

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK LİF UÇ GEOMETRİSİNİN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur ALPARSLAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK LİF UÇ GEOMETRİSİNİN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Uğur ALPARSLAN
501111057**

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111057 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Uğur ALPARSLAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇELİK LİF UÇ GEOMETRİSİNİN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **21 Nisan 2015**

Savunma Tarihi : **21 Mayıs 2015**

ÖNSÖZ

Eğitim - öğretim hayatım boyunca, benden desteklerini bir an bile esirgemeyen anneme, babama ve abime,
Gerek deneyler esnasında gerekse yazım aşamasında her zaman yanımda olan nişanlım İnş. Yük. Müh. Selen EKİNCİ'ye,
2006 yılından bu yana öğrencisi olmakla gurur duyduğum okulum İstanbul Teknik Üniversitesi'ndeki değerleri öğretim üyelerine,
Deneyler esnasında ellerinden gelen yardımı esirgemeyip, gerektiğinde bizzat yardımcı olan İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı teknisyenlerine,
Son olarak bana olan güvenini her fırsatta dile getiren, kendisi ile çalışmaktan çok mutlu olduğum değerli danışmanım Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Nisan 2015

Uğur ALPARSLAN

İnşaat Mühendisi, Kimya Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. ÇELİK LİF TAKVİYELİ BETONLAR.....	5
2.1 Giriş	5
2.2 Çelik Lif İçerikli Beton Türleri	9
2.2.1 Geleneksek çelik lifli betonlar.....	9
2.2.2 Karma çelik lifli betonlar	10
2.2.3 Yüksek performanslı lif takviyeli betonlar.....	12
2.3 Çelik Lif Takviyeli Betonların Davranışını Etkileyen Faktörler.....	14
2.3.1 Beton karışımının etkisi	14
2.3.2 Çelik lifin etkisi	14
2.3.2.1 Çelik lif türü ve tipi.....	15
2.3.2.2 Çelik lif hacmi	16
2.3.2.3 Çelik lif dağılımı ve yönü	17
2.4 Çelik Lif Takviyeli Betonların Kullanım Alanları	18
2.5 Çelik Lif Takviyeli Betonların Özellikleri	18
2.5.1 Taze beton özellikler	19
2.5.2 Mekanik özellikler.....	20
2.5.2.1 Basınç dayanımı.....	20
2.5.2.2 Çekme dayanımı	21
2.5.2.3 Eğilme dayanımı	22
2.5.2.4 Tokluk	24
3. ÇELİK LİF TAKVİYELİ BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI TASARIMI.....	27
3.1 Performansa Dayalı Tasarım	27
3.2 Performansa Dayalı Tasarım Parametrelerini Tanımlayan Yöntemler	27
3.2.1 Almanya beton birliği yöntemi	28
3.2.2 ASTM standardı (ASTM C 1018).....	29
3.2.3 Japon standardı (JSCE-SF4).....	32
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	35
4.1 Deneysel Çalışmanın Kapsamı.....	35
4.2 Deneysel Çalışmanın Programı	35
4.3 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	38
4.3.1 Çimento	38

4.3.2	Agrega	39
4.3.3	Çelik lif.....	40
4.3.4	Kimyasal katkı.....	40
4.3.5	Su.....	43
4.4	Beton Karışımının Özellikleri ve Numunelerin Üretimi	43
4.5	Numunelerin Hazırlığı	48
4.6	Yapılan Beton Deneyleri	48
4.6.1	Taze beton deneyleri.....	48
4.6.1.1	Birim ağırlık deneyi	48
4.6.1.2	Çökme deneyi	48
4.6.1.3	Yayılma deneyi	49
4.6.2	Sertleşmiş beton deneyleri.....	49
4.6.2.1	Basınç dayanımı tayini ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması	49
4.6.2.2	Elastisite modülünün tayini.....	50
4.6.2.3	Çekme dayanımının tayini	50
4.6.2.4	Kiriş eğilme deneyi	52
4.6.2.5	Yatay çekme deneyi	54
4.6.2.6	Lif dağılımlarının belirlenmesi	55
5.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	57
5.1	Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	57
5.1.1	Basınç deneyi.....	58
5.1.2	Elastisite modülü deneyi.....	59
5.1.3	Yarmada çekme deneyi	60
5.1.4	Kiriş eğilme deneyi.....	61
5.1.4.1	Yük - sehim eğrileri	61
5.1.4.2	İlk çatlak yükü.....	66
5.1.4.3	Eğilme dayanımı	66
5.1.4.4	Kırılma enerjisi	68
5.2	Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı ve Tokluk Parametrelerinin Sonuçları	72
5.2.1	Alman beton birliği yöntemine göre.....	72
5.2.1.1	Kullanılabilirlik sınır durum için eşdeğer eğilme-çekme dayanımı	72
5.2.1.2	Taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme-çekme dayanımı	73
5.2.2	ASTM standardına göre	74
5.2.3	Japon standardına göre	74
5.3	Yatay Çekme Deneyi.....	79
5.4	Lif dağılımının Röntgen Cihazı ile Görüntülenmesi	80
6.	SONUÇLAR	83
	KAYNAKLAR.....	87
	EKLER.....	91
	ÖZGEÇMİŞ.....	111

KISALTMALAR

ABBY	: Alman Beton Birliği Yöntemi
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	: Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
JSCE	: Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu
KSD	: Kullanılabilirlik Sınır Durumu
MPa	: Mega Paskal
TS	: Türk Standartları
TSD	: Taşıma gücü Sınır Durumu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Liflerin tipik özellikleri.	8
Çizelge 3.1: Çelik lif takviyeli betonlar için şekil değiştirme durumları ve sehim değerleri.	28
Çizelge 3.2: Lif içeren betonların kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırılması.	32
Çizelge 4.1: Çimento içeriği ve yüzdeleri.	39
Çizelge 4.2: Çimentonun fiziksel özellikleri.	39
Çizelge 4.3: Deneylere göre numune boyutları ve adetleri.	43
Çizelge 4.4: Geleneksel beton olarak tasarlanan serilerin karışım miktarları ve taze beton özellikleri.	46
Çizelge 4.5: Kendiliğinden yerleşen beton olarak tasarlanan serilerin karışım miktarları ve taze beton özellikleri.	47
Çizelge 5.1: Çelik lif takviyeli betonların elastisite modülü ve basınç dayanımları .	60
Çizelge 5.2: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin yarma dayanımına etkisi.	62
Çizelge 5.3: Çelik lif takviyeli betonların eğilme dayanımları ve birim alandaki kırılma enerjisi	69
Çizelge 5.4: Çelik lif takviyeli betonların ABBY ve JSCE'ye göre eşdeğer eğilme dayanımları ve ASTM'ye göre kalıcı dayanım faktörleri.....	76
Çizelge A.1: Kullanılan çelik lif türleri	92
Çizelge F.1: Çelik lif takviyeli betonların ABBY'e göre performans sınıfları	103
Çizelge F.2: Çelik lif takviyeli betonların ASTM C 1018'e göre performans sınıfları	104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Lif takviyeli betonların gerilme-şekil değiştirme davranışları.	9
Şekil 2.2: Uzun ve kısa liflerin matris içerisindeki çatlakları kontrol etmesi.	10
Şekil 2.3: Çatlak kontrolünde değişen lif boyutlarının etkisi.	11
Şekil 2.4: Yüksek performanslı betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı.	13
Şekil 2.5: Lif yerleşimi ve döküm yüzeylerine göre test yönlerinin gösterimi.	15
Şekil 2.6: Betonda kullanılan lif türleri.	16
Şekil 2.7: Çeşitli liflerin hafif ağırlıklı betonun işlenebilirlik üzerindeki etkisi.	17
Şekil 2.8: Çökme değerlerinin lif miktarına göre değişimi.	19
Şekil 2.9: Çelik lif takviyeli betonlarda basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisine lif etkisi.	21
Şekil 2.10: Tek eksenli yükleme altında çelik liflerin çekme gerilmesine etkisi.	22
Şekil 2.11: Geleneksel beton ve çelik lif donatılı betonların eğilme davranışlarının karşılaştırılması.	23
Şekil 2.12: Yük-sehim eğrisi ve altında kalan alan.	24
Şekil 3.1: Şekil değiştirme bölgeleri ve karşılık gelen sehim değerleri.	29
Şekil 3.2: a) İlk çatlağa konveks şekilde artarak yaklaşan eğri	30
Şekil 3.3: Tam plastik davranışa göre yük-sehim ilişkisi.	32
Şekil 4.1: Beton üretiminin akış şeması şeklinde gösterimi.	37
Şekil 4.2: 3D ve 4D çelik liflerinin görünüşleri.	40
Şekil 4.3: Geleneksel beton için karışım agregasının tane boyutu dağılımı ve $d_{maksimum}=31,5$ mm için agrega sınır eğrileri.	41
Şekil 4.4: Kendiliğinden yerleşen beton için karışım agregasının tane boyutu dağılımı ve $d_{maksimum}=16$ mm için agrega sınır eğrileri.	42
Şekil 4.5: Taze haldeki çelik lif takviyeli betonun yaş haldeki görüntüsü.	44
Şekil 4.6: Silindirin kesit alanında meydana gelen gerilmeler.	51
Şekil 4.7: Yarmada çekme deneyine tabi tutulan silindir.	52
Şekil 4.8: Kiriş eğilme deneyi.	53
Şekil 4.9: Üç noktalı eğilme yapılan kirişte yükleme ve mesnet noktaları.	53
Şekil 4.10: Yatay çekme deneyi.	54
Şekil 4.11: Prizma numunenin en kesiti ve çelik liflerin dağılımı.	55
Şekil 4.12: 20kg/m^3 miktarında 4D çelik lifinin kullanıldığı prizma numunenin çelik lif dağılımının ve oluşan çatlak yolunun röntgen cihazı ile görüntüsü.	56
Şekil 5.1: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin 28 günlük basınç dayanımına etkisi.	58
Şekil 5.2: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin elastisite modülüne etkisi.	59
Şekil 5.3: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin yarmada çekme dayanımına etkisi.	61
Şekil 5.4: Farklı lif tipleri ve aynı matris dayanımına sahip betonların eğilme davranışları.	63

Şekil 5.5 : Değişen lif hacimleri ve lif türlerinin geleneksel betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.....	63
Şekil 5.6 : Değişen lif hacimleri ve matris dayanımının yüksek ankraj dayanımına sahip lif içeren betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.	65
Şekil 5.7 : Değişen lif türü ve matris dayanımına betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.	66
Şekil 5.8 : Değişen lif türü ve matris dayanımına betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi	67
Şekil 5.9 : Farklı karışımlarda lif içeriğinin kırılma enerjisi üzerindeki etkisi.....	71
Şekil 5.10 : Kullanılabilirlik sınır durumuna (KSD) göre eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif hacmi ile değişimi	73
Şekil 5.11 : Taşıma gücü sınır durumuna (TSD) göre eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif hacmi ile değişimi	74
Şekil 5.12 : Japon standardına göre eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif hacim oranı ve matris dayanımı ile değişimi	75
Şekil 5.13 : Yatay çekme deneyine göre yük-açı-matris ilişkisi.....	79
Şekil B.1 : Çökme değerinin lif türü ile olan değişimi	93
Şekil B.2 : Yayılma değerinin lif türü ile olan değişimi	93
Şekil C.1 : Lif içermeyen silindirik şeklindeki numunenin yarma çekme deneyi sonrası görünüşü.....	94
Şekil C.2 : Lif içeren silindirik şeklindeki numunenin yarma çekme deneyi sonrası görünüşü	94
Şekil C.3 : 60 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin eğilme deneyi ve deplasman ölçer.....	95
Şekil C.4 : Çelik lif içeren bir numunenin eğilme deneyi ve çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçer.....	95
Şekil C.5 : Eğilme deneyi sonrası kopan ve köprüleme vazifesi gören liflerin görüntüsü	96
Şekil C.6 : Tek bir çelik lif içeren bir numunenin yatay çekme deneyi	97
Şekil C.7 : Çelik lifin sıyırılmasından önce matrisi dağılan ve elenen bir numune ...	97
Şekil D.1 : Farklı lif tipi ve 40 kg/m ³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme davranışları	98
Şekil D.2 : Farklı lif tipi ve 60 kg/m ³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme davranışları	98
Şekil D.3 : Farklı lif tipi ve 40 kg/m ³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme davranışları	99
Şekil D.4 : Farklı lif tipi ve 60 kg/m ³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme davranışları	99
Şekil D.5 : Farklı lif tipi ve 40 kg/m ³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme dayanımları	100
Şekil D.6 : Farklı lif tipi ve 60 kg/m ³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme dayanımları	100
Şekil D.7 : Farklı lif tipi ve 40 kg/m ³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme dayanımları.....	101
Şekil D.8 : Farklı lif tipi ve 60 kg/m ³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme dayanımları.....	101
Şekil E.1 : Yatay çekme deneyinde çekme yükü- lif yönlenme açısı ilişkisi.....	102
Şekil E.2 : Yatay çekme deneyinde çekme yükü- matris dayanımı ilişkisi.....	102
Şekil G.1 : 20 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 3408,89 \text{ N/m}$).....	105

Şekil G.2 : 20 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 3408,89$ N/m)	105
Şekil G.3 : 20 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 1042,56$ N/m)	106
Şekil G.4 : 20 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 1042,56$ N/m)	106
Şekil G.5 : 40 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 3504,86$ N/m)	107
Şekil G.6 : 40 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 3504,86$ N/m)	107
Şekil G.7 : 60 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 4274,28$ N/m)	108
Şekil G.8 : 60 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 4274,28$ N/m)	108
Şekil G.9 : 60 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 6132,18$ N/m)	109
Şekil G.10 : 60 kg/m ³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 6132,18$ N/m)	109

ÇELİK LİF UÇ GEOMETRİSİNİN BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

ÖZET

Beton, maliyet ve dayanım gibi önemli iki özellik ele alındığında yapı malzemeleri arasında günümüzde hala en çok kullanılan malzemedir. Bununla beraber, şekil verilebilme, yüksek sıcaklığa ve suya karşı direnç ve düşük bakım maliyeti betonun diğer avantajları arasında yer almaktadır. Ancak gevrek davranış göstermesi, sünme ve rötre kaynaklı çatlama problemleri ve durabilite problemleri de betonun olumsuz özellikleridir. Günümüzde bu istenmeyen özellikleri iyileştirmek adına kimyasal ve mineral katkıları üzerinde ve beton karışımına lif eklenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Betona doğrudan eklenen çelik lifler, gevrek olan betonun davranışını iyileştirerek bir miktar daha enerji yutulmasına, daha az çatlak oluşmasına, duraylılığın ve çekme mukavemetinin artmasına katkıda bulunmaktadır.

Genellikle ülkemizde beton karışım hesabı, betonun basınç dayanımı odaklı yapılırken, durabilite konusu ne yazık ki pek fazla önemsenmemektedir. Bu sebeple, yapının servis ömrü daha kısa olmakta, öte yandan gevrek şekilde göçme meydana geleceğinden dolayı can ve mal kaybı da söz konusu olabilmektedir. Ancak gün geçtikçe çevresel etkilerin yapıya etkisi ve yapının mekanik performansı konularında farkındalık oluşmaya başlamıştır.

Çelik lif katkılı betonlar genellikle, tünel ve maden gibi yapıların kabuk kısımlarında, döşeme ve özellikle fabrika, hava alanları gibi geniş zeminlerde, şev stabilizasyonunda, tamir harçlarında, baraj inşaatında, liman yapılarında, kompozit metal panellerde ve yapının sismik güçlendirilmesinde kullanılır. Çelik liflerin kullanımındaki esas nokta, basınç dayanımına yaptığı katkıdan çok eğilme ve çekme dayanımlarındaki katkısıdır.

Bu çalışmanın amacı, değişen çelik lif oranlarında üretilen betondaki değişimleri yapılan deneyler ile belirlemek, ucu tek kancalı çelik lif (3D) ile tek kancalı life göre daha kısa zamandır kullanılan ucu çift kancalı çelik liflerin (4D) işlenebilirlik, enerji yutma miktarındaki değişim ve çatlak kontrolü gibi konularda karşılaştırmasını yapmaktır.

Bu kapsamda yapılan çalışmanın algoritması, sırası ile; lifli betonlar hakkında genel bilgiler, literatür taraması, çelik lif katkılı betonların performansa dayalı tasarımı, deneysel çalışma ve sonuçlar şeklindedir.

Deneyler esnasında çekme dayanımı 1000 N/mm² ve 1500 N/mm² olan normal dayanımlı, uçları tek kancalı ve çift kancalı olmak üzere iki tip çelik lif kullanılmıştır. Her iki çelik lifin narinliği 67'dir. Çelik lifler birbirlerine özel bir tutkal ile bağlıdır. Lifler beton harcına eklendiklerinde karma suyu ile temas etmekte, lifler arasındaki yapışkan çözünmekte ve lifler kolaylıkla birbirinden ayrılmaktadır. Deneyler 4 grup halinde yapılmış olup ilk iki grup çift kancalı çelik lif ile, son iki grup ise ucu tek kancalı çelik lif ile yapılmıştır. Her gruptaki karışımlar aşağıdaki gibi verilebilir:

Karışım oranları her iki lif türü için de sabit tutuluyorken, geleneksel beton ve kendiliğinden yerleşen betonlarda yeniden hesaplanmıştır. Buna göre, geleneksel beton örneklerinde oran doğal kum $\%17\pm1$, kırma kum $\%33\pm1$, kırmataş I $\%20\pm2$ ve kırmataş2 $\%30\pm2$ olarak belirlenmiş iken kendiliğinden yerleşen betonda doğal kum $\%20\pm1$, kırma kum $\%23\pm1$, kırmataş I $\%57\pm2$ olarak saptanmıştır.

Çelik lifler ile yapılan bu çalışmada çelik lif takviyeli betonlarda performansları belirlemek amacı ile basınç deneyi, yarmada çekme, kiriş eğilme, yatay çekme deney sonuçları ve lif dağılımının incelenmesi amacı ile de x-ray görüntüleri değerlendirildi. Kiriş eğilme deneyi “3 noktalı eğilme deneyi olarak” yürütüldü. Taze hal özelliklerinin belirlenmesi için de çökme-yayılma deneyi yapıldı ve hava miktarı hesaplandı.

Çelik lif donatılı betonlarda taze hal özelliği olarak çökme değeri geleneksel beton için 115 mm-220 mm arasında değişirken aynı lif türünde ve kendiliğinden yerleşen betonda nihai yayılma çapı 66 cm-79 cm arasında değişmektedir. Yayılma testi ve çökme testi sonuçları gösteriyor ki işlenebilirlik üzerindeki asıl önemli değişken çelik lif miktarıdır. Çelik lif geometrisinin betonun özelliklerine olan etkisinin incelendiği bu çalışmada kullanılan iki çelik lif türünün (3D ve 4D) işlenebilirlik üzerinde ikincil bir etkisi olduğu söylenebilir. Beton taze halde iken belirlenen bir diğer özelliği olan hava miktarları da geleneksel betonda $\%0,92$ 'den $\%3,94$ 'e kadar değişiyorken kendiliğinden yerleşen betonda ise bu miktarlar $\%0,23$ 'den $\%3,33$ 'e kadar değişebilmektedir.

Deneyler sonucunda lif içeriğinin ve lif türünün betonun basınç dayanımında ve elastisite modülü üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Ancak çelik lif takviyeli betonların basınç etkisi altında iken göçme esnasında dağılmadıkları, liflerin betonun basınç dayanımına yaptığı bir katkı olarak söylenebilir. Çelik lif donatılı betonların yarma çekme dayanımının ve eğilme davranışlarının çelik lif oranına, çelik lif türüne ve matris dayanımına göre değiştiği görüldü. Ancak en fazla betonun eğilme davranışında artış olduğu anlaşıldı. Bunun sebebinin, deneyler esnasında yüklemekten dolayı oluşabilecek çatlakların kontrolünün, eğilme testinde daha etkin sağlanması olduğu düşünülmektedir. Çelik lif miktarı ile beraber bu performanslarda daha belirgin artış görülmektedir. Matris dayanımının ilk çatlak oluşma yükü ve enerji yutma miktarı üzerinde önemli bir parametre olduğu belirlendi.

Artan lif hacimleri ile beraber kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumlarına göre hesaplanan eşdeğer eğilme dayanımlarında paralel olarak bir artış olduğu görüldü. Benzer şekilde eğilme etkisi altındaki çelik lif takviyeli betonlarda yük-sehim eğrisinde ilk çatlak sonrası artan lif miktarı ile birlikte şekil değiştirme yumuşamasından şekil değiştirme sertleşmesine doğru bir eğilimin meydana geldiği görüldü. Bu sayede KSD'ye ve TSD'ye bağlı performans sınıfları belirlendi.

Her iki lif çeşidi için de lif dağılımlarının beton numunenin her bölgesinde eşit şekilde dağılmadığı gözlemlendi. Bunun nedeninin el ile kalıba yerleştirme ve numune boyutlarının birbiri ile göreceli olarak küçük olmasından kaynaklandığı düşünüldü. Başka bir ifade ile lif türünün, lif dağılımına ve yönlendirilmesine bir etkisi olmadığı sonucuna varıldı. Örnekler ilk önce imaj analiz programı ile sonrasında da X-ray ışınları altında incelendi.

Yapılan yatay çekme deneyi sonucunda ise en büyük sıyrılma dayanımı lifin çimento döküm fazına dik ve matris dayanımının en fazla olduğu ve de 4D tipi lifinin kullanıldığı durumda sağlanmıştır.

EFFECTS OF STEEL FIBER GEOMETRY ON MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

SUMMARY

Concrete is still the most commonly used material in construction sector in terms of strength and cost. Besides, workability, resistance against water and high temperature and low maintenance cost can be listed as its advantages. But unfortunately, its brittle behavior, creep and cracks owing to the shrinkage and durability problems such as corrosion, alkali silica reactions etc. do already exist. In recent years, so as to handle these problems, there has been a remarkable increase in the number of researches which are done not only in universities but also in laboratories that are located in developed companies. By the way, plenty of additives for instance, chemical and mineral additives and fibers are used. By adding steel fibers to concrete, brittle behavior of concrete is modified and turns into ductile behavior. Due to this, toughness of composite tends to increase, less cracks occur, the durability problems are prevented or delayed step by step.

Generally in Turkey only compressive strength is perceived as the target whereas other paramount properties of concrete are subordinated. As a result of this reason, the service life of structures is dramatically short, at the same time loss of life is possible. But people are becoming more concerned about the other parameters of concrete after natural disasters that happened in Turkey, especially the Marmara Earthquake.

Steel fiber reinforced concretes are highly used for tunnel timbering, floorings and particularly very large surfaces, slope stabilization, dam building, seismic retrofitting. Usage areas of steel fibers contribute to tensile strength and flexural strength of composite rather than its compressive strength.

This study aims to obtain the difference of effect on concrete between two sorts of hooked steel fiber in terms of fresh and hardened concrete properties such as workability, compressive strength, flexural strength, tensile strength, pull-out strength. To obtain toughness and anchorage strength, “Third-Point Loading” tests and pull-out tests were done respectively. Third-Point Loading was applied to prisms which were sized as 100x100x500 mm. Moreover, the distribution and orientation of steel fibers and the path of crack after loading were acquired via x-ray diffraction. Apart from the pull out test, all experiments were carried out at 28th day.

The study comprises of six sections and follows this algorithm respectively, introduction, researches about the steel fiber reinforced concretes, the design of steel fiber reinforced concretes based on performance, experimental study, overview of results and conclusions.

Two steel fibers’ aspect ratio and their length are the same, 67 and 60 mm. Their geometry is a little bit different. 3D has one hooked and 4D has double hooked at the end of fibers. But flexural strength is different. The former one’s flexural strength is

1000 MPa while the latter one's strength is 1500 MPa. Since to be produced easier, fibers are glued and attached to each other. During preparation of concrete, adhesive part of fibers dissolves and fibers release.

This study is divided into four groups using different matrix strengths and steel fiber types;

First group: this group's concrete had a normal compressive strength and its water/binder equals to 0.5. Only Portland Cement was selected as binder and 4D fiber type was used. The content of super plasticizer was determined %1.33 of cement weight. Moreover within the various ratios, four aggregates were added to concrete mix. These aggregates were sand, crushed sand, crushed stone I and crushed stone II. This group consists of four subgroups; one control series and three steel fiber reinforced concrete series. Furthermore, fibers were used in the mixture of concrete with a various volumetric ratios: %0 (control specimen), %0.25 (20kg/m³), %0.50 (40kg/m³), %0.75 (60kg/m³). After mixing, each subgroup's concrete was casted into prisms and cylinders until molded.

Second group: this group's concrete had a high compressive strength and its water/binder equals to 0.37. Only Portland Cement was selected as binder and 4D fiber type was used. The content of super plasticizer was determined %4.5 of cement weight. Moreover within the various ratios, three aggregates were added to concrete mix. These aggregates were sand, crushed sand, crushed stone I. Different from first group, crushed stone II was not used because it is not proper to be in the mixture of self-compacting concrete. This group consists of four subgroups as 1st group does; one control series and three steel fiber reinforced concrete series. Similarly, fibers were used in the mixture of concrete with a various volumetric ratios: % 0 (control specimen), %0.25 (20kg/m³), %0.50 (40kg/m³), %0.75 (60kg/m³). After mixing, each subgroup's concrete was casted into prisms and cylinders until molded.

Third group: this group's concrete had a normal compressive strength and its water/binder equals to 0, 5. Only Portland Cement was selected as binder and 3D fiber type was used. The content of super plasticizer was determined %1.33 of cement weight. Besides, the same ratios with first group, four aggregates were added to concrete mix. These aggregates were sand, crushed sand, crushed stone I and crushed stone II. Contrary to this group consists of three subgroups; three steel fiber reinforced concrete series without any control series. As a result of having no control series, fibers were used in the mixture of concrete with a various volumetric ratios: %0.25 (20kg/m³), %0.50 (40kg/m³), %0.75 (60kg/m³). After mixing, each subgroup's concrete was casted into prisms and cylinders until molded.

Fourth group: this group's concrete had a high compressive strength and its water/binder equals to 0.5. Only Portland Cement was selected as binder and 3D fiber type was used. The content of super plasticizer was determined %4.50 of cement weight. Here, this group included three aggregates were added to concrete mix. These aggregates were sand, crushed sand, crushed stone I. Identical with second group, crushed stone II does not exist because of self-compacting concrete. This group consists of three subgroups; three steel fiber reinforced concrete series. Additionally, fibers were used in the mixture of concrete with a various volumetric ratios: %0.25 (20kg/m³), %0.50 (40kg/m³), %0.75 (60kg/m³). After mixing, each subgroup's concrete was casted into prisms and cylinders until molded.

To have more accurately results, for each series concrete molded into four prisms that are sized as 100mm x 100mm x 500 mm and six cylinders with 100mm diameter and 300 mm height. Densities of coarse aggregates (crushed stone I and crushed stone II) are 2.74 g/cm³ and 2.68 g/cm³ whereas densities of fine aggregates (crushed sand and sand) are 2.65 g/cm³ and 2.76 g/cm³. The content of aggregates varies from to concrete type to concrete type because crushed stone II was not used in self-compacting concrete. According to this, steel fiber reinforced concrete that has normal compressive strength includes sand %17±1, crushed sand %33±1, crushed stone I %20±2 and crushed stone II %30±2 while in self-compacting concrete mixture, the percentages were obtained as given: sand %20±1, crushed sand %23±1, crushed stone I %57±2.

After demolded, approximately 24 hours after molded, samples were put and then kept in curing pool for 27 days in order to reach maximum strength. Curing conditions was at 20 °C.

Several hardened concrete tests were done. Compressive test, flexural test, splitting tensile test and pull-out tests were carried out and apart from pull-out tests, in the rest of experiments cylinder samples were used. Prism samples were used for third point loading test and x-ray diffractions. As for fresh concrete tests, to determine workability, slump flow and slump tests and were done. Also, air content was calculated for each mixture.

As a result of slump test that had been done for normal concretes, slump varies from 115mm to 220mm. According to another fresh concrete test for self-compacting concrete, ultimate slump flow diameter has an interval of 66cm and 79 cm. When the effect of steel fibers on fresh concrete properties such as workability is examined, it reveals that, 4D fibers show more resistance than 3D does but this difference is slight. Also, when the effect of steel fibers on air content is compared, it can be easily said that, the geometry of steel fibers does not influence this property of concrete because air contents are more or less the same. But air content directly is affected consistently but not linearly by fibers volume. Entrapped air content differs from %0.23 (control specimen) to %3.33 within the increasing fiber volume.

After experiments, it is seen that the sort or content of steel fibers embedded by any matrix has no effect on compressive strength or modulus of elasticity (Young's Modulus). However during uniaxial compression test it was seen that using steel fiber can be beneficial in terms of safety. Plain concrete, using no steel fibers, ruptured under compression and noisy failure was observed. Surprisingly, steel fiber reinforced concrete samples and plain samples have approximately the same first crack load in spite of the fact that plain samples fractured very early.

Different from the effects of adding steel fibers on compressive behavior, it was proved that fiber reinforced concrete's flexural and splitting tensile strength depend on steel fiber volume and matrix strength. Furthermore, effects of adding steel fibers on flexural behavior are much higher than the other contributions. Load-deflection graphs represent whether such parameters, especially toughness, sharply increases with an outstanding strain hardening. This also leads to an intensive crack control that influences from steel fiber volume and distribution-orientation around weak areas owing to the deflection capacity.

Addition to the benefits of steel fibers to flexural strength and splitting tensile strength, first crack load and the level of toughness are directly related to matrix

strength but effect of this relation is not as much as steel fiber content does. In third point loading test, fiber reinforced concretes that had % 0.25 steel fibers performed strain softening after first crack load whereas for fiber reinforced concretes including % 0.50 fibers, load-deflection curve reached a valley and remained constant up to 3mm deflection after first crack load. And, fiber reinforced concretes that had % 0.75 steel fibers performed strain hardening after first crack load.

It was observed that two significant parameters serviceability limit state (SLS) and ultimate limit state (ULS), calculating according to German Concrete Association, depend on the increase in steel fiber quantity. It is probably due to the anchorage of fibers to matrix and resistance to the elusion. For this reason beam samples indicated a greater performance under third loading test not only in accordance with German Standards but also in accordance with ASTM C 1018 and JSCE.

It is understood that both two sorts of steel fibers have non-homogenous distribution. It is highly possible as a result of molding manually and selecting relatively small sample size 100mm x 100mm x 500mm instead of 150mm x 150mm x 600mm. It can be concluded that geometry of steel fibers does not influence on steel fiber distribution and its orientation. Prisms were cut in order to obtain any cross-section and after that, digital imaging procedure was applied. Images were collected by high-resolution camera, processed by image analysis program and observed by x-ray diffractions of the samples.

As expected, bonding between samples and 3D steel fiber is weaker than bonding between samples and 4D steel fiber and addition to this, lower water/cement ratio accompanies steel fiber type in terms of anchorage strength. According to outputs of pull out test, specimen that had the lowest water/cement ratio and more complex steel fiber (4D), hereby, resisted much more than other specimens.

1. GİRİŞ

Beton, günümüzde inşaatlarda pek çok avantajı sebebi ile kullanılan çok önemli bir malzemedir. İstenilen şekilde döküm yapılabilmesine, suya ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olması, düşük onarım maliyetine sahip olmasının yanı sıra ekonomik bir malzeme olduğu da söylenilebilir. Beton, bu özelliklerinin yanı sıra bozulma ve çatlaklara yol açan kuruma rötresi ve sünme gibi negatif özellikler taşıyan gevrek bir malzemedir. Beton karışımlarına çelik lifler eklenmesiyle taze betonda erken yaş rötresi ve rötre çatlakları önlenmekte; betonun enerji yutma kapasitesi, tokluk, çekme dayanımı gibi özellikleri artmakta ve sonuç olarak betonun durabilitesi artmaktadır [1].

Liflerin çekme dayanımları, beton matrisine ait olan çekme dayanımlarından daha fazla olduğu için maruz kalınan çekme gerilmeleri esnasında kompozit yapı beraber çalışarak olası birçok kılcal çatlağın önüne geçilmektedir.

Değişken yükler altında betonda oluşan çekme bölgelerinden dolayı çeşitli doğrultu ve boyutlarda çatlaklar oluşmaktadır. Genellikle betonun tasarımında sadece basınç dayanımı dikkate alınması ile beraber bu durum gevrek yapıda betonların üretilmesi sonucunu da beraberinde doğurmaktadır. İşte bu noktada beton taşıyıcı elemanların davranışını gevreklikten sünekliğe doğru değiştirmek adına yapılan çalışmalardan birisi de lif takviyesidir. Bu sayede betonun enerji yutma kapasitesi artacak diğer bir değişle tokluğu daha yüksek mertebelere ulaşacaktır [2].

Güncel olarak üç tip lif kullanılmaktadır. Bunlar çelik, polipropilen ve cam liflerdir. Bunlar içinde en yaygın olarak kullanılanı çelik liflerdir. Hangi tip lifin kullanılması ne kadar önemli ise bu liflerin beton içindeki dağılımı da bir o kadar önemlidir. Uniform dağılmış bir lif takviyeli beton, yalın dökülmüş bir betona nazaran çatlak oluşumu açısından önemli ölçüde istenilen seviyelerde davranış göstermektedir. Daha az çatlak oluşumu ile beraber, betonun şekil değiştirme kapasitesi, enerji yutma kapasitesi ve çarpma dayanımı artmış olacak ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde edilmiş olunacaktır [1].

Çelik lifler, uzunlukları 6 cm e ulaşabilen, şekil olarak düz, dalgalı, ucu kancalı veya konik olabilen ve normal veya yüksek çekme dayanımına sahip olabilen takviye elemanlarıdır. Düz şekilli çelik lifler betona yapışması zayıf olduğu ve betonun özelliklerinde az etkili olduğu için çok fazla kullanılmamaktadır. Kancalı uçlu çelik lifler beton içinde tutunması yüksek olduğu için daha çok tercih edilmektedir s119. Çelik liflerin en boy oranı yani uzunluklarının çaplarına oranı ($\text{narınlik} = \frac{l}{d}$), yüzey kalitesi ve mekanik özellikleri betonun performansında önemli rol oynamaktadır [1].

Genellikle kesitleri daireseldir ve çekme dayanımları düşük karbon içerikli orta dayanımda çelikler için 500 –1000 MPa aralığında iken yüksek dayanımlı çelikten yapılan liflerde ise 2400 MPa değerine kadar ulaşmaktadır. Young modülü ise tüm çelik türlerinde birbirine yakındır ve 210 GPa değerindedir [1].

Betonun matris fazında yer alan gelişigüzel ve süreksiz yer alan çelik lifler, çekme gerilmelerden dolayı oluşan çatlakların ilerlemesini engellediği yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Yeterli lif-matris bağının olması ve tellerin dayanımının üretilen betonun çevresel etkenlere, performansına uygun olduğu takdirde büyük şekil değiştirmeleri betona sağlatarak gerilme-şekil değiştirme eğrisinin inen kolunu sağ tarafa doğru kaydırmakta diğer bir deyişle enerji yutma kapasitesini artırmaktadır. Bu katkıyı yaptığı esnada çelik lifler, çatlakların genişliklerini belirli bir seviyede tutmaktadırlar. Her ne kadar çelik lifin betonun performansı üzerinde önemli etkilerde bulunduğu bilinse de en çok üzerinde durulan parametre eğilme davranışıdır. Eğilme davranışında eğilme dayanımı yapılan deneyle saptanırken, betonun tokluğu hesaplanabilir. Lif donatılı betonları normal betonlardan ayıran en önemli özellik süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklardır. Bu farklılıklar tel tipi, tel hacmi, tel uzunluğu ve narınlığı, telin matris içindeki yönelmesi ve telin matristen sıyrılma direncinden kaynaklanmaktadır.

Çelik liflerin betonun mekanik özelliklerini belirgin biçimde arttırmasının yanında bu liflerin kullanılması ek maliyet anlamına gelmektedir. Bu sebeple çelik lifin kullanılması gerektiği koşullarda optimum lif hacminin belirlenmesi mühendislik açısından büyük önem arz etmektedir. Liflerin beton harcına doğrudan eklenebilmesi bir avantaj olarak göze çarpmaktadır çünkü sürekli veya hasır donatılarda karşılaşılan montaj maliyetleri çelik lif takviyeli betonlarda sıfıra indirilebilir. Bunun yanı sıra çelik lif kullanımı ile beraber olası montaj hataları da bu şekilde azaltılmış olunur.

Tüm verilen avantajlarının dışında çelik lif kullanılması asıl sebebi yapıya kazandırdığı daha uzun süreli servis ömrüdür. Betonun çok düşük çekme dayanımını, matris içinde kullanılan çelik lifler karşılamamış, böylelikle betonarme elemanlarda oluşabilecek çatlaklar teller yardımı ile minimize edilmiş olunur.

Çelik lif takviyeli betonların üstünlüklerini, yapı elemanlarına kazandırılan eğilme ve çekme dayanımları, çatlakların sınırlandırılması, toklukta artış, kırılmalara karşı direnç, rötrede azalma ve olası montaj hatalarının önüne geçilmesi şeklinde sıralayabiliriz.

Çelik tel donatılı betonların normal betonlara oranla sağladıkları üstünlüklerden dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Bu betonlar yaygın olarak beton yollar ve yol üst yapıları, endüstriyel zemin betonları, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi, tünel kaplamaları, havaalanı kaplama betonları, liman kaplamaları, depreme karşı stratejik yapılar, betonarme yapıların güçlendirilmesi, prekast elemanlar, beton borular ile güvenlik yapılarında kullanılmaktadır. Liflerin beton karışımlarına eklenmesi çatlakları önleyici bir etki yapar, bu lifler tek çeşit olarak kullanılabilecekleri gibi malzemenin değişik özelliklerini iyileştirebilmek açısından birkaç lif karıştırılarak da kullanılabilir, bu şekilde üretilen betonlar karma lif takviyeli betonlar olarak isimlendirilebilir.

Sunulan bu çalışmada çelik tel donatılı betonlar ile ilgili genel bir değerlendirme yapıldıktan sonra bu betonların performansa dayalı tasarımı incelenmektedir. Bu kapsamda, çelik tel donatılı betonlar üzerinde İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmış çeşitli deneysel çalışmalardan elde edilen yük – sehim davranışları, basınç ve çekme dayanımları ve en büyük sıyrılma yükü verilmektedir. Ardından, kendiliğinden yerleşen betonlarda ve geleneksel betonlarında çelik lif kullanılması etkileri değerlendirilmektedir. Ayrıca, çelik tel donatılı betonların uygulanmasında önemli bir sorun olan liflerin yönlendirilmesi ve çelik liflerin işlenebilirliğe etkisi üzerinde de durulmaktadır.

Gün geçtikçe daha fazla kullanılmaya başlanan çelik lifler, üreticileri tarafından sürekli geliştirilmekte ve değişik gövde, en kesit veya uç geometrileri ile güçlendirilen kompozitin performansı günbegün iyileştirilmektedir. Her ne kadar yeni ticari ürünlerin varlığından söz edilse de bu lifler hakkında yeteri kadar çalışma yer almamaktadır. Bu noktada, yapılan tüm deneylerde üzerinde durulan asıl konu,

kullanılan iki farklı uç geometrisine sahip lifin betonun performansı üzerindeki etkisini incelemek ve yapmış olduğu katkıları karşılaştırmaktır.

2. ÇELİK LİF TAKVİYELİ BETONLAR

2.1 Giriş

Çekme dayanımı, basınç dayanımından çok daha düşük olan malzemeleri güçlendirmek için liflerin kullanımı çok eski çağlara dayanmaktadır. Muhtemel en eski yazılı bir tarife göre kil tuğlaların saman ile güçlendirilmesi yapılmış ve kullanılmıştır. Buna göre, yaklaşık 3500 yıl önce, gün altında pişirilmiş saman takviyeli tuğlalar, bugün Bağdat yakınlarındaki 57 metre yüksekliğindeki Aqar Quf tepesinin inşaatında kullanılmıştır [1, 3].

Modern çağda geniş kullanıma sahip ilk kompozit 1900 yılında asbest elyafı olarak üretilmiştir. Bugün, çeşitli türde elyaf, çeşitli türdeki maddeleri takviye etmekte (epoksi, plastik, seramik vb.) kullanılırlar [4].

Geçmişteki doğal liflerin kullanımından tecrübe edilerek günümüzde yapay lifler betonun mekanik özelliklerini geliştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Bu lifler, çelik lifler başta olmak üzere, cam lifler, sentetik lifler, karbon lifler ve doğal lifler olarak söylenebilir [1].

Beton, diğer yapı malzemeleri ile kıyaslandığında birim dayanım başına düşen maliyette en avantajlı malzeme olduğu için günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple birçok bilimsel araştırmaya da konu olmuştur ve gelecekte de olacaktır. Lifler, betonun zayıf olan yönlerini iyileştirmek için kullanılmakta ve yapılan bilimsel çalışmalara da bu yönüyle konu olmaktadır [5].

İlk kullanılan sentetik elyafın yanında diğer lifler de geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Örnek olarak çelik ve cam lifler, karbon ve kevlar gibi yeni lifler ve sentetik (polipropilen, naylon serisi) ve doğal (selüloz, sisal) gösterilebilir. Bu lif türleri özelliklerine, verimliliklerine ve maliyetlerine göre çeşitlilik göstermektedir. Bazı genel lif türleri Çizelge 2.1’ de sıralanmıştır. Mekanik özelliklerinin yanında liflerin geometrisi de değişebilmektedir. Çelik ve cam lifler betonda kullanılan ilk yıllarında düz bir geometriye sahiptiler. Bundan sonra, mekanik bağ kuvvetlendirmek için daha karmaşık bir geometrik şekilde geliştirilmişler ve

retilmişlerdi. Günümüzde profil en kesitli, ucu kancalı veya deforme şekilde olacak şekilde türleri bulunmaktadır.

Her ne kadar elik lif takviyeli beton hakkında ilk alınan patent 1874 yılına rastlasa da bunların uygulaması 1960'lardan itibaren başlamıştır. Liflerin herhangi bir oranda kullanılması ile beraber betonun işlenebilirliği, liflerin kullanım oranı ile ters orantılı olarak değiştedir ve bu sorun, o dönemde kimyasal katkıların betonlar içinde kullanılmasına kadar devam etmiştir. Çeşitli özelliklere sahip kimyasal katkıların geliştirilmesi, bunun yanında mineral katkıların muhteva oranları ve liflerin tüm bunlar ile beraber nasıl çalıştığı, uzun süredir birçok araştırmaya konu olmuştur [1].

elik lif takviyeli beton, ana bileşenler olarak imento, su ve agreganın bulunduğu ve diğer katkıların (kimyasal ve/veya mineral) yanında elik liflerin de matris içerisinde gelişigüzel şekilde dağıldığı kompozit elemanlardır. Liflerin burada kullanılma amacı çatlak kontrolünü sağlamak ve daha büyük enerji yutma kapasitesine sahip olmaktır [1].

Yalın betonlar, lif takviyesiz betonlar düşük çekme dayanımlı ve çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip gevrek malzemelerdir. Bu yüzden betonlar, döküm yapılmadan önce takviye edilmeye ihtiyaç duyarlar. Tarihsel olarak bu takviye, oluşan kayma ve çekme gerilmelerini karşılayacak şekilde uygun yerlerde konumlandırılan sürekli çubuklar ile yapılmaktadır. Diğer taraftan lifler sreksizdirler ve matris içerisinde gelişi güzel bir dağılım gösterirler. Donatılara nazaran lifler birbirlerine daha yakın konumlandırıldığı için çatlak kontrolünde daha iyidirler. Ancak önemli bir husus vardır ki o da, lifler ile donatıların birbirlerinin yerine kullanılamamalarıdır. Diğer bir deyişe, ikame değillerdir. Modern beton teknolojisinde liflerin ve donatı çubuklarının farklı görevleri vardır ve birçok uygulamada beraber kullanıldığına rastlanılmıştır [4].

elik lif tercih edilmiş olunsun veya olunmasın, herhangi bir lif donatılı betonda betonun performansını etkileyen life ait parametreler, lif içeriği (hacim oranı) ve lif narinliğidir (lif uzunluğu/lif apı). Lif narinliği her ne kadar performansı etkilese de işlenebilirlik üzerinde de etkisi vardır. Narinliğin artması ile topaklanma ve lifin matris içerisinde dengesiz dağılma riski artmaktadır. Öte yandan, lif miktarı da benzer şekilde işlenebilirliği aşırı kullanımlarda çok ciddi biçimde etkiler. Yazıcı ve

diğerleri, yaptıkları çalışmada optimum lif hacminin % 0,5 - % 2,5 olduğunu ortaya koymuşlardır [6].

Lif takviyeli betonlar elbette ki yalın betonlara göre daha maliyetlidirler ancak unutulmamalıdır ki çekme gerilmeleri yönünden betonun modifiye edilmesi, çatlak oluşumunu geciktirecek ve bu sayede birçok durabilite problemleri ile yapı erken yaşta karşılaşmamış olacaktır. Bunlardan hareketle, liflerin beton içerisinde kullanımı yapının servis ömrüne olumlu şekilde katkı sağlamış olur ve böylelikle hem can hem de mal güvenliği açısından kazanç elde edilir.

Çizelge 2.1: Liflerin tipik özellikleri [4].

Lif	Kimyasal Yapı	Çap (µm)	Özgül Ağırlık ($\frac{g}{m^3}$)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)	Kopma uzaması (%)
Çelik		5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Cam		9-15	2,6	70-80	2,0-4,0	2,0-3,5
Asbest	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2,0-3,0
Krosidolit		0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0-3,0
Krisolit						
Polipropilen	$(C_3H_6)_n$	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Kevlar	$(-CO-C_6H_4-CO-NH-C_6H_4-NH-)_n$	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2,0-4,5
Karbon (yüksek dayanımlı)		8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Naylon	$(-NH-(CH_2)_5-CO-)_n$	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Selüloz	$(C_6H_{10}O_5)_n$	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Akrilik		18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietilen	$(CH_2=CH_2)_n$	25-1000	0,92-0,96	5	0,08-0,60	3-100
Odun lifi		-	1,5	71,0	0,9	-
Sisal		10-50	1,5	-	0,8	3,0
Çimento fazı		-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

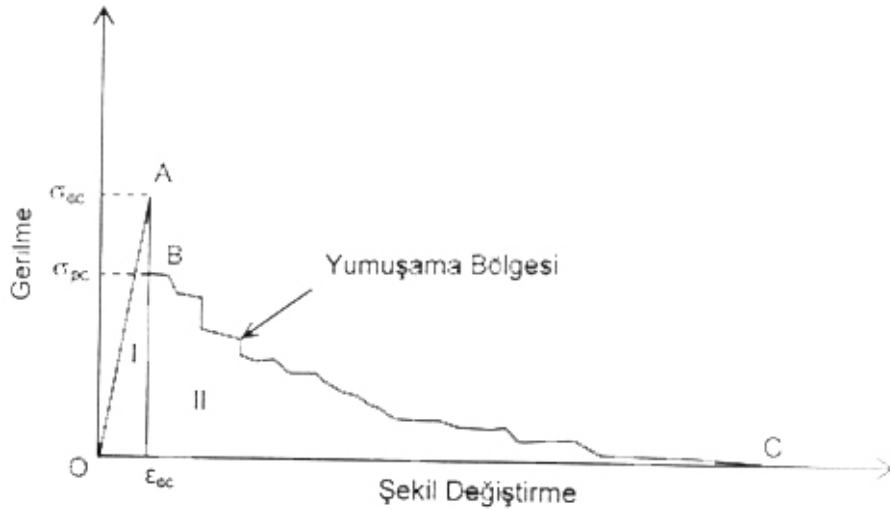
2.2 Çelik Lif İçerikli Beton Türleri

Çelik lif takviyeli betonlar performans ve karışım özellikleri açısından; Geleneksel lif takviyeli beton (LTB), karma lif takviyeli beton (KLTB) ve yüksek performanslı lif takviyeli beton (YPLTB) olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1 Geleneksek çelik lifli betonlar

Bu türlü betonlar, yalın betonlara narinlik veya geometri gözetmeksizin lif eklenmesi ile üretilmektedir. İşlenebilmede karşılaşılan problemlerden ötürü LTB sınırlı oranlarda kullanılıyorken, lif hacim oranı için en fazla %3 olarak verilmiştir [7].

Lif takviyeli betonların eğilme altındaki davranışlarında ilk çatlak oluşumuna ait gerilme ve bu gerilmeden sonraki davranış, betonların kendi içlerinde karşılaştırma yapılırken dikkat edilen iki parametre olarak göze çarpmaktadır. Genellikle ilk çatlak oluşumuna ait gerilme değeri matrise ait oluyorken, çatlama sonrası davranış çoğunlukla geride kalan liflerin performansı ile alakalıdır. Geleneksel lif takviyeli betonların tipik gerilme-şekil değiştirme davranışı, Şekil 2.1’de de görüldüğü gibi iki kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.1: Lif takviyeli betonların gerilme-şekil değiştirme davranışları [8].

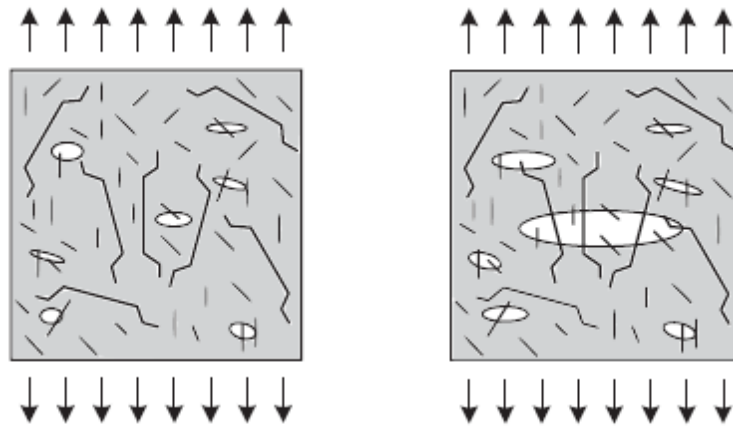
Grafikteki ilk kısım, [OA] doğru parçası ile gösterilen bölgedir ve bu bölge ilk çatlak oluşumuna ait gerilme ve şekil değiştirme değerlerini verir. Davranış, doğrusala çok yakındır. İkinci kısım ise çatlak oluşumundan sonraki şekil değiştirme yumuşamasının olduğu bölgedir. Liflerin hacmi veya narinliği gibi parametrelerinin kompozit yapıya olan etkisi, bu ikinci kısım üzerinde görülür.

2.2.2 Karma çelik lifli betonlar

Bu türdeki betonlar, matris içerisinde tek tip lif kullanımı yerine birden fazla türde lifin kullanıldığı yapılardır. Karma şekilde kullanılmasının sebebi, kompozit yapının performansını artırmak ve özel uygulamalar kazandırmaktır. Karma lifler, farklı narinlik, uç ve/veya gövde geometrisine sahip olabilmektedirler [9].

Betonun performansını artırmak için farklı türde (boy, narinlik, geometri vb.) liflerin kullanılması, tek tip lif kullanılmasından daha faydalı olabilmektedir. Buna göre, kısa liflerin varlığı ile lif sayısının artmasından dolayı çatlaklar ve dolaylı olarak durabilite problemleri azalırken uzun liflerin varlığı ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır [1].

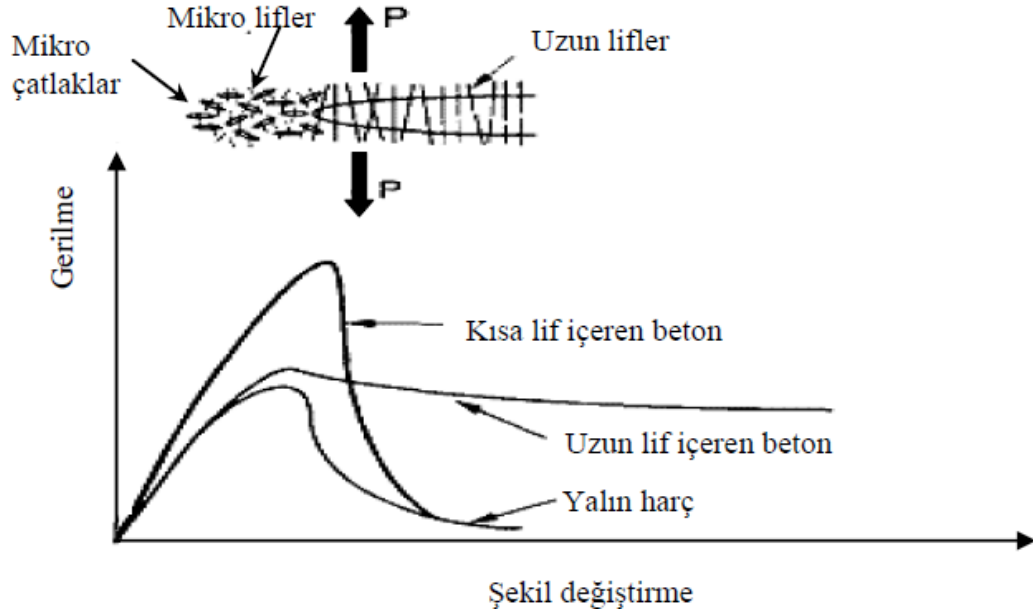
Beton içerisinde çeşitli sebeplerden dolayı makro, mezo ve mikro ölçekte çatlaklar oluşmaktadır. Bu oluşan farklı düzeydeki çatlakları önlemek için de farklı liflerin kullanılması ile beraber karma lifli betonlar oluşmaktadır [9]. Makro çatlakları kontrol etmek için yüksek dayanımlı lifler diğer bir deyişle çelik lifler kullanılırken, mikro çatlaklar için ise polipropilen veya polivinilalkol türündeki lifler (mikrolifler) tercih edilir. Şekil 2.2’de bir çalışmada deney sonucu görülen mikro ve makro çatlaklar ile liflerin yerleşimi görülmektedir.



Şekil 2.2: Uzun ve kısa liflerin matris içerisindeki çatlakları kontrol etmesi [10].

Makrolifler, varlıkları ile kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımlarına katkı sağlarlar. Bunun yanında kompozitin eğilme altındaki gerilme-deplasman eğrisinde en büyük yükten sonraki davranışı iyileştirir ve makro düzeydeki çatlakları önlerler. Mikrolifler ise boylarının kısa olmasından dolayı matris içerisinde daha sık bir dağılım göstermektedir. Makroliflerden farklı olarak, çatlakları mikro düzeyde

kontrol ederek makro düzeye ulaşmalarını engellerler. Bu köprü vazifesini, matrisin hemen her bölgesine yerleşebilecek kadar küçük boyutta olması ile gerçekleştirirler. Aynı zamanda mikrolifler, eğilme etkisi altında çelik lif takviyeli betonların gerilme-şekil değiştirme davranışındaki elastik bölgedeki davranış iyileşir. Bu durum ile ilgili grafik Şekil 2.3'te yer almaktadır [11].



Şekil 2.3: Çatlak kontrolünde değişen lif boyutlarının etkisi [11].

Makro ve mikro ölçekteki liflerin köprüleme vazifeleri ve gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini ne şekilde etkilediği Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Şekilde de gösterildiği gibi mikro lifler mikro çatlakların genişlemesini ve ilerlemesini önlerken makro lifler makro çatlaklara karşı köprüleme görevi görerek enerji yutma kabiliyetini betona kazandırır.

Karma lifli kompozitlerde, lifler fonksiyonlarına göre matrise eklenirler. Liflerden bir kısmı matrisin mekanik özelliklerine katkıda bulunurken, geri kalan lifler de plastik rötre gibi erken yaş özelliklerini iyileştirmektedir. Düşük miktardaki polipropilen lif ve çelik lif, karma olarak günümüzde ticari anlamda temin edilebilmektedir [12, 13]

Karma lif kullanımı ile betonun büzülme direncinin diğer lif kullanımlarında kazanılan dirençlere göre göreceli olarak daha fazla olduğu ve bu sayede betonun geçirimsizliğine olan katkının daha fazla olduğu görülmektedir. Malzemenin iç

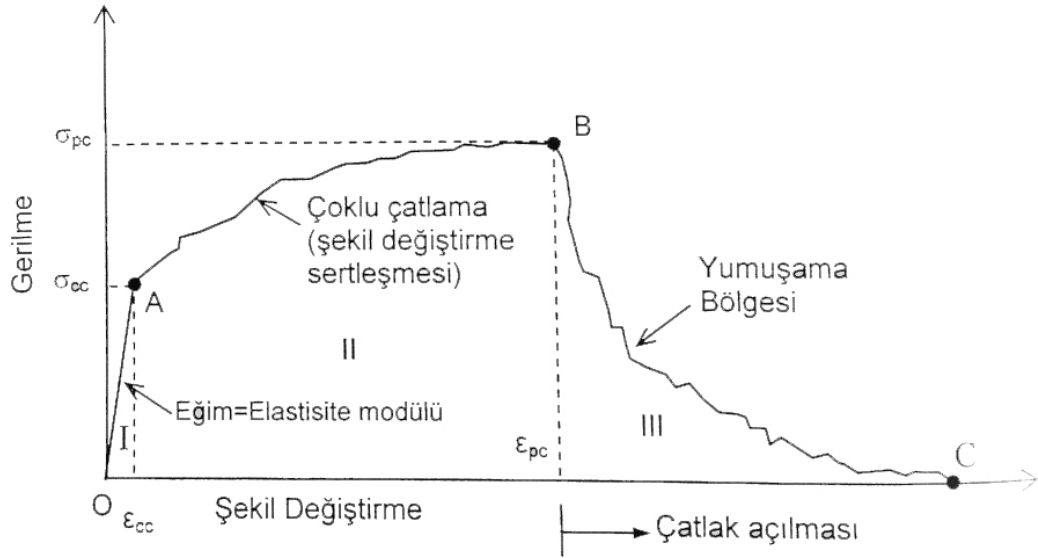
kısımında meydana gelen çatlak başlaması mikro lifler ile kontrol altına alınıyorken çatlak sayısı da paralel olarak azalmakta bu da geçirimsizliği iyileştirmektedir [14].

Belirtilen sebeplerden dolayı karma lifli betonlar kendine birçok kullanım alanı bulmuştur. Karma lifli betonlar, boyutları küçük taşıyıcı elemanların üretilmesinde; radyoaktif ve çevreye zararlı korozif etkiye sahip atıkların depolanmasında, geçirimsiz ve durabilite açısından performansı çok yüksek yapılarda, kaplama elemanlarında, yapıların onarım veya güçlendirilmesinde, kolon başlarında zımbalama kontrolü veya temelde pabuç imalatında, kolon kiriş birleşim bölgelerinde, aşınma direnci yüksek elemanlarda kullanılmaktadır.

Karma lifli betonlar ile ilgili yapılan araştırmada karma lifli betonda 30 ve 50 mm uzunluğunda, 0,5 mm çapında, narinlikleri sırası ile 60 ve 100 olan kancalı çelik lifler ile uzunluğu 12,7 ve 19 mm, çapı 0,095 mm olan, narinlik oranları sırası ile 133,6 ve 200 mm olan polipropilen lifler kullanılmıştır. Çelik lifler ve polipropilen lifler ile 16 farklı karışım oranında beton numuneleri üretilerek, basınç, eğilme, yarmada çekme ve yorulma deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, hacimce %2 oranında 30 mm uzunluğunda, kancalı çelik lif içeren numunenin optimum dayanım değerleri verdiği açıklanmıştır [7].

2.2.3 Yüksek performanslı lif takviyeli betonlar

Bu türdeki kompozitler geleneksel lif takviyeli betonlardakine benzer bir davranış, yani doğrusal bir gerilme - şekil değiştirme ilişkisine sahiptirler. Başlangıçlarından sonra yüksek performanslı lif takviyeli betonların davranışı biraz karmaşık bir hal alarak çoklu çatlama meydana gelir. Bu çoklu çatlama bölgesi Şekil 2.4'te de II numaralı bölge ile gösterilmiştir. Bu kısımda çatlamlar olmasına rağmen bir şekil değiştirme sertleşmesi gözlenmekle beraber bu bölge en büyük gerilmeye (B noktası) kadardır. Bu andan itibaren maruz kalınan gerilme ile beraber bir şekil değiştirme yumuşaması meydana gelir. Şekilde de görüldüğü gibi yüksek performanslı lif donatılı betonların gerilme – şekil değiştirme eğrisinde üç tip davranış açıkça gözlenmektedir.



Şekil 2.4: Yüksek performanslı betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı [8].

Yüksek performanslı betonlar, çelik lifler kullanılarak (sürekli veya süreksiz) imal edilebilir. Statik ve dinamik etkilere (özellikle deprem yüklerine karşı) karşı yapıların güçlendirilmesinde, çok yüksek oranda enerji yutması sebebi ile kullanılmaktadır.

Taşıyıcı betonarme elemanlarının tasarımında, onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmak üzere yüksek performanslı lif takviyeli betonların kullanımı giderek artmaktadır. Yüksek performanslı lif takviyeli betonların halen uygulanan türleri; bulamaç halde, enjekte edilen süreksiz lifle takviye edilen beton (SIFCON), bulamaç halde, enjekte edilen hasır lifle takviye edilen beton (SIMCON), lif takviyeli yoğunlaştırılmış çimento esaslı kompozitler (DSP) ve lif takviyeli MDF çimentolu kompozitlerdir [15].

Mekanik ve durabilite kaygıları ile geleneksel betonların performansını artırmak amacı ile eklenen lifler vasıtası ile her ne kadar lif donatılı betonlar elde ediliyorsa da lif takviyesi işlenebilmenin düşmesi, toplanma vb. gibi sebeplerden ötürü lif narinliği ve hacim oranı parametreleri sınırlandırılmaktadır. Lif donatılı betonlara daha fazla lif katma amacıyla 1970'li yılların sonlarında Lankard, bir takım araştırmanın akabinde SIFCON'u önermiştir [16]. SIFCON, liflerin yerleştirilmesinin ardından bulamacın enjekte edilmesi yoluyla elde edilir. Bu malzeme, matrise çok yüksek oranda çekme dayanımı kazandırır.

2.3 Çelik Lif Takviyeli Betonların Davranışını Etkileyen Faktörler

Lif-matris ara yüzeyindeki bağ, numune kalitesi, liften ve matristen kaynaklanan sorunlar, lif takviyeli betonların performansı üzerinde etkilidir.

Burada lif, miktarı, geometrisi, matris içerisindeki yönelmesi, narinliği, elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi faktörler ile kompozitin performansını etkilerken matris, en büyük agreganın tane boyutu, matris fazının çekme ve basınç dayanımı, ilk çatlak gibi faktörleri ile kompozitin performansı üzerinde etkili olmaktadır.

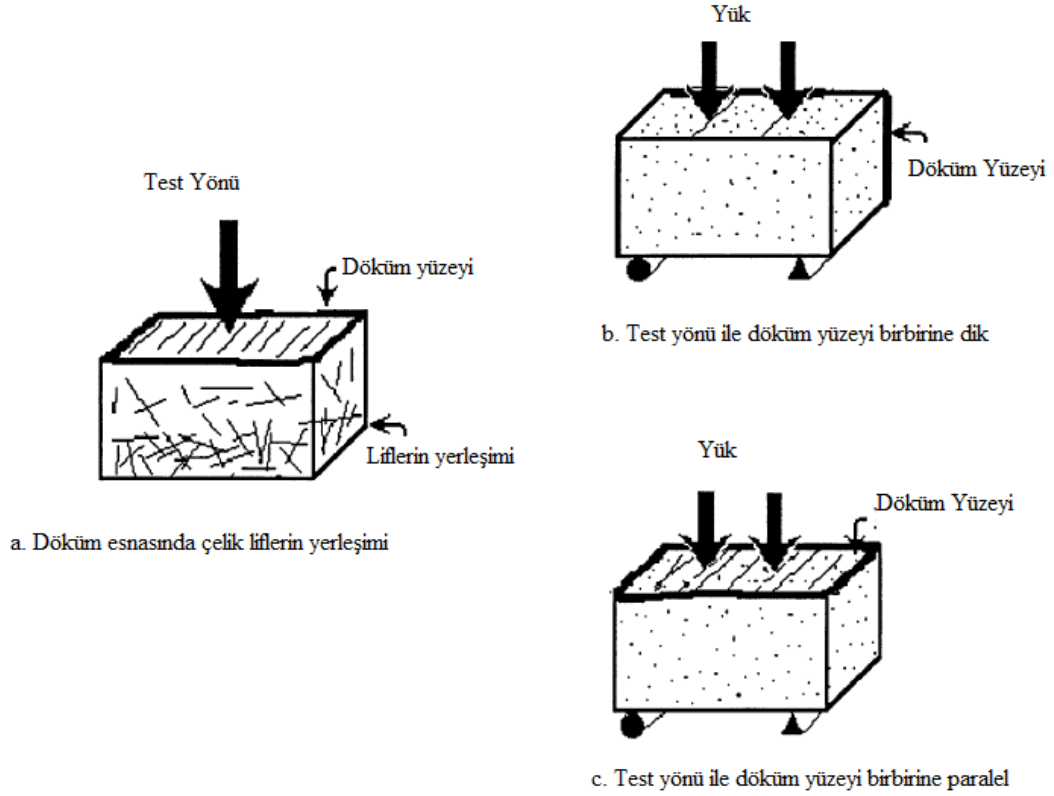
2.3.1 Beton karışımının etkisi

Gerek geleneksel betonlarda olsun gerekse lif donatılı betonlarda olsun mekanik dayanım, betonun karışımından, deneyin uygulanma yönünden ve tabi ki kür koşullarından etkilenir. Lif takviyeli betonlar, geleneksel türdeki betonlara nazaran daha ince malzemelerle ve daha fazla miktarda bağlayıcı ile tasarlanmaktadır. Lif miktarı ile (V_f) çökme miktarı birbiri ile ters orantılıdır. Yalnız, işlenebilirlik lifin miktarının yanında narinlikten de etkilenir. Liften beklenen performans katkısı, liflerin matris içerisinde mümkün olduğunca homojen dağılmasıyla mümkündür. Bu bilgilerin ışığında, liften optimum faydanın sağlanması için, çimento dozajının 300 - 350 kg/m³ aralığında olması, en büyük tane boyutu 32 mm, 14 mm'den büyük boyutlu agregaların %15-%20 civarında olması ve 0-4 mm kırma kum ağırlıklı olarak kullanılması, su/bağlayıcı oranının en fazla 0,60 olması, klorür içeriğinden kaçınılması üretici tarafından önerilmektedir.

Çelik lif donatılı betonların eğilme performansı, deneyin yönü ile de alakalıdır. Yaş halde kalıba dökülen betonun döküm yönü ile deney uygulama yönünün birbirine paralel veya dik olması sonucu etkiliyorken dik olduğu durumlarda paralel olduğu durumlara göre azalmalar olduğu gözlenmiştir. Şekil 2.5'te döküm yönlerinin test yönleri ile paralel veya dik olması durumları ve lif yerleşimi görülmektedir.

2.3.2 Çelik lifin etkisi

Gelişen teknoloji ile beraber liflerin çekme dayanımlarının giderek geliştirildiği günümüzde liflerin hasır donatılara oranla 2-3 kat mertebe farkı oluşabilmektedir. Daha küçük olmalarından dolayı çelik liflerin yüzey alanları artmakta ve bu sebeple de matris ile aralarındaki aderans artmaktadır. Lif yerleşimi ve döküm yüzeylerine göre test yönleri Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Lif yerleşimi ve döküm yüzeylerine göre test yönlerinin gösterimi [17].

2.3.2.1 Çelik lif türü ve tipi

Matris içindeki dağılımını homojenleştirmek, kompozitin performansına yapmış olduğu katkıyı azami düzeyde artırmak amacıyla son yıllarda birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışma alanlarından birisi de kompozitin kullanılış amacına uygun türde çelik lif türünü belirlemektir. ASTM A820 de üretim tiplerine göre çelik lifleri 5 türde sınıflandırmaktadır. Tip 1 soğuk şekil verilmiş lif, Tip 2 levhadan kesilmiş lif, Tip 3 eritme yolu ile üretilmiş lif, Tip 4 malle kesilmiş lif, Tip 5 modifiye soğuk şekil verilmiş liftir [18].

Çelik lifin kompozitin performansına olan katkısı, kullanılan malzeme özellikleri ile de yakından ilişkilidir. Çelik lifin beton karışımı içinde optimum şekilde çalışması için narinliğinin en fazla 100 olması gerekmektedir. Ancak tüm çelik türlerinin elastisite modülü aynı olup değeri de 210 GPa'dır. Halen yapılan çalışmalar ile çekme dayanımları daha yüksek değerlere çıkarılmaya çalışılarak daha yüksek performanslı çelikler üretilmektedir[1] .

Aderansı artırmak amacıyla düz gövdeli olan çelik liflerin yanında nervürlü, zikzaklı, uçları kancalı, uçları yuvarlak şekilde lifler kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da da görüldüğü üzere çeşitli şekillerde geliştirilmiş çelik lif türleri bulunmaktadır.

Genellikler dairesel formda bulunabilmekle beraber çok çeşitli en kesite sahip çelik lifler de kullanılmaktadır. Bunlar dikdörtgen, kare, üçgen veya çokgen gibi farklı geometriye sahip olabilmektedir.



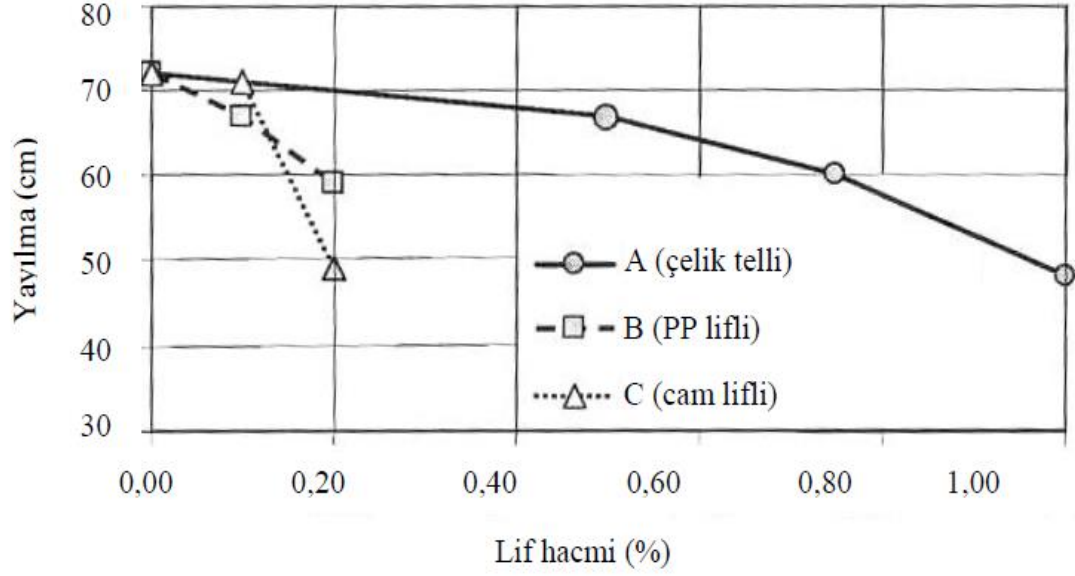
Şekil 2.6: Betonda kullanılan lif türleri [8].

Çelik liflerden uçları kancalı olanları günümüzde en yaygın olarak kullanılan türlerdendir. Bunun sebebi uçlarında bulunan farklı geometridir ve bu durum matris içerisindeki aderansı artırmaktır. Bu lif türü üretim aşamasında, daha kolay ve seri üretim amacıyla birbirlerine tutkal ile yapışıklardır. Bu özel tutkal, beton karışımı içerisindeki karma suyu ile teması halinde çözülerek liflerin karışım içerisinde topaklanması önlemektedir [1].

2.3.2.2 Çelik lif hacmi

İşlenebilirlik, maliyet gibi parametreler göz önüne alındığında kullanılan en fazla çelik lif hacim oranı %2-%3 civarındadır.

Şekil 2.7’de de belirtildiği gibi artan lif içerikleri ile beraber işlenebilirlik önemli ölçüde etkilenirken bu etki en az çelik lifte olmaktadır. Ancak %1 hacimde çelik lif içeren bir betonda işlenebilirlik kendiliğinden yerleşen betonda yayılma testinde 20 cm den daha fazla olmaktadır.



Şekil 2.7: Çeşitli liflerin hafif ağırlıklı betonun işlenebilirlik üzerindeki etkisi [19].

Eğri yutma kapasitesindeki artış artan lif hacmi ile paralellik göstermektedir. İlk çatlak yükü sonrası yalın betonda meydana gelen düşüş (eğilme altındaki yük-sehim davranışı) artan lif hacmi ile beraber düzelerek daha fazla sehimde bile yük taşıyabileceğini göstermektedir. Bu, eğilme performansındaki artışı göstermektedir.

2.3.2.3 Çelik lif dağılımı ve yönü

Çelik lif donatılı betonlarda çelik lif yönlenmesi ve miktarı liflerin sıyrılmasında önemlidir. Bu, bir adet çelik lifin hangi enerjilerde kopacağı ile ilişkilidir. Lif yönlenmesi, betonun taze halde iken döküm yönü, hızı, tekniği, vibrasyon süresi gibi parametrelerden önemli ölçülerde etkilenmektedir.

Çelik lifli betonlarda liflerin yerleşmesi Şekil 2.5’te görüldüğü gibi kiriş numunenin alt kısmına doğru bir eğilim göstermektedir. Ancak bu durum betonda homojen olmayan bir dağılıma neden olabilmektedir. Lif takviyeli betonlar için eğilme deney metotları hakkındaki Amerikan Standardı (ASTM C 1018) geniş elemanlar için döküm yönüne dik deney yapılmasının uygun olacağı belirtilmektedir [20].

2.4 Çelik Lif Takviyeli Betonların Kullanım Alanları

Çelik lifler beton elemanı olarak kullanıldığında sadece betonun mekanik performansına katkıda bulunmaz, betonda kılcal çatlak oluşumunu önlediği veya geciktirdiği için durabilite açısından da avantajlı olduğu için kendine birçok uygulama alanı bulmuştur. Bunun yanında burulma, yorulma ve kesmeye karşı da bir direnci sisteme sağlamıştır. Çelik liflerin kullanımı ile meydana gelen tokluk artışı ile daha yüksek mertebelerdeki yüklere maruz kalan betonun göçme olduğu anda patlamaması, çelik liflerin üstünlüklerinden birisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çelik lif katkılı betonlar, 1940'lı yıllardan bu yana pek çok alanda uygulanan modern malzemeler arasında en önemli grubu oluşturmaktadır. Endüstriyel zeminler, karayolları, havaalanı beton kaplamaları gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır [1].

Genellikle beton yapılar, beton için önemli parametrelerden biri olan basınç dayanıma göre tasarlanmaktadır. Ancak basınç dayanımına ek olarak, tokluk ve yük-deplasman eğrileri gibi özellikler günümüzde daha fazla dikkate alınmaktadır. Ölçüm cihazlarının gelişimi ile beraber yük-sehim eğrisinin tamamı ayrıntılı olarak elde edilebilmekte ve şekil değiştirme davranışlarının ilk çatlak sonrası nasıl olduğu belirlenebilmektedir. Reaktörler, depo tankları, büyük barajlar gibi kırılmanın en az tolerans gösterildiği yapılarda sadece basınç dayanımının önemli olmadığı, diğer bir ifade ile çatlak kontrolünün de önemli olduğunu açıklayan örneklerdir [21].

Çelik liflerin diğer liflere olan üstünlüklerinden birisi de çeşitli şekiller alabilmesidir. Bu özelliği çelik life daha fazla kullanım alanı sağlamıştır. Öyle ki püskürtme betonlarda betonun çarpma dayanımını artırmak amacıyla çelik lif kullanılıyorken, orta büyüklükte lif kullanılması ile mikro çatlakların da kontrolünü sağlanması hatta kanca uçlu çelik lif kullanılması ve bu uçların modifiye edilmesi ile beraber aderans özelliklerinin artması mümkün olmaktadır.

2.5 Çelik Lif Takviyeli Betonların Özellikleri

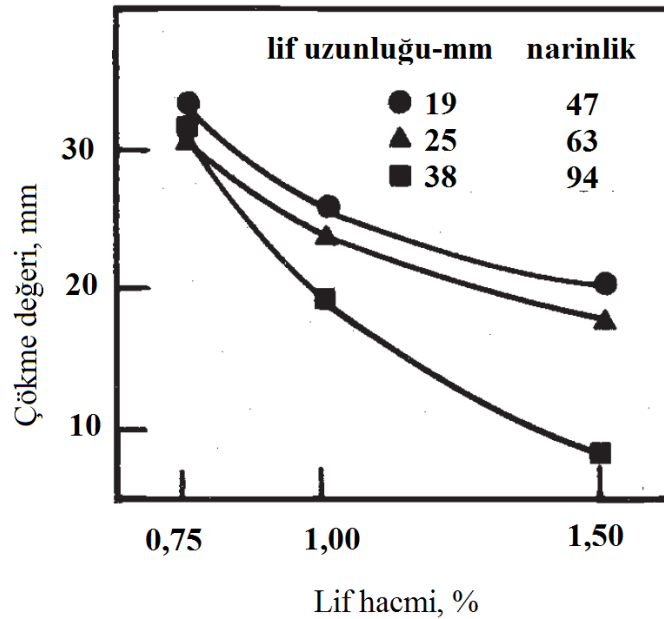
Betonda performansın artması amacıyla karışıma eklenen çelik liflerin dağılımı matris içerisinde dağınık bir dağılım göstermektedir. Eklenen bu materyal kompoziti daha sünek bir noktaya taşımaktadır. Diğer bir deyişle, çatlama öncesi ve çatlama sonrası daha fazla yüklere veya dış etkilere dayanabilmektedir. Bu direnç, çelik

liflerin tamamen kopması veya matris ile aralarındaki bağı koparak, sıyrılması ile son bulur.

2.5.1 Taze beton özellikler

Betonların taze hal özelliklerinden olan işlenebilirlik, lif geometrisi, lif hacim oranı, beton karışımı ve narinlik gibi parametrelerden etkilenmektedir. İster çelik liflerde olsun ister diğer türdeki lifler olsun, bunların betona katılması ile beraber karşılaşılan en büyük problemlerden birisi işlenebilirliktir. Bu probleme neden olan faktörler de lif hacmi ve lif narinliğidir. Şekil 2.8’de belirtildiği gibi farklı lif türlerinde lif hacminin artışı ile işlenebilirlik önemli ölçüde değişmektedir. Yeterli ölçüde işlenebilirliğin elde edilebilmesi için kullanılan akışkanlaştırıcıların türü ve miktarı önemlidir. Bunun yanında, mümkün olduğunca homojen bir dağılım elde etmek için lifler beton karışımına en son ilave edilmektedir.

Şekil 2.8’de 19, 25 ve 38 mm uzunluğunda lifler kullanılarak yapılan çalışmada kullanılan lif hacimlerine göre çökme değerleri verilmektedir.



Şekil 2.8: Çökme değerlerinin lif miktarına göre değişimi [22].

Lif miktarının hacim oranının başlangıçta %0,5 olarak kullanıldığı bir çalışmada, işlenebilirlik ve maliyeti göz önünde bulundurarak maksimum lif miktarı belirlenmiştir. 13 mm’den 38 mm’e değişen uzunluklarda lifler kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Buna göre 19 mm uzunluğunda lif içeren numunelerden, lif dağılımı bakımından en etkili sonuç alınmıştır [13].

2.5.2 Mekanik özellikler

Özellikle çatlak kontrolü olmayan betonlarda dinamik yükler altında meydana gelen çok eksenli çekme ve basınç gerilmelerinden dolayı mevcut kılcal çatlaklar birleşerek makro yapıya kavuşurlar. Bu durum betonun en istenmeyen davranışlarından olan gevrek göçmeye neden olmaktadır. İşte bu noktada çelik lifler kompozitlerin içerisinde aktif olarak kullanılmaktadır. Çelik lifler vasıtası ile donatılandırılmış bir betonda çekme mukavemeti ve sıyrılma açısından mekanik özellikler artar ve bununla doğrudan ilişkili olarak betonun eğilme davranışı artırılmış olur [23].

Çelik ya da sentetik liflerin kullanılması yalın halde gevrek olan betonun sünekliğini arttırmaktadır. Bunu dışında beton içinde homojen şekilde bulunan lifler betonda çatlak oluşumunu geciktirir, mevcut mikro çatlakların yayılımını ve ilerlemesini önler, matristen sıyrılma ve kopmayı zorlaştırarak betonun enerji yutma kapasitesini önemli miktarda arttırır. Betonun darbe dayanımı, ilk çatlak dayanımı, çekme ve eğilme dayanımı da iyileştirilmiş olur [24].

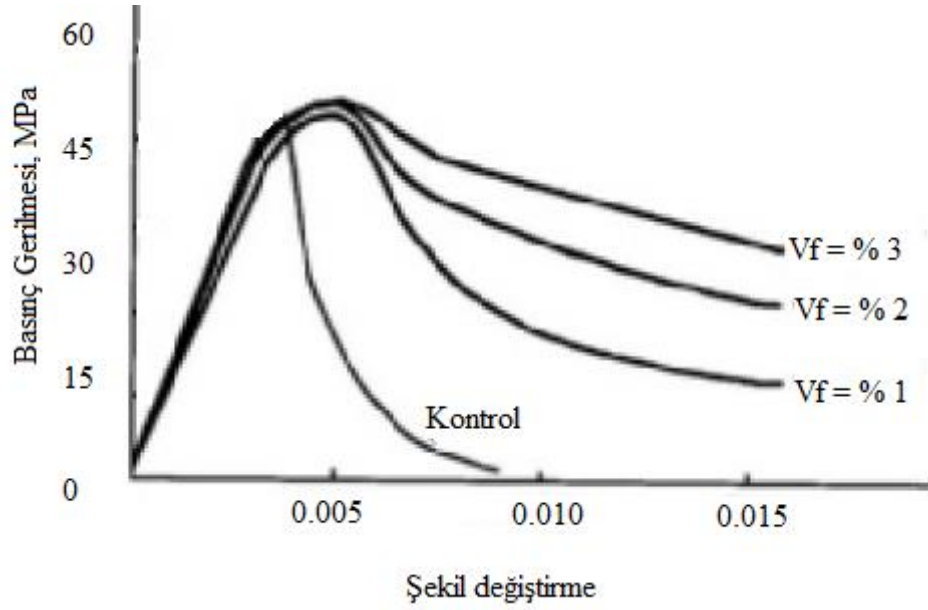
Betona farklı hacim oranlarında lif eklenmesi ile ilgili yapılan bir çalışmada lif eklenmesi ile betonun yarmada çekme ve basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Buna göre, % 0,5 hacim oranında eklenen çelik liflerin betonun yarmada çekme ve basınç dayanımlarında sırası ile %19 ve %7,1 artış sağlandığı saptanmıştır [25].

Çatlak kontrolünün sağlanması veya genişlemeye karşı direncinin artırılmasından dolayı betonun rötre davranışında da iyileşme meydana gelmektedir. Bununla birlikte, yalın betonla kıyaslandığında çelik lif takviyeli betonlar ile durabilite açısından daha sürdürülebilir çözümler elde edilebilmektedir.

2.5.2.1 Basınç dayanımı

Çelik lifli betonlarda takviye amacı ile kullanılan çelik liflerin betonun basınç mukavemeti üzerinde yapılan araştırmalarda çıkan sonuçlara göre, basınç mukavemetinin kısmen azalabildiği veya artabildiği gözlenmiştir. Bu sebeple de tam olarak etkisi bilinmemektedir. Ancak çelik liflerin eklenmesi ile beraber betona çatlama sonra önemli ölçüde şekil değiştirme yeteneği çelik lifler tarafından sağlanmaktadır [26].

Herhangi bir tasarımla eklenen liflerin betonun basınç dayanımına bir etkisi yoktur. Ancak basınç altındaki davranışta süneklik artışı, tüm yapıdaki sünekliği artırır. Enerji yutma mertebelerinin yükselmesi ile kontrol betonuna göre daha güvenli bir kırılma sağlanabilmektedir. Şekil 2.9’da da görüldüğü gibi en büyük basınç gerilmesi değeri kontrol grubunda ve değişik lif oranlarına sahip betonlarda hemen hemen aynı iken tepe yükünden sonra şekil değiştirme kabiliyetleri gözle görülür biçimde değişmektedir. Bu, çelik lif içeren betonlarda basınç tokluğunun, lif içeriği ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

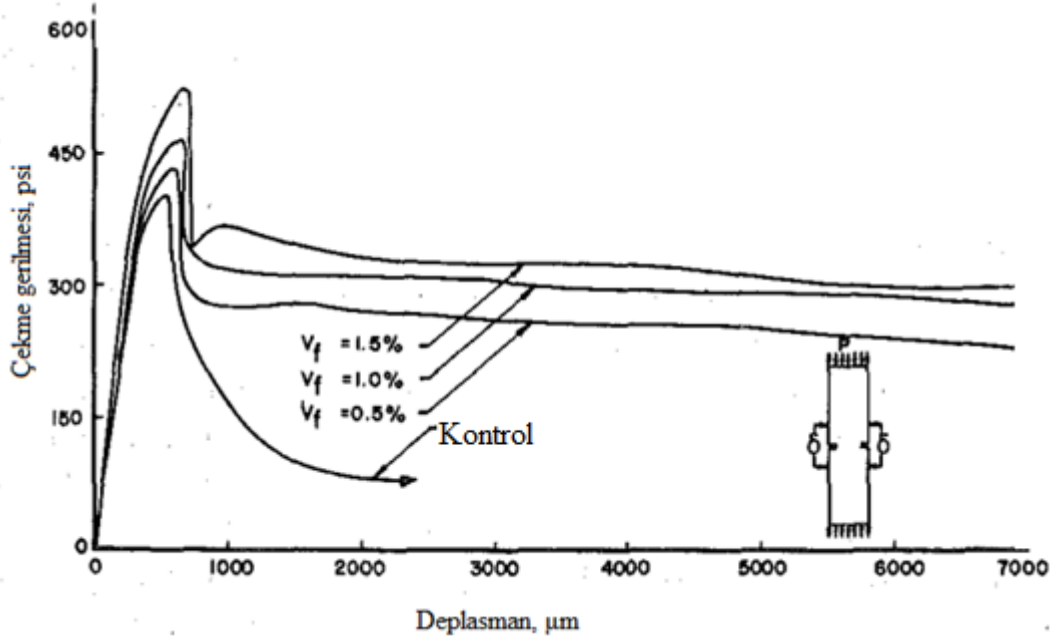


Şekil 2.9: Çelik lif takviyeli betonlarda basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisine lif etkisi [4].

2.5.2.2 Çekme dayanımı

Çelik lif donatılı betonların çekme davranışları, yalın betonlara göre daha fazladır. İlk çatlak dayanımında önemli bir değişiklik gözlenmezken, ilk çatlak oluşumundan itibaren meydana gelen tokluktaki artış sebebi ile çelik lif donatılı betonlar kendine pek çok uygulama alanı bulmaktadır.

Çelik lif takviyeli betonların tek eksenli çekme gerilmesi altındaki davranışının değişen lif oranları ve yalın betonla karşılaştırılması Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Tek eksenli çekme deneyinde, ilk çatlak sonrası enerji yutma miktarında çelik liflerin katkısı çok fazla olduğu ancak bu katkının eklenen lif hacim miktarı ile doğru orantılı olmadığı sonucuna varılmıştır.



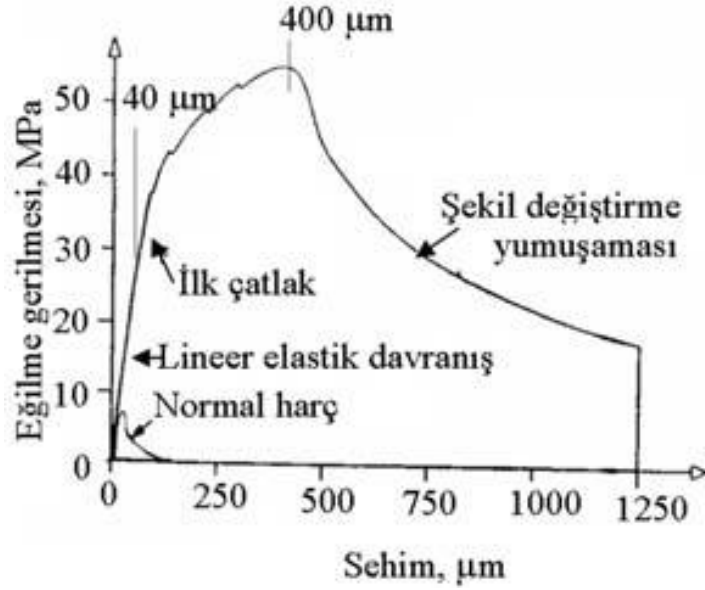
Şekil 2.10: Tek eksenli yükleme altında çelik liflerin çekme gerilmesine etkisi [27].

Yapılan bir çalışmada, 8 farklı beton karışımı hazırlanarak kendiliğinden yerleşen çelik lifli beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numuneler üzerinde çekme dayanımı, basınç dayanımı ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde, çekme dayanımının, basınç dayanımı ve lif miktarına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir [28].

2.5.2.3 Eğilme dayanımı

Matris içerisine mekanik performansı artırmak amacı ile eklenen çelik liflerin çekme davranışının artması ile meydana gelen moment kapasitesi, kompozit yapının tokluğu ve çatlak kontrolü ile beraber yapının eğilme davranışını da iyileştirmektedir. Eğilme yüklemesi ile beraber lifli yapı matrisin çatlamasına kadar lif ve matris bileşenleri beraber, çatlamasından sonra da köprüleme vazifesi görerek lifler kendi başlarına şekil değiştirme yeteneğini artırarak üstün bir performans ortaya koyarlar.

Eğilme etkilerini doğuracak şekilde yapılan noktasal veya çizgisel yüklemelerde, çelik lifler betona üstün bir eğilme performansı sağlamakta ve yapının eğilme tokluğunu iyileştirmektedir. Şekil 2.11’de yükleme altında boyutları aynı olan yalın ve lif donatılı betonda şekil değiştirme kapasitesi ve tokluk karşılaştırılmaktadır. Eğilme davranışındaki bu değişim lif hacmine, lif uzunluğuna, lif şekline, matrise, çentik genişliği ve yüksekliğine ve numune boyutlarına bağlıdır.



Şekil 2.11: Geleneksel beton ve çelik lif donatılı betonların eğilme davranışlarının karşılaştırılması [15].

Lif hacmi, tokluk üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle artan çelik lif miktarı ile beraber yük-sehim eğrisindeki ilk çatlak sonrası davranış yükselen bir eğilim göstermektedir.

Lif uzunluğu eğilme davranışındaki bir diğer önemli parametredir. Tasarımı ve yerleştirilmesi dahil tüm aşamaları yeterli kalitede olursa daha uzun liflerin performansa daha çok katkısı vardır. Ancak lif uzunluğunun etkisi lif hacim oranı arttıkça azalmaktadır.

Lif şekli bir diğer tabiri ile lif geometrisi eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Öyle ki, uçları kancalı çelik lifler, gövdesi dalgalı bir geometriye sahip bir çelik life oranla (aynı dayanımda) daha fazla aderans kuvvetine sahip olacak ve performans gösterecektir.

Matris bileşimi, kendi başına büyük bir fayda sağlayamayacağı gibi kullanılan daha ince malzemeler vasıtası ile matris-lif ara yüzeyinden kaynaklanan zayıflıklar ve etkileri azalacağından dolayı önemlidir.

Belirtilen parametrelerin eğilme performansı üzerindeki etkileri birkaç standardın uygulanması ile anlaşılmaktadır. Bu yöntemler 3. bölümde “Çelik lif takviyeli betonların performansa dayalı tasarımı” isimli başlıkta incelenmektedir.

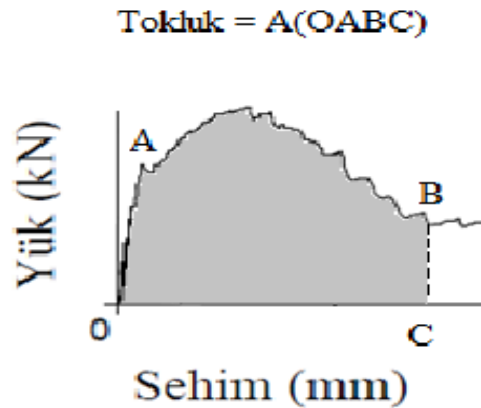
2.5.2.4 Tokluk

Her ne kadar çekme, eğilme ve basınç dayanımlarına yaptığı katkı incelense de çelik liflerin asıl etkisi yutulan enerji üstündedir. Bu bir diğer adıyla betonun tokluğunu etkiler. Daha önce Şekil 2.9 ve Şekil 2.10’da gösterildiği gibi karşılaştırılan numunelerinin çelik lif takviyesinden sonra dayanımlarında değişiklik olmuş ancak çok bir katkıda bulunulmamışsa da yine aynı şekillerde karşılaştırılan numunelerin toklukları çelik lifin varlığı ile önemli ölçüde değişiklik göstermektedir.

Tokluk bir diğer adıyla betonun enerji yutması ilgili yüklemenin yük-sehim grafiği altında kalan alanı ile belirlenir. Şekil 2.12’de bir örneği görülen yüklemenin ve karşısında oluşan [OC] doğru parçası ile gösterilen miktardaki sehimin neticesinde numunenin göstermiş olduğu tokluk ifadesi;

$$\int_{\delta=0}^{\delta=C} P(\delta).d\delta \quad (2.1)$$

şeklinde olacaktır. Burada sehim değişkendir ve yük eğrisi, sehimin bir fonksiyonudur.



Şekil 2.12: Yük-sehim eğrisi ve altında kalan alan.

Betonun kendi başına gevrek davranış gösteren bir malzeme olmasından dolayı, bunun kullanılabilir ve sürdürülebilir bir hale getirilmesi için geçmişten günümüze gerek sürekli gerekse süreksiz çekme dayanımı yüksek malzemelerle güçlendirilmektedir. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi çeşitli boyutlardaki liflerin kullanılması ile beraber betonun farklı özellikleri takviye edilmektedir. Buna göre,

kullanılan kısa lifler daha çok yapının darbe dayanımını artırırken, uzun lifler de şekil değiştirme olanağını getirmektedir. Her ne amaçla kullanılırsa kullanılsın, beton karışımına eklenen kısa veya uzun lifler eğrinin altında kalan alanı artırarak yapıya bir tokluk kazandırmaktadır. Genellikle eğilme etkileri üzerindeki tokluk hesaplanırken bu yöntemlerden en çok kullanılanlardan birisi ASTM C 1018'dir.

3. ÇELİK LİF TAKVİYELİ BETONLARIN PERFORMANSA DAYALI TASARIMI

3.1 Performansa Dayalı Tasarım

Performansa dayalı tasarım, betonun gerilme-deplasman eğrisindeki ilk çatlak oluşuktan sonraki maksimum enerji yutması esasına dayanan bir metottur. Lif takviyeli betonların, yalın betonlara nazaran ilk çatlak sonrası enerji absorbe etme düzeyleri ve mekanik özelliklere olan etkileri daha yüksektir. İçlerinde performansa en çok etki eden lif ise çelik liftir. Bu yönüyle çelik lif içeren betonlar birçok akademik çalışmaya konu olmakla beraber, yapılara kattığı üstün performanslar sebebi ile çelik lif takviyeli betonların performansa dayalı tasarımı uluslararası bazı standartlarda yer bulmuştur. Günümüzde hala çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine ve durabilitisine olan katkısına yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Yurtdışındaki bazı standartlara göre çelik lif takviyeli betonların performansa dayalı tasarımını ifade eden farklı sınıflar geliştirilmiştir. Elde edilen değerlerinin sınıflandırılmasının yanında bazı özgün çalışmalarda tasarımlar, tokluk, eğilme dayanımı gibi kriterlere göre değerlendirilmektedir.

3.2 Performansa Dayalı Tasarım Parametrelerini Tanımlayan Yöntemler

Betonlar lif takviyeli olsun olmasın, yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın büyüklüğü ölçüsünde bir tokluğa sahiptirler. Genellikler bu değer tespiti için “4 noktalı kiriş eğilme” deneyi çentiksiz olacak şekilde tatbik edilmesi önerilmekle beraber, “3 noktalı kiriş eğilme” deneyi de kabul görmektedir. 4 noktalı eğilme deneyinde kirişin orta bölgesinde sadece eğilme momenti beton eleman üzerinde etkili iken 3 noktalı eğilme deneyinde kirişin orta noktası hem eğilme hem de kesme kuvveti etkisi altındadır. Yapılan deneylerde betonun tokluk özelliklerini belirlemek amacı ile bazı indisler ve eşdeğer eğilme dayanımları gibi parametrelerden faydalanılmaktadır. Bu parametrelerden en yaygın olanı enerjiye dayalı boyutsuz indislerdir. Bunlardan ilki lifli olarak üretilen betonu kırmak için gerekli enerji

miktarının, ilk çatlak oluşması için gerekli enerji miktarına oranı iken ikincisi ilk çatlak oluşumundaki sehim miktarı ve katlarına bakılarak hesaplanmaktadır. Bir diğer indiste ise tokluk indisi, ilk çatlak sehiminin iki katı düzeyine dek yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın, ilk çatlak sehimine kadar olan alana oranı şeklinde hesaplanır. Bu indisler çoklu yükleme düzlemlerinde ve çentikli veya çentiksiz olarak uygulanarak belirlenir.

Çelik lif takviyeli betonların performansa dayalı tasarımı, her hesap yönteminin kendi içinde bazı kabuller barındırmasından dolayı farklılıklar gösterebilir. Ancak tokluk ölçümlerinde belli başlı standartlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

3.2.1 Almanya beton birliği yöntemi

Almanya Beton Birliği tarafından zemin betonları için iki adet sınır durumuna dayalı tasarım bulunmaktadır. Bunlar elastik teoriye ve enerji yutma kapasitesine göre tasarlanmıştır. Bu yöntemde kullanılabilirlik sınır durumu (KSD) ve taşıma gücü sınır durumu (TSD) için iki farklı sehim durumları tanımlanmış, bunlara göre de enerjiler hesaplanmaktadır. Çizelge 3.1’de KSD için ilk çatlak oluşumundan sonra 0,65 mm sehim değeri tanımlanırken bu değer TSD için ilk çatlaktan sonra 3,15 mm sehim değeridir.

Çizelge 3.1: Çelik lif takviyeli betonlar için şekil değiştirme durumları ve sehim değerleri [29].

Şekil Değiştirme	Sınır Durumu	Sehim değeri
Küçük sehim hali	Kullanılabilirlik sınır durumu (KSD)	$\delta_1 = \delta_0 + 0,65$
Büyük sehim hali	Taşıma gücü sınır durumu (TSD)	$\delta_2 = \delta_0 + 3,15$

Alman Beton Birliği tarafından tanımlanan eşdeğer eğilme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan sehimlere karşılık gelen şekil değiştirme bölgeleri simgesel olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada ilk çatlak oluşumundaki sehim değeri δ_0 ile ifade edilirken, δ_1 e kadar olan kısım kullanılabilirlik sınır durumuna, δ_2 e kadar olan kısım ise taşıma gücü sınır durumuna ait eşdeğer eğilme dayanımlarını belirlemede kullanılır. Kullanılan bu değer, aşağıdaki denklemde yerine konularak değerlendirilmektedir:

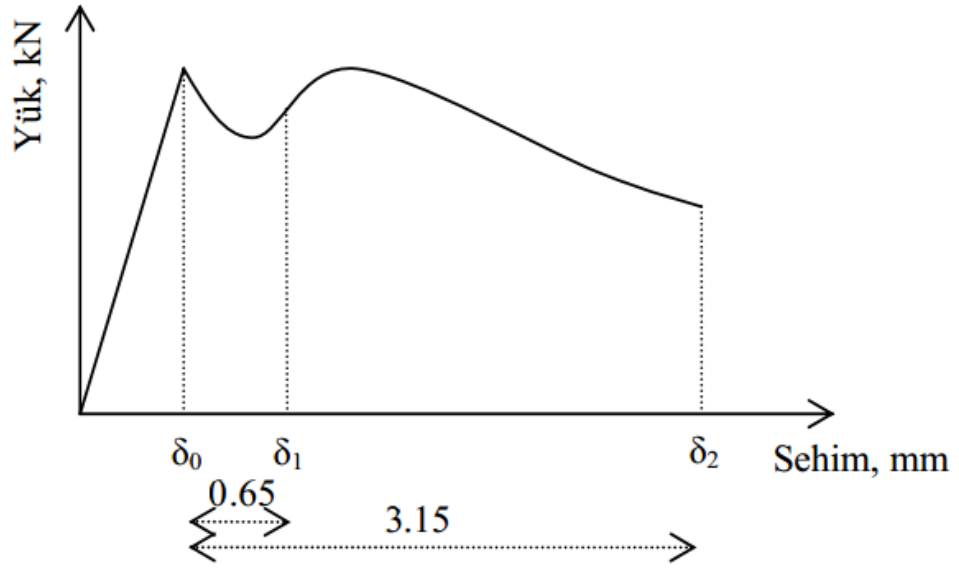
$$f_{es} = \frac{T_i \cdot S}{\delta_i \cdot (b \cdot h^2)} \quad (3.1)$$

T_i : i durumu için(TSD veya KSD) yük-sehim grafiği altında kalan alan [N.mm]

δ_i : i durumu için meydana gelen sehim değeri [mm]

S : yüklenen kirişin mesnet açıklığı [mm] ve

b, h : Eğilmeye çalışan kirişin en kesit sırası ile genişliği ve yüksekliği

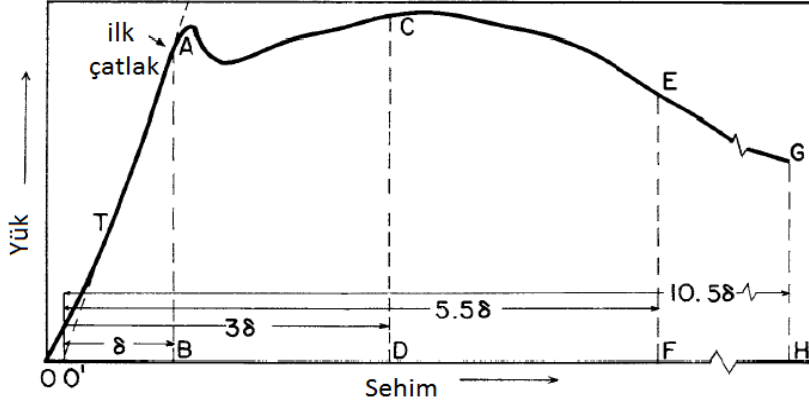


Şekil 3.1: Şekil değiştirme bölgeleri ve karşılık gelen sehim değerleri [29].

Bu yöntemde çelik fil donatılı betonlar, deney sonrası elde edilen veri sonuçlarına göre belirli kodlamalar ile ifade edilmektedir. Örnek olarak, C 30/37 F 0,9/0,7 XC4 şeklinde yazılan bir numune C30/37 lik kısım beton elemanın silindir/basınç dayanımını, F 0,9/0,7 lik kısım bu yönteme göre KSD ve TSD halleri için eşdeğer eğilme dayanımını ve XC4 lük kısım ise ıslanma-kuruma çevrimi sonucu karbonatlaşmaya maruz çevresel faktörleri ifade etmektedir.

3.2.2 ASTM standardı (ASTM C 1018)

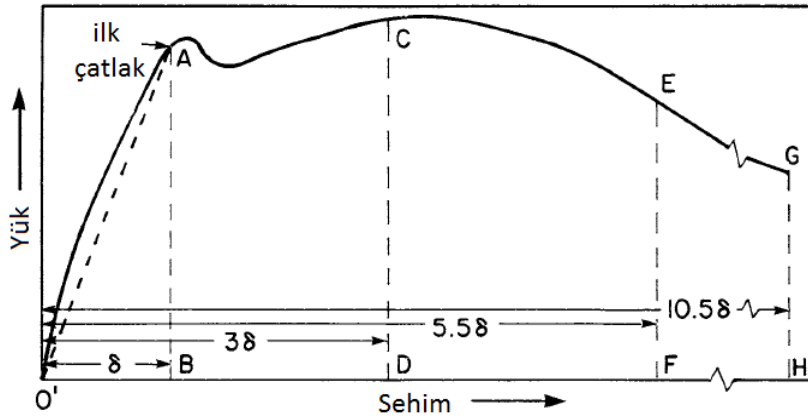
Bu yöntem Amerikan bazlı bir yöntem olup, betonun ilk çatlak oluşumundaki sehim değeri ve bu değer in standartta belirtilen katlarındaki yutulan enerji miktarlarının kıyaslanması esasına dayanmaktadır. Diğer yöntemlerde olduğu gibi betonun tokluk değeri, yük-sehim ($P-\delta$) eğrisi altında kalan alan ile doğrudan ilişkilidir. Bu standarda göre deney üç noktalı olacak şekilde uygulanmaktadır [20].



Bu yöntemde ilk çatlak oluştuğundaki sehim ve bu sehim değerinin katları önemli olduğu için, δ değerini hassas okumak önem kazanmaktadır. Ancak her zaman ilk çatlak oluştuğu yeri belirlemek mümkün olamamaktadır.

Şekil 3.2' de yük-sehim eğrisi üzerinde harflerle tanımlanan yer, tokluk değerinin hesabında kullanılmaktadır. Buna göre;

- Konveks veya konkav yaklaşımda ilk çatlak oluşum noktası A ile tanımlanır ve doğrusal olarak artan eğrinin lineerlikten ayrıldığı noktadır.
- İlk çatlak oluşum noktasında eğrinin y eksenine karşılık gelen değer, diğer bir deyişle yük eğilmeye çalışan etkin alana bölünerek gerilme MPa [N/mm^2] hesaplanır.
- İlk çatlama anındaki sehim miktarı $[O'B]$ doğru parçasının uzunluğu kadar olarak belirlenir ve δ_0 olarak kayıt edilir.
- Şekil 3.2 de $O'AB$ üçgeni ile belirtilen üçgenin alanı hesaplanır ki bu alan ilk çatlak oluşumu için gerekli enerjinin fiziksel karşılığıdır.



Şekil 3.2: a) İlk çatlak konveks şekilde artarak yaklaşan eğri
b) İlk çatlak konkav şekilde artarak yaklaşan eğri [20].

- İlk çatlak oluşum anındaki sehim miktarının üç katı değerindeki sehim değeri ($3\delta_0$) D noktasındır ve bu değer yük sehim eğrisindeki noktasının x eksenine izdüşümüdür. Başlangıçtan bu bölgeye kadar eğri altında kalan alan hesaplanarak not edilir. ($O'ACD$ bölgesinin alanı) Bu bölgenin alanının, $O'AB$ üçgeninin alanına oranı I_5 tokluk indisini vermektedir:

$$I_5 = \frac{A(O'ACD)}{A(O'AB)} \quad (3.2)$$

- Benzer şekilde I_{10} tokluk indisi ve I_{20} tokluk indisi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$I_{10} = \frac{A(O'AEF)}{A(O'AB)} \quad (3.3)$$

$$I_{20} = \frac{A(O'AGH)}{A(O'AB)} \quad (3.4)$$

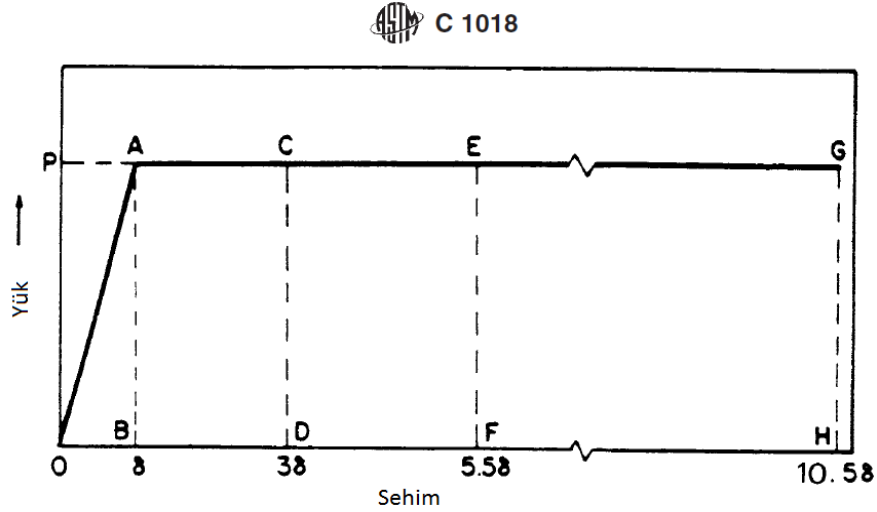
- I_{10} ve I_{20} tokluk indisleri sırası ile $5,5\delta_0$ ve $10,5\delta_0$ sehim değerlerine karşılık gelen eğrinin E ve G noktalarına kadarki alanların, $O'AB$ üçgeninin alanına oranıdır.
- Hesaplanan tokluk indisleri ondalık şekilde yuvarlanır.
- Tokluk indisleri, çatlak sonrasında yutulan enerji ile diğer bir deyişle beton elemanların sünekliği ile doğru orantılıdır.
- Kalıcı dayanım faktörleri tokluk indislerine bağlı olarak, aşağıdaki gibi hesaplanmakta olup bu değerler de indisler gibi boyutsuz büyüklüklerdir:

$$R_{5, 10} = 20(I_{10} - I_5) = 20 \frac{\{A(O'AEF) - A(O'ACD)\}}{A(O'AB)} \quad (3.5)$$

$$R_{10, 20} = 10(I_{20} - I_{10}) = 10 \frac{\{A(O'AGH) - A(O'AEF)\}}{A(O'AB)} \quad (3.6)$$

Kalıcı dayanım faktörleri, kalan ortalama dayanımları ilk çatlak dayanımlarının yüzdesini ifade etmektedir. Çatlak sonrası hasarın bir ölçüsü olarak da değerlendirilebilir. Yapılan tokluk indislerinin hesaplarında, elastik ve tam plastik kısımlar dikkate alınmaktadır. Buna göre tokluk indislerini artıracak şekilde tasarımlar geliştirmek optimum matris dayanımı, lif narinliği, oranı, dağılımı ve yönlenmesi ile mümkündür.

Eğilme deneyi yapılan kiriş numunelerinin R, kalıcı dayanım faktörlerinin değeri 100 değerine ne kadar yaklaşırsa Şekil 3.3'te verilen grafikteki davranışa o kadar yaklaşır. Bu değer lif içermeyen betonlarda sıfırdır. Çünkü ilk çatlaktaki sehim, üç katı değere ulaşmadan beton eleman daha fazla yük alamaz.



Şekil 3.3: Tam plastik davranışa göre yük-sehim ilişkisi.

ASTM C 1018-97 yöntemine tabi tutulan kiriş elemanlar, Çizelge 3.2 'deki gibi sınıflandırılır.

Çizelge 3.2: Lif içeren betonların kalıcı dayanım faktörlerine göre sınıflandırılması.

R, Kalıcı dayanım faktörü	Sınıflandırma
<40	Zayıf
40-60	Normal
60-80	Güçlü
>80	Mükemmel

3.2.3 Japon standardı (JSCE-SF4)

Bu yöntem mutlak tokluk baz alınarak geliştirilmiş bir standart olmak ile beraber, kiriş en kesitinin 150 mm x 150 mm ve açıklığının 450 mm olduğu koşullarda çentiksiz olarak en doğru sonucun elde edileceğini belirtmektedir. Bunun yanında 4 noktalı eğilme deneyi önerilmektedir [30]. Hesap yöntemi itibari ile “Alman Beton

Birliği Yöntemi” ile benzerliği göze çarparken sehım değeri farklılık göstermektedir ve kiriş açıklılığının 150 de biri olarak belirlenmiştir. Eşdeğer eğilme dayanımı:

$$f_{es} = \frac{T_b \cdot S}{\delta_b \cdot (b \cdot h^2)} \quad (3.7)$$

Şeklinde hesaplanır. Denklemin terimleri;

T_b : kiriş açıklılığının 1/150si kadarki sehım değerine kadar yük-sehım eğrisinin altında kalan eğrinin alanı [N.mm]

δ_b : i durumu için meydana gelen sehım değeri [mm]

S : yüklenen kirişin mesnet açıklılığı [mm] ve

b, h : Eğilmeye çalışan kirişin en kesit sırası ile genişliği ve yüksekliği [mm]

Verilen formüldeki enerji değerini hesaplamak için kullanılan sehım değeri, ASTM C 1018-97’e nazaran daha yüksek mertebelerdedir. Buna göre Japon Standardı’na göre önerilen kiriş açıklılığı 450mm dolayısı ile sehım değeri $450/150=3$ mm iken ASTM C 1018-97’e bu değer 1,8-1,9 mm civarındadır. Bu çerçevede çelik lifin beton elemana katkısı Japon Standardı’nda daha doğru şekilde irdelenir. Bu yöntemin ASTM C 1018-97’e üstünlüklerinden bir tanesi de ilk çatlak sehımının belirlenme zorunluluğunun olmayışıdır. ASTM C 1018-97’de ilk çatlak oluşumu dolayısı ile bu noktadaki sehım değeri büyük önem tanımakta, indisler bu değere kadar olan enerjinin orantılanması ile belirlenmekte iken, Japon Standardı’nda bu gereklilik yoktur. Çünkü denklemdede açıklılığın 1/150 si kadar sehıme kadarki enerji değeri hesapta kullanılmaktadır.

Diğer taraftan bu yöntemin zayıf tarafı, ilk çatlak oluşum sehımına ve sonrası davranışa bakılmaksızın mutlak bir enerji hesaplanmasıdır. Eğrinin düşen kolunun eğimi veya değişimi bu yöntemde önemsenmemekte iken ASTM C 1018-97’de hesaplanan indisler hasar tahmini açısından kullanılabilir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deneysel Çalışmanın Kapsamı

Çelik lif takviyeli betonların,

- Değişen lif türlerinin kendiliğinden yerleşen ve geleneksel beton türlerinde işlenebilirlik üzerindeki etkisini incelemek,
- Mekanik özelliklerine lif narinliğini sabit tutarak değişen matris dayanımlarının, çelik lif uç şeklinin ve çelik lif hacminin (V_f %) etkisini belirlemek,
- Kırılma enerjisi, çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri, deney içerisinde değişen s/ç ve lif hacmi gibi parametrelere bağlı matematiksel modeller geliştirmek,

amacıyla geleneksel ve kendiliğinden yerleşen olmak üzere dört beton grubundan oluşan bir çalışma yapıldı.

4.2 Deneysel Çalışmanın Programı

Daha önceden belirlenen bu çalışmanın kapsamı doğrultusunda bir deneysel program oluşturuldu. Buna göre sırası ile agregaların kurutulması, granülometri eğrilerinin oluşturulması, özgül ağırlıklarının hesaplanması, seri betonların üretilmesi ve kür havuzlarına alınması, çimento hamurundan oluşan numunelerin üretilmesi, üç noktalı eğilme deneyinin yapılması, yarmada çekme deneyinin yapılması, elastisite modülünün ve basınç dayanımlarının bulunması, yatay çekme deneyinin yapılması, sonuçların değerlendirilmesi şeklinde olmuştur. Buna göre uygulanan her bir basamak titizlikle sürdürülmüş, her bir deney ilgili standartların belirttiği koşullarda yapılmıştır. Üretilen betonlar Şekil 4.1’de de belirtildiği gibi aşağıdaki programda ve içerikte üretilmiştir.

1. Grup: Normal dayanımlı, narinliği 65 olan ucu çift kancalı çelik liflerin kullanıldığı, sabit s/ç (0,5) oranında sadece çelik lif hacim oranlarının değiştiği 3 farklı geleneksel beton üretilmiştir. Çelik lif içerikleri, 20 kg/m³ (V_f =%0,254), 40 kg/m³ (V_f =%0,509), 60 kg/m³ (V_f =%0,764) şeklindedir. Bunun yanında aynı matris

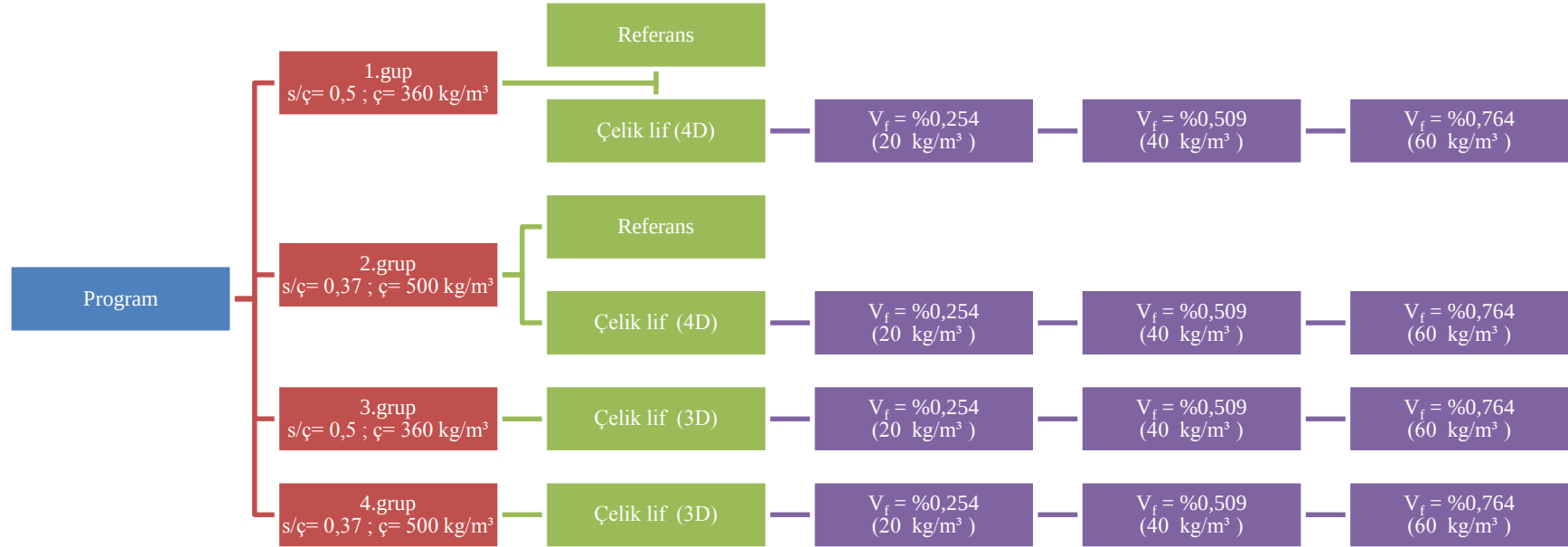
dayanımında bir adet de referans betonu üretilmiştir. Numuneler, 4 adet prizma (10cmx10cmx50m) ve 6 adet silindir ($\phi=10\text{cm}$, $h=15\text{cm}$) içerisine yerleştirilmiştir.

2. Grup: Normal dayanımlı, narinliği 65 olan ucu çift kancalı çelik liflerin kullanıldığı, sabit s/ç (0,37) oranında sadece çelik lif hacim oranlarının değiştiği 3 farklı kendiliğinden yerleşen beton üretilmiştir. Çelik lif içerikleri, 20 kg/m³ ($V_f=\%0,254$), 40 kg/m³ ($V_f=\%0,509$), 60 kg/m³ ($V_f=\%0,764$) şeklindedir. Bunun yanında aynı matris dayanımında bir adet de referans betonu üretilmiştir. Numuneler, 4 adet prizma (10cmx10cmx50m) ve 6 adet silindir ($\phi=10\text{cm}$, $h=15\text{cm}$) içerisine yerleştirilmiştir.

3. Grup: Normal dayanımlı, narinliği 65 olan ucu tek kancalı çelik liflerin kullanıldığı, sabit s/ç (0,5) oranında sadece çelik lif hacim oranlarının değiştiği 3 farklı geleneksel beton üretilmiştir. Çelik lif içerikleri, 20 kg/m³ ($V_f=\%0,254$), 40 kg/m³ ($V_f=\%0,509$), 60 kg/m³ ($V_f=\%0,764$) şeklindedir. Bunun yanında aynı matris dayanımında bir adet de referans betonu üretilmiştir. Numuneler, 4 adet prizma (10cmx10cmx50m) ve 6 adet silindir ($\phi=10\text{cm}$, $h=15\text{cm}$) içerisine yerleştirilmiştir.

4. Grup: Normal dayanımlı, narinliği 65 olan ucu tek kancalı çelik liflerin kullanıldığı, sabit s/ç (0,37) oranında sadece çelik lif hacim oranlarının değiştiği 3 farklı kendiliğinden yerleşen beton üretilmiştir. Çelik lif içerikleri, 20 kg/m³ ($V_f=\%0,254$), 40 kg/m³ ($V_f=\%0,509$), 60 kg/m³ ($V_f=\%0,764$) şeklindedir.

Deneyssel çalışmada kullanılan beton tasarım gruplarının lif içerikleri Şekil 4.1’de yer almaktadır.



Şekil 4.1: Beton üretiminin akış şeması şeklinde gösterimi.

Bunun yanında aynı matris dayanımında bir adet de referans betonu üretilmiştir. Numuneler, 4 adet prizma (10cmx10cmx50cm) ve 6 adet silindir ($\phi=10\text{cm}$, $h=15\text{cm}$) içerisine yerleştirilmiştir.

İlk iki grupta ucu çift kancalı çelik lif kullanılırken, diğer iki grupta tek kancalı lif kullanılmıştır. Birinci ve üçüncü gruplardaki betonlar geleneksel beton olarak üretilmişken diğer gruplarda da kendiliğinden yerleşen beton üretilmiştir. Her dört grupta da agrega miktarları birbirinden farklı olarak kullanılmıştır. Bunun yanında kendiliğinden yerleşen betonda üç tip (doğal kum-yapay kum-kırmataş¹) agrega kullanılmışken geleneksel betonda bunlara bir de kırmataş² eşlik etmektedir. Her grubun işlenebilirlikleri birbirinden farklı olması gözlenmiş olması ile beraber bu değişimi incelemek, tez çalışmasının amaçlarından birisidir. Ancak betonların işlenebilirlikleri belirli bir düzeyde olmasının yanında kalıplara yerleşmesi açısından bir problem yaşanmamıştır. Betonlar üzerinde basınç, elastisite modülü, yarma çekme, üç noktalı eğilme ve sıyrılma deneyleri yapılmıştır. Bunun yanında liflerin dağılımının homojen olup olmadığını belirlemek amacı ile prizma numunelerden en kesit alınarak “Image J” adlı program vasıtasıyla lif dağılımları gözlenmiştir. Bu yöntemden alınan neticeler doğrultusunda liflerin dağılımını görüntülemek amacı ile röntgen cihazı kullanılarak X-Ray görüntüleri elde edilmiştir.

4.3 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

4.3.1 Çimento

Bu çalışmada bağlayıcı olarak sadece çimento seçilmiş olup, Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.’nin Büyükçekmece fabrikasında üretilen, TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu normal Portland çimentosu (CEM I 42,5 R) kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilip, tüm çalışma tek bir üretim partisinden elde edilen çimento beton karışımında yer almıştır. Böylelikle, çalışmalar süresince nem alarak topaklaşma önlenmiş ve aynı kimyasal içerikli hammadde kullanılarak olası hataların malzeme farklılığından kaynaklanması bertaraf edilmiştir. Ayrıca çimentolar standart ambalajlarının yanında nem ve su geçirmeyen bir örtü ile korunmuştur. Kimyasal olarak çimentonun içeriği Çizelge 4.1’de azalan oranlarına göre verilirken, fiziksel özellikleri ise Çizelge 4.2’de priz başlangıç ve bitiş priz süreleri olacak şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.1: Çimento içeriği ve yüzdeleri.

İçerik	Yüzde fraksiyonlar [%]
CaO	62,91
SiO ₂	19,71
Al ₂ O ₃	5,20
Fe ₂ O ₃	3,73
SO ₃	2,72
MgO	2,54
K ₂ O	0,90
Na ₂ O	0,25
Kızdırma kaybı	0,96

Çizelge 4.2: Çimentonun fiziksel özellikleri.

Özellik		Değer
Özgül ağırlık		3,12 g /cm ³
Priz Başlangıcı	Başlangıç	150 dakika±10 dakika
	Bitiş	210 dakika±10 dakika
Özgül yüzey		3250 cm ² /g
İncelik	0,20 mm elekte kalan	0 [%]
	0,09 mm elekte kalan	0,1 [%]

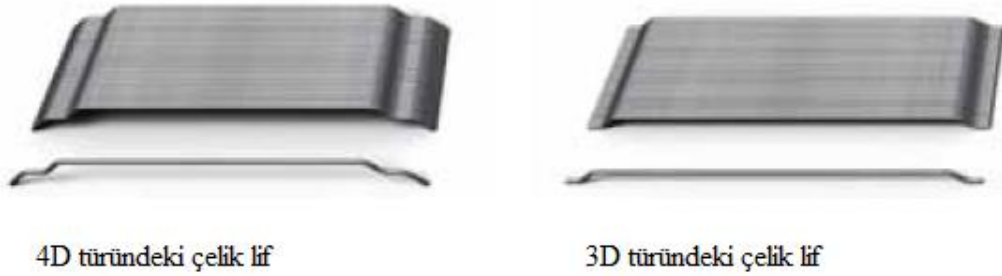
4.3.2 Agregası

Çalışmalarda dört çeşit agregası kullanılmıştır. Bunlar; doğal kum, yapay kum, kırmataş1 ve kırmataş2 olmakla beraber ilk ikisi ince agregası, diğerleri ise kaba agregasıdır. En büyük agregası boyutu 32 mm'dir. Yapılan bu yüksek lisans tez çalışmasında iki farklı tipte beton kullanılmış olup bunlardan bir tanesi de kendiliğinden yerleşen betondur. Bu sebeple kırmataş2, bu tip betonda kullanılmamıştır.

4.3.3 Çelik lif

Yurt dışından ithal edilen “Bekaert” markalı 3D ve 4D tipli iki tür çelik lif bu yüksek çalışmada kullanılmıştır. Her iki lifin ortak özelliği, uçlarından kancalı olması, aynı narinlikte ve boyda olması, normal çekme dayanımına sahip olmaları iken 3D modelinde çekme dayanımı 1000 N/mm², 4D modelinde ise 1500 N/mm² 'dir. Bunun yanında çelik lifler tutkal ile birbirlerine bağlı şekilde durmaktadır.

Bu yüksek lisans çalışmasında kullanılan çelik lifler arasındaki ayırt edici özellik, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, her iki ucundaki farklılıktan kaynaklanmaktadır ve bu farklılık sonuçlar kısmında tartışılacaktır.



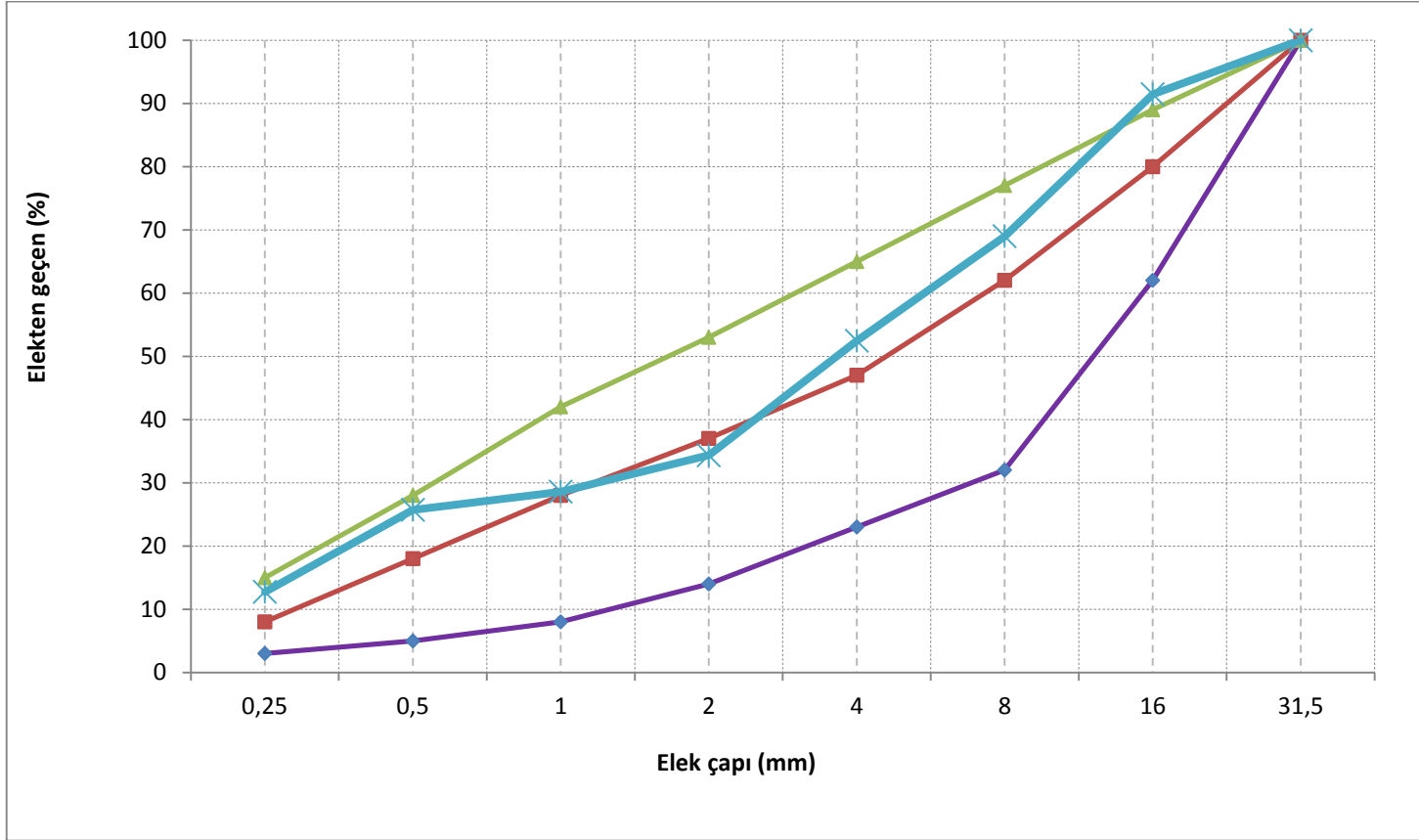
Şekil 4.2: 3D ve 4D çelik liflerinin görünüşleri.

Aralarındaki bir diğer fark ise bir miktara düşen lif adedidir. Buna göre 3D için bu miktar 3200 lif/kg iken 4D için bu sayı 3183 lif/kg olarak karşımıza çıkmaktadır. Çelik liflerin uzunluğu 60 mm, çapı 0,9 mm ve narinlikleri 67 olmakla beraber her iki lif için de bu değerler ortak özelliklerdir [31].

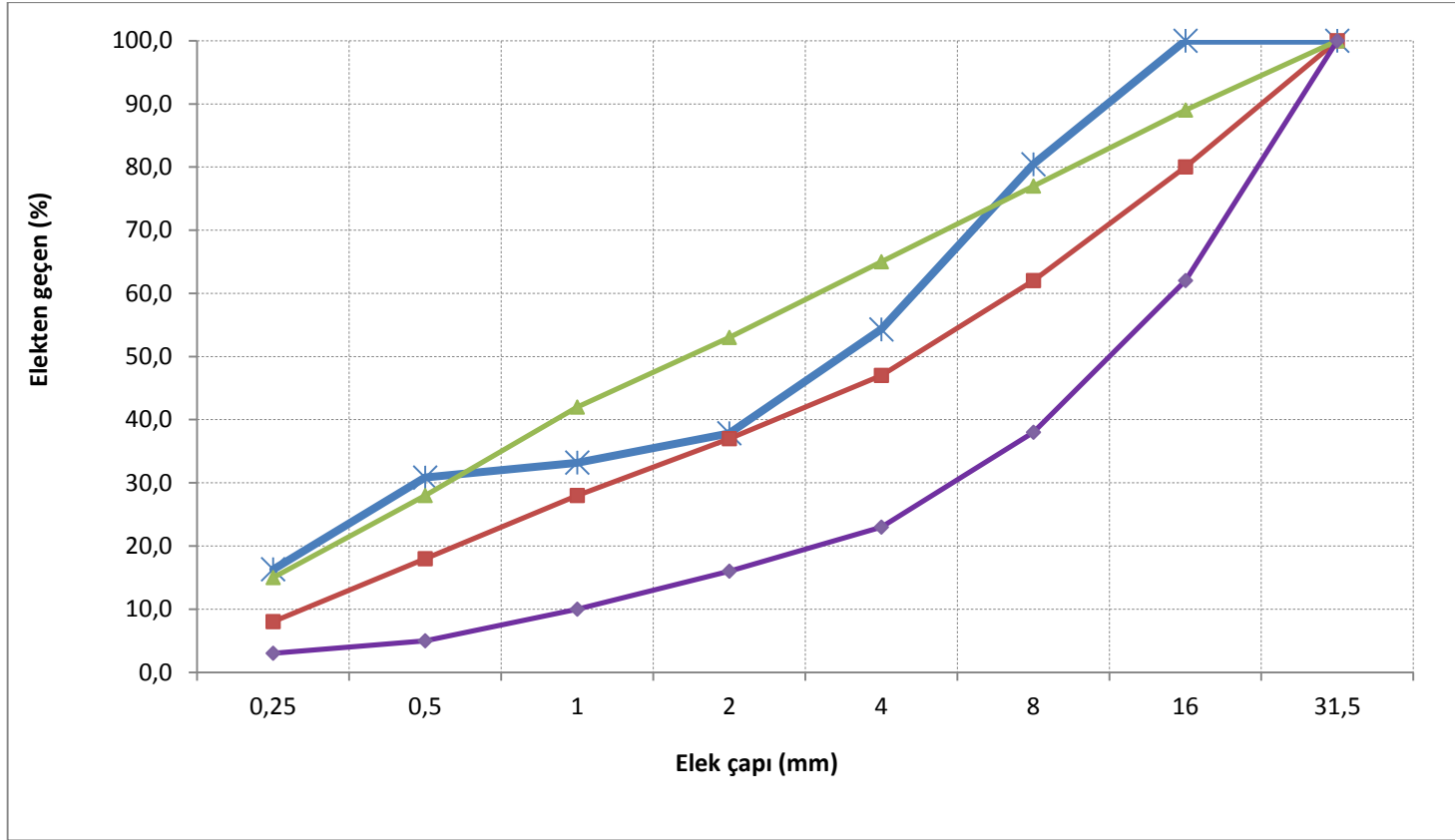
4.3.4 Kimyasal katkı

Taze beton ve harç karışımlarında işlenilebilirliği artırmak, erken mukavemet ve nihai yüksek performans sağlamak amacıyla; karma suyunu azaltıcı ve sınırlı klor ve alakali konsantrasyonlu [$Cl_{max} = \%0,1$] hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkı Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.’den temin edilen Sikament-300’dür. Yüksek etkinlik gösteren bu kimyasal katkı çalışmada %4,5 oranında kullanılmıştır. Yoğunluğu 20°C’de 1,15 – 1,19 kg/l’dir.

Deneylerde üretilen geleneksel ve kendiliğinden yerleşen betonda, agrega tane boyut dağılımı ve maksimum tane boyutu için agrega sınır eğrileri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te verilmektedir.



Şekil 4.3: Geleneksel beton için karışım agregasının tane boyutu dağılımı ve $d_{\text{maksimum}}=31,5$ mm için agregası sınır eğrileri.



Şekil 4.4: Kendiliğinden yerleşen beton için karışım agregasının tane boyutu dağılımı ve $d_{\text{maksimum}}=16$ mm için agregası sınır eğrileri.

Çelik lif kullanılması nedeniyle geleneksel betonda dahi belirli bir işlenebilirlik düzeyine ulaşmak amacıyla kimyasal katkı kullanılmış olup bu oran bağlayıcı ağırlığının %1,33 oranındadır. Bunun yanında kendiliğinden yerleşene betonda ise bu oran azalan s/ç oranı ile beraber çimento ağırlığının % 4,5 seviyesine ulaşmakta olup kimyasal katkının etkin çalışma sınırındadır. Her grup beton üretiminde aynı tip ve markalı akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

4.3.5 Su

Deneylerde karışım suyu olarak ve kür havuzlarında kullanılan su İstanbul şehir şebekesinden alınan sudur. Bu bakımdan beton karma suyu ilgili Türk Standardı TS EN 1008 'a göre uygundur.

4.4 Beton Karışımının Özellikleri ve Numunelerin Üretimi

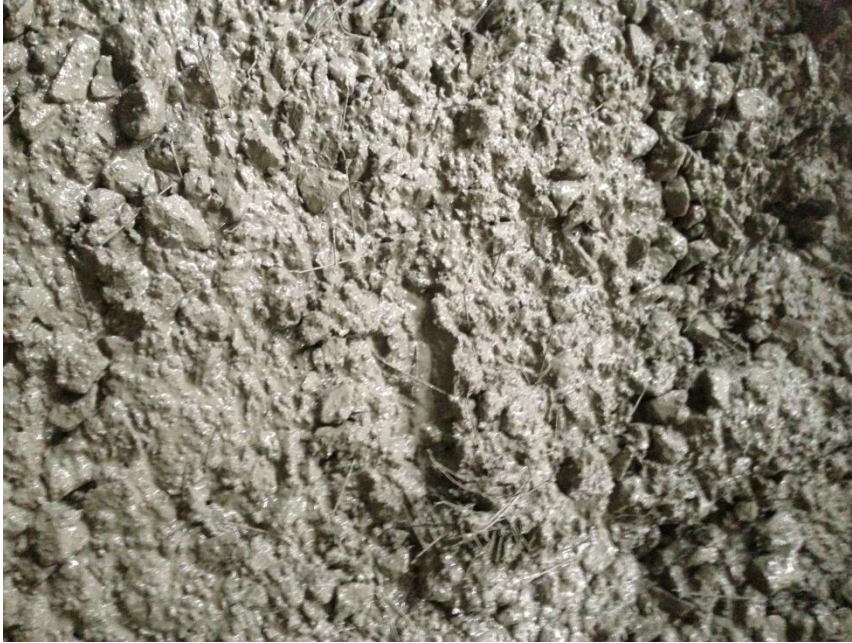
Yapılan bu çalışmada kapsamındaki tüm çalışmalar (beton üretimi ve deneyler) İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi'ndeki Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda titizlikle sürdürülmüştür. Deneysel çalışma kapsamında yapılan programa göre iki farklı matris dayanımlı, iki farklı lif türü içeren toplam 4 grupta 14 seri, her seri dahilinde de 4 adet prizma ve 6 adet silindir şeklinde beton üretilmiştir. Çizelge 4.3'de de belirtildiği gibi bu numuneler basınç dayanımının, çekme dayanımının, elastisite modülünün ve eğilme dayanımının hesaplanması için kullanılmıştır. Yapılan deneyler, Malzeme Laboratuvarı'nda hazır bulunan malzemeler olmasının yanında, çalışmanın amacına göre beton karışım hesabı özel olarak tasarlanmıştır.

Çizelge 4.3: Deneylere göre numune boyutları ve adetleri.

Deney	Numune Adet	Numune Türü	Numune Boyutu
Elastisite Modülü	3	Silindir	Φ100mm, h=200mm
Basınç dayanımı	3	Silindir	Φ100mm, h=200mm
Yarmada çekme	3	Silindir	Φ100mm, h=200mm
Üç noktalı eğilme	3	Prizma	100mmx100mmx500mm

Beton karışım hesabı yapılmış çelik takviyeli betonların üretim aşaması sırası ile aşağıda verildiği gibi belirli bir düzen çerçevesinde yapılmıştır:

- Agregalar, önce kırmataş2 sonra kırmataş1, yapay kum ve doğal kum, tane çapı büyük olandan küçük olana doğru sırası ile tartılarak mikser kazanına konuldu. Daha sonra bağlayıcı tartılarak bunlara ilave edildi ve kuru karışım elde edildi. Diğer taraftan su, katkı ve çelik lif tartıldı.
- Kuru karışım mikserde yaklaşık 2 dakika karıştırıldıktan sonra karma suyunun %80-85 kadarı eklendi. Geriye kalan su katkıya eklendi. Bunun sebebi viskoz davranış gösteren akışkanlaştırıcı katkının kap çeperinde kalarak kayıp olmasını engellemektir. Katkının da eklenmesi ile beraber akıcı karakter kazanan betona lifler eklendi ve ilgili işlenebilirlik testi uygulandı. Ayrıca taze haldeki özgül ağırlığını hesaplamak için bir miktar beton kullanıldıktan sonra “Taze beton deneyleri”nde kullanılan betonlar tekrar miksere eklendi ve toplamda 8 dakikalık bir karışıma tabi tutuldu. Tüm karıştırma süreleri, her beton üretim serisi için sabit tutuldu. Beton, Şekil 4.5’de görüldüğü gibi bir görünüm kazandı.



Şekil 4.5: Taze haldeki çelik lif takviyeli betonun yaş haldeki görüntüsü.

Prizma ve silindir kalıplar özenle kurulup kumpasla ölçüldü ve kalıp yağı ile yüzeyleri yağlandı. Beton kalıplara konuldu ve yeteri kadar vibrasyon uygulanarak yerleştirme sıkıştırılarak yapıldı.

Lifler üretimden bir bütün halde çıkmasına rağmen, çelik elemanları bir arada tutan tutkalın karışım suyuna teması ile beraber çözünmesi, olası topaklanmaların önüne geçmektedir. Bu sayede homojen bir dağılım elde edilmekte dolayısı ile çelik liflerin betona yapacağı takviye elemanın her bölgesinde olacaktır.

Prizini alan kalıptaki beton elemanlar, dökümden 24 saat sonra kalıptan alınarak ON-OFF Controller ile sıcaklığı 21 °C' de sabit tutulan, kirece doymuş kür havuzuna alınmıştır. Bu havuzlarda numuneler 28 güne kadar tutulmuş, bu günden sonra havuzdan alınarak numuneler ilgili deneylerine tabi tutulmuştur.

Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'de beton karışım miktar ve malzemeleri açıkça gösterilmektedir. Hangi numunenin hangi matris dayanımına ve lif oranına sahip olduğunu gösteren kodlar deneyler esnasında oluşabilecek herhangi bir karışıklığı önlemiş; bunun yanında işlem takip kolaylığı sağlamıştır.

Çizelge 4.4: Geleneksel beton olarak tasarlanan serilerin karışım miktarları ve taze beton özellikleri.

Lif türü	Açıklama	Çimento	Su	Doğal kum	Yapay kum	Kırmtaş1	Kırmtaş2	Lif	Katkı	Slump	Hava
-	Referans-lifsiz beton	360	180	309	625	376	551	0	4,8	22,0	0,92
4D 67/60	20 kg/m ³ lifli beton	360	180	307	622	374	549	20	4,8	16,5	1,79
4D 67/60	40 kg/m ³ lifli beton	360	180	306	619	373	547	40	4,8	12,0	3,30
4D 67/60	60 kg/m ³ lifli beton	360	180	305	617	371	546	60	4,8	10,5	3,94
3D 67/60	20 kg/m ³ lifli beton	360	180	307	622	374	549	20	4,8	18,5	1,58
3D 67/60	40 kg/m ³ lifli beton	360	180	306	619	373	547	40	4,8	16,5	2,15
3D 67/60	60 kg/m ³ lifli beton	360	180	305	617	371	546	60	4,8	11,5	3,61

Çizelge 4.5: Kendiliğinden yerleşen beton olarak tasarlanan serilerin karışım miktarları ve taze beton özellikleri.

Lif türü	Açıklama	Çimento	Su	Doğal kum	Yapay kum	Kırmataş1	Lif	Katkı	t ₅₀	Yayılma	Hava
-	Referans-lifsiz beton	500	185	330	395	972	0	22,5	6,5	79	0,23
4D 67/60	20 kg/m ³ lifli beton	360	180	329	395	971	329	22,5	7,1	77	0,31
4D 67/60	40 kg/m ³ lifli beton	360	180	328	393	967	328	22,5	10	68	3,06
4D 67/60	60 kg/m ³ lifli beton	360	180	327	391	963	327	22,5	14	66	3,33
3D 67/60	20 kg/m ³ lifli beton	360	180	329	395	971	329	22,5	8,5	78,5	1,96
3D 67/60	40 kg/m ³ lifli beton	360	180	328	393	967	328	22,5	10,5	72	2,24
3D 67/60	60 kg/m ³ lifli beton	360	180	327	391	963	327	22,5	15	67	4,15

4.5 Numunelerin Hazırlığı

Basınç dayanımının belirlenmesi ve elastisite modülünün hesaplanması için beton sert halde iken üzerine tatbik edilen deneyler Çizelge 4.3’de belirtildiği gibi silindir numuneler ile yapılmıştır. Ancak silindir kalıbın her tarafı kapalı olmadığından, numunenin pres altında kalan yüzeylerinden birisi pürüzlü kalmaktadır. Bu sebeple 28 günlük yaşını, kür havuzunda tamamlayan numunelere, deney öncesinde başlık yapılmıştır. Bu süreçte başlıklar, terazi ile titizlikle oluşturulmuştur ve dayanım kazanması için 3 gün bekletilmiştir.

Aynı zamanda, üç noktalı eğilme deneyi prizma numuneler üzerinde yapabilmek için elemanlara, en kesit boylarının altıda biri ($h/6$) olacak şekilde başka bir ifade ile 16~17 mm yüksekliğinde çentikler açılmıştır. Bu çentik vasıtası ile çatlak ağzı açılmasının (CMOD) ne ölçüde olduğu % olarak ilgili yazılımda ‘Strain2’ olarak takip edilmiştir.

4.6 Yapılan Beton Deneyleri

4.6.1 Taze beton deneyleri

Harç üretimi sırasında, beton prizini almaya başlamadan birim ağırlık, çökme ve yayılma deneyi olmak üzere üç adet deney yapılmıştır.

4.6.1.1 Birim ağırlık deneyi

Taze halde yapılmış deneylerden birisi olan birim ağırlık deneyi için, hacmi 10 litre olan metal kap kullanılmıştır. Bu büyüklükte kap kullanılmasının nedeni, betonu olabildiğince fazla ölçüde karakterize eden numune almak ve birim ağırlığı en az hata ile saptamaktır. Deneyin asıl amacı ise, teorik olarak bilinen birim ağırlığı bu deney sonuçları ile karşılaştırarak beton karışımındaki hava miktarını yüzde olarak hesaplamaktır.

4.6.1.2 Çökme deneyi

Kullanım amacı ve dış şartlara göre tasarlanan betonların belirli bir işlenebilirlik seviyesinde de olması istenir. Bu tez çalışmasının amaçlarından birisi de farklı lif türlerinin çökme değerine olan etkisini incelemektir.(Geleneksel betonlarda) Türk

Standartları'nda (TS EN 12350) belirtildiği üzere, standart koni dar ağzı yukarıda kalacak şekilde yerleştirildikten sonra üçte biri seviyesine kadar taze beton ile doldurulduktan sonra 25 kere şişlenmiştir. Bu süreç diğer 1/3 lük seviyelerde de uygulanarak koni üst yüzeyine kadar doldurulmuştur. Bu aşamadan sonra, deney tepsisinin temizliğinden emin olunduktan sonra çökme konisi kaldırılarak betonun ağırlığı altında ne kadar yayıldığı not edilmiştir. Her beton serisinin çökme deneyi aynı kişi tarafından, titizlikle yapılmış bu şekilde ölçülen değerler daha doğru karşılaştırılmıştır. Bu değerler taze beton özelliklerini içeren Çizelge 4.4'de verilmiş, sonuçları ise altıncı başlık altında tartışılacaktır. Çelik liflerin çökme üzerindeki etkisi Ek B'deki grafikte verilmiştir.

4.6.1.3 Yayılma deneyi

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) gibi çok akıcı kıvama sahip olan karışımların işlenebilirlikleri ve akıcılık özelliklerinin tayini bu deney ile tayin edilmiştir. Bu deney ile kendiliğinden yerleşen betonun kalıbı doldurma yeteneği ve akıcılığı hakkında veri elde edilmiştir. Ayrıca deney tablası üzerinde, önceden işaretlenmiş olan 50 cm çapa ulaşma süresi hesaplanmıştır. Bu süreden yararlanılarak betonun viskozitesi mertebe olarak belirlenir. Diğer bir deyişle betonun akma karşı direncinin ölçüsü belirlenmiş olunur. Bu tez çalışmasında, yayılma Amerikan Standartlarına(ASTM C 1611) göre yapılmıştır. Buna göre standart çökme konisi, 50 cm'lik dairenin ortasına ters şekilde (dar kısmı aşağıda kalacak şekilde) yerleştirilerek taze haldeki beton karışımı ile doldurulmuştur. Koninin kaldırılması ile beraber kronometre çalıştırılmıştır ve betonun 50 santimetreye ulaşma süresi not edilmiştir. Deneyin devamında bir süre daha beklenerek son çap ölçülmüştür. Segregasyon ve fazla suyun olup olmadığı gözlenmiştir. Bu değerler taze beton özelliklerini içeren Çizelge 4.5'de verilmiştir. Çelik liflerin yayılma üzerindeki etkisi Ek B'deki grafikte verilmiştir.

4.6.2 Sertleşmiş beton deneyleri

4.6.2.1 Basınç dayanımı tayini ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin oluşturulması

Tüm deneyler boyunca yükleme hızı sabit alınmış (0,5 kN/s) ve 10 cm çaplı, 20cm yükseklikteki silindir beton numuneleri kullanılmış olup deney TS EN 12390 'de

tarif edildiği gibi yapılmıştır. Silindir elemanlar, basınç dayanımlarının %90 mertebesine kadar yüklenmiş, böylelikle belirli aralıklarda okunan değerlerle σ - ε eğrisi tamamına yakını belirlenmiştir. Okumalar ekstansometre ile yapılmış olup, bu değerler her bir 10kN luk aralıklara tekabül etmektedir. Hesapta dikkat edilen bir nokta vardır ki o da, ekstansometre ile okunan değerlerin “2 Δl ” olmasıdır. Eksenel basınç altındaki elemanın iki yüzeyinden de şekil değiştirmesi buna sebeptir.

Basınç dayanımı sonuçları ondalık kısmı tam olacak şekilde yuvarlatılmıştır.

Basınç dayanımı, σ_c , MPa biriminde aşağıdaki bağıntıdan (4.1) elde edilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S_c} \quad (4.1)$$

Burada;

σ_c : Basınç dayanımı [MPa],

F_c : Kırılmada ki en büyük yük [N] ve

S_c : Beton numunesinin deneydeki basınç etkisine direnen kesit alanı [mm^2] dır.

4.6.2.2 Elastisite modülünün tayini

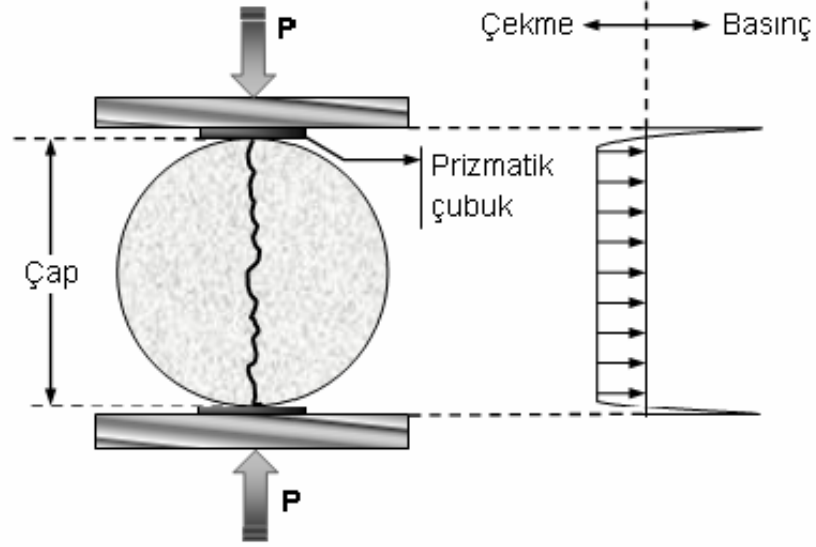
Elde edilen σ - ε eğrisinin lineer kısmındaki (elastik şekil değiştiren bölge) değerler dikkate alınarak elastisite modülü hesaplanmıştır. Dikkate alınan iki noktadan birincisi yüklemeye başlanan ilk okuma, ikincisi ise tepe yükünün yaklaşık 1/3 ü mertebesindeki yüklemenin olduğu kısımdır.

Elastisite modülü, E_c , MPa biriminde aşağıdaki eşitlikten (4.2) hesaplanmıştır.

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon} = \frac{\sigma_c}{\frac{\Delta l}{l_0}} \quad (4.2)$$

4.6.2.3 Çekme dayanımının tayini

Bu deney, presin tablalarının arasına yatay olarak yerleştirilen silindir beton numunelerinin alt ve üstündeki plakalara dik olarak basınç uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Yükün arttırılmasıyla, dolaylı olarak çekme gerilmeleri oluşur ve örnek eksen boyunca yarılarak göçer. Şekil 4.6’da görülen deney sistemine göre, yarma deneyi süresince, deney aletinin (presin) yükleme tablalarının silindir örneğe göre dikey bir düzlemde tutulması sağlanmıştır.



Şekil 4.6: Silindirin kesit alanında meydana gelen gerilmeler.

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi çekme gerilmeleri çap boyunca sabit kalmaktadır, kesitin orta bölgesinde neredeyse uniform dağılımlı çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Çekme dayanımı;

f_{ct} , MPa biriminde aşağıdaki bağıntıdan **(4.3)** hesaplanır.

$$f_{ct} = \frac{2 \times P}{\pi \times L \times D} \quad (4.3)$$

Burada;

f_{ct} : Çekme dayanımı [MPa],

P : Uygulana kuvvet [N] ve

L,D: Sırasıyla silindir numunenin uzunluğu ve çapı [mm]’dir.

Çekme değerlerinin elde edilebilmesi için Şekil 4.7’de gösterildiği gibi 50-4D-40 kodlu yani Şekil 4.1’de verilen şemadaki gibi 1. seride üretilmiş, 40 kg/m³ miktarda çelik lif içeren numunelerden birisine yarmada çekme deneyi tatbik edilmiştir.

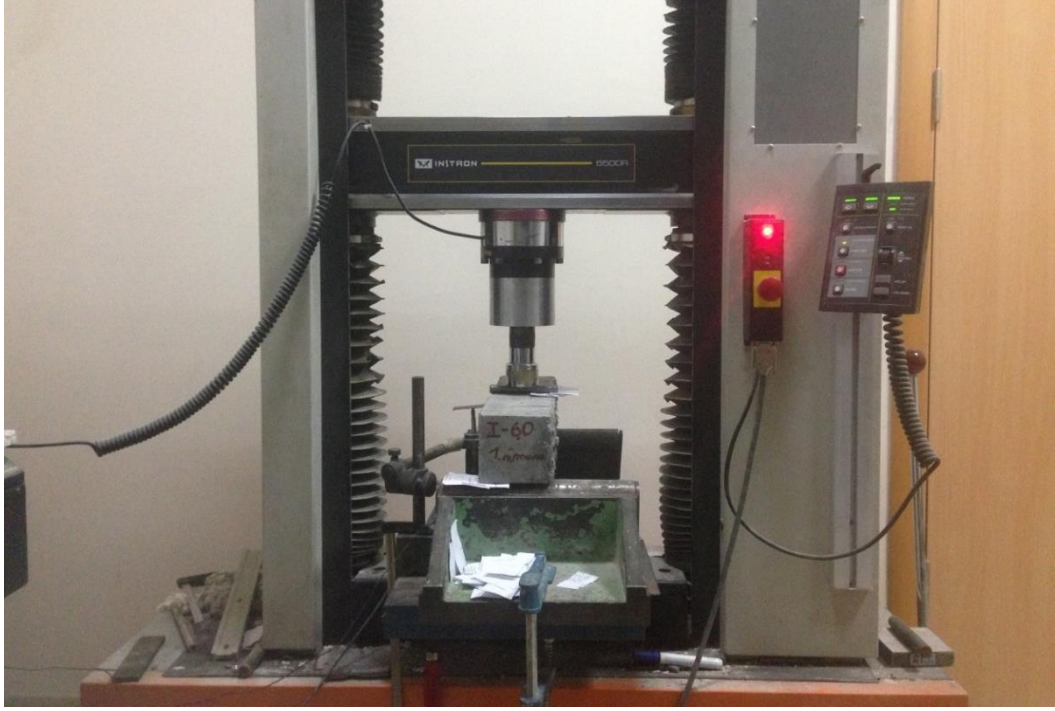


Şekil 4.7: Yarmada çekme deneyine tabi tutulan silindir.

4.6.2.4 Kiriş eğilme deneyi

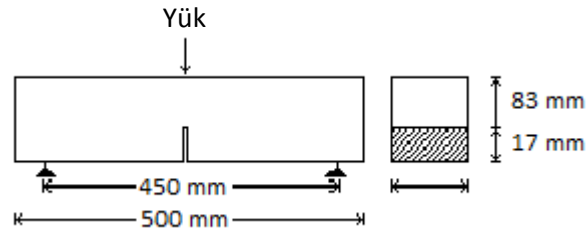
Çelik lif takviyeli betonlara ait Yük-Sehim ve Yük-Çatlak Ağız Açılma Deplasmanı davranışları üzerindeki ortak etkileri beşinci bölümde incelenecektir.

Tüm eğilme deneyleri Şekil 4.8’de görüldüğü INSTRON 5500R kapalı çevrimli deplasman kontrollü 100 kN kapasiteli deney makinesinde gerçekleştirilmiştir. Numunelere deneyden önce açıklığın ortasında 17 mm derinliğinde çentikler açılmış ve bu çentiklere yerleştirilen çatlak ağız açılma deplasmanı ölçen cihazın kullanılması ile çatlak genişliği kontrol edilerek deneyler yapılmıştır. Prizma şekilli numune, eğilme cihazına yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde, boyuna ekseni mesnet silindirlerine dik şekilde yerleştirilmiştir. Yük, yükleme silindiri vasıtasıyla numunenin karşıt yüzeyinden, mesnetleri ortalayacak şekilde, düşey olarak uygulanmıştır. Deney sırasında, aynı anda yük-sehim eğrisi “LVDT” ile, yük-çatlak ağız açılma deplasmanı ise “çatlak ağız açılma deplasmanı ölçer” ile ölçülmüştür.



Şekil 4.8: Kiriş eğilme deneyi.

Kiriş numunelerin boyutları Şekil 4.9’da gösterildiği gibi 100mmx100mmx500mm olmakla beraber, mesnetler arası açıklık 450 mm alınmıştır. Her ne kadar çentik yüksekliği tüm yüksekliğin 1/6’sı kadar olarak belirlenmiş olsa da sonuçların doğruluğu için açılan çentiklerin derinliği, her bir kiriş numunesinin çalışan yüksekliğini hesaplamak amacı ile deney öncesi kumpas ile ölçülmüştür.



Şekil 4.9: Üç noktalı eğilme yapılan kirişte yükleme ve mesnet noktaları.

Eğilme dayanımı,

σ_{max} , MPa biriminde aşağıdaki bağıntıdan (4.4) hesaplanır.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{\frac{P.l}{4}}{\frac{b.h^3}{6}} \quad (4.4)$$

Burada;

σ_{max} : Eğilme dayanımı [MPa],

b : Kare enkesitinin kenar uzunluğu [mm]

h : Kare enkesitinin çentik açıldıktan sonraki yüksekliği [mm]

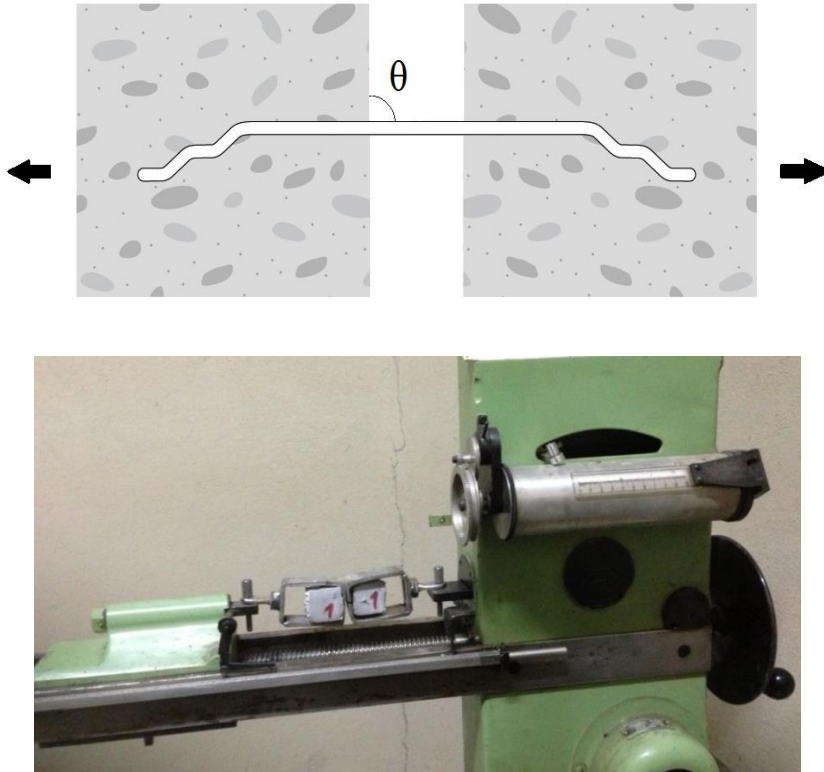
P : Prizmaya, orta noktasından uygulanan çizgisel yük [N]

l : Mesnetler arasındaki uzunluk [mm] dir.

4.6.2.5 Yatay çekme deneyi

Tek bir lifin sıyrılma direncini saptamak amacıyla çeşitli su/çimento oranlarına (0.3; 0.4 ;0.5), lif türüne (3D, 4D) ve lif açılara (30^0 , 45^0 , 60^0 , 90^0) sahip numuneler Şekil 4.10'daki gibi matris içerisinde tek bir lif olacak şekilde hazırlandı. Hazırlanan toplam 58 adet numune üzerinde, 200kg göstergeye ait tek eksenli yatay çekme düzeneğinde, deneyi yapıldı.

Şekil 4.10'da θ ile gösterilen lifin matris içerisine saplanma açısının, lif geometrisinin ve matris dayanımının, sıyrılma direncindeki en büyük kuvvet üzerindeki etkisinin bulunması bu deneyde amaçlanmıştır. Sonuçların doğruluğu açısından test sonrası matris içerisinden sıyrılan lifte, uç deformasyonunun olup olmadığı dikkate alınmıştır.



Şekil 4.10: Yatay çekme deneyi.

4.6.2.6 Lif dağılımlarının belirlenmesi

Liflerin özellikle mekanik performanslarının yüksek olması homojen bir dağılım göstermesi ile de ilgilidir. Bu sebeple bu çalışmada liflerin matris içerisinde nasıl bir yerleşimi olduğunu saptamak için herhangi bir prizmadan kesit alınarak liflerin dağılımı diğer bir ifade ile kaç tane olduğu ve matris içerisindeki yönelmesi gözlemlendi. Kesit alındıktan sonra ilk olarak çelik lif dağılımının nasıl olduğu gözle kontrol edildi.

Yapılan nitel gözlemlerden sonra, çalışmayı nicel hale getirmek için alınan en kesit temizlenerek ıslak bir biçimde yüksek çözünürlükteki fotoğraf makinası ile bilgisayara aktarıldı. Şekil 4.11’de görüldüğü gibi liflerin daha parlak olarak görüldüğü en kesitte “Photoshop” adlı program kullanılarak çelik lifler el ile seçildi. Seçimden sonra çelik lif etrafında, çelik lif-matris fazı ara yüzüne ait kısımlar tıraşlandıktan sonra çelik lif alanlarının toplamını ölçmek için imaj analiz programı kullanıldı.

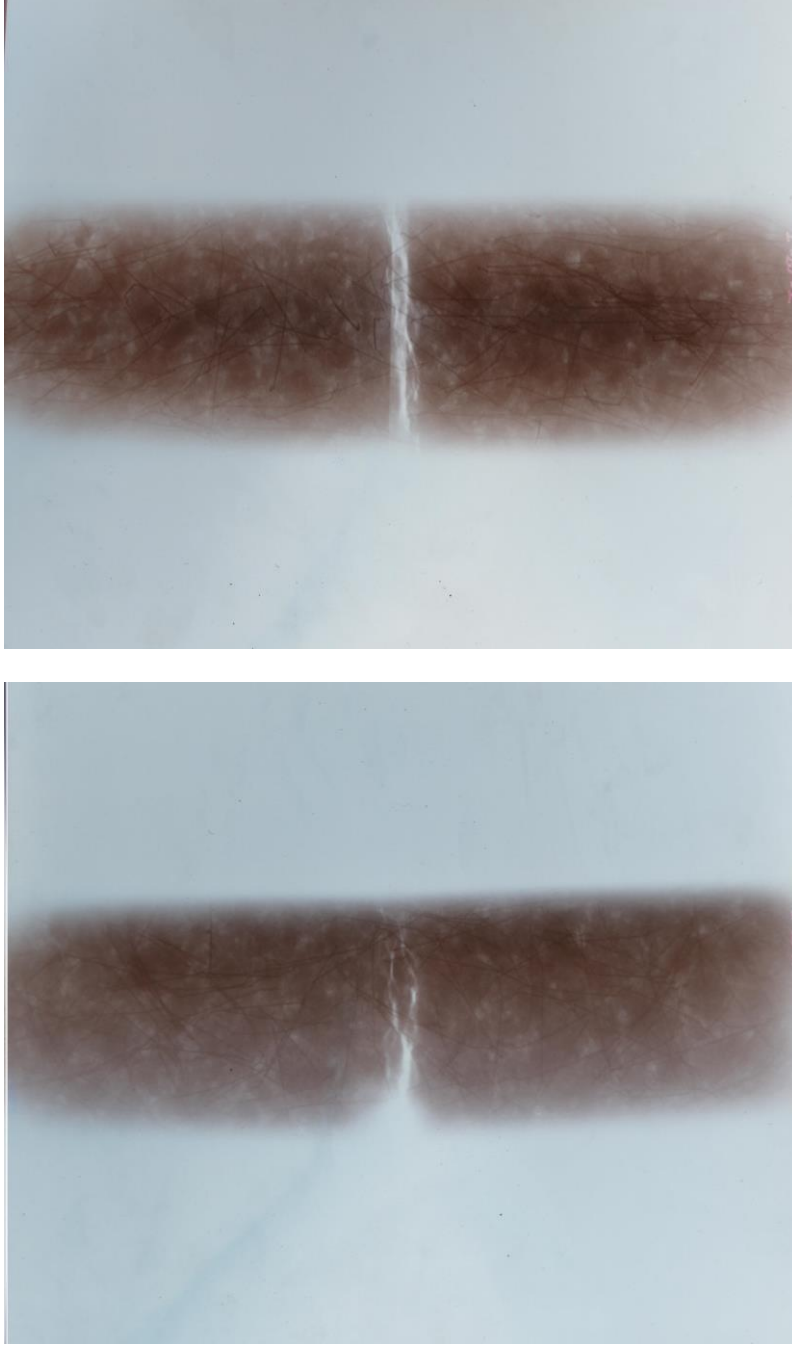


Şekil 4. 11: Prizma numunenin en kesiti ve çelik liflerin dağılımı.

Elde edilen çelik lif oranları toplamının toplam alana oranı sonucu, daha önceki nitel gözlemlerle uyduğundan dolayı çelik liflerin dağılımlarını daha iyi gözlemleyebilmek amacı ile İTÜ Sağlık, Kültür ve Spor Daire Başkanlığına bağlı Sağlık Merkezi’nde yer alan röntgen cihazı ile prizmaların X-ray dağılımları elde edildi.

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi “3 noktalı eğilme deneyi” sonrası 50-4D-20 kodlu prizma numunenin lif dağılımının incelenebilmesi amacı ile 2 yönlü x-ray görüntüsü elde edilmiştir. Bu sayede, lif dağılımının yatay ve düşey dağılımını görüntülemek mümkün olmuştur. Bu görüntülemenin bir diğer amacı çatlak oluşumu ve yolunun belirlenmesi idi. X-ray görüntüleri vasıtası ile oluşan çatlakların ilerleyişleri de

görüntülenmiştir. Bazı prizma şekilli numunelerin X-ray görüntüleri Ek G 'de verilmiştir.



Şekil 4.12: 20kg/m³ miktarında 4D çelik lifinin kullanıldığı prizma numunenin çelik lif dağılımının ve oluşan çatlak yolunun röntgen cihazı ile görüntüsü.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapı malzemesi olarak kullanılan çeliğin zayıf yönü olan korozyonun çelik lifler için de geçerli olduğu bu çalışmada görüldü. Kalıplara dökülen çelik lif içerikli harcın standart 28 günlük dayanımına ulaşmaları için su içinde bekletildikten sonra çelik liflerin paslandığı gözlenmiştir. Bu paslanma numuneler içinde gömülü olanlarda fazla değil iken yüzeye yakın olan ve yüzeye çıkan lif tanelerinin tamamen veya yüksek oranda korozyona maruz kaldığı görülmüştür. Artan lif hacim oranları ile birlikte betonların daha fazla korozyona maruz kaldığı göz ardı edilmemelidir.

Betonun işlenebilirliği de ihmal edilemeyecek ölçülerde çelik lif içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Ek B’da da gösterilen bu değişim ile beraber gerek geleneksel betonda olsun gerekse kendiliğinden yerleşen betonlarda olsun betonun akış ve çökme değerleri üzerinde çelik lif miktarının önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

Yayılma testi ve çökme testi sonuçları gösteriyor ki işlenebilirlik üzerindeki asıl önemli değişken çelik lif miktarıdır. Çelik lif geometrisinin betonun özelliklerine olan etkisinin incelendiği bu çalışmada kullanılan iki çelik lif türünün (3D ve 4D) işlenebilirlik üzerinde ikincil bir etkisi olduğu söylenebilir. Aralarındaki farkınsa 4D tipindeki lifin 3D tipindeki çelik life göre kısmen daha karmaşık bir uç geometrisine sahip olması ile açıklanabilir.

Aynı miktarlarda ancak farklı lif türlerinin kullanıldığı numunelerde, x ray çıktılarına bakıldığından görülen lif dağılımı arzu edilen seviyelerde olmadığı görülmüştür. Bu değerlendirme aynı zamanda işlenebilirlik ile ilişkilendirilebilir. Öyle ki işlenebilmede meydana gelen kısıtlanmaların bir sonucu olarak çelik lifler tamamen homojen bir davranış sergilememişlerdir.

5.1 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

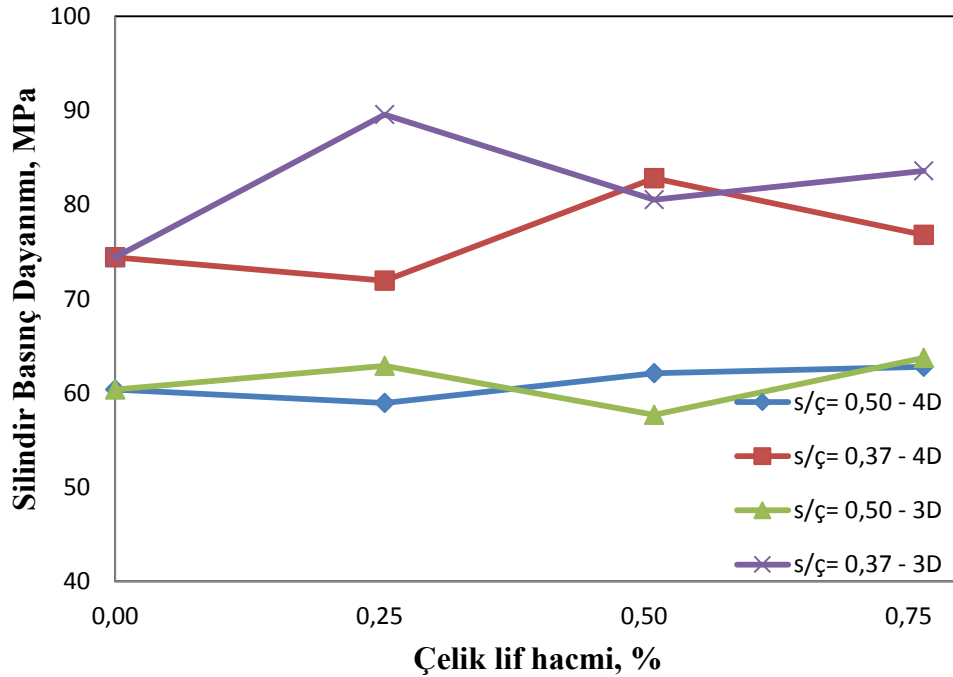
Betonun en az taze hal özellikleri kadar sert haldeki özellikleri de kullanılacak yapının performansı ve servis ömrü için önem arz etmektedir. Bu sebeple yapılan

basınç testi, elastisite modülünün tayini testi, yarmada çekme testi, üç noktalı eğilme testi ve yatay çekme testleri bu kısımda irdelenmiştir.

5.1.1 Basınç deneyi

Kullanılan farklı çelik lif türlerinin ve çelik lif oranlarının, iki farklı matris dayanımına sahip referans betonlarının basınç dayanımlarına etkisi Şekil 5.1’de görülmektedir. Beton karışımına eklenen liflerin, betonun basınç dayanımına çok fazla tesiri olmadığı yapılan seri basınç deneyleri sonucunda gözlenmiştir. Yapılan bu çalışmada betonların basınç mukavemeti, çelik lif takviyesi olsun olmasın azalan su/çimento oranı ile artmaktadır.

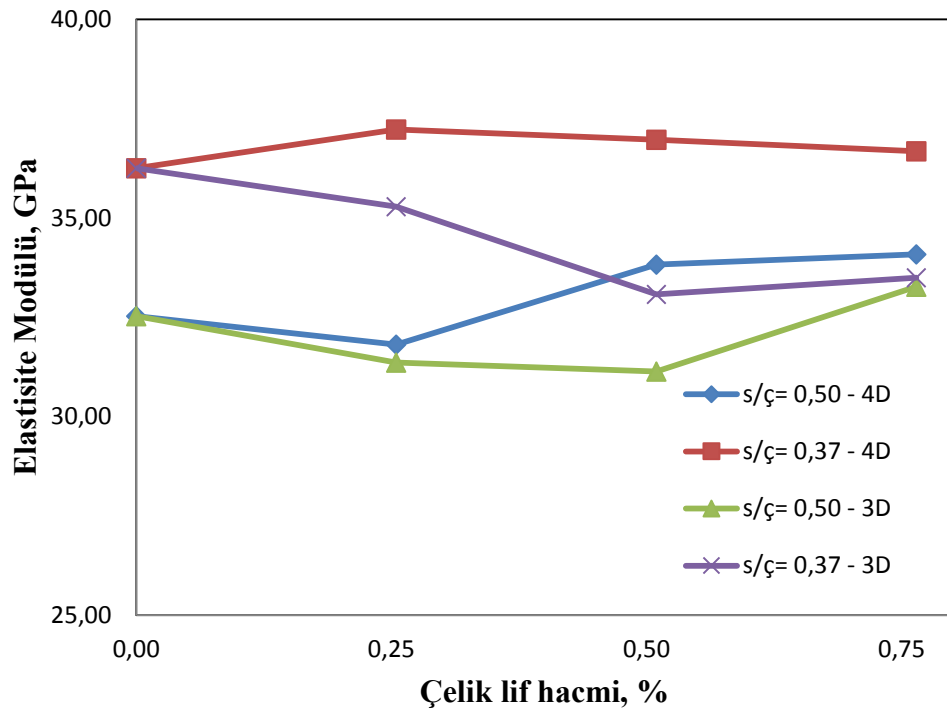
Şekil 5.1’de görüldüğü gibi çelik lif eklenmesinin betonun basınç dayanımında önemli bir etki oluşturmadığı anlaşılmıştır. Kullanılan iki farklı lif türü de (aynı narinlik, farklı uç yapısı) benzer davranış sergilemiş, basınç dayanımı-lif hacmi ilişkisi dalgalanmalar yapmakta ve yakın değerler etrafındadır. Sadece oluşan fark su/çimento oranından ileri gelmektedir.



Şekil 5.1: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin 28 günlük basınç dayanımına etkisi.

5.1.2 Elastisite modülü deneyi

Aynı narinlikteki liflerin kullanıldığı, farklı s/ç oranına sahip beton numunelerinin elastisite modüllerinin değişen lif hacimleri ve matris dayanımları ile ilişkileri Şekil 5.2’de verilmektedir. Basınç dayanımı - çelik lif hacmi ilişkisinde olduğu gibi elastisite modülü-çelik lif hacmi ilişkisi de benzer davranış göstermektedir.



Şekil 5.2: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin elastisite modülüne etkisi.

Farklı matris dayanımına, çelik lif türü ve lif hacmine sahip beton numunelerinin arasında en düşük elastisite modülüne sahip olanı su/çimento oranının 0,5 olduğu ve 3D tipli çelik lifin kullanıldığı beton numunesidir.

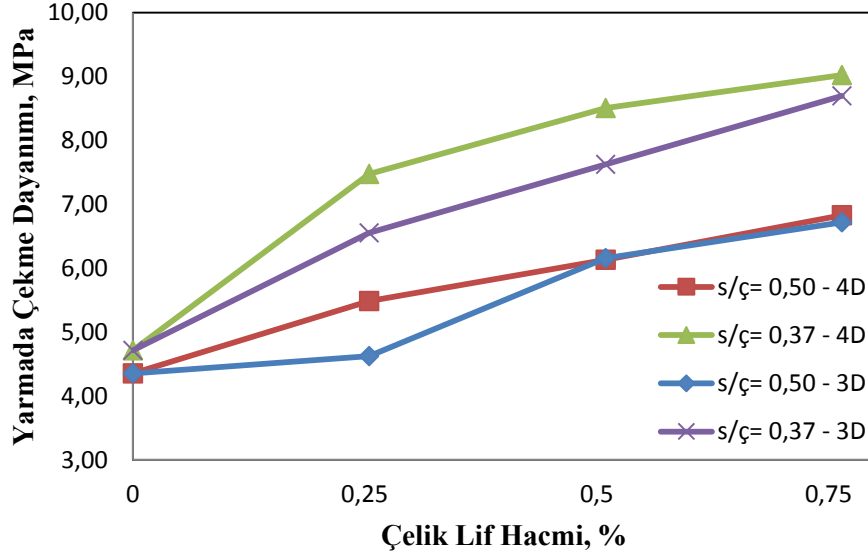
Farklı matris dayanımları, lif türü ve lif hacimlerine sahip beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları ve elastisite modülleri Çizelge 5.1’de verilmektedir. Burada vurgulandığı gibi lif türü ve lif hacmi gibi lif ile ilgili parametrelerin elastisite modülleri üzerindeki etkisi ihmal edilecek mertebelerdedir.

Çizelge 5.1:Çelik lif takviyeli betonların elastisite modülü ve basınç dayanımları.

Numune kodu	Su/çimento oranı	Lif hacmi V_f %	Lif türü	28 günlük silindir basınç dayanımı, MPa	Elastisite Modülü, GPa
50-R	0,50	0,00	4D- 65/60	60,38	32,52
50-4D-20	0,50	0,25	4D- 65/60	58,93	31,81
50-4D-40	0,50	0,51	4D- 65/60	62,09	33,82
50-4D-60	0,50	0,76	4D- 65/60	62,78	34,08
37-R	0,37	0,00	4D- 65/60	74,42	36,25
37-4D-20	0,37	0,25	4D- 65/60	71,92	37,23
37-4D-40	0,37	0,51	4D- 65/60	82,82	36,97
37-4D-60	0,37	0,76	4D- 65/60	76,80	36,67
50-3D-20	0,50	0,25	3D- 65/60	62,89	31,36
50-3D-40	0,50	0,51	3D- 65/60	57,68	31,13
50-3D-60	0,50	0,76	3D- 65/60	63,75	33,27
37-3D-20	0,37	0,25	3D- 65/60	89,59	35,28
37-3D-40	0,37	0,51	3D- 65/60	80,55	33,07
37-3D-60	0,37	0,76	3D- 65/60	83,58	33,50

5.1.3 Yarmada çekme deneyi

İki farklı matris dayanımına sahip beton numunelerinin yarma çekme dayanımlarına, değişen çelik lif hacim oranlarının etkisi Şekil 5.3’de verilmiştir. Çelik lif vasıtası ile takviye edilmemiş betonlar, çelik lif eklenmesi ile çekme dayanımları ve performansları artırılmıştır. Buna göre en fazla artış % 91,1 ile su/çimento oranının 0.37 olduğu ve 4D tipindeki lifin kullanıldığı betonda gözlenirken çekme mukavemetinin diğer betonlara göre en az artış gözleendiği numune %54,5 ile su/çimento oranının 0,5 olduğu ve 3D tipindeki lifin kullanıldığı beton olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 5.3: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin yarmada çekme dayanımına etkisi.

Bunun yanında matris dayanımının önemi de göze çarpmaktadır. Öyle ki 4D tipindeki çelik lifin kullanıldığı betonun yarmada çekme dayanımının 3D tipindeki çelik lifin kullanıldığı betonun yarmada çekme dayanımından daha fazla olması bekleniyorken Şekil 5.3’de de görüldüğü gibi matris dayanımı daha fazla ancak lif yapısı daha zayıf olan betonun yarmada çekme dayanımı daha fazla mertebelerde olduğu görülmüştür. Bu, lif-matris ara yüzey bağından ileri gelmektedir. Yarmada çekme dayanımlarının betonlar numunelerinde nasıl değiştiği Çizelge 5.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

5.1.4 Kiriş eğilme deneyi

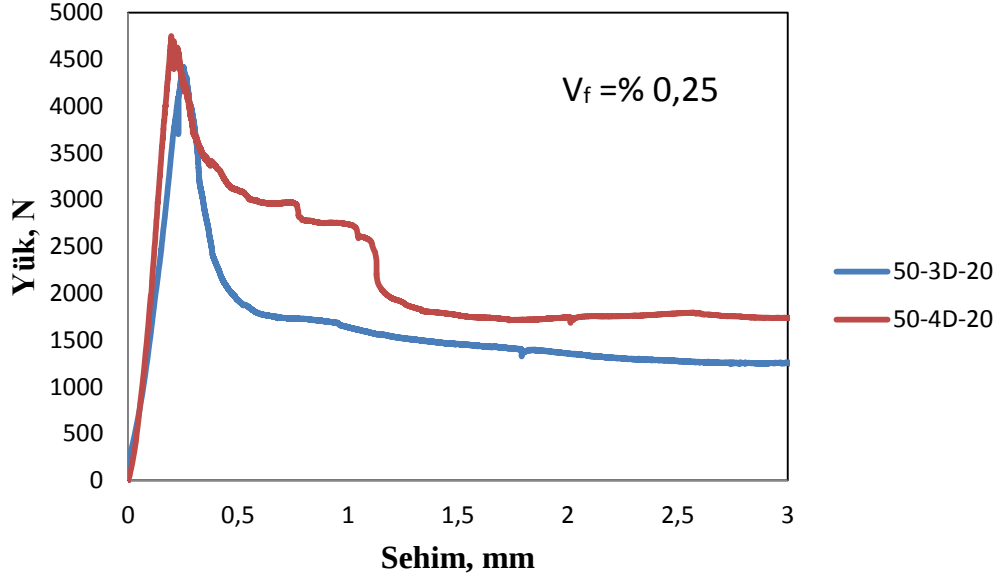
5.1.4.1 Yük - sehim eğrileri

Eğilme deneyleri, 100mmx100mmx500mm boyutlarındaki prizmalara “Üç Noktalı Eğilme Deneyi” tercih edilerek uygulanmıştır. Farklı lif hacimleri ve türleri ancak aynı narinlikteki ($l/d=65$) çelik lif muhteva eden beton numunelerine uygulanan kiriş eğilme deneyleri sonucunda yük-sehim elde edilmiştir.

Çizelge 5.2: Farklı lif tipleri ve matris dayanımına sahip betonlarda lif hacminin yarma dayanımına etkisi.

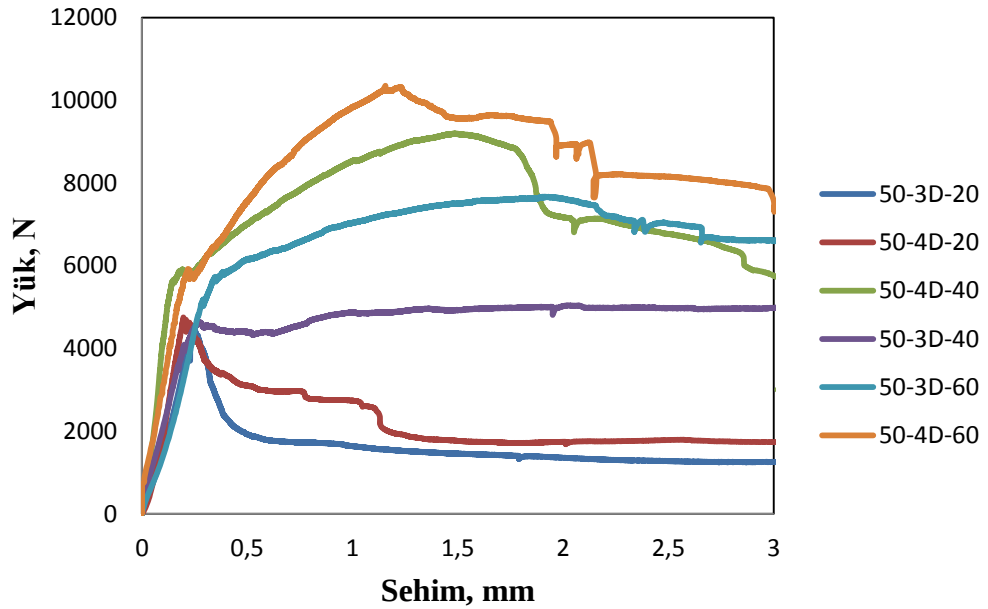
Numune kodu	s/ç oranı	Lif hacmi V_f %	Lif türü	28 günlük silindir basınç dayanımı, MPa	Yarmada çekme dayanımı, MPa
50-R	0,50	0,00	4D- 65/60	60,38	4,35
50-4D-20	0,50	0,25	4D- 65/60	58,93	5,49
50-4D-40	0,50	0,51	4D- 65/60	62,09	6,14
50-4D-60	0,50	0,76	4D- 65/60	62,78	6,83
37-R	0,37	0,00	4D- 65/60	74,42	4,72
37-4D-20	0,37	0,25	4D- 65/60	71,92	7,48
37-4D-40	0,37	0,51	4D- 65/60	82,82	8,51
37-4D-60	0,37	0,76	4D- 65/60	76,80	9,02
50-3D-20	0,50	0,25	3D- 65/60	62,89	4,63
50-3D-40	0,50	0,51	3D- 65/60	57,68	6,16
50-3D-60	0,50	0,76	3D- 65/60	63,75	6,72
37-3D-20	0,37	0,25	3D- 65/60	89,59	6,56
37-3D-40	0,37	0,51	3D- 65/60	80,55	7,63
37-3D-60	0,37	0,76	3D- 65/60	83,58	8,70

Şekil 5.4’ de farklı lif tipleri ve aynı matris dayanımına sahip betonların($V_f = \%0,25$) eğilme davranışları veriliyorken Şekil 5.5’de diğer beton numunelerinin de bulunduğu bir değerlendirme yer almaktadır.



Şekil 5.4: Farklı lif tipleri ve aynı matris dayanımına sahip betonların eğilme davranışları.

Şekil 5.4’ de görüldüğü gibi aynı matris dayanımı ve lif hacmine sahip, ancak aderans özellikleri bakımından daha üstün lif türünün kullanıldığı elemanlarda ilk çatlak yükü daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra daha belirgin fark, tokluk değerlerinde görülmektedir.

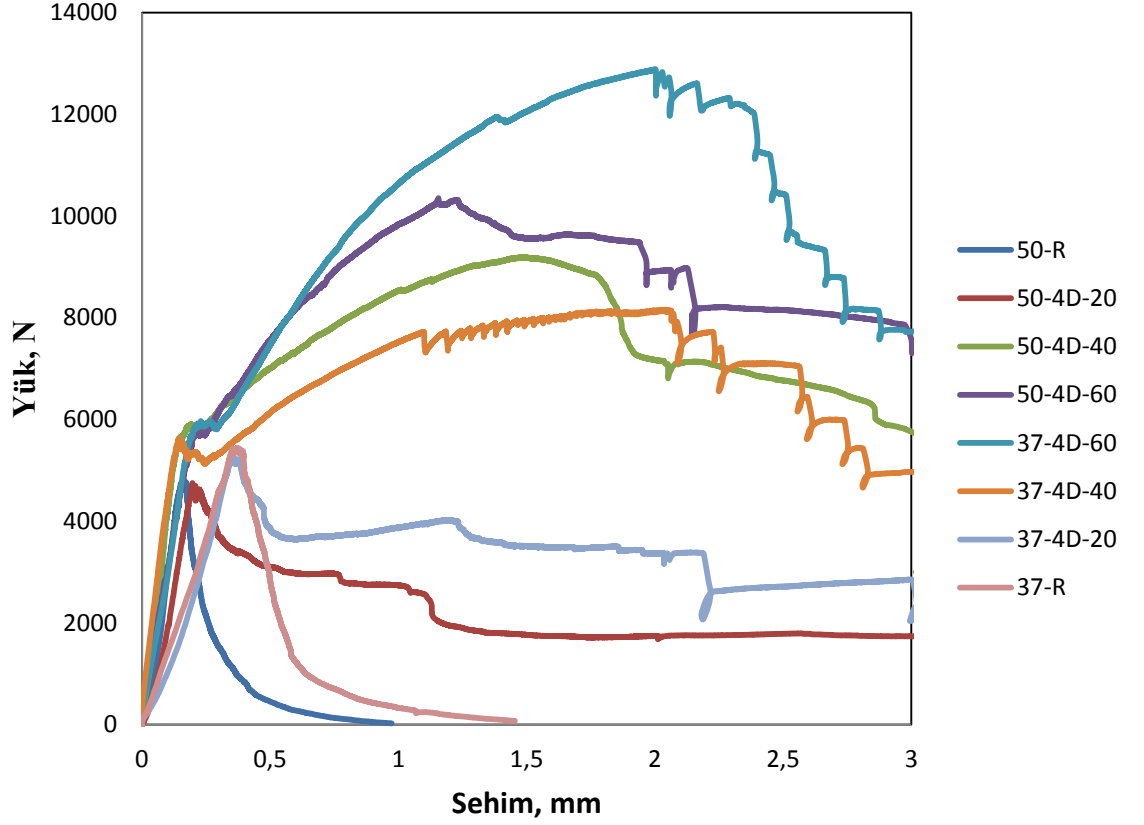


Şekil 5.5: Değişen lif hacimleri ve lif türlerinin geleneksel betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.

Buna göre, 3D lifinin kullanıldığı numunelerde çatlak sonrası davranış, 4D lifinin kullanıldığı numunelere nazaran yük-sehim eğrisinde ilk çatlak sonrası davranış açısından daha zayıftır. Dolayısı ile bu durum betonun enerji yutması diğer bir ifade ile tokluk ile alakalıdır. Su/çimento oranı 0,50 olacak şekilde tasarlanan beton numunelerinin tümü aynı grafik üzerinde, Şekil 5.5’de karşılaştırılmıştır. Lif içeriği arttıkça eğrilerin davranışının değiştiği açıkça görülmektedir. Buna göre, lif içeriği ile ilk çatlak yükü ve tokluk miktarları doğru orantılı olarak değişmektedir. Farklı lif oranlarına sahip her bir beton numunesinin 3 mm sehim değerine kadarki davranışları arasında belirgin farklar olmasına rağmen 40 kg/m³ ve aderans gücü daha yüksek çelik lif muhteva eden beton numunesinin 2 mm sehim değerine kadarki davranışı, 60 kg/m³ çelik lif muhteva eden betonların aynı sehim değerlerine kadarki davranışlarına benzemekte, daha sonra daha büyük bir eğime sahip inen kolu olduğu görülmüştür. Başlangıçtaki bu benzer davranışın sebebi prizmada gelişi güzel dağılan liflerin çatlak civarındaki yönelmesi ve miktarıdır. Bu durum x-ray ışını altına görüntülenen prizmaların görüntülerinden de anlaşılmaktadır.

Beton karışım hesabında, su/çimento oranı azaldıkça ve çelik lif miktarı arttıkça ilk çatlak sonrası tepe yükü değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Buna paralel olarak Şekil 5.6’da gösterildiği üzere, 3 mm sehim değerindeki numunelerin taşıdıkları yük değerleri, daha yüksek matris dayanımlı ve lif içerikli betonlarda en fazla iken bu parametreler azaldıkça taşınan yükler de azalmakta, referans betonlarında ise bu sehim değerine ulaşamadığı gözlenmiştir. Tüm bunlardan hareketle, yük-sehim ilişkisinde matris dayanımının ve çelik lif içeriğinin çok önemli parametreler olduğu söylenebilir.

Çelik liflerin eklenmesi, kiriş eğilme deneyinde betonun şekil değiştirme kapasitesinde ve yük-sehim eğrilerinin altında kalan alanı artırarak toklukta önemli oranda iyileşmeler sağlamıştır. Çelik liflerin eklendiği beton numunelerinde en az lifin kullanıldığı seriler ($V_f = 0,25$) dışında tüm elemanlarda ilk çatlak sonrası davranış yukarı gidiş yönünde eğilime sahiptir. Şekil 5.4’de görüldüğü gibi lif miktarı 20 kg/m³ olan prizmaların yük-sehim eğrilerinde, ilk çatlak sonrası eğri düşüşe geçiyorken Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da ilk çatlak sonrasında yük-sehim eğrisinin tırmandığı ve ilk çatlak yükünden daha büyük bir tepe yükünün oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 5.6: Değişen lif hacimleri ve matris dayanımının yüksek ankraj dayanımına sahip lif içeren betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.

Betonun matris dayanımı, lif içeriği ve lif türü gibi parametrelerin ilk çatlak yükü ve sehim değerine çok fazla etkisi bulunmamasına karşın bu değişkenler daha çok çatlak sonrası davranışta etkili olduğu gözlenmiştir. Çatlak sonrası davranışı ise matris dayanımından çok lif türü ve miktarı daha fazla etkilediği gözlenmiştir. Yapılan tüm çalışmalarda narinlik sabit tutulduğu için bu etkiler sadece narinlik değerinin 65 olduğu çelik lifler için söylenebilir.

Her iki lif türünde de ilk çatlak oluşumundan sonra, lif oranının artışı ile beraber oluşan yumuşama miktarı azalmakta veya daha büyük sehim değerlerinde oluşmaktadır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da yüksek performanslı çimento bağlayıcılı kompozit malzemelerin tipik özelliği olan ilk çatlak sonrasında oluşan şekil değiştirme sertleşmesi ve onu takip eden şekil değiştirme yumuşaması açıkça görülmektedir.

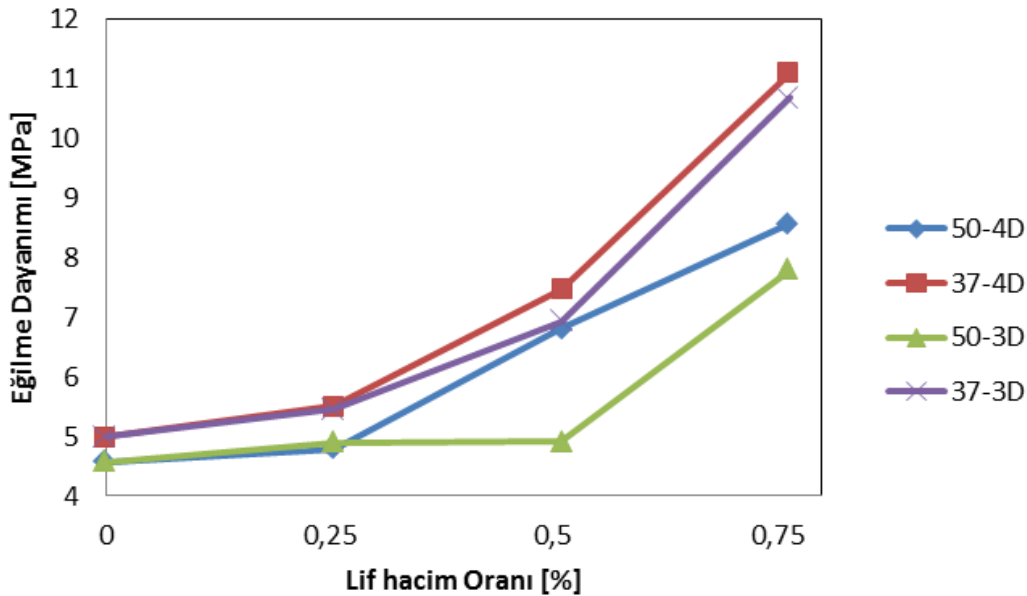
5.1.4.2 İlk çatlak yükü

İki farklı matris dayanımına sahip, aynı narinlikteki liflerin kullanıldığı beton numunelerde değişen lif içeriklerinin ilk çatlak oluşumunu nasıl etkilediği Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’de, sırası ile çelik lif türü ve matris dayanımı açısından verilmiştir. Tüm numunelere bakıldığı zaman artan çelik lif içeriği ile beraber ilk çatlak yükünün de arttığı görülmüştür. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi çelik liflerin çatlakları kontrol etmesi ile ilgilidir.

5.1.4.3 Eğilme dayanımı

Dördüncü bölümde “Kiriş eğilme deneyi” başlığı altında ifade edildiği gibi yapılan deneyler sonucu yük-sehim eğrisinde okunan en büyük yük ifadesi yine aynı bölümde verilen (4.4) denkleminde yerine konarak numunelere ait eğilme dayanımları elde edilmiştir. Tüm numunelere ait eğilme dayanımları belirtilen denklem vasıtası ile hesaplanmış, Çizelge 5.3’de belirtilmiştir.

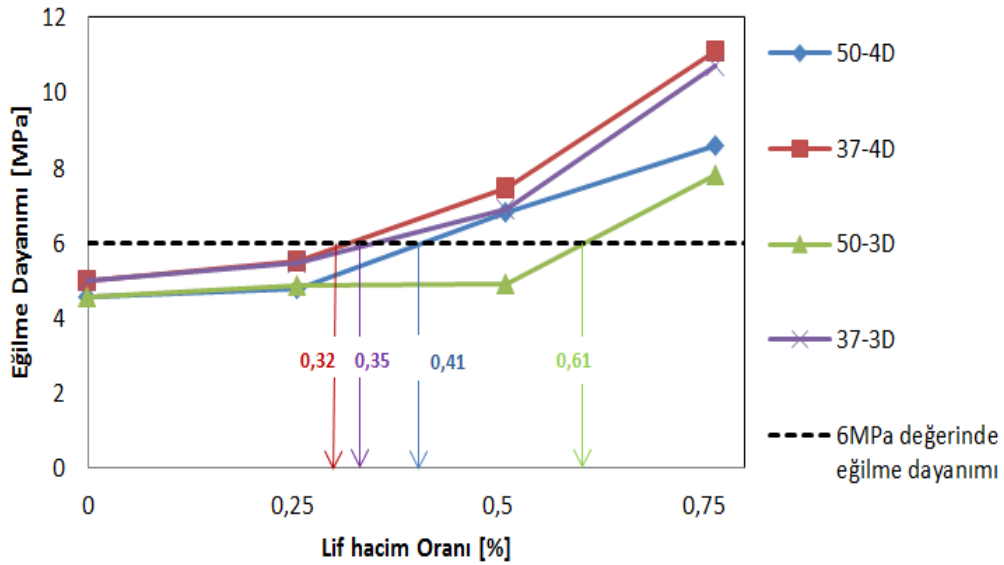
Lif narinliğinin aynı olduğu, farklı su/çimento oranına sahip karışımların eğilme dayanımlarındaki artış lif oranı ile doğru orantılı olduğu Şekil 5.7’de görülmektedir



Şekil 5.7: Değişen lif türü ve matris dayanımına betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.

. Grafikte gösterildiği üzere eğilme dayanımının referans betonuna göre en fazla artışın olduğu beton su/çimento oranının 0,37 olduğu ve 4D tipi lifin kullanıldığı

betonlardır. Bu artış % 122,1 olarak hesaplanıyorken en az artış su/çimento oranının 0,50 olduğu ve 3D tipi lifin kullanıldığı betonlarda, % 70,4 olmaktadır. Aderans gücü daha yüksek çelik lifin kullanıldığı karışımlara ait betonların matris dayanımının artması ile beraber en yüksek eğilme performansı gösterdiği ve bu etkinin lif oranı ile arttığı Şekil 5.7’de gösterilmektedir. 6 MPa değerinde bir eğilme dayanımına sahip bir beton elde etmek için her dört karışım da kullanılabilirken bu oranların değiştiği Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Buna göre 6 MPa değerinde bir eğilme dayanımı için kendiliğinden yerleşen betonda, 4D türündeki liften %0,32 (25 kg/m³) kullanılması yeterli iken, aynı tür betonda ancak 3D türündeki liften %0,35 (28 kg/m³) kullanılması; geleneksel betonda, 4D türündeki liften %0,41 (34 kg/m³) kullanılması ve aynı tür betonda, 3D türündeki liften %0,61 (48 kg/m³) kullanılması gerekmektedir. Bu kıyaslama ile beraber “Matris dayanımı arttıkça kullanılması gereken lif miktarı azalmaktadır.” İfadesi söylenebilir. Benzer şekilde, sabit su/çimento oranında lif aderans kuvveti azaldıkça eğilme dayanımını karşılamak için lif içeriği artırılmalıdır.



Şekil 5.8: Değişen lif türü ve matris dayanımına betonlarda eğilme davranışları üzerindeki etkisi.

Eğilme dayanımındaki artış, betonun matris fazının çatlamadan sonra devre dışı kalmasına rağmen çelik liflerin köprüleme vazifesi görmesinden kaynaklanmaktadır. Matrisin yük almamasında sonra tüm yükü çelik lifler karşılar. Çelik lif takviyeli betonunun kırılması da yüksek matris dayanımlı betonlarda liflerin kopması (kuvvetli

elik lif-matris bağından dolayı), normal matris dayanımlı betonlarda liflerin sıyrılması (düşük aderans dayanımından dolayı) ile meydana gelmektedir.

Tüm bunlardan hareketle, elik lif tipi, içeriği ve su/imento oranı betonun eğilme dayanımını etkileyen parametreler olduğu görülmüştür. Betonun yarmada çekme performansına olan katkısı da göz önünde bulundurulduğunda liflerin eğilme dayanımına olan katkısı daha çoktur.

5.1.4.4 Kırılma enerjisi

Yapılan seri üç noktalı kiriş eğilme deneyleri sonucunda elde edilen yük-sehim ilişkisi bir grafik üzerinde eğri oluşturacak şekilde çizilmiştir. Dış yükün oluşturduğu bu etki hesaplanan enerjiye, prizmanın ağırlığının da oluşturduğu enerji ifadesi eklenerek kırılma enerjisi hesaplanmıştır. Bu enerji hesaplanırken çentik aıldktan sonra kalan kesit alan göz önünde bulundurulmuştur. Her bir karışıma ait kırılma enerjileri izelge 5.3’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

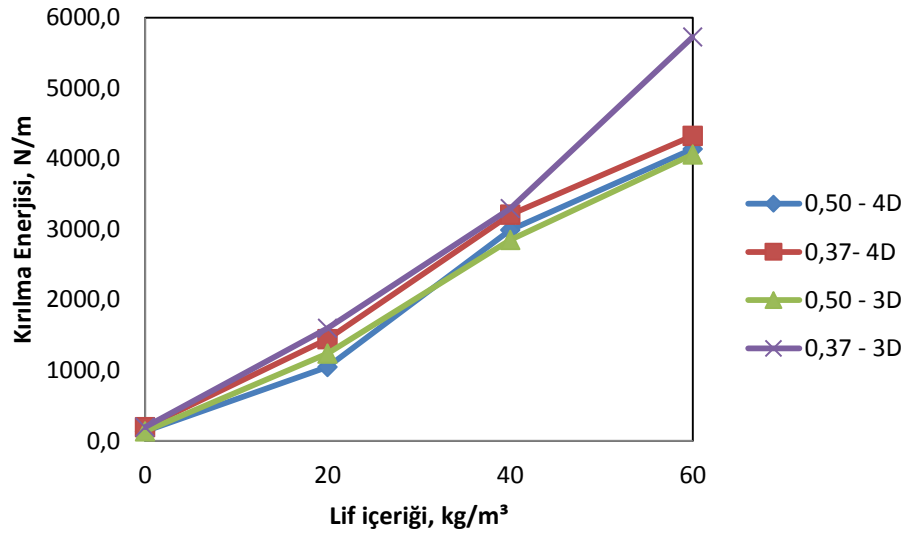
Çizelge 5.3: Çelik lif takviyeli betonların eğilme dayanımları ve birim alandaki kırılma enerjisi.

Karışım kodu	Numune	Su/çimento oranı	Lif hacmi, V_f [%]	Lif türü	Eğilme dayanımı, f_e [MPa]	Kırılma Enerjisi, G_f [N/m]
50-R	1	0,50	0,00	4D- 65/60	4,80	135,83
	2				4,21	124,98
	3				4,71	144,96
50-4D-20	1	0,50	0,25	4D- 65/60	6,06	3408,89
	2				4,09	1042,56
	3				4,20	1052,47
50-4D-40	1	0,50	0,51	4D- 65/60	4,99	2154,16
	2				6,18	3066,25
	3				9,54	3504,86
	4				6,52	3228,58
50-4D-60	1	0,50	0,76	4D- 65/60	8,21	4108,68
	2				8,84	4028,97
	3				9,28	4274,28
	4				7,99	3119,78
37-R	1	0,37	0,00	4D- 65/60	5,36	155,08
	2				4,80	253,48
	3				5,14	162,22
	4				4,69	199,74
37-4D-20	1	0,37	0,25	4D- 65/60	5,20	1699,10
	2				4,46	1550,60
	3				5,61	1208,00
	4				5,73	1305,33
37-4D-40	1	0,37	0,51	4D- 65/60	6,90	2778,57
	2				7,06	3204,88
	3				8,45	3639,37

Çizelge 5.3 (Devamı) : Çelik lif takviyeli betonların eğilme dayanımları ve birim alandaki kırılma enerjisi.

Karışım kodu	Numune	Su/çimento oranı	Lif hacmi, V_f [%]	Lif türü	Eğilme dayanımı, f_e [MPa]	Kırılma Enerjisi, G_f [N/m]
37-4D-60	1	0,37	0,76	4D- 65/60	9,90	3563,20
	2				12,51	4646,12
	3				10,88	4764,43
50-3D-20	1	0,50	0,25	3D- 65/60	4,77	498,07
	2				4,22	827,49
	3				5,00	2390,50
	4				5,54	2242,29
50-3D-40	1	0,50	0,51	3D- 65/60	5,27	2824,75
	2				4,89	2885,15
	3				4,56	2829,68
50-3D-60	1	0,50	0,76	3D- 65/60	7,09	3488,31
	2				7,74	4486,43
	3				8,57	4208,29
37-3D-20	1	0,37	0,25	3D- 65/60	5,47	1937,73
	2				5,80	1303,93
	3				5,12	1550,10
37-3D-40	1	0,37	0,51	3D- 65/60	10,40	5869,14
	2				6,92	3293,40
	3				4,94	1661,59
37-3D-60	1	0,37	0,76	3D- 65/60	10,64	6132,18
	2				11,82	5635,38
	3				10,76	5408,70

Artan çelik lif hacmi ile beraber farklı matris dayanımına sahip betonların kırılma enerjileri, referans betonlara kıyasla önemli ölçüde artmıştır. Yalın betona kıyasla en fazla artış yaklaşık 30 kat değerindeki kırılma değeri ile 37-4D-60 seri kodlu betonda (su/çimento oranının 0,37; çelik lif tipinin 4D ve çelik lif miktarının 60 kg/m^3 olduğu karışım) görülmektedir. Çelik lif miktarının artması ile beraber daha yüksek kırılma enerjilerinin elde edildiği bunun yanında çelik lif türü ve hacminin aynı kaldığı ancak daha yüksek matris dayanımına sahip numunelerin daha üstün kırılma performansı gösterdiği görülmüştür. Bu, çelik lif – matris ara yüzeyinin aderans kuvvetinden ileri gelmektedir. Her ne kadar lif miktarının artması ile beraber kırılma enerjisi artsa da genel davranışları itibari ile dört farklı karışım da eğilme etkisi altında benzer davranış göstermişlerdir. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi her bir karışıma ait eğri, lif içeriğinin artması ile beraber numunelerin kırılması için gerekli enerjisinin değeri önemli ölçülerde artmaktadır.



Şekil 5.9: Farklı karışımlarda lif içeriğinin kırılma enerjisi üzerindeki etkisi.

Bir diğer ortak davranışları, özgül kırılma enerjisi-lif miktarı ilişkisinde göze çarpmaktadır. Örneğin, 40 kg/m^3 çelik lif içeriğine sahip tüm numuneler karşılaştırıldığında betonun kırılması için gerekli en küçük değer $2846,5 \text{ N/m}$ lik değer ile su/çimento oranı 0,50 olan ve 3D tipi lifin kullanıldığı karışıma ait iken, en büyük değer ise $3293,4 \text{ N/m}$ lik değer ile su/çimento oranı 0,37 olan ve 3D tipi lifin kullanıldığı beton karışımına aittir. Tüm numuneler içerisinde en büyük kırılma enerjisi ise Şekil 5.9’da görüldüğü gibi $5,73 \text{ kN/m}$ değerindedir.

5.2 Eşdeğer Eğilme Çekme Dayanımı ve Tokluk Parametrelerinin Sonuçları

Çelik lif takviyeli betonların eğilme altındaki performanslarının belirlenmesi için geliştirilmiş çeşitli standartlar kullanılmaktadır. Bu performansı belirleyen parametreler, tokluk veya eşdeğer eğilme dayanımı olarak ifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında üretilen betonlar, 3 noktalı eğilme deneyinin ardından Bölüm 3’de açıklanan yöntemlere göre irdelenmiştir. Ancak bu tez çalışmasındaki numuneler, “3.2.3.Japon Standardı (JSCE-SF4)” başlığı altında açıklanan yönteme göre değerlendirilememiştir. Bunun sebebi, ilgili yönetmeliğin deney koşullarının 4 noktalı eğilme şeklinde olmasıdır. Sonuçlar, ASTM C 1018’e ve Alman Beton Birliği Yöntemi’ne göre irdelenmiş olup, her bir prizmanın 3 mm sehim değerine kadar olan davranışları da karşılaştırılmıştır.

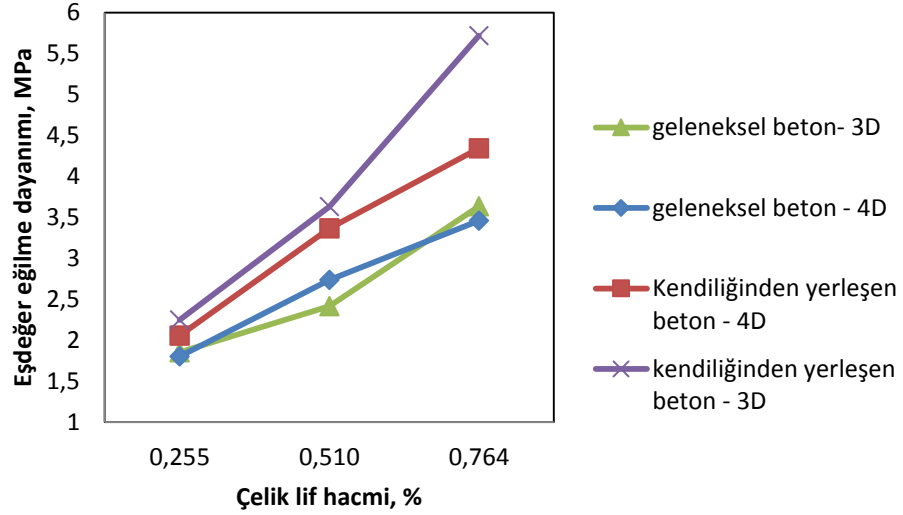
5.2.1 Alman beton birliği yöntemine göre

Uç geometrisinin farklı olduğu iki tip çelik lifi kullandığı prizmalar bu yöntemde incelenmiş olup bu değerlendirme ilgili standartta belirtilen sınır durumlarına göre yapılmıştır. Her bir sınır durum için bir eşdeğer eğilme dayanımları hesaplanmış olup takip eden başlıklar altında verilmektedir.

5.2.1.1 Kullanılabilirlik sınır durum için eşdeğer eğilme-çekme dayanımı

Tanımlanan iki sınır durumdan birisi olan “Kullanılabilir Sınır Durum- KSD” Çizelge 3.1’de belirtildiği gibi sehim değerinin, ilk çatlak sehiminden sonra 0,65 mm daha sehim yapması olarak alındığı haldir. Eğilme deneyi sonrası elde edilen yük-sehim eğrilerinde, KSD için tanımlanan sehim değerine ($\delta_1 = \delta_0 + 0,65 \text{ mm}$) karşılık gelen yük değeri vasıtası ile moment değerine oradan da eşdeğer eğilme dayanımı değerleri her bir numune için hesaplanmıştır.

Belirli bir düzeyde eşdeğer eğilme dayanımı elde etmek istenirse, matris dayanımı azaldıkça lif hacim miktarının artması gerektiği Şekil 5.10’da da görüldüğü gibi kullanılabilirlik sınır durumuna göre eşdeğer eğilme dayanımları karşılaştırıldığında görülmüştür.



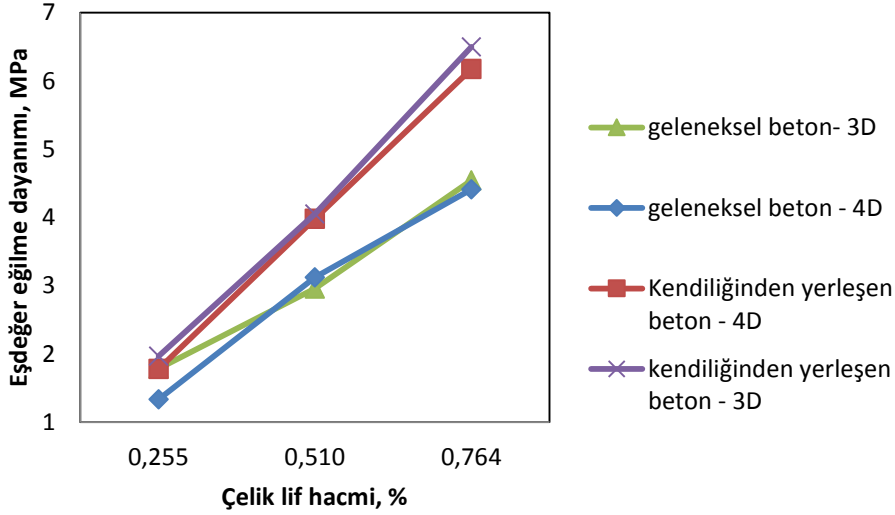
Şekil 5.10: Kullanılabilirlik sınır durumuna (KSD) göre eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif hacmi ile değişimi.

5.2.1.2 Taşıma gücü sınır durumu için eşdeğer eğilme-çekme dayanımı

Tanımlanan iki sınır durumdan diğeri olan “Taşıma gücü Sınır Durum- TSD” Çizelge 3.1’de belirtildiği gibi sehim değerinin, ilk çatlak sehiminden sonra 3,15 mm daha sehim yapması olarak alındığı haldir. Eğilme deneyi sonrası elde edilen yük-sehim eğrilerinde, TSD için tanımlanan sehim değerine ($\delta_1 = \delta_0 + 3,15 \text{ mm}$) karşılık gelen yük değeri vasıtası ile moment değerine oradan da eşdeğer eğilme dayanımı değerleri her bir numune için hesaplanmıştır.

Kullanılabilirlik sınır durumunda da olduğu gibi, taşıma gücü sınır durumuna göre eşdeğer eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, Şekil 5.11, matris dayanımının eğilme performansına olan katkısı göz önünde bulundurulmalıdır.

Her iki sınır durumuna göre olan durumlar karşılaştırıldığında ise lif geometrisinin eşdeğer eğilme davranışların üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bununla beraber, matris dayanımlarının da artan lif hacmi ile etkisinin arttığı Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de ortak olarak gözlenmektedir. Eğilme performansında en fazla katkıyı veren parametre çelik lif miktarı olduğu, onu matris dayanımının takip ettiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.11: Taşıma gücü sınır durumuna (TSD) göre eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif hacmi ile değişimi.

5.2.2 ASTM standardına göre

Eğilme etkisi altındaki kirişlerin yük-sehim eğrisi altındaki alan değerinden yola çıkarak, ASTM C 1018 standardına göre, kalıcı dayanım faktörleri hesaplandı. Çizelge 5.4’de boyutsuz indisler ve dayanım faktörleri her bir deney gurubu ve bu gruba ait numunelere için hesaplandı.

Boyutsuz I ile gösterilen indislerin az olması ilk çatlak sonrası yutulan enerjinin de az olduğu anlamına gelmektedir. Kalıcı dayanım faktörleri ise çatlak sonrası oluşan hasarın bir ölçüsü olarak nitelendirilebilir.

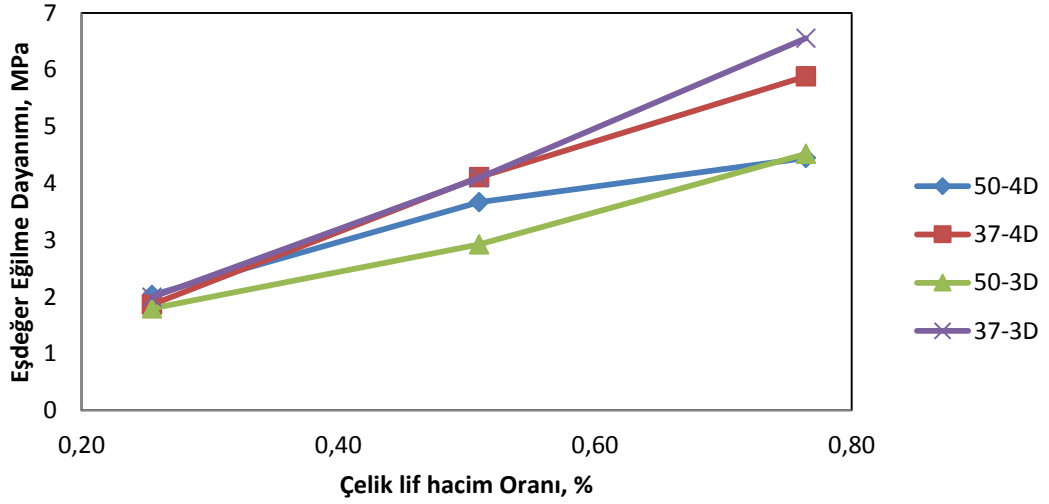
Çizelge 3.2’de belirtilen değerlendirmeye göre eğilme testine tabi tutulan toplam 40 adet numuneye ait 80 adet kalıcı dayanım faktörü ($R_{5,10}$ ve $R_{10,20}$) kategorilendirildi. Kalıcı dayanım faktörlerinden % 6,25 kadarı zayıf, %15’i normal, %18,75’i güçlü ve %60’ı da mükemmel performans gösterdiği belirlendi. Bunun yanında 60 kg/m^3 çelik lif içeren lif takviyeli betonların yaklaşık %96’sı mükemmel sınıfta olduğu sonucuna varıldı. Bu, numunelerin tokluğunun gözle görülür biçimde arttığı ve göreceli olarak daha az oranda hasar oluştuğu şeklinde yorumlanabilir.

5.2.3 Japon standardına göre

Bu standartta 3.2.3 numaralı başlıkta da anlatıldığı üzere prizmalar teste tabi tutulmuştur. Şekil 4.9’da gösterildiği gibi yerleştirilen kirişlerin mesnet açıklığı 450 mm ve standarda göre bu değer 1/150’si kadar sehim göze alınacağından, yük-

sehim eğrisi altında kalan alan $\delta=3\text{mm}$ 'e kadar dikkate alınmıştır. Standartta da belirtildiği üzere bu sehim değerine kadar sadece tek bir tokluk değeri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4'de görüldüğü üzere artan çelik lif hacmi ile beraber eşdeğer eğilme dayanımı da paralel olarak artmaktadır. Bu değişimin doğrusala yakın bir eğilim gösterdiği Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12: Japon standardına göre eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif hacim oranı ve matris dayanımı ile değişimi.

Bu standardın sonuçları, 5.2.1 başlığı altında incelenen “Alman beton birliği yöntemine göre” elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Özellikle taşıma gücü sınır durumuna göre hesaplanan eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif miktarı ile değişimi, JSCE’ye göre belirlenen eşdeğer eğilme dayanımının çelik lif miktarı ile değişimi eğrisi ile neredeyse aynı davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.4: Çelik lif takviyeli betonların ABBY ve JSCE’ye göre eşdeğer eğilme dayanımları ve ASTM’ye göre kalıcı dayanım faktörleri.

Numune Kod	Örnek	Esdeğer eğilme dayanımı, MPa		ASTM					Japon yönteminde Esdeğer dayanım, MPa
		KSD	TSD	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	R _{5,10}	R _{10,20}	
50-4D-20	1	4.37	3.29	4.9	10.9	22.3	120.9	113.4	3.26
	2	1.78	1.30	4.3	7.7	12.2	67.4	44.6	1.33
	3	1.83	1.37	4.1	7.1	13.0	58.6	59.3	1.51
50-4D-40	1	2.50	2.33	4.0	7.4	14.0	68.7	65.5	2.39
	2	2.82	3.30	4.6	9.0	19.2	87.0	102.8	3.37
	3	4.34	5.02	5.2	11.4	26.0	125.0	146.4	5.13
	4	2.90	3.74	3.0	6.1	13.3	61.2	72.2	3.78
50-4D-60	1	3.18	4.45	6.0	13.6	30.1	153.1	164.1	4.42
	2	3.81	4.74	5.3	12.4	26.7	142.7	143.0	4.80
	3	2.69	4.57	6.0	15.4	32.7	188.6	172.6	4.51
	4	3.39	3.88	4.6	10.1	23.1	110.3	129.3	4.05
37-4D-20	1	2.02	2.08	3.7	6.8	13.4	62.0	66.0	2.12
	2	1.96	1.85	4.4	8.4	14.5	79.7	60.8	1.92
	3	2.15	1.57	3.1	5.2	8.1	40.8	29.0	1.69
	4	2.11	1.63	3.1	5.1	8.8	41.4	36.3	1.73
37-4D-40	1	3.20	3.53	5.1	11.0	21.5	116.5	105.6	3.71
	2	3.02	3.71	4.1	8.8	17.0	93.6	82.4	3.86
	3	3.88	4.71	4.4	9.4	21.2	100.1	117.5	4.76

Çizelge 5.4(devam): Çelik lif takviyeli betonların ABBY ve JSCE’ye göre eşdeğer eğilme dayanımları ve ASTM’ye göre kalıcı dayanım faktörleri.

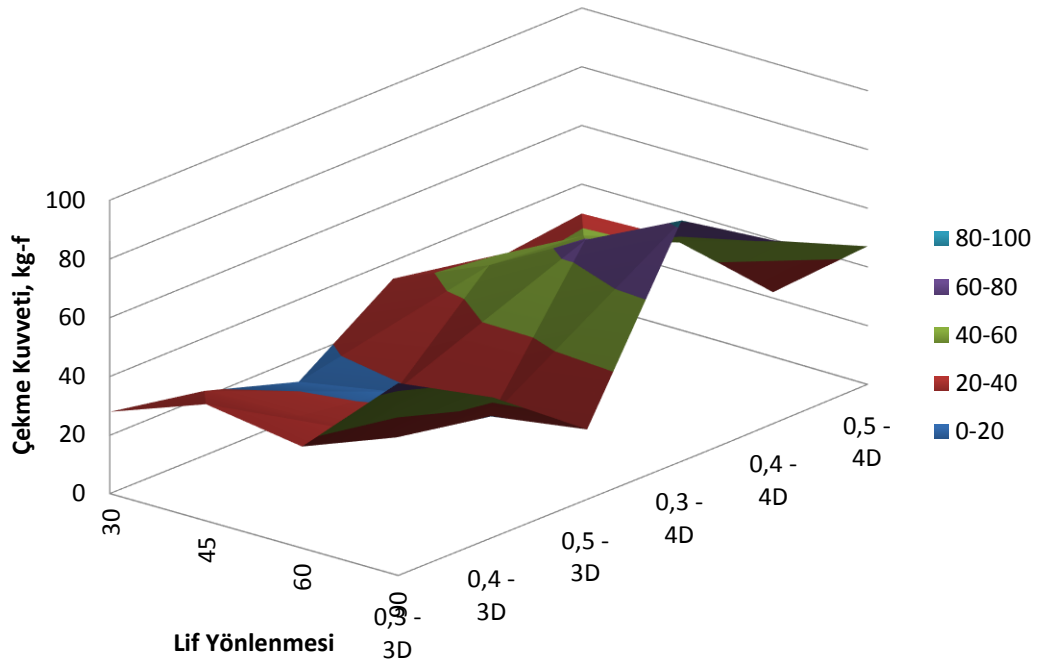
Numune	Örnek	Eşdeğer eğilme dayanımı,MPa		ASTM					Japon yönteminde Eşdeğer dayanım, MPa
		KSD	TSD	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	R _{5,10}	R _{10,20}	
37-4D-60	1	4,40	4,91	5,5	12,9	26,8	147,2	138,8	5,10
	2	4,30	6,27	5,4	13,4	33,5	160,0	201,1	6,43
	3	4,33	6,09	4,6	10,4	25,5	115,5	148,7	6,12
50-3D-20	1	1,13	0,64	2,4	3,3	4,7	17,2	14,4	0,66
	2	1,44	1,07	3,3	5,3	8,6	40,0	33,3	1,10
	3	2,51	2,93	4,9	10,2	20,5	104,7	103,5	2,92
	4	2,33	2,50	3,9	7,6	14,2	72,6	65,8	2,50
50-3D-40	1	2,24	3,16	5,4	12,2	27,0	136,4	148,0	3,10
	2	2,63	3,11	4,4	9,0	18,5	92,3	95,0	3,08
	3	2,37	2,61	4,4	8,1	16,3	74,7	81,8	2,58
50-3D-60	1	2,86	4,03	5,7	12,6	25,7	139,5	130,6	3,96
	2	3,55	4,47	5,6	12,2	24,5	132,0	123,4	4,48
	3	4,50	5,13	5,1	10,5	20,4	108,3	99,2	5,12
37-3D-20	1	2,15	2,12	4,0	7,1	13,7	63,5	65,4	2,12
	2	2,72	2,09	3,9	6,8	12,1	58,8	53,3	2,14
	3	1,87	1,69	3,5	5,9	10,9	49,4	49,9	1,72
37-3D-40	1	4,80	5,97	5,2	11,2	23,3	120,0	121,1	6,01
	2	3,60	4,14	4,5	9,2	19,2	94,9	99,5	4,17
	3	2,49	2,05	3,6	6,1	10,9	50,1	48,5	2,11

Çizelge 5.4(devam): Çelik lif takviyeli betonların ABBY ve JSCE'ye göre eşdeğer eğilme dayanımları ve ASTM'ye göre kalıcı dayanım faktörleri.

37-3D-60	1	5,53	6,55	4,2	8,7	17,5	89,9	87,6	6,53
	2	6,20	6,80	4,3	8,1	17,7	76,5	63,5	6,87
	3	5,42	6,15	4,4	9,4	18,6	99,3	92,1	6,27

5.3 Yatay Çekme Deneyi

Tek bir lifin değişen matris ve yönlenmelerine göre sıyrılma dirençlerinin bulunmasının amaçlandığı bu deneyde beklendiği gibi 4D lifinde ve su/çimento oranının 0,3 olduğu matriste, aynı zamanda lif yönlenmesinin yükleme yönü ile aynı olduğu numunelerde en büyük çekme dayanımları gözlenmiştir. İlgili grafik Şekil 5.13'te yer almaktadır.



Şekil 5.13: Yatay çekme deneyine göre yük-açı-matris ilişkisi.

Benzer şekilde en az 3D lifinde ve su/çimento oranının 0,5 olduğu matriste, aynı zamanda lif yönlenmesinin yükleme yönü ile en fazla açı olduğu numunelerde en küçük çekme dayanımları gözlenmiştir.

Çelik liflerin uç geometrilerinde deformasyon olmadan matrisin gevrek bir yapı göstererek dağılması sonucu bazı çelik lifler sadece eğilmişler ve sıyrılma dirençlerine ulaşmadan göçmüşlerdir. Bu türdeki sonuçlar dikkate alınmamış olup, elenen örnekler Ek C'de gösterilmiştir.

5.4. Lif dağılımının Röntgen Cihazı ile Görüntülenmesi

Gerek yapılan başka çalışmalarda gerekse bu çalışmada, sertleşmiş beton deneyi sonuçlarında çıkan bazı aykırı sonuçların değerlendirilmesinde yorumlar, lif dağılımının homojen olup olması üzerine olmuştur. Öyle ki aynı karışımda üretilmiş iki numuneye ait örneğin eğilme performansları, toklukları, birbirinden çok farklı olabilmektedir. 5.1.4.4 numaralı başlıkta incelenen kırılma enerjisi ile ilgili tabloda, Çizelge 5.3, 50-4D-20 ile kodlandırılmış, 20 kg/m³ 4D tipinde lif içeren geleneksel betonda ilk numunenin kırılma enerjisi $G_f = 3408,89$ N/m olarak bulunmuş iken diğer numunelere ait kırılma enerjileri $G_f = 1042,56$ N/m ve $G_f = 1052,47$ N/m olduğu görülmüştür. Bu farkı inceleme için röntgen cihazı ile iki numune (enerjisi $G_f = 3408,89$ N/m ve $G_f = 1042,56$ N/m olan) görüntülenmiştir ve anlaşılmıştır ki tasarımları tamamen aynı olan numunelerin lif dağılımları birbirinden çok farklıdır. Kırılma enerjisi yüksek olan numunenin çentik civarında lif sayısı gözle görülür biçimde diğer numuneye göre daha fazla iken aynı zamanda lif sayısı fazla olan numunede gömülü olan liflerin önemli bir kısmı yataya yakın biçimde konumlanmış, bu durum da liflerin köprüleme yeteneğini artırmıştır. İncelenen iki numunenin yandan ve üstten görüntüleri Ek G'de (Şekil G.1, Şekil G.2, Şekil G.3 ve Şekil G.4) verilmiştir.

Şekillerden çıkarılan bir diğer sonuç da çatlak oluşumunun izlenmesi olmuştur. Buna göre yüksek kırılma enerjisine sahip betonlarda çatlak, çentik ile yükleme silindiri arasındaki en kısa yoldan gitmek yerine lif sayısının daha az ve lif yönlenmesinin yatay olmadığı bölgelere doğru ilerlemiştir. Oluşan çatlak yolu 67 keV'lik enerji altında çekilen görüntülerde parlak olarak, hem yandan hem de üstten görünüşlerden seçilebilmektedir.

Çalışmada ayrıca imaj analiz programı kullanılarak lif dağılımının analizi bir kademe ileri taşınmıştır. Öyle ki lif dağılımının Şekil 4. 11'de görüldüğü gibi incelenmesinden sonra analiz geliştirilerek en kesitteki çelik lif alanının, tüm kesit alanına oranı %1 olarak hesaplanmıştır. Çelik lif oranı açısından en fazla %0,75 çelik lifin kullanıldığı düşünüldüğünde yapılan bu analiz ile liflerin önemsenemeyecek bir miktarının yatay olarak konumlanmadığı anlaşılmıştır. Elde edilen bu sonuçtan ve prizma numunelerinin en kesitlerinde daire ve elips şekillerinin yer almasından dolayı çelik liflerin matris içerisindeki yönlenmesi ve sayısının belirlenmesi ihtiyacı

duyulmuş ve akabinde x-ray görüntüleri çekilmiştir. Elde edilen görüntüler, numunelerin kırılma enerjilerindeki farklılıkların açıklanmasında çok etkili olmuştur. Bu sayede, lif dağılımının, betonun performansı üzerindeki etkisi hakkında daha kesin hükümler verilebilmektedir.

6. SONUÇLAR

İki farklı matris dayanımına, iki farklı lif türüne ve dört farklı sahip numunelerin mekanik performansları ile taze hal özelliklerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Kendiliğinden yerleşen betonlarda çelik lif kullanımında daha homojen bir karışım elde etmek için geleneksel betonlara nazaran daha uzun karma sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Öyle ki, daha düşük s/ç oranında çalışıldığından dolayı beton karma suyu azalmakta bunun yanında çelik lifleri bir arada tutan özel tutkalın su ile çözünmesinden dolayı artan lif oranları ile beraber, çelik liflerin düşük karıştırma sürelerinde ayrılmadığı görülmüştür.
- 2) Artan çelik lif oranına göre işlenebilirlik gözle görülür biçimde değişmektedir. Geleneksel betonlarda çökme değerinin, kendiliğinden yerleşen betonlarda ise yayılma miktarının gözle görülür biçimde azaldığı grafiklerden anlaşılmıştır.
- 3) Her iki çelik lif türünde de, matris dayanımı ne olursa olsun, lif hacim oranı artışı ile beraber daha yüksek yarma çekme dayanımı elde edildi. Bunun yanında, yarmada çekme dayanım artışında kullanılan çelik lif türünün matris dayanımına oranla daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Buna göre, en fazla artış su/çimento oranının 0,37 olduğu (KYB) ve 4D tipindeki lifin kullanıldığı beton numunelerinde görülüyorken en az artış ise su/çimento oranının 0,50 olduğu(geleneksel beton) ve 3D tipindeki lifin kullanıldığı betonlardadır. Daha yüksek matris dayanımına sahip betonların daha üstün performans göstermelerinin sebebinin, göreceli olarak daha kuvvetli lif-matris bağına sahip olmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.
- 4) Çelik liflerin beton numunelere katılması ve lif miktarının artması ile beraber
 - İlk çatlağın oluşmasından sonraki tepe yükünün artması
 - Enerji yutma miktarında (tokluk) artma
 - Deplasman yeteneğinin iyileşmesi ve
 - İlk çatlak yükü ve ona karşılık gelen sehim değerinde artış görüldü.

5) Mekanik özellikleri ve durabilitenin iyileştirilmesi için kullanılan çelik lifler ile beraber beton daha sünek bir yapıya kavuştuğu gözlenmiştir. Bu artışta eğilme performansı açısından iki parametrenin daha etkili olduğu saptanmıştır:

- Çelik lif miktarı bu artışı sağlayan en önemli parametredir. 60 kg/m^3 çelik lif içeren betonlarda yalın betona göre, eğilme etkisi altında enerji yutma miktarında referans betona göre (yalın beton) 30 kata kadar artış meydana gelebiliyorken bu artış 40 kg/m^3 ve 20 kg/m^3 çelik lif içeren numunelerde sırasıyla 22 kat ve 9 kat olarak saptanmıştır.
- Matris dayanımı bir diğer önemli parametredir ancak etkisi ikincildir. Matris dayanımının aderansın daha yüksek olması yönüyle etkisi vardır ama bu etki artan lif hacim miktarı ile azalmaktadır. Öyle ki 20 kg/m^3 4D türünde çelik lif içeren ve su/çimento oranlarının 0,50 ve 0,37 olduğu iki numunede eğilme etkisi altında enerji yutma miktarları arasında yaklaşık % 40 fark oluşuyorken bu değişim 40 kg/m^3 4D türünde çelik lif içeren betonlarda %7 ve 60 kg/m^3 4D türünde çelik lif içeren betonlarda ise %4,5 olmaktadır. Benzer şekilde 3D türündeki lifin kullanıldığı aynı türdeki betonlarda azalan bir etki vardır. Bu sonuçlardan dolayı artan çelik lif hacmi ile matris dayanımının eğilme davranışı üzerindeki etkisi azalmaktadır.

Çelik lif türünün ise eğilme davranışına önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Aynı miktarda çelik lifin bulunduğu ve aynı matris dayanımına sahip betonların kullanılan çelik lif türünü değiştirerek yapılan tokluk ölçümlerinde birbirine yakın değerler çıkmış ve miktarlar arasındaki fark %3'e kadar çıkabilmiştir.

6) Eğilme etkisi altındaki çelik lif takviyeli betonlarda yük-sehim ilişkisi incelendiğinde her üç çelik lif oranına sahip betonların (20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 , 60 kg/m^3) farklı şekil değiştirme davranışları olduğu saptanmıştır. Buna göre 20 kg/m^3 çelik lif içeren betonlarda ilk çatlak oluşuktan sonra tepe yükünden sonra şekil değiştirme yumuşaması meydana geldiği, 40 kg/m^3 çelik lif içeren betonlarda ilk çatlak oluşuktan sonra yük-sehim eğrisinin x eksenine paralel gittiği ve bu yük değerinin tepe yükü civarında olduğu, 60 kg/m^3 çelik lif içeren betonlarda ise davranış şekil değiştirme sertleşmesi göstererek en büyük yük değeri tepe yükünden daha fazla bir değere ulaştığı görülmüştür.

7) Alman Beton Birliği Yöntemi tarafından belirlenen “Kullanılabilir Sınır Durumu-KSD” ve “Taşıma Gücü Sınır Durumu-TSD” eğilme etkisi altındaki betonlar için

irdelendiğinde çelik lif içermeyen yalın betonların kullanılabilirlik açısından zayıf olduğu ve taşıma gücü bakımından değerlendirilemediği görülmüştür. Bunun sebebi, bu tür betonların TSD için tanımlanan sehım değerine ulaşmadan göçmesidir. Kullanılan çelik lif miktarı, matris dayanımı ve çelik türü sınır durumlarının sonuçlarında etkili olmuştur. En zayıf performansı ise beklendiği gibi matris dayanımının düşük, lif geometrisinin daha düz ve çelik lif içeriğinin en az olduğu 50-3D-20 kodlu betonlar (su/çimento=0,50; 3D türünde ve 20 kg/m³ miktarında çelik lif) göstermiştir.

Aynı numunelerin KSD'ye ve TSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında düşük lif hacim oranına sahip betonlarda (20 kg/m³) her iki lif türü için de KSD'ye göre hesaplanan eğilme çekme dayanımı değerlerinin TSD'ye göre hesaplanan eğilme çekme dayanımı değerlerinden daha büyük olduğu, artan lif hacim oranları ile beraber en fazla çelik lif miktarına sahip betonlarda (60 kg/m³) ise bu durumun değiştiği saptanmıştır. Artan çelik lif miktarı ile TSD'ye göre hesaplanan eğilme çekme dayanımı değerlerinin arttığı ve bunun ilk çatlak sonrası yük-sehım eğrisinde iyileşmeden kaynaklandığı anlaşılmıştır.

- 8) Çelik lif takviyeli betonlarda çelik lif eklenmesi ile beraber her grup üretiminde ASTM C 1018 Standardı'na göre hesaplanan kalıcı dayanım faktörlerinin de arttığı görülmüştür. Beton fazın eğilme altında daha fazla yük taşıyamayarak göçtüğü yerlerde çelik liflerin köprüleme görevi görmesi, bir diğer ifade ile süneklikte artış bu artan kalıcı dayanım faktörleri EK F'de tablo ile verilmiştir.
- 9) Düşük oranda lif içeren beton numunelerde çatlakların, çentik-yüklemle silindiri arasında en kısa yolu takip ettiği görülüyorken artan çelik lif miktarı ile beraber çatlakların daha farklı yollar izlediği ve bu çatlakların çoklu olması ile beraber liflerin daha seyrek alanlardan ilerlediği x-ray çıktıları ile gözlenmiştir. Böylelikle çelik lif miktarının ve dağılımının etkin bir çatlak kontrolünün sağlandığı sonucuna varılmıştır.
- 10) En büyük sıyrılma dayanımı lifin çimento döküm fazına dik ve matris dayanımının en fazla olduğu ve de 4D tipi lifinin kullanıldığı durumda sağlanmıştır.
- 11) Çelik lif hacim değişiminin elastisite modülü veya basınç dayanımına herhangi bir katkısı gözlenmiyorken deneyler esnasında çelik lif içerikli betonların basınç

dayanımı sonucunda dağılmadığı anlaşılmıştır. Bu, yüksek mukavemetli betonların kullanıldığı taşıyıcı elemanlarda göçme esnasında oluşabilecek patlamaları bertaraf ederken betonun dağılmaması sebebi ile can güvenliğine katkı sağlayabilir.

- 12) Lif dağılımlarının beton numunenin her bölgesinde eşit şekilde dağılmadığı gözlemlendi. Bunun nedeninin el ile kalıba yerleştirme ve numunenin boyutlarının göreceli olarak küçük olmasından kaynaklanacağı düşünüldü. Her iki lif çeşidinde de benzer sonuçlar elde edildi. Diğer bir deyişle lif türünün, lif dağılımına ve yönlenmesine bir etkisi olmadığı sonucuna varıldı. Örnekler X-ray ışınları altında incelendi ve EK G’da gösterildi.
- 13) Liflerin homojen dağılıp dağılmadığı ve yönlenmelerinin gözlenebilmesi amacı ile çekilen X-ray görüntülerinde önemli sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre, beşinci bölümde vurgulanan Çizelge 5.3 ve Şekil 5.9’da yüksek matris dayanımlı ve 3D tipi lif ile takviye edilen betonların kırılma enerjileri başka bir deyişle eğilme performansları, yüksek matris dayanımlı ancak 4D tipi lif ile takviye edilen betonların kırılma enerjilerinden özellikle 60 kg/m³ çelik lif içeren numunelerde beklenmedik bir biçimde daha fazla olmuştur. Bu noktada röntgen cihazı vasıtası ile elde edilen görüntüler incelendiğinde, 37-3D-60 kodlu betonların açılan çentik civarındaki lif sayısının 37-4D-60 kodlu betonların çentik civarındaki lif sayısından daha fazla olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, 50-4D-20 kodlu üç numunenin kırılma enerjileri sırası ile 3408,89 N/m; 1042,56 N/m ve 1052,47 N/m olduğu görüldükten sonra bunun sebebini anlamak amacı ile kırılma enerjileri 3408,89 N/m ve 1042,56 N/m aynı karışıma sahip iki numunenin çentik etrafındaki ve toplam lif sayısının gözle görülür biçimde farklı olduğu x-ray çıktıları ile gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Brandt, A. M.** (1995). *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*, E & FN Spon, London.
- [2] **ACI Committee 544.** (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI 544.1R-96, American Concrete Institute, Michigan.
- [3] **Newman J., ve Choo B. S.** (2003). *Advanced Concrete Technology Constituent Materials* Elsevier, Oxford.
- [4] **Bentur, A. and Mindess, S.** (2006). *Fibre Reinforced Cementitious Composites, Modern Concrete Technology Series*, Oxford.
- [5] **Altun F., Haktanır, T. and Arı, K.** (2007). Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction and Building Materials*, **21**, 654-66.
- [6] **Yazıcı, Ş., İnan, G. and Tabak, V.** (2007). Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of steel fiber reinforced concretes, *Construction and Building Materials*, **21**, 1250-1253.
- [7] **Naaman, A. E. and Harajli, M.H.** (1990). Mechanical properties of high performance concretes, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.
- [8] **Naaman, A. E.** (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites, *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1** (3), 241-252.
- [9] **Rossi, P.** (2000). Ultrahigh performance fibre reinforced concretes (UHPFRC): An overview, *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, September 13-15, 87-100.
- [10] **Li, Z.** (2011). *Advanced Concrete Technology*, John Wiley and Sons, New Jersey.
- [11] **Betterman, L. R., Ouyang, C. ve Shah, S. P.** (1995). Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, **2**, 53-61.
- [12] **Banathia, N. And Sappakittipakorn M.** (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, **37**, 1366-1372.
- [13] **Fouad F. H.** (2006). Cellular Concrete: Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, 561-569 Eds. Lamond J. F. ve Pielert J.H., Bridgeport.
- [14] **Sun, W., Chen, H., Luo, X. and Qian, H.** (2001). The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, **31**, 595-601.

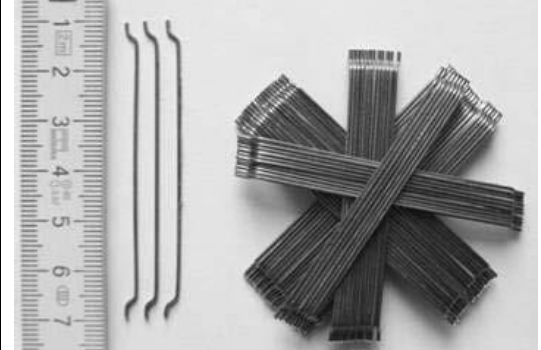
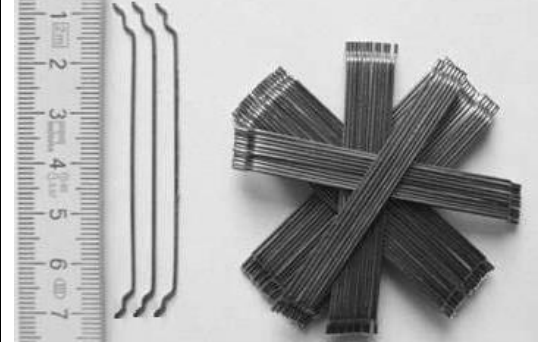
- [15] **Taşdemir M.A., Bayramov F. ve Yerlikaya M.** (2003). Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar, *Türk Mühendislik Haberleri*, **426**(4), 76-84.
- [16] **Lankard, D.R.** (1986). Preparation, properties and applications of cement based composites containing 5-20 percent steel fibers, pp.199-217, *Elsevier Applied Science Publisher*, Londra.
- [17] **Toutanji, H. Anda Bayasi, Z.** (1988). Effect of manufacturing techniques on the flexural behaviour of steel fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, **28**(1), 115-124.
- [18] **ASTM A 820 Standard.** (2011). Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.
- [19] **Taşdemir, M. A., Şengül, Ö. ve Şengül, C.** (2013). Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı, Beton 2013, *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 1 –28.
- [20] **ASTM C 1018 Standard.** (1997). Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete.
- [21] **Koyanagi W., Rokugo K., Iwase H.** (1987). Toughness Evaluation and Its Application to Concrete Structural Design. *SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, Eds. Shah S. P., Swartz S.E. 288-297
- [22] **Peter C. Tatnall.** (2006). Cellular Concrete: Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, 578-590 Eds. Lamond J. F. ve Pielert J.H., Bridgeport
- [23] **Fanelle D. And Naaman A. E.** (1985). Stress-strain properties of fiber reinforced mortar in compression, *Journal of the American Concrete Institute*, **82**(4), 475-483.
- [24] **Yazici, H.** (2000). Yüksek Performanslı Betonlar Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- [25] **Song, P. S., Hwang, S.** (2004). Mechanical Properties Of High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials*, **18**, 669–673.
- [26] **ACI Committee 544.** (1998). Measurement of properties of fibre reinforced concrete, ACI 544-2R, American Concrete Institute, Michigan.
- [27] **Gopalaratnam, V. S., Shah S. P.** (1987). Tensile Failure Of Steel Fiber-Reinforced Mortar, *Journal of Engineering Mechanics*, **113**(5), 635-652.
- [28] **Guetti P.C., Riberio G. O. ve Serna P.** (2010). Experimental Study of the Post-Cracking Behavior of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete, *6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 26-29 Eylül, 1261-1271.
- [29] **ABBY.** (1996). Basis for the design of industrial float slabs out of steel fiber reinforced concrete.

- [30] **JSCE-SF4 Standart.** (1984). Standart for flexural strength and flexural toughness, methods of test for test for steel fiber reinforced concrete, Japan Concrete Institute.
- [31] **Bekaert Firması. (Üretici)** (2012). Ürün Kataloğu.

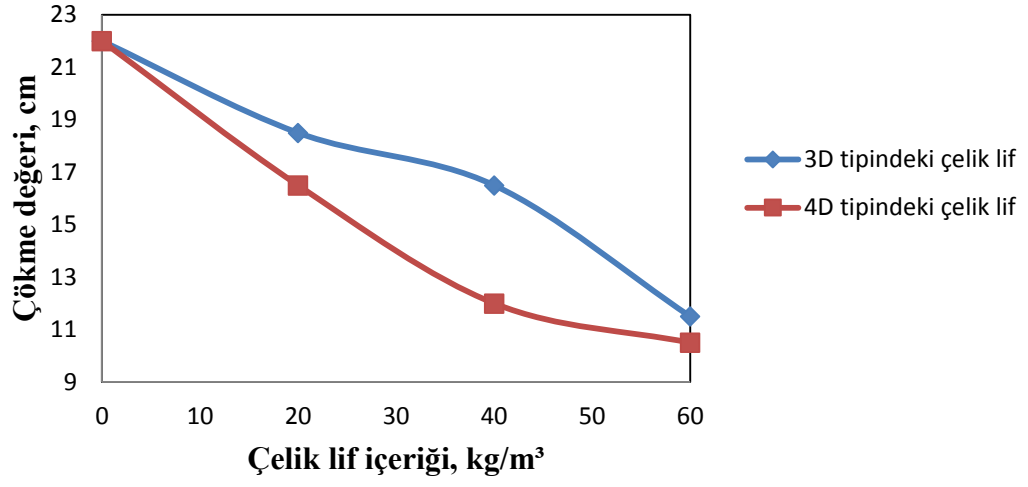
EKLER

- EK A** : Çelik liflerin özellikleri
- EK B** : Çelik lif türünün işlenebilirliğe etkisi
- EK C** : Sertleşmiş beton deneyleri
- EK D** : Çelik lif takviyeli betonlara ait eğilme deneyi sonuçları
- EK E** : Tek bir life ait yatay çekme deneyi sonuçları
- EK F** : Çelik lif donatılı betonların performans sınıfı sonuçları
- EK G** : Eğilme deneyi sonrası çatlamış prizma şeklindeki numunelerin x-ray görüntüleri

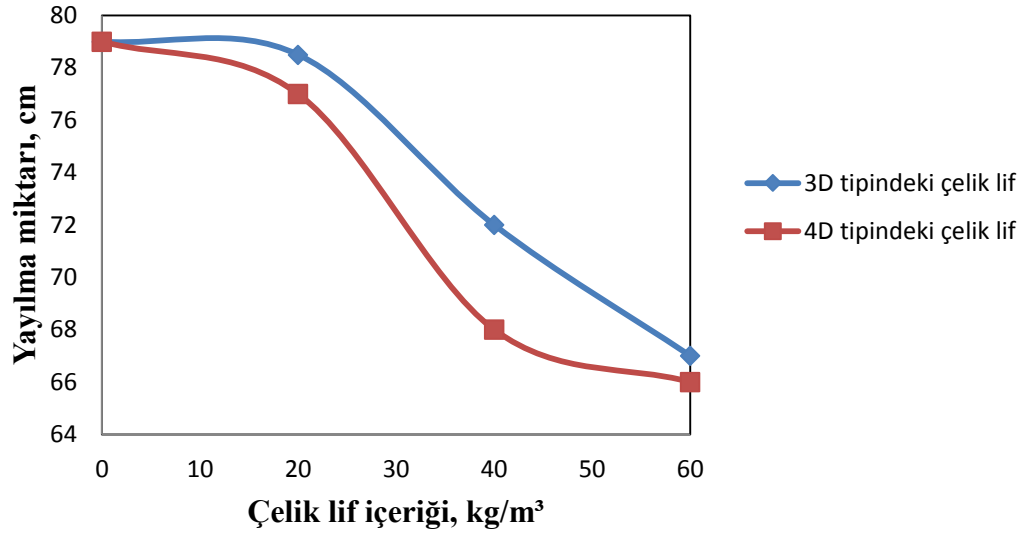
EK A: Çelik liflerin özellikleri**Çizelge A.1: Kullanılan çelik lif türleri.**

Numara	Lif şekli	Geometri	Diğer özellikler	
1		Yüzey: Düz Uç tipi: Kancalı Model ismi: 3D	Uzunluk : 60 mm Çap : 0,9 mm Narinlik: 67	Çekme dayanımı: 1000MPa Miktar: 3200 kg ⁻¹
2		Yüzey: Düz Uç tipi: Kancalı Model ismi: 3D	Uzunluk : 60 mm Çap : 0,9 mm Narinlik: 67	Çekme dayanımı: 1500MPa Miktar: 3183 kg ⁻¹

EK B: Çelik lif türünün işlenebilirliğe etkisi



Şekil B.1: Çökme değerinin lif türü ile olan değişimi.



Şekil B.2: Yayılma değerinin lif türü ile olan değişimi.

EK C: Sertleşmiş beton deneyleri



Şekil C.1: Lif içermeyen silindir şeklindeki numunenin yarma çekme deneyi sonrası görünüşü.



Şekil C.2: Lif içeren silindir şeklindeki numunenin yarma çekme deneyi sonrası görünüşü.



Şekil C.3: 60 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin eğilme deneyi ve deplasman ölçer.



Şekil C.4: Çelik lif içeren bir numunenin eğilme deneyi ve çatlak ağzı açılma deplasmanı ölçer.



Şekil C.5: Eğilme deneyi sonrası kopan ve köprüleme vazifesi gören liflerin görüntüsü.

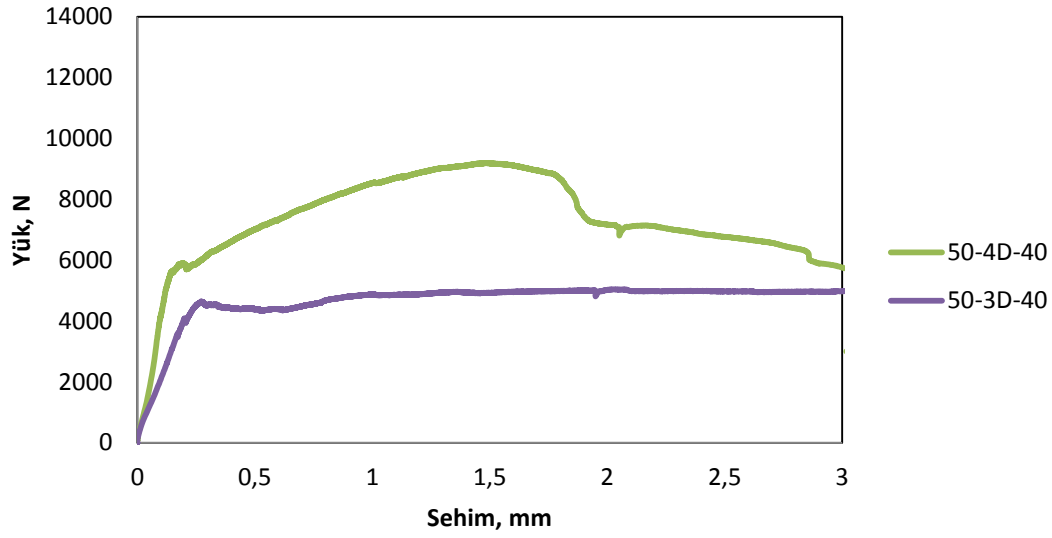


Şekil C.6: Tek bir çelik lif içeren bir numunenin yatay çekme deneyi.

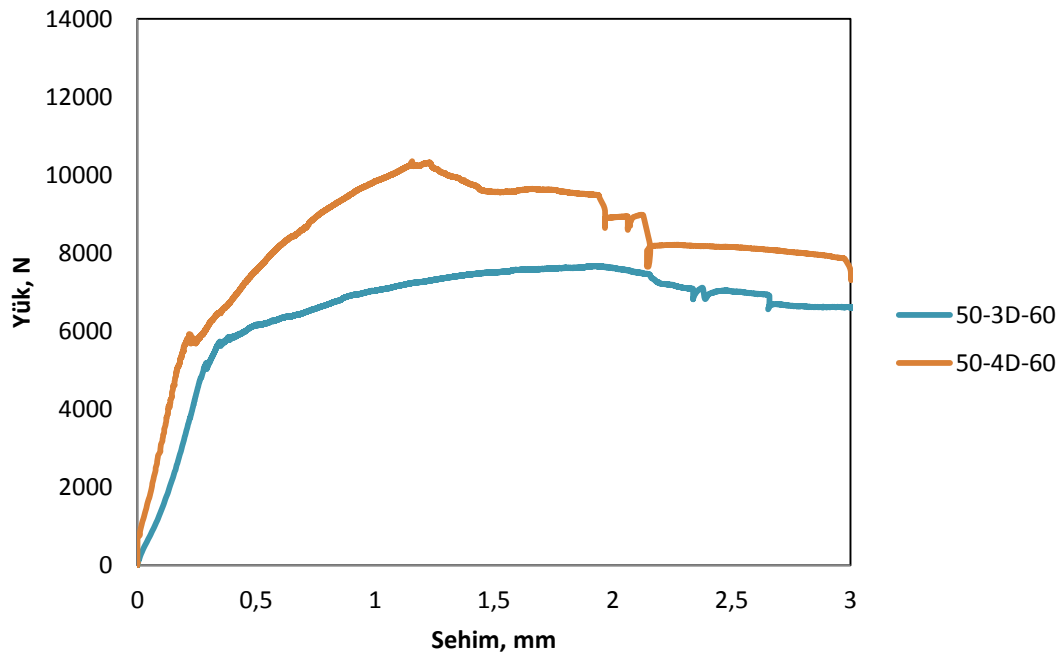


Şekil C.7: Çelik lifin sıyrılmasından önce matrisi dağılan ve elenen bir numune.

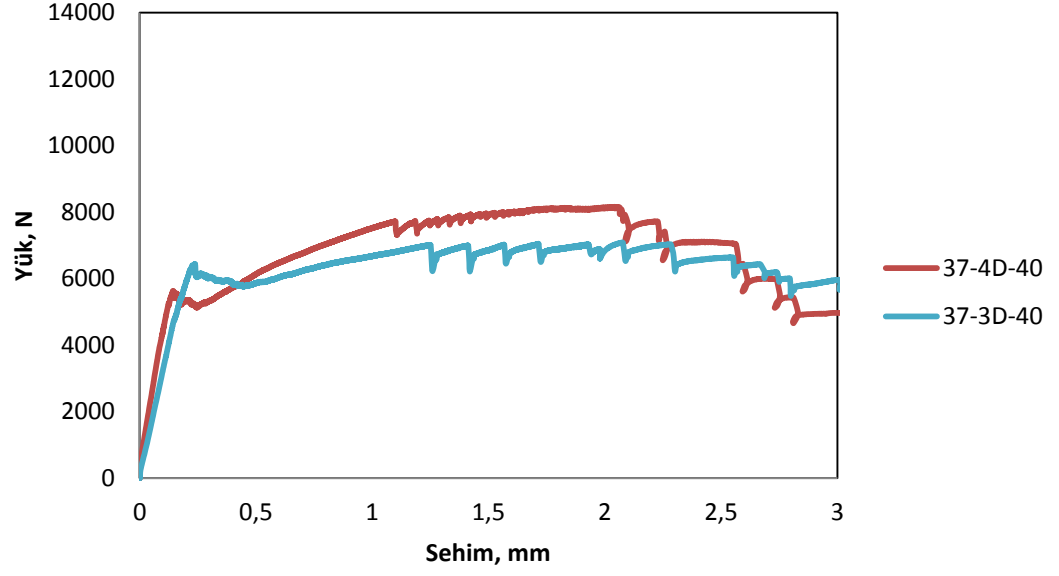
EK D: Çelik lif takviyeli betonlara ait eğilme deneyi sonuçları



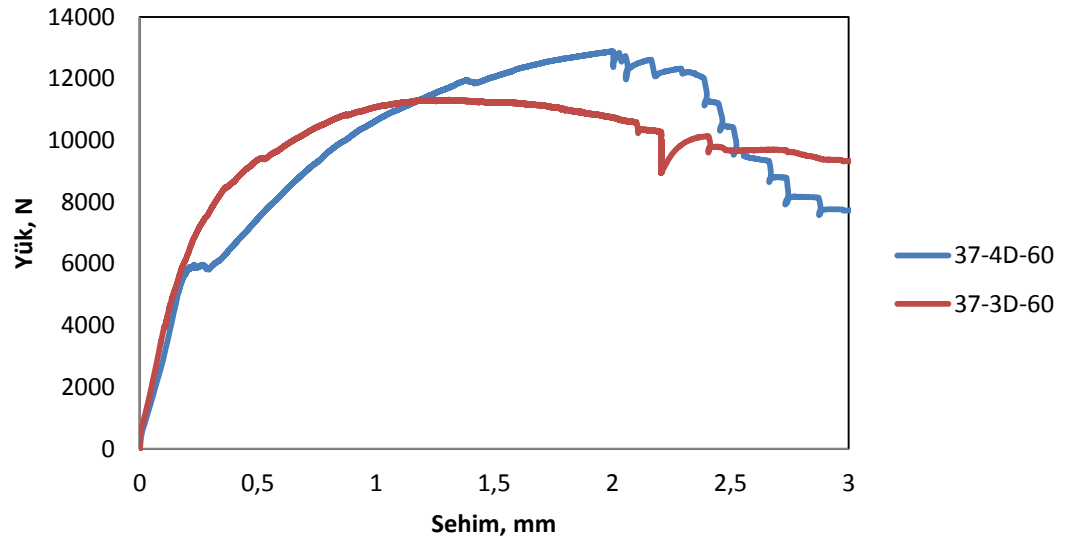
Şekil D.1: Farklı lif tipi ve 40 kg/m³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme davranışları.



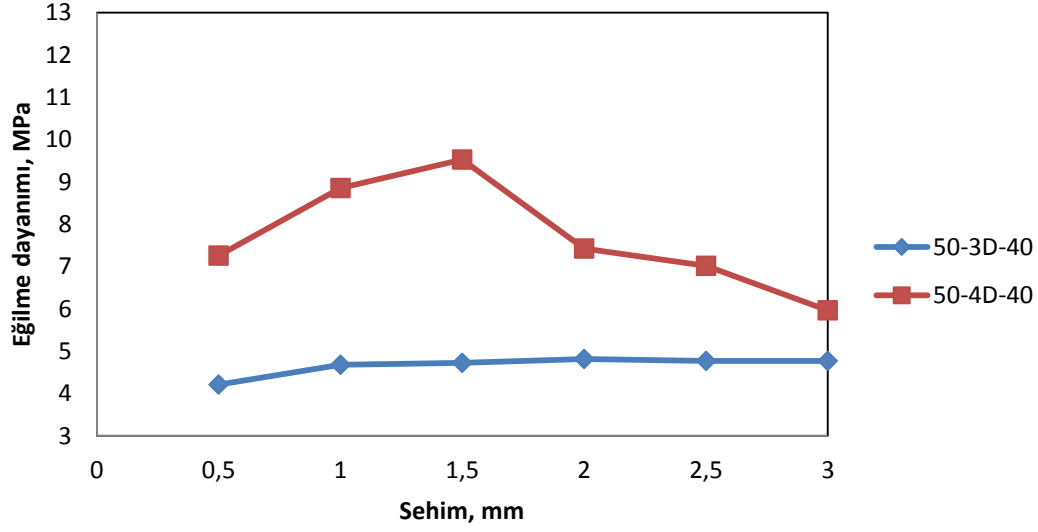
Şekil D.2: Farklı lif tipi ve 60 kg/m³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme davranışları.



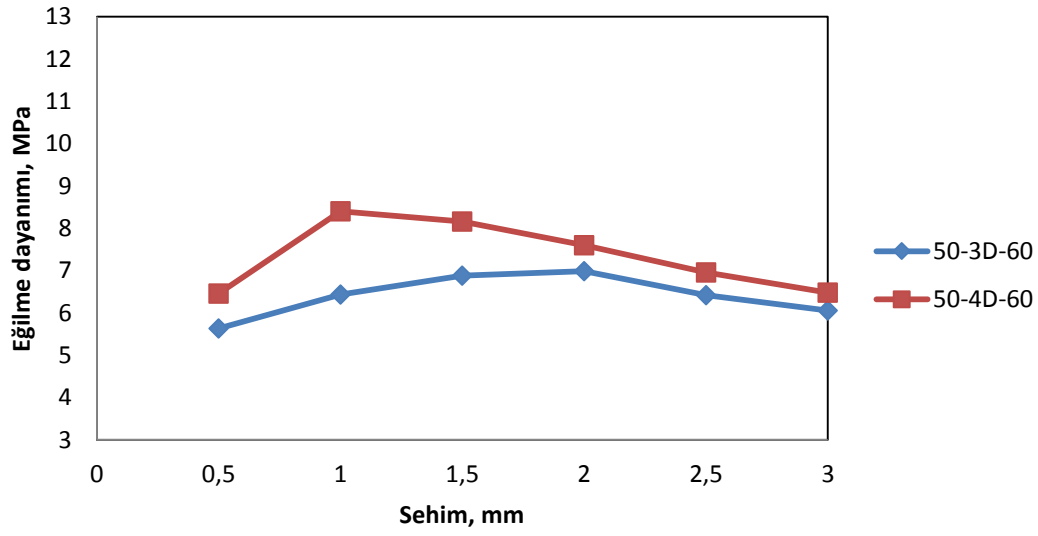
Şekil D.3: Farklı lif tipi ve 40 kg/m³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme davranışları.



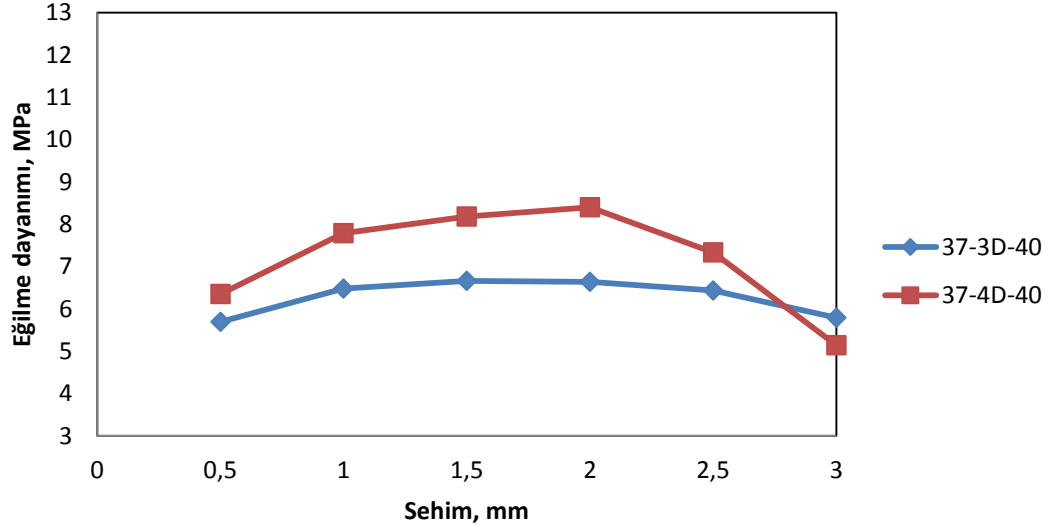
Şekil D.4: Farklı lif tipi ve 60 kg/m³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme davranışları.



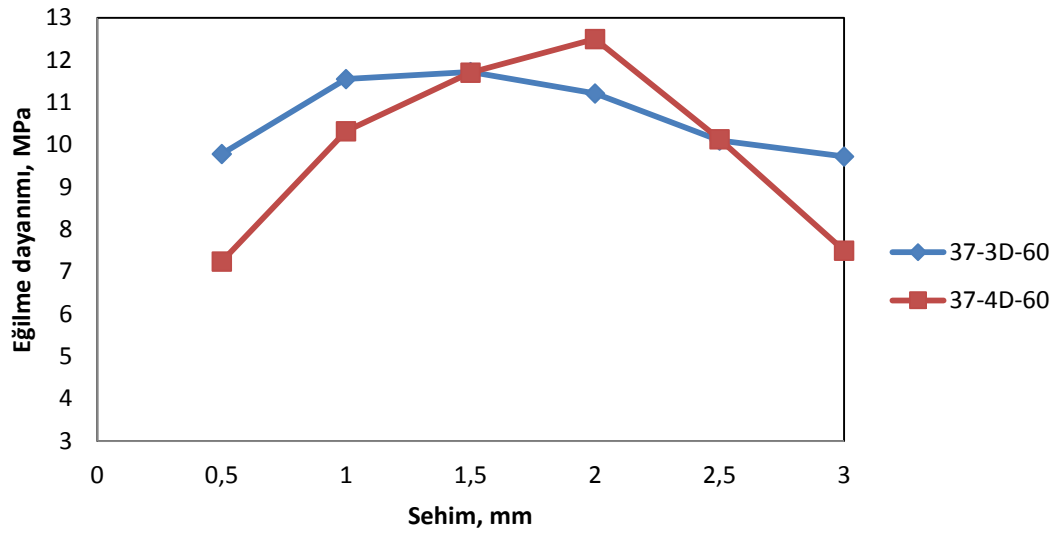
Şekil D.5: Farklı lif tipi ve 40 kg/m³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme dayanımları.



Şekil D.6: Farklı lif tipi ve 60 kg/m³ lif miktarına sahip geleneksel betonların eğilme dayanımları.

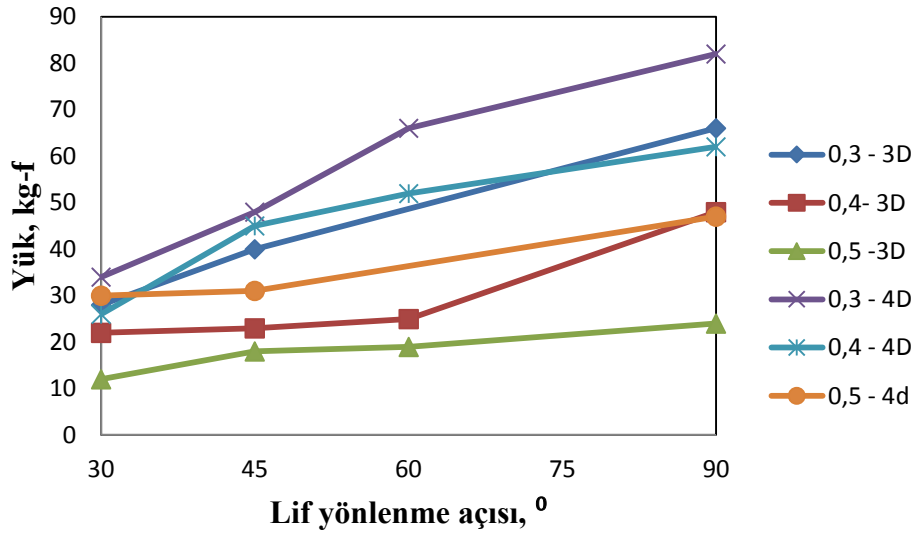


Şekil D.7: Farklı lif tipi ve 40 kg/m³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme dayanımları.

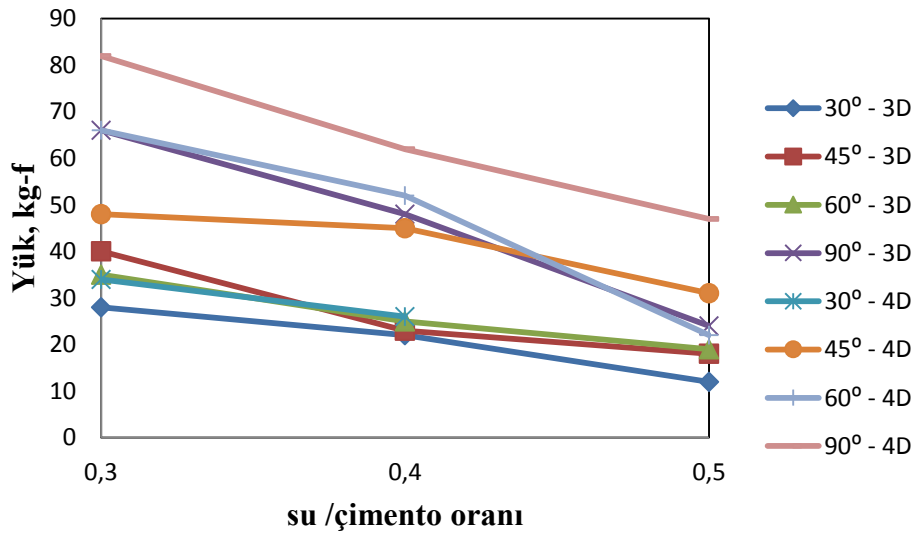


Şekil D.8: Farklı lif tipi ve 60 kg/m³ lif miktarına sahip kendiliğinden yerleşen betonların eğilme dayanımları.

EK E: Tek bir life ait yatay çekme deneyi sonuçları



Şekil E.1: Yatay çekme deneyinde çekme yükü- lif yönlendirme açısı ilişkisi.



Şekil E.2: Yatay çekme deneyinde çekme yükü- matris dayanımı ilişkisi.

EK F: Çelik lif donatılı betonların performans sınıfı sonuçları

Çizelge F.1 : Çelik lif takviyeli betonların ABBY'e göre performans sınıfları.

Numune kodu	Beton sınıfı	Performans sınıfı
50-4D-20	C60	C60/75 NDL 4,37/3,29
50-4D-20	C60	C60/75 NDL 1,78/1,30
50-4D-20	C60	C60/75 NDL 1,83/1,37
50-4D-40	C60	C60/75 NDL 2,50/2,33
50-4D-40	C60	C60/75 NDL 2,82/3,30
50-4D-40	C60	C60/75 NDL 4,34/5,02
50-4D-40	C60	C60/75 NDL 2,90/3,74
50-4D-60	C60	C60/75 NDL 3,18/4,45
50-4D-60	C60	C60/75 NDL 3,81/4,74
50-4D-60	C60	C60/75 NDL 2,69/4,57
50-4D-60	C60	C60/75 NDL 3,39/3,88
37-4D-20	C70	C70/85 NDL 2,02/2,08
37-4D-20	C70	C70/85 NDL 1,96/1,85
37-4D-20	C70	C70/85 NDL 2,15/1,57
37-4D-20	C70	C70/85 NDL 2,11/1,63
37-4D-40	C80	C80/95 NDL 3,20/3,53
37-4D-40	C80	C80/95 NDL 3,02/3,71
37-4D-40	C80	C80/95 NDL 3,88/4,71
37-4D-60	C80	C80/95 NDL 4,40/4,91
37-4D-60	C80	C80/95 NDL 4,30/6,27
37-4D-60	C80	C80/95 NDL 4,33/6,09
50-3D-20	C60	C60/75 NDL 1,13/0,64
50-3D-20	C60	C60/75 NDL 1,44/1,07
50-3D-20	C60	C60/75 NDL 2,51/2,93
50-3D-20	C60	C60/75 NDL 2,33/2,50
50-3D-40	C60	C60/75 NDL 2,24/3,16
50-3D-40	C60	C60/75 NDL 2,63/3,11
50-3D-40	C60	C60/75 NDL 2,37/2,61
50-3D-60	C60	C60/75 NDL 2,86/4,03
50-3D-60	C60	C60/75 NDL 3,55/4,47
50-3D-60	C60	C60/75 NDL 4,50/5,13
37-3D-20	C90	C90/105 NDL 2,15/2,12
37-3D-20	C90	C90/105 NDL 2,72/2,09
37-3D-20	C90	C90/105 NDL 1,87/1,69
37-3D-40	C80	C80/95 NDL 4,80/5,97
37-3D-40	C80	C80/95 NDL 3,60/4,14
37-3D-40	C80	C80/95 NDL 2,49/2,05
37-3D-60	C80	C80/95 NDL 5,53/6,55
37-3D-60	C80	C80/95 NDL 6,20/6,80
37-3D-60	C80	C80/95 NDL 5,42/6,15

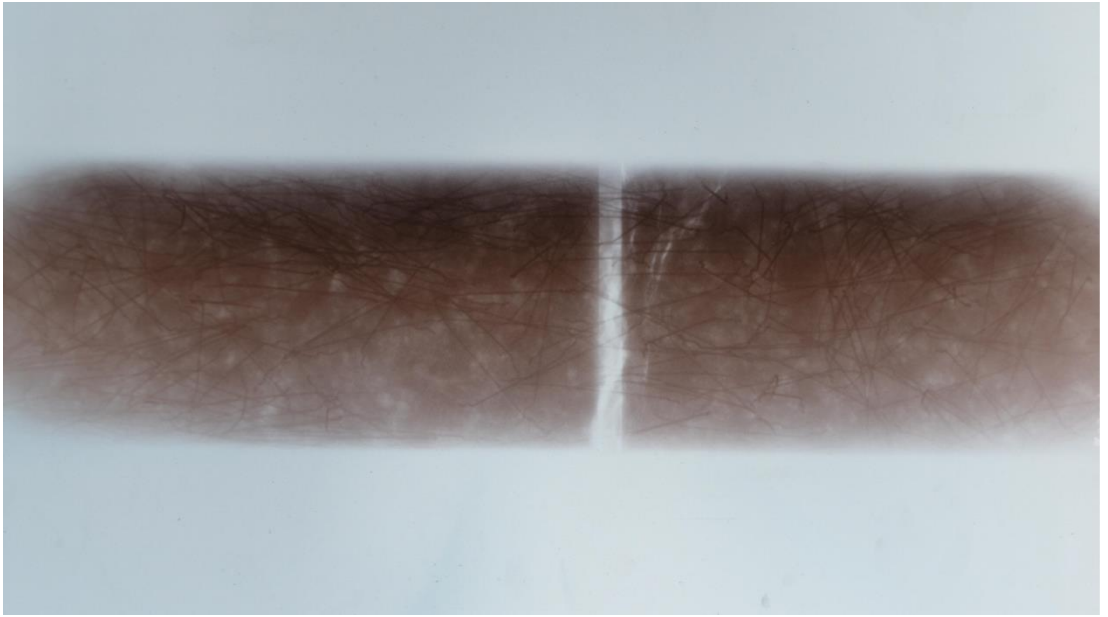
Çizelge F.2: Çelik lif takviyeli betonların ASTM C 1018'e göre performans sınıfları.

Numune kodu	R5,10	R10,20	Kalıcı dayanım sınıfı	Performans sınıfı
50-4D-20	120,9	113,4	IV	Mükemmel
50-4D-20	67,4	44,6	II-III	Orta-iyi
50-4D-20	58,6	59,3	II	Orta
50-4D-40	68,7	65,5	III	İyi
50-4D-40	87,0	102,8	IV	Mükemmel
50-4D-40	125,0	146,4	IV	Mükemmel
50-4D-40	61,2	72,2	III	İyi
50-4D-60	153,1	164,1	IV	Mükemmel
50-4D-60	142,7	143,0	IV	Mükemmel
50-4D-60	188,6	172,6	IV	Mükemmel
50-4D-60	110,3	129,3	IV	Mükemmel
37-4D-20	62,0	66,0	III	İyi
37-4D-20	79,7	60,8	III	İyi
37-4D-20	40,8	29,0	I-II	Zayıf-orta
37-4D-20	41,4	36,3	I-II	Zayıf-orta
37-4D-40	116,5	105,6	IV	Mükemmel
37-4D-40	93,6	82,4	IV	Mükemmel
37-4D-40	100,1	117,5	IV	Mükemmel
37-4D-60	147,2	138,8	IV	Mükemmel
37-4D-60	160,0	201,1	IV	Mükemmel
37-4D-60	115,5	148,7	IV	Mükemmel
50-3D-20	17,2	14,4	I	Zayıf
50-3D-20	40,0	33,3	I-II	Zayıf-orta
50-3D-20	104,7	103,5	IV	Mükemmel
50-3D-20	72,6	65,8	III	İyi
50-3D-40	136,4	148,0	IV	Mükemmel
50-3D-40	92,3	95,0	IV	Mükemmel
50-3D-40	74,7	81,8	III-IV	İyi-mükemmel
50-3D-60	139,5	130,6	IV	Mükemmel
50-3D-60	132,0	123,4	IV	Mükemmel
50-3D-60	108,3	99,2	IV	Mükemmel
37-3D-20	63,5	65,4	III	İyi
37-3D-20	58,8	53,3	II	Orta
37-3D-20	49,4	49,9	II	Orta
37-3D-40	120,0	121,1	IV	Mükemmel
37-3D-40	94,9	99,5	IV	Mükemmel
37-3D-40	50,1	48,5	II	Orta
37-3D-60	89,9	87,6	IV	Mükemmel
37-3D-60	76,5	63,5	III	İyi
37-3D-60	99,3	92,1	IV	Mükemmel

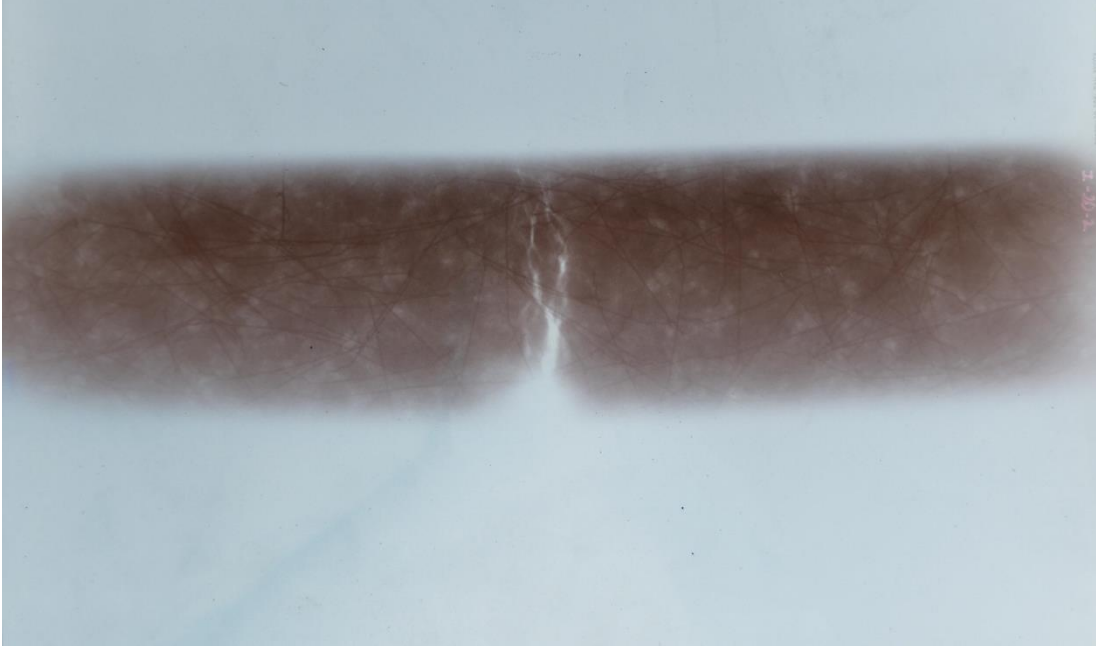
EK G: Eğilme deneyi sonrası çatlamış prizma şeklindeki numunelerin x-ray görüntüleri



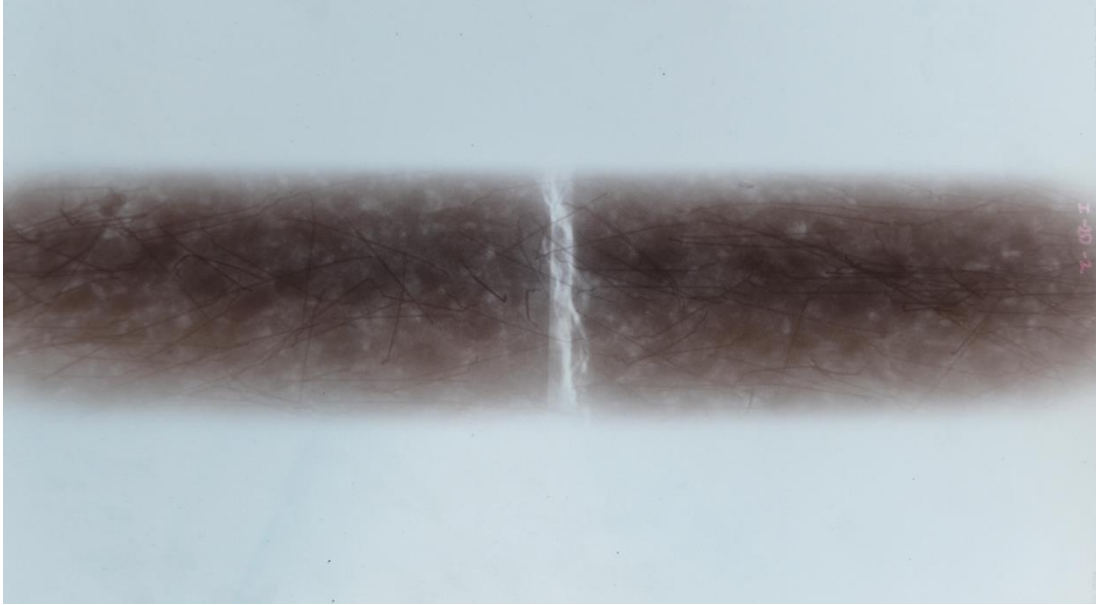
Şekil G.1: 20 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 3408,89$ N/m).



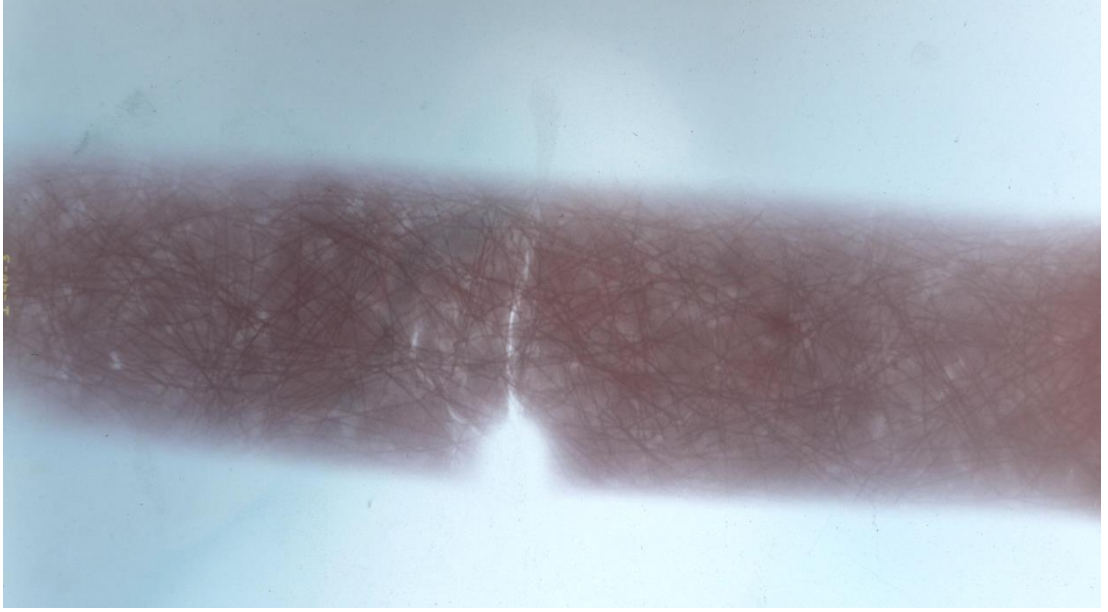
Şekil G.2: 20 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 3408,89$ N/m).



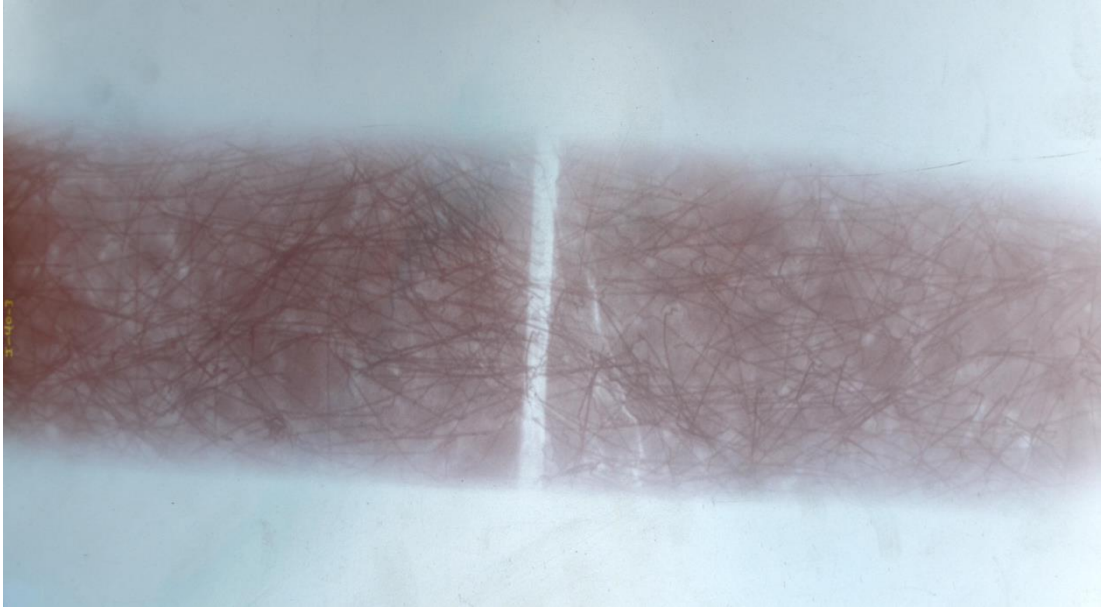
Şekil G.3: 20 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 1042,56$ N/m).



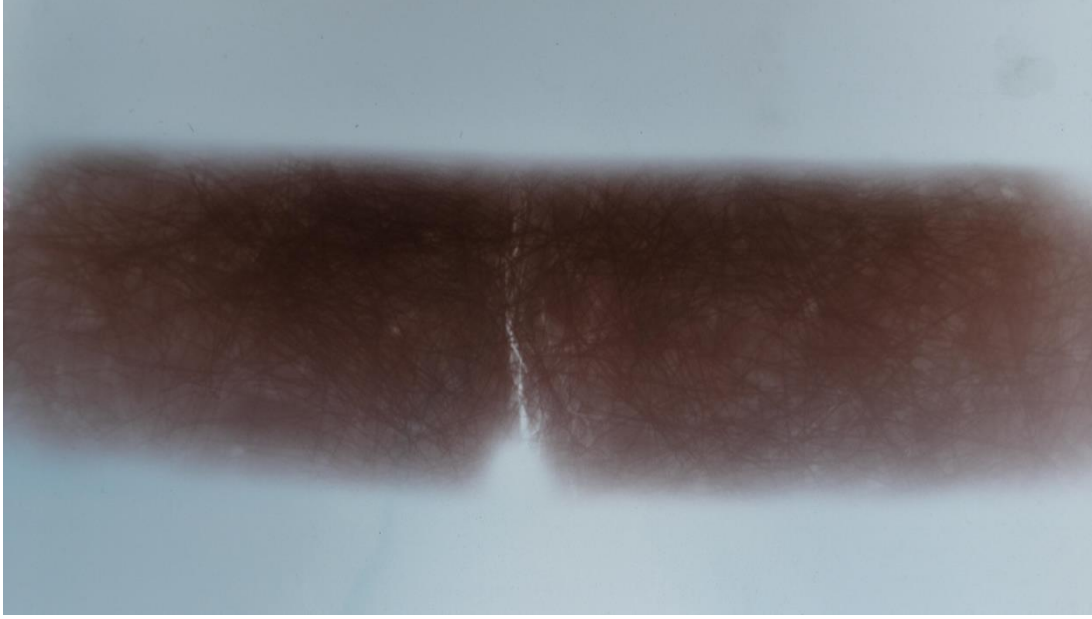
Şekil G.4: 20 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 1042,56$ N/m).



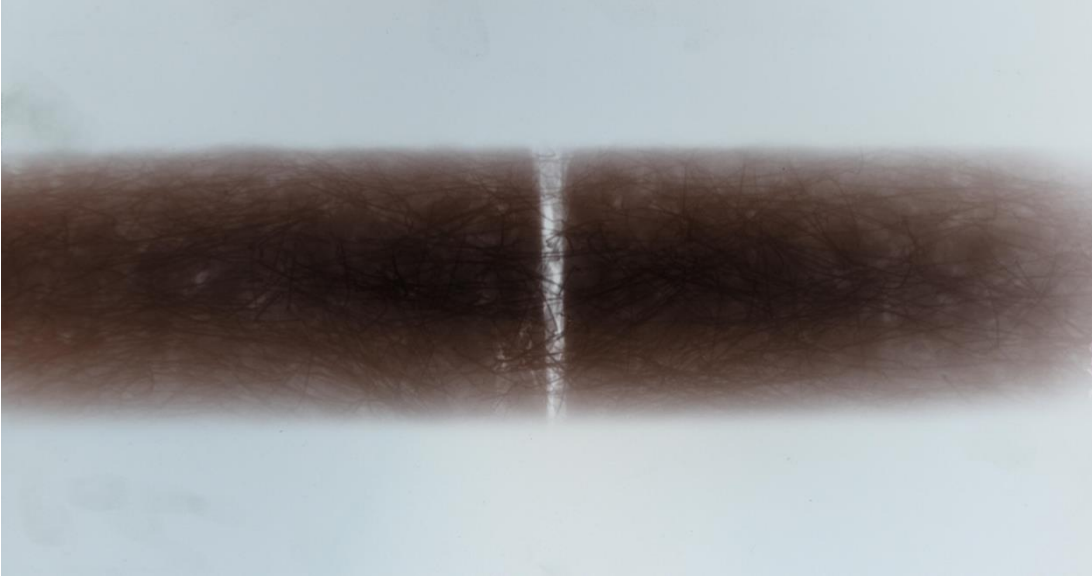
Şekil G.5: 40 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 3504,86$ N/m).



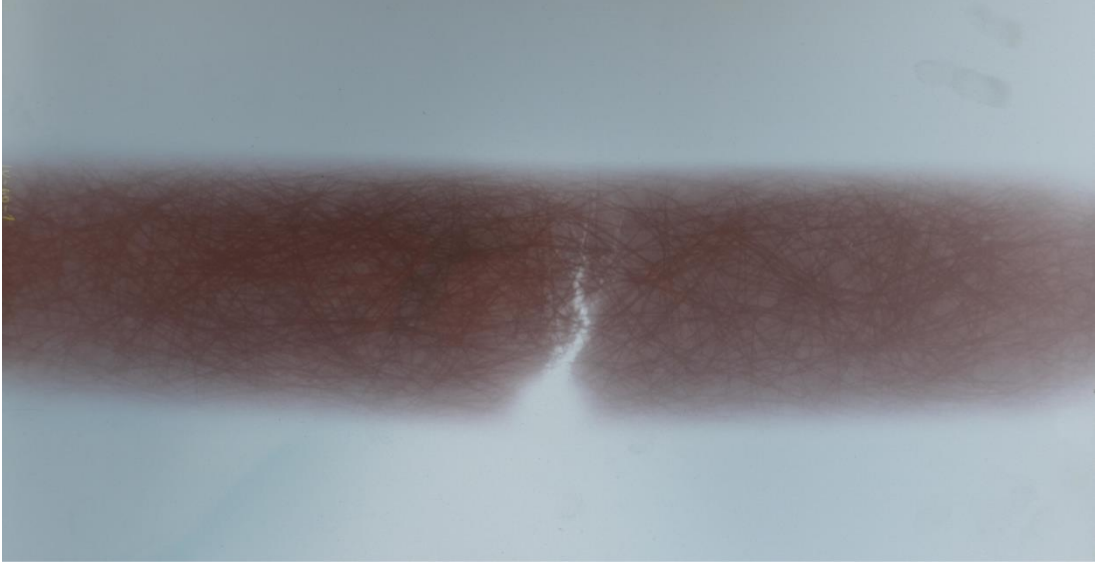
Şekil G.6: 40 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 3504,86$ N/m).



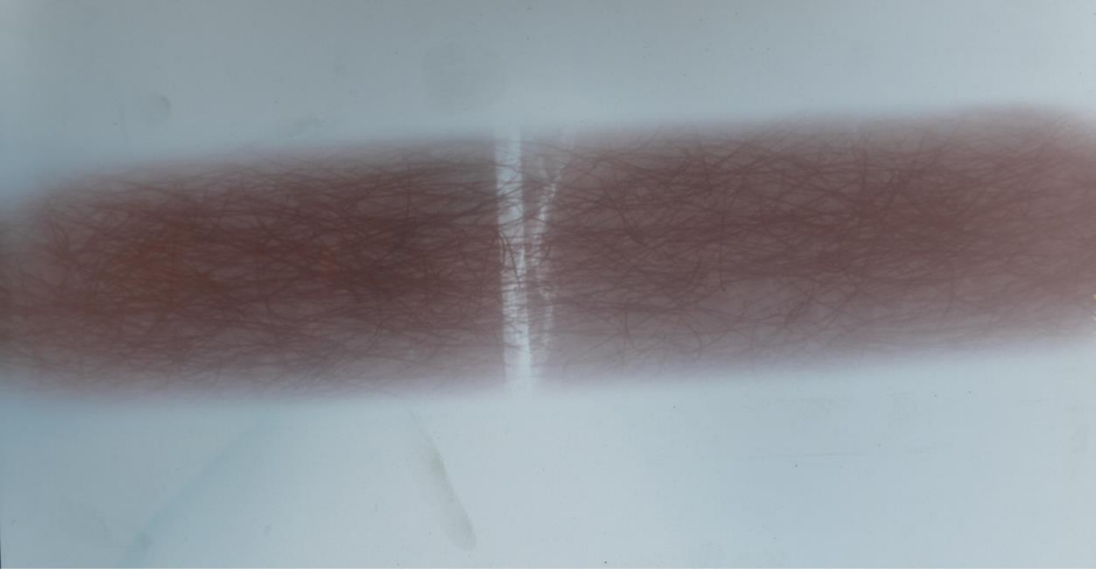
Şekil G.7: 60 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 4274,28$ N/m).



Şekil G.8: 60 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 4274,28$ N/m).



Şekil G.9: 60 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin yandan görünüşü ($G_f = 6132,18\text{N/m}$).



Şekil G.10: 60 kg/m³ çelik lif içeren bir numunenin lif dağılımının ve çatlak ilerleyişinin üstten görünüşü ve çelik liflerin köprülemesi ($G_f = 6132,18\text{ N/m}$).

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad	: Uğur ALPARSLAN
Doğum Yeri ve Tarihi	: İstanbul, 1987
Adres	: Beylikdüzü, İSTANUL
E-Posta	: ualparslan23@yahoo.com
Lisans	: İnşaat Mühendisliği, İTÜ (2011) Kimya Mühendisliği, İTÜ (2012)
Lise	: Bolu Fen Lisesi, (2006)
Başarılar	: İnşaat Müh. mezuniyet derecesi (<i>Dokuzunculuk</i>) Çıta Köprü Yarışması derecesi (<i>Birincilik</i>) İstanbul Satranç Turnuvası İl derecesi (<i>İkincilik</i>) İlköğretim Okulu mezuniyet derecesi (<i>Birincilik</i>)
Kulüp ve dernekler	: İMO – İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul TDV – Türkiye Deprem Vakfı, İstanbul TEMA - Türkiye Erozyonla Mücadele, Ağaçlandırma ve Doğal Varlıkları Koruma Vakfı
Bitirme Projeleri	: Bigadiç, Gördes ve Romanya Klinoptilolitlerinin İyon Değiştirme Kapasitelerinin Bulunması (2012, Kimya Mühendisliği) İki Açıklıklı Çelik Endüstri Hal Yapısı Tasarımı (2011, İnşaat Mühendisliği) Asit Yağmurlarının Allium Sativum Bitkisi (sarımsak) Üzerindeki Etkileri (2006, Fen Lisesi)