

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇELİK LİF KATKISININ TEKRARLI YÜK ETKİSİNDEKİ GELENEKSEL VE
YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME KOLONLARIN DAVRANIŞLARINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. İsmail SEKBAN

EYLÜL 2007

TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇELİK LİF KATKISININ TEKRARLI YÜK ETKİSİNDEKİ GELENEKSEL VE
YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME KOLONLARIN DAVRANIŞLARINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İnş. Müh. İsmail SEKBAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İnşaat Yüksek Mühendisi"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.08.07
Tezin Savunma Tarihi : 21.09.07**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Metin HÜSEM

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Selim PUL

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Hasan KOLAYLI

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007

ÖNSÖZ

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

“Çelik Lif Katkısının Tekrarlı Yük Etkisindeki Geleneksel ve Yüksek Performanslı Betonarme Kolonların Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi” isimli bu çalışmayı bana öneren ve çalışma süresince bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Metin HÜSEM' e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım sırasında, deney düzeneğinin hazırlanmasından deneylerin sonuçlanmasına kadar her aşamada yardımlarını esirgemeyen görüş ve önerilerinden faydalandığım değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selim PUL' a en samimi saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca kaynak araştırmalarım sırasında sınırsızca kaynak göndererek yardımcı olan Beksa Dramix Çelik Kord Sanayi Teknik Müdürü Sayın Mehmet YERLİKAYA' ya deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. S. Emre GÖRKEM' e ve Öğr. Gör. Ercan YOZGAT' a deneylerim sırasında yardımcı olan değerli arkadaşım İnş. Müh. Arif YANIK'a ve Arş. Gör. M. Emin ARSLAN'a ayrıca çevirilerimde ve diğer çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen tüm arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Öğretim hayatım boyunca beni destekleyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip anneme ithaf olunur.

İsmail SEKBAN

Trabzon 2007

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Geleneksel Betonlar Hakkında Genel Bilgiler	1
1.2. Yüksek Performanslı Betonlar Hakkında Genel Bilgiler	2
1.2.1. Yüksek Performanslı Betonların Tanımı ve Özellikleri.....	2
1.2.2. Yüksek Performanslı Betonların Gelişimi ve Uygulama Alanları	4
1.2.3. Yüksek Performanslı Betonlar Üzerinde Daha Önce Yapılan Bazı Çalışmalar	6
1.3. Lifli Betonlar Hakkında Genel Bilgiler	8
1.3.1. Lifin Donatı Malzemesi Olarak Kullanımının Tarihçesi.....	10
1.3.2. Betonlarda Kullanılan Lifler ve Özellikleri.....	12
1.3.3. Lifli Beton Karışım Esasları ve Üretim Yöntemleri.....	14
1.3.4. Lifli Beton Özelliklerine Bilişimindeki Parametrelerin Etkisi	15
1.3.4.1. Lif Miktarı ve Görünüm Oranının Etkisi.....	15
1.3.4.2. Lif Tipinin Etkisi	16
1.3.4.3. Çimento ve Agrega Etkisi	17
1.3.4.4. Mineral Katkı Maddesinin Etkisi	18
1.3.4.5. Matris Etkisi	18
1.3.5. Lifli Betonlar ile Geleneksel Donatılı Betonların Karşılaştırılması	19
1.3.5.1. Geleneksel Betonun Yük Altındaki Davranışı	23
1.3.5.2. Lifli Betonların Yük Altındaki Davranışı.....	26
1.4. Çelik Lifler	27
1.4.1. Çelik Liflerin Tanımı.....	27

1.4.2.	Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı	28
1.5	Çelik Lifli Betonlar.....	31
1.5.1.	Çelik Lifli Betonun Özellikleri.....	32
1.5.2.	Çelik Lifli Betonların Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar	35
1.5.3.	Çelik Lifli Betonların Kullanım Alanları	38
1.5.4.	Çelik Lifli Betonun Mekanik Özellikleri.....	40
1.5.4.1.	Çelik Lifli Taze Betonun Özellikleri	40
1.5.4.1.1.	İşlenebilirlik ve Kıvam	44
1.5.4.1.2.	Tasarım ve Karışım Esasları.....	46
1.5.4.2.	Çelik Lifli Sertleşmiş Betonun Özellikleri	47
1.5.4.2.1.	Çelik Lifli Betonlarda Basınç Dayanımı	48
1.5.4.2.2.	Çelik Lifli Betonlarda Çekme Dayanımı.....	51
1.5.4.2.3.	Çelik Lifli Betonlarda Eğilme Dayanımı.....	53
1.5.4.2.4.	Çelik Lifli Betonlarda Tokluk	56
1.5.4.2.5.	Çelik Lifli Betonlarda Yorulma Dayanımı	62
1.5.4.2.6.	Çelik Lifli Betonlarda Darbe Dayanımı	64
1.5.4.2.7.	Çelik Lifli Betonlarda Rötire	70
1.5.4.2.8.	Çelik Lifli Betonlarda Dayanıklılık.....	72
1.5.4.2.9.	Çelik Lifli Betonlarda Donma Çözülme Dayanımı	73
1.6.	Betonarme Kolonlar Hakkında Genel Bilgiler	74
1.6.1.	Kolon Türleri ve Kolonların Davranışları	75
1.6.2.	Kolonların Yatay Yükler Altındaki Davranışı	77
1.6.3.	Sınır Durumlar	79
1.6.4.	Rijitlik, Dayanım ve Süneklik	80
1.7.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	82
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	83
2.1.	Geleneksel ve Yüksek Performanslı Betonların Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	83
2.1.1.	Agrega Özellikleri	83
2.1.2.	Çimento ve Katkı Maddelerinin Özellikleri	86
2.1.3.	Lifli Beton Üretiminde Kullanılan Lifler	86
2.1.4.	Kolon Üretiminde Kullanılan Donatıların Özellikleri.....	88
2.2.	Deney Numunelerinin Özellikleri ve Deney Programı	89

2.3.	Geleneksel ve Yüksek Performanslı Kolonların Üretimi.....	92
2.4.	Deney Düzeneginin Hazırlanması.....	96
3.	BULGULAR VE İRDEMELER.....	103
3.1.	Üretilen Betonların Özellikleri.....	103
4.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	111
5.	KAYNAKLAR.....	113
	ÖZGEÇMİŞ.....	120

ÖZET

Betonarme sistemlerin deprem yüklerini güvenli bir şekilde aktarırken rijit olmalarının yanı sıra bu yüklerin bir kısmını sönmüleyebilmeleri için sünek olmaları da istenir.

Betonarme taşıyıcı sistemlerin önemli elemanı olan kolonların düşey yükler altındaki davranışları elverişli olmasına rağmen, yatay yükler altındaki davranışları çoğu zaman yeterli olmayabilmektedir. Bunun yanı sıra bir yapının yeterli yatay yer değiştirme rijitliğine sahip olmaması, özellikle kuvvetli deprem etkileri altında büyük görelî kat ötelenmelerinin meydana gelmesine, buda kolon uç noktalarında önemli büyüklükte ikinci mertebe momentlerin oluşmasına yol açmaktadır.

Bilindiği gibi beton; yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi bakımından zayıf bir malzemedir. Betonun elverişli olmayan bu mekanik özelliklerinin iyileştirebilmek amacı ile beton içerisine çelik liflerin katılması en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Sağladığı faydalar da dikkate alındığında, beton ve betonarme yapılarda çelik liflerin beton içerisindeki davranışının bilinmesi oldukça önemlidir. Konu ile ilgili son yıllarda birçok araştırma yapılmasına rağmen yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Betonarme kolonların yapımında kullanılan betona çelik lif katkısının kolonların tekrarlı yatay yük taşıma kapasitesine sağlayacağı katkının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup, ikinci bölüm çalışmanın amacına uygun olarak çelik lif katkılı betonarme kolonların üretimini kapsamaktadır. Üçüncü bölüm, üretilen betonarme kolonlar üzerinde yapılan tekrarlı yüklemelere ait deneylerden elde edilen bulguların karşılaştırmalı olarak irdelenmesinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmanın bütününden çıkarılabilecek sonuç ve öneriler dördüncü bölümde özetlenmekte ve bu bölümü kaynaklar dizini izlemektedir.

Elde edilen sonuçlar, çelik lif katkısının geleneksel betonarme kolonların yatay yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını, yüksek performanslı betonarme kolonlarda bu artışın çok az olduğunu, hem geleneksel hem de yüksek performanslı betonarme kolonlarda kolon uç noktalarındaki yerdeğiştirme kapasitelerini önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kolon, Çelik Lif, Tekrarlı Yükler

SUMMARY

Investigation of Effect of Steel Fiber Contribution on the Behaviors of Ordinary and High Performance Reinforced Concrete Columns under Effect of Cyclic Loads

The reinforced concrete systems while transmitting the earthquake loads in safety, is expected to be ductile as well as rigid in order to damp these loads.

Although the behaviors of columns, important elements of the reinforced concrete systems, under the vertical loads are convenient, the behaviors of the under horizontal loads are generally not enough. In addition, if a construction doesn't have enough horizontal displacement rigidity, it will cause big relative displacements under earthquake reactions and this will also cause to happen second order moments in the extremity points of the columns.

As is known, concrete is a not strong material in point of fatigue resistance, abrasion resistance, pulling resistance, and toughness capacity. Adding steel fibers inside of unset concrete to heal unsuitable mechanical features of the concrete is one of the most used methods.

This study consists of four parts, which was carried out to examine the contribution which steel fiber additions to concrete used in construction of concrete column give to the cyclic horizontal load carrying capacity of column. First section is general information, the second section is about the production of steel fiber added columns according to the aim of the study. Third section consists of the comparison of the results of the experiments which were done on the reinforced concrete columns under the cyclic loads. All of the results and the suggestions about this study are summarized in the fourth section and the reference list follows this.

The results of the experiments shows that the steel fiber addition increases importantly the horizontal load carrying capacity of the traditional reinforced concrete columns which are cyclic loaded, and this increase is slightly in the high performance reinforced concrete columns, and it also increases the capacity of displacement in the extremity points of both traditional and high performance reinforced concrete columns.

Key Words: RC Column, Steel Fiber, Cyclic Loads

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek performanslı betonlarda gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.....	3
Şekil 2.	Değişik tipteki lifli betonların çekme etkisi altındaki davranışları	14
Şekil 3.	Betonda 1, 2 ve 3-boyutta donatı dağılımları	20
Şekil 4.	Lifli betonlarda tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	21
Şekil 5.	Geleneksel betonun yük altındaki gerilme-birim deformasyon eğrisi.....	23
Şekil 6.	Normal ve lifli betonun yük altındaki davranışı.....	25
Şekil 7.	Çelik lifli betonların üretiminde kullanılan çelik lif çeşitleri	28
Şekil 8.	Çelik lifli betonlarda gerilme aktarımı	30
Şekil 9.	Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi.....	31
Şekil 10.	Lifli ve normal beton kirişlerde çatlak genişliğinin yük ile değişimi.....	35
Şekil 11.	Çelik lifli ve lifsiz betonlarda ters koni yöntemi ile yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının karşılaştırılması	42
Şekil 12.	Lif şekli ve lif görünüm oranına göre işlenebilirliğin değişimi.....	43
Şekil 13.	Lif hacmi ve lif görünüm oranı artışı ile işlenebilirlikteki azalmalar.....	45
Şekil 14.	Slump - Ve-Be deneyleri ve ters çevrilmiş koni -Ve-Be deneyleri arasındaki ilişki	46
Şekil 15.	Basınç dayanımını etkileyen lif yönlenmesi.....	49
Şekil 16.	Basınç dayanımına V_f ve l/d nin etkisi	50
Şekil 17.	Farklı şekillerde, % 1,73 lif içeren harçların çekmede gerilme - şekil değiştirme eğrileri.....	52
Şekil 18.	Çelik lifli betonda tipik eğilmeye yük-deplasman eğrisi.....	55
Şekil 19.	Çelik lifli betonda yük deplasman eğrisi ve I_5 , I_{10} , ve I_{30} indekslerini için tanımlanmış alanlar	58
Şekil 20.	Eğilme tokluğuna V_f ve l/d nin etkisi	62
Şekil 21.	Çelik lifli betonlarda lif görünüm oranının ve lif içeriğinin kırılma enerjisine etkisi	67
Şekil 22.	Ucu kancalı çelik liflerin hacim değişiminin betonun rötresi üzerine etkisi	72
Şekil 23.	Beton üretiminde kullanılan agregaların tane dağılımı.....	84
Şekil 24.	Deney de kullanılan Dramix ZP 305 çelik lifler.....	87

Şekil 25.	Kullanılan Dramix ZP 305 tipi liflere ait ölçülendirme	87
Şekil 26.	600 kN kapasiteli losenhauwerk marka UHP 60 tipi üniversal deney aleti	89
Şekil 27.	Üretilen kolonların boyutları ve donatı şemaları	90
Şekil 28.	Deneylerde kullanılmak amacı ile üretilen betonarme kolonların ait ölçülendirme	90
Şekil 29.	Betonarme kolon donatı ve kalıpları	91
Şekil 30.	Betonların üretiminde kullanılan 80 dm ³ kapasiteli eğik eksenli betonyer	93
Şekil 31.	Deneyde kullanılan 2800 devir/dakika frekanslı sarsma tablası	94
Şekil 32.	Üretilen kolonlar ve standart silindir numuneler	94
Şekil 33.	Çelik liflerin betona ilave edilişi	95
Şekil 34.	Yapılan deneylerde kullanılmak üzere üretilen betonarme kolonlar	96
Şekil 35.	Üretilen kolon temel sistemine ait ölçülendirme	97
Şekil 36.	Kolonların yerleştirildiği temel sistemi	97
Şekil 37.	Deney düzeneği	98
Şekil 38.	Üretilen kolon temel sistemleri	99
Şekil 39.	DeneySEL çalışmalarında kullanılan manüel yükleme pistonu	100
Şekil 40.	Deneyler için hazırlanmış deney düzeneğinden görüntü	100
Şekil 41.	Deneylerde kullanılan veri toplama aparatları	101
Şekil 42.	HSC- 3'e ait deney görüntüsü	102
Şekil 43.	HSC-4'e ait deney görüntüsü	102
Şekil 44.	3000 kN' luk WP 300 tipi merkezi basınç aleti	104
Şekil 45.	Geleneksel betonarme kolonlara ait kırılma şekilleri	106
Şekil 46.	Yüksek performanslı betonarme kolonlara ait kırılma şekilleri	108
Şekil 47.	Geleneksel betonarme kolonlara ait tipik yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi ..	109
Şekil 48.	Yüksek performanslı betonarme kolonlara ait tipik yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi	110

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Beton basınç dayanımının yıllara göre değişimi	5
Tablo 2.	Lif çeşitleri ve bu liflere ait bazı mekanik özellikler	13
Tablo 3.	Lifli betonlarda geleneksel betonlara kıyasla mekanik özelliklerde meydana gelen artışlar	22
Tablo 4.	Çelik lifli betonda bulunması gereken ince malzeme miktarı	37
Tablo 5.	TS.10514'e göre betona ilave edilebilen maksimum tel miktarı	37
Tablo 6.	Donatısız ve lifli numunelerden elde edilen çekme dayanımı değerleri	53
Tablo 7.	Tokluk indekslerinin değerlendirme kriterleri	58
Tablo 8.	Etriyesiz, etriyeli ve lifli bileşimlerin enerji yutma kapasiteleri	60
Tablo 9.	Değişik narinlik ve lif içeriğine bağlı olarak numunenin dayanabileceği darbe sayısı	65
Tablo 10.	Artan lif sayısı ile birlikte kırılma darbe sayıları	69
Tablo 11.	Aderans dayanımları ile kırılma enerji değerleri	70
Tablo 12.	Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	83
Tablo 13.	Beton üretiminde kullanılan agregaların granülometrik birleşimi	84
Tablo 14.	Beton üretiminde kullanılan çimentonun bazı özellikleri	86
Tablo 15.	Çelik lifli kolonların üretiminde kullanılan çelik liflerin bazı özellikleri	87
Tablo 16.	Donatıların bazı mekanik özellikleri	88
Tablo 17.	Üretilen kolonların boyut, donatı ve lif miktarları	91
Tablo 18.	Yüksek performanslı betonlar için beton bileşimi	92
Tablo 19.	Geleneksel betonlar için beton bileşimi	92
Tablo 20.	Standart silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi sonuçları	104
Tablo 21.	Elde edilen maksimum yükler ile bu yüke karşılık gelen maksimum moment ve yerdeğiştirmeler	105

SEMBOLLER DİZİNİ

d	: Lif çapı
E	: Elastisite modülü
k	: Kolonun yatay yerdeğiştirme rijitliği
L	: Kolonun yüksekliği
P	: Yük
s	: Lif aralığı
W	: Deformasyon işi
D_{\max}	: Maksimum dane çapı
G_f	: Normal betonlarda kırılma enerjisi
k_c	: Çatlamış kolonun yatay yerdeğiştirme rijitliği
l	: Lif uzunluğu
l_c	: Kritik lif uzunluğu
V_f	: Bir lif elemanın hacmi
W_c	: Yerine yerleştirilmiş bir metreküp betondaki çimento kütlesi
W_a	: Agrega kütlesi
V_w	: Su hacmi
V_h	: Hava kütlesi
β_i	: Her bir tane sınıfının kütlece oranı
γ_a	: Agreganın doymuş kuru yüzeyli özgül kütlesi
γ_{ai}	: Her bir tane sınıfının birim kütlesi
ε	: Birim kısalma
ε_c	: Kırılma noktasındaki birim kısalma
ρ	: Matristeki hacim olarak lif yüzdesi
σ	: Gerilme
σ_f	: Lif dayanımı
ν_b	: Ara yüzey aderans gerilmesi
Φ	: Donatı çapı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Geleneksel Betonlar Hakkında Genel Bilgiler

Değişik türlerdeki yapılarda kullanılmakta olan betonların üzerine farklı yönlerde etki eden statik ve dinamik yükler gelmektedir. Betonun bu yükleri taşıyabilmesi için belirli bir dayanıma sahip olması gerekmektedir. Bu yükler etkisiyle betonda şekildeğişiklikler meydana gelmektedir. Eğer beton üzerine gelen yüklerin büyüklüğü, betonun bu yüklerle karşı koyma kapasitesini aşarsa çok büyük şekil değişiklikler meydana gelerek beton taşıma gücünü kaybetmektedir.

Betonun üzerine farklı yönlerde uygulanan yükler, değişik etkiler yaratmaktadır. Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekildeğişikliğe ve kırılmaya karşı gösterebileceği dayanma kabiliyeti, sırasıyla basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yüklerin etkisi altında betonun şekildeğişiklik ve kırılmaya karşı göstereceği direnme dayanımına ise yorulma dayanımı adı verilmektedir.

Betonun kullanılacağı yapının tasarımı yapılırken, betonun üzerine gelebilecek değişik türlerdeki yüklerin büyüklükleri göz önünde tutulmakta ve üretilecek betonun bu yüklerle karşı dayanım gösterebileceği varsayılmaktadır. Üretilecek betondaki dayanım değerlerinin hesapta kullanılan dayanım değerlerinden az olmaması gerekmektedir.

Sertleşmiş betonun belirli dayanımının olmasının yanı sıra, yeterli dayanıklılığı göstermesi gibi diğer bazı özelliklere de sahip olması gerekir.

Betonun kullanıldığı yapılar genellikle; basınç, çekme, eğilme ve kayma yaratacak kuvvetlerin doğrudan etkisi altındadır. Bu nedenle betonun yukarıda sözü edilen etkilere karşı dayanımlarının bilinmesi, beton yapıların bu yükler altındaki taşıma kapasitelerinin bilinmesi için önemlidir [1].

Bilindiği üzere beton; yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, çekme dayanımı, çatlama sonrası yük taşıma ve enerji emme kapasitesi bakımından zayıf bir malzemedir. Betonun elverişli olmayan bu mekanik özelliklerinin iyileştirebilmek amacı ile beton içerisine geleneksel donatıdan farklı olarak çelik lif katılması en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Normal beton içerisine değişik oranlarda ve belli özelliklerde çelik tellerin

katılması ile elde edilen lifli beton, teorik olarak geleneksel betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını arttırdığı yapılan birçok çalışmayla ispaylanmıştır [2].

1.2. Yüksek Performanslı Betonlar Hakkında Genel Bilgiler

1.2.1. Yüksek Performanslı Betonların Tanımı ve Özellikleri

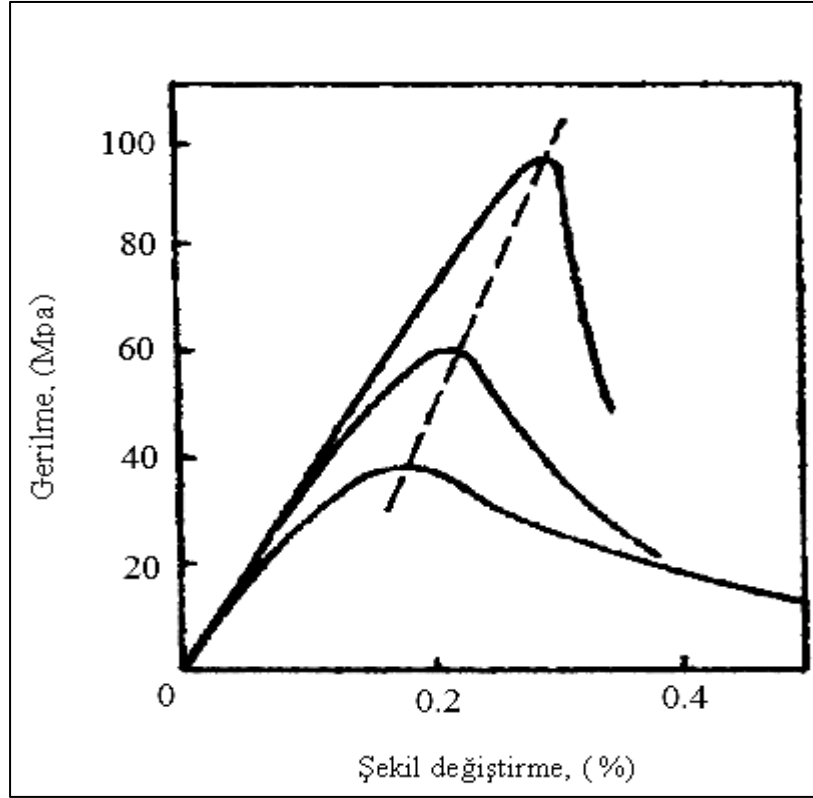
Yüksek performanslı beton tanımı zamana, betonun kullanıldığı bölgeye ve yaygın olarak üretim teknolojisine göre değişmektedir. Başka bir deyişle yüksek performanslı betonlar Türkiye' de bu gün için 28 günlük standart silindir beton numunelerinin karakteristik basınç dayanımı 50 MPa'dan büyük betonlar olarak tanımlanmaktadır [3]. Bununla birlikte, her ülkenin yapı şartnamelerinde bulunan beton basınç sınırlarının üzerindeki betonlar "yüksek performanslı beton" olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, CEB/FIB (Committee Euro-International de Beton / Federation internationale du Beton), yüksek dayanımlı beton için minimum 60 MPa'lık maksimum 130 MPa'lık silindir basınç dayanımı öngörmektedir [4]. TS 500 [3]' e göre 2000 yılına kadar 30 MPa 'nın üzerindeki betonlar yüksek performanslı beton sınıfına girerken, 2000 yılında revize edilen standarda göre [5], 50 MPa'nın üzerindeki betonlar yüksek performanslı betonlar sınıfına girmektedir.

Son yıllarda yüksek performanslı betonların üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili konularda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Yüksek performanslı betonlar, yüksek dayanımlarının yanında üstün durabiliteye sahip betonlardır. Ancak, bu malzemeler normal betona göre daha gevrek davranış göstermektedirler. Bu gevrek davranışı gidermek ve betonun tokluğunu arttırmak amacı ile bu betonların içerisine çelik liflerin katılması uygun olmaktadır. Yüksek performanslı betonların potansiyel kullanımları henüz yaygın olarak oluşmamakla birlikte özellikle uzun dönem özelliklerini belirlemek için daha fazla bilimsel çalışmaya ihtiyaç vardır [6].

Yüksek performanslı beton durabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Bununla birlikte yüksek performanslı beton için çeşitli tanımlar yapılmıştır. Bunlardan biri merkezi Amerika da buluna stratejik otoyol araştırma programının (SHRP,1991) yapmış olduğu tanımdır. SHRP'nin tanımına göre yüksek performanslı beton, dayanımı, durabilitesi ve su/bağlayıcı oranı bakımından tanımlanabilir [7]. Buna göre:

- a) Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı ≥ 17.5 MPa; çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa; çok yüksek dayanımlı beton 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa,
- b) Durabilite çarpanı $\geq \%80$ (300 donma - çözünme tekrarından sonra),
- c) Su / bağlayıcı oranı ≤ 0.35 .

Yüksek performanslı betonların farkı yükleme koşullarında, dayanımlar arttıkça gerilme – şekil değiştirme eğrilerinin tepe noktalarındaki şekil değiştirme de artmaktadır. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek performanslı betonlarda gerilme – şekil değiştirme eğrisi

Şekil 1’den de görüleceği gibi tepe noktasına kadar yüksek dayanıma sahip betonun eğriliği hemen hemen lineerdir. Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta, tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve beton

ani olarak kırılmaktadır. Yüksek performanslı betonlarda en yüksek gerilemeye kadar yutulan bağıl enerji normal dayanımlı betonlara göre daha düşük olmaktadır [8].

Geleneksel betonlarda olduğu gibi yüksek performanslı betonların da gerilme-şekildeğiştirme eğrisini analitik olarak tanımlayabilmek için, birçok deneysel ve teorik araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların bir kısmında, gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin yükselen ve alçalan kolları ayrı ayrı bağıntılarla, bir kısmında ise gerilme – şekil değiştirme eğrisi tek bir bağıntıyla ifade edilmiştir. Beton dayanımını etkileyen tüm parametrelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrisini de etkilediği bilinmektedir [9].

Yüksek performanslı betonlar üzerinde gerçekleştirilen değişik araştırmalar, dayanımın arttıkça gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin şeklinin önemli derecede değiştiğini göstermiştir. Örneğin, geleneksel betonlarda gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin yükselen kolu dayanımın %40'ına kadar çıkabilirken yüksek performanslı betonlarda yükselen kolun doğrusallığı dayanımın %80 - %90' ına kadar ulaşabilmektedir. Yine beton dayanımındaki artışla beraber gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin alçalan kolunun eğimi de artmaktadır. Geleneksel betonun maksimum basınç dayanımına karşılık gelen birim kısalma genellikle 0.002 civarındayken yüksek performanslı betonlarda bu değer 0.003 civarında olabilmektedir [10].

1.2.2. Yüksek Performanslı Betonların Gelişimi ve Uygulama Alanları

Son otuz yılda malzeme teknolojisinde gerçekleşen önemli çalışmalar, genel olarak "yüksek performanslı beton" olarak tanımlanan değişik tipte bir betonun ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yüksek performanslı beton yeni bir malzeme olarak düşünülmesine rağmen gelişimi uzun yıllar almıştır. Yüksek performanslı betonun gelişimine paralel olarak tanımı da sürekli olarak değişmiştir. Örneğin, 1950'li yıllarda standart silindir (150 x 300mm boyutlarında) beton numunelerin karakteristik basınç dayanımı 34 MPa olan betonlar "yüksek dayanımlı beton" olarak tanımlanmaktaydı. 1960'lı yıllarda ise Amerika'da 41 ile 52 MPa basınç dayanımına sahip betonlar ticari amaçlı olarak üretilmeye başlanmıştır. 1970'lerin ilk yarısında ise betonların basınç dayanımı ancak 60 MPa'lara kadar ulaşabilmişti. Son 20 yılda malzeme teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak 80MPa -100 MPa arasında değişen yüksek performanslı beton, yekpare, prefabrike ve öngerilmeli beton yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde çok yüksek dayanımlı agregalar

kullanılarak üretilen ve uygun ortamlarda kürü yapılan betonlarda ise 250 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılabilmektedir [11].

Yüksek performanslı betonun dayanımı, teknolojiadaki gelişmeler nedeniyle, yıllara bağlı olarak artmaktadır. Bu artış Tablo 1.'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Beton basınç dayanımının yıllara göre değişimi

Yıl	Beton Basınç Dayanımı (MPa)
1960–1970	40–50
1970–1980	50–70
1980–1990	70–100
1990-	100<

Tablo 1'den de görülebileceği gibi, 1990' lı yıllardan sonra beton basınç dayanımı 100 MPa' yı aşmış, günümüzde ise 250 MPa basınç dayanımına sahip betonlar üretilebilir hale gelmiştir. Ancak, betonarmeye ilişkin bugün yürürlükte bulunan yönetmeliklerdeki projelendirme kriterleri, maksimum basınç dayanımı yaklaşık 50 MPa' a kadar değişen beton dayanımlarının kullanıldığı deney sonuçlarına bağlı olarak belirlenmekte, bu nedenle de basınç dayanımı 50 MPa'yı geçen bütün betonlar yüksek performanslı beton olarak düşünülerek, projelendirmede kullanılan geleneksel beton için önerilen kriterlerin yüksek performanslı betona uygulanmasında geçerliliklerinin incelenmesi gerektiğini belirtmek uygun olmaktadır.

Araştırmacılar, malzeme bilimindeki yeni gelişmeler yardımı ile yüksek performanslı betonlarında daha yüksek mukavemetlere, süneklik eksikliğine karşı daha iyi dayanımlara ulaşılabileceğini, bunun sonucunda açıklıklar, konsol boyları gibi karakteristiklerinin artacağını ve yapıda kullanılacak toplam malzeme miktar ve fiyatının ise azalacağını belirlemişlerdir [12].

Yeni gelişmelerin ışığında beton davranışının daha iyi anlaşılacağı, içinde bulunduğumuz 21. yüzyılda mühendislik yapılarının projelendirilmesinde daha gerçekçi ilkelerin ve çok daha gelişmiş yöntemlerin kullanılabilmesi beklenmektedir. Bu yüzden betonun daha etkin bir biçimde kullanılması oldukça önemlidir. Yüksek dayanımlı betonların reaktörler, açık deniz yapıları, yüksek katlı binalar ve savunma amaçlı depolama

siloları gibi özel yapılarda kullanılması, çatlama davranışında artan bir ilginin oluşmasına neden olmuştur [13].

Larrard ve Malier [14] yüksek performanslı betonların günümüzde, çok yüksek yapılarda, açık deniz platformlarında, köprülerde, kabloları aderanslı ön gerilmeli profiller, Bow-string köprü kemerleri gibi mühendislik yapılarında kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir.

1.2.3. Yüksek Performanslı Betonlar Üzerinde Daha Önce Yapılan Bazı Çalışmalar

Günümüzde hem dünyada hem de ülkemizde yüksek mukavemetli betonlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. TS 500 [5], C50 (28 günlük silindir basınç dayanımı) ye varan beton sınıflarını öngörmekle birlikte TS 11222, C100'e kadar beton sınıflarını hedeflemektedir. Ancak ülkemizde en yaygın kullanılan beton sınıfları C14, C16 ve C20 dir. Yüksek yapılarda ise C30 veya C35 sınıfları kullanılmaktadır. Buna karşın Eurocode 2'de [15] normal beton sınıfları C80'e varmaktadır. Avrupa'da Almanya'nın öncülüğünde C60-C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım kodları geliştirilmektedir. Bu aralıktaki betonlar yüksek dayanımlı olarak kabul edilirler. 1960'lı yıllarda basınç dayanımı bakımından alt sınır 40 MPa olarak tanımlanan yüksek mukavemetli betonun günümüzde 100 Mpa'ya kadar olan betonlar rutin olarak hazır beton tesislerinde üretilmesi mümkün olmaktadır. Yapılan araştırmalarda basınç dayanımı 150 MPa'ı aşan betonların üretildiği bilinmektedir. Ancak 100 MPa'ı aşan dayanıma sahip betonları rutin olarak üretmek hem pratik hem de ekonomik değildir. Böylece çok yüksek dayanımlı betonlar yerine dayanımları bu değerlerin altında örnek olarak CEB-FIB Model Code, 1990 (üst sınır beton sınıfı olarak verilen 80 MPa civarında olan) fakat daha düşük geçirimsizliğe sahip, donma-çözölmeye ve zararlı ortamların etkisine dayanıklı betonları yalnızca önemli yapılarında kullanmak daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Betonun dayanımının yanı sıra, dürabilitesinin de yeterli olması istenir. Geçirimsiz olması istenen bir betonun yeterli dürabiliteye sahip olacağı varsayılır [16].

Son yıllarda yüksek performanslı betonlar üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar şartnamelerin kapsamının genişlemesine ve basınç dayanım sınıfları C 100'ü aşan betonarme yapıların tasarımına neden olmuştur [7,16]. Yüksek performanslı betonlar konusunda, yüksek performanslı betonun çeşitli mekanik özellikleri belirlemek, olumlu ve

olumsuz yönlerini tespit etmek olumlu yönlerini yapı teknolojinde kullanabilmek olumsuz yönlerini geliştirmek amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Kaar, Hanson ve Capell [17] yaptıkları deneysel çalışmalarda normal ağırlıklı ve hafif ağırlıklı agregalarla üretilen yüksek performanslı silindirik beton numunelerin merkezi basınç altında gerilme - şekildeğiştirme eğrileri elde etmişler ve daha sonra dikdörtgen gerilme bloğu sabitleri olan k_1 , k_2 , k_3 parametrelerinin belirlenmesine çalışmışlardır.

Atımtay ve Tuna [18], normal betondan farklı mekanik özelliklere sahip yeni bir yapı malzeme olan yüksek performanslı betonunun davranışına karar verebilmenin yalnız yüksek dayanımına bakılarak mümkün olmayacağı, gerilme-şekil değiştirme diyagramı, Elastisite modülü, çekme dayanımı, yorulma, birim ağırlık, ısı iletkenliği, hidrasyon ısısı, zamanla mukavemet artışı, donmaya karşı dayanımı, rötre ve sünmesi gibi önemli mühendislik özelliklerinin de tüm yönüyle araştırılıp bilinmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Shah ve Ahmad [19] yaptıkları çalışmaların sonucunda, yüksek performanslı betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi için yeni bir matematiksel model önermişlerdir.

ACI Committee 363 [20] tarafından sunulan çalışmada; yüksek performanslı betonun tarihçesi, yüksek performanslı beton için karışım oranları, üretimi, karıştırılması, taşınması, yerleştirilmesi, kür edilmesi, bakımı, merkezi basınç altındaki davranışları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca çalışmada yüksek performanslı betonarme kirişler için kullanılabilir bazı gerilme blokları ve betonarme kiriş kesitinde eğilme etkisi ile oluşabilecek momentin tahmini için kullanılabilir bağıntılar, gerilme blokları için eğilmeye maruz yüksek performanslı betonarme kirişlerde $k_2 / (k_1.k_3)$ ile yüksek performanslı beton basınç dayanımının değişimi konularına da değinilmiştir.

Arıoğlu ve Arıoğlu [21] yaptıkları çalışmada yüksek performanslı betonun yapısal parametrelerini elde etmek üzere bir dizi deney yaparak, yüksek ve çok yüksek performanslı betonun gerilme-şekildeğiştirme karakteristiklerini elde etmişler ve bu sonuçları teorik ifadelerle karşılaştırmışlardır.

Tokuy vd. [22] basınç altında yüksek dayanımlı betonların gerilme birim deformasyon ilişkilerini şu şekilde yorumlamışlardır:

1. Yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-birim deformasyon ilişkisi normal betonlara göre maksimum dayanımın daha yüksek bir yüzdesine kadar doğrusal özellik göstermektedir. Agreg-açimento hamuru ara yüzeyindeki aderansın yüksek dayanımlı

betonlarda daha iyi olması nedeniyle düşük yüklerde mikro çatlakların daha az miktarda olması bu doğrusal ilişkinin başlıca nedenidir.

2. Yüksek dayanımlı betonlarda maksimum gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon normal dayanımlı betonlara göre az bir miktar daha fazladır.

3. Gerilme-birim deformasyon eğrisinin alçalan kısmının eğimi yüksek dayanımlı betonlarda daha diktir.

4. Maksimum birim deformasyon yüksek dayanımlı betonlarda normal betonlara göre daha azdır.

Son iki maddeden anlaşılacağı üzere yüksek dayanımlı betonlar basınç yükleri altında gevrek bir davranış göstermektedirler.

Larrard ve Mailer [14] tarafından yapılan çalışmada yüksek performanslı betonların bileşim prensipleri, taze ve sertleşmiş haldeki davranışları, mikro yapısı, bazı mekanik özellikleri ve bu özellikler için bazı modellemeler verilmiştir.

Ersoy ve Tankut [23] deneysel ve teorik çalışmalarında yüksek performanslı betonun yapısal davranışı üzerine çalışmışlar ve yüksek performanslı betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini, taşıma gücünü ve diğer bazı özelliklerini incelemişlerdir.

Atımtay [18] çok yüksek performanslı beton ile yaygın olarak kullanılan döşeme, kiriş, kolon gibi taşıyıcı elemanlar ve yapı güvenliği hakkında araştırma yapmıştır.

Üzümeri ve Özden [24] yaptıkları çalışmada yüksek performanslı ve geleneksel betonlar arasındaki farkları ortaya koyarak, yüksek performanslı betonda kullanılacak malzemeleri, yüksek performanslı betonun mekanik özelliklerini ve yüksek performanslı beton ile üretilmiş yapı elemanlarının davranışını incelemişlerdir.

Pul [25] yüksek performanslı, geleneksel ve hafif betonlar ile betonarme ve öngerilmeli beton kirişler üzerinde deneysel ve teorik çalışmalarda bulunmuş ve yüksek performanslı, geleneksel ve hafif betonlar ile betonarme ve öngerilmeli kirişlerin özelliklerini ve yapısal davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

1.3. Lifli Betonlar Hakkında Genel Bilgiler

Lifli beton; hidrolik çimento, agrega ve beton içerisinde çoğunlukla süreksiz dağılmış liflerin su ile karıştırılması ile meydana gelen bir beton türüdür. Ayrıca hidrolik çimento ve liflerden oluşan bileşime de “lifli beton” denilmektedir. Fakat matris olarak sadece çimento

hamurunun kullanılmasının hacim kararsızlığı sebebi ile sakıncalı olduğu belirtilmektedir [26].

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenleri ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan betonun içerisine değişik tekniklerle ve değişik oranlarda plastik, karbon, çelik, polipropilen gibi liflerin ilavesiyle elde edilen betona 'lifli beton' denilmektedir [27].

Lifli beton için başka bir tanım ise ACI (Amerikan Concrete Institute) tarafından yapılmıştır. Bu tanıma göre içerisinde aralıklarla dağıtılmış küçük çelik teller bulunan ince veya ince ile kaba agregası ve çimento kullanılarak üretilmiş kompozit bir malzemedir.

Lifler puzolanlar ve normal betona ilave edilen katkı maddeleri ile de ortak olarak kullanılabilir [28,29].

Lifli betonları tanımlayabilmek için birçok tanım yapılmış olmasına rağmen liflerin tanımı tam olarak yapılamamaktadır. Lifleri tanımlayan öğeler lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan lifin çekme gerilmesi, geometrik yapısı ve görünüm oranı gibi özellikleridir [27]. Ancak lifleri tanımlayan en uygun sayısal parametrenin görünüm oranı olduğu belirtilmektedir. Görünüm oranı, lif boyunun lif çapına bölünmesiyle elde edilir. Fakat betonlarda kullanılan liflerin geometrisi her zaman dairesel olmamaktadır. Lif enkesitinin dairesel olmadığı durumlarda, lifin enkesit alanına eşdeğer alana sahip dairenin çapı esas alınarak görünüm oranı belirlenir [28,29,30].

Lifli betonların üretilmesine ihtiyaç duyulmasının sebebi, geleneksel betonun kullanımı sırasında ortaya çıkan zayıf yönlerinin giderilmek istenmesidir. Betona lif katılması ile betonun, tokluğu, sünekliği, darbe dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinde artış sağlanması amaçlanmaktadır.

Geleneksel betonun içerisine doğal veya yapay lif eklenmesi ile oluşturulan lifli betonun görünümü geleneksel beton karışımına benzese de, değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklıdır. Beton, içerisinde meydana gelen farklı gerilmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensiz bir yapıya sahiptir. Beton içerisine katılan lifler, matris fazını takviye ederek beton içerisinde, üzerlerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içerisinde üç boyutlu olarak dağılmış olan liflerin betondaki çatlak sonlarına bitişik olmalarından dolayı lifler, matristeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine çekerek matrisin sağlam bölgelerine aktarırlar [31].

Beton özelliklerini iyileştirmek amacı ile taze beton içerisine, çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda lifler katılmaktadır. ACI 544'e [28] göre lifin tanımı lif boyunun eşdeğer lif çapına bölünmesiyle elde edilen "boy/çap" (aspect ratio) oranı olarak kabul edilmektedir. Bu orana kısaca "narınlik oranı" ya da "görünüm oranı" da denilmektedir.

Bazı liflerin uzunluklarının ve çaplarının farklı değerler alması liflerin demet şeklinde olması nedeniyle liflerde, sadece boy/çap oranına göre sınıflandırma yapmak mümkün olmayabilmektedir.

Lifli betonlarda, beton bileşimine giren parametreler içerisinde beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörler, lifin narınlik oranı ve lif miktarı olduğu birçok araştırmada belirtilmiştir. Genellikle beton karışımlarında kullanılan çelik liflerin narınlik oranı 50 ile 100 arasında değişmektedir. Bu oran ne kadar büyük olursa karışım içerisinde topaklanmanın oluşma ihtimali o kadar artar ve liflerin homojen dağılma ihtimali de o oranda azalır. Aynı zamanda karışıma katılan lif miktarı da betonun işlenebilme özelliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Genellikle beton karışımlarında en uygun lif yüzdeleri betonun toplam hacminin % 0.5'i ile % 2.5'i arasındaki hacim oranlardır. Beton bileşimine katılan liflerin çeşidi ne olursa olsun liflerin homojen olarak dağılması ve beton karıştırıldıktan sonra da bu dağılımın bozulmaması gerekmektedir [32,33].

Lifli betonların en yaygın olarak kullanılan çeşitleri; Cam lifli beton, çelik lifli beton polimer betonu, mika levhalı beton ve plastik lifli betonlardır [33].

Lifli beton literatüründe matris olarak tanımlanan yapı, lifin etrafına saran ortam malzemesidir. Kısaca, çimento hamuru matris olarak tanımlanmaktadır. Lifli betonlarda matrisin işlevi lifleri bir arada tutarak, onları sarmak ve liflerle veya liflerden matrise gerilme transferini sağlamaktır [34].

1.3.1. Lifin Donatı Malzemesi Olarak Kullanımının Tarihçesi

Lifler eski zamanlardan beri kırılğan malzemeleri güçlendirmek için kullanılmaktadır. İnsanların önceleri güneşte kurutulan toprak tuğlaları güçlendirmek için saman, keçi, at gibi hayvanların kıllarını kullandıkları bilinmektedir [28].

Eğilme ve çekme kuvvetlerine maruz yapı malzemelerini güçlendirmek için liflerin kullanımı çok eski zamanlara dayanmaktadır. Günümüzden yaklaşık 3500 yıl öncesi de, Bağdat yakınlarında inşa edilmiş 57 metre yüksekliğindeki "Aqar Quf" kulesinin yapımında güneşte pişirilmiş tuğlalarda saman kullanıldığı bilinmektedir [35].

Arslan ve Aydın'a [29] göre lifli betonların esin kaynağı olan saman takviyeli kil harcı 4500 yıl öncesinden beri yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Fakat yapı malzemelerinin sürekli donatılarla kullanılması, ancak betonarme betonu kadar eskidir. Eski çağlardan beri kullanılan kerpiç malzemesinde, kil hamuru ile birlikte saman ve benzeri bitkisel liflerin bazı sıva uygulamalarında da keten ve kenevir liflerinin ve atkuyruğu, kuş tüyü gibi hayvansal liflerin kullanıldığı bilinmektedir.

Gerçekte lif kullanımı, 1898 yılında Hatschek işleminin bulunmasından sonra asbest liflerinin çimento hamuru ile birlikte kullanılmasıyla yaygınlaşmıştır. Daha sonraları asbest liflerinin insan sağlığı açısından zararlı olduğunun ortaya çıkmasıyla 1960'lı ve 1970'li yıllarda alternatif lif çeşitleri piyasaya sürülmüştür. 1960'ların başlarında Amerika'da çelik liflerin betonda donatı malzemesi olarak kullanımına başlanmıştır [28].

Sovyetler Birliği'nde 1950'lerin sonlarından itibaren, İngiltere'de 1966 yılından itibaren cam lifli donatıların kullanımı, buna uygun matris malzemesinin seçimi ve betonda kullanılacak cam liflerinin özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Özellikle, betonda alkali ortamda tahrip olan liflerin yerine alkali ortama dayanıklı cam liflerinin üretilmesine başlanmıştır. Bu dönemlerde polipropilen, naylon gibi sentetik lifler ve karbon liflerin uygulanabilirliği konusunda çalışmalar yürütülmüştür. Fakat bu liflerin o yılların teknolojisiyle cam lifler ve çelik lifler kadar üretiminin kolay olmaması, buna bağlı olarak maliyetlerinin de yüksek oluşu nedeniyle çelik lifler ve cam lifler bu dönemde önemini korumuştur [36,37].

İtalya'nın Roma kentinde bulunan Collosium inşaatı sırasında sıva malzemesi olarak kullanılan balçık karışımlarına çeşitli hayvanlara ait kuyruk vb. kıllarının ilave edildiği bilinmektedir. Türk Mimarisinde ise Mimar Sinan'ın yapılarında kullandığı Horasan Harcının da saman gibi doğal lifler içerdiği bilinmektedir.

Basit olarak çimento, agrega ve suyun karışımı olarak tanımlayabileceğimiz betonda meydana gelen çökme ve büzülme çatlakları yıllar boyunca, betonun doğasından kaynaklandığı düşünülerek dikkate alınmamıştır. Ancak bu çatlakların oluşma sebebinin, çok özel bir dönemde betonun, iç bünyesinde oluşan gerilmeleri taşıyacak dayanımının olmaması olduğu çok sonraları anlaşılabilmiştir [38].

1960'lı yılların başında Amerikan Silahlı Kuvvetleri Mühendisleri Birliği betonda oluşan bu çatlakların giderilmesine yönelik bir araştırma programı başlatmışlardır. Betonda yapısal olmayan çökme ve büzülme çatlaklarının azaltılabilmesi için kullanılan geleneksel yöntemler, yüzeyin bir sıvı kür malzemesi ya da bir örtü kullanılarak kapatılmasını

kapsamaktaydı, ancak bu önlemler çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlıyor, fakat betona yük bindiğinde çatlakların genişlemesini önlemiyordu. Araştırma programının sonunda plastik büzülme çatlaklarının, betonun tasarlandığı mukavemet değerine ulaşmaya kadar maruz kaldığı dinamik iç gerilmelerden kaynaklandığı sonucuna varılmıştı. Ayrıca beton içerisine konulacak liflerin betonun balistik, enerji sönümleme ve darbe dayanımını arttırdığı sonucunda varılmıştır [38].

Lifli betonlar üzerindeki çalışmalar, 1963'lü yıllarda beton içerisine cam liflerin katılmasıyla devam etmiştir. Daha sonraları farklı lif tipleri kullanılarak beton mukavemeti üzerine liflerin etkisi araştırılmış yapılan çalışmalar sonucunda; beton içerisinde süresiz dağılı bulunan liflerin genellikle betonda oluşan çatlakları en aza indirerek lifli betonun şekil değiştirme özelliğini arttırmakta olduğu gözlemlenmiştir [33].

20. yüzyılın ortalarına doğru metal liflerin üretilmesiyle birlikte özellikle çelik I lifler en çok kullanılan beton katkı maddeleri olmuşlardır.. Ancak çelik lifler çatlamayı azaltıp dayanımı artırırken paslanma ve betonda kirlenmelere de neden olmuşlardır. Bu yıllarda cam, asbest, karbon gibi birçok lif çeşidi beton içerisinde kullanılarak test edilmiş ve her bir lif çeşidinin değişik işlev ve üstünlüklere sahip olduğu keşfedilmiştir.

1970'li yıllarda sadece düz çelik lifler kullanılırken sonraları üreticiler uçları çengelli, kıvrımlı, yüzey pürüzlülüğü artırılmış, özel deformasyonlar verilmiş ve daha değişik geometrilerde çelik lifler üretmişlerdir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, betonun özellikleri üzerindeki en büyük iyileştirmeyi düz çelik lifler ve ucu çengelli lifler sağlamaktadır. Çelik lifli betonları daha ekonomik hale getirmek için değişik üretim metotları denenmiş ve sonuçta dairesel kesitli olmayan (yarım daire, dikdörtgen ve düzensiz en kesitli gibi) çeşitli tipte lifler de üretilmiştir [29,30].

Günümüze kadar lifli betonlar üzerinde birçok araştırma yapılmış ve liflerin betonun mekanik özellikleri üzerinde çok olumlu sonuçlar verdiği deneylerle ispatlanmıştır [39,40].

1.3.2. Betonlarda Kullanılan Lifler ve Özellikleri

Lifli beton üretiminde çelik, karbon, cam, plastik, asbest gibi çok değişik malzemeler lif olarak kullanılmaktadır. Donatı malzemesi olarak kullanılan bu lifler çeşitli malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmektedirler. Kullanılan lif malzemesini belirleyici ana kriter lifin tipi, çapı ve lifin boy/çap oranı olarak adlandırılan görünüm oranıdır. Lifli betonlarda kullanılan lif çeşitleri ve bu liflere ait bazı mekanik özellikler Tablo 2'de verilmiştir [35].

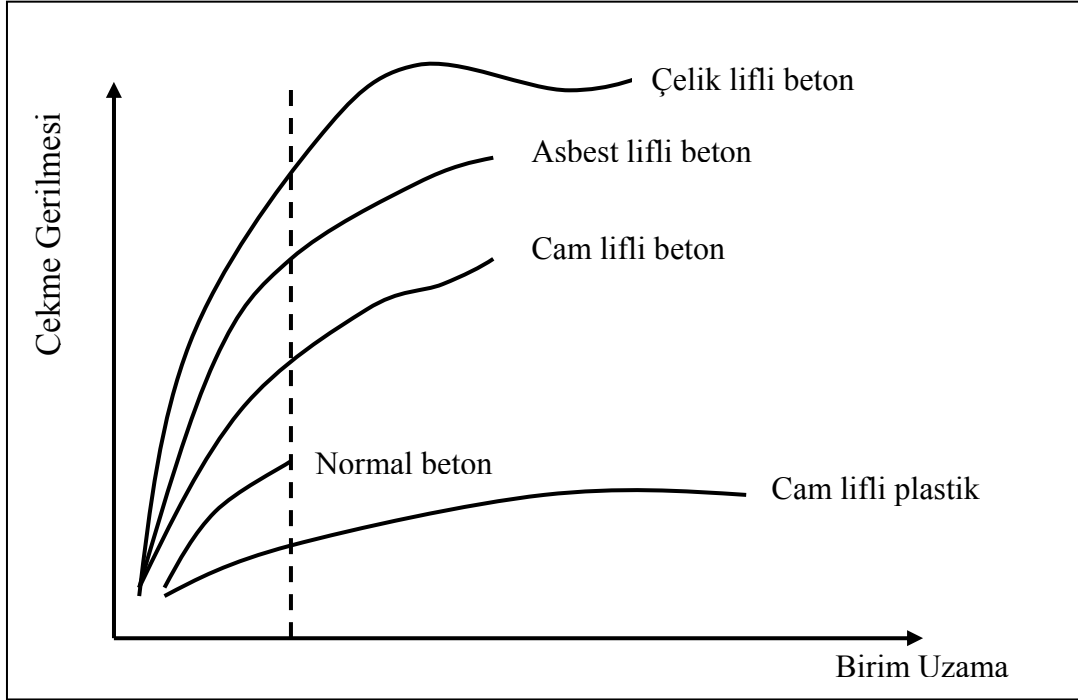
Tablo 2. Lif çeşitleri ve bu liflere ait bazı mekanik özellikler [35].

Lif tipi	Çap (µm)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	Elastisite modülü (kN/mm ²)	Çekme dayanımı (kN/mm ²)	Kopma uzama oranı (%)
Çelik	5 – 500	7.84	200	0.5 – 2	0.5 – 3.5
Cam	9 – 15	2.60	70 – 80	2 – 4	2 – 3.5
Polipropilen	20 – 200	0.90	5 – 77	0.5 – 0.75	8
Naylon	-	1.10	4	0.9	13 – 15
Karbon	9	1.90	230	2.6	1
Asbest	0.02 – 0.4	3.20	164 – 196	3.1 – 3.5	2 – 3
Krokidolit	0.02 – 0.4	3.40	196	3.5	2 – 3
Krositol	0.02 – 0.4	2.60	164	3.1	2 – 3
Polietilen	-	0.95	0,30	0.7 x 10 ⁻³	10
Selüloz	-	1.20	10	0.3 – 0.5	-
Ahşap lif	-	1.50	71	0.9	-
Akrilik	18	1.18	14 – 19.5	0.4 – 1	3
Çimento matrisi	-	2.50	10 – 45	3.7 x 10 ⁻³	0.02

Betona ilave edilen liflerin görünüm oranları ve miktarları da betonun performansını etkilemektedir. Teorik olarak liflerin görünüm oranı ve miktarı ne kadar büyükse betonun darbe etkilerine karşı dayanıklılığı, tokluğu ve düktilitesi gibi teknik özellikleri de o kadar büyüktür. Fakat, lif görünüm oranı ve miktarının yüksek olması karıştırma ve yerleştirme aşamalarında zorluk çıkarmaktadır. Bu yüzden çelik lifli betonlarda kullanılacak lif miktarının sınır değerleri standartlarda belirtilmiştir [41].

Lifli betonlarda donatı malzemesi olarak kullanılan liflerin, istenilen performansı gösterebilmesi için matris içerisinde homojen dağılım göstermesine özen gösterilmelidir. Bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy / çap oranının en az 10 olması ($l/d > 10$), lifin en büyük genişliğinin 0.25 mm'den ve en büyük kesit alanının da 0.05 mm²'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. ACI Committee 544'e göre bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre lifin narinlik oranı olduğu daha öncede belirtilmişti. Lif boyunun, lifin kesit alanı kadar alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan eşdeğer lif çapına bölünmesiyle bulunan bu oranın, boyları 0.60 ile 7.62 cm arasında olabilen lifler için 30 ile 150 arasında değişmektedir [37].

Lifli betonlarda kullanılan donatının etkinliği, donatı malzemesinin elastisite modülünün, matrisin elastisite modülünden daha yüksek olmasına bağlıdır. Şekil 2.'de değişik tipte lif içeren lifli betonların çekme etkisi altındaki davranışları görölmektedir.



Şekil 2. Değişik tipteki lifli betonların çekme etkisi altındaki davranışları

Şekil 2.'den de görölebileceği gibi beton içerisinde kullanılan liflerden elastisite modülü en yüksek olan çelik lifler, çekme etkisi altında en iyi performansı göstermektedir [42].

1.3.3. Lifli Beton Karışım Esasları ve Üretim Yöntemleri

Çelik lifli betonların karışım esasları, lifli beton uygulamalarının başarılı olabilmesi için ve üretilen betondan istenilen performansın elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken en önemli süreçtir. Normal betonlarda uyulması gereken kurallar lifli betonlar içinde geçerli olsa da gerek karışım hesaplarının yapılmasında gerekse çelik liflerin betona katılması sonucu elde edilen malzemenin yeni karıştırma ve taşınma tekniklerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır.

Çelik lifli betonlar üretilmeden önce, yapının hangi kısımlarında kullanılacağı, hangi etkiler altında kalacağı önceden tespit edilmelidir. Yani beton yapıda hangi etkilere maruz kalacaksa o etkilere göre lif tipi, boyutu ve görünüm oranı seçilmelidir [27].

Çelik lifli beton karışımlarının hazırlanması esnasında en sık karşılaşılan sorunlar çelik liflerin bir araya gelip topaklanarak işlenebilirliği zorlaştırmaları ve karışım sırasında liflerin eğilerek deforme olmalarıdır. TS 10514'e [43] göre bu problemlerin ortaya çıkmasını önlemek için;

- Homojen bir beton karışımı elde etmek için lifsiz betonlarda dikkat edilmesi gereken kurallara uyulmalıdır.
- İşlenebilirliği artırmak için akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılmalıdır.
- Çelik lifli betonun karıştırılmasını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda lif miktarını artırmayı sağlamak için ince agregaya miktarı artırılmalıdır.
- Taze betonda homojen lif dağılımı gözle kontrol edilmelidir. Birbirine yapışık lif demetleri halinde betona katılan lifler tek tek ayrılincaya kadar karıştırma işlemi devam ettirilip, üniform bir dağılım sağlanmalıdır.

Çelik lifli betonların üretimleri çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Bu yöntemleri Bentur ve Mindness [35], ön karıştırma işlemi, püskürtme işlemi, hamur tipi işlemi, püskürtme betonu ve elle yayma işlemi olarak beş ana grup altında toplamışlardır.

1.3.4. Lifli Beton Özelliklerine Bilişimindeki Parametrelerin Etkisi

1.3.4.1. Lif Miktarı ve Görünüm Oranının Etkisi

Lifli betonlarda, beton bileşimine giren parametreler içerisinde beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörler, lifin narinlik oranı ve lifin miktarı olduğu bilinmektedir.

Lifli betonun üretilmesinde karıştırma ve yerleştirme gibi aşamalarda liflerin narinlik oranları oldukça önemlidir. Narinlik oranı beton karışımlarında kullanılan çelik lif için 50 ile 100 arasında değişmektedir [32].

Lifli betonlarla ilgili yapılan çalışmalarda; liflerin beton içerisine katılma oranı hacimsel olarak %0.5–2.5 arasında olabileceğini göstermektedir. Ancak diğer yandan araştırmalar şunu da göstermiştir ki optimum fayda hacimsel oranın % 1–2 olması halinde sağlanmaktadır. Bu değerden daha az katılması halinde normal beton özelliği üzerine yeterince olumlu gelişme sağlanamamaktadır. Daha yüksek oranda katılma durumunda ise,

normal betonun basınç dayanımından daha düşük bir basınç dayanımı değeri elde edilmekte ve betonun işlenebilirliği azalmaktadır. Buna en büyük etken de yüksek oranda katılmış liflerin karışım sırasında topaklaşıp liflerin homojen dağılmamasıdır. Buna paralel olarak da yer yer beton içerisinde zayıf bölgeler ve hava boşlukları oluşmaktadır [29, 33, 42].

Lifli betonların işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalarda, liflerin beton içerisine katılmasıyla taze betonun işlenebilme özelliğinin, kullanılan lif miktarının artmasıyla azalmakta olduğu görülmüştür. Aynı şekilde liflerin narinlik oranları arttıkça da betonun işlenebilme özelliği azalmaktadır. Betona ilave edilen çelik liflerin görünüm oranlarının (uzunluk/çap oranı) 100'den büyük olması işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediğinden, betonun teknik özelliklerini iyileştirmesi bakımından görünüm oranının 100'den küçük olması gerekmektedir [27].

Yerleştirme sırasında kullanılan vibrasyon işlemi liflerin dönmesine ve belirli doğrultularda dizilmelerine neden olmaktadır. Bu durum lifin narinlik oranıyla ilgili olmasının yanında, vibrasyon tipine ve kalıp boyutuna da bağlıdır. Dolayısıyla lifli betonların yerleştirilmesinde dış vibrasyon tercih edilmelidir [26].

1.3.4.2. Lif Tipinin Etkisi

Lifli betonların üretiminde kullanılan lif tipleri ve boyutlarının betonun mekanik dayanımı ve düktilitesi üzerinde farklı etkileri vardır. Lif uzunluğu arttıkça matrisle lif arasındaki aderansın artmasından dolayı betonun taşıyabileceği çekme gerilmeleri de artar.

Beton üretiminde kullanılan bu çelik lifler, genellikle soğukta çekilmiş düşük karbonlu C 1008 çelikten üretilmektedir. Bu lifler yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özelliği gösterirler. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 MPa olup elastik limitleri % 0,2'nin altındadır. Bu lifler soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi, çelik plakaların kesilmesi, sıcak çekme, çelik tellerin öğütülmesi gibi birçok değişik yöntemlerle üretilirler. [44].

Çok değişik geometrik formda çelik lifler üretilmiştir. Ancak yapılan araştırmalar göstermiştir ki beton özellikleri en büyük iyileştirmeyi düz çelik fiberler sağlamaktadır. Bu tür liflerin en uygun boyutunun (çap/uzunluk oranı) $a/l=1/100$ ve $l=30-50$ mm olduğu yapılan araştırmalarla belirlenmiştir [42].

Uygulama alanlarına göre lifler; doğru, uçları bükülü, zig zaglı, çift baskılı, tek baskılı, düzensiz, dişli ve birleştirilmiş hallerde üretilmektedir [45].

TS 10513/93'e [46] göre lif özellikleri ile ilgili iki önemli parametre mevcuttur. Bunların birincisi çekme-kopma gerilmesi ortalaması en az 345 N/mm² olmalı, her bir tel için 310 N/mm²'den az olmamalıdır. İkinci parametre ise 16 °C ± 1 °C ortamda 3.18 mm.lik bir iç çap çevresinde eğilme etkisinde liflerin kırılmaksızın 90° eğilme kabiliyeti gösterebilmesi şartıdır. Bu özellikler betonda kullanılan liflerin daha sünek ve çekme dayanımı yönünden de daha yüksek bir mukavemet ile davranabilmesine imkân sağlayacağı vurgulanmaktadır.

Lifler, sertleşen betonun her yanına üniform olarak dağılmalıdır. Ayrıca beton yerleştirildikten sonra liflerin dönmemesi ve belirli bölgelerde toplanmalarını istenir. Genellikle cam ve çelik lifli beton karışımında topaklanma, bir yönde dizilme görülmektedir. Bu durumun liflerin beton karışımına kuru olarak katılması halinde en aza indirilebileceği söylenmektedir [26].

1.3.4.3. Çimento ve Agrega Etkisi

Lifli betonların üretiminde, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda genellikle portland ya da katkılı portland çimentoları kullanılmıştır. Lifli beton üretiminde portland çimentolarının kullanılmasında çeşitli yararları olmasına rağmen önemli bir sakıncası 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.

Diğer yandan, çimento matrisi bilindiği gibi alkali bir ortamdır. Cam ve çelik lifler bu alkali 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 içerisine puzolanik maddeler de katılabilir [47].

Matriste puzolan kullanılarak çimento hidrasyonu sırasında ortaya çıkan Ca(OH)₂'i ve diğer alkalileri bağlayarak, koroziv alkali atıklarını azaltmada önemli rol oynamaktadır [48].

Lif geometrisi ve lif miktarından farklı olarak iri agreganın hacmi, biçimi ve boyutunun taze lifli beton karışımının teolojisi üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Agreganın boyutu artarken lif boyutunu artırmanın genellikle yararlı olacağı belirtilmiştir [26].

1.3.4.4. Mineral Katkı Maddesinin Etkisi

Lifli beton içerisinde silis dumanı bazlı süper akışkanlaştırıcı içeren toz halde beton katkı malzemesi kullanımı; yoğunluk, dayanıklılık ve en önemlisi kıvamı arttırmak için kullanılır. Bu katkılar; aktif silikon dioksit içermektedir. Böylece, betonun sertleşme süreci boyunca, beton içinde hidrate olmuş çimento tanelerinin oranını, işlenebilirlik süresini ve durabiliteyi de artırabilmektedir. Özellikle su, klor ve zararlı gaz geçirimsizliğini, donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı artırmaktadır. Mineral katkıları etkisiyle, karbonasyon azalır, erken ve nihai mukavemetler artmaktadır. Mineral katkıları korozif maddeler içermemektedir. Mineral katkıları etkisiyle; karbonasyon azalır, erken ve nihai mukavemetler artmaktadır. Mineral katkıları korozif maddeler içermemektedir [48].

1.3.4.5. Matris Etkisi

Matris olarak tanımlanan yapının lifin etrafını saran ortam malzemesidir yani çimento hamuru olduğu bilinmektedir. Lifli beton kompozitlerin de matrisin fonksiyonu lifleri bir arada tutmak, onları sarmak ve liflerle veya liflerden gerilme transferini sağlamaktır.

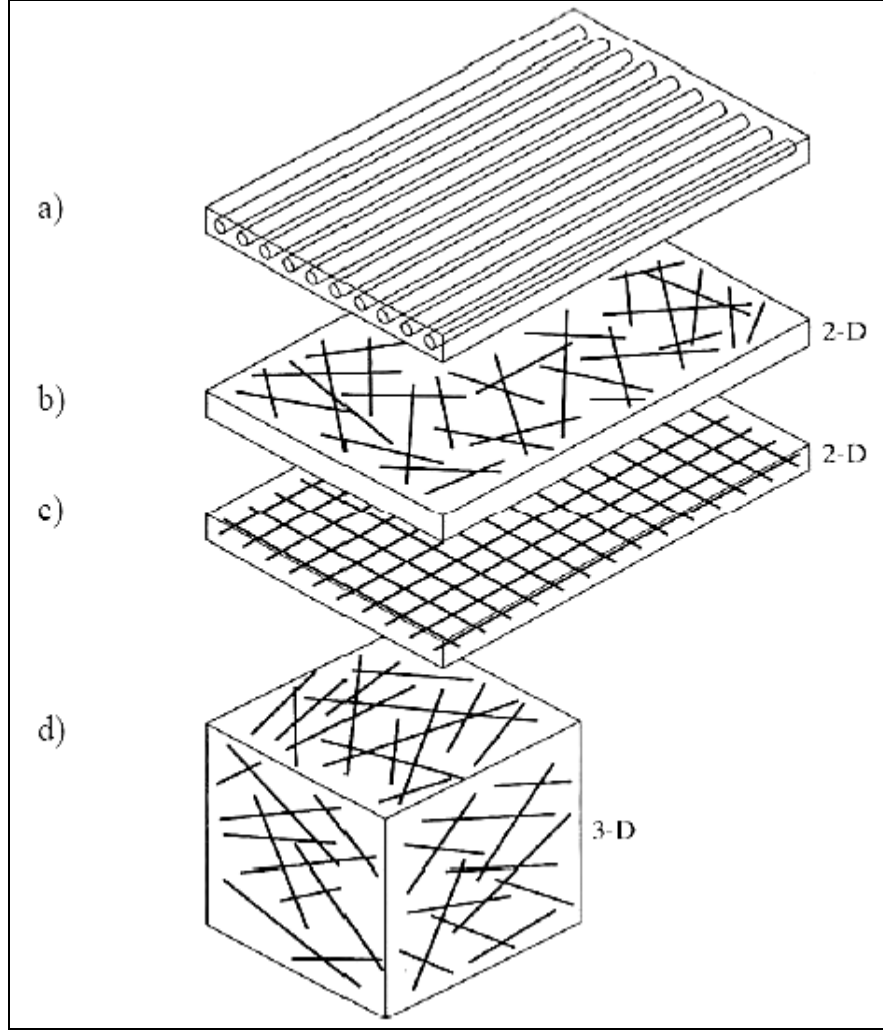
Lifli betonların üretimi için yapılan çalışmaların genellikle portland veya katkıli portland çimentosu kullanılmaktadır. Matrisin nitelikli olmasını sağlamak üzere lifli beton karışımlarının su/çimento oranları 0.55 den küçük olacak şekilde karışımlar hazırlanarak betonun çimento dozajı minimum 300 kg/m³ tutulmuştur. Yine bu amaçla yapılan çalışmalarda matrisi güçlendirmek amacı ile betonda silis dumanı da kullanılmaktadır [49].

Lifli beton üretiminde genellikle portland çimentosu kullanılmasına rağmen bu çimentonun önemli birde sakıncada vardır. Bu da çimento hamurunun kırılma birim uzamasının çoğu liflerinkinden %0.2 – 0.006 mertebesinde düşük olması sonucu yüklenme anında, çimento hamurunda çatlaklar oluşmasıdır. Ayrıca, bilindiği gibi çimento hamuru alkali bir ortamdır. Cam ve çelik lifler bu ortamdan kimyasal olarak etkilenip

koroziona uğrayabilirler. Bunun sonucunda lifin malzeme içerisindeki etkisi oldukça azalabilir. Bu duruma karşı koroziona dayanıklı kaplanmış çelik lifler kullanılabilirdi gibi çimento içerisinde puzolanik malzemeler de kullanılabilir [27].

1.3.5. Lifli Betonlar ile Geleneksel Donatılı Betonların Karşılaştırılması

Donatısız betonlar, çekme dayanımları ve kırılma anındaki şekilgeçirime kapasiteleri bakımından yetersiz malzemelerdir. Betonun bu olumsuz özelliklerinin giderilmesi için beton içerisinde ön gerilmeli veya ön gerilmesiz donatı çubukları, düzenli ve sürekli bir şekilde ilave edilir. Oluşan betonarme elemandan, kendisinden beklenen optimum performansı göstermesi beklenir. Betonda kullanılan lifler ise üç boyutlu ve süreksiz donatı oluşturacak bir şekilde gelişigüzel dağılı olarak matris içinde yer alırlar. Lifler yapısal uygulamalarda geleneksel donatı çubukları ile birlikte de kullanılabilirler [28,50]. Şekil 3'te beton içerisinde 1, 2 ve 3 boyutta donatı dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 3. Betonda 1, 2 ve 3-boyutta donatı dağılımları

Şekil 3'te sırasıyla üstten aşağıya bir boyutta düzenli dağılmış ve sürekli donatı, iki boyutta rasgele dağılmış ve süreksiz donatı, iki boyutta düzenli dağılmış ve sürekli donatı, üç boyutta rasgele dağılmış ve süreksiz donatı yapıları gösterilmiştir.

Geleneksel betonlara donatıların düzenli ve sürekli bir şekilde ilave edildiği sistemlerde donatı, bulunduğu bölgeye gelen çekme ve kesme kuvvetlerini karşılar. Donatının bulunmadığı bölgeler, betonun çekme ve kesme dayanımını aşan yüklere maruz kaldığında bu bölgelerde gerilme yığılmaları ve sonrasında bir takım hasarlar meydana gelmesi kaçınılmazdır. Liflerin matris içerisinde üç boyutlu ve süreksiz donatı oluşturacak bir şekilde gelişigüzel dağılımı nedeniyle betonun herhangi bir bölgesinde oluşabilecek gerilmeler, lifler tarafından karşılanabilmektedir. Bu sayede betonda oluşabilecek olası çatlakların kontrol altına alınması mümkün olabilecektir.

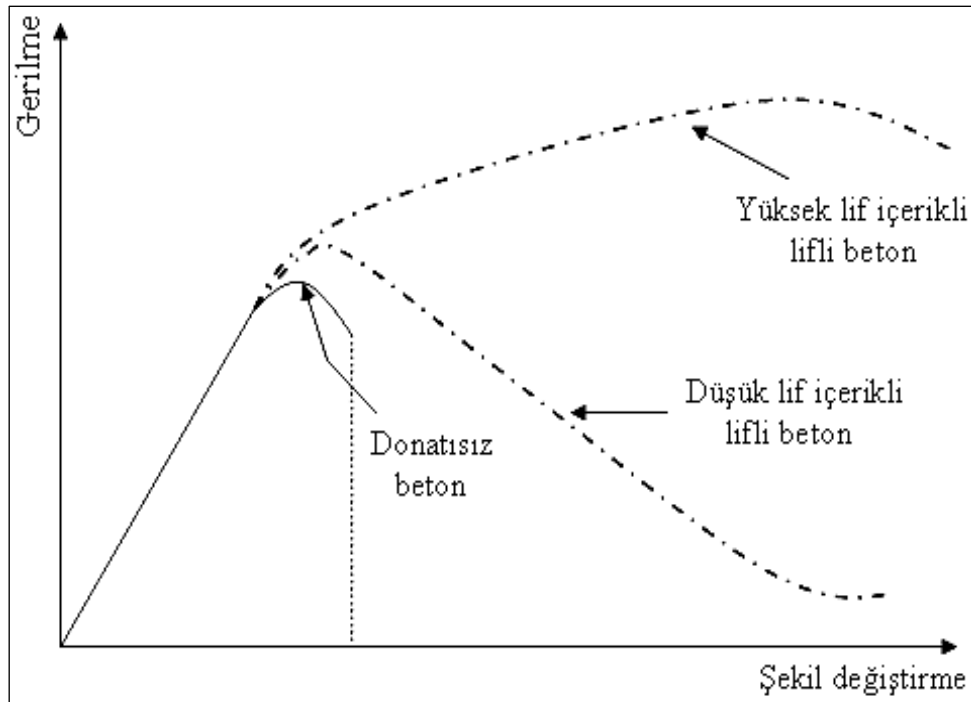
Lifli betonlarda, betonun yük altında gösterdiği maksimum çatlama deformasyonu

geleneksel betona oranla önemli bir artış göstermektedir. Maksimum yükten sonra, lifli betonlarda, artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok daha yavaş olmaktadır. Dolayısıyla, lifli betonlarda liflerin matristen ayrılması ve uzamaları nedeniyle yutulan enerji, geleneksel betonlara göre oldukça fazladır [22].

Geleneksel donatının kullanılmadığı ince kesitli plaklarda lifler birincil donatı olarak kullanılırlar. Bu plaklarda lif konsantrasyonu genellikle % 5'in üzerindedir. Bu uygulamalarda lifler, Şekil 4'te görüldüğü gibi plağın dayanımını ve tokluğunu artırıcı rol oynarlar.

Lifler tünellerde, patlama etkilerine karşı dayanıklı olması gereken yapılarda, çakma etkilerine maruz kalacak prekast kazıklarda lokal ani yüklere karşı geleneksel donatıya göre daha iyi bir davranış göstermektedirler.

Lifli beton; nem ve ısı değişikliklerinin hasar yaratabileceği döşeme ve kaplama betonlarında, çatlak kontrolü açısından geleneksel donatıdan daha üstündür [35].



Şekil 4. Lifli betonlarda tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Betonda kullanılan geleneksel donatı çubukları betonun yük taşıma kapasitesini artırırlar, lifler ise daha çok betonda, oluşabilecek çatlakların oluşmasının ve gelişmesinin engellenmesinde etkilidirler [35]. Lif kullanılan betonlar, geleneksel betonlara göre daha

fazla enerji yutma kapasitesine sahiptirler. Yani yük altında daha sünek davranış gösterirler.

Lifli betonlarda geleneksel betona göre beton karışımına çeşitli boy, çap ve tipteki liflerin ilavesi sonucu betonun, çökme değerinde bir miktar düşme olabilmektedir. Çökme kaybını etkileyen etkenler ise lifin görünüm oranı denen boy/çap oranı ve lifin miktarıdır. Bu çökme kaybı çeşitli kimyasal katkı kullanımı ve iyi vibrasyon yapılması ile giderilebilmektedir.

Lifli betonların üretilmesindeki ana amaç malzemenin eğilme mukavemeti, tokluğu, darbe mukavemeti gibi zayıf mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yöneliktir olduğu bilinmektedir [51].

Liflerin donatı malzemesi olarak kullanıldığı lifli betonlarda geleneksel betonlara nazaran çekme, eğilme, çarpma dayanımları gibi mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlanır. Bu iyileşmeler sayesinde çekme, eğilme, çarpma gibi etkilere maruz kalacak yapılarda, lif donatısı kullanımı önem kazanmaktadır. Betonda lif kullanımı sonucu betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen ortalama artışlar Tablo 3'te gösterilmiştir [27].

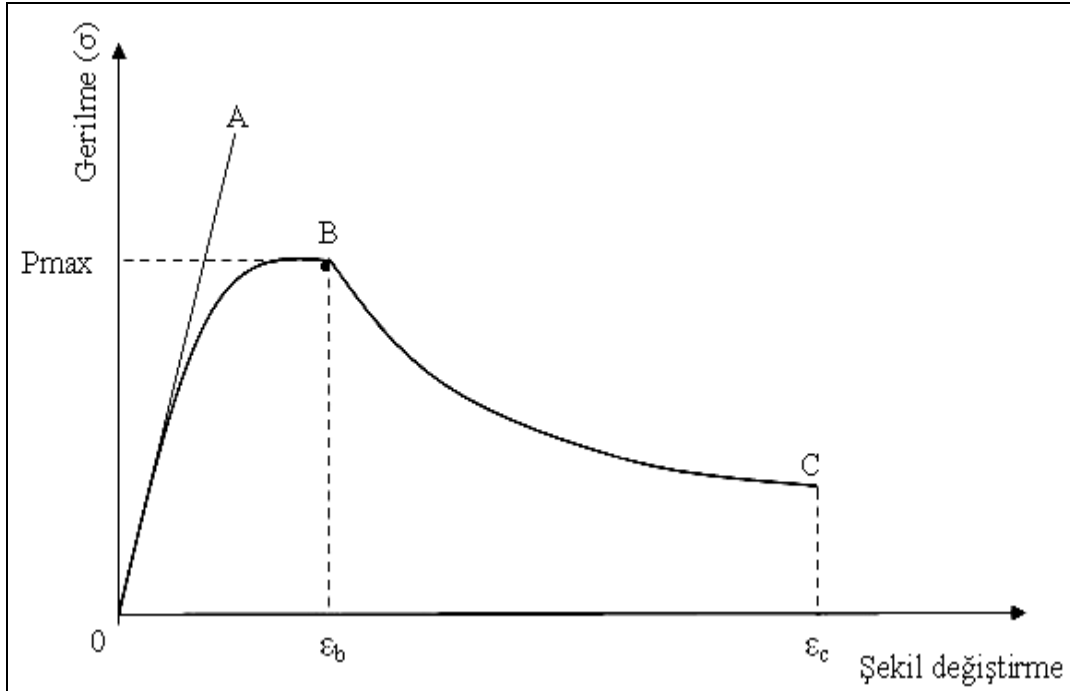
Tablo 3. Lifli betonlarda geleneksel betonlara kıyasla mekanik özelliklerde meydana gelen ortalama artış yüzdeleri

Mekanik özellik	Artış yüzdeleri (%)
Tokluk	100–1200
Çarpma dayanımı	100–1200
İlk çatlak dayanımı	25–100
Eğilmede çekme dayanımı	25–200
Çekme dayanımı	25–150
Yorulma dayanımı	50–100
Şekildeğiştirme oranı	50–300
Basınç dayanımı	± 25
Kavitasyon/erozyon direnci	200–300
Elastisite modülü	± 25
Sehim	20–500

1.3.5.1. Geleneksel Betonun Yük Altındaki Davranışı

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 kısalmasında değil ϵ_c 'de oluşacaktır.

Betonda, σ - ϵ eğrisinin kuyruk bölümünün var olması nedeni ile fazla zorlanan liflerin daha az zorlanan liflere gerilme aktarabilme özelliği gerilme uyumu (gerilmelerin yeniden dağılımı-redistribution) olarak adlandırılır.



Şekil 5. Geleneksel betonun yük altındaki gerilme-birim deformasyon eğrisi

Betonun gerilme - birim deformasyon özelliklerini birçok değişkenin etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle betonlar için tek ve kesin bir σ - ϵ eğrisi çizmek mümkün değildir. Şekil 5'teki eğri sadece betonun genel davranışı hakkında bilgi verebilir. Verilen geleneksel betonun yük altındaki gerilme-birim deformasyon eğrisi yorumlayacak olursak;

0-A arası doğrusal kabul edilir. Bu bölgede meydana gelen deformasyonlar, uygulanan gerilemeler orantılıdır.

Bu sonuç Hooke bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

Burada E elastisite modülü olup AO doğrusunun eğimine eşittir. A noktasından sonra eğri doğrusallıktan sapar ve B noktasında maksimum değerine ulaşır. B noktasının ordinatı basınç mukavemetini, apsisi betonun mukavemetini kaybetmeden yapabileceği maksimum birim kısalmayı gösterir. B noktasından sonra artan deformasyonlara karşılık gelen gerilmeler ani ve hızla azalır.

Normal betonun gerilme-birim deformasyon eğrisini tanımlamak üzere literatürde farklı denklemler verilmiştir. Bunlardan ilki kolay uygulanabilen ve $\varepsilon < \varepsilon_0$ değerleri için geçerli olan Voellmy formülüdür.

$$f = f_c \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \quad (2)$$

Bir diğer formül deney verilerine daha iyi uyum sağlayan Smith ve Young tarafından önerilen

$$f = f_c \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) e^{\left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)} \quad (3)$$

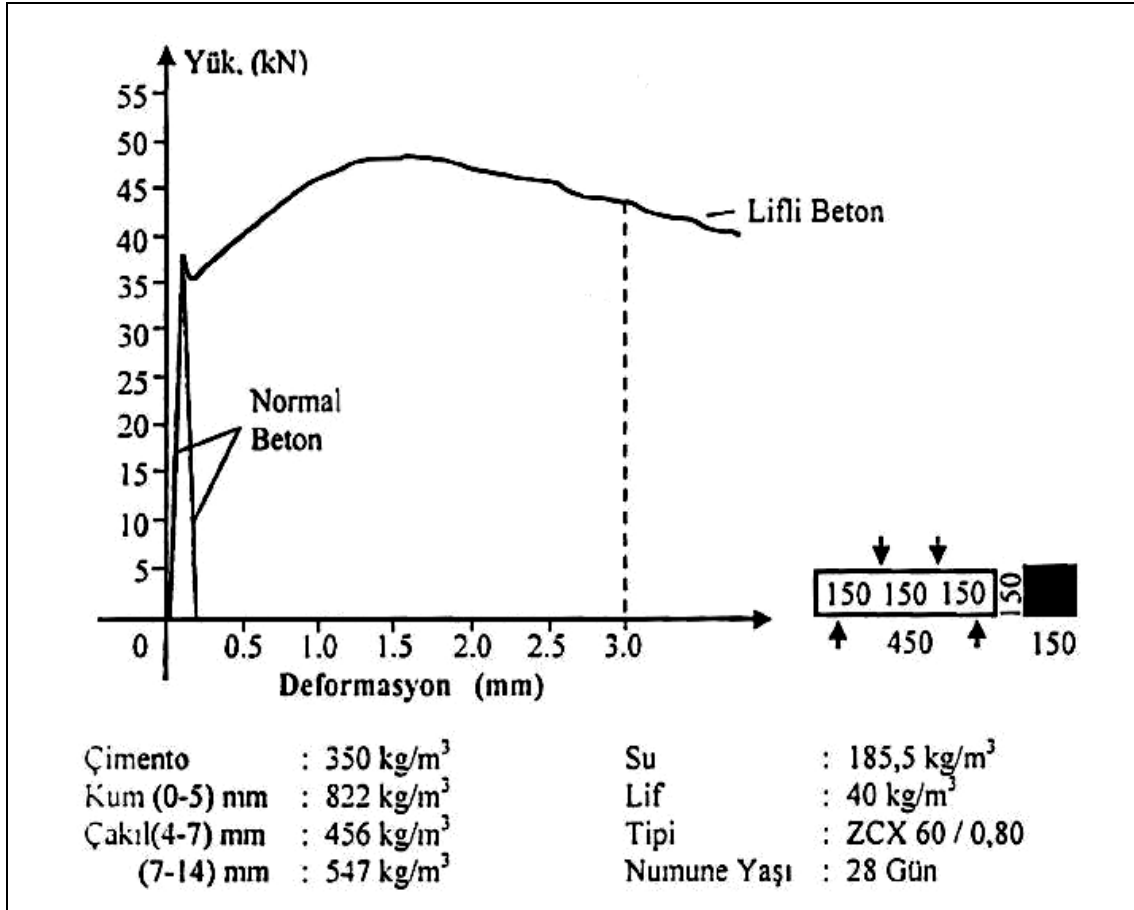
Bağıntısıdır.

Betona P kadar bir yük uygulandığında $\delta\varepsilon$ deformasyonunun oluşabilmesi için meydana gelen işe deformasyon işi denir ve $(P \times \varepsilon)$ diye anılır. Deformasyonun $\Delta\varepsilon$ gibi bir değer alması halinde yapılan deformasyon işi;

$$W = \int_0^{\Delta\varepsilon} p_x \cdot \delta \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Formülü ile ifade edilir. Bu aynı zamanda gerilme-deformasyon eğrisi altındaki alanı tanımlar. Bu alan deformasyon sırasında yapılan iş için harcanan enerjiyi ya da enerji yutabilme kapasitesini gösterir.

Çelik liflerle, betonda kullanılan çeliğin hiçbir zaman birbirine karıştırılmaması gerekir. Statik hesaplarda çelik lifler eğilme momentini alan çubuk ya da hasır donatı olarak görülmemelidir. Çelik liflerin beton içerisindeki görevi betonun yapısını değiştirerek onu plastik davranışa zorlamalarıdır [33].



Şekil 6. Normal ve lifli betonun yük altındaki davranışı

Şekil 6'dan da görüleceği gibi geleneksel betonun maksimum yükte kırılma sonrası gösterdiği yükün azalma hızı çok yüksek olup yapabileceği maksimum deformasyon da çok düşüktür. Çelik lifli betonda ise maksimum yükten sonra yükün daha da yükseldiği görülmektedir. Bu, kullanılan çelik liflerin çekme dayanımının betonunkinden daha yüksek olması gerçeği ile açıklanabilir. Beton maksimum yükte kırıldıktan sonra yükün kısa bir aralıkta ani olarak azalmasını takiben çelik liflerin gerilmeyi taşıması sonrası beton, belli bir deformasyon değerine kadar maksimum yükten daha fazla yük taşımaktadır.

Maksimum yükten sonra, lifli betonlarda, artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre çok yavaştır olmaktadır [27].

1.3.5.2. Lifli Betonların Yük Altındaki Davranışı

Geleneksel betonun içerisine doğal veya yapay lif eklenmesi ile oluşturulan lifli beton, görünüş olarak geleneksel beton karışımına benzese de, değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklıdır.

Beton, içerisinde meydana gelen farklı gerilmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensiz bir yapıya sahiptir. Beton içerisine katılan lifler, matris fazını takviye ederek beton içerisinde, üzerlerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak davranırlar. Beton içerisinde üç boyutlu olarak dağılmış olan liflerin betondaki çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı lifler, matristeki çatlağın yayılmasına yol açan gerilmeleri kendi üzerlerine çekerek matrisin çatlama bölgesine aktarırlar [52].

Statik hesaplamalarda, homojen bir malzeme olarak lifler eğilme momentini alan çubuk veya hasır donatı gibi görülmemelidir. Lifler betonun yapısını değiştiren ve onu elastik davranışa zorlayan bir malzeme olarak kabul etmek daha doğru bir tanımdır [27].

Lifli betonlar, yük altındaki davranışı itibariyle normal betondan daha farklı bir davranış gösterir. Yük altındaki bu farklı davranış sonucu betonun gerilme deformasyon özelliğine paralel elastisite, tokluk, deformasyon, sünme gibi özelliklerinin performansı da değişir [44].

Lifli betonda, maksimum yükten sonra yükün azalma hızı oldukça düşüktür. Bu 3–4 mm deformasyona kadar maksimum yükün %70-80'i arasındadır. Normal betonda kırılma sonrası yük azalma hızı çok yüksek ve deformasyon çok düşük olmasına karşın, lifli betonda çatlama sonrası yükün daha da arttığı görülür. Bunun nedeni kullanılan liflerin çekme dayanımının betonunkinden daha yüksek olmasıyla ilgilidir.

Lifli beton maksimum yükte kırıldıktan sonra, yük kısa bir aralıkta ani olarak düşer. Bu düşme matrisin dağılmasıyla ilgilidir. Daha sonra matris üzerinden boşalan gerilme çelik lifler tarafından karşılanır. Yani matristen liflere bir gerilme transferi söz konusudur. Liflerin çekme dayanımları yüksek olduğundan gerilme taşıma kapasiteleri daha fazla olup, yük altında sünek davranış gösterirler.

Maksimum yükten sonra liflerin matristen ayrılması ve uzamaları nedeniyle emilen enerji ya da meydana gelen deformasyon ise oldukça büyüktür. Bu durum yük-deformasyon eğrisi altında kalan alanların karşılaştırılması ile görülebilir [33].

1.4. Çelik Lifler

1.4.1. Çelik Liflerin Tanımı

Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacı ile taze beton içerisine çeşitli yöntemlerle ve çeşitli miktarlarda eklenen çelik lifler, değişik boyutlarda ve kesitlerde üretilmektedirler. Bunlar; Soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi, çelik plakların kesilmesi yöntemi, sıcak çekme yöntemi, çelik tellerin öğütülmesi yöntemleridir. [28,50].

Geleneksel beton içerisine değişik oranlarda ve belli özelliklerde çelik tellerin katılması ile elde edilen çelik lifli beton. Teorik olarak geleneksel betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını arttırmaktadır. Betona çelik lif katılması ile darbe dayanımı, süneklik, yorulma dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ilk çatlak yükü gibi mekanik özellikler değişik oranlarda ve miktarlarda artmaktadır [2] .

Beton bileşiminde kullanılan çelik lifler, genellikle soğuk çekilmiş düşük karbonlu çelik olan C 1008'den üretilmişlerdir. En önemli özellikleri yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama değerleridir. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 12000 kg/cm² olup, elastik limitleri % 0.2'nin altındadır. Lifli beton üretiminde kullanılan çelik liflerin çapları genellikle 0.13 – 1.0 mm arasında olup, görünüm oranı adı verilen uzunluk/çap oranları ise 30 – 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm'den 70 mm'ye kadar değişmektedir [27].

Lifleri tanımlayan en önemli unsur, liflerin sahip oldukları mekanik özellikler ve lifin sayısal bir parametre ile ifade edilmesini sağlayan biçimsel özellikleridir. Çelik liflerin tanımını sağlayan bu özellikler; Görünüm oranı (lif uzunluğu/lif çapı), geometrik yapı ve lifin çekme gerilmesidir.

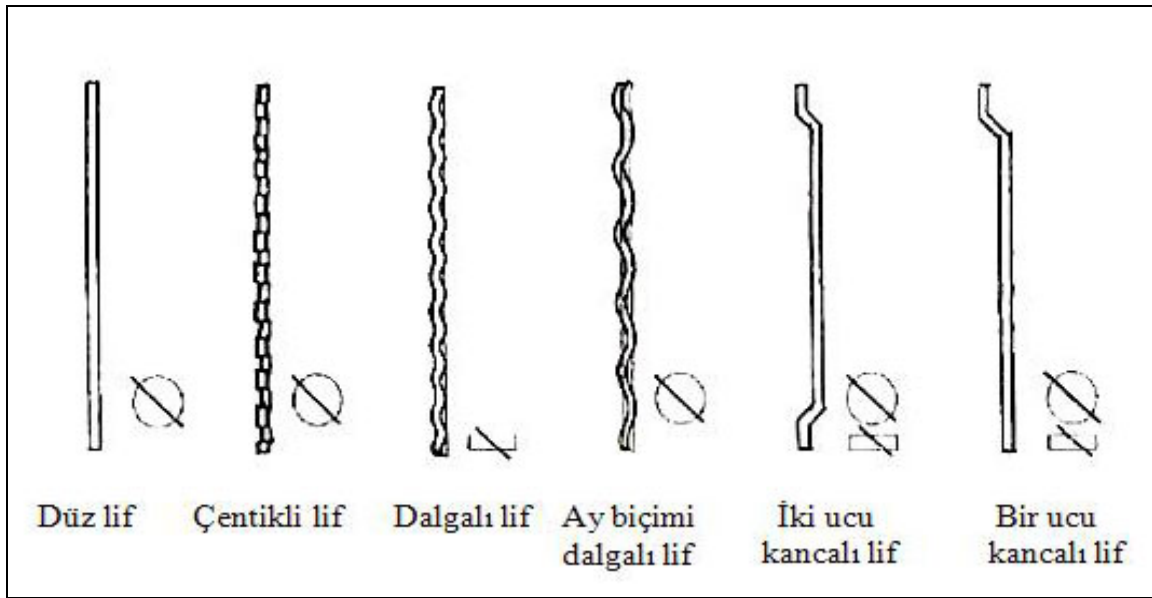
Çelik lifler, TS 10513'de [46] geometrik yapılarına göre üç sınıfa ayrılırlar.

- Düz, pürüzsüz yüzeyli teller
- Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller (üzerinde çentikler açılmış teller, kıvrımlı teller, ay biçimli dalgalı teller)
- Sonu kancalı teller (iki ucu kıvrılmış teller, bir ucu kıvrılmış teller)

Çelik liflerin en önemli özellikleri olan yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama davranışları sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur [29].

Çelik liflerin çapları 0.25 – 1.00 mm arasında, boyları 12.7 – 63.5 mm arasında, görünüm oranları ise 20–100 arasında değişmektedir [53].

TS 10513'e [46] göre betonda kullanılacak çelik liflerin yüzeylerinin kir, pas ve yağdan arındırılmış olması, her bir lifin çekme dayanımının 310 N/mm^2 'den az olmaması ve 16°C ' lik bir ortamda 3.18 mm çaplı silindir çevresinde 90° kırılmadan kıvrılır olması istenmektedir. Bu özellikler çelik liflerin daha sünek ve daha yüksek mukavemetle davranabilmesine imkân sağlaması bakımından gereklidir.



Şekil 7. Çelik lifli betonların üretiminde kullanılan çelik lif çeşitleri

1.4.2. Çelik Liflerin Beton İçerisindeki Davranışı

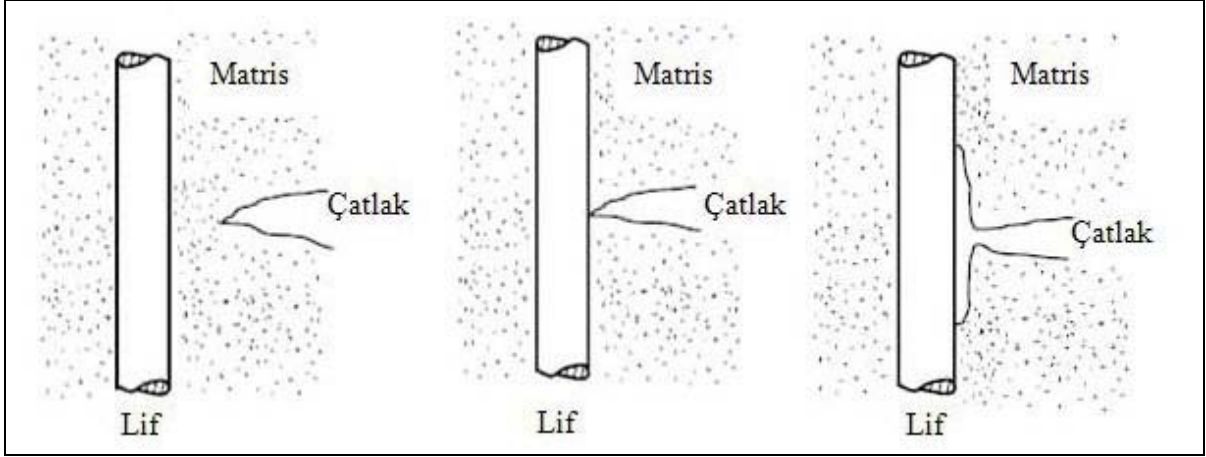
Çelik lifler genellikle kullanıldıkları betondaki donatıları destekleyici bir rol oynarlar. Çelik lifler aynı zamanda betonda oluşan çatlakların ilerlemesini sınırlar, yorulma, darbe, rötre veya ısıl gerilmeler gibi etkenlere karşı betonun direncini artırır [30]. Çelik liflerin beton içerisindeki işlevi ile betonda kullanılan geleneksel donatının işlevi birbirlerinden farklıdır. Bu nedenle çelik liflerin beton içerisindeki davranışı ile betonda kullanılan donatının işlevi hiçbir zaman birbirine karıştırılmamalıdır. Beton içerisinde donatı ve çelik lif belli bir yere kadar aynı işlevi görebilirler. Fakat bunlar arasındaki en önemli fark beton içerisindeki liflerin fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır [27, 29].

Statik hesaplar yapılırken çelik lifler, eğilme momentini alan hasır veya çubuk donatı gibi görülmemelidir. Çelik lifler, betonunu plastik bir davranışa iten malzemelerdir. Çelik lifli betonun özelliği, onun arttırılmış elastikiyet ve enerji yutma yeteneğidir [29].

Yani normal betonların yük – deformasyon eğrisinde maksimum yükten sonra yükün azalma hızı çok yüksek ve yapabileceği deformasyonun çok düşük olmasına rağmen çelik lifli betonlarda çelik lifler yük altında sünek bir davranış gösterdiklerinden maksimum yükten sonra da belli deformasyona kadar yük taşıyabilirler. İşte bu nedenle çelik lifli betonlarda maksimum yükten sonra artan deformasyon neticesinde yükün azalma hızı çok düşük olup, yük – deformasyon eğrisinde maksimum yükten sonra azalan bir kuyruk kısmı oluşmaktadır. Dolayısıyla liflerin betondan ayrılması ve böylece betonun göçmesi için gereken enerji de oldukça büyüktür. Başka bir deyişle lifli betonun deformasyon yapma kabiliyeti geleneksel betonlara göre oldukça fazladır [27, 29].

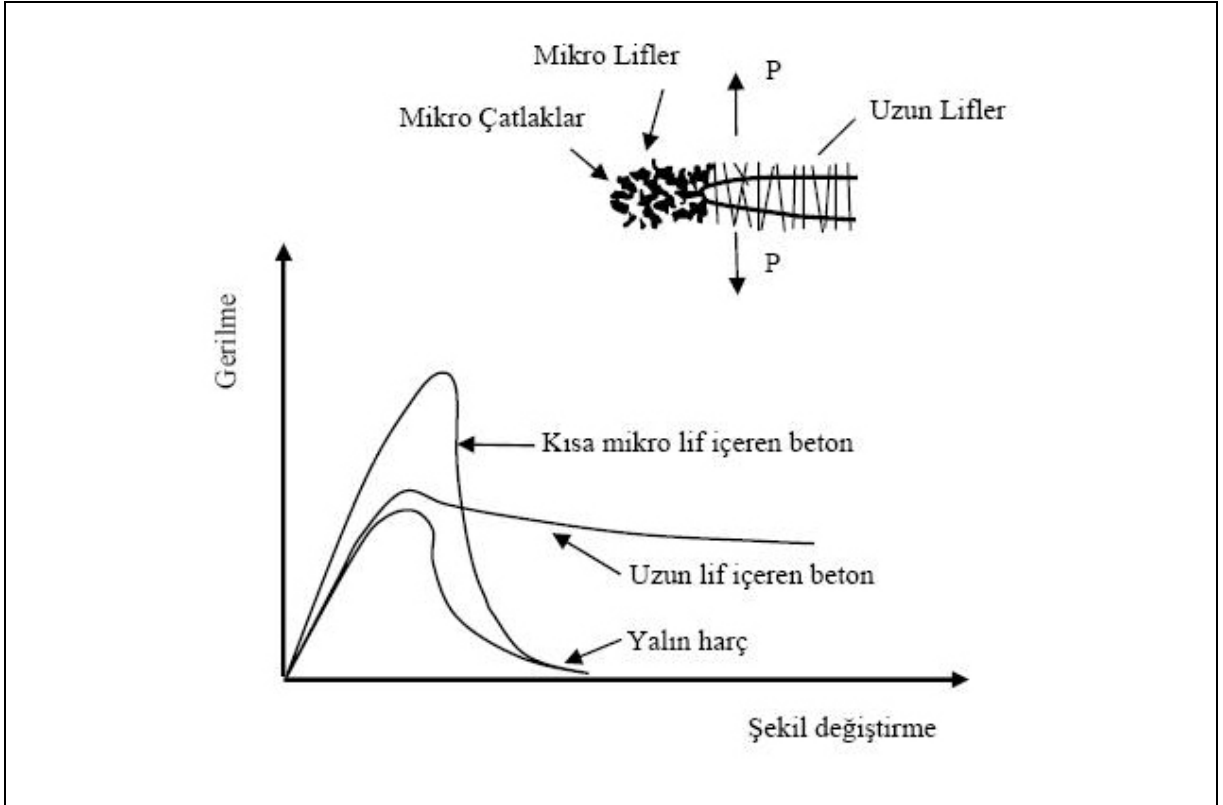
Lifsiz betonlarda gerilme ile başlayan mikro çatlaklar, gerilmenin artışı ile çeşitli yönde yayılarak belli bir gerilme değerinde betonun parçalanmasına yol açar. Lifli Betonlarda ise ilk çatlaktan sonra çimento hamuru fazından liflere doğru bir gerilme transferi olur. Lifler, miktarları ve geometrik şekillerine bağlı olarak bu gerilmelerin bir kısmını kendi taşır, bir kısmını da matrisin sağlam bölgelerine aktarırlar. Özellikle kritik yüklemelerde, beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin beton içerisindeki davranışı daha iyi açıklanır. Çelik lifli betonlarda gerilme aktarımı Şekil 8’de gösterilmiştir [55].

Lifsiz betonda kırılma sonrası yükün azalma hızı çok yüksek olup betonun yapabileceği maksimum deformasyon da çok azdır. Çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda ise maksimum gerilmeden sonra yükün davranışı lifsiz betona göre oldukça değişiktir. Maksimum gerilmeden sonra yükte hafif bir düşüş meydana gelir. Daha sonra meydana gelen gerilmenin bir kısmının lifler üzerinden taşınması nedeniyle betonun gerilme-deformasyon davranışında geleneksel betona göre farklılıklar yaşanır. Çelik lifli betonda yük, tedrici olarak azalır. Dolayısıyla liflerin matristen ayrılması ve uzaması nedeniyle emilen enerji ya da başka bir deyişle meydana gelen deformasyon işi oldukça büyüktür [31].



Şekil 8. Çelik lifli betonlarda gerilme aktarımı

Nelson vd., yaptıkları çalışmada lifli betonlarda çatlak genişliklerini etkileyen en önemli parametrelerin liflerin hacim yüzdesi ve liflerin kenetlenme özellikleri olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca mikro çaplı liflerin betonda oluşabilecek mikro çatlakları uzun liflere göre daha etkin bir şekilde engellediğini vurgulamışlardır. Diğer bir deyişle mikro çaptaki lifler, betonda mikro çatlakların gelişimini engelleyerek bölgesel çatlakların oluşumunu geciktirirler. Matristeki çatlaklar, mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamamaktadırlar. Büyük boyutlu lifler, ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olabilmektedir. Buna karşın, mikro lifler çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü vazifesi görerek çatlakları durdururlar. Mikro lifler, matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilirler. Mikro lifler, mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar. Şekil 9'dakine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir [8,73].



Şekil 9. Çatlak köprülenmesine farklı lif boyutlarının etkisi

1.5. Çelik Lifli Betonlar

Çelik lifli beton, hidrolik çimento, ince veya ince ve kaba agreganın ve süreksiz dağılı çelik liflerin bir arada kullanıldığı, gerektiğinde puzolan ve katkı maddesi ilavesiyle hazırlanan bir tür betondur [53]. Diğer bir tanımla çelik takviyeli beton, betona çelik tellerin karıştırılmasıyla elde edilen, 3 boyutta donatılmış betondur [54].

Çelik liflerin betona veya harca hacimce % 0.25 ve hacimce % 2 arasındaki miktarlarda eklenmesi beton ve harçların mühendislik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Özellikle betonun darbe dayanımı, eğilme dayanımı, yorulma mukavemeti, kırılma ve parçalanma dayanımı artmaktadır [53].

Çelik liflerin betona belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yeni betonun çekme dayanımının yanında birçok özelliklerinde de iyileşme görülür. Bu çelik lifler basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, liflerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, beton matrisinde olması muhtemel çatlakların meydana gelmesini önler. Bunun yanında betonda oluşmuş çatlakların matris içinde ilerlemesini yavaşlatır.

Çelik lifli beton basınç duktilitesi gösterir. Beton taşıma gücüne ulaştığı halde bir miktar

daha yük taşıyabilir. Beton taşıyabileceği maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır. Çelik lifli betonlarda çatlama, dökülme, parçalanma ve dağılma geleneksel betonlara göre daha azdır. Ayrıca Kesme, yorulma ve burulma mukavemetleri de geleneksel betonlara göre yüksektir. Basınç mukavemetinde de bir miktar artış bazen de (topaklaşmalar sonucu) düşüş görülebilir. Çekme dayanımındaki artış ise normal betona göre oldukça fazladır [29].

Çelik lifli betonlarda kırılma enerjisi de normal betonlara göre yüksektir. İlk kırılma yükünden sonra oldukça yüksek duktilite gösterirler. Bu nedenle lif oranı arttıkça betonun kırılma enerjisinin de yükseldiği araştırmalarla ispatlanmıştır [8].

Bu özelliklerinden dolayı çelik lifli betonlar kullanılması söz konusu olan yerlerde kesitler küçültülerek ekonomi sağlanabilir. Bazı döşemelerde hasır döşemeye gerek kalmadan daha küçük döşeme kalınlığı ve uygulama süresiyle çelik lifli beton kullanımı avantaj sağlar [42].

Çelik lifler genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kaviteasyon dirençlerini arttırmaları. Çelik teller, darbe aşınmasının neden olduğu mikro kırılma çatlaklarını kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını ve büzülme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzülme hareketlerini sınırlamaktadırlar [55].

1.5.1. Çelik Lifli Betonun Özellikleri

Normal beton içerisine değişik miktarlarda ve belli özelliklere sahip çelik liflerin katılmasıyla elde edilen lifli beton teknik olarak normal betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını artırır. Ancak performanstaki bu iyileşmeler normal betonlarda olduğu gibi agrega cinsi ve granülometrik dağılımı, çimento cinsi ve miktarı, su/çimento oranı gibi faktörlere bağlıdır. Bunların yanı sıra kullanılan çelik liflerin şekli, teknik özellikleri, miktarı ve beton içerisindeki yönelimleri de sonuçlar üzerinde etkilidir [27, 30].

Çelik liflerin betona belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen yeni betonun çekme dayanımının yanında birçok mühendislik özelliklerinde de iyileşme görülür. Bu çelik lifler basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, liflerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, beton matrisinde oluşması muhtemel çatlakların meydana gelmesini önlemekte ve betonda oluşmuş çatlakların matris içerisinde ilerlemesini yavaşlatmaktadır. Çelik lifli beton basınç duktilitesi göstererek betonun taşıma gücüne ulaştığı halde yük

taşımaya devam etmesini sağlar. Maksimum yükten sonra artan deformasyonlar sonucunda yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır. Betonda çatlama, dökülme, parçalanma ve dağılma azdır. Kesme, yorulma ve burulma mukavemetleri yüksektir. Basınç mukavemetinde de bir miktar artış görülür ancak bu artış sınırlıdır. Çekme mukavemetinde ise normal betona göre oldukça büyük artışlar gözlenir [29].

Betonun çekme ve basınç mukavemetinin yanında kırılma enerjisi de oldukça önemli bir malzeme parametresidir. Çelik lifli beton, özellikle ilk kırılma yükünden sonra oldukça yüksek bir düktilite gösterir. Bu nedenle lif oranı arttıkça kırılma enerjisi de artış kaydetmektedir. Çelik lifli betonların bu tür özelliklerini ortaya koymak üzere literatürde bir çok ampirik tanımlama yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi Barr 'in (Barr, B.I.G. vd. 1982) geliştirdiği Tokluk İndeksi (Toughness Index) tanımlamasıdır. Lifli betonun gerilme-birim boy değişimi eğrisinin ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alanın, eğri altındaki toplam alana oranı Tokluk indeksi olarak tanımlanmıştır [29].

Çelik lifli beton, içerisinde aralıklarla dağıtılmış küçük çelik teller bulunan ince veya ince ile kaba agrega ve çimento kullanılarak üretilmiş kompozit bir malzemedir. Çelik lifler puzolanlar ve normal betona ilave edilen katkı maddeleri ile de ortak olarak kullanılabilir [28,29].

Betona çelik liflerin ilavesi ile betonun özellikle çekme mukavemetini, tokluğunu, eğilme mukavemetini, yorulma mukavemetini, parçalanma ve kırılmaya karşı dayanıklılığını, darbe etkilerine karşı dayanımını ve deformasyon yapabilme yeteneği gibi mekanik özelliklerini artırmak mümkündür [29].

Betonun mekanik özelliklerindeki bu artış betonun, karışım oranına, liflerin karışım içerisindeki dağılımlarına, görünüm oranlarına, liflerin geometrik şekline ve miktarına bağlıdır [27,56].

Betonun yararlanılmak istenilen mekanik özelliklerini yükseltmek için birçok değişik geometrik formda çelik lif üretilmiştir ve kullanılmaktadır. 1970'li yıllarda sadece düz çelik lifler kullanılırken sonraları farklı ihtiyaçları karşılamak üzere uçları çengelli, kıvrımlı, yüzey pürüzlülüğü artırılmış, özel deformasyonlar verilmiş ve daha değişik geometrilerde çelik lifler üretmişlerdir. Ancak araştırmalar göstermiştir ki, betonun özellikleri üzerindeki en büyük iyileştirmeyi düz çelik lifler ve ucu çengelli lifler sağlamaktadır. Çelik lifli betonları daha ekonomik hale getirmek için değişik üretim metotları denenmiş ve sonuçta dairesel kesitli olmayan (yarım daire, dikdörtgen ve düzensiz en kesitli gibi) çeşitli tipte lifler de üretilmiştir [29,30].

Çelik lifli betonlar üretilirken genellikle yüzeyi kaplanmamış çelik teller kullanılır. Ancak özellikle yerleştirme işleminden sonra açıkta kalan liflerin paslanarak yüzeyde pas lekeleri meydana getirmesi, aşırı paslanmanın olabileceği ortamlarda ya da estetiğin gözönünde bulundurulduğu mimari yapılarda galvanizlenmiş liflerin kullanılması gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Isıya dayanıklı ve su ile doğrudan temas eden betonlarda ise paslanmaz çelik liflerin kullanılması tavsiye edilir. Bu liflerin mekanik özellikleri diğerleri ile aynı olup, sadece korozyona karşı daha dirençlidirler [27].

Beton üretiminde kullanılan bu çelik lifler, genellikle soğukta çekilmiş düşük karbonlu C 1008 den üretilmiş liflerdir. Yüksek çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özelliğine sahiptirler. Çekme gerilmeleri ortalama olarak 1200 MPa olup elastik limitleri %0,2'nin altındadır [44].

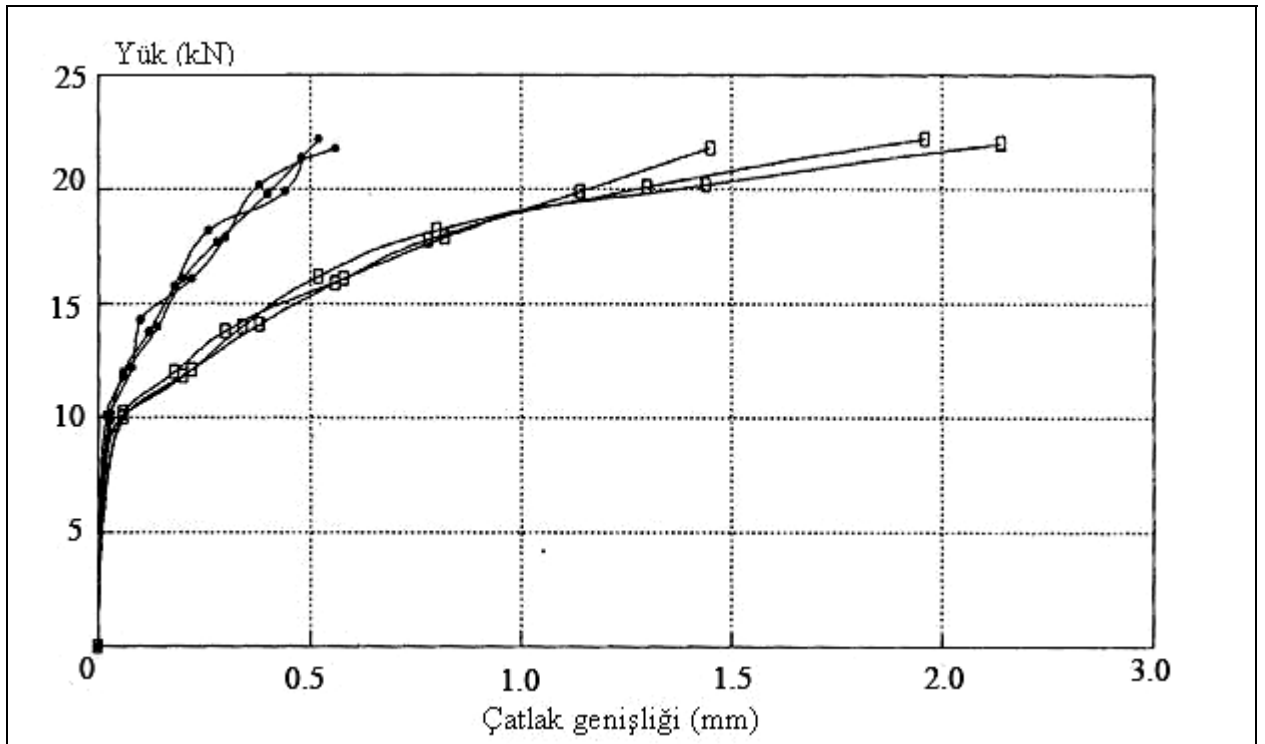
Çelik lifli betonun kesme dayanımı da normal betona göre oldukça yüksektir [57]. Bu nedenle kesme veya burulma elemanlarında da kullanımı oldukça avantajlı görünmektedir. Özellikle, yüksek kirişlerde, betonarme silolarda ve deprem perdelerinde kullanımı çok anlamlı olmaktadır. Bütün bu üstün özelliklerinden dolayı çelik lifli betonun kullanılması halinde kesitler daha küçülerek malzemedeki tasarruf sağlanmaktadır. Bazı yapı uygulamalarında genellikle asal donatıya bile gereksinim duyulmayabilmektedir. Bu yeni malzemenin betonarme döşemelerde, betonarme döşeme kaplamalarında, fabrika inşaatlarında, çeşitli mimari levhaların yapımında, küçük betonarme yapı elemanlarının yapımında kullanılması avantajlı görünmektedir.

McConnel, yaptığı çalışmada bir numuneye kesin olarak bilinen bir deformasyon yaptırarak yarım yük deformasyon eğrisinin integrasyonu ile numune tarafından absorblanan enerjiyi elde etmiştir. Elde ettiği bu değeri yük zaman grafiğinden elde ettiği değerle karşılaştırarak doğruluğunu kıyaslamış ve deneysel olarak yük-zaman grafiğinden elde edilen verilerin yük - deplasman grafiğinden elde edilen verilerle eşit olduğu sonucuna varmıştır [29].

Arslan Ulucan [58], erken yaştaki beton elemanların davranışının karışım içerisine az miktarda çelik lif katılması ile iyileştirilmesi öngördüğü çalışmada, bu amaçla bir seri çelik lifli beton numuneler denerdi. Yüke karşılık çatlak aralığı, genişliği ve sayısı hem normal hem de çelik lifli beton kirişler üzerinde kaydetti. Çelik lif ile güçlendirmenin, eğilme etkisindeki erken yaş betonlarda çatlak genişliği ve deplasmanları azalttığını gözledi (Şekil 10). Taşıma gücü yüklerindeki artış, liflerin katılımının çekme kapasitesini arttırdığını göstermekte olduğu vurgulanarak prefabrike beton endüstrisinde çelik lifli

betonların kullanımı ile hasarlı üretim azaltılarak ekonomi sağlanabileceğini ifade ettiler. Çalışma sonucu olarak ortaya koyduğu genel sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

1. Yapılan yaklaşık ekonomik analizde erken yastaki dayanımı arttırabilmek için prefabrik betonarme yapı elemanlarında liflerin kullanılması ısıtma ve priz hızlandırıcı kullanılmasına göre daha avantajlı görünmektedir.
2. Çelik lifler çatlak genişliklerini, çatlak sayısını ve kiriş deplasmanını önemli ölçüde azaltmaktadır.
3. Çelik lifler erken yastaki betonarme kirişte yük tekrar kaldırıldığında çatlak genişliklerinin kapanma oranını arttırmaktadır.
4. Lif katılması ile betonarme kirişin eğilme etkisindeki erken yaş taşıma gücü artırılmaktadır. Bu durum da betonun çekme ve basınç dayanımında artışlar sağladığını göstermektedir.



Şekil 10. Lifli ve normal beton kirişlerde çatlak genişliğinin yük ile değişimi

1.5.2. Çelik Lifli Betonların Hazırlanmasında Dikkat Edilecek Hususlar

Geleneksel beton üretilirken uyulması gereken kurallar genel olarak çelik lifli beton üretiminde de geçerlidir. Betonda yeterli fiziksel ve kimyasal dayanıklılık için gerekli olan

kaliteli malzeme, düşük su/çimento oranı, optimum çimento dozajı, iyi sıkıştırma ve iyi işçilik gibi unsurların sağlanması gerekir. Çelik lifli beton karışımında sıkça rastlanan iki sorundan birisi, çelik liflerin bir araya gelip topaklanarak işlenebilirliği zorlaştırmaları ve karışım sırasında liflerin eğilerek deforme olmalarıdır. Çelik tel fiberli betonlarda, normal betonlarda olduğu gibi iyi bir karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma sonrasında ortaya çıkabilecek dayanıklılık problemi önlenmiş olur [27].

Türk Standartlarının hazırlamış olduğu “Beton - Çelik Tel Takviyeli - Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları” standardı olan TS 10514/92’de [43] çelik lifli taze beton karışımlarının hazırlığı sırasında karışımların homojen olması ve işi kolaylaştırmak için bir takım kurallar getirilmiştir. TS 10514/1992 tarafından belirtilen bu kurallar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

— Homojen bir beton karışımı elde etmek için temel ilkelere (TS 1247, TS 1248) dikkat edilmelidir.

— Kritik çelik tel miktarı aşılmamalıdır.

— Çelik tel teçhizatlı betonun karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda tel miktarını artırmayı sağlamak amacıyla ince agrega kullanılmalıdır.

— Taze betonda; homojen tel dağılımı gözle kontrol edilmeli birbirlerine yapışık teller halinde betona karıştırılan tel demetler veya teller beton içinde tamamen dağılıp ayrılıncaya kadar beton karışımı devam etmeli ve üniform dağılım göz ile fark edilmelidir.

— Tel takviyeli beton döküm yerine kamyon ve transmikser ile nakledilebilir. Transmikser kullanıldığında mikser düşük hızda döndürülmelidir.

Çelik liflerin beton içerisinde gerilmeler altında istenilen davranışını gösterebilmesi için lifi saran matrisin boşluksuz, rijit, yoğun ve istenilen dayanımda olması gerekir. Bu sıkı yapının sağlanması durumunda liflere gelen gerilmeler matris aracılığıyla diğer bir life aktarılacak ve böylece gerilme transferi sağlanacak ve betonun kusurlu bir bölgesine gelen bir gerilme, bu gerilme transferi ile betonun sağlam bölgesine aktarılmış olacaktır. TS 10514’te Lifi beton içerisindeki davranışını etkileyen önemli parametre olan matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi bakımından bir takım sınırlamalar getirilmiştir. Buna göre;

Çimento miktarı en az 320 kg/m^3 ve kum (0–4 mm) miktarı, toplam agrega kütlelerinin % 40 - % 45’i olmalıdır.

D_{max} , doğal agrega için 28 mm, doğal olmayan agrega (kıрма taş) için 32 mm, olmalıdır. 14 mm’den büyük agrega oranı % 15 – % 20 ile sınırlandırılmıştır.

Su/çimento oranı en çok 0.55 olmalıdır, işlenebilirliğin sağlanması için akışkanlaştırıcı katkıları kullanılabilir.

Betonun karakteristik basınç mukavemeti en az 20 N/mm² olmalıdır.

TS 10514'e [43] göre betonda bulunması gereken 0.25 mm'den küçük ince malzeme miktarı aşağıda verilen Tablo 4 değerlerini sağlamalıdır.

Tablo 4. Çelik lifli betonda bulunması gereken ince malzeme miktarı

En büyük agrega dane boyutu	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

Çelik liflerin betonun içerisine katılma oranları hacimce % 0.5 - % 2.5 arasında olabileceği daha önce yapılan araştırmalarla belirtilmiştir. Ancak yapılan bu araştırmalar sonunda optimum faydanın hacimsel oranın % 1–2 olması halinde sağlandığı, lif miktarlarının bu orandan az olması çelik lifli betonun teknik özelliklerinin genelsel betonunkine oranla yeteri kadar iyileştirmediği, bu orandan fazla lif eklenmesi durumunda ise topaklaşma ve liflerin deformasyonu ve maliyet sorunları ortaya çıkmaktadır [29]. Bu nedenle kullanılacak maksimum tel miktarı TS.10514 standardına göre Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. TS.10514'e göre betona ilave edilebilen maksimum tel miktarı, (kg/m³)

En büyük dane çapı (mm)	Uzunluk/çap=60		Uzunluk/çap=75		Uzunluk/çap=100	
	Normal	Pompa	Normal	Pompa	Normal	Pompa
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

Tablo 5'ten de anlaşılacağı gibi çelik lifin görünüm oranı arttıkça betona ilave

edilebilecek çelik lif miktarı azalmaktadır. Aynı şekilde pompa betonlarında kullanılan lif miktarı da pompalamada yaşanabilecek sorunlar nedeniyle yerinde döküm lifli betona göre bir miktar daha azdır. Beton karışımı esnasında homojen tel dağılımı gözle kontrol edilmeli, birbirine yapışık teller ayrışmaya kadar karıştırma işlemine devam edilmelidir.

Çelik teller, beton karışımında kum ve agreganın üzerine dökülmelidir. Karışıma su, çimento ve gerekli ise katkı maddesi eklenerek karıştırılmalıdır. Karıştırma işlemi bütün teller ayrışmaya kadar devam etmelidir. Bu süre ortalama olarak 1–2 dakikadır. İkinci bir yöntem olarak lifler, karıştırma kazanı içine en son olarak da ilave edilebilir [43].

Lif seçiminde dikkat edilebilecek bir husus da lif boyunun agrega maksimum tane çapının en az 1.5- 2 katı olması gerekliliğidir [43].

Çelik lifli betonların yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve mastarlama işlemleri geleneksel aletlerle yapılabilir. Çelik lifli betonların yerleştirilmesi sırasında dışsal vibrasyon ile sıkıştırılma tercih edilir. Dışsal vibrasyon sağlanamayan durumlarda içsel vibratörler kullanılabilir. Fakat çubuk tipi daldırma vibratörlerinin kullanılmasından kaçınılmalıdır. Bu tip vibratörlerin kullanılması sırasında lifler dönerek belli yerlerde lif yığılmasına sebep olur.

Açık döşeme yüzeyleri perdelanırken vibrasyonlu mastarlar kullanılmalı veya daha önceden içsel vibratörlerle yerleştirilmiş beton, perdel makinesiyle tesviye edilmelidir.

Aşırı paslanmanın olabileceği durumlarda ise galvanizlenmiş liflerin kullanılması daha uygundur.

1.5.3. Çelik Lifli Betonların Kullanım Alanları

Yapı uygulamalarında genellikle, çelik lifli betonlar sadece kırılmayı önlemek için değil aynı zamanda dinamik yüklemelere karşı, çarpma mukavemetini arttırmak, malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de sıklıkla kullanılmaktadırlar [28].

Kirişlerde, kolonlarda ve kat döşemelerinde olduğu gibi diğer yapı elemanlarında da eğilme veya çekme kuvvetleri meydana gelmektedir. Bu basınç, eğilme ve çekme kuvvetlerinin birlikte oluşturduğu gerilmelerden dolayı ve zor kesit tesirlerine karşı yapı elemanı asal çelik donatı ile birlikte çelik lifler ile kuvvetlendirilerek dayanımı oldukça önemli mertebede artırılabilir. Çelik lifli beton düktilitesi normal betona göre oldukça yüksektir. Bu yüzden çarpma etkisine, titreşimli yük etkisine ve dinamik yük etkisine karşı normal betona göre daha dayanıklıdır. Deprem oluşması olasılığı yüksek olan bölgelerde,

konutlar da dâhil olmak üzere her türlü yapılarda kullanılması uygun olmaktadır [29]. Aşağıda çelik lifli betonun yapısal ve yapısal olmayan kullanımlarından bazı örnekler verilmiştir.

Çelik lif katkılı betonlar son yıllarda; tünel inşaatlarında, şev stabilitesi çalışmalarında, onarım ve güçlendirme işlerinde, baraj inşaatlarında, liman yapılarının onarım ve güçlendirmesinde, beton büz borularda ve betonarme çerçevelerde, beton dayanımına olan olumlu etkileri ve enerji yutma kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle yaygın olarak uygulama alanı bulmaktadır [59].

Çelik lifli beton endüstri yapılarında çarpma rijitliğini sağlamak, termal etkilere karşı dayanıklılığı artırmak için kullanılmaktadır [29].

Barajlar, kanallar, dinlendirme havuzları ve dolu savaklarda plak yerine veya kavitasyon hasarlarına karşı koymak için, kaplama olarak çelik liflerin kullanımı yaygındır [29].

Çelik lifli betonların sahip oldukları yüksek eğilme ve yorulma mukavemetleri nedeni ile havaalanı uygulamalarında, kaplama kalınlığı lifli betonlarla azaltılması mümkündür. Çelik lifler özellikle, normal plaklardan daha ince plak yapılması istendiği durumlarda kullanılırlar [27].

Beton yol uygulamalarında kaplama kalınlığının daha ince olmasının istendiği durumlarda çelik lifli betonların kullanımını uygundur. Günümüzde çelik lifli betonlar yollarda, otobanlarda, köprülerde ve hava alanlarında başarıyla kullanılmaktadır [41].

Eddington'a göre çelik lifler tünellerde ve maden ocaklarında zeminin desteklenmesi için genellikle kaya ankraj bulonları ile birlikte kullanılmaktadır. Bu şekildeki kullanımın klasik kullanıma göre avantajları üç grupta özetlenebilir. Kullanılan toplam beton miktarından tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca hasır çelik ve üst kaplama yapılmamaktadır. İlave olarak da işlem miktarı azaldığından yapım süresi daha da kısalmaktadır [29].

Çelik lifli beton karayollarını ve demiryollarını kesen, yer üstündeki kaya veya topraktan oluşan dik şevlerin yada toprak setlerin stabilitesinin sağlanmasında kullanılmaktadır [26,29].

Çelik lifli betonun üstün nitelikleri kesit kalınlıklarının azaltılmasını mümkün hale getirdiğinden, ince kabuk yapılarda, kubbelerde, katlanmış plaklarda ve çeşitli mimari nedenlerle ince olması gereken yapı elemanlarında kullanılması uygun olmaktadır.

Genellikle normal donatı çubukları ile birlikte kullanıldığında, güç santralleri ve askeri tesislerin yapımında çok uygun bir kullanım arz etmektedir. Özellikle çok önemli askeri

tesislerin yapımında bu özelliğinden dolayı kullanımı tercih edilmektedir. Uzun yıllardan beri Amerikan askeri tesis yapım şartnamelerinde yer almakta yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [29].

Gelecekte deprem tesirinin etki etmesi muhtemel olan yerlerde, depreme dayanıklı yapılarda kullanılabilir.

Büyük sıcaklık farklılıkları ile karşı karşıya kalabilecek, termal ve mekanik şok tehlikesi olan ve aynı zamanda yük taşıyacak olan yapılarda da çelik lifli beton kullanılmaktadır [27].

Günümüzde yüksek mukavemetli betonlara ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu betonların normal mukavemetli olanlara göre olumsuz yönü göçme esnasında bağıl olarak az enerji yutmalarıdır. Böylece gevrek davranış gösteren yüksek mukavemetli betonların yerini sünekliği artırılmış yüksek performanslı sahip ultra yüksek mukavemetli betonlar alması söz konusu olmaktadır. Ultra yüksek mukavemetli betonlar; 28 günlük basınç mukavemeti 2000 kg/cm^2 'den fazla olan betonlardır. Ultra yüksek mukavemetli çimento esaslı kompozitlerin üretiminde ince agrega ve çimentoya ilave olarak 0.15 mm çapında ve 5 – 10 mm boyunda kısa kesilmiş çelik tel, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılmaktadır. Bu kompozitleri üretmekle betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega – çimento hamuru arasındaki boşluklar ve harçtaki kusurlar minimum yapılabilmekte ve gevrek davranışa sahip bu çok yüksek mukavemetli betona kısa kesilmiş ince çelik tellerle sünek davranış özelliği kazandırılmaktadır [41].

Serbest yüzeyli büyük akım hızlarının yer aldığı su yapılarında karşılaşılan kavitasyon ve bunun sebep olduğu hasarların önlenmesinde de çelik liflerin kullanılması oldukça uygun bir çözümdür [27].

1.5.4. Çelik Lifli Betonun Mekanik Özellikleri

1.5.4.1. Çelik Lifli Taze Betonun Özellikleri

Taze beton özelliği denilince akla ilk gelen işlenebilirliktir. İşlenebilirlik kavramı içine betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve homojenliği girer.

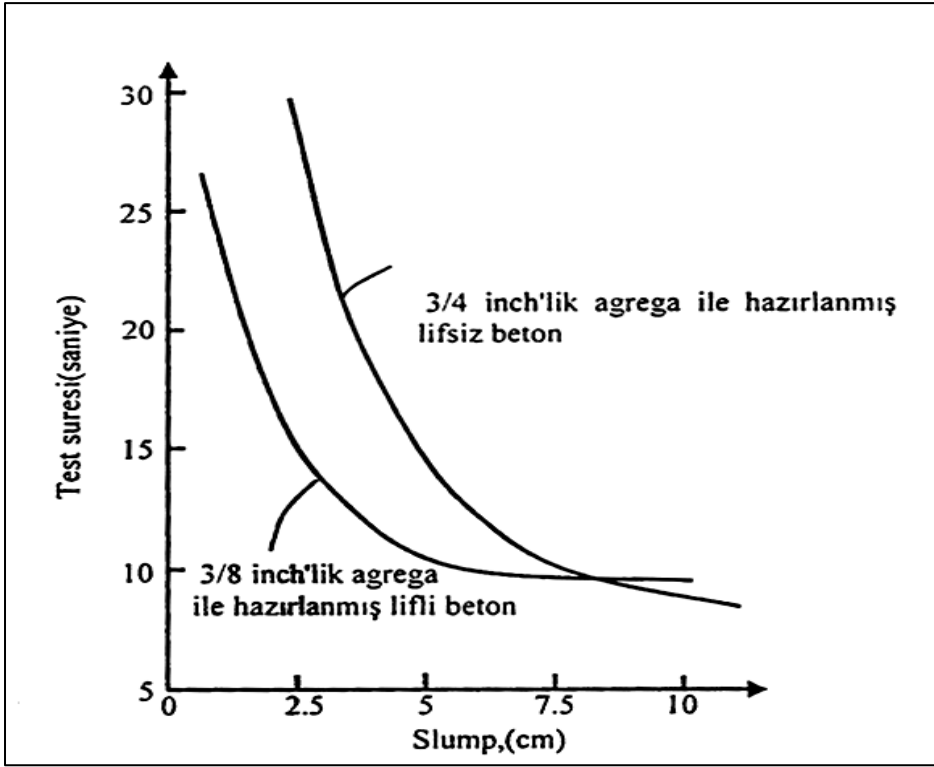
Normal betonlarda olduğu gibi çelik lifli betonun da davranış ve özelliklerinin istenilen şekilde gerçekleşebilmesi için betonun planlanmasından başlayıp bakımının tamamlanması ile son bulan üretim süreçlerinin doğru tasarlanıp uygulanması

gerekmektedir. Başlangıçta karmaşık görünse de zorunluluklar yerine getirildiği takdirde herhangi bir problemle karşılaşılmamaktadır [33].

Taze beton karışımının işlenebilirliği, onun taşınma, karıştırılma ve en önemlisi minimum hava içeriği, minimum homojenlik kaybıyla yerleştirilme ve sıkıştırılmasının bir ölçüsüdür. Bu karakteristiklerin birini ya da daha fazlasını değerlendirmek için birçok test yöntemleri mevcuttur [60].

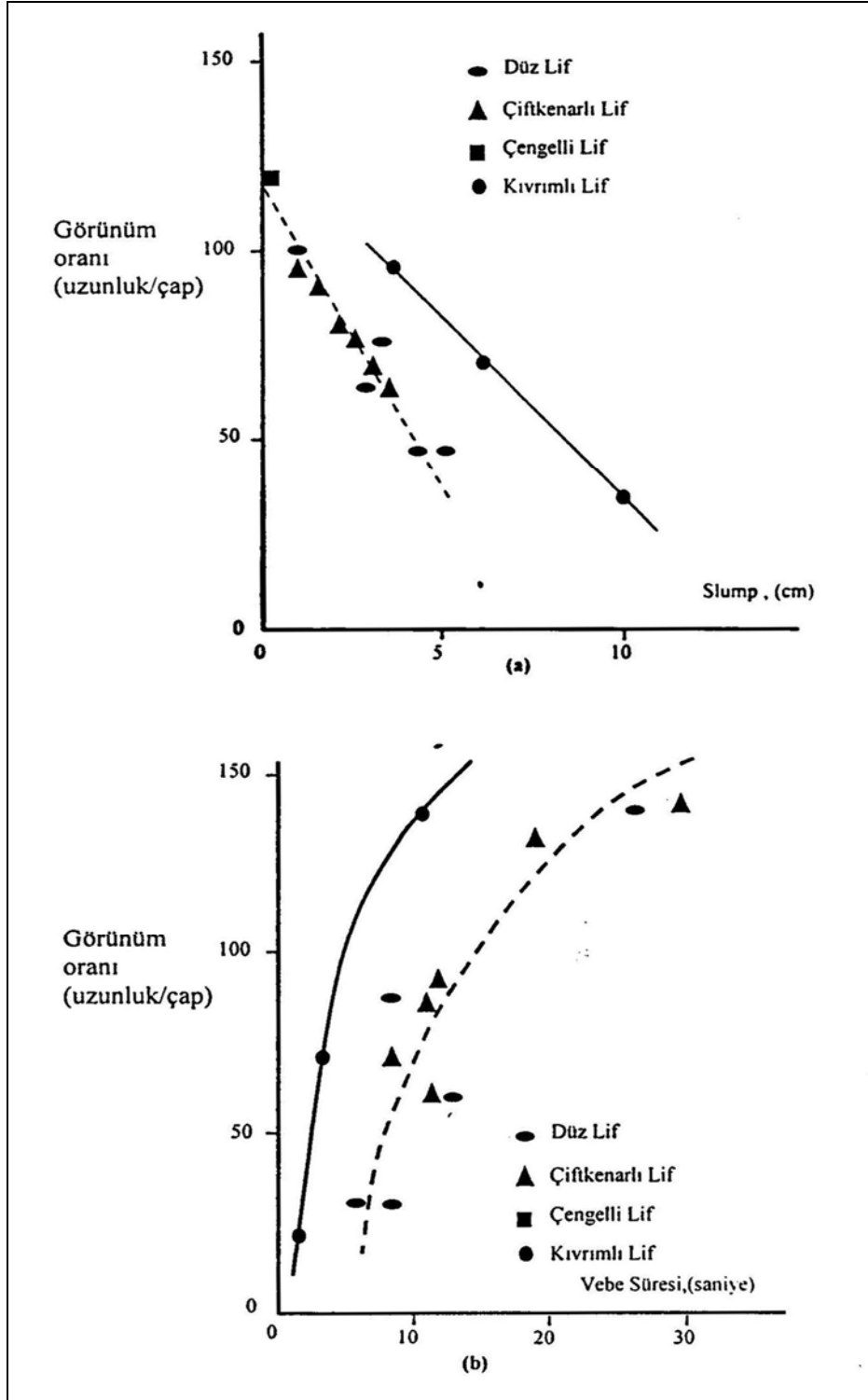
Schnütgen'e göre, çelik lifli betonun taze beton özelliklerinden bahsedildiğinde, herkesin aklına öncelikle betonun işlenebilirliği gelmektedir. Beton işlenebilirliği genellikle onun yayılma derecesi ile tanımlanır. Düşük ve orta lif miktarına bağlı olarak azalır. Akışkanlık meydana getiren madde katkıları ile daha düşük su/katkı değerlerinde daha iyi bir işlenebilirlik derecesine ulaşılabilir [60].

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda betona lif ilavesi ile işlenebilirlikte azalmalar görülmüştür. Bu azalma üzerindeki en önemli iki parametre, karışımdaki lif hacmi ve lifin görünüm oranıdır. Lifsiz betonlarda işlenebilirliği ölçmede kullanılan slump yöntemi çelik liflerle güçlendirilmiş betonlarda pek sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle çelik lifli betonların işlenebilirliğini ölçmek için en uygun yöntem VE-BE deneyidir [58,61]. Ancak bu deney de şantiye koşullarına uygun değildir. Gerek şantiye gerekse laboratuvar şartlarında kullanılabilen işlenebilirlik ölçme yöntemi ASTM C 995'de tanımlanan ters çevrilmiş koni deneyidir [62].



Şekil 11. Çelik lifli ve lifsiz betonlarda ters koni yöntemi ile yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 11'de ters koni yöntemi ile lifsiz ve lifli betonlarda yapılmış işlenebilirlik deney sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi düşük çökme değerlerinde lifli beton vibrasyona iyi cevap vermektedir. Çökmenin 5–7.5 cm olduğu aralıkta bu eğri değişmemektedir [27].



Şekil 12. Lif şekli ve lif görünüm oranına göre işlenebilirliğin değişimi

Şekil 12' de lif şekli ve lif görünüm oranına göre işlenebilirliğin değişimi verilmiştir. Yapılan araştırma sonucunda aynı lif hacminde, kıvrımlı liflerin kullanıldığı karışımların işlenebilirlik açısından en iyi sonuçları verdiği gözlenmiştir. Ayrıca lif tipine göre

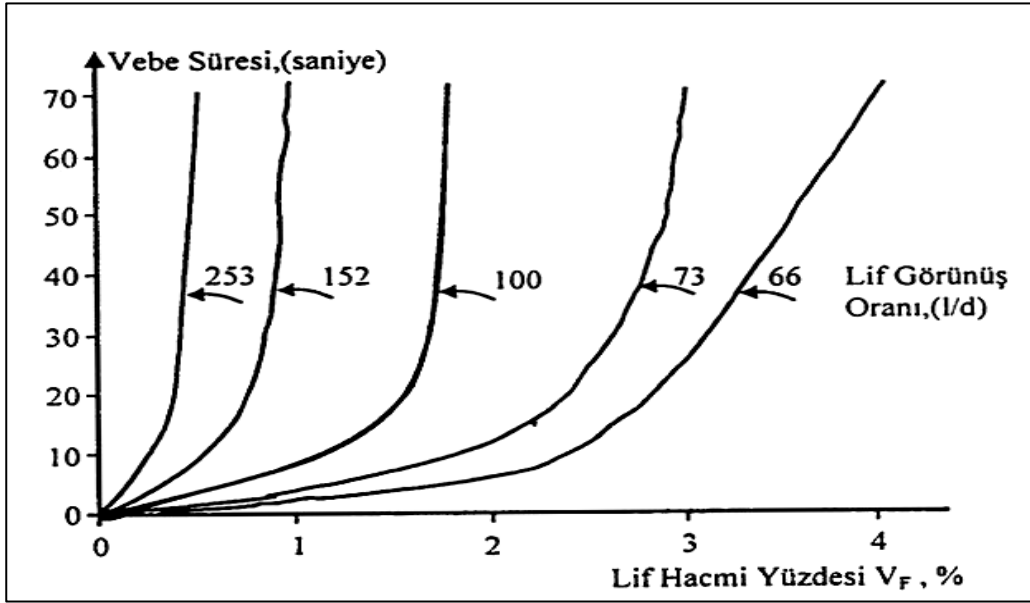
işlenebilirlikteki azalma ise en az kıvrımlı liflerde olmak üzere düz lifler, çift kenarlı lifler ve çengelli lifler sırasına göre olduğu belirtilmiştir. Yapılan çalışmanın bir diğer sonucu ise liflerin görünüm oranının büyümesi ile işlenebilirlikte önemli azalmalar tespit edilmiştir [27,63].

1.5.4.1.1. İşlenebilirlik ve Kıvam

Lifli betonda işlenebilirlik olarak tanımlanan, taşıma, yerleştirme, sıkıştırma ve homojenlik, lifli betonun sertleşmiş beton özelliklerini ve performansını önemli derecede etkiler. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda betona lif ilave edilmesiyle işlenebilirlikte önemli azalmalar tespit edilmiştir. Lifli betonun işlenebilirliği etkileyen faktörler, maksimum tane çapı, tane dağılımı, lif hacmi, lif tipi, narinlik oranı, hava miktarı, su/çimento oranıdır. İşlenebilirliği azaltan iki parametre ise karışımdaki lif hacmi ve narinlik oranıdır [64].

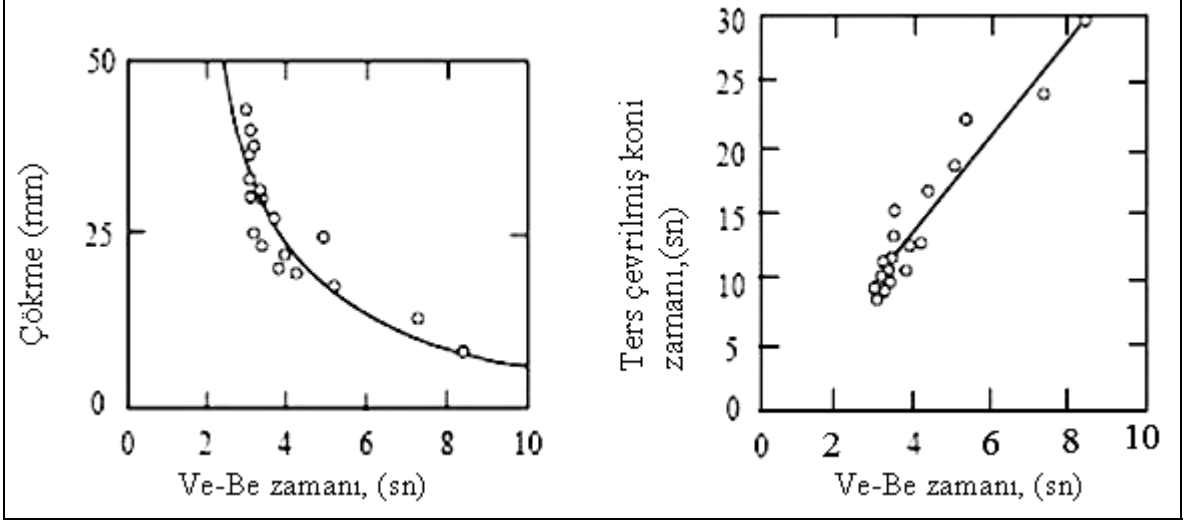
Betonun içerisine çelik liflerin katılması sonucu taze beton özelliklerinde bir takım değişiklikler görülmektedir. Betonda çelik lif kullanımı, betonun hazırlanma, taşınma, yerleştirme ve sıkıştırma sürecini ifade eden işlenebilirliğini etkilemektedir. Şimdiye kadar yapılmış tüm çalışmalar betona lif ilavesinin işlenebilirliği azalttığını betondaki boşluk miktarının ise lif ilavesi ile arttığını göstermektedir. Bu azalma üzerindeki en önemli parametre lif tipi, lif hacmi ve lif görünüm oranıdır. Betondaki lif içeriğinin artması ve görünüm oranının büyümesi işlenebilirliği azaltır. Ayrıca lifin geometrik şekli yani liflerin kıvrımlı, çentikli, çift kenarlı olması da işlenebilirliği etkileyen faktörlerdir [35,65].

Lifsiz betonlarda kıvam ölçümü için kullanılan slump (çökme) deneyi, çelik lifli betonlar için pek uygun değildir. Laboratuvar koşullarında olmak şartıyla çelik lifli betonların işlenebilirliğini ölçmek için en uygun yöntem Ve-Be deneyidir. Ve-Be deneyinin şantiyede uygulanabilirliğinin zorluğundan ötürü, şantiyelerde uygulanmak üzere ise ters çevrilmiş koni deneyi daha uygundur. Şekil 13'te lif hacmi ve lif görünüm oranı artışı ile işlenebilirlikteki azalmalar Şekil 14'te ise Slump-Ve-Be deneyleri ve ters çevrilmiş koni-Ve-Be deneyleri arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 13. Lif hacmi ve lif görünüm oranı artışı ile işlenebilirlikteki azalmalar

Lif hacmi ve lif görünüm oranının işlenebilirliğe etkisini araştırmak amacıyla yapılan çalışmalarda değişik lif hacimleri ile üretilen betonlarda yeterli işlenebilirliği sağlamak için çeşitli miktarlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanmış ve katkı miktarının artmasıyla işlenebilirlikte iyileşme olduğunu görmüştür. Özellikle çimento ağırlığının % 0.3'ü oranındaki katkı maddesi kullanılarak yapılan deneylerden işlenebilirlikte önemli artışlar tespit edilmiştir. Yapılan Ve-Be ve ters koni deneyleri sonunda ise lif hacmi yüzdesinin yaklaşık % 0.6 – 0.8 değerlerinden sonra işlenebilirlikteki zorlukların arttığı belirlenmiştir [27].



Şekil 14. Slump - Ve-Be deneyleri ver ters çevrilmiş koni -Ve-Be deneyleri arasındaki ilişki [35].

Ters çevrilmiş koni deneyi, standart slump konisinin ters çevrilerek kullanımı ile yapılır. Ters çevrili halde bulunan slump konisinin içi herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan beton ile doldurulur. Daldırma tipi vibratör beton dolu koninin merkezinden düşey olacak şekilde aşağıya doğru kendi ağırlığı ile bırakılır. Vibratörün betonun içinden geçip tabana değdiği süre tespit edilir. Geçen bu süre ters çevrilmiş slump koni zamanı olarak belirlenir. Bu deney yöntemi lifli betonlar ve slump deneyinde katı kıvam olarak nitelenen betonlar için daha uygundur [53].

1.5.4.1.2. Tasarım ve Karışım Esasları

Çelik lifli betonlar üretilmeden önce, betonun nerede kullanılacağı, yapıda hangi etkiler altında kalacağı ve ondan beklenen özellikler gibi parametreler açıkça belirlenmeli ve daha sonra bu kullanıma uygun malzemelerin tespit edilerek temin edilmesi gerekmektedir [27].

Lifsiz betonlarda olduğu gibi çelik lifli betonun değişik yapılarda doğru kullanımı büyük çapta mühendislik yargı ve deneyimine, ayrıca tasarım yapan kişinin hem lifli betonu hem de onun kullanılacağı yapıyı ve yapıya gelen yükleri iyi tanıyıp doğru değerlendirmesine dayanır. Lifli beton üretilmeden önce, betonun nerede kullanılacağı, yapının esası ya da bir parçasını olacağı, yapıda hangi etkiler altında kalacağı ve bu betondan beklenen özellikler açıkça belirlenmelidir.

Lifli beton uygulamalarının başarılı olabilmesi için yani betona lif katılması sonucu elde edilmek istenen teorik performansın yakalanabilmesi için dikkat edilmesi gereken en önemli süreç karışım işlemidir.

Üretimi normal beton üretimi ile benzeşimler gösterse de gerek karışım hesaplarının tasarımı açısından gerekse çelik lifli betonda kullanılması sonucu yeni karıştırma ve taşıma tekniklerini zorunlu kılması açısından oldukça değişiktir. Lifli beton üretiminde lifin davranışını etkileyen önemli parametrelerden biri olan matris özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile bir dizi sınırlamalar getirilmiştir bunlar:

Portland ya da Katkılı Portland Çimentosu kullanılmalı, Matrisin kalitesi için maksimum su/çimento oranı 0.40 ile 0.55 arasında alınmalıdır. Minimum çimento dozajı 320 kg/m^3 olmalı, Kum miktarı toplam agrega kütlelerinin en az % 40 – 55'i ($750\text{--}850 \text{ kg/m}^3$) olmalıdır. Karışımlarda doğal kum kullanılmalı, Matrisi güçlendirmek için doğal puzolan, uçucu kül ve silis dumanı kullanılmalıdır [27].

Ayrıca çelik lifli taze beton karışımlarının hazırlığı sırasında karışımların homojen olması için ya da işi kolaylaştırmak için bir takım kurallar getirilmiştir. TS 10514'de [43] yer alan kurallar aşağıda özetlenmiştir.

1. Kritik çelik tel miktarı aşılmamalıdır.
2. Çelik tel teçhizatlı betonun karışımını kolaylaştırmak ve gerekli olduğunda tel miktarını artırmayı sağlamak amacıyla ince agrega kullanılmalıdır.
3. Taze betonda; homojen tel dağılımı gözle kontrol edilmeli birbirlerine yapışık teller halinde betona karıştırılan tel demetler veya teller beton içinde tamamen dağılıp ayrılıncaya kadar beton karışımı devam etmeli ve üniform dağılım göz ile fark edilmelidir.

Tel takviyeli beton döküm yerine kamyon ve transmikser ile nakledilebilir. Transmikser kullanıldığında mikser düşük hızda döndürülmelidir.

1.5.4.2. Çelik Lifli Sertleşmiş Betonun Özellikleri

Bilindiği üzere betonun çekme mukavemeti basınç mukavemetine göre oldukça küçüktür. Betona belirli oranda çelik lif ilave edilmesiyle betonun başta çekme ve eğilme mukavemeti olmak üzere birçok mekanik özelliğinde iyileşme sağlanmaktadır [41].

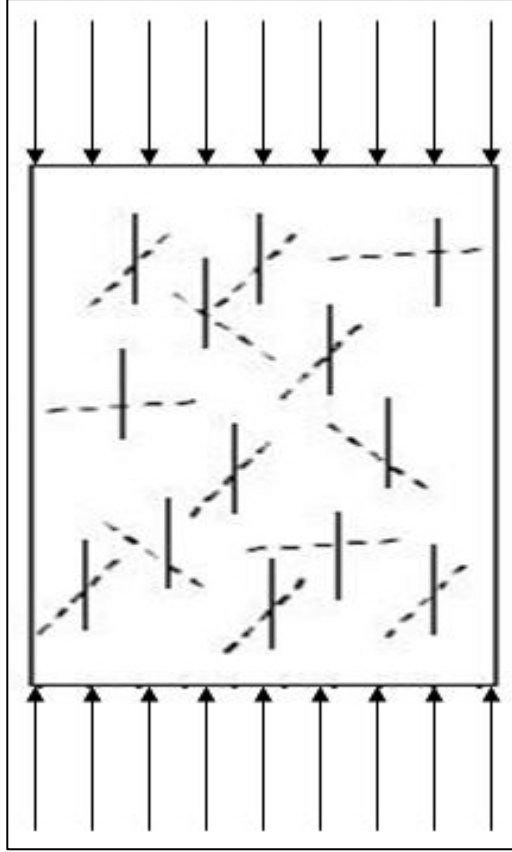
Schnütgen'e göre çelik lifli betonun sertleşmiş beton özelliklerinden söz ederken; lifin çatlak oluşumuna, çatlak ilerlemesine ve çatlakan betona olan etkisinin birbirinden ayrı ayrı dikkate alınması gerekmektedir.

Beton prizini tamamladıktan sonra sertleşmiş beton özellikleri olarak enerji emme kapasitesi, darbe dayanımı, ilk çatlak dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde lifler etkilidir [27].

1.5.4.2.1. Çelik Lifli Betonlarda Basınç Dayanımı

Çelik lifli betonların basınç yükü altındaki davranışlarına bakıldığında, liflerin betonun basınç dayanımını her zaman olumlu yönde etkilemediği görülmektedir. Bazen betonun basınç dayanımını artırırken bazen de dayanım kayıplarına yol açtığı gözlenmektedir. Ayrıca liflerin uygulanan basınç yüküne göre yönelimleri lifli betonların basınç dayanımlarında etkili olmaktadır [27].

Yapılan araştırmalar betona ilave edilen çelik liflerin basınç ve çekme mukavemetleri üzerinde de etkisi olduğunu bildirmişlerdir. Bu etkinin olumlu veya olumsuz olması liflerin beton içerisindeki dağılımına bağlıdır. Yani yükleme eksenine dik olan lifler mukavemet üzerinde herhangi bir etki etmezken, liflerin yükleme eksenine paralellikleri arttıkça mukavemet üzerindeki olumlu etkileri de artmaktadır [41]. Şekil 15'te Basınç dayanımına etkileyen lif yönlenmesi görülmektedir.



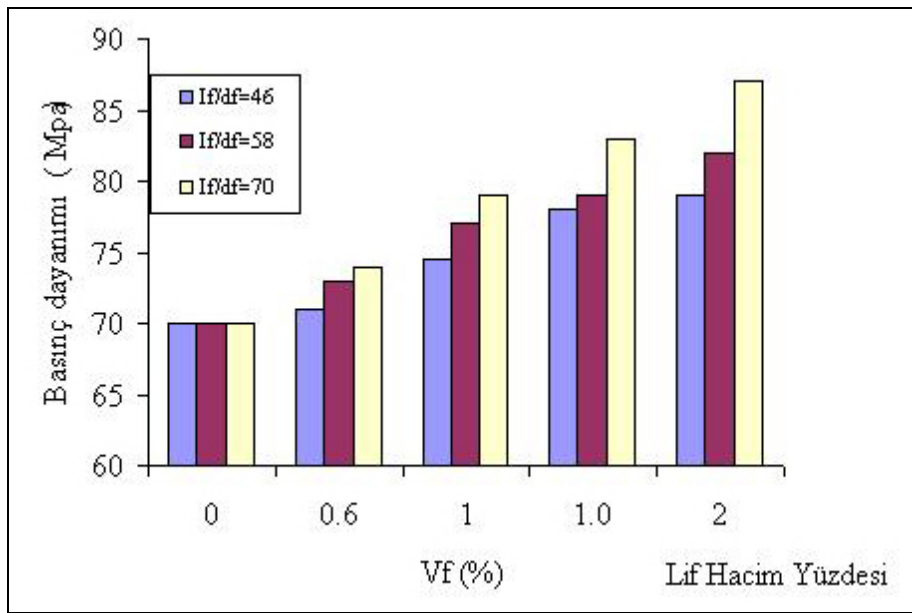
Şekil 15. Basınç dayanımına etkileyen lif yönlenmesi

Şekil 15'ten de görülebileceği gibi yükleme düzlemine dik olan lifler basınç gerilmesinde herhangi bir işlev üstlenmezler. Kesikli çizgiler ile gösterilmiş olan lifler ise yükleme düzlemine paralellikleri ölçüsünde basınç gerilmesi artmasında etkilidirler. Nihai yükte belirgin bir artış olmamasına karşın, lifli beton tek eksenli yükleme altında daha sünek davranabilmektedir. Hatta numune boyunun %10 kadar kısaldığı yüklemelerde bile, numune hala yük taşıyabilmekte ve parçalanmamaktadır.

Çelik lifli betonlar üzerinde yapılmış değişik araştırmalarda liflerin betonun basınç dayanımına % 25 gibi bir artış sağladığı bazı araştırmalarda ise liflerin basınç dayanımına bir etkisinin olmadığı görülmüştür [42]. Liflerin basınç dayanımına etkisi, liflerin beton içerisindeki yönelimleri ile ilgilidir. Betona uygulanan, yükleme düzlemine dik olan liflerin basınç dayanımına etkisinin olmadığı kabul edilmektedir. Beton içerisinde yükleme düzlemine paralel yerleşmiş lifler ise basınç dayanımının artmasına yönünde etkilidirler.

Gao vd. [66] yaptıkları çalışmada lifsiz ve hacimce % 0.6, 1.0, 1.5, 2.0 oranında lif içeriğine sahip yüksek dayanımlı hafif betonlar numuneler üzerinde çalışmışlardır. Beton üretiminde kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı katkı ve mineral katkı olarak silis

dumanı kullanmışlardır. Lif içeriğinin ve görünüm oranının işlenebilirliğe etkisinin araştırıldığı çalışmada uzunlukları 20, 25 ve 30 mm, görünüm oranları ise 46, 58 ve 70 olan çelik lifler kullanılmış ve deneyler sonucunda lif içeriğinin ve lif görünüm oranının artması ile betonların basınç dayanımlarının da doğru oranda arttığı sonucuna varılmıştır. Basınç dayanımındaki artış düşük oranda bir artış olup lif içeriğinin ve lif görünüm oranının artmasıyla 70.2'den 85.4 MPa değerine çıkmıştır. Ayrıca lif içeriğinin % 2.5 değerinden fazla olması durumunda verimli lif dağılımının sağlanamadığı görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda basınç dayanımındaki artış Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. Basınç dayanımına V_f ve l/d ' nin etkisi [66].

Balaguru [67] yaptığı çalışmada hızlı dayanım kazanan çimento ile hazırlanmış çelik lifli betonların basınç ve eğilme dayanımları üzerinde çalışmıştır. Yaptığı çalışmalarda uzunlukları 20 – 60 mm arasında değişen lifler kullanmıştır. Ucu çengelli ve kıvrımlı lifler olan bu lifler karışıma hacimce % 0.4 - 1.2 arasında değişen oranlarda katmış ve yapılan deneyler sonunda numunelerde meydana gelen basınç dayanımındaki artışın % 5-25 arasında olduğunu ve hızlı dayanım kazanan çimento ile üretilen çelik lifli betonların performansının portland çimentosu ile üretilen çelik lifli betonlardan pek farklılık göstermediği sonucuna varmıştır.

1.5.4.2.2. Çelik Lifli Betonlarda Çekme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı, betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekildeğişimlere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği direnç olarak tanımlanır [1].

Çekme gerilmeleri, bir çatlaktan pek çok çatlağın yayılmasına sebep olarak betonda göçmeye neden olur. Çatlak gelişimine karşı betonun direncini ve düktilitesini artırmak için betonun liflerle güçlendirilmesi etkili bir yoldur [29, 68].

Betonun çekme dayanımını artırmak amacıyla yapılan ilk çalışmalar ise 1963 yılında Romualdi ve Mandel tarafından başlatılmıştır. İki araştırmacı betonun çekme bölgesinde birbirine paralel olarak yerleştirilmiş ince teller bulunan kirişler üzerinde deneyler yaparak kirişin eğilme dayanımının arttığını ve kırılma yüküne kadar çatlakların fazla büyümediğini gözlemlemişlerdir. Eğilme deneylerinde, maksimum eğilme yükündeki şekildeğişimlerin artan lif miktarı ve boyutunun bir fonksiyonu olarak önemli bir artış gösterdiği belirtilmektedir. Betonun içine liflerin katılmasının ilk çatlak oluşumunda, gerilme ve deformasyonlar üzerinde önemli etkisi vardır. Fakat bu etki maksimum yüklemeye elde edilen sonuçlara göre daha azdır [26].

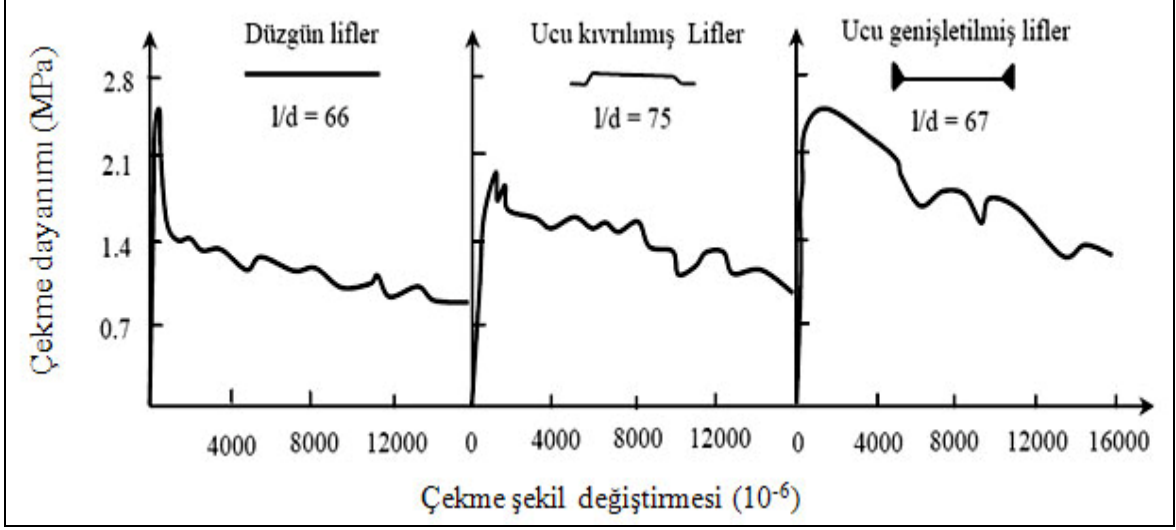
Soroushian ve Lee [68] yaptıkları çalışmada geleneksel betonun çekme mukavemetinin çok düşük olduğunu gerçeğinden yola çıkarak, betonun çekme mukavemetini artırmanın yollarından birinin de betonun içyapısında bulunan kusurların büyümesini ve çoğalmasını engellemek olduğunu belirtmişlerdir. Bu kusurların ve gerilmeler sonucu oluşacak çatlakların büyümesini ve yayılmasını önlemek için betona homojen bir şekilde çelik lif ilave edilmesinin uygun olacağını belirtmişlerdir.

Çelik lifli betonların çekme dayanımları geleneksel betonlara göre daha yüksektir. Çelik lifli betonların çekme dayanımları lifin şekline, lif miktarına, lifin görünüm oranına, liflerin beton içerisinde dağılıma şekline ve lif-matris aderansına göre geleneksel betonlara oranla % 25–100 arasında artış gösterdiği belirtilmektedir [27].

Çekme gerilmesi almadığı kabulüne göre tasarlanan beton elemanlarında özellikle dinamik yüklere maruz kaldığı deprem, türbülanslı su akımı, patlama vb. durumlarda dinamik çekme gerilmeleri ve dolayısıyla çekme gerilmelerinin neden olduğu göçmeye sebebiyet veren çatlaklar oluşmaktadır. Beton elemanlar için tehlike çekme dayanımı oluşturan bu gibi durumlarda çekme gerilmelerine maruz kalabilecek bölgelerde, çekme gerilmesinin daha homojen yayılımını sağlamak, dinamik etkiler altında oluşabilecek mikro ve makro çatlak oluşumuna karşı betonunun dayanımını arttırmak için çelik liflerin

kullanımı oldukça faydalı olduğu yapılan çalışmalarla belirtilmiştir.

Shah yaptığı çalışmada oluşan ilk çatlağın normal betonlardaki gibi gerilme-şekil değiştirme eğrisinin üst bölgelerinde oluştuğunu vurgulamış ve eğrideki azalma bölgesini liflerin şekli, hacmi ve görünüm oranının etkilediğini belirtmiştir (Şekil 17) [69].



Şekil 17. Farklı şekillerde, % 1,73 lif içeren harçların çekmede gerilme - şekil değiştirme eğrileri

Çivici ve Eren [70], çelik lifli betonların direk çekme dayanımının araştırmaya yönelik yaptıkları çalışmada donatısız ve lifli betonun çekme dayanımlarının hem direkt çekme hem de eğilmede çekme altındaki davranışlarını deneysel olarak araştırmıştır. Elde edilen deney sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Donatısız ve lifli numunelerden elde edilen çekme dayanımı değerleri, (kgf/cm²)

Deney no	Lifsiz	Lifli	Deney no	Lifsiz	Lifli
1	20.11	24.23	7	22.56	26.54
2	22.35	27.11	8	21.23	25.23
3	21.15	24.58	9	19.87	23.55
4	19.43	22.34	10	28.45	29.89
5	23.22	27.28	11	23.67	26.78
6	25.67	29.34	12	22.45	27.90

Yapılan bu çalışmanın amaçlarından bir diğeri ise beton içerisine liflerin katılmasıyla çekme dayanımda hangi mertebede artış olacağını araştırılmasıdır. Elde edilen sonuçlara göre, direkt çekme altında lifli numunelerden elde edilen çekme dayanımı değerinin donatısız numunelerinkinden % 20- 25 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan liflerin kesit içinde yönlenmesinin betonun çekme dayanımını etkilediği ayrıca belirtilen bir sonuçtur. Deneyler sonucunda beklenen kırılma yüzeyleri elde edilmiş olup, yük ile aynı yönde uzanan liflerin herhangi bir şekilde kopmadığı gözlenmiştir. Çelik lif kullanılarak üretilen betonlar çekme deneylerinde, lifler betondan sıyrılıp ayrılıncaya kadar yük taşımaya devam etmişlerdir. Dolayısı ile liflerin çekme dayanımına katkısının beton ile lif arasındaki bu bağ kuvveti kadar olduğu belirtilmiştir. Deneylerde donatısız olarak üretilen çekme numuneleri ise, beklenildiği gibi gevrek bir tarzda kırılmışlardır.

Shah vd. yaptıkları diğeri bir araştırmada ise düz, uçları kancalı ve uçlarında topuz olan çelik lifleri harç içerisine katıp, bu yeni malzemenin çekme etkisindeki gerilme – şekildeğiştirme eğrilerini elde etmişlerdir. Bu eğrinin ilk çatlak noktasına kadar yükselen kısmı donatısız harçtakine benzer olduğunu görmüşlerdir. Azalan kısmı ise, lif parametrelerine, lif şekli, lif miktarı ve görünüm oranına bağlı olduğu bildirilmektedir. Gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin azalan kısım ya da çatlama sonrası kısmının araştırılması Visalvanich ve Naaman tarafından yapılmıştır. Elde ettikleri sonucu bir denklem ile ifade etmişlerdir [70].

Tokyay vd. [22], yaptıkları çalışmada 1 kg/m³ polipropilen lif ve % 1.5 oranında düz çelik lif içeren beton karışımı hazırlamışlardır. Hazırlanan bu karışımdan standart silindir numuneler (150mm x 300mm boyutlarında) hazırlayıp numuneler üzerinde basınç ve

dolaylı çekme deneyleri yapılmışlardır. Yapılan testler sonunda polipropilen lif içeren betonların basınç dayanımlarının lifsiz betona oranla % 0.4 – 0.5 civarında azaldığı, çekme dayanımlarının ise % 14 – 15 civarında arttığını gözlemişlerdir. Diğer taraftan çelik lifler, basınç dayanımlarında % 1’lik bir artış ve çekme dayanımında da % 35’lik bir artış göstermişlerdir.

Gao vd. [66], yaptıkları çalışmada lifsiz ve hacimce % 0.6, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında numuneler üretmişlerdir. Üretilen bu numunelerde kullandıkları liflerin boyları 20, 25 ve 30 mm liflerin, görünüm oranlarını 46, 58 ve 70’dir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda lif hacminin % 0’dan % 2’ye çıkmasıyla yarmada çekme dayanımının 4.95 MPa değerinden 8.8 MPa değerine çıktığını görmüşlerdir. Ayrıca yarmada çekme dayanımındaki artış, lif hacminin artışıyla, lineer özellik gösterdiği sonucuna varmışlardır.

1.5.4.2.3. Çelik Lifli Betonlarda Eğilme Dayanımı

Bugüne kadar lifli betonlar üzerinde birçok araştırma yapılmış ve liflerin betonun mekanik özellikleri üzerinde çok olumlu sonuçlar verdiği deneylerle ispatlanmıştır. Özellikle de liflerin betonun eğilme mukavemetinde önemli bir artış sağladığı yapılan deneylerle ispatlanmıştır [40].

Şener vd. [71] lifli betonun eğilme dayanımı - gerilme diyagramının normal betonların ki gibi açıklanamayacağını belirtmişlerdir.

Çelik liflerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi çekme ve basınç dayanımlarına olan etkisinden daha fazladır. Çelik lifli betonların nihai eğilme dayanımları normal betonlara göre % 50–100 arasında artış göstermektedir. Bu artış, çelik liflerin yüksek çekme dayanımları ile ilişkilidir. Çimento hamuru matrisinin çatlamasından sonra çatlak sonlarından gerilme transferi ve dağılımı yapması nedeniyle yük, ilk çatlaktan sonra bir miktar daha artar. Bu durumda maksimum eğilme yükü normal betonlara göre daha fazla olmaktadır [27].

Eğilme dayanımını etkileyen faktörler, çelik lifli betonların diğer dayanımlarında olduğu gibi lifin şekli, görünüm oranı, lif hacmi, deney numunesi boyutları ve liflerin beton içerisindeki dağılımlarıdır. Ancak dayanımda esas olan betonla lif arasındaki aderans gerilmesini arttırmaktır.

çıkarılmasının mekanik özelliklerde lifsiz ile %2.5 lif hacmine sahip karışımlar arasındaki artışla aynı ölçüde bir artış sağlamadığını tespit etmişlerdir. Ayrıca mikro lif ilavesi, özellikle basınç ve çekme dayanımlarından çok harcın eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Eğilme dayanımları lifsiz harçta 7.7 MPa iken % 2.5 mikro lif ilavesiyle 14 MPa değerine çıkararak yaklaşık % 100'lük bir artış sağlamıştır. % 5 lif ilavesinde ise eğilme dayanımı 14.8 MPa değerine çıkmıştır.

Ünal [26], prefabrik sektöründe kullanılan seri üretim sağlayarak ilk günlerdeki mukavemet gelişimini hızlandırmak için ısıtma işlem uygulamasının çelik lifli betonun mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışmada lifsiz ve 2.5, 5, 8, 10 dm³/m³ olarak gibi değişik lif içerikli numuneler kullanılarak üretilen numuneler üzerinde farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtma işlem uygulanmıştır. Isıtma işlemleri çevrimler halinde 20 °C'de normal kür, 50 °C'de yumuşak çevrim, 65 °C'de ılımlı çevrim ve 80 °C'de sert çevrim olmak üzere dört değişik çevrim olarak uygulanmıştır. Deney süreleri 1, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir. Deneyler sonunda, ısıtma işlem uygulamasının 1 günlük numunelerdeki mukavemet artırıcı etkisinin, betona eklenen lif miktarının artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Betona eklenen lif miktarının hem 20 °C'de normal kür uygulanmış numunelerde hem de ısıtma işlem uygulanmış numunelerde erken ve ileriki yaşlardaki eğilme dayanımını arttırdığı görülmüştür.

1.5.4.2.4. Çelik Lifli Betonlarda Tokluk

Tokluk kavramı ilk olarak Amerikan Beton Enstitüsünde Henager tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra Johnson tarafından ASTM C 1018 ile standart haline getirilmiştir. Tokluk kavramı, genel olarak betonun eğilme yükleri altında enerji yutması olarak tanımlanır [65].

Çelik lifli betonun diğer bazı özellikleri gibi kırılma enerjisi de normal betonlara göre yüksektir. İlk kırılma yükünden sonra oldukça yüksek düktilite gösterirler. Bu nedenle lif oranı arttıkça betonun kırılma enerjisi de artar [73].

Çelik lifler, gerek dinamik gerekse statik yüklemelerde betonun eğilme kuvvetleri altındaki deformasyonu sırasında yapılan işi arttırarak betona aynı gerilme ölçeğinde daha yüksek deformasyonlar yapabilme yeteneği kazandırır. Bu çelik lifli betonların en önemli özelliğidir. Çelik lifli betonların enerji yutma kapasitesi normal betonlara göre % 100–

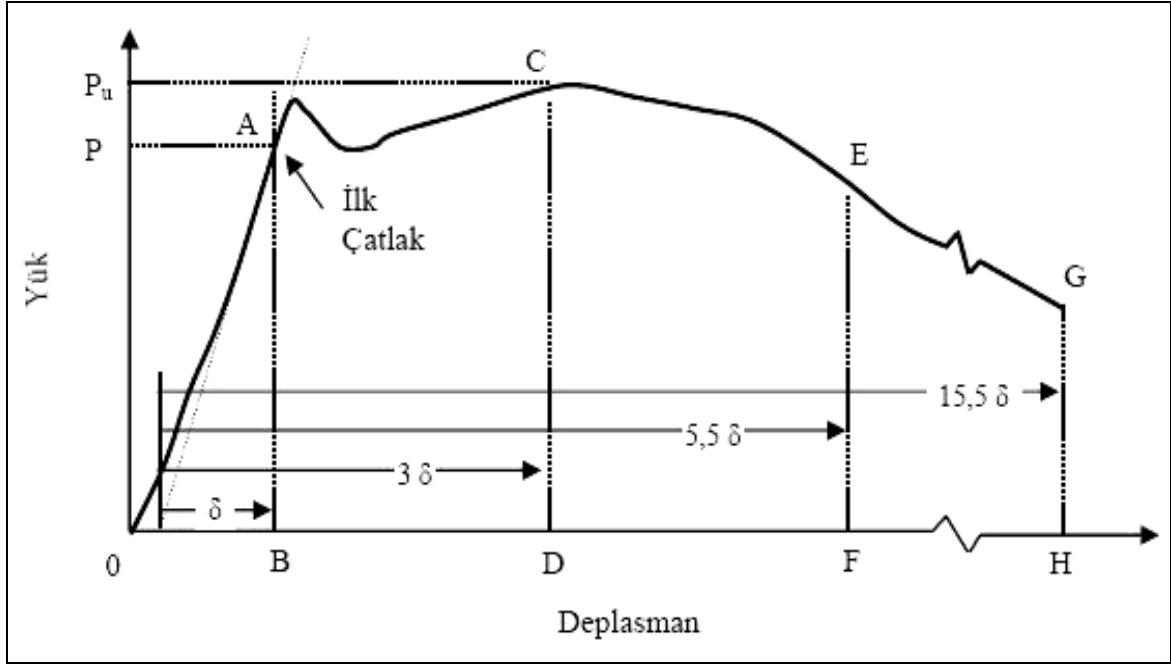
1200 arasında artış gösterebilmektedir. Bu değer eğilme deneyinde bulunan yük-deplasman eğrisi altında kalan alanın ölçülmesi ile belirlenir [27].

Betonda maksimum gerilmeye ulaşmadan meydana gelen ilk çatlakların oluşumu sırasındaki deformasyonlar, normal ve çelik lifli betonlarda hemen hemen aynı olmaktadır. İlk çatlak oluşumundan sonra artan gerilmeler maksimum gerilmeye kadar, gelişen çatlakların birleşmesine, dolayısıyla betonun rijitliğinin azalmasına neden olmaktadır. Ancak çelik lifli betonlarda yük eksenine dik olan lifler, yanıl deformasyonları, yüksek çekme dayanımları ve matris ile aralarındaki aderans nedeniyle, azalttıklarından betonun tokluğu artmaktadır [22].

Çelik lifli betonların enerji yutma kapasitesi liflerin şekli, görünüm oranı, lif hacmi, deney numune boyutları ve liflerin beton içerisindeki dağılımlarından etkilenir.

Johston ve Barr tanımladıkları toklu indeksleri ile çelik lifli 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 birbirinin aynısı olup sadece bazılarında ilave olarak daha değişik kriterler ve değişik tokluk indeksi aralıkları belirlenmiştir [27].

Tokluğun belirlenmesi için yapılan eğilme deneyinden elde edilen yük-deplasman eğrisi, deney numunesi boyutu ve geometrik yapısı, deney düzeneği ve yükleme tipi ile yükleme hızına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle malzemenin tokluğunun açıklanması için ASTM C 1018’de tanımlanmış olan I_5 , I_{10} ve I_{30} Tokluk İndeksleri sırasıyla, malzemenin doğrusal elastik davranışı ve plastik davranışını açıklamak bakımından daha kullanışlı olmaktadır. Bu indeksler numune özelliklerinden bağımsız olduğu için daha anlamlıdır. Malzemenin tokluk indeksleri ne kadar yüksekse malzeme o kadar sünekler. Şekil 19’da görülen ilk çatlak gerilmesi olan A noktasına kadar olan yük-deplasman eğrisinin altındaki OAB üçgen alanı belirlenir.



Şekil 19. Çelik lifli betonda yük deplasman eğrisi ve I_5 , I_{10} , ve I_{30} indekslerini için tanımlanmış alanlar

ASTM C 1018'e göre ilk çatlak gerilmesi alanının üç katındaki eğilme değerine kadar numune yüklenerek OACD alanı belirlenir. Bu alan OAB ilk çatlak gerilmesi alanının üç katıdır. Bulunan OACD alanı ilk çatlak alanına bölündüğünde I_5 indeksi hesaplanır. I_{10} ve I_{30} indeksleri de ilk çatlak gerilmesinin 5.5 ve 15.5 katı kadar yapılan yüklemeler sonucu bulunan alanların ilk çatlak alanlarına bölünmesi ile bulunur (Tablo 7).

Tablo 7. Tokluk indekslerinin değerlendirme kriterleri

Baz alınan tokluk alanı	İndeks	Eğilme kriteri	Normal beton	Elastik- plastik malzeme	Çelik lifli beton için aralık
OACD	I_5	3.0	1.0	5.0	1-6
OAEF	I_{10}	5.5	1.0	10.0	1-12
OAGH	I_{30}	15.5	1.0	30.0	1-40

I_{10} / I_5 oranı için 2 değeri, bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasındaki mükemmel plastik malzeme hareketini, yani yükte herhangi bir değişiklik olmaksızın eğilmedeki artışı gösterir. I_{30} / I_{10} oranı için 3 değeri, bu indekslere eşlik eden eğilmeler arasındaki mükemmel plastik hareketi gösterir. 3'ten küçük değerler ise düşük performans ifade eder.

Çelik lifli betonlar için bu kriterler çeşitli normlar ile belirlenmiş olmasına rağmen çelik lifli betonun performansını normal betonlarda olduğu gibi karışım parametreleri ve çelik liflerin beton içindeki miktarı, görünüm oranı (l/d), dağılımı, şekli gibi parametreler de önemli ölçüde etkiler [27].

Tokyay vd. [22], yaptıkları çalışmada polipropilen ve çelik lifler ile çalışmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda polipropilen liflerin normal betonun tokluğunu arttırmada etkili olmadığını, çelik liflerin ise normal betonun tokluğunu % 110 mertebesinde arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin alçalan kısımlarının eğimlerinin lifsiz betonlara göre daha düşük olması, çelik liflerin betonun sünekliğini arttırmada etkili rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Kara ve Akın [75], yaptıkları çalışmada betonarme karkas binalarda kolon kiriş birleşimlerinde deprem sırasında ortaya çıkan hasarları önlemede çelik liflerin katkısını araştırmışlardır. Çalışmada donatı yerleştirme zorluğu, maliyeti ve işçilik hatalarının minimize edilmesi göz önünde tutularak etriyeli ve etriyesiz birleşim bölgesine sahip birebir modellerin taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Kolon - kiriş birleşim bölgelerinde betona sırayla 20 kg/m^3 , 30 kg/m^3 ve 40 kg/m^3 lük çelik lif ilave edilerek deprem kuvvetleri altında gerekli olan sünekliğin ve mukavemetin sağlanabilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca etriyesiz üretimlerde yapılarak çelik liflerin etriye yerine kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmıştır. Hazırlanan kolonlara aksenal yüklemeler (15 ton) yapılarak kiriş numunesi yön değiştiren yükleme altında teste tabi tutulmuştur. Deneylerin sonunda, hasar görme mekanizmaları, yer değiştirme ve moment eğrilik karakteristikleri ve enerji yutma kapasiteleri irdelenmiştir. Etriye yerine alternatif olarak kullanılan liflerin, birleşim bölgesinde betonun parçalanmasını ve dağılmasını engellediği, enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Bulunan enerji yutma kapasiteleri etriyeli birleşim için 100 birim olarak kabul edilerek Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Etriyesiz, etriyeli ve lifli bileşimlerin enerji yutma kapasiteleri

Deney no	Enerji yutma kapasiteleri
Deney 1 (etriyesiz)	79
Deney 2 (etriyeli)	100
Deney 3 (20 kg/m ³ çelik lifli)	130
Deney 4 (30 kg/m ³ çelik lifli)	200
Deney 5 (40 kg/m ³ çelik lifli)	150

Tablo 9’da etriyeli bileşimin 100 birim olduğu kabul edilmiştir. Buna göre etriyeli bileşime göre, 20 kg/m³ çelik lif içeren birleşimde enerji yutma kapasitesinin % 30, 30 kg/m³ lif içeren birleşimde enerji yutma kapasitesinin % 100 ve 40 kg/m³ çelik lif içeren birleşimde enerji yutma kapasitesinin etriyeli bileşime göre % 50 arttığını belirlemişlerdir. Etriyesiz bileşimde ise yaklaşık % 20’lik bir düşüş söz konusu olmuştur. Belirlenen bu tokluk artışlarının düğüm noktalarındaki sünekliği de arttırdığı belirlenmiştir.

Betonun çekme ve basınç mukavemetinin yanında kırılma enerjisi de oldukça önemli bir parametresidir. Çelik lifli betonlar, özellikle maksimum yükten sonra oldukça yüksek bir düktilite gösterir. Bu nedenle lif oranı arttıkça kırılma enerjisi de artış göstermektedir. Çelik lifli betonların bu tür özelliklerini ortaya koymak üzere literatürde bir çok ampirik tanımlama yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi Barr’in geliştirdiği tokluk indeksi tanımlamasıdır. Lifli betonun gerilme-birim boy değişimi eğrisinin ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alanın, eğri altındaki toplam alana oranı tokluk indeksi olarak tanımlanmıştır [29,41].

Gopalaratnam vd. [75] çalışmalarında genelde kullanılan tokluk ölçüm metotlarını tanıtmışlardır. Bu metotların hepsinde tokluğun yük-deformasyon grafiğinin altında kalan alan yardımıyla bulunduğunu ve bu nedenle tokluğun numune boyutu, yükleme düzeni, yükleme hızı gibi parametrelere bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Tokluk hesaplanırken numune boyutu, yükleme düzeni, yükleme hızı parametrelerinden en azından bir kaçından bağımsız olarak tokluğun hesaplanabilmesi için önerilerde bulunmuşlardır.

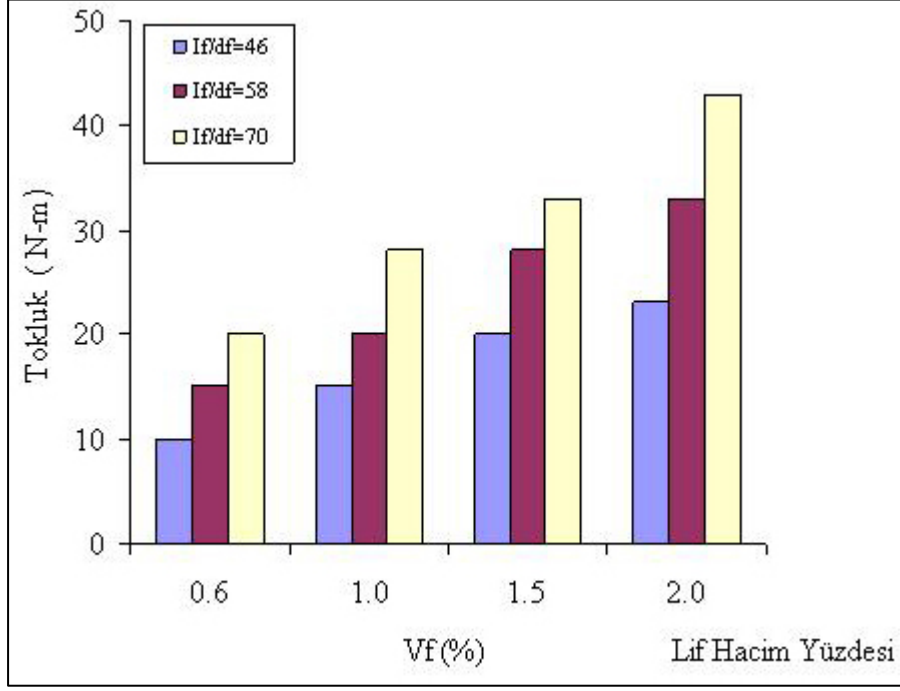
Barr ve Noor, su/çimento oranını (0.46) sabit tutarak lif miktarının (hacimce %0.03, 0.15, 0.3, 0.6, ve 0.9) çelik lifli betonların tokluk indeksi üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada betonun yük-deformasyon eğrisi altındaki alandan hesap

edilen tokluğun çelik lifli betonların en önemli özelliklerinden birisi olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan deneylerde lif miktarının artmasıyla tokluğun arttığını belirlenmişlerdir. Deneyler sonucunda lif miktarının hacimce % 0.03'den % 0,9'a çıkması tokluğun %100 oranında arttığı görülmüştür [29].

Balaguru [76], çalışmasında hızlı dayanım kazanan çimento ile hazırlanmış çelik lifli betonların basınç ve eğilme özelliklerini incelemiştir. Karışımlarda 20 ile 60 mm arasında değişen uzunlukta ucu çengelli ve kıvrımlı lifler ve 30–90 kg/m³ arasında değişen lif içerikleri kullanılmıştır. Deneyler sonunda ucu çengelli ve boyu 50 mm olan liflerin tokluk bakımından en iyi performansı gösterdiği, çimento tipinin önemli bir etki yapmadığı ve iyileşmenin kaba agrega içermeyen karışımlarda daha fazla olduğu görülmüştür.

Gao vd. [66], yaptıkları çalışmada lifsiz ve % 0.6, % 1.0, % 1.5 ve % 2.0 lif içeriğine sahip kimyasal katkı olarak süper akışkanlaştırıcı ve mineral katkı maddesi olarak silis dumanı içeren yüksek dayanımlı hafif beton numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Deneylerde 20, 25 ve 30 mm uzunluklarında ve 46, 58 ve 70 görünüm oranlarına sahip çelik lifler kullanılmıştır. Yapılan testler sonunda çelik liflerin tokluğa olan katkısının diğer mekanik özelliklere olan katkısından çok daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek dayanımlı hafif betonların, eğilme gerilmeleri altındaki davranışının geleneksel çelik lifli betonların davranışına benzediğini fakat yüksek dayanımlı hafif betonlarda meydana gelen çatlakların çimento matrisinden önce kullanılan hafif agregalarda oluştuğunu görmüşlerdir. Çelik liflerin çatlakların gelişimini çatlak köprülenmesi sağlayarak kontrol etmesinden dolayı yüksek dayanımlı hafif betonların eğilme-şekil değiştirme davranışını önemli ölçüde etkilediğini, dolayısıyla toklukta büyük iyileşmeler meydana getirdiği ayrıca belirtilmiştir.

Eğilme tokluğunun lif hacmi ve lif görünüm oranı değişiminden nasıl etkilendiğini Şekil 20'de göstermişlerdir.



Şekil 20. Eğilme tokluğuna V_f ve l/d nin etkisi [66].

Kosa ve Naaman [77] çelik lifli betonda lif korozyonu ve bu korozyonun betonun mukavemeti ve betonun enerji emme kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve yaptıkları araştırmada korozyonun betondaki donatıları fazla etkilememesine rağmen çelik liflerde ciddi zararlara yol açtığını vurgulamışlardır. Deneyle sonuçunda korozyona maruz bırakılan numuneler içerisindeki liflerin çapında % 70'lere varan azalmalar meydana geldiği lif çapındaki bu azalmaların numunelerin eğilme ve çekme deneylerindeki maksimum mukavemette ve dolayısı ile tokluğunda dikkate değer azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Böylece çelik lifli betonların mekanik özelliklerinin lif çapındaki azalmayla doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır.

1.5.4.2.5. Çelik Lifli Betonlarda Yorulma Dayanımı

Malzemeyi kırmaya yetmeyen elastik limitin altındaki gerilmelerin arka arkaya tekrarlı bir şekilde uygulanması sonucunda malzemede görülen ani ve gevrek kırılma olayına “yorulma” denilmektedir. Bu kırılma olayı dinamik yüklemelerdeki kırılmanın başka bir örneğidir. “Yorulma dayanımı” ise belirli sayıdaki yük tekrarı altında, malzemenin kırılmadan direnebileceği en büyük gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır [1].

Malzemeyi normal olarak kırmaya yetmeyen, elastiki limitin altındaki gerilmelerin art arda tekrarlı bir şekilde uygulanması sonucu meydana gelen ve sonunda malzemenin ani ve gevrek kırılmasına yol açan yorulma olayı da dinamik yüklemelerdeki kırılmanın bir başka örneğidir. Çelik lifli betonlar üzerinde yapılmış çalışmalarda yorulma dayanımının lifsiz betonlara göre %50 ile %100 arasında arttığı gözlenmiştir [44].

Tek başına elastik limitin altındaki bir gerilmenin uygulanması ile malzemenin kırılmadığı, ancak bu gerilmenin tekrarlı olarak uygulanması ile malzemede taşıma gücünün yitirildiği söylenebilir. Bu malzemenin yorulması olarak adlandırılır. Çelik lifli betonların üzerinde yapılan araştırmalar betona çelik lif katılması ile yorulma dayanımının arttığı gözlenmiştir [61].

Tekrarlı uygulanan gerilmelerin etkisiyle, malzemenin bünyesinde yer almakta olan veya yeni oluşan mikro çatlaklar giderek daha büyük çatlaklara dönüşmekte ve kırılmalara yol açmaktadır. Çelik lifler, bu noktada performanslarını gösterirler ve çatlak gelişimini engelleyerek tekrarlı yüklerin oluşturacağı hasarların şiddetini azaltırlar. Yapılan çalışmalar sonunda, çelik lifli betonların yorulma dayanımının normal betonlara göre % 50-100 arasında arttığı gözlenmiştir [69].

Arslan ve Aydın'a [29] göre çelik lifler, betonun; kesme, yorulma ve burulma dayanımını yükselterek, kesitin küçülmesine ve bazen de asal donatıya gereksinimin ortadan kalkmasına sebep olmaktadır.

Yan vd. [78], tekrar eden dinamik yükler altında, yüksek dayanımlı beton, silis dumanlı yüksek dayanımlı beton, çelik lifli yüksek dayanımlı beton ve çelik lifli silis dumanlı yüksek dayanımlı beton üzerine çalışmışlardır. Ayrıca, silis dumanı ve çelik lifle hasarı azaltma mekanizmalarını da araştırmışlardır. Sonuç olarak çelik lifler; çatlak tiplerinde çekme yoğunlaşmalarını hafifleten bir yüksek performanslı beton yapısında kırılma esnasında çatlakların başlangıç ve yayılmasını etkin bir şekilde sınırlamakta, darbe ve yorulma altında hasar oluşumunu geciktirmektedir. Silis dumanı etkin olarak bağlantı bölgelerindeki zayıflıkları bertaraf ederek beton yapısındaki bağları güçlendirmekte, çatlak boyut sayısını azaltmakta, çelik liflerin çatlaklara karşı dayanıklılığını artırmakta ve hasarı sınırlamaktadır. Beton darbe ve yorulmaya tabi tutulduğunda çelik lif ve silis dumanı sayesinde performans oldukça artmaktadır.

Betondaki yorulma sınırı, 10 milyon yük tekrarına karşılık gelen gerilme değeri olarak kabul edilmektedir. Lif tipi ve içeriğine bağlı olarak, çelik lifli betonlarda 2 milyon yük tekrarında yorulma dayanımı, statik eğilme dayanımının % 65-90'i arasındadır. Normal

betonlarda yorulma mukavemeti limiti, genel olarak statik eğilme gerilmelerinin % 50'si kadardır. Normal betonlarda beton içerisine 30-40 kg/m³ lif eklenmesi sonucu, bu limit % 80'lere çıkar.

Betonda oluşan çatlaklar, betonun yük taşıma kapasitesini ve dolayısıyla yorulma dayanımını da düşürürler. Çelik lifli betonlarda çatlak oluşumu ve çatlakların ilerlemesi engellendiği için tekrarlı yorulma yükleri altındaki kırılma süreci engellenir ya da geciktirilir. Çelik lifli betonlarda lif hacminin artması, yorulmaya karşı direnci arttırmaktadır [73]. Bu nedenle yorulma dayanımı arttırılmak istenen geleneksel donatılı yapı elemanının, çelik liflerle güçlendirilmesi uygun olmaktadır.

1.5.4.2.6. Çelik Lifli Betonlarda Darbe Dayanımı

Betonun ani olarak dinamik bir yükü yüklenmesine karşı gösterdiği dirence darbe dayanımı denir. Lifli betonlardaki darbe dayanımı normal betonlara göre % 100–1200 arasında artış göstermektedir. Çelik lifler, matris üzerine gelen dinamik yükleri kendi üzerlerine alarak matrisin, çarpma etkilerine karşı daha yüksek bir çarpma mukavemeti göstermesini sağlarlar. Bu nedenle darbe dayanımı, betonun tokluğu ve kırılma enerjisi ile doğrudan ilgilidir [27,42].

Arslan ve Aydın'a [29] göre, yapı mühendisliğinin pek çok uygulamasında betonun darbe yüklerine ve tekrarlı yüklere karşı yeterli dayanıma sahip olması istenir. Liflerin darbe dayanımında sağladığı mükemmel artış da lifli betonların en önemli avantajlarından biridir.

Çekme gerilmesi almadığı kabulüne göre tasarlanan beton elemanların özellikle dinamik yüklere maruz kaldığı deprem, türbülanslı su akımı, patlama, darbe durumlarda beton elemanlar üzerinde dinamik çekme gerilmeleri ve dolayısıyla çekme gerilmelerinin neden olduğu göçmeye sebebiyet veren çatlaklar meydana gelecektir. Bu gibi dinamik gerilmelere maruz kalabilecek elemanlarda çekme gerilmelerinin daha homojen yayılımını sağlamak, dinamik etkiler sırasında oluşabilecek mikro ve makro düzeydeki çatlak oluşumlarına karşı betonun direncini arttırmak için çelik lif kullanımı uygun bir çözümdür. [29].

Tablo 9. Değişik narinlik ve lif içeriğine bağlı olarak numunenin dayanabileceği darbe sayısı [29]

Beton Tipi	Narinlik	Lif hacmi (%)	Darbe Sayısı	
			İlk çatlak	Kırılma
Kontrol	-	0	4	5
Çelik Lifli	60	0.5	8	18
Çelik Lifli	60	1	22	45
Çelik Lifli	60	1.5	40	75
Çelik Lifli	60	2	101	192
Çelik Lifli	75	0.5	17	37
Çelik Lifli	75	1	29	56
Çelik Lifli	75	1.5	43	151
Çelik Lifli	75	2	116	276
Çelik Lifli	83	0.5	21	48
Çelik Lifli	83	1	33	68
Çelik Lifli	83	1.5	81	172
Çelik Lifli	83	2	193	373

Yapısal uygulamalarda çelik lifli beton sadece kırılmayı önlemek için değil, aynı zamanda betonun dinamik yükleme veya darbe mukavemetini arttırmak ve malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de betona çelik lif ilave edilmektedir [30,53].

Betonun darbe yükleri altındaki davranışını tanımlayabilmemiz için en önemli parametreler betonun dayanımı ve kırılma enerjisidir. ACI lifli betonlar için değişik darbe dayanımı deneyleri tanımlamıştır. Ancak bunların yalnızca iki tanesi önerilmektedir [27]. Bunlardan birincisi Drop-weight (ağırlık düşürme) deneyi denilen ve bir bilyenin beton üzerine defalarca düşürülmesi esasına dayanan deneydir. Diğer ise darbe etkisi veren bir alet ile dinamik çekme, eğilme veya basınç yükü uygulanarak yapılır. Ağırlık düşürme deneyinde, ilk çatlak anındaki darbe sayısı ve malzemenin kırılma anındaki darbe sayısı normal betona göre yorumlanır. Diğer kıyaslama yöntemi ise çelik lifli betonun darbe yükü altındaki davranışı ile statik yükleme altındaki davranışının karşılaştırılmasıdır [28].

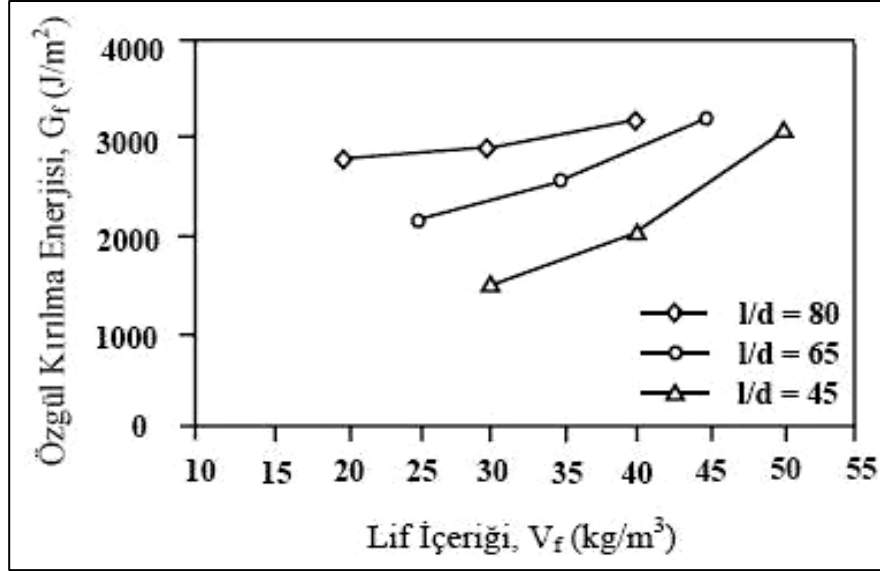
Lifli betonların çeşitli yüklemelerdeki darbe dayanımı lifsiz betonlara göre 10 ila 20 kat daha büyüktür. Çelik lifler matris üzerine gelen dinamik yükleri kendi üzerlerine alarak matrisin çarpma mukavemetinde daha yüksek bir çarpma mukavemeti meydana getirirler. Bu nedenle darbe dayanımı; betonun tokluğu ve kırılmasıyla doğrudan ilgilidir. Liflerin

betondan çekip çıkarılması daha büyük enerji ihtiyaç duyduğundan dolayı parçalanmaya karşı direnç sağlamakla beraber darbe dayanımını artırır. Darbe dayanımının tespitinde genellikle Drop-weight deneyi kullanılır. Bu deneyde, ilk çatlak anındaki darbe sayısı ve malzemenin kırılma anındaki darbe sayısı lifsiz betona göre yorumlanarak değerlendirilir. Ortalama bir lif dozajında çelik lifli betonun darbe direnci 10–20 kat lifsiz betondan daha yüksektir [44,79].

Lif görünüm oranının ve lif içeriğinin artması, lif şeklinin kancalı veya kıvrımlı olması, çelik lifli betonlarda kırılma enerjisini arttıran unsurlardır. Çelik lifli betonun kırılma enerjisinin belirlenmesinde, çelik liflerin çekme dayanımı da önemli rol oynar. Normal betonlarda kırılma enerjisi (G_f), 100 – 150 J/m² arasındadır. Bu kırılma enerjisi, çelik lifli betonlarda 4000 J/m² değerine kadar çıkabilmektedir [80].

Wang vd. [81] yaptıkları çalışmada dalgalı ve ucu kancalı çelik liflerle hacimce % 0.50, % 0.75 ve % 1.5 lif oranlarında çelik lifli beton numuneler üzerinde darbe dayanım testleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda betonlarda kırılma enerjisinin lif hacminin artışı ile doğru oranda arttığı ve lifli betonların kırılma enerjisinin normal betonlara göre oldukça yüksek olduğunu gözlemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda çelik liflerin eğilme deformasyonuna etkisinin en fazla % 1.5 lif hacmine sahip kirişte olduğu ve maksimum eğilme deformasyonunun 0.4 mm' den 3 mm yükseldiği görülmüştür.

Şekil 21'de 5 mm'lik bir sehim için yük-sehim eğrisi altında kalan alandan hesaplanmış olan özgül kırılma enerjisinin lif içeriği ve görünüm oranı ile değişimi verilmektedir. Şekil 21'den de görüleceği gibi çelik lifin görünüm oranı ve içeriğinin artmasıyla yüksek özgül kırılma enerjisi ve yüksek süneklik elde edilmektedir. Lif içeriği 30 kg/m³ olduğunda narinliğin 45'ten 80'e çıkmasıyla özgül kırılma enerjisi yaklaşık 2 kat artış göstererek 1468 J/m²'den 2889 J/m²'ye çıkmaktadır. Ayrıca, çelik lifli betonların sünekliği normal betonlarınkine oranla yaklaşık 25 kat daha fazla olduğu da görülebilir. Lif içeriği ve lif görünüm oranının artışıyla özgül kırılma enerjisinin de artmasının nedeninin; kırılma sürecinde liflerin sıyrılmasından, çok sayıda ve rasgele dağılım liflerin çatlakların birleştirilmesinde bir köprü rolü oynamasından ve böylece dolaylı çatlak yayılmasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 21'den de görülebileceği gibi çelik lif içeriğini ve görünüm oranını istenilen performansa göre tasarlamak mümkündür [7].



Şekil 21. Çelik lifli betonlarda lif görünüm oranının ve lif içeriğinin kırılma enerjisine etkisi

Arone, yaptığı çalışmasında darbe deneylerinin mantığını anlatmaktadır. Deneyler esnasında ölçme sistemindeki güçlükler, fiziksel davranış gibi konuları ele alarak numune şekil ve boyutlarının nasıl olması gerektiğini açıklamıştır. Timoshenko yaklaşımına göre, deplasmanların dengesi, teorisini kuran Arone, 8x10x40 mm'lik çelik numuneler için Charpy deneylerini çentikli ve çentiksiz numuneler üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu deneylerde darbe kafası ve numunenin dinamik uygunluğu, kiriş numunenin vibrasyonu nedeniyle, elde edilen yük zaman grafiğinin ilk osilasyonunu oldukça etkilenmekte olduğunu görmüştür. Ayrıca darbe deneylerinde kaydedilen yük ile kiriş açıklığının ortasında elde edilen moment arasında bir korelasyon mevcut olmadığını vurgulamıştır. Bu nedenle çalışmasında, söz konusu bu momenti elde edebilmek üzere bir prosedür vermiştir. Darbe deneylerinden elde edilen yük-zaman osilogramlarının iç gerilme, moment ve dinamik kırılma enerjisinin hesabında kullanılabilmesinin altını çizmiştir [29].

Arslan [82], düşü ağırlıklı bir darbe dayanım test cihazı kullanarak çelik ve polipropilen liflerin betonda karışık halde kullanılması durumunda kırılma performanslarını modelleyebilecek bir numune geometrisi tanıtmıştır. Deneylerde kullanılan düşü ağırlıklı darbe deney düzeneğinin malzemenin özelliklerini Charpy ve Izod testlerine göre daha iyi yansıttığı için daha sık kullandığını anlatmıştır. Deney düzeneğinde, darbe kafasınca uygulanan potansiyel enerjinin darbe olayı ile tamamen numuneye kinetik enerji olarak geçtiğini varsayarak, normal ve çeşitli lif oranlarındaki betonların kırılma enerjilerini

hesaplamış ve lifli betonların çarpma etkisi altında, statik yüklemeye göre çok daha yüksek bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

Banthia vd. çelik lifli betonların darbe dayanımlarını inceledikleri çalışmalarında darbe dayanımlarında kullanılan pendulum tipindeki ve düşü ağırlıklı darbe deneyi düzeneklerini tanıttılar. Darbe deneylerini 40–52–85 Mpa basınç dayanımlarında 100x100x350 mm'lik kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirdiler. Beton dayanımındaki artışın darbe anındaki yük zaman grafiğinde iç gerilmeler nedeniyle oluşan ilk tepe noktasında değişim gözlenmezken ikinci tepede artışlara sebep olduğunu gördüler. İlk tepe noktasından sonra iç gerilmeler ihmal edilebilmesi nedeniyle ikinci tepe noktasındaki bu artışın betonun basınç dayanımında meydana gelen artış nedeniyle çekme dayanımında meydana gelen artışla ilgili olduğunu vurguladılar. Çalışmalarında, çeşitli geometrilerdeki liflerin katıldığı betonlarda kırılma enerjisi absorblama kapasitesindeki artışın matrisin statik basınç dayanımında meydana gelen artışla veya lif geometrisiyle ilgili olmadığını gördüler. Gerek statik gerekse dinamik deneylerde liflerin tokluk üzerindeki olumlu etkisindeki artışın matrisin statik basınç dayanımının artmasıyla azaldığını gördüler [29].

Marar vd. [83] ağırlık düşürme darbe test cihazını kullanarak, ucu kancalı görünüm oranları 60, 75, 83 olan, hacimce % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2 lif hacimlerine sahip silindirik yüksek dayanımlı beton numuneler üzerinde darbe deneyleri yapmışlardır. Tüm numunelerin yuttuğu enerjiyi bulmak için basınç deneyinde gerilme-şekildeğiştirme diyagramları çizilmiştir. Deneyler sonucunda çelik lif hacminin artması, betonun darbe direncinin de arttığı görülmüştür. Darbe etkilerine karşı iyi performansı Çelik lif hacminin % 2, görünüm oranının 83 olduğu numuneler göstermiştir. Lif hacminin % 2, görünüm oranının 83 olduğu beton numunenin darbe direncinin lifsiz betona göre 74 kat daha büyük meydana geldiği tespit edilmiştir. Diğer numunelerin ise darbe direnci artışları lifsiz olan betonlara göre sırasıyla görünüm oranı 60 olan lifli betonların 38, 75 olan lifli betonların darbe direnci artışları ise 55 kat mertebesinde artış göstermiştir.

Yıldırım [84], araştırmasında hazırladığı kontrol, cam lif, çelik lif ve çelik ile cam liflerin beraber kullanıldığı karma lifli betonlar üzerinde darbe dayanım testleri yapmıştır. Bu testler için hazırlamış olduğu 100 x 100 x 100 mm küp numuneleri 38 cm düşü yüksekliğine sahip, 14 kg düşü ağırlıklı deney düzeneği ile darbe testlerine tabi tutmuştur. Deneylerde ortaya çıkan kırılma darbe sayıları Tablo 10'da verilmiştir. Çelik liflerin hacimsel yüzde oranlarının cam liflerden daha fazla olması ve çelik liflerin uçlarının kıvrık olması kırılmayı geciktirdiği varılan sonuçlar arasındadır. Sadece cam lif eklenmiş

betonlarda lif hacminin düşük olmasına karşın kırılma darbe sayılarında lifsiz betona göre % 100 artış sağlamıştır. Liflerin beraber kullanımı, artan lif sayısı ile birlikte kırılma darbe sayısının da doğru orantılı arttığı gözlenmiştir.

Tablo 10. Artan lif sayısı ile birlikte kırılma darbe sayıları

Beton Cinsi	Kırılma Darbe Sayısı
Kontrol	13
Çelik lif (hacim % 0.5)	31
Çelik lif (hacim % 0.75)	32
Çelik lif (hacim % 1.0)	42
Cam lif (hacim % 0.1)	28
Çelik + cam lif (hacim % 0.5 + % 0.1)	44
Çelik + cam lif (hacim % 0.75 + % 0.1)	48
Çelik + cam lif (hacim % 1.0 + % 0.1)	54

Mindness ve Yan geleneksel donatı çubuğu ile beton arasındaki aderans dayanımının, darbe etkisi altındaki değişimini ve lif ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Deneilerinde yalın beton, % 0.1 ve % 0.5 polipropilen lifli beton ve % 0.5 ve % 1.0 çelik lifli beton kullanmışlardır. Darbe deneyleri, üç farklı düşü yüksekliği ile düşü ağırlıklı darbe test cihazı yardımıyla yapılmıştır. Düşü yüksekliği arttıkça numunelerin aderans dayanımı ve kırılma enerjisi artmıştır. Çelik liflerin betona ilavesi, darbe etkisi altında donatı ile beton arasındaki aderans dayanımı ve betonun kırılma enerjisinin artışında, polipropilen liflerden daha etkili olmuştur. Betonların aderans dayanımları ile kırılma enerji değerleri Tablo 11’de verilmiştir [29].

Tablo 11. Aderans dayanımları ile kırılma enerji değerleri

	Lif içeriği (hacimce) (%)	Düşü yüksekliği (mm)	Ortalama aderans dayanımı (MPa)	Kırılma enerjisi (Nm)
Lifsiz beton	-	300	10.1	53.8
		500	10.4	55.8
		800	11.2	58.0
Polipropilen lifli beton	0.1	300	10.2	54.2
		500	10.8	56.1
		800	11.5	59.9
	0.5	300	11.1	60.1
		500	11.6	63.4
		800	12.3	66.7
Çelik lifli beton	0.5	300	11.8	74.3
		500	13.8	83.2
		800	16.7	94,5
	1.0	300	14.8	110.3
		500	16.3	129.8
		800	19.1	140.4

1.5.4.2.7. Çelik Lifli Betonlarda Rötne

Rötne genellikle betonda hacimsel büzülme olarak tanımlanır. Priz süresince ve sonrası çeşitli nedenlerle çıkan çekme gerilmelerinin karşılanamaması ve dolayısıyla oluşan çatlakların büyüyerek çoğalması rötrenin oluşma mekanizmasıdır. Rötrenin en önemli oluşma nedeni, makro ve mikro boşluklardaki suyun, beton bünyesinden uzaklaşmasıdır. Ortamda bulunan suyun uzaklaşması ile betonda hacimsel büzülme meydana gelir. Betonda meydana gelen bu hacimsel büzülme dört grupta toplanabilir. Bunlar; termik rötne, plastik (erken, bünyesel) rötne, hidrolik (kuruma) rötne, karbonatlaşma rötresidir [1].

Genellikle katkısız betonun büzülmesini etkileyen faktörlerle lifli betonun büzülmesini etkileyen faktörler benzerdir. Bunlar sıcaklık, bağıl nem, malzeme özellikleri, kür süresi ve numune boyutları olarak sıralanabilir. Betona çelik lif ilavesi rötrenin lifsiz betonlara göre daha kısa zamanlarda tamamlanmasını sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda kuruma büzülmesinin sınırlandırıldığında liflerin etkisinin olmadığı ve ya katkısız betondan daha az büzülmeye sebep olduğu saptanmış ve sadece kuruma büzülmesini sınırlamak amacıyla lif

katılacaksa, kısa ve rasgele dağılmış liflerin uzun liflerden daha faydalı olacağı sonucuna varılmıştır [85].

Lifler, betonda büzülme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzülme hareketi sınırlanmaktadır. Ayrıca köprüleme etkisi ile kılcal çatlak oluşumunu azaltmakta ve çatlak ilerlemesini belirli düzeyde tutmaktadır. Yüksek çekme mukavemetleri ile birlikte düşük elastisite modülüne sahip çelik lif donatılı betonlarda rötre çatlakları normal betona oranla daha az olmaktadır. Buna karşılık liflerin büzülme özellikleri üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olacak şekilde yeterli miktarda bulunması gerekmektedir. Ayrıca uzun lifler, kuruma rötresinin sınırlanmasında daha etkili olmaktadır [55].

Büzülme çatlakları, betonda büzülme hareketi sınırlandığında ortaya çıktığı bilinmektedir. Çelik lif kullanımı, ilk çatlağın oluşumunu geciktirmekte ve birden fazla çatlağın oluşmasını sağlamakta dolayısıyla da çatlak genişliklerini azalmaktadır [86].

Lifli betonların sınırlandırılmış büzülme davranışı hakkında yapılan deneyler, betona az hacimce % 0.25 gibi düşük miktarlarda bile çelik lif katılmasının çatlak genişliğini ortalama %20 - %50 arasında azalttığını göstermektedir [87].

Betonda çelik lif kullanımı, oluşan çekme gerilmelerinin bir miktarının lifler tarafından alınmasını, matristeki gerilmelerin ise çatlaksız bölgelere aktarılıp dağıtılmasını sağlar.

Çelik lifler aynı zamanda betonda oluşan çatlakların ilerlemesini sınırlar, yorulma, darbe, rötre veya ısıl gerilmeler gibi etkenlere karşı betonun direncini artırır [31].

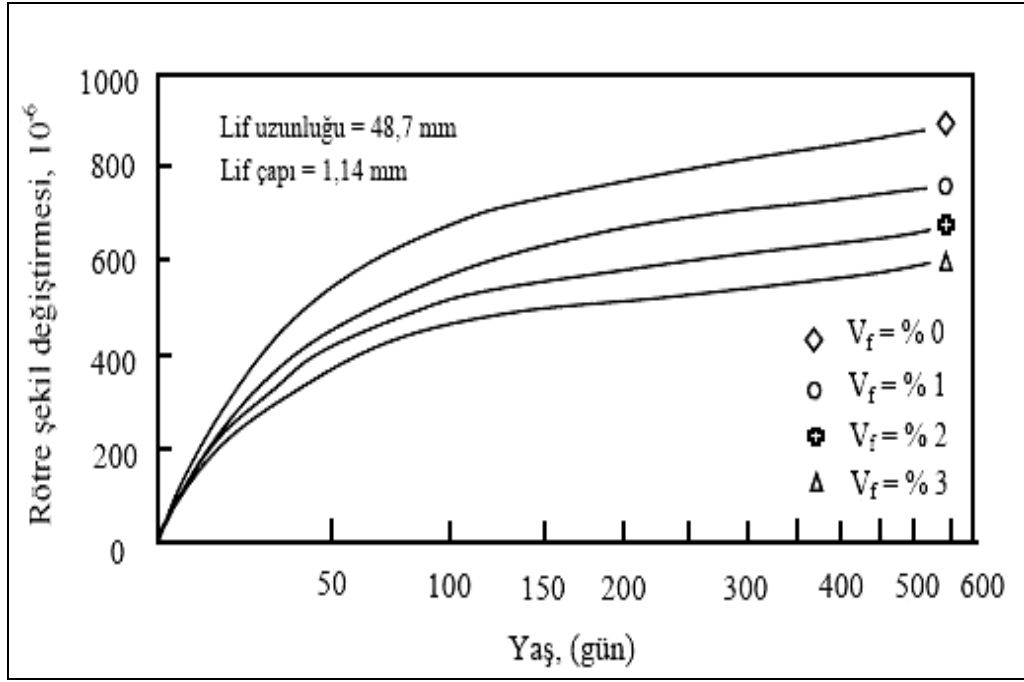
Çelik lifler genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kavitasyon dirençlerini artırırlar. Çelik teller, darbe aşınmasının neden olduğu mikro kırılma çatlaklarını kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltmaktadırlar. Ayrıca çelik lifler, büzülme çatlak genişliklerini azaltmakta ve büzülme hareketlerini sınırlamaktadırlar [55].

Çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlar da dahil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonların sertleşmeleri sırasında hidrasyon süreci, malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olmaktadır. Bu sırada oluşan çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına beton içerisinde rastgele dağılmış çelik lifler karşı koyabilir ve rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önleyebilirler [7].

Çelik lifli beton literatüründe çelik lifler üzerine çok ayrıntılı bir rötre araştırması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada çelik lifli beton kuruma rötresi koşullarına tabi tutulmuş ve sonra ASTM C 341'e göre betonun rötresi bazı parametrelere bağlı olarak değerlendirilmiştir. Düz liflerin kullanıldığı değişik çelik lif içeriklerinde farklı iki hacim /yüzey oranında hazırlanan numuneler üzerine numune boyut ve şeklinin etkisi

incelenmiştir deney sonuçlarına göre rötire, kuruma süresinin artmasıyla artmakta hacim yüzey oranının büyümesi ile de büyümektedir. Deneyden elde edilen başka bir sonuç ise lif yüzdesinin artması ile kuruma rötresinde azalmalar meydana gelmiştir. Aynı şekilde büzülme sonucu meydana gelen birim deformasyonda lif hacmi fraksiyonunun artması ile azalmaktadır [47].

Yapılan araştırmalarda özellikle çentikli çelik liflerin, betonun rötresini % 40 oranında önledikleri belirtilmiştir. Rötire miktarındaki bu azalma, çelik liflerin beton içindeki kullanım miktarına ve lifin geometrisine bağlıdır. Lif hacminin ve görünüm oranının artması, rötire miktarını azaltır (Şekil 22). Ayrıca kullanılan liflerin geometrisinin çentikli ya da ucu çengelli olması düz liflere nazaran rötreyi azaltıcı bir unsurdur [35].



Şekil 22. Ucu kancalı çelik liflerin hacim değişiminin betonun rötresi üzerine etkisi

1.5.4.2.8. Çelik Lifli Betonlarda Dayanıklılık

Betonun boşluklu yapısı, geçirgenliği, porozitesi, hacim / yüzey oranı ve dış fiziksel ve kimyasal etkilere karşı koyabilme yeteneği durabilite kavramının temelini oluşturur.

Beton içerisinde birbirine yapışık halde bulunan çelik liflerin beton karışımı sırasında ayıramayıp betonun içerisinde kalması sonucu betonda boşluklu bir yapı oluştururlar. Böyle bir durumda sıvı ve gazların beton içerisine nüfuz etmesi kolaylaşır. Beton içerisine

nüfus eden bu sıvı ve gazların liflerle teması sonucu çelik lifli betonlarda lifin korozyona uğraması ya da kimyasal olaylar ile bozulması kolaylaşacaktır [27].

Bunun önlenmesi için normal betonlar için de geçerli olan iyi karışım, iyi yerleştirme ve sıkıştırma ile iyi kür koşulları sağlanmalı ve ayrıca korozyon riski olan yerlerde paslanmayan liflerin kullanılması gerekmektedir.

Çelik lifler, genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kaviteasyon dirençlerini arttırmaları. Çelik lifler darbe aşınmasının neden olduğu mikro çatlakları kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltırlar. Ayrıca çelik lifler, beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyici etki yapmaktadır [55].

Susteric [88] tarafından yapılan çalışmada çelik lif katkılı beton numunelerin erozyon ve aşınma dirençleri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler için su / çimento oranları 0.30 – 0.65 arasında değişen dokuz ayrı karışım hazırlanmıştır. Bu karışımlardan yalnızca 0.30 su / çimento oranına sahip karışımda çelik liflerin oranı %0.25 ile % 0.2 arasındaki değişik oranlarda değiştirilirken diğer karışımlarda lif miktarı sabit tutulmuştur. Karşılaştırma yapabilmek için her bir karışımdan bir adette liffsiz üretim yapılmıştır. Deneylerin sonucunda çelik lif ilavesinin betonun erozyon - aşınma direncini olumlu yönde etkilediği gözlenmiştir.

1.5.4.2.9. Çelik Lifli Betonlarda Donma Çözülme Dayanımı

Donma çözülme olayı, fiziksel bir etkendir. Islanarak doygun duruma gelen ve donma çözülme devirlerine maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. Donma çözülme tekrarları karşısında, betondaki iç gerilmeler nedeniyle, beton yüzeyindeki agregalar gevşeyip kopmakta, betonun içerisinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar giderek daha büyük çatlaklar haline gelmektedirler. Şiddetli ortamda çok sayıda donma çözülme olaylarına maruz kalan en iyi betonlar dahi kısa süre içerisinde büyük hasar görebilmektedir [1].

Betonlarda su, klor ve zararlı gaz geçirimsizliğini sağlamak donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı arttırdığı bilinmektedir [48].

Betonların donma – çözünme tesirine karşı direncini etkileyen en önemli faktör betonun bileşimine giren agrega taneleridir. Agregaların don etkisi altında parçalanmaları bu malzeme ile üretilen betonların don etkisinden zarar görmesine neden olmaktadır. Bir

agreganın boşluk oranı ve su emme oranı ne kadar yüksekse, o agreganın donma etkisine karşı dayanıklılığı da o derece düşüktür [89].

Vares [90] tarafından yapılan çalışmada çelik lifli betonların mikro yapısına çelik liflerin etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma amacı ile % 2 ve % 4 oranında çelik lif katılmış beton numuneler üretilmiştir. Donma - çözünme direncini tespit edebilmek için suda bekletilen numunelerin donma çözünme dirençleri 100 ve 200 donma çözünme tekrarına maruz bırakıldıktan sonra belirlenmiştir. 200 donma çözünme tekrarından sonra çelik lifli betonun mikro yapısında ciddi bir hasarın olmadığı tespit edilmiştir.

Çelik lif katkısının betonun, donma - çözünme direncine belirgin bir etkisinin olmadığı ACI Commitee 544 raporunda belirtilmiştir. Raporda donma çözünmeye karşı dirençli olmayan betonların lif katkısı ile donma – çözünme dayanımına sahip olamayacağı vurgulanmıştır [36].

1.6. Betonarme Kolonlar Hakkında Genel Bilgiler

Kolonlar, yapı sistemindeki önemli taşıyıcı elemanlardır. Bu nedenle, betonarme kolonların davranışının ve taşıma gücünün bilinmesi oldukça önemlidir [91].

Çerçeve sistemli betonarme yapılarda, yapıya etkiyen düşey ve yatay kuvvetleri güvenle temel sistemine aktarma görevini üstlenen kolonların diğer önemli görevinin de yatay yüklerden dolayı meydana gelecek rölatif kat ötelenmelerini yönetmelikte izin verilen sınırlar içerisinde tutmak olduğu bilinmektedir. Taşıyıcı sisteme monolitik olarak bağlı bulunan bu elemanlar, görevlerini yerine getirirken büyük eksenel kuvvetlerin yanı sıra eğilme momentlerin ve kesme kuvvetlerinin, bazı durumlarda da burulma momentlerinin etkisinde kalmaktadırlar. Taşıyıcı sistemi sadece çerçevelerden oluşan betonarme yapılarda bu yük ve yük etkilerini kolonlar karşılamaya çalışırken, perde – çerçeve türü karma sisteme sahip yapılarda ise özellikle yatay kuvvetler daha çok perdeler tarafından karşılanmaktadır. Yapının sünek davranışı için önemli görev üstlenen kolonlar, özellikle deprem etkisi altında kalan yapılarda, taşıyıcı sistemin davranışını yönlendirdiğinden, bu elemanlarda meydana gelen hasarlar büyük önem taşır [12].

Kolonlar taşıyıcı sistemin ana elemanlarından sayılırlar. Dolayısıyla kolonlarda ortaya çıkacak bir hasar tüm taşıyıcı sistemi zayıflatır, onarılması güç durumlar ortaya çıkarır [92].

Düşey taşıyıcı elemanlar olan kolonların ana işlevi, katlara gelen yükleri taşıyıp bunları temele aktarmaktır. Kat yükü, kolonlara kirişler aracılığı ile veya kirişsiz döşemelerde olduğu gibi doğrudan döşemelerce aktarılır. Kolonlar, deprem ve rüzgâr türü yatay yüklerin karşılanmasında, varsa perde duvarlarla birlikte en önemli işlevi yüklenirler [93].

Kolonlar basınç taşıyan elemanlar olduğundan, boyutları ayarlayarak tüm eksenel yükü betona taşımak ve böylece donatısız kolon yapmak ilk bakışta mantıklı görünse de kolonlarda büzülme, özellikle sünme deformasyonlarının önemi ve ön görülmeyen eğilme momentlerinin oluşabilme olasılığı göz önünde bulundurularak, yönetmeliklerde donatısız kolonlara izin verilmez. Kolonlarda boyuna doğrultuda yerleştirilen donatı, uygulanan eksenel yükün bir bölümünü taşır [93].

1.6.1. Kolon Türleri ve Kolon Davranışları

Betonarme kolonlar boyuna donatıyı saran enine donatının cinsine göre iki sınıfa ayrılır. Boyuna donatısı bireysel etriyelerle sarılmış olan kolonlara etriyeli kolon, sürekli dairesel fretlerle sarılmış olan kolonlara ise fretli kolon denilir. Kolon enine donatısı, bireysel dairesel etriyelerden de oluşabilir. Enine donatının içinde kalan beton alanı “çekirdek alanı”, dışında kalan ise “kabuk alanı” olarak adlandırılır. Pratikte en çok kullanılan etriyeli kolonun kesiti genelde kare ve dikdörtgen, fretli kolonun ki ise dairesel olur, ancak mimari nedenlerle kolon kesiti, L, T, çokgen gibi çeşitli geometrilere de sahip olabilir [93].

Etriye ve fretli kolonlar dışında bileşik, yani kompozit kolonlarda vardır. Bileşik kolonlarda eksenel yükün bir bölümü çelik elemanlarca taşınır [93].

Yapının taşıyıcı sisteminin en önemli elemanı olan kolonlarda, düşey ve yatay yüklerin etkisiyle hem eksenel (normal) kuvvet, hem eğilme momenti, hem de kesme kuvveti meydana gelmektedir. Deprem etkisinde kalan bir yapının, kütle ve rijitlik merkezlerinin çakışmaması durumunda ise kolonlarda ayrıca burulma momenti de oluşmaktadır. Eğilme momenti kolona bir eksenli veya iki eksenli olarak etkiyebilir. Eğilme etkisi bazen kolon kesitinin bir kısmında çekme oluşturabilir. Kolonlarda eğilme etkisi olsa bile, kolon davranışını kontrol eden parametre basınç etkisi olduğundan, kolonlar çoğunlukla basınç elemanı olarak kabul edilirler [94].

Kolonların, eksenel yükleri taşımalarının yanı sıra yapıya etki eden deprem veya rüzgâr gibi yatay yüklerin taşınmasında da önemli görevleri vardır. Betonarme bir yapıda yapıyı oluşturan tüm elemanların sünme davranış göstermesi, büyük bir enerjinin açığa çıktığı

deprem etkisi esnasında yapının ve yapıyı oluşturan elemanların bu enerjiyi yutması ve tüketmesi açısından çok önemlidir. Bu amaçla betonun içerisine çelik tellerin eklenmesi ile betonun gevrek davranışı azaltılarak daha sünek bir davranış elde edilebilmektedir, özellikle saha betonlarında aşınmaya karşı direnci arttırmak amacıyla kullanılan çelik tellerin, son yıllarda betonarme yapı elemanlarında sünekliği arttırmada da kullanılması yönünde araştırmalar yapılmıştır [95].

Depremde hasar görmüş binalar incelendiğinde kolonların, binanın ayakta kalmasında veya büyük ölçüde hasar görmesinde başlıca etken ve çok önemli birer taşıyıcı eleman oldukları dikkati çekmektedir. Bu durum özellikle kolonların kayma dayanımlarının dikkate alınmadığı, sadece moment ve eksenel normal kuvvetler altında projelendirildikleri zaman ortaya çıkmaktadır. Kolonun rijitliğinin kirişlerden az olması, kuvvetli kiriş-zayıf kolon birleşimini oluşturur. Bu nedenle deprem etkisiyle olabilecek hasar, daha sünek olması gereken kirişler yerine sünekliği az olan kolonlarda meydana gelir. Daha çok kısa kolonlarda, kayma dayanımına eşit veya kısa kolonun taşıyabileceği maksimum kayma dayanımı değerinden büyük bir yatay kuvvete maruz kaldığı durumlarda kayma kırılma mekanizması oluşur. Kolon kesitinin projelendirilmesi, maksimum taşıyabileceği moment ve normal kuvvet değerlerine ulaşılmadan, genellikle hesaplarda göz önüne alınmayan kesme kuvvetleri kolonun kırılmasına neden olmaktadır. Kısa kolonlar binanın orijinal tasarımında uygun kayma donatıları ile projelendirildiklerinde, eğer kısa kolon özellikleri de dikkate alınarak uygulama yapılmışsa kırılma tehlikesi genellikle olmamaktadır. Ancak binanın daha sonradan mimari veya başka bir nedenle değiştirilmesi sırasında bilinmeden kısa kolon teşkil ettirilmiş ve kolon içindeki mevcut donatı sadece moment ve normal kuvvete göre hesaplanmışsa, yönetmeliklerde önerilen sünek kolon şartlarını sağlayan enine donatı konulmadığı hallerde, kolonlarda kayma kırılmalarına rastlanır. Kısa kolon, çoğunlukla mimari nedenlerden kaynaklanmakta ve genellikle pencere boşlukları nedeniyle oluşmaktadır. Kolon yanlarındaki dolgu duvarlar, boyu çok kısalan kolonda kesme kuvvetinin neden olduğu gevrek kırılmalar meydana getirir. Kolon boyundaki kısalmanın kolon rijitliğini etkilemesi, kesme kuvveti ve moment değerlerini değiştirebileceği açıktır. Eğilme momentine göre uygun bir şekilde projelendirilmiş bir kolon, kesme kırılmasına ulaşmadan eğilme kapasitesine ulaşır. Kolon boyunun sonradan azaltılması halinde genellikle eğilme kapasitesine ulaşmadan kesme kırılması olur. Kolonlarda yükseklik/derinlik oranı küçüldükçe ve enine donatı aralıkları arttıkça sünekliğin azalması yanında kolonların depreme karşı kayma dayanımları azalmakta ve

genellikle kesme kırılmaları görülmektedir. Bu açıdan kısa kolonların kesme dayanımlarının incelenmesi ayrı bir önem kazanmaktadır [95].

1.6.2. Kolonların Yatay Yükler Altındaki Davranışı

Betonarme yapıların, düşey yükler yanında yatay yükleri de güvenli bir şekilde taşıması gerekir. Bina türünden betonarme yapılarda sabit yükler sınıfında sayılan taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların ağırlıkları ile hareketli yükler düşey yükleri oluştururlar. Deprem ve rüzgâr etkileri ise en önemli yatay yükleri meydana getirirler. Bu yükler düşey yüklerden farklı bir özellikte olduğu için, yapının güvenliği sağlanırken taşıyıcı sistem davranışının esas alınması ve ilgili konstrüktif kurallara uyulması önemlidir.

Taşıyıcı sistem inşa edilirken başlangıçtan itibaren kendi ağırlığını taşımaya başlar. Sabit yüklerin üstüne gelen düşey faydalı yükler de benzer türden özelliğe sahiptir. Hareketli yükün taşıyıcı sisteme etkimesi, ani değil belirli bir süre içinde gerçekleşir. Yükleme ve bu yüklemenin değeri bir zaman içinde meydana geldiği için, taşıyıcı sistemde kusurlar ortaya çıktığında, hemen yük boşaltılarak tedbir alma yönüne gidilir. Rüzgâr ve özellikle deprem yükleri ise, çok kısa zamanda etkiler ve dinamik özellik gösterirler. Daha önce herhangi bir yatay yükleme altında kalmayan taşıyıcı sistem kısa bir zamanda önemli bir yatay etki ile zorlanır. Taşıyıcı sistemdeki kusurlar çok kısa bir zamanda ortaya çıktığı için, herhangi bir tedbir almak veya yüklemeye müdahale etmek mümkün olmamaktadır.

Depremlerin büyüklükleri ortaya çıkardıkları enerjiye bağlı olarak belirlenir. Büyük depremler şiddetli hasarlar meydana getirirler ve seyrek meydana gelirler. Yani, dönüşüm periyotları uzundur. Buna karşılık sık meydana gelen küçük depremler az hasar meydana getirir ve dönüşüm periyotları küçüktür. Deprem Yönetmelikleri'nde yapının amacına bağlı olarak dönüşüm periyodu 100 ile 500 yıl arasında bulunan depremlere karşı binanın dayanımı söz konusu edilir. Ancak, bu tür depremlerden oluşan kesit etkilerinin taşıyıcı sistemin elastik davranışı ile karşılanması mümkün değildir. Buna karşılık bu değerlerin % 15–25'i gibi oldukça küçük bir oranını elastik davranış içinde karşılanması esas alınır ve daha büyük depremlerin taşıyıcı sistemde meydana gelecek elastik ötesi şekildeğiştirmeler ve enerji tüketilmesi ile karşılanacağı kabul edilir. Bunun sonucu olarak taşıyıcı sistemin dayanım kapasitesine sık rastlanan şiddeti düşük depremlerde erişilmektedir. Bu durumda deprem etkisi yönünden yapının dayanım kapasitesine erişmesinin yıllık ihtimali %1~3

gibi yüksek bir oran olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında düşey yükler altında taşıyıcı sistemin dayanım kapasitesine erişmesi ise % 0.01 gibi oldukça düşük bir orandır. Bu iki değer kıyaslandığında deprem etkisinin karşılanmasındaki eksikliklerin ne derecede sorun meydana getireceği anlaşılır.

Yapıların boyutlandırılmasında depreme karşı dayanımının da önemli olduğu düşüncesi 1930'lara dayanmaktadır. Sayısal ölçümlerin eksikliğinin de sonucu olarak, deprem etkisi yapının ağırlığının yaklaşık % 10'u bir yatay yük olarak kabul edilmekteydi. Ancak, 1960'larda depremlerden elde edilen sayısal bilgiler, daha gerçekçi yük kabullerini beraberinde getirmiştir. Yakın zamanda bilgisayardaki gelişmeler de, taşıyıcı sistemin çözümlenmesini daha ayrıntılı biçimde yapma imkânını vermiştir. Bu arada depremlerden sonra yapılan incelemelerden bir kesitte yeterli eğilme momenti dayanımı bulunmamasının, taşıyıcı sistemin bütünlüğü bozulmamak koşulu ile her zaman ağır hasara veya göçmeye götürmediği belirlenmiştir. Bunun yanında kesme kuvveti etkisinin karşılanamamasından ortaya çıkan elastik ötesi şekildeğişikliklerin önemli hasara neden olduğu gözlenmiştir. Yapılan çalışmalar, normal orta ve yüksek katlı binaların tipik bir depremde zorlanması durumunda çözümlemenin elastik veya elastik ötesi davranış esas alınarak yapılmasına bağlı olmaksızın aynı mertebede yatay yer değiştirmenin meydana geldiğini göstermiştir. Depremde yapının tamamen elastik davranış gösterdiği kabul edilmesi durumunda, yönetmeliklerde öngörülen yüklerin kullanılmasına göre 3 ile 6 kat arasında değişen kesit etkileri ve yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak yapılan incelemeler, dikkati dayanımdan elastik ötesi davranışa kaydırmıştır. Taşıyıcı sistemin elastik ötesi yer değiştirmelerinin büyük olması veya sünek olması ile deprem enerjisinin sönmülenebileceği ve elemanlar arasında yardımlaşma sayesinde daha büyük deprem etkilerinin karşılanabileceği öne çıkarılmıştır. Ancak, elastik ötesi şekildeğişiklikler her zaman kolayca güvenilecek bir özellik değildir. Yerine göre bir kısmı süneklik sağlarken bir kısmı da meydana gelen aşırı ikinci mertebe etkileri nedeniyle sistemin göçmesine sebep olabilmektedirler.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında genel eğilim sünek taşıyıcı sistemlerin teşvik edilmesi şeklindedir. Bunun yanında yatay ve düşey kesitlerde düzenli taşıyıcı sistemin seçimi ve elemanların birleşim bölgelerinde gösterilecek özen önemle vurgulanmaktadır. Ayrıca, taşıyıcı sistemde yatay yer değiştirmeleri sınırlandıracak rijitliğin oluşturulması ve bu suretle taşıyıcı olmayan elemanlarda meydana gelebilecek hasarların azaltılması diğer önemli bir husus olarak görülmektedir [92].

1.6.3. Sınır Durumlar

Deprem kayıtlarının ve yeryüzünün tektonik yapısının incelenmesinden deprem tehlikesi olan bölgeleri belirlemek oldukça kolay olmasına karşılık, yapının ömrü boyunca meydana gelebilecek en büyük deprem hakkında tahmin yapmak zordur. Depreme dayanıklı yapı tasarımında, yapının fonksiyonuna devam etmesinin sağlanması, hasarın sınırlandırılması ve yapı içindekilerin hayatının kurtarılması şeklinde olmak üzere değişik seviyelerde korunma söz konusudur.

Kullanılabilirlik sınır durumu; bölgede sık olarak ortaya çıkan küçük depremlerin yapının fonksiyonuna her hangi bir olumsuz etki yapmaması, taşıyıcı sistemde onarıma gerek gösteren hasarın meydana gelmemesi istenmektedir. Bu ise, depremde meydana gelecek şekil ve yer değiştirmelerin sınırlandırılması ve depremde oluşacak etkilerin eleman kesitlerinde meydana getireceği gerilmelerin elastik bölgede kalması şeklinde sağlanmaktadır. Elemanlarda küçük çatlaklar oluşursa da, büyük çatlaklar ve betonun ezilmesi gibi bir olayın meydana gelmemesi istenir. Bu duruma tasarımda esas alınacak deprem, yapının fonksiyonunun önemine bağlı olarak seçilmelidir. Örneğin, konut binasında dönüşüm periyodu daha küçük olan bir deprem seçilirken; hastane, itfaiye binası, haberleşme ve santral binası gibi deprem durumunda fonksiyonuna devam etmesi istenen yerler için dönüşüm periyodu daha büyük olan depremler seçilir. Bu durum yapı önem katsayısının seçimi ile kontrol edilmektedir.

Hasar kontrolü sınır durumu; kullanılabilirlik sınır durumuna esas alınan depremden daha büyük depremlerde yapıda bazı hasarlar meydana gelir. Donatı akma durumuna gelirken, onarımı gerekli olan geniş çatlaklar oluşabilir. Bunun gibi bazı yerlerde temizlenip yenilenmeyi gerektiren beton ezilmelerine rastlanabilir. Bu ikinci sınır durumu, ekonomik olarak onarılıp güçlendirilebilecek durum ile onarım güçlendirilmesi ekonomik olarak mümkün olmayan durumu birbirinden ayırır. Yapının ömrü boyunca, taşıyıcı sistemi bu sınır durumuna getirecek depremin meydana gelme ihtimalinin düşük olduğu varsayılmaktadır. Böyle bir sınır durumuna karşı gelen depremden sonra yapının ekonomik olarak onarılıp güçlendirilebilmesi istenir.

Göçme kontrolü sınır durumu; yönetmelikte öngörülen kuvvetlerden çok daha büyük etki oluşturabilecek bir depremin meydana gelme olasılığı düşüktür. Böyle bir depremin, sıradan bir yapıda, sınırlı bir hasarla karşılaşılması ekonomik olmaz. Ancak, böyle bir durumda göçme mekanizmasının kontrol edilerek, yapının içindekilerin hayatının

korunması bu sınır durumu tarif etmektedir. Ender olarak meydana gelebilecek depremlerde yapıda onarılamayacak kadar hasarın meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır. Ancak, bu durumda da can kaybının önlenmesi için yapının tamamen göçmesi içersinde yaşayanların hayatının korunması gerekmektedir. Büyük depremlerde yapı dayanım sınırı aşılacağı için, yatay taşıyıcılıkta önemli kayıplar olmadan ve tamamen göçme meydana gelmeden, büyük plastik şekil ve yerdeğıştirmeler oluşabilecek şekilde boyutlandırma yapılması bu kontrolün esasını teşkil etmektedir.

Yukarıda tarif edilen sınır durumunun gerçekleştirilebilmesi; yapıda yeterli seviyede yatay rijitlik, dayanım ve sünekliğin sağlanması ve yapının genel davranışının kontrol edilmesi ile mümkün olur. Bu üç sınır durumun ayrılmasında oldukça büyük belirsizlikler olduğu bilinmektedir. Boyutlamada kapasite kavramına önem vererek, bu belirsizlikler belirli ölçüde yenilebilmektedir [92].

1.6.4. Rijitlik, Dayanım ve Süneklik

Yatay kuvvetler altında yapıdaki yer değıştirmelerin hesabı yanal rijitliğin belirlenmesine bağlıdır. Brüt eleman kesitlerinden ve betonun başlangıç elastiklik modülünden hareket edildiğinde, bulunacak rijitlik yatay yükün çok düşük seviyesi için geçerli olmaktadır. Kullanılabilirlik sınır durumundaki rijitlik için, betonun çatlamasının göz önüne alınması uygundur. Yatay kuvvetin büyümesiyle donatıda akma ve donatı ve betonda doğrusal olmayan davranışın hâkim duruma geçmesi, rijitliği daha da azaltmaktadır. Binada taşıyıcı olmayan elemanlar, taşıyıcı olanlara göre daha az elastiktir ve gevrek bir davranış gösterirler. Rijitliğin artırılması ile katların birbirine göre olan rölatif yatay ötelenmesi sınırlandırılarak özellikle taşıyıcı olmayan elemanlarda meydana gelecek hasarı kontrol altına almak mümkün olmaktadır. Bunun yanında özellikle yüksek yapılarda deprem sırasında düşey yüklerin ikinci mertebe etkilerini sınırlı tutmak için yerdeğıştirmelerin sınırlandırılması amacıyla rijitliğin artırılması gerekmektedir.

Seçilen bir deprem etkisine karşı taşıyıcı sistemin gerekli dayanıma sahip olması boyutlamanın esasını teşkil etmektedir. Dayanımın sağlanması için sadece kesitte gerekli donatının bulunmasını yeterli olacağı düşünülmemelidir. Donatının aderansının sağlanması, gerekli kenetlenme boyuna sahip olacak şekilde başlangıç ve bitiş yerlerinin seçilmesi ve betonun yerleştirilmesini zorlaştırılacak donatı düzenlerinden kaçınılması da,

dayanımın oluşması için gereklidir. Ayrıca, konstrüktif kurallara uyulması da öngörülen dayanımın oluşmasında önemlidir.

Yapıda büyük hasarların ve yapının tamamen göçmenin önlenmesi, taşıyıcı sistemin yatay yük dayanımının büyük bir kısmını büyük elastik ötesi yer değiştirmelerde de devam ettirebilmesi ile mümkün olmaktadır. Taşıyıcı sistemin veya elemanlarının ya da kullanılan malzemenin elastik ötesi davranışta da, şekil ve yerdeğiştirmeler artarken, dayanımının önemli bir kısmını sürdürme özelliği süneklik olarak isimlendirilir. Sünek kavramı aynı zamanda büyük şekil ve yerdeğiştirme yapabilme, tekrarlı yüklemelerde enerji söndürebilme özelliğini de içerir. Az sünek olan ve sünek olmayan davranışa ait yük-yerdeğiştirme eğrilerinde eğrinin yataya yakın olarak devam etmesi durumunda, göçme olmadan yapı yük taşımaya devam edecektir. Bu durumda sisteme giren enerjinin bir kısmı doğrusal olmayan davranış sebebiyle söndürülürken, büyük şekildeğiştirmeler elemanlar arası yardımlaşmaya imkân verecek ve taşıma kapasiteleri olan elemanların devreye girmesini sağlanacaktır. Depremde en büyük hasar nedeni sünekliğin sağlanamaması olarak gözlenmiştir. Matematiksel olarak süneklik, ulaşılabilecek toplam yer değiştirmenin elastik sınıra erişildiğindeki yerdeğiştirmeye oranı olarak tarif edilebilmektedir.

Kesit, kesitin bulunduğu eleman ve elemanların oluşturduğu taşıyıcı sistem için ayrı ayrı süneklik tanımlanabilir. Taşıyıcı sistemin sünek davranış göstermesi için kullanılan malzemeler sünek olmalıdır. Donatının kopma gerilmesinin öngörülen değeri sağlaması yanında kopma uzamasının da yönetmelikte verilen sınırın altına düşmemesi gerekir. Bunun yanında donatının basınç gerilmeleri altında da sünek davranış gösterebilmesi için burkulmaya karşı korunmuş olması önemlidir. Beton, esas olarak basınç gerilmeleri taşır ve en büyük kısılması sınırlı bir değere sahiptir. Betonda sıklaştırılmış etriye düzeni ile yanal basınç oluşturarak, betonun basınç dayanımını ve özellikle en büyük birim kısılma değerini arttırmak mümkündür.

Betonarme elemanların eğilme momenti altında donatının akma gerilmesine erişmesi sonucu meydana gelen güç tükenmesi sünektir. Buna karşılık kesme kuvveti altında eğik çekme gerilmeleri veya eğik basınç gerilmelerinin betonda oluşturduğu güç tükenmesi gevrek olarak meydana gelir. Bunun gibi, donatı ile beton arasında aderansın sağlanmaması sonucu donatının betondan sıyrılması ile ortaya çıkan güç tükenmesi de gevreklerdir.

Yapılar, ilgili yönetmelikte Süneklik düzeyi normal sistemler ve süneklik düzeyi yüksek sistemler olarak iki gruba ayrılmıştır. Süneklik düzeyi yüksek olan sistemlerde, oluşturulan yüksek süneklikten dolayı elastik deprem yüklerinin daha büyük bir katsayı ile azaltılması öngörülmektedir. Bir sistemin süneklik düzeyinin yüksek olabilmesi için özellikle aşağıdaki hususların sağlanması gereklidir:

- Kiriş ve kolonlarda sık etriye düzeni kullanılarak, betonun hem dayanımını ve hem de sünekliği arttırılmalıdır. Örneğin, depremde en çok zorlanması beklenen kolon-kiriş birleşim bölgelerine yakın kiriş ve kolon kesitlerinde etriye sıklaştırılmasının yapılması gibi.
- Betonarme elemanlarda sünek güç tükenmesinin, gevrek olandan daha önce ortaya çıkması sağlanmalıdır. Örneğin, kiriş ve kolon gibi elemanlarda ve birleşim bölgelerinde gevrek güç tükenmesi ortaya çıkaran kesme kuvveti kapasitesinin, sünek güç tükenmesi ortaya çıkaran eğilme momenti kapasitesinden daha yüksek tutulması gibi [92].

1.7. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Deprem gibi tekrarlı yük etkisine maruz kalan betonarme yapı elemanlarının davranışlarını incelemek için birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmalar geleneksel ve/veya yüksek performanslı beton ile üretilmiş betonarme yapı elemanlarının, tekrarlı yüklere göre, performanslarının belirlenmesine ya da arttırılmasına yöneliktir. Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak beton üretiminde kullanılan katkı maddelerinin de gelişmesi betonun dayanım ve dayanıklılığını da arttırmakta dolayısı ile daha yüksek dayanımlarda betonlar üretilmektedir. Beton, dayanımının artması ile daha kırılğan bir hal almaktadır. Betona belirli bir sünekliği kazandırabilmek için cam, karbon, polipropilen ve çelik lif gibi lifler eklenmekte ve böylece betonun sünekliğine, oluşan çatlakların sınırlandırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı; çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda geleneksel ve yüksek performanslı kolonlar üretilmiş, üretilen kolonlar, çelik lif katkılı ve katkısız olarak hazırlanmıştır. Deney numuneleri tekrarlı yük etkisinde, göçme oluncaya kadar deneye tâbi tutulmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Geleneksel ve Yüksek Performanslı Betonların Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

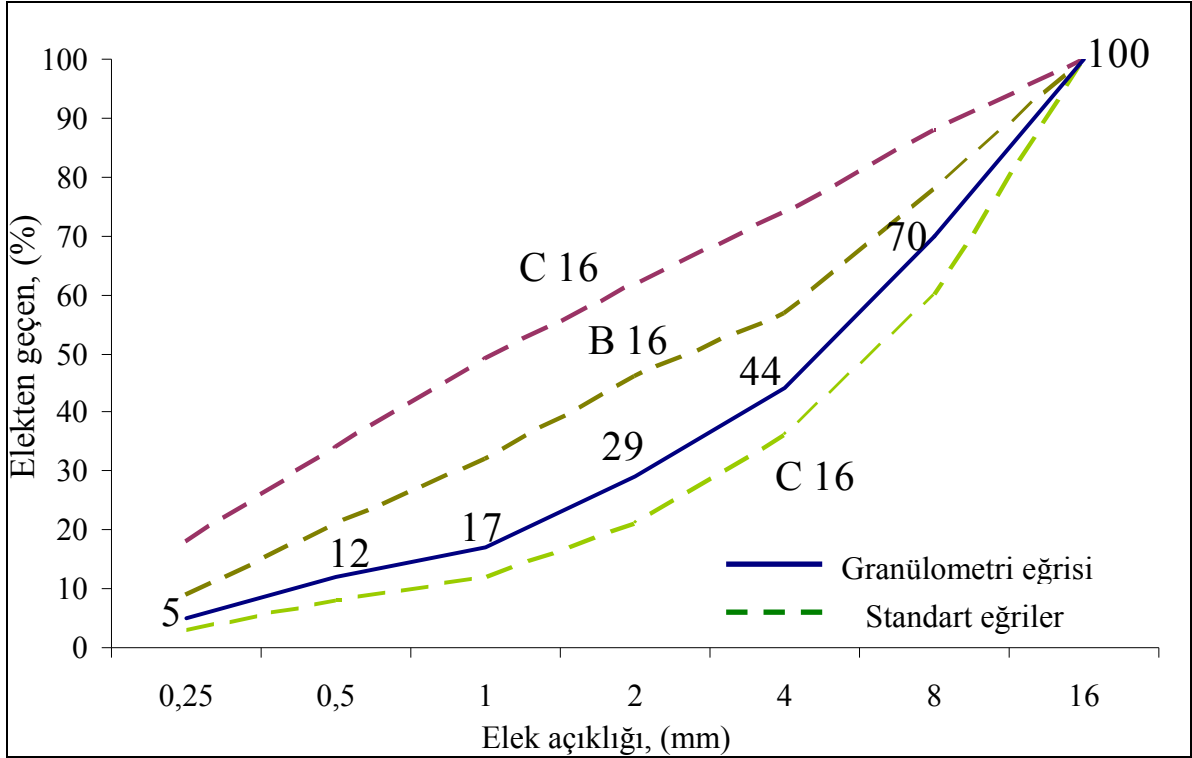
2.1.1. Agregaların Özellikleri

Bu çalışma kapsamında, geleneksel ve yüksek performanslı betonların üretiminde Trabzon İli Maçka İlçesi Meryemana yöresindeki taş ocaklarından elde edilen kalker agregası kullanılmıştır. Maksimum tane çapı 16mm olan bu agregaların agreganın fiziksel özellikleri Tablo 12’de verilmektedir.

Tablo 12. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega tane boyutu (mm)	Gevşek birim kütle (kg/m^3)	Özgül kütle (kg/m^3)		Su emme (%)
		Doygun	Kuru	
İri (> 4mm)	1440	2706	2718	0.42
İnce(<4mm)	1490	2671	2680	0.52

Betonların üretiminde kullanılan agregaların tane dağılımları T.S 706’da [96] tanımlanan sınır eğrileri ile birlikte Şekil 23’te verilmiştir.



Şekil 23. Beton üretiminde kullanılan agregaların tane dağılımı

Buna göre beton bileşimine giren agrega oranları hesaplanarak Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Beton üretiminde kullanılan agregaların granülometrik birleşimi

Elek göz açıklığı	Kütlece (%)
0.00mm–0.25mm	5
0.25mm–0.50mm	7
0.50mm–1.00mm	5
1.00mm–2.00mm	12
2.00mm–4.00mm	15
4.00mm–8.00mm	26
8.00mm–16.00mm	30

Geleneksel ve yüksek performanslı betonların bileşim hesabında mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır [93]. Bu yöntemde göre, W_c ; yerine yerleştirilmiş bir metreküp betondaki çimento kütlesini (kg/m^3), W_a ; agrega kütlesini (kg/m^3), V_w ; su hacmini (dm^3), V_h hava

kütlesini (kg/m^3) ve γ_a ; agreganın doymun kuru yüzeyli özgül kütlesini göstermek üzere agrega hacmi ;

$$\frac{W_a}{\gamma_a} = 1000 - \left(\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (5)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Beton üretimine girecek agreganın i adet ayrı agrega sınıfından meydana geldiği, β_i ve γ_{ai} sırasıyla her bir tane sınıfının kütlece oranı ile birim kütlesini göstermek üzere toplam agrega kütlesi;

$$\sum \left(\beta_i \frac{W_a}{\gamma_{ai}} \right) = 1000 - \left(\frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (6)$$

bağıntısıyla daha hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu şekilde belirlenen agrega kütlesi doymun kuru yüzeyli agrega kütlesidir. Bundan doğal nemdeki agrega kütlesine geçmek için; S_c ve D_n sırasıyla agreganın kütlece su emme ve doğal nem oranlarını göstermek üzere;

$$D_n = W_a (S_c - D_n) \quad (7)$$

bağıntısı ile belirlenen doyma suyu miktarı (kg/m^3), bağıntı 5'ten belirlenen agrega miktarlarından çıkarmak gerekmektedir. Agrega kütlesi bağıntı 6'dan hesaplandığı takdirde, yani karışıma birden çok agrega giriyorsa, doyma suyunun buna bağlı olarak her bir agrega tane sınıfı için hesaplanması gerekir. Dolayısıyla da toplam doyma suyu miktarı;

$$D_s = \sum \left[\left(S_c \right)_i - \left(D_n \right)_i \right] W_{ai} \quad (8)$$

bağıntısıyla hesaplanması gerekmektedir.

2.1.2. Çimento ve Katkı Maddelerinin Özellikleri

Geleneksel ve yüksek performanslı betonların üretiminde karakteristik basınç dayanımı 42,5 MPa olan portland çimentosu (Cem I 42,5) kullanılmıştır. Bu çimentonun, üretildiği fabrikadan alınan bazı özellikleri Tablo 14’te verilmektedir.

Tablo 14. Beton üretiminde kullanılan çimentonun bazı özellikleri

Fiziksel özellikler			Mekanik özellikler		
Özgül ağırlık (g/cm ³)		3.10	Yaş (gün)	Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)
İncelik	200 µm elekte kalan (%)	0			
	90 µm elekte kalan (%)	1.1	2	5.6	28.9
Sertleşme süresi (saat)	Başlangıç	2.35	7	7.30	43.6
	Bitiş	4.00	28	8.5	52.9

Yüksek performanslı beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak silis dumanı, kimyasal katkı maddesi olarak ise süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

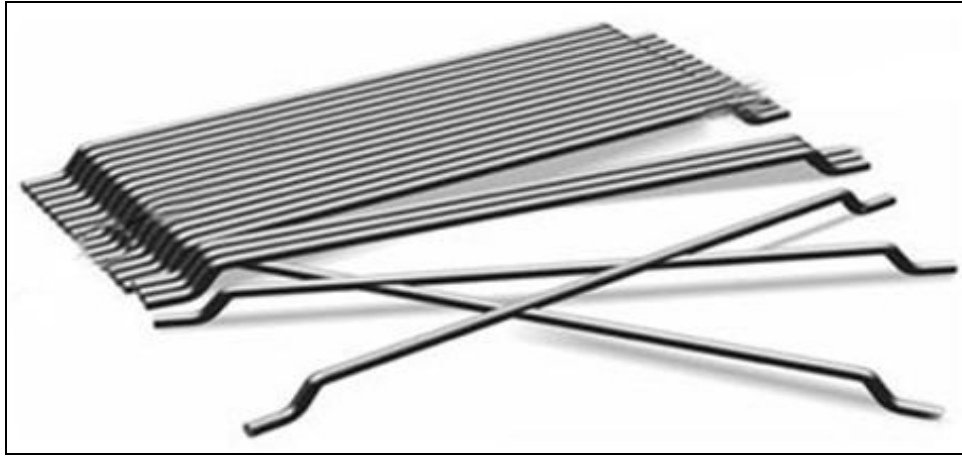
2.1.3. Lifli Beton Üretiminde Kullanılan Lifler

Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolların davranışına etkisinin incelenmesi amacı ile yapılan bu çalışmada çelik lifli betonların üretiminde kullanılan lifler, Bekaert firmasının ürettiği TS 10513’e uygun Dramix marka ZP 305 kodlu sınıf C tip A türü çelik liflerdir. Bu liflerin uçları kıvrılmış, sonu kancalı olup lifler, birbirlerine beton içerisinde homojen dağılımı sağlayan, suda kolayca çözünebilen özel tutkalla yapıştırılmış demetler halinde standart torbalarda satılmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bu çelik lifler, soğukta çekilmiş, düşük karbonlu ve yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Bu liflere ait bazı mekanik özellikler Tablo 15’te verilmektedir.

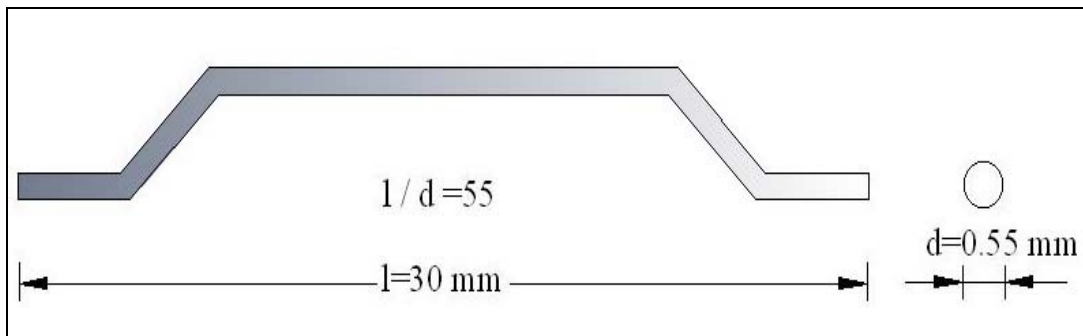
Tablo 15. Çelik lifli kolonların üretiminde kullanılan çelik liflerin bazı özellikleri

Lif tipi	Boy (mm)	Çap (mm)	Görünüm oranı	Yoğunluk (kg/dm ³)	Elastisite modülü (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Kg'daki lif sayısı (adet)
ZP 305	30	0.55	55	7.48	200000	1100	16750

Çelik lifli kolon üretiminde kullanılan Dramix ZP 305 kodlu çelik liflerin görünümü Şekil 24'te bu liflere ait ölçülendirme ise Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 24. Deney de kullanılan Dramix ZP 305 çelik lifler



Şekil 25. Kullanılan Dramix ZP 305 tipi liflere ait ölçülendirme

2.1.4. Kolon Üretiminde Kullanılan Donatıların Özellikleri

Çelik lif katkısının geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların tekrarlı yüklemeler altındaki davranışına etkisinin incelenmesini amaçlayan bu çalışma kapsamında donatı olarak kullanılan inşaat çeliğinin özellikleri, yapı ve malzeme laboratuvarında bulunan 600 kN kapasiteli universal deney aleti yardımı ile tespit edilmiştir. Elde edilen akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve kopma birim uzama değerleri Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. Donatıların bazı mekanik özellikleri

Numune anma çapı (mm)	Ölçülen çap (mm)	Akma dayanımı (N/mm ²)	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Kopma-uzama oranı (%)
8	7.93	571	706	18
14	13.80	562	675	14

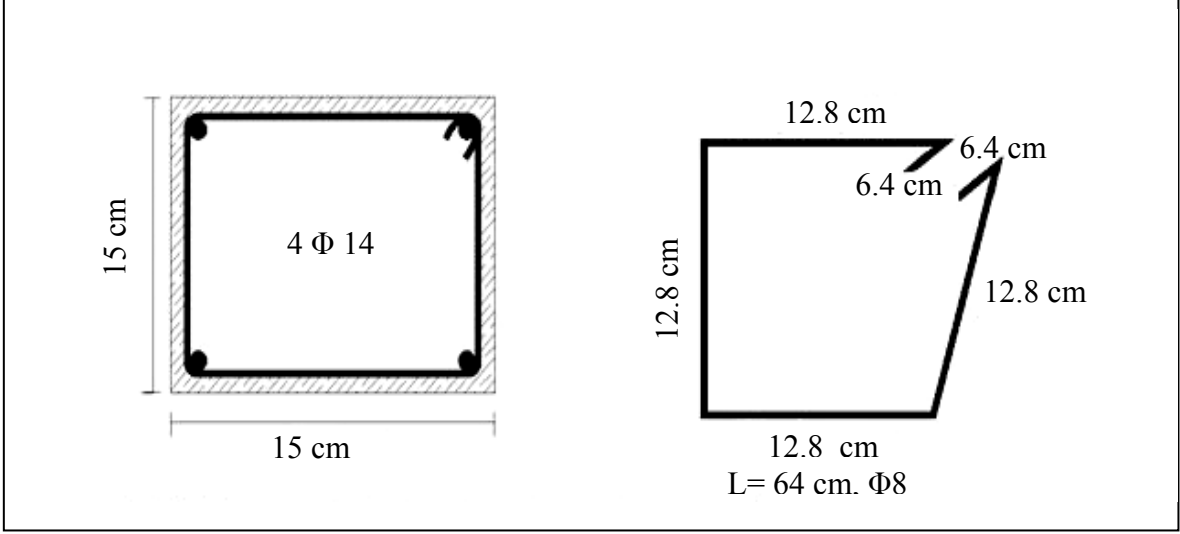
Deneylerde kullanılan donatıların özelliklerinin belirlenmesi amacı ile kullanılan universal deney aleti Şekil 26’da verilmiştir.



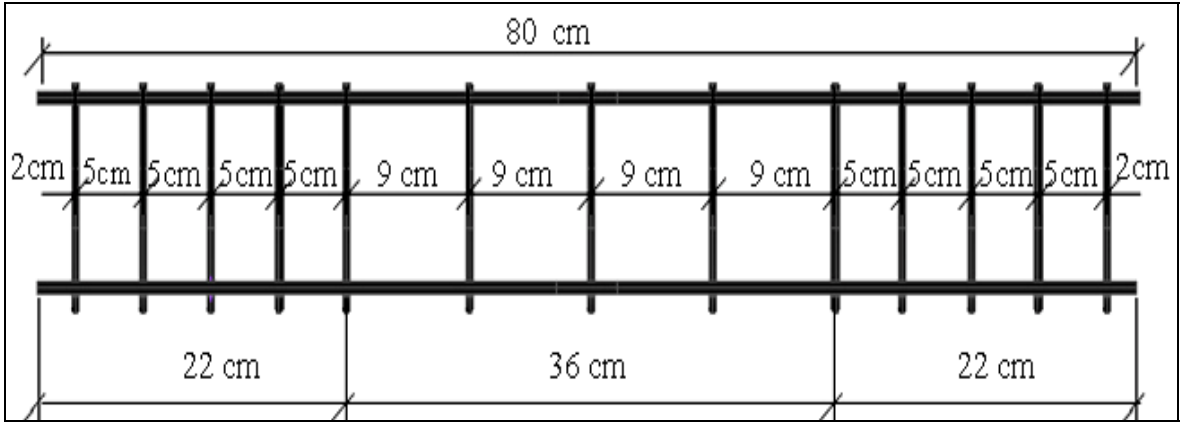
Şekil 26. 600 kN kapasiteli losenhaukwerk marka UHP 60 tipi üniversal deney aleti

2.2. Deney Numunelerinin Özellikleri ve Deney Programı

Geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarının incelenmesi amacı ile en kesit boyutları 150mm x 150mm ve yüksekliği 800mm olan kolon kalıpları hazırlanmıştır. Hazırlanan kalıplarda geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonlar için kullanılan donatı düzeni sabit tutularak lifsiz ve farklı lif oranlarında 1 grup yedek olmak üzere toplam 16 adet üretim yapılmıştır. Kolonlarda kullanılan donatı düzeni Şekil 27 ve 28’de verilmektedir.



Şekil 27. Üretilen kolonların boyutları ve donatı şemaları



Şekil 28. Deneylerde kullanılmak amacı ile üretilen betonarme kolonlara ait ölçülendirme



Şekil 29. Betonarme kolon donatı ve kalıpları

Üretilen tüm kolonlarda S 420 sınıfı donatı kullanılmış ve etriye sıkılaştırması yapılmıştır. Deneyler için üretilen kolonların boyut, donatı ve lif miktarları Tablo 17’de verilmiştir.

Tablo 17. Üretilen kolonların boyut, donatı ve lif miktarları

Seri no	Kolon boyutları (mm)	Boyuna donatı	Enine donatı	Lif yüzdesi (hacimce)
OC 1	150x150	Φ8	4 Φ 14	-----
OC 2	150x150	Φ8	4 Φ 14	0,5
OC 3	150x150	Φ8	4 Φ 14	1
OC 4	150x150	Φ8	4 Φ 14	1,5
HSC 1	150x150	Φ8	4 Φ 14	-----
HSC 2	150x150	Φ8	4 Φ 14	0,5
HSC 3	150x150	Φ8	4 Φ 14	1
HSC 4	150x150	Φ8	4 Φ 14	1,5

2.3. Geleneksel ve Yüksek Performanslı Kolonların Üretimi

Geleneksel ve yüksek performanslı betonların bileşim hesabında mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır. Yukarıda verilen esaslara göre hesaplanan beton bileşimleri yüksek performanslı betonlar için Tablo 18’de geleneksel betonlar için Tablo 19’da verilmiştir. Çelik lif katkıli olarak üretilen betonarme kolonlarda hacimce % 0,5 - % 1 ve % 1,5 oranında lif kullanılmıştır.

Tablo 18. Yüksek performanslı betonlar için beton bileşimi

Çimento (kg/m ³)	W/C	Su (kg/m ³)	Toplam Agrega (kg/m ³)	Doyma suyu (kg/m ³)	Süper Akışkan. (kg/m ³)	Silis (kg/m ³)
500	0.30	150	2420.5	4.66	16.5	50

Tablo 19. Geleneksel betonlar için beton bileşimi

Çimento (kg/m ³)	W/C	Su (kg/m ³)	Toplam agrega (kg/m ³)	Doyma suyu (kg/m ³)
325	0,60	195	2275	4,38

Betonların üretiminde ELE firmasının üretmiş olduğu 80 dm³ kapasiteli 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip eğik eksenli betonyer kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan bu betonyer Şekil 30’da verilmiştir.



Şekil 30. Betonların üretiminde kullanılan 80 dm³ kapasiteli eğik eksenli betonyer

Beton üretimi için her bir sınıf agrega tartılarak önceden nemlendirilen betonyere konulmuş ve doyma suyu ilave edilerek 5 dakika, daha sonra yüksek performanslı betonlar için silis dumanı ilave edilerek 3 dakika, bunu takiben çimento konularak tekrar 3 dakika daha karıştırılmıştır. Karışım suyuna yüksek performanslı beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilerek betonyere konulduktan sonra beton 3 dakika daha karıştırılmıştır. Bu şekilde üretilen taze beton frekansı 2800 devir/dakika olan sarsma tablası üzerinde bulunan kolon kalıplarına, her aşamada 15 saniye titreşim uygulanarak üç aşamada yerleştirilmiştir. Deney esnasında kullanılan 2800 devir/dakika frekansa sahip sarsma tablası Şekil 31’de üretilen kolonlar ve silindir numuneler Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 31. Deneyde kullanılan 2800 devir/dakika frekanslı sarsma tablası



Şekil 32. Üretilen kolonlar ve standart silindir numuneler

Çelik lif katkılı betonların üretiminde kullanılan ve demetler halinde bulunan çelik lifler önceden suya batırılarak birbirinden ayrılması sağlanmış ve betonyere agregalar konulduktan sonra topaklaşmanın oluşmasını engellemek için serpiştirilerek karışıma ilave edilmiştir. Çelik liflerin betona ilave ediliş görüntüsü Şekil 33’te verilmiştir.



Şekil 33. Çelik liflerin betona ilave edilişi

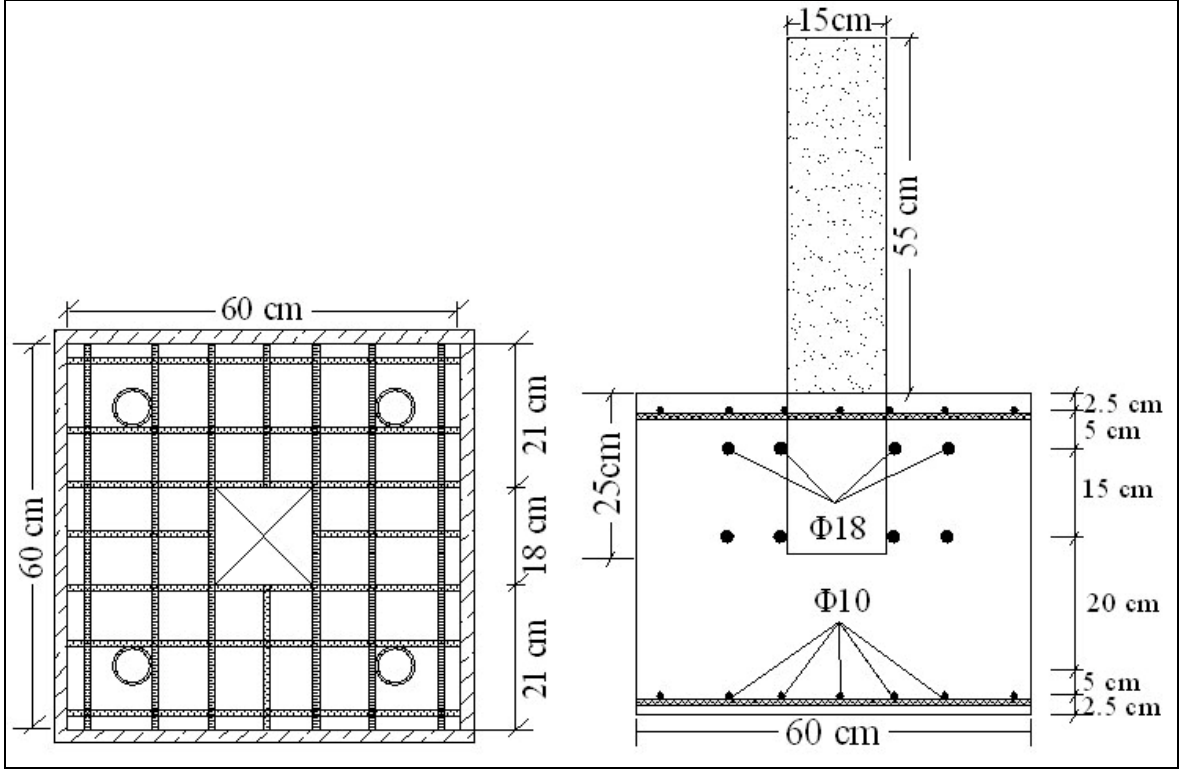
Üretilen betonların basınç dayanımlarını belirlemek amacı ile her bir üretimden üçer adet 150mm çapında 300mm yüksekliğinde standart silindir numuneler alınmıştır. Üretimden bir gün sonra kolonlar ve standart silindir numuneler kalıplarında çıkarılarak 28 gün boyunca sıcaklığı sabit, ($23^{\circ} C \pm 2$) kirece doymun suda bekletilmiştir. 28. gün sonunda kürden çıkarılan numuneler deney gününe kadar yine sıcaklığı sabit tutulan ($22^{\circ} C \pm 2$) ve bağıl nemi $\%70 \pm 5$ olan ortamda bekletilmiştir. Kürden çıkarılan kolonlar Şekil 34’te görülmektedir.



Şekil 34. Yapılan deneylerde kullanılmak üzere üretilen betonarme kolonlar

2.4. Deney Düzenekinin Hazırlanması

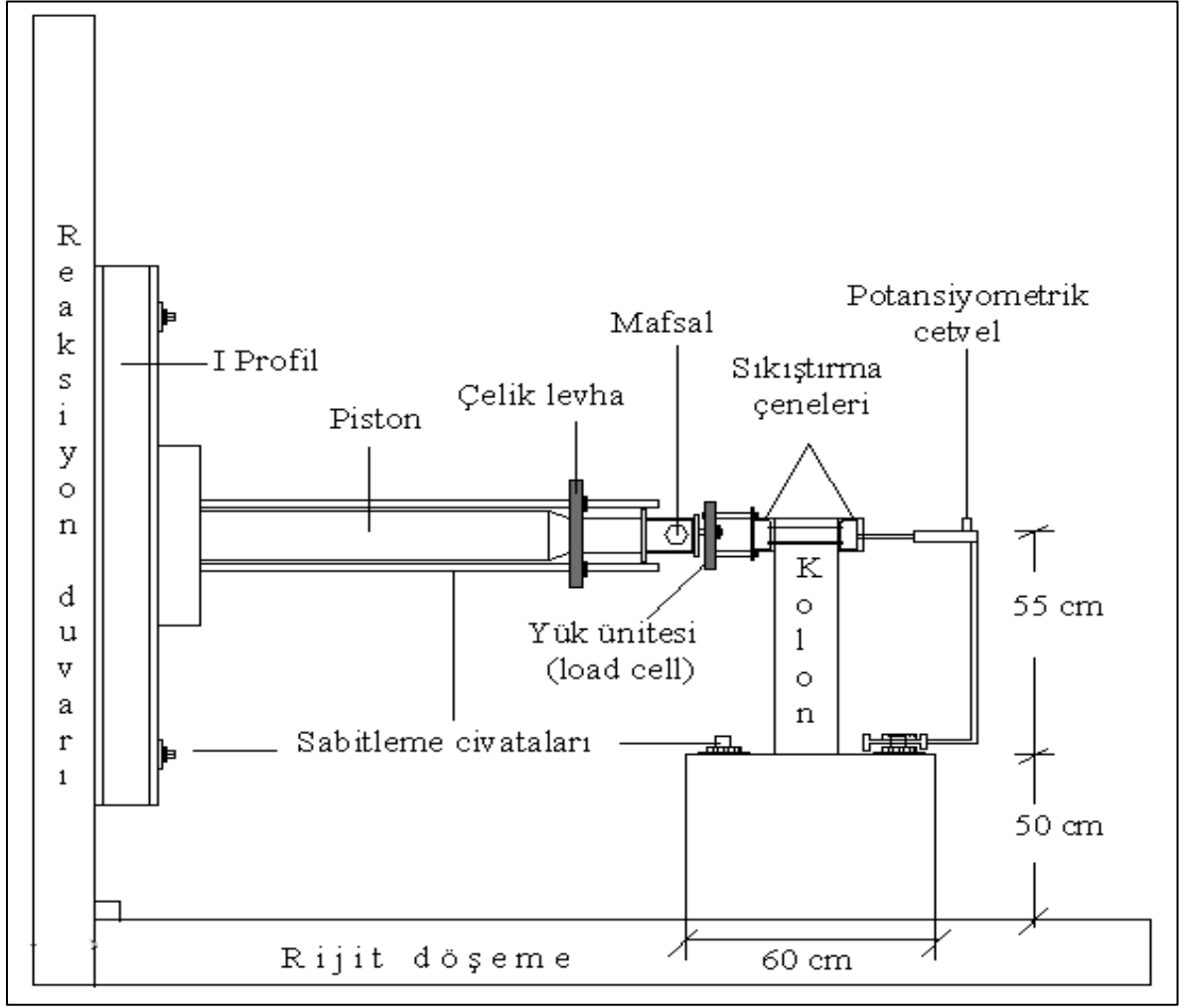
Geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların tekrarlı yükler altındaki davranışına çelik lif katkısının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmada üretilen kolonları yapı malzemesi laboratuvarında bulunan rijit duvara (Reaction Wall) sabitleyebilmek için her bir kolonu en kesiti 600mm x 600mm ve yüksekliği 500 mm olan ve dört köşesine 400mm aralıklarla 30 mm çapında çelik borular yerleştirilmiş temel sistemi üretilmiştir. Bu temel sistemin görünümü ve ayrıntıları Şekil 35 ve 36'da verilmiştir.



Şekil 35. Üretilen kolon - temel sistemine ait ölçülendirme



Şekil 36. Kolonların yerleştirildiği temel sistemi



Şekil 37. Deney düzeneği

Hazırlanan bu temel sistemine daha önce üretilen kolonlar 25 cm gömülecek şekilde yerleştirilmiştir. Üretilen kolon temel sistemleri şekil 38’de verilmiştir.

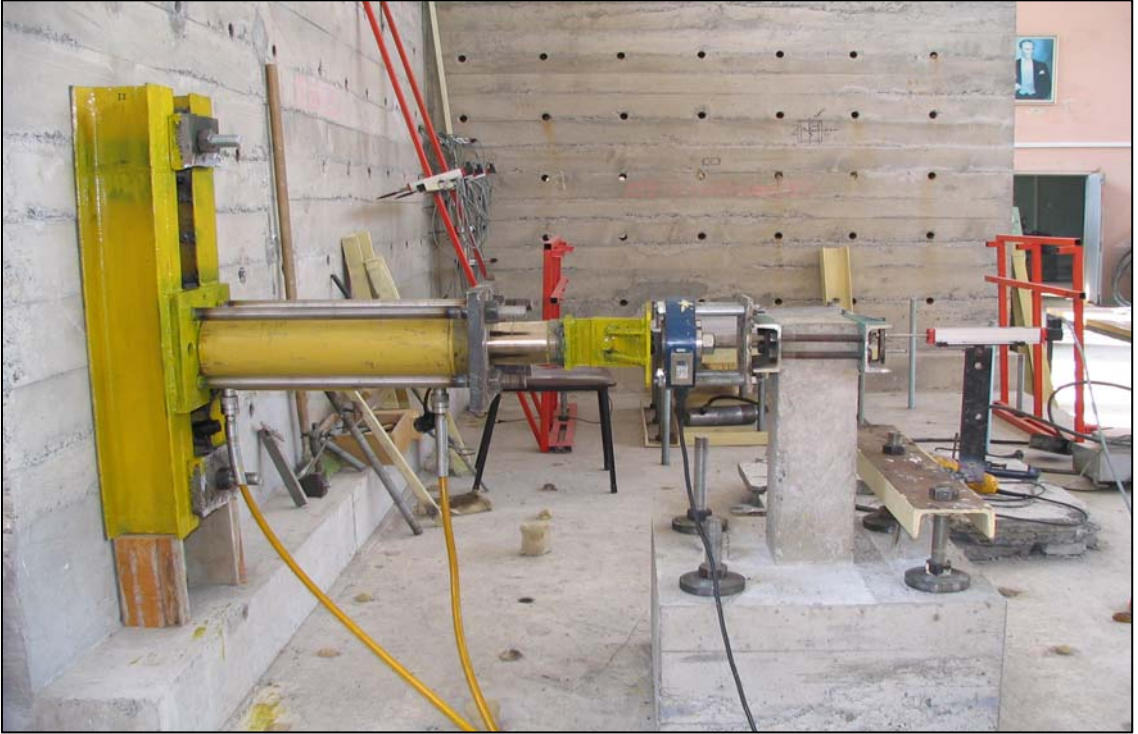


Şekil 38. Üretilen kolon temel sistemleri

Temel betonunun dayanım kazanmasından sonra yapı malzemesi laboratuvarında bulunan rijit duvara 4 adet 30 mm çapında ankraj cıvataları ile sabitlenmiştir. Yatay yüklemeyi yapabilmek amacıyla hazırlanan 80 ton kapasiteli piston rijit duvara dik reaksiyon duvarına yine 30mm çaplı cıvatalar ve levhalar yardımıyla kolon sistemine dik olacak şekilde sabitlenmiştir. Deney düzeneği hazırlandıktan sonra manuel piston yardımıyla 5 kN adımlarla tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Kullanılan bu piston ve bağlantı sistemleri Şekil 39’da deneyler için hazırlanmış deney düzeneğinden bir görüntüde Şekil 40’ta verilmiştir.

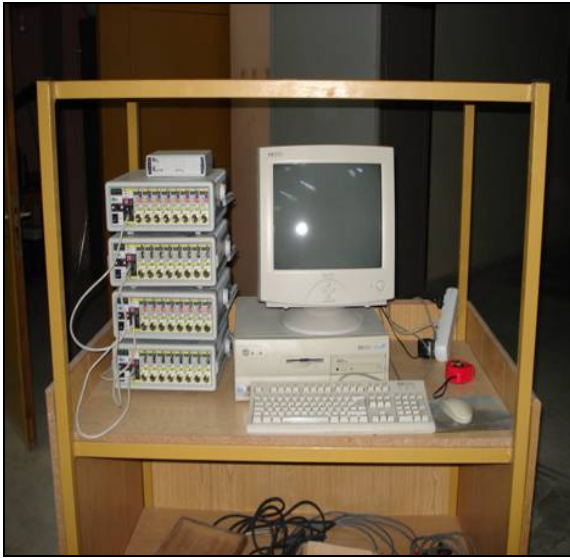


Şekil 39. Deneysel çalışmalarda kullanılan manüel yükleme pistonu



Şekil 40. Deneysel için hazırlanmış deney düzeneğinden görüntü

Deneyde uygulanan tekrarlı yükleri ölçebilmek amacı ile 500 kN kapasiteli çekme ve basınç yükü okuma kabiliyetine sahip bir yük hücresi (loadcell) kullanılmıştır. Uygulanan bu tekrarlı yükler sonucu kolon uç noktasındaki yer değiştirmeyi ölçmek amacıyla kolon uç noktasına 150mm yerdeğişirme ölçebilen lineer potansiyometrik cetvel (LPDT) yerleştirilmiştir. Uygulanan yük ve kolon uç noktasındaki yerdeğişirme TDG – CoDA marka 32 kanallı veri toplama sistemi ile kayıt altına alınmıştır. Bu veri toplama sistemi saniyede 8 veri kaydedebilme özelliğine sahiptir. Bu sistem ve diğer veri toplama aparatları Şekil 41’de gösterilmiştir.



(a)



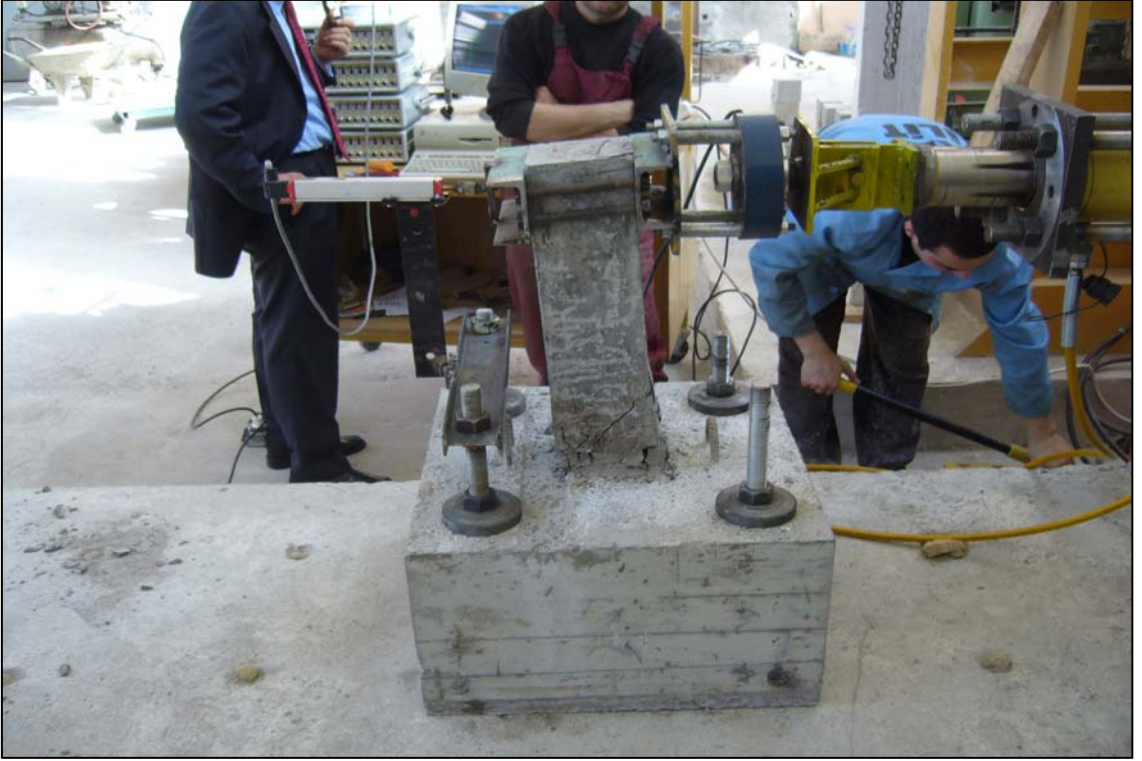
(b)

Şekil 41. Deneylerde kullanılan veri toplama aparatları. (a) bilgisayar destekli veri toplama ünitesi (b) yük hücresi ve deplasman ölçer

Çelik lif katkısının tekrarlı yüklemeye maruz geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolon davranışına etkisinin incelenmesi amacı ile yapılan deneylerden bazı görüntüler Şekil 42 ve 43’de verilmiştir.



Şekil 42. HSC- 3'e ait deney görüntüsü



Şekil 43. HSC-4'e ait deney görüntüsü

3. BULGULAR VE İRDEMELER

3.1. Üretilen Betonların Özellikleri

Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında üretilen deney numunelerinden her bir seriden alınan üçer adet 150mm çapında 300mm yüksekliğindeki standart silindir numuneler üzerine 300 tonluk press yardımı basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yapıldığı 3000 kN'luk press Şekil 44'te, gerçekleştirilen basınç deneyi sonuçları Tablo 20'de verilmiştir.



Şekil 44. 3000 kN'luk WP 300 tipi merkezi basınç aleti

Tablo 20. Standart silindir numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi sonuçları

Seri no	Geleneksel betonlar				Yüksek performanslı betonlar			
	OC 1	OC 2	OC 3	OC 4	HSC 1	HSC 2	HSC 3	HSC 4
Ortalama basınç dayanımı (MPa)	33,4	35,7	37,4	34,4	66,5	70,2	76,5	67,2

Bu tablodan görüldüğü gibi lifsiz olarak üretilen geleneksel betonların (OC1) ortalama basınç dayanımı 33,4 MPa, hacimce %0.5 çelik lif kullanılarak üretilen geleneksel betonların ortalama basınç dayanımı 35,7 MPa, hacimce %1 çelik lif kullanılarak üretilen betonların ortalama basınç dayanımı 37,4 MPa ve hacimce %1.5 oranında çelik lif kullanılarak üretilen betonlarınki ise 34,4 MPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre geleneksel betonlarda hacimce % 0.5, %1 ve %1.5 oranında çelik lif kullanılarak üretilen betonların ortalama basınç dayanımında, lifsiz olarak üretilen betonların ortalama basınç dayanımına göre sırasıyla %7, %12 ve %3 oranında bir artış edildiği görülmektedir.

Lifsiz betona göre en büyük artış %1 oranında çelik lif kullanılarak üretilen betonda meydana gelmiştir. Çelik lif oranının %1 den daha fazla olması durumunda basınç dayanımında lifsiz betona göre belirli bir artış olmakla beraber diğer lif oranlarına göre belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bu da çelik liflerin beton içinde topaklaşarak boşluk oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Lifli betonlarla ilgili yapılan bazı çalışmalarda [29,33,42,66] bu sonuçları desteklemektedir.

Bu çalışma kapsamında hacimce % 0.5 çelik lif katılarak üretilen yüksek performanslı betonun ortalama basınç dayanımı lifsiz betona göre %6, %1 çelik lif kullanılarak üretilen yüksek performanslı betonun ortalama basınç dayanımına göre %15 ve %1.5 çelik lif katılarak üretilen yüksek performanslı betonun ortalama basınç dayanımına göre ise %1 oranında büyük olarak elde edilmiştir.

Çelik lif, yüksek performanslı betonlarda da çelik lif katkısının geleneksel betonlarda olduğu gibi maksimum basınç dayanımına etkisi, %1 lif oranında en büyük değerini almaktadır. Lif katkısının bu orandan daha büyük olması durumunda çelik lifin beton basınç dayanımına etkisi önemsenmeyecek kadar küçüktür. Bu çalışma kapsamında

üretile geleneksel ve yüksek performanslı betonlarda lif katkısının beton basınç dayanımına etkisi en fazla %15 düzeyinde kalmıştır.

Çelik lif katkısının tekrarlı yük etkisindeki geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların davranışlarına etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında deney düzeneği yardımıyla kolonlara uygulanan tekrarlı yüklerden elde edilen maksimum yük ile bu yüke karşılık gelen kolon tabanındaki maksimum moment ve kolon uç noktalarındaki yerdeğıştirmeler Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 21. Elde edilen maksimum yükler ile bu yüke karşılık gelen maksimum moment ve yerdeğıştirmeler

Seri no	OC 1	OC 2	OC 3	OC 4	HSC 1	HSC 2	HSC 3	HSC 4
Uygulanan max. yük (kN)	48.8	53.1	56.7	60.3	47.6	48.8	49.4	48.7
Max. moment (kN mm)	2342.4	2548.8	2721.6	2894.4	2284.8	2313.6	2371.2	2337.6
Max. yerdeğıştirme (mm)	46.2	49.5	54.3	58.25	38.94	40.2	52.26	53.25

Bu tablodan da görüleceği gibi lifsiz üretilen geleneksel betonarme kolana (OC1) uygulanan tekrarlı yük sonunda elde edilen maksimum yatay yük 48.8 kN olmuştur. Kolon uç noktasında meydana gelen yerdeğıştirmeler ise 46.2 mm dir. %0.5 çelik lif katılarak üretilen geleneksel betonarme kolonun (OC2) maksimum yatay yükü lifsiz üretilen betonarme kolonun yatay yükünden %9 daha büyük uç noktasının yatay yerdeğıştirmesi ise %7 daha büyük elde edilmiştir.

Çelik lif katkısının %1 olması durumunda (OC3) lifsiz olana göre uygulanan yatay yük %16 uç noktasının yer değıştirmesi ise %18 daha büyüktür. Geleneksel betonarme kolonlarda lif katkısının %1.5 olması durumunda (OC4) uygulanan yatay yükte %24, uç noktasının yerdeğıştirmesi ise %26 oranında daha büyük elde edilmiştir. Geleneksel betonarme kolonların tekrarlı yük altındaki davranışlarına çelik lif etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada çelik lif oranı arttıkça uygulanan yatay yük seviyesinde de artış gözlenmiştir.

Bu artış çelik lif oranının %0.5 olması durumunda %9 iken çelik lifin %0.5' ten %1' e çıkarılması durumunda %7 oranında %1.5'e çıkarılması durumunda ise %6 oranında artış olmuştur. Buradan da görüldüğü gibi artış oranı lif oranı arttıkça azda olsa bir azalma göstermektedir.

Kolon uç noktalarının yerdeğiştirmesi lif oranına bağlı olarak artmakta ve ya geleneksel betonarme kolonların lifsiz betonarme kolona göre daha sünek davranışını sağladığı gibi betonarme kolonlarda oluşan çatlakların açılmasını önleyerek çatlakların kolon boyunca yayılmasını sağlamışlardır. Lifsiz olarak üretilen geleneksel betonarme bir kolonun tekrarlı yük altında meydana gelen kırılma şekline örnekler Şekil 45'te görülmektedir.



Şekil 45. Geleneksel betonarme kolonlara ait kırılma şekilleri

Yüksek performanslı betonarme kolonlarda çelik lif kullanılması durumunda uygulanan maksimum yatay yük 47.6 kN olarak elde edilmiştir. Çelik lif katkısının %0.5 olması durumunda (HSC2) uygulanan yatay yükte lifsiz yüksek performanslı betonarme kolona göre (HSC1) %1 oranında uç noktasının yerdeğiştirmesi ise %3 oranında daha büyük olmuştur.

Çelik lif katkısının %1 oranında olması durumunda (HSC3) uygulanan yükte %4 oranında, uç noktasının yerdeğiştirmesinde de %34 oranında bir artış gözlenmiştir. Çelik

lif katkısının %1.5 olması durumunda (HSC4) ise yatay yükte artış oranı %2 oranında kalırken uç noktasının yerdeğiştirmesi yaklaşık %37 oranında olmuştur. Yüksek performanslı betonarme kolonlarda çelik lif katkısının etkisi dayanım yönünden beklenen düzeyde oluşmamıştır. Yüksek performanslı betonda çelik lif katkısı %1 den % 1.5' e çıkarılması durumunda yatay yükte %1 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Ancak uç noktasının yerdeğiştirmesini büyük oranda arttırmıştır.

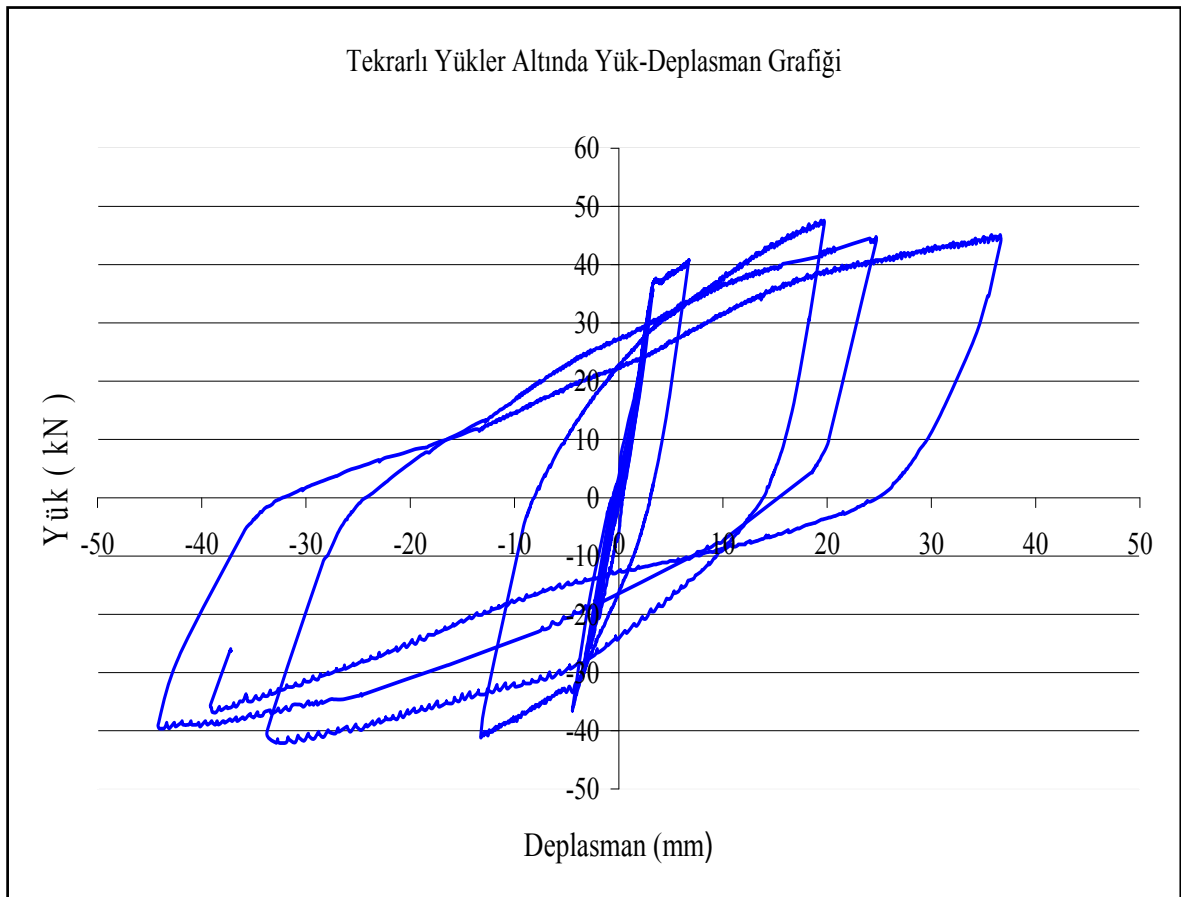
Yüksek performanslı betonarme kolonlara ait kırılma şekilleri örnek olarak şekil 46'da verilmektedir.



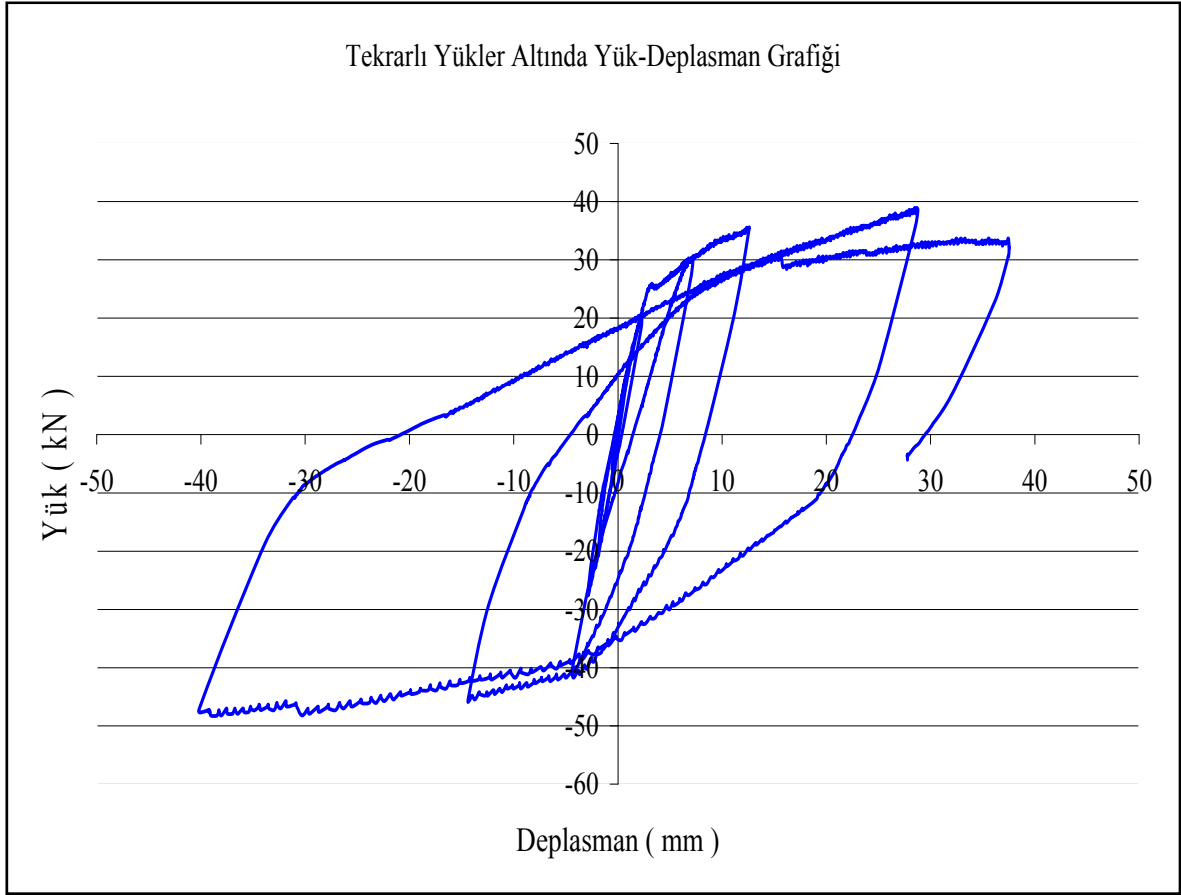
Şekil 46. Yüksek performanslı betonarme kolonlara ait kırılma şekilleri

Bu şekillerden de görüldüğü gibi çelik lif yüksek performanslı betonlarda da çatlak sayılarını arttırmakta dolayısıyla lifsiz betonarme kolonlara göre de daha sünek davranış göstermesini sağlamaktadır.

Çelik lif katkısının tekrarlı yükleme altında geleneksel ve yüksek performanslı kolonların davranışına etkisinin incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmada uygulanan yatay yük ile yerdeğiştirme oranı arasındaki ilişkilere ait örnekler geleneksel betonlar için Şekil 47’de yüksek performanslı betonlar için Şekil 48’de verilmiştir.



Şekil 47. Geleneksel betonarme kolonlara ait tipik yatay yük - yerdeğiştirme ilişkisi



Şekil 48. Yüksek performanslı betonarme kolonlara ait tipik yatay yük – yerdeğiştirme ilişkisi

Deney sonuçlarına göre çelik lif katkısı, yüksek performanslı betonarme kolonlara göre daha sünek davranış gösteren geleneksel betonarme kolonlarda daha etkili olmuştur. Bunun nedeni tekrarlı yük etkisinde betonarme kolonun çatlamasından sonra yatay yükün lif ve donatılar tarafından karşılanması olarak değerlendirilmektedir. Daha gevrek davranış gösteren yüksek performanslı betonarme kolonlarda ise ilk çatlamadan sonra ani ve gevrek bir kırılma davranışı meydana gelmiş, uygulanan yatay yük boyuna donatı tarafından karşılanırken çelik liflerin katkısı yeterli düzeyde olmamıştır. Yüksek performanslı betonların üretimine su/çimento oranının düşük olması nedeniyle çelik liflerin beton içerisinde üniform dağılmadığı, topaklaşmaların olduğu gözlemlenmiştir. Çelik lif katkısının yüksek performanslı betonarme kolonlarda etkisinin az olmasının nedeni çelik liflerin beton içerisinde üniform dağılmaması ve topaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Geleneksel betonlarda su/çimento oranı yüksek olması (0.60) nedeniyle çelik liflerde herhangi bir topaklaşma gözlenmemiştir

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tekrarlı yük etkisine maruz geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolon davranışına çelik lif katkısının etkisini incelemek amacı ile gerçekleştirilen bu çalışmanın birinci bölümünde literatürde mevcut olan geleneksel ve yüksek performanslı betonlar hakkında genel bilgiler verilerek beton özelliklerine etkisi lif katkısının etkileri üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu bölümde konuyla ilgili yapılmış olan bazı çalışmalarda verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde bu çalışmanın amacı doğrultusunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar anlatılmış, üçüncü bölümde ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak değerlendirilerek verilmiştir.

Gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalarda çıkarılan bazı sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1. Bu çalışma kapsamında geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların üretiminde kullanılan betonların ortalama basınç dayanımları yaklaşık olarak sırasıyla 33 MPa ve 67 MPa dır.
2. Geleneksel betonlarda hacimce %0.5 ve %1 oranında çelik lif kullanılması durumunda basınç dayanımında sırasıyla %7 ve %12 oranlarında bir artış gözlenmiştir. Lif oranının %1.5 olması durumunda ise basınç dayanımındaki artış %3 düzeyinde kalmıştır. Beton üretiminde yüksek lif oranının kullanılması durumunda, beton içinde lif dağılımının üniform olmamasını ve/veya yüksek lif oranı nedeniyle topaklaşma riskinin artması, dolayısıyla da beton içinde boşluk oluşmasına neden olmaktadır. Buda basınç dayanımının, belirli bir lif oranından daha fazla olması durumunda istenilen düzeyde arttırılamayacağını göstermektedir.
3. Yüksek performanslı betonlarda basınç dayanımı hacimce %1 oranında çelik lif kullanılması durumunda en büyük değeri almıştır. Bu oran dışındaki çelik lif oranlarında basınç dayanımında pratik bir artış gözlenmemiştir.
4. Bu çalışma kapsamında üretilen lifsiz geleneksel betonarme kolonların yatay yük etkisinde ulaştıkları maksimum taşıma kapasitesi 48.8 kN olmuştur. Kolon uç noktasında meydana gelen yerdeğiştirmeler ise 46.2 mm düzeyindedir. Çelik lif oranı arttıkça hem yatay yük taşıma kapasitesinde hem de kolon uç noktasının yerdeğiştirmesinde basınç dayanımına oranla büyük artışlar olmuştur. Ancak bu artış lif oranının %0.5 olması durumunda %9 iken lif oranının %0.5 ten %1'e

çıkarılması durumunda %7, %1.5' e çıkarılması durumunda ise %6 oranında olmuştur. Buna göre yata yük taşıma kapasitesinde ki artış oranı, lif oranı arttıkça azda olsa bir azalma göstermiştir.

5. Kolon uç noktalarının yerdeğiştirmesi lif oranına bağlı olarak artmış ve geleneksel betonarme kolonların daha sünek davranış göstermesini sağladığı gibi kolonlarda oluşan çatlakların genişlemesini önleyerek çatlakların kolon boyunca yayılmasını da sağlamıştır.
6. Yüksek performanslı betonarme kolonlarda çelik lif katkısının yatay yük taşıma kapasitesine etkisi pratik olarak %3 düzeyinde kalmıştır. Geleneksel betona göre daha gevrek davranış gösteren yüksek performanslı betonun yatay yük etkisi altında aniden kırılması nedeni ile lifin katkısının yeterli düzeyde olmadığını göstermektedir.
7. Yüksek performanslı betonarme kolonlarda çelik lif katkısının kolon uç noktasındaki yerdeğiştirmeyi katkısız olana göre önemli oranda arttırılmıştır. Dolayısıyla da geleneksel betona göre daha az sünek davranış gösteren yüksek performanslı betonarme kolonların sünekliklerini önemli oranda arttırmıştır.

Özetle bu çalışmada farklı çelik lif oranları kullanılarak üretilen geleneksel ve yüksek performanslı betonarme kolonların tekrarlı yük etkisindeki davranışları incelenmiştir. Buna göre geleneksel ve yüksek performanslı betonlarda lif oranının istenildiği kadar arttırılması ile basınç dayanımında arzu edilen artışın sağlanamayacağı görülmüştür. Ancak çelik lif katkısının tekrarlı yatay yüke maruz geleneksel betonarme kolonlarda yatay yük taşıma kapasitesini arttırdığı yüksek performanslı betonarme kolonlarda ise bu artışın yok denecek kadar az olduğu, hem geleneksel hem de yüksek performanslı betonarme kolonlarda kolonların uç noktalarındaki yerdeğiştirme kapasitelerini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Bu sonuçlar, bu çalışma kapsamında üretilen beton ve betonarme kolonlar için geçerli olup, genelleme yapılabilmesi için farklı en kesit boyutları ve yüksekliklerde çeşitli tip ve boyutta çelik lif kullanılarak çok sayıda deneysel çalışma yapılması gerekmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Erdoğan, T. Y., Beton, 1. Baskı, O.D.T.Ü. Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 2003.
2. Yılmaz, Ü.S., Eksenel Yük Etkisindeki Çelik Tel Fiber Takviyeli Etriyeli Betonarme Kolonların Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2001.
3. TS 500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, T.S.E., Ankara, 1984.
4. CEB/FIB Model Code 1990, CEB Bull. d'Information No. 213/214. Committee Euro-International du Beton, Lausanne, Switzerland 1993.
5. TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara, Şubat 2000.
6. Taşdemir, M.A., Bayromov, F., Ağar, A.Ş. ve Yerlikaya, M., Çelik Tel Donatılı Betonların Performansa Dayalı Tasarımı, 6. Ulusal Beton Kongresi Yüksek Performanslı Betonlar, Kasım 2005, İstanbul, 33-44
7. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N. ve Yerlikaya, M., "Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler", Beton 2004 Kongresi Bildirileri, Haziran 2004, İstanbul, 1-34.
8. Taşdemir, M.A., Bayramov, F. ve Yerlikaya, M., Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar, Türkiye Mühendislik Haberleri, 426 (2003), 76-84.
9. Öztekin, E., Basit Eğilme Etkisinde Yüksek Performanslı Betonarme Kiriş Hesabı İçin Gerilme- Şekil Değişirme ve Eşdeğer Gerilimi Dağılım Modellerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
10. Ersoy, U. ve Tankut, T., Yüksek Dayanımlı Betonun Yapısal Davranışı ile İlgili Bir İrdeleme, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 76-115
11. ACI Commite 262, State of the Art Report on High Strength Concrete, ACI Journal (1984) 364-410
12. Hüsem, M., Pul, S. ve Görkem S.E., Bileşik Eğilme Etkisindeki Yüksek Performanslı Betonarme Kolonların Davranışlarının Araştırılması, K.T.Ü Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı, Proje Kod No: 2002.112.01.1, Trabzon, 2006.
13. Taşdemir, M. A., Çelik Tel Takviyeli Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışı, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, İstanbul 1993.

14. Larrard, F. ve Malier, Y., Çok Yüksek Mukavemetli Betonların Mühendislik Özellikleri, 2. Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 76-115.
15. EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
16. Atahan H.N., Taşdemir M.A. ve Oktar O.N., Yüksek Dayanımlı Betonlarda Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Beton Özelliklerine Etkisi, İ.T.Ü Dergisi, 2, 1 (2003) 23-34
17. Kaar, P.H., Hanson, N.W. ve Capell, H.T., Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete, Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, August 1978, Michigan, 161-185.
18. Atımtay, E. ve Tuna, M. E., Yüksek Sünekli Betonarme Karma Sistemin Tasarım İlkeleri, Türkiye İnşa Dergisi, 66 (2001) 14
19. Shah, S.P. ve Ahmad, S.H. Structural Properties of High Strength Concrete and its Implications for Precast Prestressed Concrete, PCI Journal, 30,6 (1985) 92- 119.
20. ACI Comitte 363, State-of-the Art Report on High Strength Concrete, ACI Journal 81,4 (1984) 364-410.
21. Arıoğlu E., Arıoğlu E., Yüksek Dayanımlı Betonların Bünyesel Davranış Parametreleri Üzerine Bir Araştırma, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongresi, Ekim 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 174-190.
22. Tokyay, M., Ramyar, K. ve Turanlı, L., Polipropilen ve Çelik Lifli Yüksek Dayanımlı Betonların Basınç ve Çekme Yükleri Altındaki Davranışları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Beton Kongresi, 1991, İstanbul, Bildireler Kitabı, 303 - 311.
23. Ersoy, U. ve Tankut, T., Yüksek Dayanımlı Betonun Yapısal Davranışı İle İlgili Bir İrdeme, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 122-139
24. Üzümeri, Ş.M. ve Özden, Ş., Yüksek Dayanımlı Betonun İnşaat Kullanımı Konusunda Standartlar ve Yönetmeliklerdeki Gelişmeler, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 159-182.
25. Pul, S., Doğu Karadeniz Bölümü Agregalarıyla Yüksek Performanslı Beton Üretimi ve Özelliklerinin Diğer Betonlarla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1999.
26. Ünal, O., Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Beton Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.

27. Uğurlu, A., Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton, T.C. Enerji ve Tabii kaynaklar Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, Yayın No: MLZ-878, İkinci Baskı, Ankara, 1999.
28. ACI Committee 544, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544-1R-96 American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1997.
29. Aslan, A. ve Aydın, A. C., Lifli Betonların Genel Özellikleri, Hazır Beton Dergisi, 6,36 (1999) 67 – 75.
30. ACI Committee 544, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete ACI 544.4R-88, American Concrete Institute, Detroit, 1996
31. Yerlikaya, M., Çelik Teller ile Donatılmış Beton Elemanların Düşey Yük Altında Davranışları, Hazır Beton Dergisi, (1998), 72-73.
32. Ünal, O., Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Beton Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1994.
33. Yiğiter, H., Yüksek Performanslı Betonların Süneklik Özelliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2002.
34. Sancak, E., Hafif Agregalı Beton Blokların Mekanik Özellikleri Üzerine Çelik Lif Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1998.
35. Bentur, A., ve Mindness, S., Fibre Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, (1990), 1-449.
36. Ding, Y., Kusterle, W., Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fibre-Reinforced Concrete at Early Age, Cement and Concrete Research, 30 (2000) 1573 – 1579.
37. Ersoy, H.Y., Kompozit Malzeme, 1. Baskı, Literatür Yayınları, İstanbul, 2001.
38. Erbaş, M., Lif Donatılı Betonlar, Hazır Beton Dergisi, (1999) 93-95.
39. Eren, Ö., ve Çelik, T., Effect of Silica Fume and Steel Fibers on Some Properties of High-Strength Concrete, Construction and Building Materials, 11 (1997) 373 – 382.
40. Yıldırım, M. A., Hafif Ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Lif Kullanılmasının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
41. Düzgün, O.A., Çelik Liflerin Hafif Betonların Dayanımları Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2001.
42. Arslan, A., Çelik Lifli Betonların Özellikleri ve Kullanım Potansiyeli, Türkiye Mühendislik Haberleri, 369 (1993) 29-33.

43. TS 10514, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Çelik Telleri Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları, T.S.E., Ankara, Aralık 1992.
44. Şimşek, S., Lifli Betonlar Üzerine Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1997.
45. Sancak, E., Hafif Agregalı Beton Blokların Mekanik Özellikleri Üzerine Çelik Lif Kullanımının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1998.
46. TS 10513, Çelik Teller - Beton Takviyesinde Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1992.
47. Akkaya, Y., Peled, A. ve Shah, S. P., Parameters Related to Fiber Length and Processing in Cementitious Composites, Materials and Structures, 33 (2000) 515-524.
48. Yıldırım, S.T., Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2002.
49. Elmacı, Ö., Farklı Oranlardaki Lifli Betonlarda Saklama Koşullarının Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2005.
50. Pigeon, M. ve Cantin, R., Flexural Properties of Steel Fiber-Reinforced Concretes at Low Temperatures, Cement and Concrete Composites, 20 (1998) 365 – 375.
51. Sancak, E. ve Ünal, O., Hafif Betonda Çelik Lif Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, A.K.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 2, 1 (2000) 79–88.
52. Altun, F., Özcan, D.M., Vekli, M. ve Karahan, O., Çelik Lif Katkılı C20 Betonun Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması, A. K.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 4,1-2, (2004).
53. ACI Committe 544, Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete ACI Committe 544.3R–93, American Concrete Institute, Detroit, 1993.
54. TS 10515, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Aralık 1992.
55. Eyyubov, C., Köksal, F. ve Ünal, B., Polipropilen ve Çelik Liflerin Donma Çözülme ve Aşınma Dirençlerine Ortak Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi Betonun Dayanıklılığı, Ekim 2003, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 345–354.
56. Toutanji, H. ve Bayasi, Z., Effects of manufacturing Techniques on The Flexural Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete. Cement and Concrete Research, 28, 1, (1998) 115–124.

57. Arslan, A., Hughes, T.G. ve Barr, B.I.G., Mixed-Mode Fracture -Including Torsion in a New Compact Test Specimen Geometry, Proceedings of International Conference on Fracture Processes in Concrete, June 1991, Netherlands, 737-746,
58. Arslan, A. ve Ulucan, Z.Ç., Çelik Liflerin Erken Yaştaki Betonarme Kirişlerin Göçmesine Etkisi, İMO Teknik Dergi, 8,4 (1997) 1507-1515.
59. Ocean Concrete Products, Ocean Heidelberg Cement Group, Steel Fibre Reinforcement, Working Together to Build Our Communities Report, 1999, USA.
60. Yıldırım, S.T., Lif Takviyeli Betonların Performans Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002, Elazığ.
61. Wafa, F. F. ve Ashour, S. A., Mechanical Properties of High – Strenght Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 89,5 (1992) 449–455.
62. Bayasi, Z. ve Soroushian, P., Effect of Steel Fiber Reinforcement on Fresh Mix Properties of Concrete, Technical Report, ACI Materials Journal, 89,4 (1992) 824-828
63. Swamy, R. N. ve Jojagha, A. H., Workability of Steel Fibre Reinforced Lightweight Aggregate Concrete. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 4, 2 (1982) 103–109.
64. Uyan, M., Yildirim, H. ve Eryaman, A., Workability and Durability of Steel Fiber Reinforced Concrte Cast Wite Normal Plasticiziers, Fibre Reinforced Cement and Concrete Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium, July 1992, England, 1, 70-81
65. Şimşek, O., Erdal, M. ve Sancak, E., Silis Dumanının Çelik Lifli Betonun Eğilme Dayanımına Etkisi, G. Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20, 2 (2005) 211-215
66. Gao, J., Sun, W. ve Morino K., Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced, High Strength, Lightweight Concrete, Cement and Concrete Composites, 19 (1997) 307-313.
67. Balaguru, P. N., Fiber-Reinforced Rapid-Setting Concrete, Concrete International, 14, 2 (1992) 64-67.
68. Soroushian, P. ve Lee, C. D., Tensile Strenght of Steel Fiber Reinforced Concrete: Correlation with Some Measures of Fiber Spacing, ACI Materials Journal, 87 (1990) 541 – 546.
69. Shah, S. P., Stroeven, P., Dalhuisen, D. ve Stekelenburg, P., Complete Stress-strain Curves for Steel Fibre Reinforced Concrete in Uniaxial Tension and Compression, Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, RILEM Symposium, 1978, Lancaster 399-408.
70. Çivici, F. ve Eren, İ., Çelik Lifli Betonun Direkt Çekme Dayanımının Ölçülmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma, Türkiye Mühendislik Haberleri, 6,434 (2004) 49-53.

72. Yıldırım, M. A., Hafif ve Yarı Hafif Betonlarda Çelik Lif Kullanılmasının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1994.
71. Şener, S., Begimgil, M. ve Belgin, A., Size Effect on Failure of Concrete Beams with and Without Steel Fibers, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 14,5 (2002) 436–440.
72. Pierre, P., Pleau, R. ve Pigeon, M. “Mechanical Properties of Steel Microfiber Reinforced Cement Pastes and Mortars, Journal of Materials in Civil Engineering, 11,4 (1999) 317-324.
73. Nelson, P.K., Li, V.C. ve Kamada, T., Fracture Toughness of Microfiber Reinforced Cement Composites, Journal of Materials in Civil Engineering, 14, 5 (2002) 384-391.
74. Kara, N. ve Akın, S.K., Kolon Kiriş Birleşim Bölgesinde Fiber Betonun Taşıma Kapasitesine Etkileri, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Kasım 1999 İstanbul.
75. Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., Batson, G.P., Criswell, M.E., Ramakrishnan, V., ve Wecharatana, M., Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 88, 4 (1991) 339-353.
76. Balaguru, P., Properties of Fiber Reinforced Rapid Hardening Cement Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by H.W.Reinhardt and A.E. Naaman, London, (1992) 300-310.
77. Kosa, K. ve Naaman, A. E., Corrosion of steel fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, 87 (1990) 27–37.
78. Yan, H., Sun, W. ve Chen, H., Effect of Silica Fume and Steel Fiber on the Dynamic Mechanical Performance of High-Strength Concrete, Cement and Concrete Research 29 (1999) 423-426.
79. Najatara, M.C., Dhang, N. ve Gupta, A.P., Statical Variations in Impact Resistance of Steel-Reinforced Concrete Subjected to Drop Weight Test, Cement and Concrete Research, 29 (1999) 989–995.
80. Özyurt, N., İlki, A., Taşdemir, C., Taşdemir, M.A. ve Yerlikaya, M., Mechanical Behavior of High Strength Steel Fiber Reinforced Concretes with Various Steel Fiber Contents, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, September 2002, İstanbul, 885-894.
81. Wang, N., Mindness, S. ve Ko, K., Fiber Reinforced Concrete Beams under Impact Loading, Cement and Concrete Research, 26, 3 (1996) 363-376.
82. Arslan, A., Mixed Mode Fracture Performance of Fiber Reinforced Concrete under Impact Loading, Materials and Structures, 28 (1995) 473-478.

83. Marar, K., Eren, Ö. ve Çelik, T., Relationship between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, Materials Letters, 47 (2001) 297-304.
84. Yıldırım, S.T., Lifli Betonlarda Yorulma Tesirlerinin Araştırılması, Kocaeli Deprem Sempozyumu, 2003, Kocaeli, Bildiriler Kitabı, 294-301.
85. Balaguru, P., N. ve Ramakrishnan, V., Properties of Fiber Reinforced Concrete : Workability, Behavior under Long – Term Loading, Air – Void Characteristics, ACI Material Journal, 85, 3 (1988) 189-196
86. Ezeldin, A., S. ve Lowe, S.R., Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Rapid - Set Materials, ACI Materials Journal, 88, 4 (1991) 384-389.
87. Naaman, A. E., Moavenzadeh, F. ve McGarry, F., Probabilistic Analysis of Fiber Reinforced Concrete, Journal of Engineering Mechanics, 100,2 (1974) 397- 413.
88. Sustersic, J., Mali, E. ve Urbancic, S., Erosion-Abrasion Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete, Durability of Concrete, American Concrete Institute Second International Conference, 1991, Montreal, 2, 729-743.
89. Postacıoğlu, B., Beton, Cilt 2, Beşinci Baskı, Matbaa Teknisyenleri Basım, İstanbul,1987.
90. Vares, S., Frost Resistance of Steel Fiber High Strength Concrete, Nordic Concrete Reaserch, Publication, 15 (1994) 75-88.
91. Kaltakçı, M.Y, Köken A. ve Yılmaz, Ü. Y., Eksenel Yük Altındaki Çelik Lifli ve Lifsiz Etriyeli Betonarme Kolonların Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 1 (2006) 65–85.
92. Celep, Z. ve Kumbasar, N., Betonarme Yapılar, Beta Yayınevi, Dördüncü Baskı, İstanbul, 2005.
93. Ersoy, U. ve Özcebe, G., Betonarme Temel İlkeler TS 500, 2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Hesap, Evrim Yayınevi, Ankara, 2001.
94. Kaplan, S A., Betonarme Yapı Elemanları, Bilbeyki Yayınları, İstanbul, 2004.
95. Gerçek, İ. M., Eğilme Kesme ve Eksenel Basınç Etkisindeki Kolonların Kayma Dayanım Kapasitelerinin Belirlenmesi için Deneysel Bir Çalışma, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993.
96. TS 706 EN 12620, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
97. TS 802, Beton Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.

ÖZGEÇMİŞ

28.12.1981 yılında Trabzon'un Sürmene ilçesinde doğdu. 1987 yılında başladığı Sürmene Ayşe Krali İlkokulunu bitirdikten sonra Sürmene Lisesinde öğrenimine devam etti. Ortaokul ve lise eğitimini burada tamamladıktan sonra 2000 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazanarak, bu bölümden 2004 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

Bekâr olan İsmail SEKBAN, İngilizce bilmektedir.