştırma ve taşınma tekniklerini zorunlu kılması açısından oldukça değişiktir. Bu değişiklikler betonun performansını doğrudan etkileyebilecek kadar önemlidir.

Lifsiz beton üretiminde uyulması gerekli zorunluluklar çelik lifli beton üretimi için de geçerlidir. Yani, kaliteli agrega, düşük su/çimento oranı, optimum çimento dozajı, yüksek kompasite ve iyi sıkıştırma gibi. Bunun yanısıra Bölüm IV'de verilen çelik lifli beton özellikleri gözönüne alınıp yapının maruz kalacağı gerilmeler hesaplanarak karışım için gerekli malzemeler ve hedefler buna göre belirlenmelidir. Bu hedefler doğrultusunda ilgili standartlara göre yapılacak deneylerden bulunacak sonuçlar tartışılarak gerekirse karışımda yeni düzenlemeler yapılmalıdır.

Lifli kompozitlerin yapımında, kompozit üretimi tasarımı yapılırken lifin gerilme altında beklenen şekilde davranabilmesi için onu çevreleyen matris özelliklerinin uygun olması gereklidir. Matrisin liften life gerilme aktarabilmesi için öncelikle rijit, boşluksuz, kesif ve mukavim olması gereklidir. Liflerle donatılı kompozitlerde mukavemet üzerinde lif-matris aderansı ve matrisin boşluklu yapısının birincil bir etkisi vardır,[39]. Bu nedenle çelik lifli beton üretiminde, lifin davranışını etkileyen önemli parametrelerden birisi olan matris özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla bir dizi sınırlamalar getirilmiştir.

Kısaca sıralanacak olursa;

- Su/çimento oranı 0,40 ila 0,55 arasında olmalıdır. Bazı özel betonlar için bu değer 0,38 ila 0,44 arasında sınırlandırılmıştır, [4,20, 8,40].

- Çimento miktarı 250 kg/m^3 'ten az olmayacaktır. Bazı kaynaklarda bu sınırlama en az 320 kg/m^3 'tür, [4,20,40]. Üst sınır ise 420 kg/m^3 'tür.

- Beton içerisindeki kum miktarı toplam agrega kütlelerinin en az % 45-55'i olmalıdır. Bu oran TS 10514'te % 40-45'e kadar toleranslıdır.

- Karışımlarda doğal kum tercih edilmelidir.

- Matrisin yoğunluğunu ve kompozitesini arttırmak üzere doğal puzzolan, uçucu kül özellikle de silika tozu kullanılmasında fayda vardır.

- Kum içerisinde $0,25 \text{ mm}$ 'den (yada 30 nolu elekten) küçük ince malzeme miktarı Tablo-5.1'deki gibi olmalıdır, [40].

Çelik liflerle güçlendirilmiş betona ait matris özellikleri bu şekilde tayin edildikten sonra Bölüm IV'te verilen taze ve sertleşmiş beton özellikleri de gözönüne alınarak TS 10513 (Çelik Teller-Beton Takviyesinde Kullanılan) esaslarınca çelik liflerin özellikleri belirlenmelidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton özelliklerinin lif geometrisi ile yakından ilgili olduğu düşünülecek olursa bu konuda teknik davranmanın zorunluluğu anlaşılmış olunur.

Günümüzdeki lifli beton uygulamalarında çok değişik lifler kullanılmakla birlikte en çok düz ve çengelli çelik lifler kullanılmaktadır. Bölüm IV'ten de anlaşılacağı üzere

çengelli çelik liflerin performansı düz olanlara göre daha yüksektir, foto-2.2.

Tablo-5.1 Çelik lifli beton karışımlarında kum içerisinde bulunması gerekli 0,25 mm'den küçük ince malzeme miktarı, [40]

Agrega Maksimum Tane Çapı	İnce Malzeme Miktarı (< 0,25 mm)	
	kg/m ³	L/m ³
8 mm	525	180 - 185
16 mm	450	150 - 155
32 mm	400	130 - 135

Çengelli liflerin kullanılması halinde düz lifler için verilmiş olan kullanım miktarı % 40-45 oranında azaltılabilir. Tatminkar bir karışım için lif içeriği beton hacmine oranla % 0,5 ila % 1,5 arasındadır. Bu oranı % 2'ye kadar çıkarmak mümkün olmakla birlikte etkili bir fayda sağlayabilmek için hiçbir zaman % 0,5'in altına düşürülmemelidir. Çelik lif konsantrasyonunun % 2'nin üzerine çıkması karıştırma ve yerleştirme işlemlerinde çok büyük problemler yaratır. Aslında bu oran % 1,5'tan itibaren başlar. Ancak çengelli lif kullanılması durumunda bu oranı % 2'ye kadar çıkarmak mümkün olabilmektedir. Yüksek lif konsantrasyonlarında betonun performansında önemli bir artış olmamakla birlikte maliyetinde büyük

artışlar ortaya çıkar. TS 10514'de betonda kullanılması gereken lif miktarı değişen maksimum tane çapı ve betonun durumuna göre şu şekilde verilmiştir, tablo-5.2.

Tablo-5.2 Değişen agrega maksimum tane çapına göre betonda kullanılması gerekli lif miktarı, kg/m^3 , [40]

Agrega Maksimum Tane Çapı (mm)	KULLANILACAK LİF MİKTARI, kg/m^3					
	Uzunluk/Çap = 60		Uzunluk/Çap = 75		Uzunluk/Çap = 100	
	Normal Beton	Pompa Betonu	Normal Beton	Pompa Betonu	Normal Beton	Pompa Betonu
4	160	120	125	95	95	70
8	125	95	100	75	75	55
16	85	65	70	55	55	40
32	50	40	40	30	30	25

Bu tablodan görüleceği üzere maksimum tane çapının ve uzunluk/çap oranının büyümesi ile gereksinim duyulan lif miktarı orantılı olarak azalmaktadır. Aynı şekilde pompa betonlarında kullanılan lif miktarı da normal, lifli betona göre miktar olarak daha azdır. Liflerin uzunluk/çap (görünüş) oranı-

nın 80 ila 100 arasında olması betonun performansı açısından gerekli bir ölçüdür. Bu oran püskürtme beton uygulamaları hariç hiçbir zaman 60'ın altına düşürülmemelidir.

Gerek yüksek miktarda lif kullanılması ve gerekse de uzunluk/çap oranı (l/d) 100-60 aralığının dışında olan liflerin kullanılması sonucunda, lifler karışım sırasında biraraya toplanıp kümeleşerek karışımı zorlaştırırlar. Çoğu zaman eğilme direnci düşük olan lifler karışım sırasında bükülerek topaklaşıp iyi bir karışımın ortaya çıkmasına engel olurlar. Hangi karıştırma metodu uygulanırsa uygulansın bu şekildeki lifler sürekli olarak anılan problemi gösterirler. Çengelli lifler, taze beton içerisindeki uyumlu davranışı ve sertleşmiş beton içerisinde oranı diğer liflere göre % 40-45 daha az olmasına rağmen gösterdiği yüksek performans nedeni ile daha çok tercih edilir.

Lif seçiminde dikkat edilecek bir husus da lif boyunun agregaya maksimum tane çapının en az 2 veya 1.5 katı olması zorunluluğudur. Bu nedenle uzun liflerin kullanılamaması sonucu kütle betonlarında lifli beton uygulaması yoktur, [38]

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton uygulamalarında agregaya seçimi yapılırken lifsiz betonların hazırlanmasındaki esaslar dikkate alınabilir. Yani; fiziksel özellikleri iyi, tane dağılımı düzgün agregaya kullanımı gibi. Çünkü çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar yüksek dayanıma ihtiyaç duyulan ve zor koşullar altında kullanılan kompozitler olduğu için yüksek kaliteli agregaya gereksinim duyarlar. Zayıf agregaya kullanılması durumunda çimento hamuru fazını güçlen-

dirmek çözüm olamaz. Bu durumda da lifli betonun performansı gerektiği gibi olmayacaktır. Agreganın şekli ve miktarı da önemlidir. Çelik lifli beton uygulamalarında genellikle maksimum tane çapı 1" ile 3/8" (yada 32mm ile 4mm) arasında değişen agregalar kullanılır. Maksimum tane çapı 1" yada 32 mm olan betonlarda 1/2" yada 16 mm'den büyük agrega miktarı toplam agreganın % 15 ile % 20'si arasında sınırlandırılır. Yapılan uygulamalarda kaliteli kırmataş çakıllı betonlar doğal çakıl kullanılarak yapılan betonlardan daha iyi sonuçlar göstermiştir,[39].

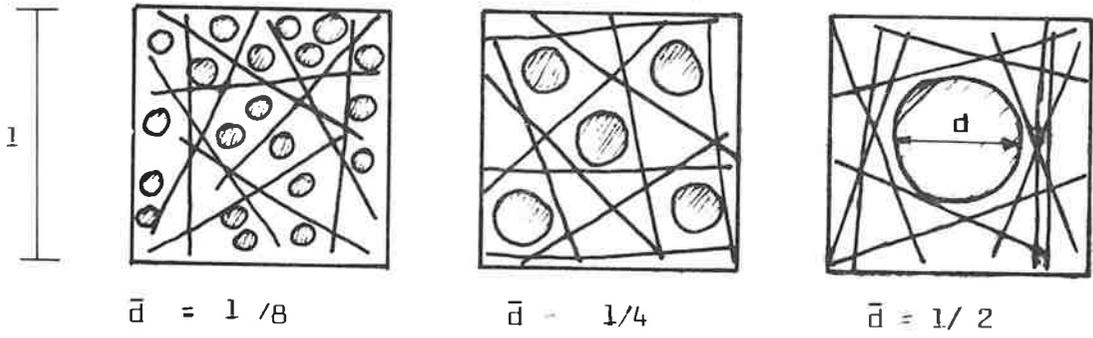
ASTM serisi eleklerle göre çelik lifli betonlar için önerilen tane dağılımı eğrileri tablo-5.3'teki gibidir, [38]

Daha önceki bölümlerde bahsedilen ve çelik liflerle güçlendirilmiş betonların özellikleri değerlendirilirken önemli bir parametre olarak kabul edilen lif hacmi fraksiyonu (V_f) da karışım içerisindeki agrega maksimum tane boyutu ile değişmektedir. Ortalama lif aralığı yada belli bir hacimdeki lif yığılması olarak tanımlanan bu kavram liflerin homojen dağıldığı varsayımı ile hesaplanabilmektedir,[42]. Karışıma ince agrega katılması halinde, agrega taneciklerinin lifler arasında kalmakta olduğu ve lif dağılımını önemli ölçüde etkilemediği düşünülebilir.

Katılan agrega tane boyutunun ortalama lif aralığına ulaşması ve aşması ile liflerin dağılımı etkilenmekte, giderek agrega arasında kalan bölgede bağlayıcı hamur içinde lifler yoğunlaşmaktadır,şekil-5.1.

Tablo-5.3 Çelik lifli betonlar için önerilen tane dağılımı değerleri, [39]

Elekt No	% Geçen				
	Kum	3/8" (9,5 mm) Tane çapı	3/4" (19 mm) Tane çapı	3/8" (9,5 mm) Tüvenan	3/4" (19 mm) Tüvenan
1" (25,4 mm)	-	-	100	-	100
3/4" (19,0 mm)	-	-	88-100	-	94-100
1/2" (12,7 mm)	-	100	40-76	100	70-88
3/8" (9,5 mm)	100	92-100	22-46	96-100	61-73
4 no (4,8 mm)	95-100	48-68	0-5	72-84	48-56
8 no (2,36 mm)	80-95	12-20	-	46-57	40-47
16 no (1,18 mm)	64-80	0-5	-	34-44	32-40
30 no (0,60 mm)	40-64	-	-	22-33	20-32
50 no (0,30 mm)	20-63	-	-	10-18	10-20
100 no (0,15 mm)	4-14	-	-	2-7	3-9
200 no (0,08 mm)	-	-	-	0-2	0-2



Şekil-5.1 Ortalama tane boyutunun lif dağılımına etkisi, [5, 39]

Agregalı karışımlarda, bağlayıcı hamur içerisindeki lif oranı belirli sınırları aşmadığı sürece, birim matris hacmine düşen donatı yoğunluğu artmış olacaktır, [39] .

5.1.2.2 Karışım Sırasında Dikkat Edilecek Hususlar ve Karışım Teknikleri

Çelik lifli beton uygulamalarında kazanılmış deneyimler sonucu karma ve taşıma sırasında öngörülen koşullar yerine getirilip gerekli kurallara uyulduğu takdirde herhangi bir sorun görülmemektedir. Lifli betonlar hazırlanırken normal beton karışımlarında uyulması gerekli kurallara burada da uymak zorunludur. Bununla birlikte karışımı zorlaştırıcı, işlenebilirliği güç olan karışımlar yapmaktan kaçınmak da

gereklidir. Bu nedenle önceki bölümlerde açıklanan ve öngörülen malzeme özellikleri ve miktarlarının dışında malzeme kullanmamak gereklidir. Karışım sırasında sıkça gözlenen iki problemden birisi; çelik lifler biraraya gelip topaklanarak karışımı güçleştirmeleri ve karışım sırasında liflerin eğilerek deforme olmalarıdır.

Bu tip ve benzer problemlerin ortaya çıkmaması için aşağıdaki önlemlerin alınması gereklidir;

- Homojen ve iyi bir beton karışımı elde etmek için lifsiz betonda dikkat edilen kurallara (TS 1247, TS 1248, TS 802) uyulmalıdır.

- Kritik lif miktarı aşılmamalıdır.

- Tablo - 5.2'de verilen tane çapı lif miktarı ilişkisine bağlı kalınmalıdır.

- Eğer lif miktarının arttırılması gerekiyorsa karışımında çimento ve ince agrega miktarı da arttırılarak karışımın kohezyonu arttırılmalıdır.

- İşlenebilirliği sağlamak üzere akışkanlaştırıcı yada süper akışkanlaştırıcı tipinde katkılar kullanılmalıdır.

- Taze betonda homojen lif dağılımı gözle kontrol edilmelidir. Birbirlerine yapışık lifler (demetler) halinde betona katılan lifler tek tek ayrılincaya kadar karışım devam ettirilerek üniform bir dağılım sağlanmalıdır, foto-5.1,5.2

-Liflerin karışıma verilmeden önce dağılmasını sağlamak amacıyla betonyer teknesi üzerine bir sarsıcı konularak liflerin tek tek ayrılması sağlanabilir.

-Beton harmanına lif katılması yavaş yavaş yapılmalıdır.

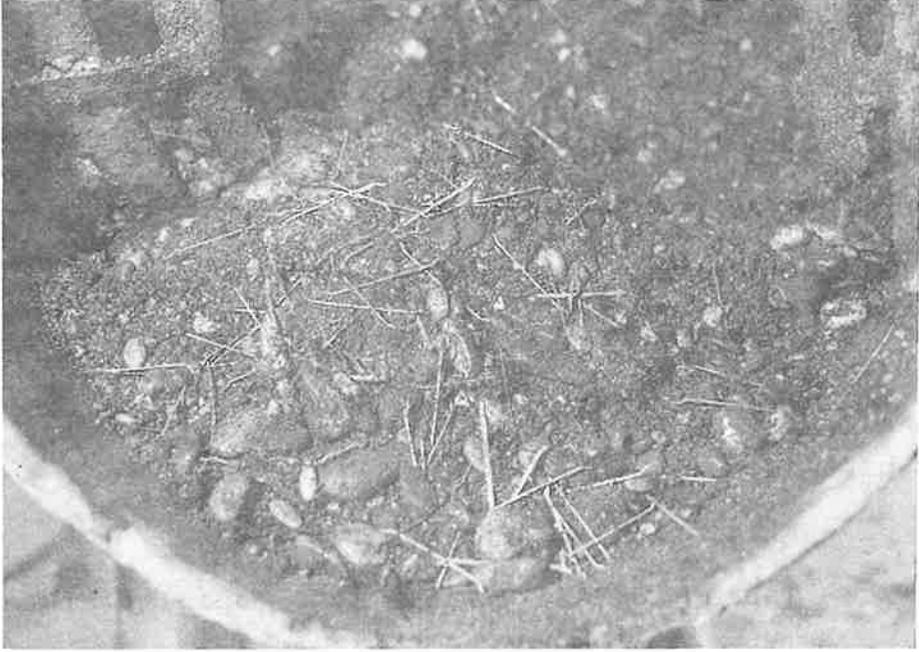


Foto-5.1 Kuru olarak karıştırılmış ve homojen olarak dağılmış çelik lifler .

Lifli betonların hazırlanmasında belli başlı üç yöntem kullanılır;

A-Beton Santralinde Liflerin Karıştırılması Yöntemi:

En başarılı ve en kolay yöntem olarak bilinir. Bu yöntemde işlemler şu sıraya göre yürütülür, şekil-5.2

i- Kum, çakıl ve çelik lifler bir konveyör bant aracılığı ile karıştırma kazanına verilebildiği gibi, beton santralının tartı kovasına da konulabilir. Her iki durumdan da lifler, kum ve çakılın üzerine dökülmelidir. Bu durumda beton-

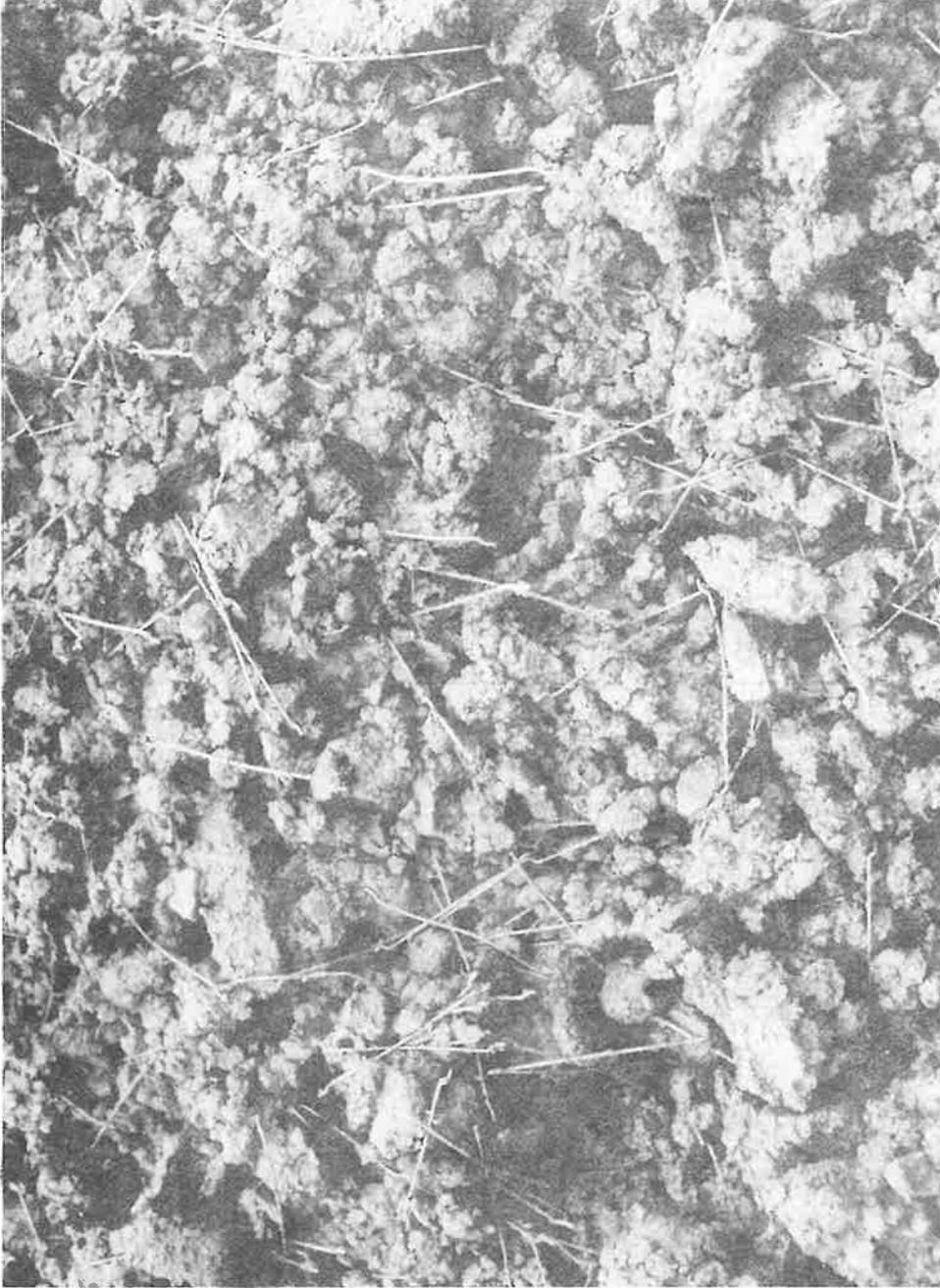
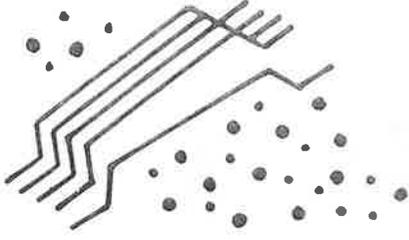
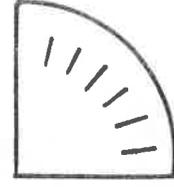


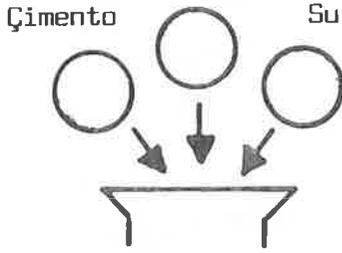
Foto-5.2 Taze beton içerisinde homojen olarak dağılmış çelik lifler



1.Çelik lifler kum ve çakıl üzerine serpiştirilir.



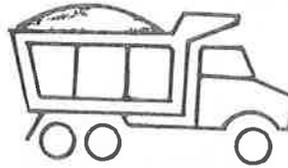
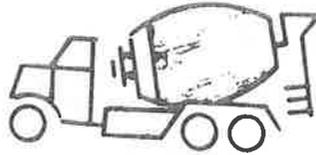
2.15 saniye kuru olarak karıştırılır.



3.Diğer bütün bileşenler harmana ilave edilir.



4.Lifler tek tek ayrılıncaya kadar karışım karıştırılır.



5.Hazırlanan beton transmikserlerle döküm yerine taşınır.

Şekil-5.2 Beton santralinde liflerin karıştırılması yöntemi, [38]

betonyere birkaç tur attırılarak kuru karışımda tel demetlerinin çözülmesi ve dağılması sağlanır, foto-5.3

ii- Karışıma su, çimento, katkı, vs. gibi diğer elemanlar ilave edilir.

iii- Bütün lifler tek tek ayrılıp dağılıncaya kadar betonyer çalıştırılır. Bu süre mikser tipine bağlı olup yaklaşık 1-2 dakika arasındadır.

iv- Lifler, hazırlanan betona karıştırma kazanı içerisinde en son olarak da ilave edilebilir. Bu durumda da lifler tek tek ayrılincaya kadar karıştırma işlemine devam edilir. Bu yöntem toplam karışım süresini 1-2 dakika uzatır.



Foto-5.3 Kuru karışımda liflerin tek tek ayrılması durumu

B-Transmikserde Bütün Malzemelerin Karıştırılması

Yöntemi:

i- Kum, çakıl ve lifler transmiksere konarak karıştırılır. Bu süre sınırlı olup oldukça (1 dakikadan az) kısadır.

ii- Çimento, su, katkı, vs. ilave edilir.

iii- Mikser çalıştıktan 2 ila 4 dakika sonra karışım kontrol edilerek liflerin tek tek ayrılıp ayrılmadığı kontrol edilmelidir. Eğer lifler tek tek dağılmamışsa transmikser bir süre daha çalıştırılır, şekil-5.3

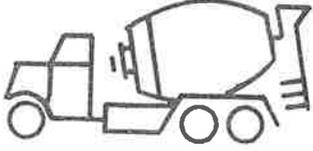
C-Transmikserde Bulunan Hazır Betona Liflerin İlave Edilmesi Yöntemi:

Bu yöntem, A ve B yöntemlerinin kullanılmasının mümkün olmadığı zamanlarda kullanılır. Bu durumda aşağıdaki koşullara uyulmalıdır.

i- Transmikser kapasitesinin % 80'i kadar beton hazırlanır.

ii- Hazırlanan betonun su/çimento oranı düşük tutulmuş olmalıdır. Bu amaçla gerekirse akışkanlık verici katkı maddeleri kullanılmalıdır. Çelik lifler transmiksere dakikada 20-30 kg yükleme hızı ile ilave edilerek transmiksere kazanı en yüksek devirde çevrilmelidir, foto-5.4

iii- Karıştırma süresi mikser tipine bağlı olup bütün lifler ilave edildikten sonra 1 dakika beton karıştırılmalıdır. Uniform bir dağılım olup olmadığı kontrol edilmeli ve lifler tam olarak ayrılmamışsa tambur bir süre daha döndü-



1. Beton her zamanki gibi hazırlanır.



2. Transmikserin tamburu tam hızla çalıştırılır.



30 kg'lık torba

-Taşıyıcı banta 60 kg/dakika hızı ile verilir
-Transmikserde 30 kg/dak. hızla ilave edilir.



2-4 dakika

3. Çelik lifler yavaş yavaş betona ilave edilir

4. Transmikserin tamburu lifler dağılına kadar tam hızla çalıştırılır.

Şekil-5.3 Transmikserde çelik liflerin karıştırılması yöntemi, [38]



Foto-5.4 Çelik liflerin transmiksere 20-30 kg/dakika hız ile verilmesi

rülmelidir. Eğer yine başarı elde edilemezse transmiksere bu karışım sistemi için uygun olmadığına karar verilmelidir.

5.1.2.3. Taşıma

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun taşınması iyi tasarlanmış ve yeterince temiz durumda bulunan geleneksel beton ekipmanları ile yapılmalıdır. Beton taşınırken transmiksere haznesi tam olarak yüklenmemelidir. Özellikle karışım transmiksere hazırlanacaksa bu kurala kesinlikle uyulmalıdır. Örneğin, 7m³'lük tambur 6m³' betonla doldurulmalıdır. Tambur içerisindeki kanatlar temiz ve deforme olmamış olmalıdır. Aksi takdirde liflerin topaklanması sonucu üniform olmayan karışımlar meydana gelir, foto-5.5

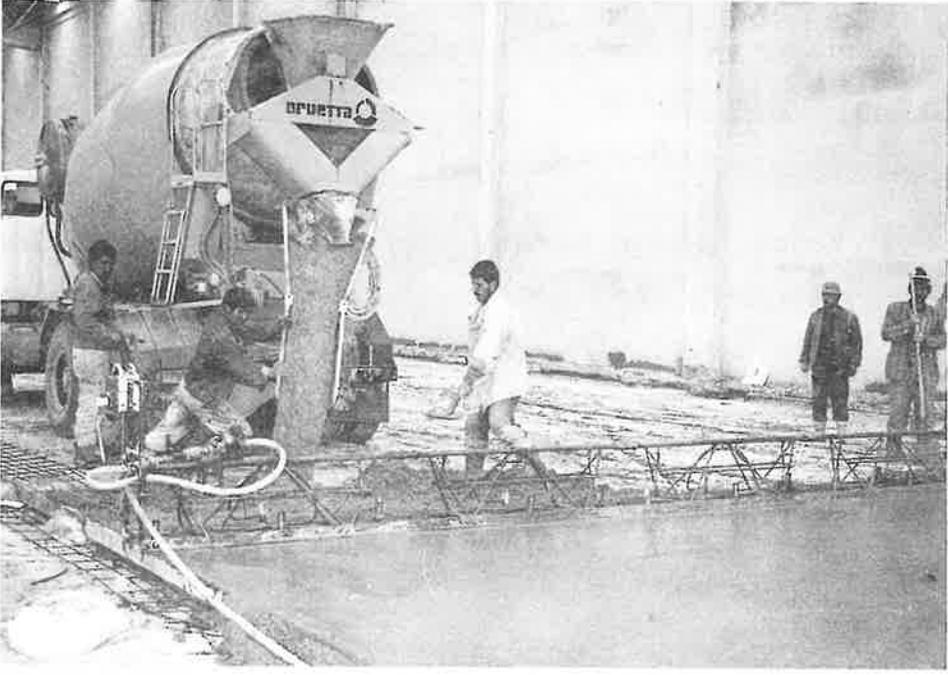


Foto-5.5 Çelik lifli betonun taşınması ve dökümü

Lifli betonları karıştırmak için gerekli enerji liffsiz betonlara göre daha fazladır. Fakat transmikselerlerin çoğu bu ilave gücü kaldıracak niteliktedir. Çelik lifli beton üretiminde transmikseler ve pan (çanak) tipi karıştırıcılar herhangi bir sorun yaratmazlar. Bazen düşük slampli betonların boşaltılması sırasında betonun mikserden kolayca akması gibi bir sorun çıkabilir. Bu durumda operatörün yardımı gereklidir. Bu gibi durumlarda transmikselerin önü bir yamaca gelecek şekilde araç park edilerek betonun kolayca akması temin edilebilir.

Beton kovalar ile taşınırken, kovanın çıkış ağzı betonun

kolayca akmasına imkan verecek şekilde bir açıklığa sahip olmalıdır. Bazen kovanın dış kısmına bir vibratör kaynak edilerek betonun akıtılması sırasında çalıştırılıp betonun kolayca akması sağlanır.

Betonun pompa ile nakli sözkonusu ise lifsiz betonda olduğu gibi beton pompa betonu özelliklerinde hazırlanmalıdır, foto-5.6

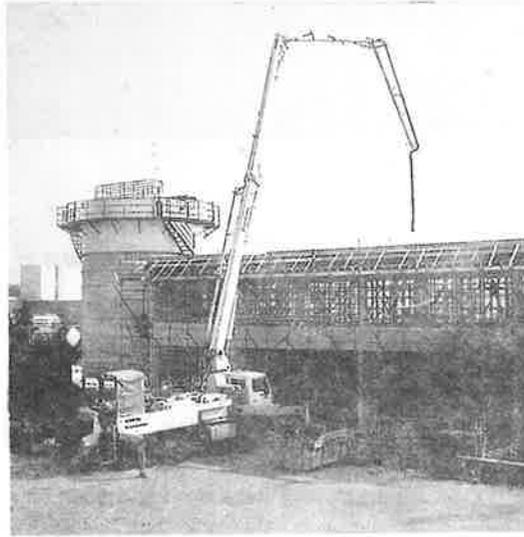


Foto-5.6 Çelik lifli betonun pompa ile taşınması ve dökümü

Bununla birlikte Şu koşullar da sağlanmalıdır;

- İhtiyaç duyulan basınç ve beton hacmini basabilecek kapasitede bir pompa
- Geniş çaplı boru (yaklaşık 155 mm),foto-5.7



Foto-5.7 Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun pompa hortumundan dökümü

- Bükülebilir, kıvrılabilir hortum kullanmak
- Aletin giriş ağzına lif demetlerinin hortuma girmesini önleyecek Şekilde 50-75 mm açıklıklı bir elek konulmalıdır.
- Çok yüksek slamplı betonlardan kaçınmak (yüksek slamplı beton kullanıldığında betonun ince kısmı akacak iri kısmı ve lifler hortumu tıkayacaktır).

5.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Yerleştirilmesi Ve Tesviye Edilmesi

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve tesviye işlemleri kullanılagelen ekipmanlarla yapılabilir. Sadece teknik ve işçilikte incelikler gereklidir. Çelik lifli beton yerleştirilirken harici vibrasyon ile sıkıştırma tercih edilir. Harici vibrasyonun kullanılmayacağı yer ve durumlarda daldırma tipli dahili vibratör kullanılarakda beton yerleştirilebilir. Bu şekilde daldırma tipli vibrasyon kullanıldığında bunların çubuk şekilli olanlarından kaçınmak gereklidir. Çubuk şeklindeki daldırma tipi vibratörlerin kullanılması durumunda sıkıştırma esnasında lifler dönerek belli yerlerde lif yığılmasına neden olurlar. Laboratuvar çalışmalarında numune hazırlanırken harici vibrasyon kullanılmalıdır, [38] .

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonların en çok döşeme ve benzeri yüzeylerde kullanıldığı düşünüldüğünde tesviyesinde genellikle bir sorunla karşılaşılmaz. İyi sıkıştırılmış bir lifli beton uygulamasında kalıplar çıkarıldığında beton yüzeyinde lifler gözükmez ve düzgün bir yüzey elde edilir. Açık döşeme yüzeyleri düzeltilirken vibrasyonlu masterlar kullanılmalı veya daha önceden dahili vibratörler ile yerleştirilmiş beton perdah makinası ile tesviye edilmelidir, foto-5.8

Kullanılacak perdah makinaları tercihen metal ve kanat (pervane) uçları ise hafifçe yuvarlatılmış olmalıdır, foto-5.9.



Foto-5.8 Çelik lifli betonun döşemeye yerleştirilmesi

Perdah makinalarının kullanılmayacağı alanlarda yüzey vibratörleri de kullanılabilir. Yüzey işlemlerinde tahta malalar da kullanılabilir. Tahta malalar, çoğu zaman master kanatlarının neden olduğu yüzey yırtıkları ve boşluklarını kapatmak için de kullanılabilir. Tahta mala kullanıldığında yüzeyde açıkta lifler varsa bu lifler yüzeyin pürüzlenmesine neden olabilir.

Yüzey bitirme işlemleri sırasında yüzeyde fazla çalışmaya özen gösterilmelidir. Lifsiz betonlara göre harç (çimento) bakımından oldukça yüksek olan çelik lifli betonun aşırı masterlanması yüzeyi aşırı ölçüde hassaslaştırarak çatlamalara

neden olabilir. Bu çatlaklar priz sonrasında belirginleşerek ortaya çıkar, [38].



Foto-5.9 Çelik lifli döşeme betonu yüzeyinin perdah makinası ile düzeltilmesi

Eğer beton yüzeyinde terleme sonucu su ve ince şerbet birikirse bu, mastarla yada vakum yolu ile yüzeyden uzaklaştırılmalıdır. Master kullandıktan sonra bir silindir veya makara yardımı ile de tesviye yapılabilir. Bu işlemden sonra tekrar bir master yapmak ta mümkündür. Çok mükemmel bir yüzey isteniyorsa magnezyum kanatlı perdah makinaları kullanılmalıdır. Bu tip araçlar mükemmel bir yüzey oluşturulmada ve lifleri gömmede daha başarılıdır. Geniş perdah makinalarının kullanımı zor olmakla birlikte düz ve cilalı bir yüzey elde etmek için daha işlevseldirler.

Yukarda anlatıldığı şekilde yerleştirilen ve yüzeyi düzeltilen çelik lifli beton lifsiz betonlar gibi kür edilebilir.

5.3 Kalite Kontrol

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun kalite kontrolü yapılırken lifsiz betonların kalite kontrolü için öngörülen yaklaşımlar denenir. Kısaca özetlersek;

- Kalite limitlerini belirlemek için laboratuvarda yapılan ve araştırma niteliğinde olan ilk deneyler,

- Şantiyede yapım sırasında yapılan kalite kontrol çalışmaları,

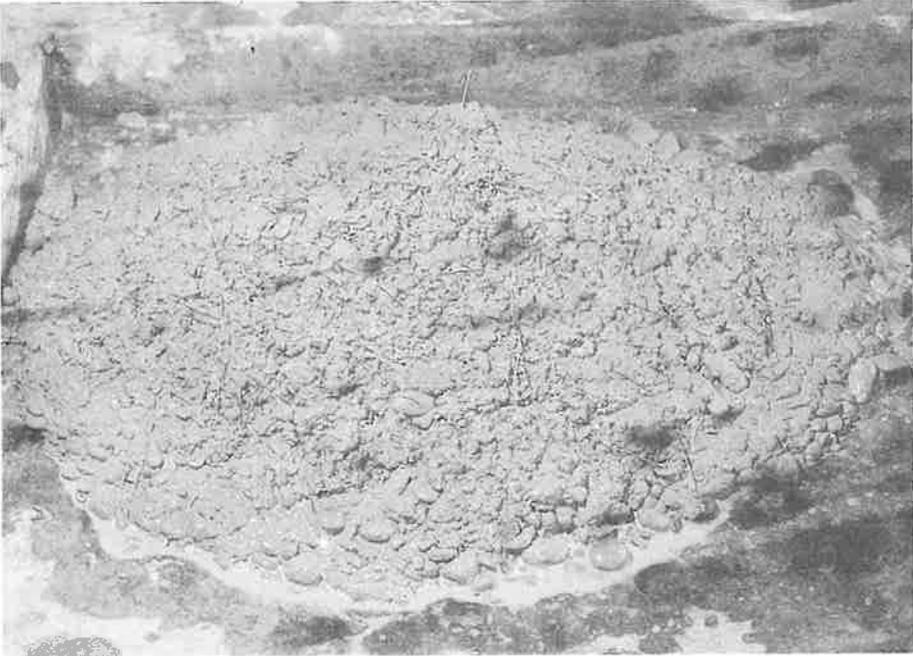
- Beton tesisindeki kalite kontrol çalışmaları,

- Yerleştirme esnasında döküm ve sıkılaştırma işlemlerine yönelik kalite kontrol çalışmaları.

Çelik lifli beton üretiminden önce betonda kullanılacak olan bileşenlerin ilgili standartlar kapsamında deneye tabi tutularak uygun olup olmadıkları araştırılmalıdır. Daha sonra yine ilgili standartlar esasınca, beton üretilerek deneyler için numuneler hazırlanmalı ve bu numuneler test edilerek betonun performansı tayin edilmelidir, foto-5.10,5.11,5.12,5.13 Şantiyede ise laboratuvarda yapılmış çalışmalar tekrar edilerek sonuçların labaratuvar sonuçlarına yaklaşması sağlanmalı ve yerine yerleştirilen betonun deney numuneleri ile aynı performansı yakalayabilmesi için bakım ve kür ile ilgili zorunlu koşullar yerine getirilmelidir.



Foto-5.10,5.11 Homojen olarak liflerin dağılmış olduğu
elik lifli beton karışımı



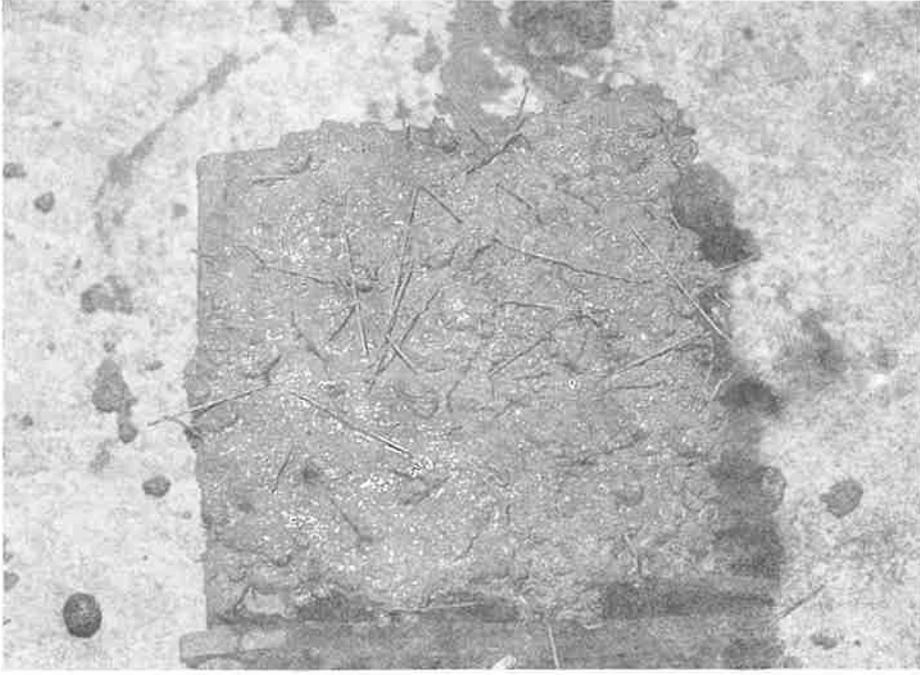
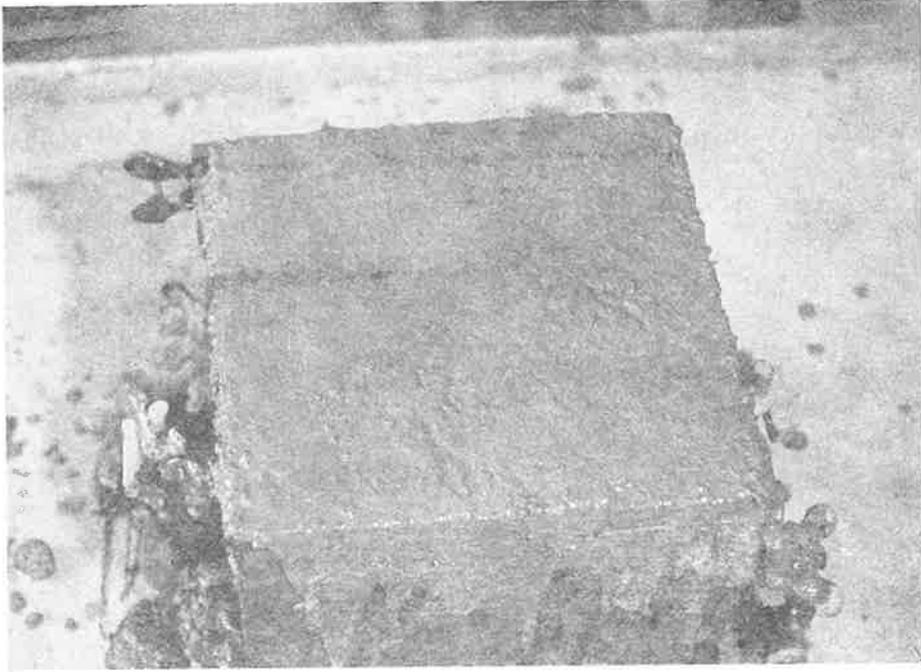


Foto-5.12,5.13 Çelik lifli beton numunesinin yerleştirilmesi ve tesviye edilmesi



Şantiyede, betonda kullanılmak üzere alınmış olan çelik liflerin depolanması sırasında liflerin paslanmasını ve topaklanmasını önleyecek önlemler alınmalıdır. Bunun için lifler plastik örtü içerisinde ve bir platform üzerinde depolanmalıdır. Açık arazideki depolamalarda lifler kapalı torbalar içerisinde muhafaza edilmelidir. Ufak paslanmalar tolere edilebilir ama büyük ölçüdeki paslanmalarda lifler kesinlikle kullanılmamalıdır.

Zamkla birkaçı birbirine bağlanmış olan lifler, uzun süre sıcak havada depolanırsa lif taneleri birbirine iyice yapışarak karışım sırasında tek tek ayrılmaları güçleşir. Bir diğer husus da beton santralinde lifleri düğüm etmeden ve mikserle fazla yükleme yapmadan liflerin betona katılması için gerekli özenin gösterilmesidir.

Çelik liflerle güçlendirilmiş kompozitler, taze ve sertleşmiş betonların kalite kontrolü adı altında yapılan deneylerle sınılanır. Taze beton deneyleri içerisinde kalite-kontrol açısından yapılması gerekli en önemli deney işlenebilirliğin tespitine yönelik deneylerdir. Sertleşmiş beton açısından ise malzemenin tokluk indekslerinin tesbiti, eğilmede çekme dayanımı ve darbe dayanımı deneyleridir.

6. ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN KULLANIM ALANLARI

VE ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ PÜSKÜRTME BETON

6.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton Uygulamaları

Çelik liflerin beton içerisindeki davranışı ve yapısal özellikleri nedeni ile betonun bir çok özeliğini güçlendirmesi sonucu çelik liflerle güçlendirilmiş beton, ağır çalışma koşullarına maruz kalan yapılarda, ince kesitlerin ve yüksek dayanım özelliklerinin (çekme, darbe, kavitasyon, erozyon, yorulma, tokluk, vs.) gerektiği yerlerde kullanılmaktadır. Bazı yerlerde ise beton içerisinde donatı ve hasır kullanmamak için ekonomik gerekçelerle kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanıldığı alanları sıralayacak olursak ;

- Endüstriyel döşemeler
- Su yapıları
- Püskürtme beton uygulamaları
- Şev stabilitesi ve tünel kaplamaları
- Havaalanı kaplama betonlarının
- Liman kaplama betonlarının
- Çeşitli kaplamalar
- Depreme dayanıklı yapılar
- Ateşe dayanıklı beton yapılar
- Ön yapımlı beton elamanlar
- Beton borular, foto-6.1,6.2,6.3
- Askeri güvenlik yapılarının (sığınak, hangar, vs.)

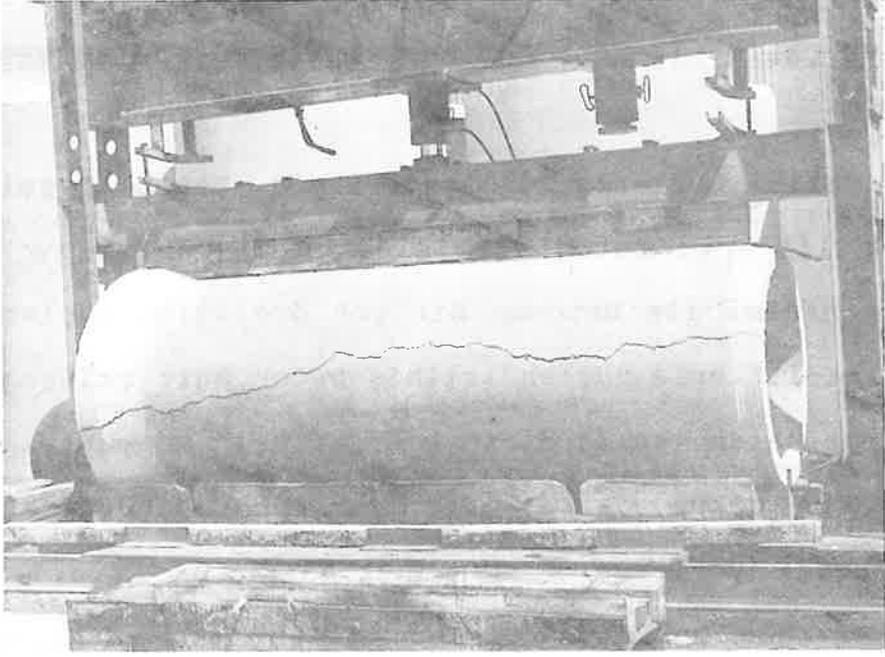
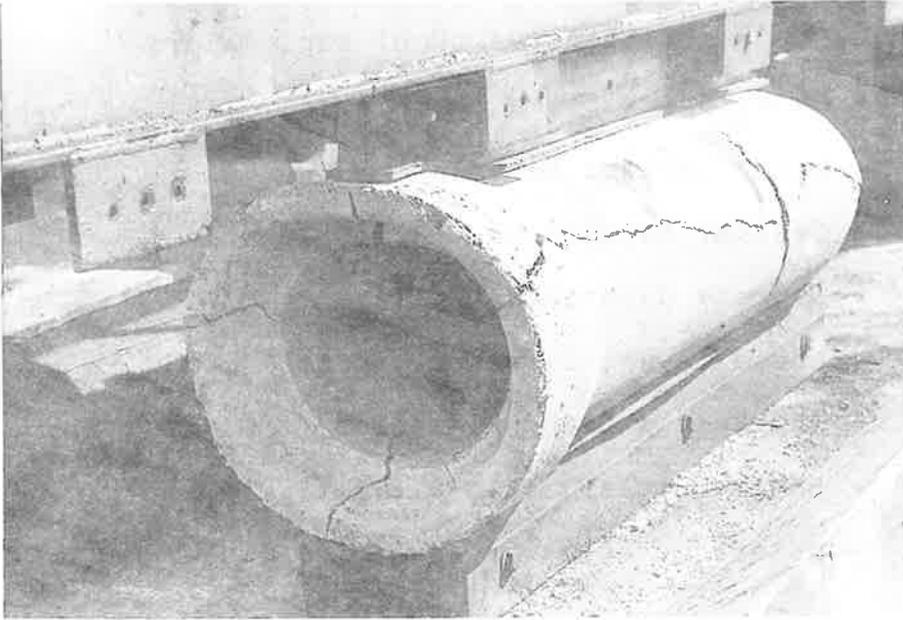


Foto-6.1,6.2 Yüksek deformasyonlara uğramasına rağmen parçalanmamış çelik liflerle güçlendirilmiş beton borular



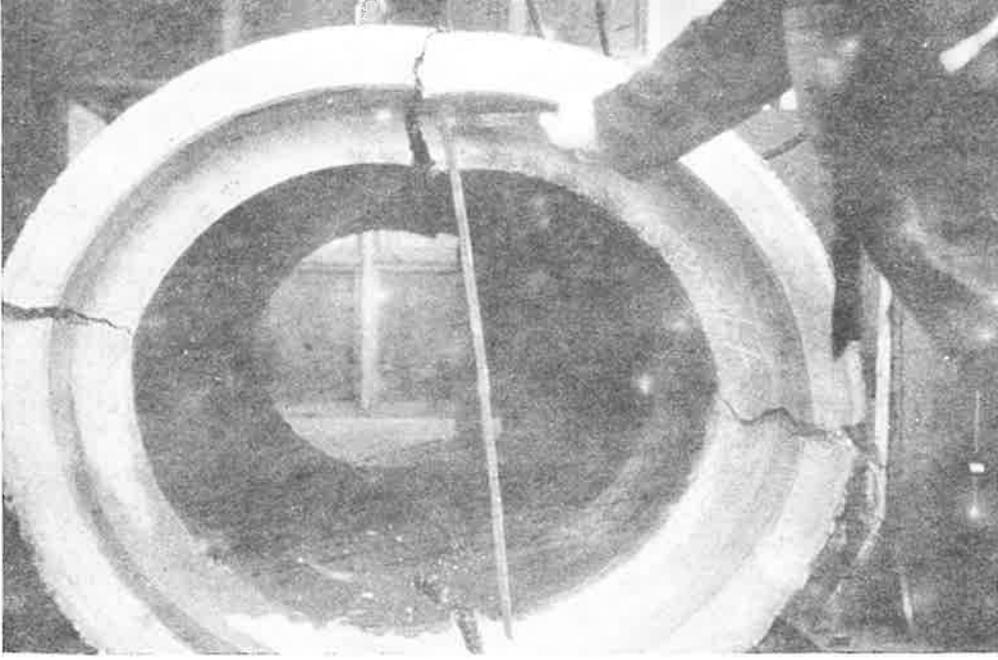


Foto-6.3 Tepe noktası basıncı deneyi sonrasında çelik liflerle güçlendirilmiş beton boru

6.1.1 Endüstriyel Döşemeler (Fabrika Döşemeleri, Ambar ve Hangar Zeminleri, İskele-Rıhtım Kaplamaları, vs.)

İyi bir döşeme bütün endüstriyel işlerin temelidir. Bu nedenle, yapının işlevini yitirmeden hizmet görme yeteneğini sürdürmesi olarak tanımlanan servis ömrü kavramı endüstriyel döşemeler için önemli bir tanımlamadır. Onarım ve yeniden inşa sadece mali bir yük getirmekle kalmaz, endüstriyel faaliyetin kesilmesine de neden olur.

Bu tip yapılarda döşeme, üzerine gelen aşırı yükler ile karşı karşıyadır. Bir taraftan tekerlek, düşme, çarpma şeklinde görülen dinamik yükleri, diğer taraftan da statik kolon yüklerini ve üniform yayılı yükleri karşılamak zorundadır.

Özellikle dinamik etkilere karşı döşeme betonunun dayanımının arttırılması çözüm olmamaktadır. Bunun için döşeme betonunun, yorulma dayanımının, darbe dayanımının, yüksek ve düzensiz sıcaklık değışikliklerine karşı direncinin iyi olması gereklidir.

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton homojen bir malzeme olarak bu yükleri yüksek bir mukavemet ile karşılar.Çelik lifler bu tip döşemelerde hasırla birlikte kullanılabilceği gibi hasırın yerine de kullanılabilir,foto-6.4



Foto-6.4 Çelik liflerle güçlendirilmiş ağır yüklere maruz döşeme betonu

Endüstriyel döşemelerin kaplanması uzunluk/çap oranı ve çelik lif dozajı şu şekilde seçilir, tablo-6.1

Tablo-6.1 Endüstriyel döşemeler için önerilen çelik lif tipleri ve dozajları, [14]

Uzunluk/Çap	Lif Dozajı	Uygulama Alanı
ZC 30/0,50	30-50 kg/m ³	Döşemede özel uygulamalar
ZP 30/0,50	15-30 kg/m ³	Su geçirmez tabaka ve şap
ZC 50/0,50	30-50 kg/m ³	Beton kaplamalar
ZC 60/0,80	20-40 kg/m ³	Monolitik olmayan döşemeler
ZC 60/0,100	20-40 kg/m ³	Monolitik döşemeler

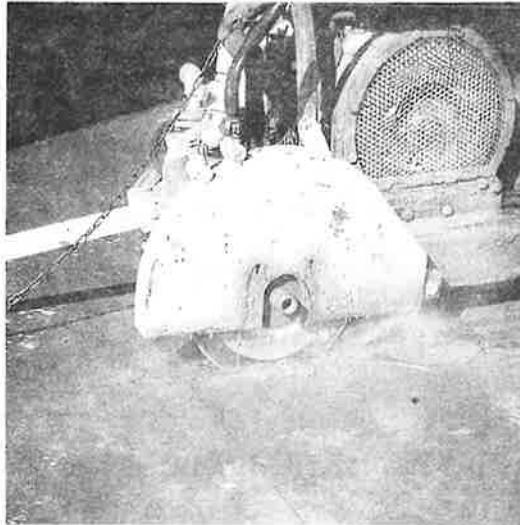
Büyük açıklıklı (anolu) döşemelerde çatlama olasılığının tamamen ortadan kaldırılabilmesi için döşeme, beton derinliğinin üçte biri (h/3) oranında (6x6)m veya (10x10)m boyutlarında kesilerek yalancı derzler teşkil ettirilebilir, foto-6.5, 6.6

Endüstriyel döşemelerde çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanılmasının avantajlarını özetlersek ;

- Döşeme kalınlığının azaltılması
- Geleneksel hasır donatısının kaldırılması
- Daha düşük bakım, onarım masrafları
- İnşaatın kısa zamanda basit ve kolay bir şekilde tamamlanması
- Çatlak yayılmasının durdurulması



Foto-6.5,6.6 Çelik hasır kullanılmadan hazırlanmış ve derz oluşturulmak üzere kesilen çelik lifli beton döşeme



- Döşemenin maruz kalacağı dinamik yüklemelere karşı daha da güçlendirilmesi

- Liflerin üç boyutlu donatı gibi çalışması sonucu yapısal güvenliğin artması

Endüstriyel döşemelerin kaplanmasında uzunluk/çap oranı ve çelik lif dozajı tablo- 6.1'deki esaslar dahilinde seçilir.

Büyük açıklıklı (anolu) döşemelerde çatlama olasılığının tamamen ortadan kaldırılabilmesi için döşeme, beton derinliğinin üçte biri ($h/3$) oranında (6x6)m veya (10x10)m boyutlarında kesilerek yalancı derzler teşkil ettirilebilir, foto-6.5,6.6

6.1.2 Havaalanı Kaplamaları

Havaalanı beton kaplamaları tasarımı yapılırken aşağıdaki hususlar gözönüne alınır;

- Sıkıştırılmış zemin ve sıkıştırılmış zemin + gro-beton bileşimi için altyapı reaksiyon modülü (K), (kg/cm^3)

- Taşıyıcı betonun sınıfı

- Uçak tipi, tahmini yükler ve bunların sıklığı, [38].

Havaalanı uygulamalarında kaplama kalınlığının lifli beton ile azaltılması mümkündür. Havaalanlarında beton kalınlık hesabı limit gerilme kriterine göre yapılır. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonların yüksek eğilme ve yorulma mukavemetleri nedeni ile kaplama kalınlığında azaltmalar yapılabilmektedir. foto-6.7

Normalde zemin ve yol betonlarında statik eğilme gerilmeleri $40-50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ civarındadır. Bu değer statik yükleme durumu içindir. Yüklerin tekrarlanması ve zamanla oluşan yo-

rulma nedeni ile, beton plak daha düşük gerilmelerde de bulunabilir. Lifsiz betonlarda, yük tekrarından doğan yorulma mukavemeti statik mukavemetin % 50'si civarında olup bu oran çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar için % 80'dir.

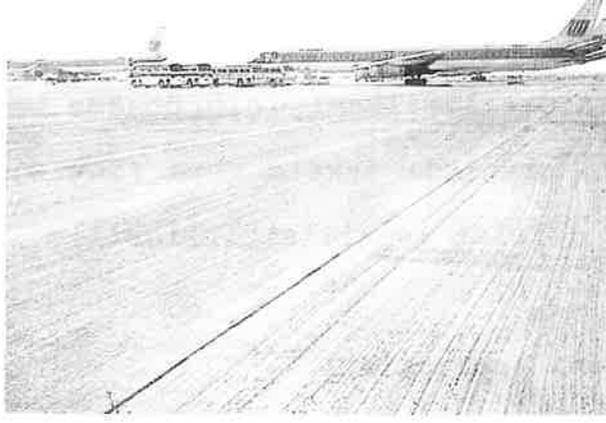


Foto-6.7 Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun havaalanı uygulaması

Havaalanı kaplamaları için bir diğer husus da çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanıldığında derz açıklıklarının büyütülebilmesidir. Lifli betonların yüksek çekme mukavemetleri nedeni ile derzler arasındaki mesafeyi büyütme ve derz sayısını azaltmak mümkündür. Bu derzler beton kesme makinası ile beton kalınlığının % 40'ı kesilerek elde edilir.

6.1.3 Liman Kaplamaları

Liman kaplamaları diğer kaplama çeşitlerinden farklı

olarak ağır yol trafiğini karşılayacak şekilde projelendirilir. Liman kaplamalarında yük transferi, çarpma etkileri, kesme momentleri, su yüzeyinin sürekli değişmesi, noktasal yükler ve aşırı yükleme olasılığı gibi durumlar gözönüne alınır. Liman kaplamalarında çelik lifli betonun kullanılması durumunda kaplama kalınlığının azaltılması ve derz açıklıklarının büyütülmesi mümkündür.

6.1.4. Ateşe Dayanıklı Beton Yapılar

Termal ve mekanik şok tehlikesi olan, büyük sıcaklık farklılıkları ile karşı karşıya kalabilecek ve aynı zamanda yük taşıyacak olan yapılar genel uygulama alanlarıdır. Uygulamanın yapıldığı endüstri alanları şunlardır ;

- Petrokimya : çatlak tehlikesine karşı
- Çimento Üretimi :klinker döner fırınının astarlanmasında
- Çelik Üretimi : fırın kapıları ve kapakları, foto-6.8
- Jet motorları için test duvarı
- Çelik kolonların yangına karşı astarlanması

Bu tip uygulamalarda genellikle uzunluk/çap oranı 30/0.40 ve 50/0.50 olan paslanmaz çelik lifler kullanılır. Betona liflerin katılması sonucu yüksek sıcaklıkta kırılma eğilimi gösteren betonun kırılma eğilimi önlenerek betonun termal ve mekanik şok direncinde önemli artışlar kaydedilir.

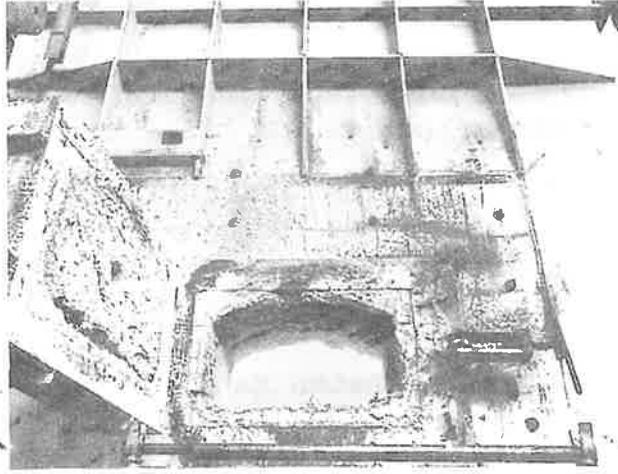


Foto-6.8 Çelik lifli beton ile kaplanmış yüksek fırın kapağı

6.1.5 Önyapımlı Beton Elemanlar

Önyapımlı beton elemanlarda ;

- Çatlak oluşumunun ve yayılmasının önlenmesi,
- Beton elemanın yük altında daha elastik davranabilmesi,
- Beton elemanın dinamik yüklere karşı daha mukavim davranabilmesi,
- Hasır çeliğin kaldırılarak daha ekonomik bir üretimin sağlanması amacıyla beton borularda, cephe ve bölme panellerinde, süzgeç, menhol gibi üç boyutlu elemanlarda , kirişlerde, kanaletlerde kullanılır. Bu uygulamalarda daha çok uzunluk/çap oranı 40/0.60 ve 60/0.80 olan paslanmaz çelik

lifler kullanılır,foto-6.9.

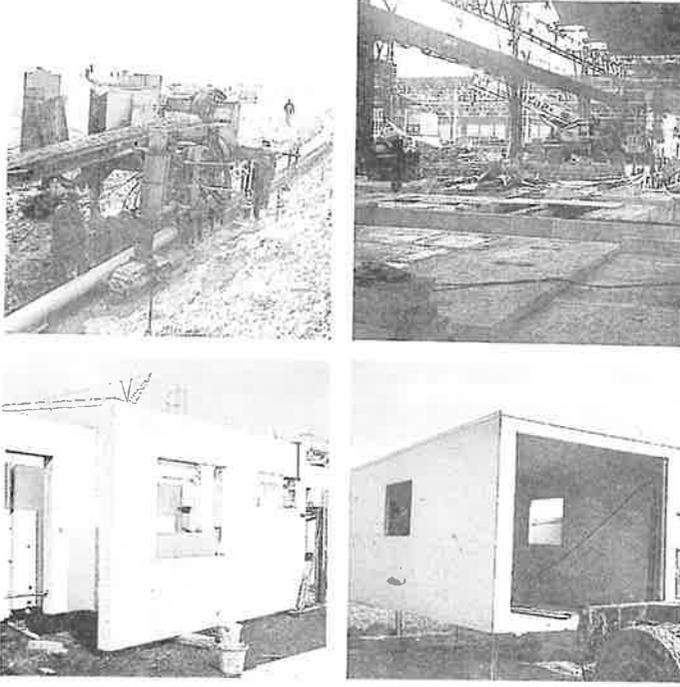


Foto-6.9 Çelik liflerle güçlendirilmiş betondan üretilmiş prefabrik elamanlar

6.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Püskürtme Beton (Shotcrete) Uygulamaları

Günümüzde,özellikle tünel kaplamalarında ve yamaç stabilitesini sağlamada püskürtme beton kullanılmaktadır,foto-6.10,6.11. Bu tip inşa çalışmalarında zeminin kalitesi gözönüne alındığında çoğu zaman püskürtme beton kaplamanın takviye edilmesi zorunluluğu ortaya çıkar. Bu takviye püskürtme beton içerisinde çelik hasır kullanılarak gerçekleştirilir.

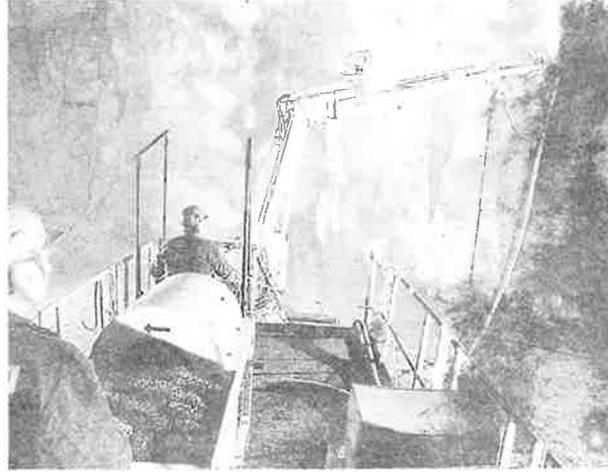


Foto-6.10,6.11 Çelik lifli püskürtme betonun tünel ve kanal kaplaması onarımında kullanılması

Hasır kullanılması, montaj ve işçilik açısından güç ve pahalı bir işlem olup inşa sürecini uzatarak değişik sorunlara da neden olur. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton teknik özellikleri itibari ile püskürtme beton içerisinde kullanılan donatının işlevini görebilir. Püskürtme beton uygulamasının yanısıra yine tünellerde ön stabilizasyonu sağlayan önyapımlı

tünel elamanlarının (segman) üretiminde de kullanılmaktadır. Çelik liflerle güçlendirilmiş segmanlar 15 cm'ye kadar yeraltı hareketlerinin beklenildiği zeminlerde gerekli destek işlevini yerine getirebilirler, [38]

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton; donatının işlevini yüksek tokluğu, çatlak oluşma direnci ve elastik davranabilme yetenekleri sayesinde üstlenir. Püskürtme betonun tünel ve yamaç uygulamalarında esas olan, kazılmış kaya yada toprak duvarlarda yarı sert bir kaplama yaratarak zemin hareketlerine karşı stabil bir yapı oluşturmaktır. Bu nedenle püskürtme betonun kaya yüzeylerine ve zemine iyi yapışması için yüksek bir başlangıç gerilmesine ve zemin-kaya hareketlerini durdurması için de yüksek esneme kapasitesi ve tokluğa sahip olması gereklidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton, bölüm III ve IV'de açıklanan davranışı ve özellikleri ile bu koşulları sağlayabilecek bir malzemedir. Zemin-kaya hareketleri nedeni ile ortaya çıkan gerilmeler, yüksek tokluk ve deformasyon özelliği olan lifli beton tarafından emilerek rijit malzeme içerisinde dağıtılır.

Genel olarak, çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton yaygın olarak şu alanlarda kullanılır ;

- Tünel, maden ocağı gibi yeraltı kazılarında destek olarak,

- Yamaç-şev stabilizesi ve kazılan temellerin desteklenmesi amacıyla kaya ve zemin ankraj sistemleri ile birlikte, foto-6.12



Foto-6.12 Çelik lifli püskürtme beton uygulaması

- Çeşitli nedenlerle tahrip olmuş kanal kaplamalarının tamirinde, foto-6.11

- Köprü mesnetlerinin korunmasında,

- Bozulan deniz yapılarının onarımında

Kuru ve ıslak sistem olarak her iki sistemde de püskürtme beton uygulaması yapılabilir. Fakat daha çok kuru sistem tercih edilir. Islak sistemde liflerin boruyu tıkaması gibi bazı problemler vardır. Liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton uygulamasında bir diğer sorun da ilk tabakanın uygulanmasında yere dökülen (rebound) betonun fazlalığıdır. Bu sorun, püskürtme beton uygulanacak yüzeylere önce astar şeklinde yapılacak lifsiz püskürtme beton uygulaması ile ortadan kaldı-

rılabilir.Yapılan incelemelerde 76 mm kalınlığa kadar olan uygulamalarda % 13'ten daha düşük bir rebound miktarı tespit edilmiştir, [38].

Daha büyük maksimum tane çapları ile daha büyük tabaka kalınlıklarındaki uygulamaların varlığına rağmen lifli püskürtme beton uygulamaları 3/8" ve 1/2" 'lik maksimum tane çapları ve 8 cm'lik beton tabakası kalınlıkları ile sınırlandırılmıştır. Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton uygulamalarında tane dağılımı belirlenirken tablo-6.2'deki sınırlar içerisinde kalacak granülometri eğrileri seçilir,[8].

Tablo-6.2 Çelik lifli püskürtme beton için önerilen tane dağılımı değerleri,[8]

Elek Göz Açıklığı	% Geçen (Kütlece)		
	Kum	3/8" (9,5 mm)	1/2" (12,7 mm)
19 mm	-	-	100
12 mm	-	100	80- 95
10 mm	100	90-100	70- 90
4,76 mm	95-100	70- 85	50- 70
2,40 mm	80-100	50- 70	35- 55
1,20 mm	50- 85	35- 55	20- 40
600 m	25- 60	20- 35	10- 30
300 m	10- 30	8- 20	5- 17
150 m	2- 10	2- 10	2- 10

Kuru sistemdeki karışımlarda basit olarak şu oranlar gözetilir; çimento % 20 (diğer puzzolanik, silika tozu gibi malzemeler de dahil), iri agrega % 15-20 ve toplam agreganın % 60-65'i ölçüsünde de kum kullanılır.

Kuru karışımda çimento miktarı belirlenirken maksimum tane çapı esas alınır. Şöyleki;

Maksimum tane çapı	Çimento miktarı, kg/m ³
4 mm	450-600
8 mm	350-450
16 mm	300-400

Islak karışımda su miktarı çökme değeri 5 cm'nin üzerine çıkacak şekilde ayarlanır. Çökme 15 cm'nin üzerine çıkarsa karışımın kohezyonu azalır ve iri agregaların ayrışma eğilimi artar. Karışımın uygulama yüzeyine iyi yapışabilmesi için çimento ağırlığının % 2'si ölçüsünde priz hızlandırıcı (gunitaj) katkısı ilave edilir. Bunların yanısıra 0,55 su/çimento oranının gerekli işlenebilirlikte aşılması için yüksek su azaltıcı (süper akışkanlaştırıcı) katkıları, iyi bir matris elde etmek için de silika tozu ve polimer ilave edilebilir. Silika tozunun ilave edilmesi ile karışımın yüzeye yapışkanlığı artar, reboundu azalır, foto-6.13, 6.14, [8].

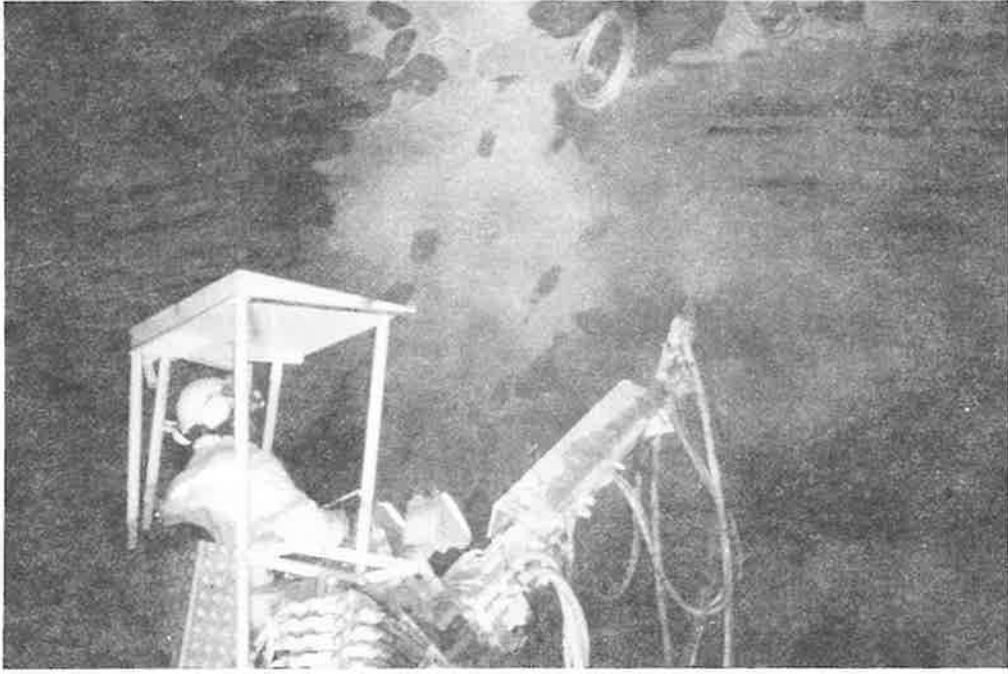


Foto-6.13,6.14 'Tünelde çelik lifli püskürtme beton uygulaması



En başarılı uygulamalar lif boyu 15-30 mm, çapı ise 0,25-0,40 mm arasında olan çelik liflerle gerçekleştirilmiştir, [38] .

Püskürtme beton ve uygulamaları ile ilgili değerlendirme bölüm III, IV ve V'te geçen deney yöntemleri kullanılarak yapılır. Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton uygulamalarında Morgan tarafından geliştirilmiş olan tokluk indeksleri (I_{10}, I_{30}) ve tokluk faktörü ($R_{30/10}$) gibi kriterler kullanılır, tablo-6.3, [43 , 44]

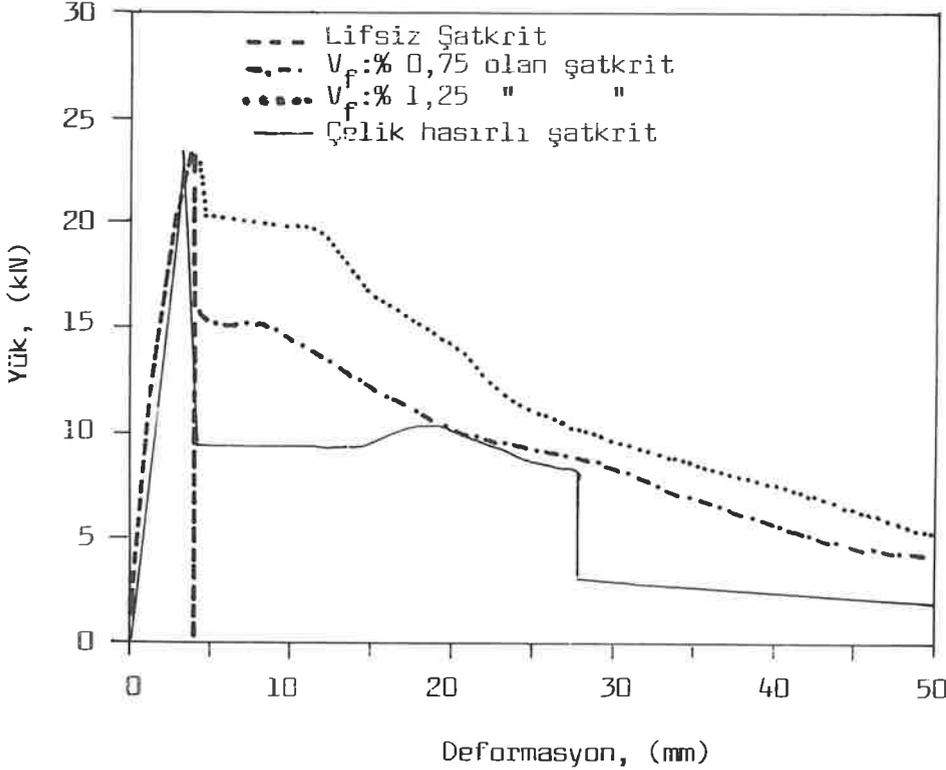
Tablo-6.3 Çelik lifli püskürtme beton için kullanılan değerlendirme kriterleri, [8]

Sınıfı	Değerlendirme	I_{10}	I_{30}	$R_{30/10}$
I	Zayıf	4	12	40
II	Kabuledilebilir	4	12	40
III	İyi	6	18	60
IV	Mükemmel	8	24	80

Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton uygulamalarında da lifsiz beton karışımlarında olduğu gibi karışım parametreleri ve bileşenleri betonun teknik performansını etkiler.

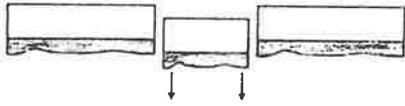
6.2.1 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Püskürtme Betonun Teknik Performansı

Morgan ve Mowatt; yapmış oldukları çalışmada donatısız, hasır donatılı ve çelik lifli püskürtme beton uygulamalarının yük-deformasyon davranışlarını ayrıntılı olarak incelemişlerdir, [44]. Büyük paneller üzerinde yapılan yük-deformasyon deneyleri göstermiştir ki, ilk çatlağa kadar olan küçük deformasyonlarda malzemeler arasında herhangi bir fark bulunamamış bunun aksine büyük deformasyonlarda çelik lifli beton daha iyi performans (% 100'e yaklaşan) göstermiştir, şekil-6.1

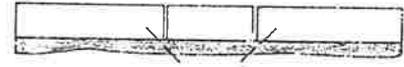


Şekil-6.1 Çelik lifli ,çelik hasırlı ve lifsiz püskürtme betonun mukayese edilmesi, [8, 44]

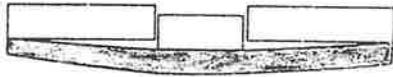
Bu sonuçların bulunmasından sonra blok düşmesi (Falling block test) adı verilen ve bir kaya bloğun düşmesine benzer koşullar sağlanarak yapılan deneylerle yeniden kıyaslama yapılmıştır. Bu deneylerde tünelin tepe kısmında, boşta kalan blok veya kayanın değişik yüklerine maruz kalan püskürtme beton kaplamanın durumuna benzer bir sistem tasarlanmıştır, şekil-6.2.



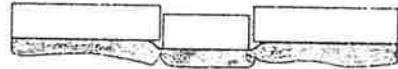
Kesme kuvveti etkisinde



Çapraz çekme kuvveti etkisinde



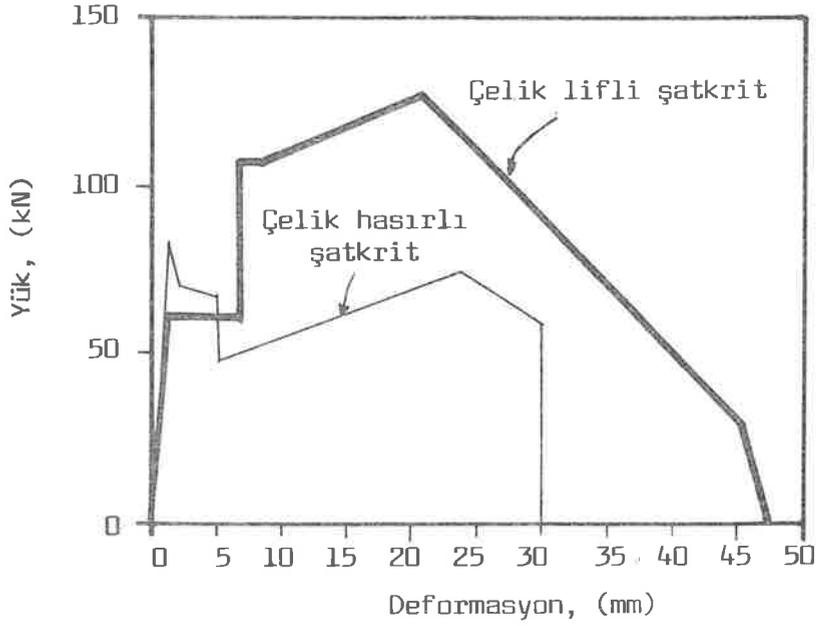
Bağ/Yapışma kuvveti etkisinde



Eğilme kuvveti etkisinde

Şekil-6.2 Çelik lifli püskürtme betonlara uygulanan blok düşmesi deneyinin değişik durumları ,[44]

Bu çalışmada elde edilen verilerle hazırlanan grafiklerde yine yüksek deformasyonlarda çelik lifli şatkritin gayet iyi performans gösterdiği görülmüştür, şekil-6.3,[38,43,44].

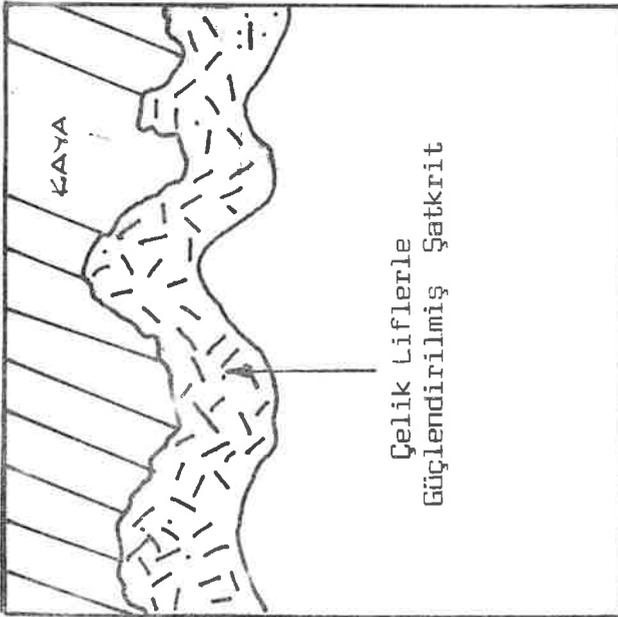


Şekil-6.3 Çelik lifli ve çelik hasırlı püskürtme betonun gerilme-deformasyon davranışları,[44]

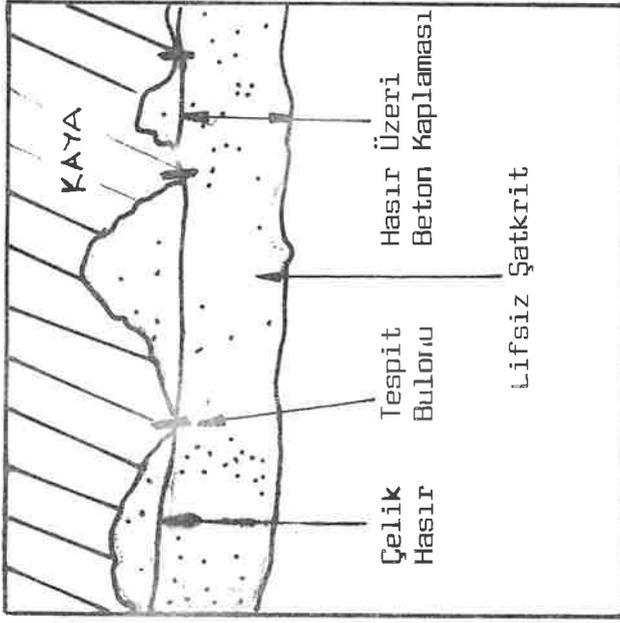
6.2.2 Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Püskürtme Betonun Uygulama Farklılıkları ve Ekonomik Avantajları

Çelik lifli püskürtme betonu çekici kılan nedenlerin başında çelik hasır montajının ortadan kalkması gelir. Hasırın tünel yüzeyine tutturulması masraflı ve tehlikeli bir işlem olmakla birlikte uzunca bir zaman da gerektirir. Kazı yüzeylerinin düzensiz olması itibarıyla hasır tünel yüzeyine bulonlarla bağlanır. Şekil-6.4'ten görüleceği üzere hasırın arkasında yüzey düzensizlikleri nedeniyle boşluklar vardır.

ÇELİK LİFLİ ŞATKRİT



ÇELİK HASIRLI ŞATKRİT



Şekil-6.4 Çelik lifli ve çelik hasırlı püskürtme betonun karşılaştırılması, [8]

Hasır kullanılması durumunda bu boşlukların betonla doldurulup hasır yüzeyinin de betonla kaplanması gereklidir. Halbuki çelik lifli uygulamada (şekilden de görüleceği üzere) daha az beton sarfiyatı söz konusudur. Yani bu sistemde yüzeylerin takip edilmesi mümkündür. Yine hasır kullanılması durumunda, eğer operatör nozulu hatalı kullanırsa hasır yüzeyine çarpma sonucu beton birikir ve arka kısımlara betonun gitmesi önlenerek hasırın arka kısmında boşluk ve ince madde içeriği fazla bir karışım meydana gelir. Bu durumda beton kaya yüzeyine iyi yapışamaz.

Zemin suyunun söz konusu olduğu durumlarda hasırın paslanması, tünelde sızıntı ve kaplamanın bozulması gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkar. Hasıra çarpan iri agregaların hasırını sürekli titreştirmesi sonucu hasır ile beton arasında aderans sağlanamaz. Bu uygulamanın reboundu da yüksek olur. Her iki uygulama arasında arasında beton sarfiyatı açısından % 40 fark vardır.

7.ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONUN SU YAPILARINDA KULLANILMASI

7.1 Giriş

Çelik liflerle güçlendirilmiş beton içerisindeki çelik lifler nedeniyle yük altında geleneksel betonlardan daha farklı davranış gösterir. Yük altındaki bu farklı davranış sonucu betonun teknik özelliklerinde (özellikle tokluk, darbe dayanımı, yorulma dayanımı ve kavitasyon hasarları dayanımı gibi dinamik yüklerle doğrudan ilgili olan) bir artış meydana gelmiştir. Kırılma anında yüksek enerji absorblama özeliği sonucu betonun kırılması için yapılması gerekli iş büyümüştür.

Su yapılarında, kritik yapılar olarak tanımlanan dolusavak, dolusavak boşaltım kanalı, dolusavak saptırıcıları, sıçratma eşiği, dipsavak, enerji kırıcı havuz gibi yapılar yapım sırasında gerekli kalite kontrolün yapılmaması, kavitasyon oluşturabilecek akım koşullarının varlığına rağmen projede yapısal önlemlerin ihmal edilmesi ve projedeki bazı olumsuzluklar nedeniyle potansiyel olarak kavitasyon hasarları tehlikesi ile karşıkarşıyadırlar, foto-7.1

Günümüzde düşü yüksekliği fazla olan barajların inşa edilmesi sonucu barajlarda kavitasyon hasarının meydana gelme olasılığı daha da artmıştır. Bilindiği üzere 10 m/s'nin üzerindeki hızlarda daima kavitasyonun meydana gelme olasılığı vardır,[45] 12-15 m/s arasındaki hızlarda kavitasyon hasarı görülebilir, 20 m/s'den büyük hızlarda ise kavitasyon hasarlarına karşı beton (yada yüzeyi) mutlaka korunmalıdır, [46].



Foto-7.1 Dipsavakta kavitasyon sonucu meydana gelen 14 m derinliğindeki oyulma,(Glen Kanyon Barajı,ABD)

Bunun yanısıra çoğu zaman yapım sırasında kalite kontrol eksikliğinden dolayı beton kalitesinin düşük olması nedeniyle 10 m/s'den daha düşük hızlarda betonda aşınma meydana gelebilir,foto-7.2,[47].



Foto-7.2 Hız 10 m/s'den düşük olmasına rağmen betonun kalitesizliği nedeniyle dipsavak taban betonunda oluşan aşınma hasarı, (Adıgüzel Barajı)

Yukarıda anılan sebeplerle oluşan kavitasyon olayı, sonucu meydana gelen oyulma ve daha değişik nedenlerle ortaya çıkan aşınma türü hasarları önlemek için başlangıçta su yapılarında yada bu yapıların anılan hasarlara maruz kalabilecek kısımlarında çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanımı yaygınlaşmaktadır. Hasarı önlemek için malzemenin dinamik etkilere karşı kalitesinin yükseltilmesi de çözüm için alınması gerekli tedbirlerden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Akım hızının yüksek olduğu ve akım ipçiklerinin yapıdan ayrıldığı bölgelerde ortaya çıkan çekme kuvvetlerine betonun

dayanamaması sonucu meydana gelen hasarların onarılmasında; tahribata uğrayan betondan daha güçlü, darbe, çekme ve tokluk dayanımı yüksek bir malzemeye ihtiyaç vardır. Çelik lifli beton pratiğinden önce bu tip hasarların onarımında epoksi esaslı tamir harçları kullanılmış ve başarı elde edilememiştir.

Kavitasyon, oluşum mekanizması açısından dinamik bir etkidir. Bu nedenle kavitasyona maruz kalacak malzemenin dinamik etkiler ve tekrarlı yükler altında yüksek enerji emme kapasitesine (tokluğuna) sahip olması gereklidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş beton yukarıda anılan performansını, çekme deneyinde yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanın büyüklüğü ile gösterir. Bu durumdaki betonu kırmak için daha çok iş yapmak gereklidir.

Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) yaptığı çalışmalarda belirttiği üzere çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar su yapılarında kavitasyon hasarına karşı yada bu tip hasarların onarımında kullanılmak üzere test edilirken yüksek düşülü bir baraj dolusavağının çıkışında görülene benzer şekilde kavitasyon koşulları yaratılarak denenmişlerdir,[16]. Hazırlanan çelik lifli beton, epoksili harç ve normal beton plakalar, 75 m düşü yüksekliği altında 35 m/s hızda ve 1,7 m³/s debideki su akışına maruz bırakılmışlardır. Deneylerde, kavitasyon yaratabilmek için modelin akış yolu üzerinde birtakım düzensizlikler (engeller) inşa edilerek ciddi oyulma koşulları yaratılmıştır. ABD'deki **Detroit Barajı**nın yüksek düşüsünden yararlanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada; yüksek hızdaki akım ile yüzeyde kavitasyon meydana getirilerek, betonda ciddi

hasarlar yaratılmıştır,[18]. Bu deneyler sonucu; gerçek kavitasyon koşullarında çelik liflerle güçlendirilmiş beton plakaların (döşemelerin) kavitasyon hasarına karşı dayanıklılığının aynı beton bileşenleri ile yüksek dayanımlı ve epoksi harçlı olarak üretilmiş betonların dayanıklılığının üç katı olduğu görülmüştür.

Yapılan uygulamaların başarılı olabilmesi için normal betonda özen gösterilen; beton bileşenlerinin uygunluğu, çimento dozajı, düşük su/çimento oranı gibi parametrelerin yanısıra lifli betonun tasarımı, yerleştirilmesi, uygun lif seçimi ve yüzey tamamlama işlemlerine ait uygulamaların da doğru yapılması gereklidir. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun barajlarda kullanımı büyük ölçüde mühendislik sezgi ve deneyimi ile onarımı yapılacak olan yapının ve onarımda kullanılacak malzemelerin iyi tanınmasına bağlıdır.Kavitasyon hasarlarının onarımına yönelik çalışmaların başarılı olabilmesi için dikkat edilmesi gerekli en önemli husus çelik liflerle güçlendirilmiş betonun altındaki betona ve döşemeye bağlanması olayıdır. Burada kullanılan bağlantı(ankraj) demirleri, üzerinde durduğu taban malzemesi ve lifli beton yüzeyindeki negatif basıncı alabilecek özellikte olmalıdır. Bunun yanısıra lifli betonun bir alt tabakaya iyi yapışabilmesi ve düzgün bir yüzey için titreşimli masterlar ile betonun iyi sıkıştırılarak düzeltilmesine de ihtiyaç vardır.

7.2 Su Yapılarındaki Deneysel Uygulamalar

Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlar, son on yılda çeşitli özellikteki barajlarda değişik amaçlarla kullanılmıştır. Lifli beton tarihinin daha eski olmasına rağmen üretimi ve yerleştirilmesi konusunda uygulamacıların kuşku-larından ötürü baraj yapılarında kullanılması oldukça yenidir. Önceleri kavitasyon hasarı (oyulmalarda) ve değişik nedenlerle ortaya çıkmış aşınma, parça kopması gibi onarımlarda kullanılan ve buralarda yüksek performans gösteren lifli beton uygulamaları daha sonraları su yapılarının kritik bölgelerinde yapının bir parçası olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Normal ve tamir amacıyla üretilmiş betonlarla (epoksi harçlar) önceden başarılı olunamayan bölgelerde bu onarımlarla iyi sonuçlar alınması, önemli bölgelerde asıl yapının parçası olarak çelik lifli betonun kullanılması konusunda tasarımcılara güven vermiştir. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonların onarım amacıyla ve yapının esas parçası olarak kullanılmış olduğu barajlardan bazıları tablo-7.1'de verilmiştir, [38] .

Tablo-7.1'de sıralanan bu projelerde çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanılmadan önce yüksek dayanımlı beton ya da epoksi harçlar kullanılarak beton onarılmaya çalışılmışsa da başarılı olunamamıştır. Bunun üzerine; oyulma, parça kopması ve aşınma şeklinde görülen hasarlarda çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanılarak baraj işletmeye açılmış ve uzun yıllardan bu yana onarılan yerlerde herhangi bir problem gözlenmemiştir, foto-7.3, 7.4

Tablo-7.1 Çelik liflerle güçlendirilmiş betonun kullanıldığı projeler,[38]

PROJE	ÜLKE	KULLANIMI
Libby Barajı	ABD	- Dipsavak Onarımları - Enerji kırıcı havuz onr. - Diğer döşeme onarımları
Dworshak Brj	ABD	- Dipsavak onarımları - Enerji kırıcı havuz onr.
Lucky Peak Brj	ABD	- Sıçratma ucu onarımları
Applegate Brj	ABD	- Kaya yamaçların stblte.
Little Goose Brj	ABD	- Dolusavak saptırıcıları - Kıyı emniyet duvarı - Vinç rayı mahfazası
Bonnevilla Brj	ABD	- Kuyruksuyu eroz.koruması - Kaya yamaçların krnması

McNary Brj	ABD	- Dolusavak saptırıcıları
Kinzua Brj	ABD	- Enerji kırıcı havuz
Lower Monumental Brj ve Kanalı	ABD	- Kıyı emn.kanalı duvarıe - Kıyı emniyet kanalı onr.
Ririe Brj	ABD	- Yamaç koruması - İrtibat galerisi
Old River Structure Brj	ABD	- Enerji kırıcı havuz onarımları
Oxbov Brj	ABD	- Dolusavak onarımları
Mayfield Brj	ABD	- Dalma havuzu onarımları
Alder Brj	ABD	- Dalma havuzu onarımları
Rıza Şah Brj	İran	- Dolusavak onarımları
Pilot Butte Chute Brj	ABD	- Dalma havuzu onarımları - Enerji kırıcıhvz.onarımı

Tarbela Brj	Pakistan	- Dolusvak onarımları - Enerji kırıcıhvz.onarımı
Little Para Brj	Avustralya	- Sıçratma ucu onarımları - Dalma havuzu onarımları
Mississippi Brj	ABD	- Dolusavak ayırma duvarı
Baestaloo Brj	Avustralya	- Dolusavak ayırma duvarı
İtaipu Brj	Brezilya	- Dolusavak onarımlarında
Port Melon Brj	Kanada	- Dolusavak aşınmalarında
Karun Brj	İran	- Dolusavak onarımlarında
Sır Barajı	Türkiye	- Dalma havuzu onarımları - Dolusavak yan duvarları

Sıralanan bu projelerin biri hariç diğerlerinde çelik liflerle güçlendirilmiş beton uygulamasından mükemmel sonuçlar alınmıştır. Kötü sonuç alınan ABD'deki Kinzua Barajındaki başarısızlık ise beton tasarımının iyi yapılamaması ve bunun sonucunda kötü kalitede bir beton üretilmesiyle ilgilidir.



Foto-7.3,7.4 Dipsavak taban betonunda aşınma ve kavitasyon başlangıcı ,(Adıgüzel Barajı)



Listedeki **Libby Barajı** (ABD) ; düşük seviyeli üç adet dikdörtgen çıkışlı dipsavak ve iki gözlü dolusavağı olan 127 m yüksekliğindeki bu beton ağırlık barajda 1974 yılının başlarında dipsavaklardan birinde kavitasyon sonucu meydana gelen büyük bir oyulma türü beton hasarı görülmüştür. Hasar meydana gelmeden önce dipsavak 16 ay boyunca 57 ila 1339 m³/s debileri arasında çalışmış, onaltı aylık kullanımdan sonra ani olarak bir oyulma görülmüş ve bu oyulma neticesinde yaklaşık 30 m³'lük yüksek dayanımlı beton donatı ile birlikte yerinden sökülüştür. Dipsavak duvarlarında ve invert betonunda çelik lifli beton kullanılarak onarım yapılmış ve onarımdan sonra on iki yıl gibi uzun bir hizmet süresi boyunca çelik lifli betonda herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir. Daha sonra diğer iki dipsavakta da benzer oyulmalar meydana gelmiş ve bu hasarlar da yine çelik lifli betonla onarılmıştır. 1978 yılında, adı geçen barajın enerji kırıcı havuzu taban betonunda aşınma ve oyulma başlangıcı meydana gelmiş ve döşemenin donatıları yer yer sökülerek parçalanmıştır. Bu hasara karşı da enerji kırıcı havuzun yüzeyi çelik liflerle güçlendirilmiş betonla kaplanmıştır. Dolusavağın çalışması ile enerji kırıcı havuz betonunda normal betondaki hasarla karşılaştırılmayacak kadar küçük ve onarım gerektirmeyen aşınma türü hasarlar meydana gelmiştir. Bu ise daha sonra çelik lifli betona polimer emdirilerek onarılmıştır. Enerji kırıcı havuzda meydana gelen aşınma türündeki bu hasar, rezervuarda bulunan granüler malzemenin yüksek hızda suyla akması sonucu ortaya çıkmıştır.

Dworshok Barajının (ABD) dipsavak ve enerji kırıcı havuzunda kavitasyon sonucu meydana gelen oyulma çelik lifli beton ve polimer kullanılarak onarılmıştır. Dipsavaktaki hasar makro türbülans, enerji kırıcı havuzdaki hasar da esas olarak birikmiş döküntüler, beton üzerinde kalan donatı artıkları ve ırmak çakılları gibi materyaller nedeniyle ortaya çıkmıştır. Projenin hem lifli beton ve hem de polimer emdirilmiş bölümlerinde, onarımdan günümüze kadar (1992), döküntülerin tekrar birikip suyla taşınmasına rağmen herhangi bir bozulma görülmemiştir. Derzlerde bazı küçük aşınmalar oluşmuşsa da bunlar tamir gerektirecek boyutta görülmemiştir.

Pakistan'daki **Tarbela Barajında** proje tamamlandıktan kısa bir süre sonra 1974 yılında rezervuarın taşma tehlikesi söz konusu olunca dolusavak tam kapasite ile çalıştırılmış ve bu çalışma sonrasında enerji kırıcı havuzda **24 m derinliğinde oyulma** türü bir meydana gelmiştir. Hasar, başlangıçta yüksek dayanımlı betonla onarılmaya çalışılmışsa da dolusavağın birgün çalışması sonucu bu bölgede tekrar aynı ölçülerde bir oyulmanın ortaya çıktığı görülmüştür. Bunun üzerine hasarlı bölge çelik lifli betonla onarılmış ve olası hasarlara karşı da tüm döşeme çelik lifli betonla bir tabaka halinde kaplanmıştır. Bugüne kadar, yapılan bu onarım ve kaplamada herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

Baraj mansabına yüksek hızlarla deşarj edilen debilerde ortaya çıkan aşırı azotun ve bunu izleyen balık ölümlerinin giderilmesi için ABD'de Snake ve Colombia nehirleri üzerinde

yer alan **Lower Monimental, Little Goose ve McNary Barajlarının** dolusavaklarına Corps of Engineers tarafından yatay saptırıcılar yerleştirilmiştir. Normal beton üzerine bir tabaka çelik liflerle güçlendirilmiş beton kaplamasının yapılması ile inşa edilen saptırıcıların tümünde, bazıları rekor seviyede akışa maruz kalmasına rağmen bugüne kadar herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir.

Yukarıda bahsedildiği üzere ABD'deki **Kinzua Barajının** enerji kırıcı havuzunda meydana gelen oyulmalar çelik liflerle güçlendirilmiş betonla onarılmış ve ancak onarım başarılı olamamıştır. Kinzua projesindeki başarısızlık beton tasarımının iyi yapılmaması, onarımı yapacak personelin bilgi ve deneyim açısından yetersiz oluşu, kullanılan beton bileşenlerinin kalitesiz olması gibi nedenlerden kaynaklanmıştır. Yapılan incelemelerde oyuğun doldurulmasında kullanılan taze betona ait özelliklerin de olumsuz olduğu, betonun iyi yerleştirilemediği, hava boşluklarının fazlalığı gibi hususlar tespit edilmiştir.

Alder ve Myfield Barajları düşü seviyesi yüksek olan ABD'nin Washington'daki iki barajıdır. Bu barajlarda akım enerjisinin kırılması için dalma havuzlarından yararlanılmaktadır. Adı geçen barajlar işletmeye açıldıktan sonra iki bölmeli enerji kırıcı havuz, akımın dinamik etkisi ve oluşan makro türbülans içerisindeki katı madde hareketlerinin etkileri nedeni ile büyük hasara uğramıştır. Enerji kırıcı havuzlardan herbiri, betonun bir kısmı pompa ile bir kısmı da püskürtme beton ile yerleştirilerek çelik liflerle güçlen-

dirilmiş beton ilen tamir edilmiştir. Onarımların tamamlanmasından kısa bir süre sonra her iki yapı da 50 yıl için beklenen taşkınlara ve havuzların yamaçlarındaki 3-4 m³ 'lük kayaların türbülans içerisindeki darbe yüklerine maruz kalmıştır. 1978 yılının nisan ayında inceleme için dalma havuzlarının suyu boşaltıldığında Alder Barajının yerinde dökme döşemesinde hiçbir hasar oluşmadığı buna karşın Myfield Barajının 38 cm kalınlığındaki döşeme plakalarının kalktığı ve gevşediği tespit edilmiştir. Burada iyi yerleştirememeden ötürü çelik lifli betonun bir alt tabakaya iyi yapışmayıp sıkı bir şekilde kenetlenemediği görülmüştür. Bu durum büyük olasılıkla kaplama altında kaldırma basınçlarının gelişmesine, kenetlemede çatlama ve ayrılmaya neden olmuştur. Bu döşemede herhangi bir beton hasarı izlenememiş fakat iki tabakayı birleştirmesi amacıyla konulan tespit demirlerinin aşağı doğru deformasyona uğradığı tespit edilmiştir. Kısacası bu projede de, çelik liflerle güçlendirilmiş beton; darbe ve kavitasyon kuvvetlerine karşı çok iyi dayanmasına rağmen, kötü yerleştirme, bağlantı ve mekanik kenetlenmenin iyi yapılamaması sonucu kısmende olsa başarısız olmuştur.

Lucky Peak Barajının (ABD) sıçratma ucu yapılarındaki betonda ortaya çıkan, nispeten havuzlardaki hasarlara göre daha küçük olan oyulmalar tespit edilmiştir. Bu hasarlar da uygun bir yöntemle çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanılarak onarılmıştır. Daha sonra dolusavaşın çalıştırılması ile herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir.

Lower Monumental Kanalının su kemerlerinde kavıtasyon ve aşınma sonucu oluşan beton hasarları 1978 yılında taban betonunun üzeri tamamen çelik lifli betonla kaplanarak onarılmıştır. Bu onarım sırasında epoksi harçlar da yer yer kullanılmıştır. Fakat bir yıl kadar sonra epoksi harçla yapılan yerlerin iyi sonuç vermeyerek tekrar bozulduğu görülmüştür..

Idaho'daki **Oxbow Barajı**nın (ABD) dolusavağı, dalga hareketi ve beklenmeyen şiddetli vorteksler sonucu oluşan akım düzensizliklerinin yol açtığı kuvvetler nedeni ile alttan oyularak hasar görmüştür. Bazı bölgelerde dibi kaya temele kadar uzanan 10 m derinliğinde oyulmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Hasar görmüş dolusavak ve doldurulan oyuk betonu üzerine çelik lifli beton uygulaması yapılarak hasarlar onarılmıştır.

ABD'nin Oregon kentindeki, ikinci bir güç santralının eklendiği **Bonneville Barajı**nda, biriken döküntü ve kayaların olası oyulma ve aşındırma hareketine karşı güç santralının aşağısındaki düşü yatağında çelik liflerle güçlendirilmiş beton kullanılmış ve savağın çalışması sonrasında herhangi bir hasar gözlenmemiştir.

Yüksek düşülü **Karun Barajı**nın (İran) dolusavağında, yüksek hızdan ötürü meydana gelen kavıtasyon sonucunda oyulmalar meydana gelmiştir. Onarım için başlangıçta yüksek kaliteli beton ve epoksi uygulaması yapılmışsa da başarısız sonuçlar alınmıştır. Daha sonra yüzlerce küçük onarım ve yama şeklinde çelik liflerle güçlendirilmiş beton uygulaması yapılarak

onarılan dolusavak onarılmıştır.Daha sonra dolusavak çeşitli kereler çalıştırılmasına rağmen günümüze kadar bu yapıda herhangi bir hasar gözlenmemiştir.

YARARLANILAN KAYNAKLAR

1- **Ersoy, H.Y.**, "Liflerle Donatılı Kırılğan Matrisli Kompozitler ve Cam Lifi Donatının Alçı Bağlayıcı-Hafif Agregat Kompozitlerinin Özelliklerine Etkisi" , Makale, İTÜ İnşaat Fakültesi Malzeme Seminerleri, İstanbul, 1985.

2- **Naaman, E.**, "Fiber Reinforcement For Concrete", Concrete International, vol.7-3/1985, 21-25 p

3- **Uyan, M.**, "Lifli Betonların Genel Özellikleri ve Gelişimi", Makale, İTÜ İnşaat Fakültesi Malzeme Seminerleri, İstanbul, 1985.

4- "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Reported by ACI Committee 544-IR-82, Chapter 1

5- **Hannant, D.J.**, Fibre Cements and Fibre Concretes, Chichester, John Wiley and Sons, 1987, 219p

6- **Robins, P.J.**, and Austin, S.A., " Melt Extruded Fiber A New Impetus for Steel Fiber Sprayed Concrete", Development in Fibre Reinforced Cement and Concretes, RILEM Symposium 1986, Sheffield, Vol.1, No.3-9, 8p.

7-**Soruushion, P.**, and **Bayasi, Z.** " Fiber Typh Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete" Technıcay Paper, ACI Materials Journal, March-April 1991, Vol.88, No.2, 129 p

- 8- **Dramix**, "Tunnelling the World", Reference Projecets , 1991 ,60 p, Belgium
- 9- **Kocataşkın**, F., " Yapı Mühendislerine Malzeme Bilimi", İTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayını Sayı: 109, sayfa 26, yıl 1976, İstanbul.
- 10- **Nicholls**, R., " Composite Construction Materials Hand book", Prentice Hall Inc., Eglwood Cliffs, New Jersey, 1976.
- 11- **Ersoy**, U." Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı" Cilt 1,2. basım, 1987,s.24
- 12- **Postacıoğlu**, B.," Yapı Malzemesi Problemleri", 1. basım, 1975,s.10
- 13- "Fiber Reinforced Concrete" CIGB, ICOLD, Bulletin 40a, 1988
- 14- **Bekaert**, "Dramix Steel Fiber for Concrete Reinforcement"
- 15- **Hooghton**, D.L., **Borge**, D.E., **Paxton**, J.H., " Cavitation Resistance of Some Special Concretes", ACI Journal Proceedings, Volume 75, No.12,December 1978, pp.664-667
- 16- Journal of the American Concrete Institute , "Measurement of Properties of Fiber-Reinforced Concrete",ACI No.544 Committe Report. July 1978, No.7, Proceedings Volume 75,pp.283-289.
- 17- **Schrader**, E.K.,"Studies in the Behavior of Fiber-Reinforced Contrete", Masters Thesis,Clarckston College of Techonology,Postdam,N.Y.,April 1981,pp.112-120

18- **Hooghtun, D.L., Borge, O.E., Paxton, J.H.**, "Cavitation Resistance of Some Special Concretes", ACI Journal Proceedings, Volume 75, No.12, December 1978, pp.664-667

19- **Rice, J.L.**, "Fibroos Concrete Pavement Design Summary", U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Lab., Report M-134, June 1975

20- Journal of Fiber-Reinforced Concrete Institute "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete" ACI No.544 Committee Report. December 1988, No.6, Vol.85, pp.583-593

21- **Bayasi, Z., Soroushian, P.**, " Effect of steel Fiber Reinforcement on Fresh Mix Properties of Concrete", Technical Paper, ACI Materials Journal, Vol.89, No.4, July-August.1992

22- **Uyan, M., Yıldırım, H., Eryaman, A.**, " Workability and Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete Cast With Normal plasticizers" , İTÜ, Building Materials Department, Istanbul

23- **Soroushian, P., Bayasi, Z.**, " Fiber type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete" ACI Materials Journal, Technical Paper, March-April 1991, Vol.88, No.2, pp.129-134

24- **Johnston, C.D.**, " Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fibre Reinforced Concrete" , Cement, Concrete and Aggregates, ASTM, V.4, No.2, Winter 1982, pp.53-60

25- **Barr, B.I.G., Liv, K. and Dowers, R.C.**, " A Toughness Index Measure the Energy Absorption of Fibre Reinforced Concrete ", Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.4, No.4, 1982, pp.221-227

26- **Vellore S.G., Surendra P.S., Gordon B.B., Marvin E.C, Ramakrishnan V., and Wecharatana M.,**" Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete" ACI Materials Journal, Technical Paper, July-Augst 1991, Vol.88,No.4,pp.339-353

27- **P. Balaguru, R.,Narahari, M. Patel,**" Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Technical Paper, November-December 1992, Vol.89,No.6,pp.541-546

28- **Robert,J.W., Victor,C.L.,** " Dependence of Flexural Behavior of Fiber Reinforced Mortar on Material Fracture Resistance and Beam Size", ACI Materials Journal, Technical Paper, November-December 1990, Vol.87, No.6,pp.627-637

29- **Ezeldin,S.A.,Lowe,R.S,**" Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Rapid-Set Materials ", ACI Materials Journal, Technical Paper, July-Augst 1991, Vol.88,No.4,pp.384-389

30- **Sorooshian P., Lee,C.D.,**" Tensile Strenght of Steel Fiber Reinforced Concrete: Correlation With Some Measures of Fiber Spacing" ,ACI Materials Journal, Technical Paper, November-December 1990, Vol.87, No.6,pp.541-546

31- **Özbek T.,**" Dolusavak Boşaltım Kanallarında Kavitasyon", DSİ Teknik Bülteni 1989, sayı 68, s.67-80

32-**Demiröz E.,**"Dolusavakların Boşaltım Kanallarındaki Büyük Hızlı Akımlar İçin Kullanılan Havalandırıcıların Bazı Proje Kriterleri",Tübitak Mühendislik Araştırma Grubu,Proje No:606,Ankara,1985

33-**Demiröz E.**, "Su Yapılarında Kavitasyon", DSİ TAKK, Yayın No:Hİ-711, Ankara, 1980

34-**Demiröz E.**, "Dolusavakların Boşaltım Kanallı Havalandırması İçin Yapıya İlave Edilen Havalandırıcılara Ait Proje Kriterlerinin Belirlenmesi", DSİ TAKK, Yayın No:Hİ-754, Ankara, 1986

35-**Chern J.C., Young C.H.**, " Study of Factors Influencing Drying shrinkage of Steel Fiber Reinforced Contrece", ACI Materials Journal, Technical Paper, March - April 1990, Vol. 87, No.2, pp. 123-129

36- **Grzybowski M., Shah S.P.**, " Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete" ACI Materials Journal, Technical Paper, March -April 1990, Vol.87, No.2, pp. 138-148

37- **Mangat, P.S., Azari M.M.**, " Plactic shrinkage of steel fibre reinforced concrete ", RILEM, Meterials and Structures Journal, Technihal Paper, May 1990, Vol. 23, No.135, pp.186-195

38- " State of The Art Report on Fiber Reinforced Concrete ", Reported by USCOLD Concrete Committe, June 1981

39- **Ersoy, H.Y.**, " Liflerle Donatılı Kırılğan Matrisli Kompozitler ve Cam Lifli Donatın Alçı Bağlayıcı - Hafif Agrega Kompozitlerinin Özelliklerine Etkisi ", Teknik Makale, İTÜ Malzeme Seminerleri, 1985

40- TS 10514, " Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları ", Aralık 1992

41- **Hooghton, D.L.**, " Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete ", ACI Journal Proceedings, Vol.73, No. 12, December 1976, pp. 691-700

42- **Krenchel, H.**, " Fibre Spacing and Specific Fibre Surface ", Fibre Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium Proceedings, 1975.

43- **Morgan, D.R.** and **Sherril F.A.**, " Recent Developments in Wet and Dry Process Shotcrete ", 1988 World of Concrete, Seminar 8-21

44-**Morgan, D.R.** and **Mowat, D.N.**, " A Comparative Evaluation of Plain Mesh and Steel Fiber Reinforced Shotcrete" Hardy Associates, International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, Detroit, September, 1982

45- **Henry T. Falvey**, " USBR, Cavitation in Chutes and Spillways ", Engineering Monograph, No.47, April, 1990, Denver, Colorado

46- **Volkart, P.** and **Rutschmann, P.**, " Air entrained devices" Hydrologie und Gaziologie No.72, Zurich, 1984

47- **Kuzum, L.**, **Kocabeyler, F.**, "Adıgüzel Barajı Derivasyon ve Dipsavak Tünellerinde görülen hasarlar, nedenleri ve onarım yöntemleri", Ankara, 1994.

