

**T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Yüksek Lisans Tezi**

**ÇELİK TEL İÇEREN BETONARME  
KİRİŞLERİN MEKANİK DAVRANIŞI**

**Hasan EROL**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Ziyafeddin BABAYEV**

**Yozgat 2011**

T.C.  
BOZOK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Anabilim Dalı 7011070001 numaralı öğrencisi Hasan EROL' un hazırladığı "Çelik Tel İçeren Betonarme Kirişlerin Mekanik Davranışı" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 25/05/2011 Çarşamba günü saat 10:00'da yapılmış, tezin onayına ~~OY ÇOKLUĞU~~ / OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Yüksel TAŞDEMİR



Üye : Doç.Dr. Ziyafeddin BABAYEV (Danışman)



Üye : Yrd. Doç.Dr. Osman GENÇEL



**ONAY:**

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ..24../..06../..2011 tarih ve 07.. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

24./06/2011

Enstitü Müdürü  
  
Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL  
Bozok Üniversitesi  
Fen Bil. Enst. Müdür V.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	vi
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	viii
<b>1.GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI</b> .....	4
2.1. Çelik Tel Donatılı Betonlar.....	4
2.1.1. Genel.....	4
2.1.2. Betonda Kullanılan Çelik Teller ve Özellikleri .....	5
2.1.3. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları .....	7
2.1.4 Çelik Tel Donatılı Beton Karışımı .....	10
2.1.5. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı.....	13
2.1.6. Çelik Tellerin Betonun Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri .....	19
2.1.6.1. Basınç Dayanımı .....	19
2.1.6.2. Elastisite Modülü .....	21
2.1.6.3. Çekme Dayanımı .....	22
2.1.6.4. Yarmada Çekme Dayanımı .....	23
2.1.6.5. Eğilme Dayanımı .....	24
2.1.6.6. Darbe ve Yorulma Dayanımı .....	25
2.1.6.7. Tokluk .....	26
2.1.7. Çelik Tellerin Betonun Durabilite Özellikleri Üzerindeki Etkileri.....	28
2.1.7.1. Korozyon.....	28
2.1.7.2. Sünme ve Büzülme .....	28
2.1.7.3. Donma - Çözülme .....	29
2.1.7.4. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon Direnci.....	31
2.1.8. Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları.....	32
2.2. Betonarme Elamanların Basit Eğilme Altındaki Davranışı ve Kesit Hesabı .....	33
<b>3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI</b> .....	<b>39</b>
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	39
3.1.1. Çimento.....	39
3.1.2. Agrega.....	39

3.1.3. Süper Akışkanlandırıcı.....	40
3.1.4. Çelik Tel.....	40
3.2. Beton Karışımları.....	40
3.3. Üretilen Betonların Özellikleri .....	42
3.4. Beton Deneyleri .....	45
3.4.1. Taze Beton Deneyleri .....	45
3.4.1.1. Birim Ağırlık Deneyi .....	45
3.4.1.2 İşlenebilme Deneyi.....	45
3.4.1.3. Taze Betonun Hava İçeriği Deneyi.....	45
3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	45
3.4.2.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini Deneyi .....	45
3.4.2.2. Eğilme Dayanımı Tayini Deneyi .....	47
3.4.2.3. Betonarme Kirişler Üzerinde Eğilme Deneyi .....	48
<b>4. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>49</b>
4.1. Taze Beton Özellikleri .....	49
4.2. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü .....	49
4.3. Eğilme Dayanımı ve Tokluk.....	51
4.4. Çelik Tel Takviyeli Betonarme Kirişlerin Eğilme Dayanımı .....	59
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>63</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>65</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>76</b>

# ÇELİK TEL İÇEREN BETONARME KİRİŞLERİN MEKANİK DAVRANIŞI

**Hasan EROL**

**Bozok Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**2011 ; sayfa 75**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ziyafeddin BABAYEV**

## ÖZET

Bu çalışma çelik tellerin  $20 \text{ kg/m}^3$ ,  $40 \text{ kg/m}^3$ ,  $60 \text{ kg/m}^3$ ,  $80 \text{ kg/m}^3$  ve  $100 \text{ kg/m}^3$  miktarlarda betona ve geleneksel betonarme kirişlere katılmasıyla elde edilen numunelerin mekanik özelliklerinin araştırılmasını içermektedir. Bu amaçla üretilen çelik tel takviyeli betonlar üzerinde basınç dayanımı, elastisite modülü ve eğilme dayanımı tayini deneyleri yapıldı. Ayrıca, eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrilerinden çelik tel donatılı betonların toklukları elde edildi. Bunun yanı sıra, çelik tellerin betonarme kirişlerin eğilme altında kırılma yüküne ve tokluklarına etkisini belirlendi.

Yapılan deneysel çalışma sonunda, çelik tellerin betonların eğilme dayanımı ve tokluğunu belirgin şekilde arttırdığı belirlendi. Ayrıca, çelik tellerin geleneksel donatılı betonarme kirişlerin eğilme altında kırılma yüklerini ve tokluklarında kayda değer iyileştirmeler yaptığı sonucuna varıldı.

**Anahtar Kelimeler:** çelik tel, süneklik, tokluk, eğilme dayanımı

# **THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS INCORPORATING STEEL FIBRE**

**Hasan EROL**

**Bozok University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences,  
Department of Civil Engineering  
Master of Science Thesis**

**2011 ; page 75**

**Thesis Supervisor: Assoc.Prof. Ziyafeddin BABAYEV**

## **ABSTRACT**

In this study, mechanical properties of concrete and conventional reinforced concrete produced by addition of steel fibre at the contents of 20 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup>, 80 kg/m<sup>3</sup> ve 100 kg/m<sup>3</sup> were investigated. For this purpose, elastic modulus, compressive and flexural tensile strength tests were performed on steel fibre reinforced concretes. Also, load-deflection curves were obtained from the flexural tensile tests. Besides, effect of steel fibre content on fracture load and toughness of conventional reinforced concrete beams under bending were investigated.

Depending on the experimental test results, it was determined that steel fibre had a significant effect on both flexural strength and toughness of concretes. Also, it was noted that steel fibre made a considerable improvements on both fracture load and toughness of conventional reinforced concrete beams under bending.

**Key Words:** steel fibre, ductility, toughness, flexural strength

## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalıőmalarım boyunca engin bilgi ve tecrübeleri ile bana her konuda yardımcı olan çok değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Ziyafeddin BABAYEV'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL'a en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitimim süresince bana emeği geçen Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görev yapan değerli hocalarıma, ayrıca deneysel çalıőmalarım sırasındaki yardımları için değerli hocam Yrd. Doç.Dr. Selçuk Emre GÖRKEM'e ve İnşaat Mühendisi Murat ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Hayatta desteklerini benden hiç esirgemeyen sevgili babam Selami EROL'a, sevgili annem Hatice EROL'a, sevgili eőim Mümine EROL'a ve her zaman ve her konuda desteklerini esirgemeyen kardeőlerime ve dostlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hasan EROL  
Yozgat 2011

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1:	Düz, Pürüzsüz Yüzeyleli Tel.....	5
Şekil 2.2:	Bütün Uzunluğu Boyunca Deforme Olmuş Teller .....	6
Şekil 2.3:	Bir Ucu veya İki Ucu Kancalı Tel .....	6
Şekil 2.4:	Çelik Tellerin Taze Beton İçerisindeki Dağılımı.....	11
Şekil 2.5:	Farklı Lif Boyutlarının Çatlak Köprüleme Etkisi.....	14
Şekil 2.6:	Çelik Tel Donatılı Beton Kirişlerin Tipik Yük-Sehim Eğrileri .....	17
Şekil 2.7:	ÇTDB'ların Tipik Çekme Gerilmesi-Çekme Şekil Değiştirme Eğrisi ..	23
Şekil 2.8:	Farklı Tel Hacimlerinde Çatlak Genişliği-Zaman İlişkisi .....	30
Şekil 2.9:	Ortalama Çatlak Genişliği-Çelik Tel Hacmi İlişkisi .....	30
Şekil 2.10:	Eğilme Etkisinde Betonarme Kesit Tasarımında Beton ve Çelik İçin Kabul Edilen Varsayımlar. ....	34
Şekil 2.11:	Basit Eğilme Altındaki Kirişin Tipik Davranışı. ....	34
Şekil 2.12:	Eğilme Altında Betonarme Kesitte Basınç Dağılımı .....	35
Şekil 2.13:	TS500'de Beton Basınç Bölgesi İçin Önerilen Eşdeğer Dağılım.....	36
Şekil 3.1:	Karışım Agregası Tane Dağılımı Eğrisi. ....	41
Şekil 3.2:	Beton Numuların Üretimi-1.....	43
Şekil 3.3:	Beton Numuların Üretimi-2.....	43
Şekil 3.4:	Beton Numuların Üretimi-3.....	44
Şekil 3.5:	Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini Deney Düzeneği .....	46
Şekil 3.6:	Eğilme Deney Düzeneği. ....	47
Şekil 4.1:	Basınç Dayanımının Çelik Tel İçeriğine Bağlı Değişimi. ....	50
Şekil 4.2:	Elastisite Modülü-Çelik Tel İçeriği İlişkisi .....	51
Şekil 4.3:	Eğilme Dayanımının Çelik Tel İçeriği Bağlı Değişimi .....	52
Şekil 4.4:	Tokluk-Çelik Tel İçeriği İlişkisi .....	53
Şekil 4.5:	20 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 1) .....	54
Şekil 4.6:	20 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 2) .....	54
Şekil 4.7:	40 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 1) .....	55
Şekil 4.8:	40 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 2) .....	55
Şekil 4.9:	60 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 1) .....	56



Şekil 4.10: 60 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 2) .....	56
Şekil 4.11: 80 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 1) .....	57
Şekil 4.12: 80 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 2) .....	57
Şekil 4.13: 100 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 1) .....	58
Şekil 4.14: 100 kg/m <sup>3</sup> Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrisi (numune 2) .....	58
Şekil 4.15: Farklı Tel İçeriği İçin Yük-Sehim Eğrileri .....	59
Şekil 4.16: Deneysel Kırılma Yükü-Çelik Tel İçeriği İlişkisi.....	61
Şekil 4.17: Betonarme Kirişlerde Tokluk-Çelik Tel İçeriği İlişkisi.....	61
Şekil 4.18: Betonarme Kirişlere Ait Yük-Sehim Eğrileri.....	62

## TABLULAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1:	ÇTDB'ların Normal Betonlara Kıyasla Genel Özellikleri .....	16
Tablo 3.1:	Portland Çimentosunun (CEM I 42.5 R) Özellikleri .....	39
Tablo 3.2:	Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	40
Tablo 3.3:	Beton Karışım Oranları .....	41
Tablo 3.4:	Kirişlere Ait Donatı ve Teorik Kırılma Yükleri .....	44
Tablo 3.5:	Mekanik Özellikler Deney Sonuçları .....	46
Tablo 4.1:	Mekanik Özellikler Deney Sonuçları .....	49
Tablo 4.2:	Betonarme Kirişlere Ait Eğilme Deney Sonuçları .....	60

## 1. GİRİŞ

Beton agrega, su ve bağlayıcı madde olan çimento ile gerektiğinde mineral ve kimyasal katkıların birleştirilmesinden elde edilen yarı-gevrek kompozit bir malzemedir. Beton günümüzde yapı taşıyıcı sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir [1]. Baraj, kanal gibi su yapıları yanında yol, bina, köprü ve diğer birçok yapıların taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarında kullanılır. Beton dayanımın yanı sıra, yangına dayanıklılığı, su geçirmezliği ve ses yalıtımı bakımından da tercih edilen bir malzemedir. Ayrıca nükleer santrali gibi stratejik yapılarda radyasyona kalkını olarak kullanılır [2,3]. Beton tasarımı yapılırken ekonomik ve dayanımlı olması yanında uzun süreli performansa (kalıcılık) sahip olması da istenir. Yüksek binaların, uzun ve geniş açıklıklı köprülerin, yeraltı ve deniz yapıları gibi birçok yapının inşa edilebilmesi, özellikle dayanımı, rijitliği, sünekliği ve dayanıklılığı (dürabilite) iyileştirilmiş yapı malzemelerinin kullanılmasıyla mümkün olmaktadır [4].

Betonların gevrek bir yapıya ve daha az şekil değiştirme yeteneğine sahip oldukları bilinmektedir. Diğer taşıyıcı yapı malzemelerine göre daha ekonomik olmasından dolayı betonun bu zayıf özelliklerinin iyileştirilmesi uygulama alanlarının artırılması açısından önemli olmaktadır. Betonun dayanımı arttıkça gevreklikleri artar, yani enerji yutma kapasitelerinin daha düşük olur [5]. Bundan dolayı yüksek dayanımlı betonların (YDB) kullanım alanları sınırlı kalmaktadır. Son yıllarda deney tekniklerinde ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak beton gibi yarı-gevrek malzemelerin davranışlarının ve özelliklerinin araştırılması konusunda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu konuda ki çalışmalar ise günümüzde halen güncelliğini korumaktadır. Geleneksel taşıyıcı yapı malzemelerine göre birçok özelliği bakımından daha performanslı olan yeni malzemeler geliştirilmiş ve bu malzemeler “yüksek performanslı malzemeler” adı altında toplanmıştır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında bu tür malzemelere ihtiyaç giderek artmakta bazen süneklikte performansın bir ölçüsü olarak kabul edilmektedir [1].

Malzeme teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak son yıllarda beton teknolojisinde de büyük gelişmeler görülmüştür. Yapılan araştırmalar sonucunda,

günümüzde küp basınç dayanımları 200–800 MPa, çekme dayanımları 25–150 MPa arasında değişen ve kırılma enerjileri ise 30000 J/m<sup>2</sup>' yi aşan yüksek performanslı betonlar üretilebilmektedir [6]. Bu tür betonlar Reaktif Pudra Betonu (RPC) olarak adlandırılmakta, süneklikleri normal betonlarınkine kıyasla 300 kat daha fazla olabilmekte ve SIFCON' da ise (matrisi; ince kum, silis dumanı, su ve çimentodan oluşan hacimce %20' ye kadar çelik tel içeren beton) kırılma enerjisi normal betonunkinin 1350 katına kadar çıkmaktadır [7]. Yüksek performanslı betonların üretiminde, en zayıf faz olan çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin iyileştirilmesi ve boşlukların azaltılması için ultra incelikteki silis dumanı (mikrosilis) kullanılmakta ve yüksek dayanımlara ulaşabilmek için su/bağlayıcı oranları düşük tutulmaktadır. Bu betonların enerji yutma kapasitelerini arttırmak için çelik teller kullanılmakta ve bazı durumlarda ise taze halde sertleşme süresinin başlangıcında basınç altında ısıtılma işlemi uygulanmaktadır [6]. Yüksek dayanımlı-yüksek performanslı beton konusunda yapılan çalışmalar son yıllarda önemli bir ivme kazandırmış ve bugün istenilen kırılma enerjisine sahip, mevcut çevresel etkilere göre istenilen servis ömrüne sahip betonları tasarlamak, çeşitli modeller kullanarak mekanik özellikleri ve kırılma parametrelerini hesaplamak ve deneyle gerçeklemek günümüzde mümkün olmaktadır.

Çelik tellerin betona katılmasıyla, gevrek bir malzeme olan geleneksel betonların çekme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve çatlak sonrası yük taşıma kapasiteleri bakımından, özellikle enerji yutma kapasitelerinde diğer bir deyişle sünekliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmektedir [8,15].

Çelik Tel Donatılı Beton (ÇTDB)' leri normal betonlara kıyasla en belirgin özeliği süneklik ve enerji yutma kapasitesinin farklılıklardır. Çelik tellerin betona katılmasıyla sağlanan başlıca faydalar; a) yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek beton üretimi olarak sağlaması, b) donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi, c) etkin çatlak kontrolü, d) dayanıklılığın artırılması, e) donatı işçiliğinde kaydedilen azalma şeklinde sıralanabilir [2].

Çelik tellerin etkisi beton matrisin çatlamasından sonra (tepe yükü sonrası) görülmektedir. Bu nedenle ani göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma

kapasitesine sahip betonların üretilmesinde çelik tel kullanımı önemli bir yere sahiptir. Çelik tel donatılı betonlar endüstriyel zemin betonları, tünel kaplamaları ve beton borular gibi zemine oturan elemanların üretiminde de, geleneksel donatılı betonların yerine tercih edilebilmektedir [12,16]. ÇTDB'lar, normal betonlara oranla sağladıkları avantajlardan dolayı kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Betonda çelik tel kullanımının betonun mekanik davranışı ve diğer özellikleri üzerine etkileri ve bu tür betonların tasarım ilkeleri konusundaki bilgisayar teknolojisindeki ve yeni deney tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak devam etmekte ve güncelliğini korumaktadır.

Deprem mühendisliğinde malzeme ve yapı taşıyıcı sisteminin, dolayısıyla taşıyıcı sistemi oluşturan taşıyıcı elemanların sünekliği büyük öneme sahiptir. Bu açıdan bakıldığında, çelik tellerin betonların sünekliği yani enerji yutma kapasitesinde yaptığı iyileştirmeler özellikle deprem kuşağında olan ülkemiz için ayrı bir öneme sahip olmaktadır. Bundan dolayı stratejik yapılarda klasik donatı ile birlikte de kullanılabilirler.

Bu çalışma, aynı performansa sahip fakat farklı çekme dayanımları olan çelik tellerin farklı su/çimento oranı ve çelik tel içeriğinde kullanılmasıyla elde edilen ÇTDB'ların mekanik özelliklerinin araştırılmasını içermektedir. Aynı zamanda su ve çimento miktarları ile tel dayanımı ve tel içeriğine bağlı olarak betonların kırılma enerjilerinin kurulan YSA modeli ile tahmin edilmesini kapsamaktadır.

Bu çalışmada, eğilme altında geleneksel donatılı betonarme kirişlere çelik tel katılmasıyla sünekliklerinin artırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda  $20 \text{ kg/m}^3$ ,  $40 \text{ kg/m}^3$ ,  $60 \text{ kg/m}^3$ ,  $80 \text{ kg/m}^3$  ve  $100 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeren betonarme kirişlerin tokluklarındaki değişiklikler araştırılması için deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmada betonarme kirişlerin eğilme altındaki yük-deplasman eğrileri ve karakteristik basınç dayanımları incelenmiş ve çelik tel içermeyen referans numuneler ait değerler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, sadece çelik tel içeren beton kiriş numunelerin toklukları ve çelik tel içeriği ile betonarme kirişlerin toklukları arasındaki ilişki analitik olarak incelenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

### 2.1. Çelik Tel Donatılı Betonlar

#### 2.1.1. Genel

Çelik tel donatılı beton (ÇTDB), geleneksel beton karışım bileşenleri olan agrega, çimento ve su ile gerektiğinde mineral ve/veya kimyasal katkıları kullanılarak üretilen betonlara çelik tel katılmasıyla elde edilen bir kompozit (karma) malzemedir. ÇTDB yüksek çekme dayanımı ve çatlakların azaltılmasının istenmesi halinde veya yapı elemanının şeklinden dolayı geleneksel donatının yerleştirilemediği durumlarda kullanılabilir. Bu malzemelerin kırılma enerjileri normal betonunkinin 300 katına, hatta SIFCON'da (Slurry Infiltrated Fibered Concrete) 1300 katına çıkabilmektedir [93]. Mükemmel darbe dayanımı özelliklerine sahip olmaları nedeni ile endüstriyel zeminlerde, trafik yoğunluğunun çok olduğu beton yollarda, askeri yapılarda, depreme karşı stratejik yapılarda, betonarme yapıların güçlendirilmesinde, küçük veya orta büyüklükteki prefabrik elemanların üretiminde kullanılabilirler.

Çelik tellerin betona katılmasının amacı genel olarak yalın betonların ve betonarme elemanların performanslarının iyileştirme sağlanmasıdır. Gevrek bir yapıya sahip donatısız betonlar çekme gerilmesi altında çatlaklar. Bu sorun çekme yükünü alacak donatı çubuklarının kullanılmasıyla aşılmıştır. Geleneksel betonlar, çarpma ve aşınma direnci, yorulma ve çekme dayanımı ve çatlak yükü sonrası taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özellikler gösterirler. Çelik tellerin betona katılmasıyla betonların bu zayıf özelliklerinde belirgin iyileştirmeler elde edilmiştir [17,21]. Çelik tel kullanılmasıyla betonun çekme şekil değiştirmesinde artış meydana gelir ve beton yarı-sünek davranış özelliği kazanır. Buna bağlı olarak betonun çatlama dayanımı ve tokluk özellikleri iyileşmeler elde edilir [1,23].

Beton içerisindeki çelik teller çatlak kontrolünü sağlar ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koyar. Genel olarak ÇTDB'ların davranışını şu iki özellik belirler; eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğu. Çelik tellerin beton özellikleri üzerinde yaptığı iyileştirmeler, kullanılan çelik tel tipine, narinliği, kullanılan tel miktarına, telin matristen sıyrılmaya dayanımına, telin matris içerisindeki oryantasyonuna bağlı olmaktadır.

### 2.1.2. Betonda Kullanılan Çelik Teller ve Özellikleri

Betonda kullanılan çelik telin tanımı ACI 544'e [24]. tel boyunun eşdeğer tel çapına bölünmesiyle elde edilen boy/çap oranı (narinlik) olarak kabul edilmektedir. Betona katılan çelik teller genellikle daire kesitlidir, bunun yanı sıra dikdörtgen kesitli çelik teller de kullanılmaktadır. Çelik tellerin boyları 30–60 mm, çapları ise 0,5–1,0 mm. Arasında, çekme dayanımlarını ise  $345 \text{ N/mm}^2$ – $2000 \text{ N/mm}^2$  arasında değişmektedir [7]. Kancalı uçlu üretilen çelik tellerin sıyrılma dayanımları düz olanlara oranla daha yüksek olmaktadır [9].

Düşük karbonlu çelikten üretilen teller genellikle; soğukta çekilen tellerin kesilmesiyle, çelik plakaların kesilmesiyle ve erimiş haldeki çelik potasından çıkarılarak olmak üzere üç farklı şekilde elde edilmektedir. TS 10153'e göre çelik tel sınıfları aşağıda ve tipleri ise Şekil 2.1–2.3'de verilmektedir [26].

#### Çelik Sınıfları ve Tipleri:

A Sınıfı: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller (Şekil 2.1.)

B Sınıfı: Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller

Tip 1: Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış teller (Şekil 2.2.a)

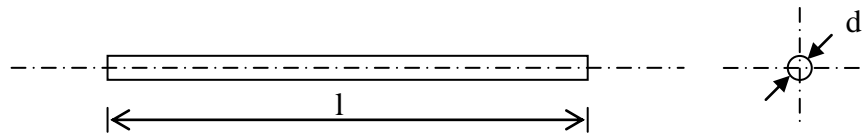
Tip 2: Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) teller (Şekil 2.2.b)

Tip 3: Ay biçimi dalgalı teller (Şekil 2.2.c)

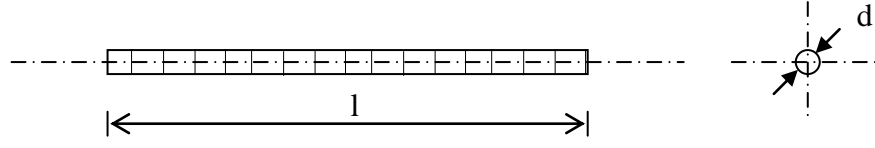
C Sınıfı: Sonu kancalı teller

Tip 1: İki ucu kancalı teller (Şekil 2.3.a)

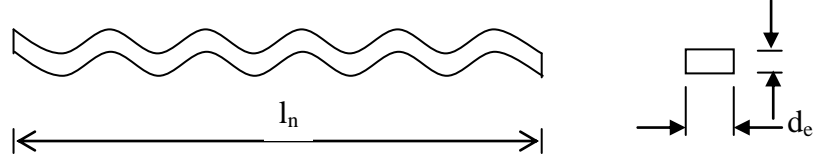
Tip 2: Tek ucu kancalı teller (Şekil 2.3.b)



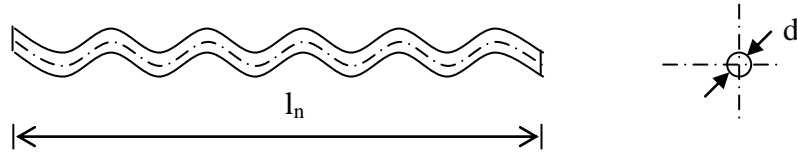
Şekil 2.1 Düz, pürüzsüz yüzeyli tel



a) Üzerinde girintiler ve çıkıntılar oluşturulmuş tel

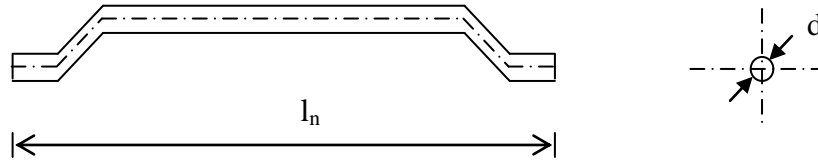


b) Uzunluğu boyunca dalgalı teller

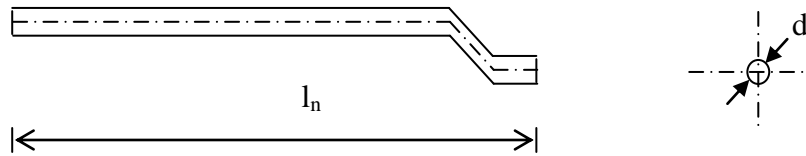


c) Ay biçimi teller

Şekil 2.2 Bütün uzunluğu boyunca deforme olmuş teller.



a) İki ucu kancalı tel



b) Bir ucu kancalı tel

Şekil 2.3 Bir ucu veya iki ucu kancalı tel



Uygulamada yaygın olarak kullanılan kancalı uçlu çelik tellerin kodlamaları;

A B XX / YY C D

şeklinde verilmektedir [12]. Burada, A:tel geometrisini, B:telin görünüşünü, XX: narinliği (uzunluk/çap), YY: telin uzunluğunu, C:telin kaplamasını ve D: çekme dayanımını ifade etmektedir.

### 2.1.3. Çelik Tel Donatılı Betonların Kullanım Alanları

Çelik tellerin betona belirli oranda katılmasıyla elde edilen ÇTDB'un çekme dayanımının yanısıra birçok mühendislik özelliklerinde de iyileşmeler elde edilmiştir. Çelik teller, basınç ve çekme kuvvetleri etkisi altında, tellerin çekme mukavemeti tam olarak kullanılmadan önce, beton matrisinde çok sayıda kılcal çatlakların meydana gelmesini ve çatlak yayılmasını önlenmektedir. ÇTDB'lar sünek davranış gösterirler, yani tepe yükü sonrası yük taşımaya devam ederler. Ayrıca kesme, burulma ve yorulmaya karşı dayanımları normal betonlara kıyasla daha yüksektir [5,27]. Dış etkilere karşı rötre, dökülme, parçalanma ve dağılmalara direnci yüksetir. Özellikle çekme mukavemetinde normal betona göre oldukça önemli artışlar gözlenir. Bütün bu üstün özelliklerinden dolayı çelik tellerin beton kullanılmasıyla kesitler daha küçülerek malzemedен tasarruf sağlanır, hatta bazı yapı uygulamalarında genellikle asal donatıya bile gerek kalmaz. Betonarme döşemelerde, betonarme döşeme kaplamalarında, fabrika işaatlarında, çeşitli mimari levhaların yapımında, küçük betonarme yapı elemanlarının yapımında çelik tel kullanılması avantajlı olmaktadır. Betonda çelik tel kullanmanın avantajları şu şekilde sıralanabilir

- a) Çelik teller çatlak oluşumunu, çatlak genişliklerini, çatlak sayısını ve kiriş deplasmanını önemli ölçüde azaltmaktadır.
- b) Erken yaştaki dayanımı arttırabilmek için prefabrik betonarme yapı elemanlarında çelik tel kullanılması ısıtma işlem ve priz hızlandırıcı kullanılmasına göre daha ekonomik olmaktadır.
- c) Çhacel obası sevcan orhanelik teller betonarme kirişin eğilme etkisindeki erken yaştaki taşıma gücü arttırılabilmekte, ayrıca erken yaştaki

betonarme kirişlerde yük tekrar kaldırıldığında çatlak genişliklerinin kapanma sağlamaktadır.

- d) Yüksek sünekliği sahip beton üretimine imkân vermektedir.
- e) Kaplama betonlarda, kenar ve köşelerin kırılmaya karşı dirençlerinin iyileştirmektedir.
- f) Taze betonun rötresinde azaltmaktadır.
- g) Geleneksel donatı yerleştirilmesindeki hataların ortadan kalkmasını sağlamaktadır.
- h) Geleneksel beton yollara kıyasla yapım süresi daha kısa olmaktadır.
- i) Beton elemanların bütün doğrultularda daha yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip olmasını sağlamaktadır.

Son zamanlarda çelik tel içeren betonlar üzerindeki araştırmalara paralel olarak bu betonların kullanım alanına gün geçtikçe artmaktadır. ÇTDB'ların kullanım alanları şu şekilde özetlenebilir:

- a) Püskürtme beton uygulamaları; Çekme donatısı kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde edilir. Kaplama kalınlığı, düz ve hasırlı olan beton kaplama kalınlıklarına oranla daha az olmaktadır. Ayrıca kırılmaya karşı yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı daha büyük bir süneklik sağlanır. Kazıların ve temellerin desteklenmesi, kanal kaplamaları, köprü mesnetlerinin korunması, bozulan deniz yapılarının ve köprülerinin onarımı, bazı sığınakların kaplamaları gibi uygulama alanları vardır. Ayrıca yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olmasından dolayı kaya ve toprak zeminlerin şev stabilizasyonu veya istinat duvarı yapımında da kullanılmaktadır.
- b) Yol kaplamaları; Beton yol kaplamalarında ve geleneksel yolların temel döşemesinde yükleri alt temele aktaran eleman olarak kullanılmaktadır. Genellikle yol temellerinde zayıf beton veya bitümlü malzeme kullanılır. Bu tür kaplamalar yüksek trafik yoğunluğu olan yerlerde büyük ölçüde yüzey düzensizliğine neden olurlar. Bunu karşılık çelik teller, oluşan çekme gerilmelerinin bir kısmını taşır ve çatlamaya karşı koyar. Ayrıca

yüksek trafik yoğunluğuna sahip yollarda büyük önem taşıyan, kırılma enerjisi ve eğilme dayanımı yüksek beton elde edilmesini sağlar. Bunun yanında, yol yapımında daha uzun bağlantı mesafelerinin uygulanmasına imkân verir. Yol kaplamalarında kullanılan ÇTDB'ların en belirgin avantajı normal betonlara kıyasla daha yüksek süneklığe sahip olmalarıdır. Ayrıca yüksek kırılma enerjileri ile bağlantı boyunca çatlakları ve yüzeylerin pullanma ile dökülmelerini büyük ölçüde azaltır ve önler [27]. Beton yollarda çelik tel kullanımı, geleneksel kaynaklı donatılı betonlara kıyasla daha ekonomiktir. Taşıma ve yerleştirme (işçilik dahil) maliyeti ÇTDB'lar da daha düşük olmaktadır. Ayrıca daha ince kaplamaya kalınlığına imkân vermesi ve donatının döşeme içerine gelişigüzel yerleştirilmesi gibi sorunların olmaması da çelik tellerin diğer üstünlüklerini göstermektedir.

- c) Su yapıları; Geleneksel betonlara kıyasla, yüksek süneklığı, aşınma ve darbeye karşı direnci, deniz ortamında bozunmaya karşı direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı su yapılarında kullanılmaktadır. Özellikle dalgakıran yapımında, dolu savak, savak yatağı ve savak kapakları, dinlendirme havuzu gibi su yapılarının tamir ve bakımda, açık kanal kaplamalarında, toprak dolgu barajların sızmazlığının azaltılması için yüzeylerinin ince kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca aşınma direnci yüksek olduğundan kavitasyon hasarlarına karşı kaplama olarak kullanılabilir [16].
- d) Endüstriyel zemin kaplamaları; Yük taşıma kapasitelerinin yüksek olması, çatlak kontrolü sağlanması, dinamik ve ani yüklemeler karşı yüksek direnç göstermesinden dolayı endüstri yapılarının zeminlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ambar ve hangar zeminlerinde, iskele ve rıhtım kaplamaları gibi kullanım alanları bulunmaktadır.
- e) Prefabrike yapı elemanların üretimi; Yüksek dayanıma, süneklığe ve dayanıklılığa sahip birçok prefabrike yapı elemanın üretiminde kullanılmaktadır. Bunlar, muayene bacaları, yağ ayırıcıları, transformatör kabinleri, yağmur suyu kolektörleri, atık su tankları, atık madde tankları,

cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, tünel segmanları, monoblok garajlar, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, atık depolama kutuları, ev mahzenleri, kablo kanalları, yalıtılmış duvar panelleri, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları, öngerilmeli çatı olukları, otobüs durakları, yiyecek kilerleri, tren tünellerindeki saklanma yerleri, baca elemanları, birleştirilmiş kanallar ve bakım yolu, demiryolu traversleri, demiryolu taban döşemesi, refrakter prekast elemanlar, istinat duvar elemanları, temel blokları, prekast banka kasaları ve kanaletlerdir [7].

- f) Stratejik yapılar; Sünekliliğin yüksek olması istenilen bu tür yapılarda kullanılabilir. Çelik tel donatılı betonların sünekliliği normal betonlara oranla yüksek olduğundan çarpma ve titreşim gibi dinamik yük etkilerine karşı daha dayanıklıdır. Bu nedenle depreme dayanıklı her türlü yapıda kullanılabilir. Bu nedenle depreme dayanıklı her türlü yapıda kullanılabilir.
- g) İnce kabuk yapılar; Kesit kalınlıklarının azaltılmasına imkân verdiği için ince kabuk yapılarda, kubbelerde ve mimari açıdan kalınlığı sınırlı olan yapı elemanlarında kullanılmaktadır [17].
- h) Güvenlik Yapılarında; Sığınaklar, sığınak kapıları ve güvenlik odalarının yapımında kullanılmaktadır.
- i) Patlama (infilak tesirlerine) karşı; Genellikle normal donatı çubukları ile birlikte kullanıldığında, güç santralleri ve askeri tesislerin yapımında çok uygun bir kullanım arz etmektedir.

#### **2.1.4. Çelik Tel Donatılı Beton Karışımı**

Çelik tellerin karışım içerisinde homojen olarak dağıtılması ve karışımından sonra da düzenli dağılımın korunmasının sağlanmasını çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmeyi doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle çelik tellerin karışım içerisinde üniform bir şekilde dağılmaları oldukça önemlidir. Şekil 2.4' de çelik tellerin taze beton içerisindeki dağılımı görülmektedir. Çelik tellerin karışım içerisinde homojen dağılımı harmanlama ve karıştırma işlemi sırasında yapılmalıdır.

Kimyasal katkı kullanılarak su azaltılması ile homojen dağılım her zaman sağlanamamaktadır. En uygun agrega tane karışımının sağlanması da iyi bir çözüm olmaktadır. Agrega karışımı maksimum yoğunluk elde edilecek şekilde seçilirse, bu durumda hamura daha az ihtiyaç kalacaktır. Bilindiği gibi taze betonun toplam rötresi, hamurun özelliklerine, çimento, su ve katkı miktarına, sıcaklık ve agrega tipine bağlıdır [5]. Su içeriğinin düşük olması daha az rötre demektir. Çimento hamuru-agrega bağına yakın bölgeleri (arayüzeyi) etkileyen en önemli etkenin su/çimento olduğu söylenebilir. Düşük su/çimento oranlarında ara yüzeyde düşük-yoğunlukta bir bölge elde edilmesine karşılık, ara yüzeyin bölgesinin genişliği azalmaktadır.



**Şekil 2.4** Çelik tellerin taze beton içerisindeki dağılımı.

Dairesel kesitli düz ve kancalı çelik tellerin betonun özellikleri üzerinde en etkin iyileştirmeyi yaptığı yapılan araştırmalarda ifade edilmektedir [8,28]. Beton karışımına katılan çelik tellerin narinlik oranı genellikle 20 ile 100 arasında ve hacimsel katılma oranları ise %0,5 ile %2,5 arasında değişebilmektedir. Katılım oranı arttıkça çelik telin karışım içerisinde topaklandığı ve homojen bir dağılım göstermediği, hatta basınç dayanımının normal betonun basınç dayanımına oranla düşük olduğu gözlenmiştir [29,30]. Çelik tel kullanım oranının yüksek oranda olması tellerin karışım içerisinde topaklaşmasına neden olmakta ve buna bağlı olarak ise matris içerisinde zayıf bölgeler ve büyük hava boşluklarına oluşabilmektedir. Bunun sonucunda da, çelik tellerin betonların özellikleri üzerindeki beklenen iyileştirme düşük seviyelerde kalabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, taze beton içerisinde

topaklanmayı önlemek ve işlenebilirliği istenilen düzeyde ayarlayabilmek için kullanılan çelik tel miktarı ve narinliği belirli oranların üzerinde olmaması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle bu sınır değerler tel hacmi için %2 ve narinlik için ise 100 olarak belirtilmektedir [27].

Narinlik oranı ve kullanılan lif miktarı ÇTDB'ların özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdendir [10,33]. Narinlik oranı bir çelik telin geometrik özelliklerini tanımlamak için kullanılan sayısal bir parametredir. Bu oran, dairesel kesitli teller için tel boyunun tel çapına oranı ve dairesel kesitli olmayan teller için ise eşdeğer lif çapına oranıdır. Kullanılan çelik telin narinliği azalırsa çelik tel-matris bağı kritik olmaktadır. Buna karşılık narinlik artarsa topaklanmaya ve homojen dağılımın elde edilememesine bağlı olarak karıştırma problemi artmaktadır [34]. Genel olarak yüksek tel narinliğinin betonlar üzerinde en önemli iyileştirmeler yapacağı beklense de, yapılan araştırmalarda tel narinliğinin, karıştırma, yerleştirme ve mastarlama işlemlerinde ortaya çıkan problemler nedeniyle sınırlanmasının gerekliliği ortaya konulmuştur [27,35].

Chang ve Chai (1995) birim hacimdeki çelik tel yüzey alanı artıca betonun işlenebilmesinin azaldığını ve çelik tellerin yeterli etki gösterebilmesi için su miktarının artırılması veya su azaltıcı katkı kullanılması gerektiğini ifade ettiler.

Chenkui ve Guafon (1995) çelik tel boyu/kaba agrega boyutu oranının dayanıma etkisi araştırdı ve bu oranın 1,5 ve 2 arasında değiştiğini belirttiler. Bu oranlar dışında çelik telin etkisinin daha az olduğunu belirttiler. Bu araştırmada, çelik tellerin kaba agrega-çimento hamuru ara yüzeyini iyileştirme eğilimi gösterdiği ve mikro çatlakların bu ara yüzeyde gelişmesinden dolayı çelik tel boyunun kısa olması durumunda çatlakları köprüleyemeyeceği ve çatlak genişlemesini durdurma etkisinin az olacağı belirtilmektedir. Buna karşılık, çelik tel boyunun çok büyük olmasının işlenebilmenin olumsuz etkileyeceği ve buna bağlı olarak betonun özelliklerinde beklenen iyileştirmelerin sağlanamayacağını ifade ettiler. Ayrıca, tel boyunun 35 mm. den küçük olmaması şartıyla, çelik tellerin sadece ince agrega içeren betonların takviyesinde değil, maksimum tane çapı 40 mm.'ye kadar olan betonların takviyesinde kullanılabileceğini belirttiler.

Yıldırım (1994) ve Taylor ve diğ. (1997) çelik tel kullanımının betonun işlenebilmeyi olumsuz etkilediğini, taze betonun çökme değerini düşürdüğünü ve VeBe işlenebilme süresini yükselttiğini belirttiler. Benzer olarak Eren ve Çelik (1997) beton takviyesinde kullanılan çelik tel çapının artmasıyla betonun VeBe süresinin arttığını ve buna bağlı olarak işlenebilmenin azaldığını ifade ettiler.

Bayramov ve diğ. (2002) işlenebilirliği etkileyen en önemli faktörlerin çelik tel narinliği ve tel hacmi olduğunu ifade ettiler. Çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğini azalttığını, özellikle uzun çelik tel kullanıldığında bu etkinin belirgin olarak görüldüğünü belirttiler. Ayrıca çelik tellerin taze betonun işlenebilirliğe etkisinin belirli bir seviyede tutmak ve betonun özellikleri üzerinde yapacağı iyileştirmenin korunması ve sağlanması için kullanılacak çelik tel hacminin ve narinliğinin sınırlandırmasının gerektiğini vurguladılar.

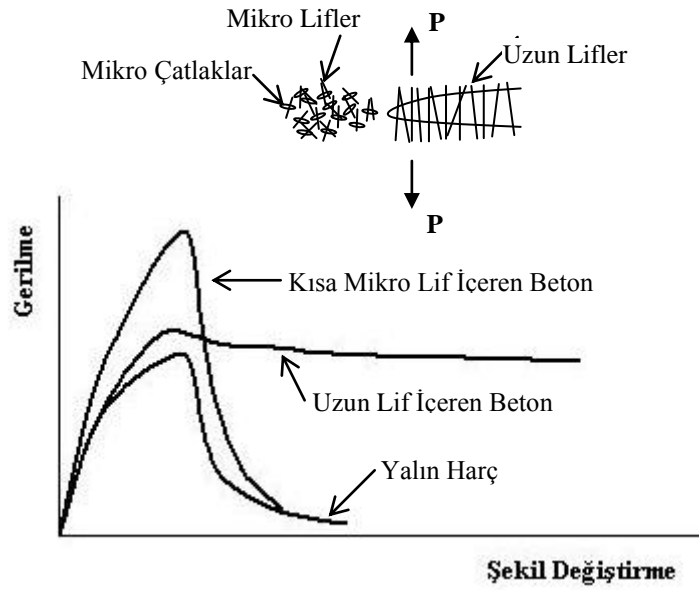
Soroushian ve Bayasi (1991) farklı tel tipleri kullanılarak yaptıkları çalışmalarda çelik tel tipinin taze betonun işlenebilmesini önemli ölçüde etkilediğini ifade ettiler. Çelik tel içeren taze betonların işlenebilmesinin kullandıkları bütün çelik tel tiplerinde normal betonlara kıyasla azaldığını, sadece kıvrımlı çelik tel içeren taze betonların işlenebilmesinde daha çok değişiklik olduğunu ve çelik tel narinliğinin belirli bir değerden fazla olmaması gerektiği sonucuna ortaya koydular.

### **2.1.5. Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı**

Beton içerisinde süresiz ve rastgele dağılı olarak bulunan çelik teller, yükler ve çevresel değişiklikler altında betonda çatlak oluşumuna ve yayılımına köprüleme etkisi yaparlar. Çelik teller çelik tel-matris bağı yeterli betonlarda uygun miktarda kullanılırsa, çatlak genişliğini küçük düzeyde tutar ve betonun tepe yükü sonrası büyük şekil değiştirme yaparak yük taşımasının devam etmesini sağlarlar. Bu şekilde yüksek sünekliğe sahip betonlar üretimine imkân verirler.

Yapılan araştırmalarda çelik tellerin genel olarak betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, darbe, yorulma ve çekme dayanımı arttırdığı ifade edilmektedir [42,47]. Çelik teller kendi çekme dayanımlarına ulaşıncaya kadar beton matrisinde basınç ve çekme yüklerinden dolayı

meydana gelecek olan çok sayıdaki kılcal çatlak oluşumunu önlemekte ve geçiktirmektedir. Bunun yanı sıra, çimento matrisi çelik telleri bir arada tutarak çelik teller vasıtasıyla gerilme transferi yapmakta ve bu şekilde kırılma birim uzamasını çelik tellere oranla düşük olan çimento hamurunda meydana gelebilecek kılcal çatlaklar önlenmektedir. Ayrıca, çelik teller çatlak köprüleme etkisi ve tutma başarısı ile betonun göçme modunda iyileştirme yaparlar. Farklı lif boyutlarına sahip liflerin çatlak köprüleme etkisi Şekil 2.5’ de verilmektedir [48].



**Şekil 2.5** Farklı lif boyutlarının çatlak köprüleme etkisi [14].

Çelik tellerin kullanılmasıyla betonun enerji yutma kapasitesi (sünekliği) ve çatlak direnci büyük ölçüde artar, ayrıca çatlak oluşumundan sonra yük taşıması sağlanır. Karışım içerisinde homojen bir şekilde dağılı bulunan çelik teller, betonun sertleşmesi sırasında çekme gerilmeleri ile hamur içerisinde oluşan çok sayıda küçük boşlukları ve çatlaklara karşı köprüleme etkisi yaparak rötre çatlaklarının oluşumunu ve gelişimini büyük ölçüde azaltır [7,49]. ÇTDB’ların normal betonlara kıyasla genel özellikleri Tablo 2.1’ de verilmektedir. Beton elemanların çatlak sonrası davranışları kırılma davranışlarının daha iyi anlaşılmasında büyük önem taşımaktadır. Gevrek matrislerde göçme çatlak sonrası ani olarak görülmektedir, buna karşılık çelik tel içeren betonlarda sünek olan teller matrisin çatlak sonrası yük taşımasının devam etmesini sağlar [27]. Çelik teller gevrek yapıya sahip betonun çekme şekil değiştirmesini artırarak betona yarı-süneklik kazandırır. Bundan dolayı çelik tellerin



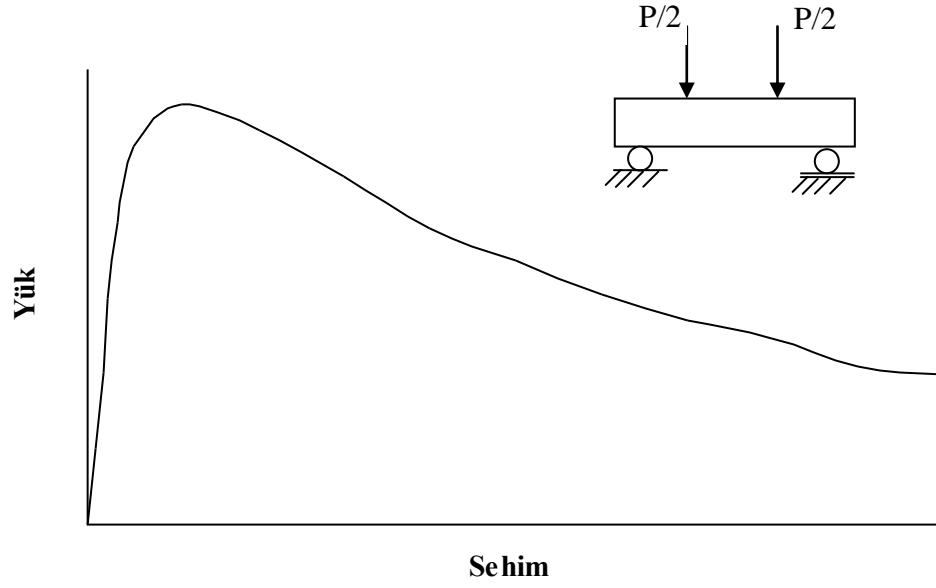
betonun çatlama dayanımı ve sünekliği üzerinde iyileşme yapması beklenen bir sonuçtur.

Çelik tellerin betonun çekme yükü taşıma kapasitesi arttırarak, taşıma gücüne erişmesine rağmen yük taşıma özeliği kazanmasını sağlarlar. Yani ilk çatlak yükünden sonra yüksek bir sünekliğe sahip olurlar, bu da kırılma enerjilerinin yüksek olmasını sağlar [32]. Şekil 2.6'de çelik tel donatılı bir kirişin eğilme altında tipik yük-sehim eğrisi görülmektedir. Çelik tel donatılı betonların maksimum yük taşıma kapasiteleri çelik tellerin beton matrisinden sıyrılma direncine bağlı olmaktadır. Çünkü çelik teller yüksek akma dayanımına sahip ve çelik donatı çubukları gibi büyük şekil değiştirme düzeylerine sahip olmadıklarından beton matrisinde bir noktaya kadar şekil değiştirme yaptıktan sonra matristen sıyrılma eğilimi gösterirler [34].

**Tablo 2.1** ÇTDB'ların normal betonlara kıyasla genel özellikleri [67].

Özellik	Açıklama
Aşınma Direnci	Kısmi olarak darbe aşınmasının neden olduğu mikro-kırılma çatlaklarını kontrol eder.
Yorulma Direnci	Düşük tel içeriklerinde bile 1.25–2 kat iyileşme
Donma-Çözünme Direnci	Donma-çözünme çevrimlerinin neden olduğu hasarın azaltabilir. Hava sürükleyici katkıların kullanılması önerilir.
Darbe Dayanımı	2-20 kat iyileşme.
Kopma Modülü	20–50 kg/m <sup>3</sup> çelik tel içeriklerinde ilk çatlak yükünde küçük değişiklik.
Önleşmiş Rötne	Düşük çelik tel içeriklerinde bile daha iyi gerilme dağılımı ile çatlak genişliklerinde %70' lere ulaşan azalma.
Kayma Dayanımı	Düşük tel içeriklerinde bile 1.25–2 kat artış.
Pullanma-Dökülme Direnci	Bütün matris içerisinde dağılan çelik tel takviyesi ile öncelikle bağlantı köşelerinin ve kenarlarının korunması.
Isı Şoku Direnci	Düşük çelik tel içeriklerinde bile önemli ölçüde iyileşme.
Basınç Dayanımı	Küçük değişiklik.
Tokluk	Düşük tel içeriklerinde bile en belirgin iyileşme.

Çelik tellerin betona katılmasındaki en önemli amaç, çatlak oluşumunu geciktirmek, çatlak genişliğinin olabildiğince küçük tutmak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerinin çelik teller tarafından karşılanmasını sağlamaktır. Matris içerisindeki çelik tellerin görevi büyük agregaları bir arada tutmak ve kenetlemek, ayrıca çimento hamurundaki mikro çatlakların açılmasını ve oluşmasını önlemektir. Çelik teller vasıtasıyla çatlak üzerinden gerilme transferi yapılarak, çatlak uçlarında daha düşük gerilme yığılması olması sağlanır ve böylece çatlak gelişimi önlenir.



Şekil 2.6 Çelik tel donatılı beton kirişlerin tipik yük-sehim eğrileri.

Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışları ilk olarak Romualdi ve Batson (1963) tarafından incelendi [50]. Bu araştırma sonucunda betonların eğilme dayanımındaki ve süneklikteki artışın çelik tellerin çatlakları köprüleme etkisine ve çelik teller arasındaki mesafeye bağlı olduğu belirtilmektedir. Aynı çalışmada çelik tellerin matris içerisindeki mevcut mikro çatlakların oluşumu geciktirmesi ve çatlak yayılmasını önlemesi için matris içerisinde yeterli miktarda bulunması ve dağılımının iyi olması gerektiği ifade edilmektedir. Matrisin çatlamasından sonra yüklerin bir kısmını taşıyan çelik teller köprü görevi görerek çatlakların ilerlemesi ve yayılmasını yavaşlatmakta ve böylece matrisin yük taşımasını sağlamaktadır. Bu mekanizma “çatlak köprüleme mekanizması” olarak adlandırılmaktadır [27]. Köprüleme mekanizmasını etkileyen en önemli etken ise çelik tellerin matristen sıyrılmaya dirençleri, yani çelik tel ile hamur arasındaki aderans olmaktadır. Çelik tellerin çatlaklara köprüleme etkisi yapabilmesi için matris ile yeterli aderansa sahip ve yeterli miktarda matriste bulunması gerekir. Çelik tellerin uçlarının kancalı olması ise tellerin matristen sıyrılmaya dirençlerini artırır [35].

Süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki farklılıklar ÇTDB’ ları normal betonlardan ayıran en önemli özelliklerdir. Çelik teller kendi çekme dayanımları ve çekme şekil değiştirme kapasiteleri yüksek olduğundan matrisin ilk çatlak oluşumundan sonra

daha fazla yük taşımasını sağlarlar. Bu şekilde gevrek olan matris, elastik ve daha fazla şekil değiştirebilen bir yapıya dönüşmesi sağlanır ve buna bağlı olarak matris daha sünek bir yapıya kavuşur. Matrisi çatlaması sonrası çelik teller tarafından taşınan yüklerin etkisi ile çelik teller şekil değiştirmeye başlar ve yükün artması ile teller matristen genellikle sıyrıma veya kopma eğilimi gösterirler. Maksimum yüke (tepe yüküne) ulaştıktan sonra göçme çelik tellerin matristen tamamen sıyrılmasıyla veya kopmasıyla meydana gelir. Çelik tellerin sıyrıma veya kopma eğilimi göstermeleri matris ve çelik tel dayanımına bağlı olmaktadır. Zayıf matris dayanımında genellikle çelik teller fazla uzama yapmadan sıyrıma eğilimi gösterirken, yüksek matris dayanımına sahip betonlarda ise çelik teller büyük şekil değiştirme yaparak kopma eğilimi gösterirler [23].

ÇTDB'ların kırılma enerjilerinin çelik telin narinliğinin artmasıyla arttığı, ayrıca iki ucu kancalı tellerin düz olanlara kıyasla daha yüksek sıyrıma yüküne sahip olduğu ifade edilmektedir [25,51]. Günümüzde geleneksel çubuk donatıların çekme dayanımlarının 2-4 katı olan yüksek karbonlu çelik teller üretilmektedir.

Taşdemir ve diğ. (2002) ÇTDB'ların tepe noktası sonrası davranışını ve tokluğunu etkileyen en önemli iki faktörün çelik tel miktarının ve narinliğinin olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, bu iki parametrenin artmasıyla su yapılarında kullanılacak olan betonun mekanik özelliklerini büyük ölçüde iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Bayramov ve diğ. (2002) çelik tel içeriği ve narinliğinin artmasıyla betonların göçmeye kadar enerji yutma kapasitelerinin arttığını ve betonların normal betonlara kıyasla daha sünek bir davranış gösterdiğini ifade ettiler.

Lange-Kornbak D. ve Karihaloo B.L. (1998) yaptıkları araştırmada, ÇTDB'ların kırılma enerjisi miktarının kullanılan çelik telin boyunun karesi ile doğru orantılı ve tel çapının karakökü ile de ters orantılı olduğunu belirttiler.

Swamy ve Mangat (1974), çelik tel içeren betonlarda ilk çatlağın telin sıyrılmasından oluştuğunu, nihai göçmenin ise göçme bölgesindeki köprüleme yapan çelik tellerin sıyrılması ve yüzeysel kopma gerilmelerinin maksimum çimento hamuru-çelik tel aderans dayanımına ulaşması ile meydana geldiğini ifade etmişlerdir.

Ramakrishnan ve diğ. (1989) farklı tel tiplerinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki araştırmışlardır. Bu çalışmada kancalı uçlu ve düz çelik teller kullanarak betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi, tepe-noktası yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitelerini belirlemişlerdir. Araştırma sonucunda ise, kancalı uçlu çelik tellerin düz çelik tellere kıyasla betonların bahsedilen özellikleri üzerinde daha iyi performansı gösterdiğini ve ilk çatlak yükünü %90 ve eğilme dayanımını %129 artırdığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, Balaguru ve diğ. (1992) kancalı uçlu çelik tellerin, burgulu ve sonlaşmış çelik tellerden daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Soroushian ve diğ. (1995) ise ÇTDB'larda en iyi performansın daha ince uzun ve dayanımı yüksek olan çelik tellerin gösterdiğini ve ayrıca bu tellerin en yüksek matris-lif aderans dayanımı sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Chang ve Chai (1995) çelik tel narinliğinin etkisini araştırmışlar ve narinlik oranı artıkça ilk çatlak yükü değerinin arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca matris içerisinde rastgele dağılı bulunan teller arasındaki mesafenin 8 mm'den az olduğunda ÇTDB'nun ilk çatlak yükünde büyük artış gözlemlendiği ifade ettiler.

Balendran ve Zhou (2002) çelik tel içeren betonların boyut etkisini araştırmışlar ve betona katılan çelik tel hacminin yeterli olması durumunda ( $>3\%$ ) sünekliği oldukça yüksek olan betonlar üretilebileceğini, ayrıca boyut etkisinin ihmal edilecek düzeyde olduğunu ifade etmişlerdir. Buna karşılık, düşük tel içeriklerinde boyut etkisi görüldüğünü ve çelik tel donatılı betonlarda boyut etkisinin önemsiz olması için kritik boyutun 150 mm aşması gerektiği belirtmişlerdir.

## **2.1.6. Çelik Tellerin Betonun Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkileri**

### **2.1.6.1. Basınç Dayanımı**

ACI Committe 544 [24] çelik tellerin betonun basınç dayanımına etkisi eğilme ve çekme dayanımlarına nazaran daha az olduğu ifade etmektedir. Ayrıca, %1,5 çelik tel içeriğinde betonların basınç dayanımlarında %0 ile %15 arasında bir artış olabileceğine yer verilmektedir. Çelik tel geometrisi ve matris dayanımı ÇTDB'ların basınç dayanımının etkileyen en önemli faktörlerlerdir [56]. Çelik tel donatılı

betonlarda yüksek dayanım isteniyorsa, geleneksel betonlarda olduğu gibi silis dumanı ve kimyasal katkıların ortak kullanılması yararlı olmaktadır [22].

Çelik teller kullanımı ile yüksek dayanımlı betonların oldukça dik olan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında belirgin bir şekilde değişiklikler elde edilmiş ve keskin olan şekil değiştirme-yumuşama davranışındaki değişiklik ile basınç tokluğunu artırmıştır [22,57]. Basınç altında enerji yutma kapasitesindeki artış genel olarak kullanılan çelik tel miktarı ve narinliğine bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan çelik tel miktarı ve narinlik arttıkça basınç tokluğu artmaktadır [58]. Karışım içerisindeki tel hacmi belirli sınırın üzerinde olması durumunda ise matris fazında homojenlik bozulmakta ve kusurlar artmaktadır, buna rağmen basınç altında tokluk ise yine de artmaktadır.

Williamson (1974) ve Naaman ve diğ. (1974) yaptıkları çalışmada, çelik tellerin harçların basınç dayanımına etkisi olmadığını, ancak betonların basınç dayanımlarında %23 artış yaptığını ifade ettiler. Otter ve Naaman (1988) ise çelik tellerin düşük dayanımlı betonların basınç dayanımlarının donatısız olan yalın betonlara oranla büyük ölçüde arttırdığını ve bu artışın çelik tel hacmine bağlı olduğunu belirttiler. Ayrıca kancalı uçlu çelik tellerin betonun basınç dayanımındaki iyileştirmenin düz olanlara kıyasla daha fazla olduğunu ifade ettiler.

Soroushian ve Bayasi (1991) farklı çelik tellerin basınç altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Kancalı uçlu çelik tellerin kıvrımlı ve düz çelik tellere kıyasla betonların basınç tokluğunda daha fazla iyi iyileştirme yaptığını ifade ettiler. Bunun yanı sıra, çelik tel geometrisinin basınç dayanımına etkisinin olmadığını belirttiler.

Ezeldin ve Balaguru (1992) kancalı uçlu çelik teller ile silis dumanın basınç tokluğuna ortak etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına bağlı olarak, silis dumanı içeren ve içermeyen betonların basınç tokluklarını büyük ölçüde arttırdığını, basınç dayanımı ve tepe gerilmesine karşı gelen şekil değiştirmesini ise çok az arttırdığını ifade ettiler.

Marar ve diğ. (2001) yüksek dayanımlı çelik tel donatılı betonların basınç altındaki kırılma enerjisinin çelik tel içeriği ve narinliğin artmasıyla arttığını ifade ettiler.

Gerilme–şekil değiştirme eğrisinde, tepe noktasından sonra eğrinin dūřen kısmın eğiminin tel hacmi arttıkça azaldığını ve ayrıca tepe noktası basınç değerine karşı gelen şekil değiştirmenin çelik tel hacminin artmasıyla arttığını ifade etmişlerdir.

### 2.1.6.2. Elastisite Modülü

Çelik ve cam gibi yalın malzemelerin elastik modüllerinin deneysel belirlenmesi ve uygulamada kullanılması, ÇTDB’lar gibi farklı malzemelerden elde edilen kompozit malzemelere göre daha kolay olmaktadır. Bunun nedeni kompozit malzemelerin elastisite modüllerini etkileyen malzeme özelliklerinden dışında parametrelerin de olmasıdır. Literatürde, kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin belirlenmesi için çok sayıda model bulunmaktadır. İki malzemeden yapılmış kompozitler için verilen en basit model, malzemelerin kompozit içerisindeki hacim oranları ve malzemelerin elastisite modellerine bağlı olarak belirlenmesini içeren üst sınır ve alt sınır modelleridir. Çelik tel donatılı kompozitler için ise, çelik telin sürekliliği, dağılımı, yönlenmesi ve narinliği gibi parametreleri içeren modeller geliştirilmiştir [62].

Halpin ve Tsai (1969) elastisite modül için üst sınır ve alt sınır modellerde verilen eşitliklerin birleşimini içeren bir model önermiştir. Çelik tellerin matris içerisinde rastgele dağılı bulunması durumunda önerilen modelde ÇTDB’ların elastisite modülünü ( $E_c$ );

$$E_c = (3/8)E_{cL} + (5/8)E_{cT} \quad (2.1)$$

formülüyle ifade etmişlerdir. Burada,  $E_{cL}$  boyuna,  $E_{cT}$  ise enine doğrultudaki elastisite modülü olarak verilmektedir.

Yapılan araştırmalarda genel olarak çelik tel kullanımıyla betonların elastisite modülleri normal betonlara göre arttığı ifade edilmektedir [64,65]. Ayrıca ÇTDB’ların elastisite modüllerinin, çelik telin narinlik oranı ve miktarı, malzemelerin elastik modülleri, telin matris içerisindeki konumu ve tellerin süreklilik ve süreksizlik durumlarının yanı sıra, çelik tel-matris ara yüzeyindeki aderans karakteristiklerine bağlı olduğunu belirtilmektedir [64,66].

Swamy ve Mangat (1974) hacimce %2 çelik tel içeren betonların dinamik elastisite modüllerinin normal (donatısız) betonlara oranla %5 değişiklik gösterdiğini ve buna bağlı olarak ÇTDB'ların statik elastisite modülleri verilen klasik modellerin dinamik elastisite modüllerinin belirlenmesinde de kullanılabileceğini ifade ettiler. Benzer şekilde Shah ve diğ. (1978) ve Fanella ve Naaman (1985) çelik tellerin betonun gerilme şekil-şekil değiştirme eğrisinin artan kısmını çok az etkilediğini, hatta hacimce %4 çelik tel içeren betonların bile elastisite modüllerinin normal betonlara kıyasla fazla değişmediğini belirttiler. Benzer sonuçlar Ezeldin ve Lowe (1991) tarafından yapılan araştırmada da elde edilmiştir. Najm ve Naaman (1995) ise kompozit malzemelerin elastisite modülleri için önerilen modellerde yer alan parametrelere ek olarak, çelik tel boyu veya narinliğinin, tel yönlenmesinin ve tel-matris arayüzeyin de dikkate alınmasının önemini vurguladılar.

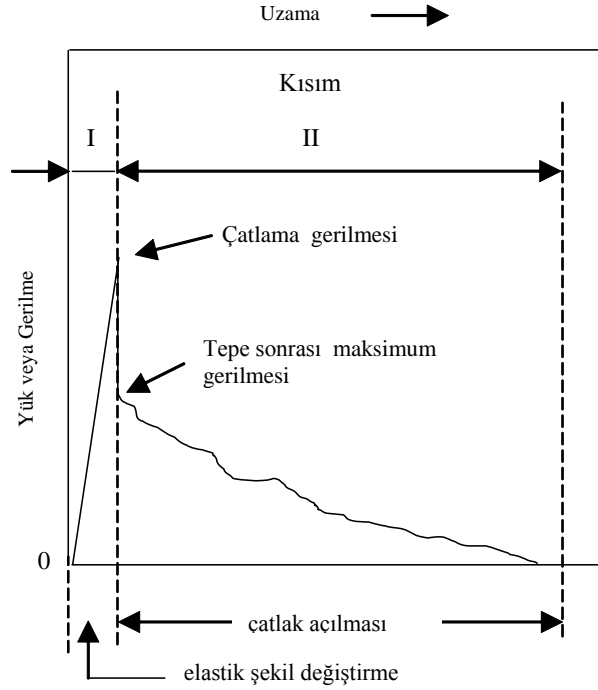
### **2.1.6.3. Çekme Dayanımı**

Çimento esaslı kompozitlerin çekme altında gevrek göçme davranışı gösterdiği, ayrıca küçük çekme şekil değiştirme kapasitelerine sahip olduğu bilinmektedir. Çelik tellerin bu tür malzemelerin üretiminde kullanılmasıyla çekme özelliklerini donatı ile takviyesiz olan matrislere kıyasla kısmen güçlendirirler. Öyleki, çekme özelliklerindeki bu iyileşme kayda değer seviye olmaktadır. Genel olarak, betonların çekme dayanımlarını belirlemek için henüz standart deney numunesi bulunmamaktadır, ancak numune şekli ve boyutuna, ölçü boyuna, ölçü boyu içerisindeki oluşan çatlak sayısına, yükleme durumuna ve deney cihazının rijitliğine bağlı olarak çekme dayanımı-çekme şekil değiştirme eğrileri elde edilmekte ve yorumlanmaktadır. Çelik tellerin betonların çekme davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktaki en büyük zorluk, ilk ana çatlağın genişlemesiyle devam eden tepe yükü sonrası çatlak davranışının belirlenmesidir.

Gevrek olan betonun çekme şekil değiştirme kapasitesi çelik teller kullanılmasıyla arttırılır ve beton yarı-sünek özellik kazanır. Bu nedenle çelik tellerin betonun çekme dayanımı ve tokluk özelliklerinde iyileşme yapması beklenen bir davranıştır. Çelik tel katılmasıyla betonun çekme dayanımı çatlak sonrası artış gösterir, ancak bu artış geleneksel çelik donatı çubuklarının gösterdiği artışa oranla oldukça düşüktür.



Yapılan araştırmalarda, çekme tokluklarının çelik tel tipine ve kullanım hacmine bağlı olarak arttığı ve bu artışın çelik tellerin matris ile aderansına ve matristen sıyrılma direncine bağlı olduğu ifade edilmektedir [70,72]. Buna karşılık, çelik tel tipinin ve miktarının ise genellikle ilk çatlak yükünü etkilemediği kabul edilmektedir [27,74].



**Şekil 2.7** ÇTDB'ların tipik çekme gerilmesi-çekme şekil değiştirme eğrisi [75].

Şekil 2.7'de hacimce %3'den daha az çelik tel içeren ÇTDB'ların tipik çekme gerilmesi-çekme şekil değiştirme eğrisi verilmektedir [75].

#### 2.1.6.4. Yarmada Çekme Dayanımı

Çelik tellerin betonların yarmada çekme dayanımları üzerinde yaptığı iyileşme, onun tek eksenli çekme ve eğilme dayanımları için yapılanlara kıyasla daha az olmaktadır. ÇTDB'ların tek eksenli çekme, basınç ve eğilme dayanımlarını etkileyen narinlik, çelik tel hacmi, çelik tel tipi matris özellikleri vb. gibi bütün parametreler yarmada çekme dayanımını da etkilemektedir [10,77]. Kancalı uçlu ve uzunluğu boyunca çentikli tellerin yarmada çekme dayanımında daha etkili olmaktadır.

Gao ve diğ. (1997) çelik tel kullanılmasıyla betonların yarma dayanımlarında büyük artış olduğunu ve bu artışın ise çelik tellerin çatlak köprüleme özeliğine bağlı olduğunu ifade ettiler. Ayrıca maksimum yarmada çekme yükünün çelik tel narinliğinin ve miktarının artmasıyla arttığını belirttiler. Benzer olarak, Taylor ve diğ. (1997) ve Lim ve Oh (1987) de çelik tellerin betonun yarma dayanımlarını artırdığını ifade ettiler.

#### **2.1.6.5. Eğilme Dayanımı**

Çelik tellerin betonlar üzerindeki en iyi iyileştirmeleri onun eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu üzerindeki yaparlar. ÇTDB'lar yüksek eğilme rijitliğine sahip olduklarından servis yükleri altında daha elemanlarda çatlak genişliği daha az olur. Ancak, çelik tel kullanımı ile eğilme dayanımındaki iyileşme geleneksel olarak kullanılan donatı çubuklarının gösterdiği iyileşme potansiyeline karşı oldukça yetersiz kalmaktadır. Çelik tel donatılı betonların eğilme davranışını ve dayanımını etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır. Bunlar; çelik tel tipi ve şekli, tel boyu, narinliği, tel hacmi, matris içerisindeki yönelmesi, matris-tel aderans özellikleri ve çelik telin matristen sıyrılmaya direnci olarak sıralanabilir. Bunların yanı sıra, işlenebilirliği etkileyen su/çimento oranı, hava içeriği ve yoğunluk gibi parametreler de etkili olmaktadır. Nihai eğilme dayanımının ise tel hacmine, boyuna, aderans özelliklerine ve telin çekme dayanımına bağlı olarak literatürde ifade edilmektedir [8,64]. Yapılan araştırmalarda matris içerisindeki çelik teller arasındaki mesafelerin ilk çatlak yükünü etkileyen en önemli etken olduğu ifade edilmektedir [50,79]. Buna karşılık, bazı çalışmalarda ise ilk çatlak yükünün sadece teller arasındaki mesafe yaklaşımı ile tahmin edilemeyeceği ifade edilmektedir [14,73]. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda ise çelik tel narinliği, tel hacmi ve telin matris içerisindeki yönelmesinin ilk çatlak yükünde daha etkili olduğu vurgulanmaktadır [8,77]. ÇTDB'ların eğilme dayanımında ve sünekliğindeki iyileşmelerde çelik tellerin çatlak tutmaya karşı yetenekleri ve matristen sıyrılmaya dirençleri belirleyici rol oynar. Yapılan araştırmalarda kancalı uçlu çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi iyileştirmeyi sağladıkları gözlenmiştir [8,64].

Ramakrishnan ve diğ. (1989) kancalı uçlu, düz ve kıvrımlı çelik tellerin betonların ilk çatlak yükü, eğilme dayanımı, tokluk indisi, tepe-noktası sonrası yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitelerine etkisini araştırdı. Çelik tellerin betonların ilk çatlak yüklerinde %15 ile %90 ve statik eğilme dayanımlarında ise %15 ile %129 arasında değişen artışlar sağladığını, kancalı uçlu tellerin ise en fazla iyileştirmeyi yaptığını ifade ettiler. Ayrıca topaklanmaya neden olmaması için kancalı uçlu tel hacminin için %1 ile fazla kullanılmaması gerektiğini vurguladılar. Benzer şekilde Balaguru ve diğ. (1992) kancalı uçlu çelik tellerin, kıvrımlı ve sonlaşmış çelik tellere göre ÇTDB'ların ilk çatlak yükü ve eğilme tokluğu üzerinde en iyi performans gösterdiğini ifade ettiler. Benzer sonuçlar Banthia ve diğ. (1994) tarafından da ifade edildi.

Gao ve diğ. (1997) çelik tel narinliği ve içeriğinin artmasıyla maksimum yükün arttığını ve betonların eğilme dayanımlarında normal betonlara kıyasla büyük artış olduğunu ifade ettiler.

Banthia ve Trottier (1995) çelik tel geometrisi ve matris dayanımı eğilme tokluğu etkilediğini, en önemli etkenin ise çelik tellerin matristen sıyrılma direnci olduğunu belirtti.

#### **2.1.6.6. Darbe ve Yorulma Dayanımı**

Çelik teller betonların çekme dayanımı ve sünekliğini arttırdığından, betonların çatlamaya karşı dirençlerini ve hasar düzeylerini sınırlamadaki kabiliyetlerini büyük iyileştirmektedir. Bunun yanı sıra, matris içerisinde mevcut veya oluşan çatlakların ilerlemesini ve yayılmasına karşı gösterdikleri köprüleme etkisi ile betonların yük altında darbe ve yorulma karşı daha dirençli olmalarını sağlamaktadır. Buna bağlı olarak, betonların darbe ve yorulma altındaki hasar düzeyleri çelik tel kullanılmasıyla azaltılmaktadır. Çelik tellerin matris içerisinde çatlakları köprüleme etkisi ve çatlak sonrası yük taşıma özeliği ile kazanılan yüksek süneklik, tekrarlı yükler altında ÇTDB'ların göçmeye karşı dirençleri normal betonunkilere oranla daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda betonların darbe dayanımları çelik tel kullanılmasıyla 2–20 kat arttabildiği ve yorulma dayanımlarının ise düşük tel içeriklerinde bile 1.25–2 kat iyileşme görüldüğü ifade edilmektediri [11,27]. Darbe ve

yorulma dayanımındaki bu iyileşmeler, özellikle tekrarlı dinamik yükler altındaki havaalanı, karayolu kaplama betonları ve endüstriyel zemin beton uygulamalarında önemli olmaktadır.

Ramakrishnan ve diğ. (1989) ÇTDB'ların betonların eğilme altında yorulma ve darbe dayanımına çelik tel tipinin etkisini araştırdılar. Çelik tellerin betonların eğilmede yorulma dayanımını arttırdığını, darbe dayanımlarını ise çok az arttırdığını ifade ettiler. Kancalı uçlu çelik tellerin betonların yorulma ve darbe dayanımı üzerinde en iyi iyileştirmeyi yaptığını, buna karşılık düz olanların ise daha az iyileştirme yaptığını belirttiler. Benzer sonuçlar Batson [80] tarafından da elde edildi.

Yan ve diğ. (1999) silis dumanını ve çelik telin betonların darbe ve yorulma dayanımlarına ortak etkisini araştırdılar. Silis dumanı ve çelik telin betonların darbe ve yorulma dirençlerini büyük ölçüde iyileştirmeler yaptığını belirttiler. Ayrıca, silis dumanı ve çelik telin birlikte kullanılmasının, silis dumanı ve çelik telin ayrı ayrı kullanılmasından daha etkili olduğunu belirttiler.

Marar ve diğ. (2001) betonların darbe direncinin çelik tel hacmine bağlı olarak arttığını, hacimce %2 çelik tel içeren ve narinliği 83 olan ÇTDB'ların darbe dayanımlarının çelik tel içermeyen betonların darbe dayanımlarınının 74 katı olduğunu belirttiler.

#### **2.1.6.7. Tokluk**

ÇTDB'ları çelik tel tel içermeyen betonlardan ayıran en belirgin iki özellik eğilme dayanımı ve eğilme tokluğudur. Tokluk genel olarak sünekliliğinin bir ölçüsüdür ve malzemelerin enerji yutma kapasitelerini gösteren bir parametredir. Çelik tel donatılı betonlarda tokluk, çatlağın konumuna, çelik tel tipine, tel hacmine, matris içerisindeki yönelmesine ve telin matristen sıyrılmaya direncine bağlı olmaktadır [9,39] Kullanılan çelik tellerin kancalı, kıvrımlı veya yüzeylerinin pürüzlü olması, matristen sıyrılmaya direnci de çatlak kontrolü açısından önemli olduğu gibi tokluğun artırılmasında da büyük etkisi vardır.

Betonların tokluk değerleri yük-sehim eğrisi altında kalan alandır ve enerji yutma kapasiteleri olarak tanımlanır. ÇTDB'ların toklukları genellikle çentikli veya

çentiksiz prizmatik kiriş numuneler üzerinde yapılan eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrileri kullanılarak belirlenir.

ÇTDB'ların eğilme tokluk düzeylerinin belirlenmesi için deney yöntemleri ve şartnameler bulunmaktadır. Bunlardan en sık kullanılanları ÇTDB kirişler için ASTM (American Society of Testing Materials), JSCE (Japan Society of Civil Engineering), RILEM ve EN (European Norm) tarafından önerilen deney yöntemleridir [82,85].

Banthia ve diğ. (1994) çelik tellerin betonun eğilme tokluğunun önemli ölçüde arttığını ve kancalı uçlu çelik tellerin diğer tel tiplerine göre toklukta iyileşmesinde daha etkili olduğunu belirttiler.

Şahin ve Köksal (2011) ÇTDB'ların tokluklarında iyileşmenin çelik tel çekme dayanımı ve matris dayanımının uyumuna göre değişiklik gösterdiğini ifade ederek, yüksek dayanımlı betonlarda yüksek çekme dayanımına sahip çelik tel kullanımının performansı büyük ölçüde arttırdığını belirttiler

Moyson ve diğ. (1994), genel olarak, ÇTDB'ların eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu belirgin iyileşmeler olduğunu, ilk çatlak yükünün (veya dayanımının) ise beton özelliklerine bağlı olduğunu ve çelik tel etkili olmadığını ifade ettiler.

Banthia ve Trottier (1995) farklı çelik tel ve matris dayanımına sahip betonların tokluklarını araştırmışlardır ve tellerin matristen sıyrılma direncinin tokluk artışında en önemli etken olduğunu ve en iyi etkiyi ise kancalı uçlu tellerin yaptığını vurguladılar.

Balendran ve Zhou (2002) ÇTDB'larda boyut etkisinin tokluk indisleri üzerindeki etkisini araştırmışlar ve numune boyutu artıkça tokluk değerinin azaldığını belirtmişlerdir.

## **2.1.7. Çelik Tellerin Betonun Dürabilite Özellikleri Üzerindeki Etkileri**

### **2.1.7.1 Korozyon**

Çelik teller donatılı betonlarda korozyon (paslanma) etkisi ilk akla gelen soru olmaktadır. Genel olarak betona içerisindeki çelik teller betona gömülü olduğundan ve yüzeyde kalanların az olması nedeniyle paslanmaya bağlı olarak oluşacak genişleme kuvvetleri sınırlı düzeyde kalmakta ve genelde beton yüzeyinde pullanma görülmemektedir. Buna karşılık, betonun yüzey tabakasına çok yakın olarak bulunan çelik teller düşük yüzey karbonatlaşma derinliğinden dolayı hızlı bir şekilde paslanmaya ve betonda pas rengi yüzeylerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu durum istenmeyen estetik bir kusur olarak ortaya çıkar. Uygulamalarda daha çok düşük karbonlu çelik tel kullanıldığı için çelik tellerdeki paslanma geleneksel betonlarda kullanılan donatı paslanmalarına oranla daha az olmaktadır. Ayrıca süreksiz bir şekilde beton matrisinde bulunan çelik tellerin elektriksel iletkenliğinin süreksiz olması da paslanma açısından bir üstünlük olarak kabul edilebilir. Çelik teller beton matrisindeki çatlakları çapraz keserek yük taşıma sürekliliği sağlamakta ve çatlakların genişlemesini önleyerek çelik tellerin korozyondan bozulmasını engellemektedirler. Çelik tellerin betonuna iyi bir biçimde gömülmesi için su/çimento oranı belirli miktarlarda olması gerekmektedir. Kohezyonu uygun bir betonda çelik teller vibratörlü master uygulaması sırasında betona iyi bir şekilde gömülmektedir.

### **2.1.7.2. Sünme ve Büzülme**

Bilindiği gibi beton kuru ortamlarda büzülür. Büzülmenin gelişimi ve miktarı ise malzemelerin özellikleri de dâhil olmak üzere, sıcaklık ve ortamın nemine, betonun yaşına ve kütlesine bağlı olmaktadır [28]. Betonun rötresi kısıtlanmadığı sürece çekme gerilmesi oluşmaz ve beton çatlamaz. Rötire çatlakları özellikle perde, döşeme ve beton kaplamalarında sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Çelik tellerin beton matrisine katılmasıyla rötire çatlaklarını azaltılabilmektedir. Betonlar elemanlar mesnet durumlarından dolayı rötresi kısıtlandığı için çatlama eğilimi gösterirler. Çelik tel miktarı ÇTDB'lerin sünme ve büzülme özelliklerini etkileyen çelik tel ile ilgili en önemli parametredir. Bu nedenle çelik tellerin sünme ve büzülme özellikleri

üzerinde iyileştirme yapması için matris içerisinde etkili olacak şekilde uygun miktarda bulunması gerekir. Düşük çelik tel miktarlarında bile çatlak genişliklerinde %70' lere ulaşan azalma görülebilmektedir [27].

Kayali ve diğ. (1995) yaptıkları araştırmada, çelik tel donatılı betonların rötre çatlaklarının normal betonlara kıyasla daha az olduğunu ifade etmişlerdir.

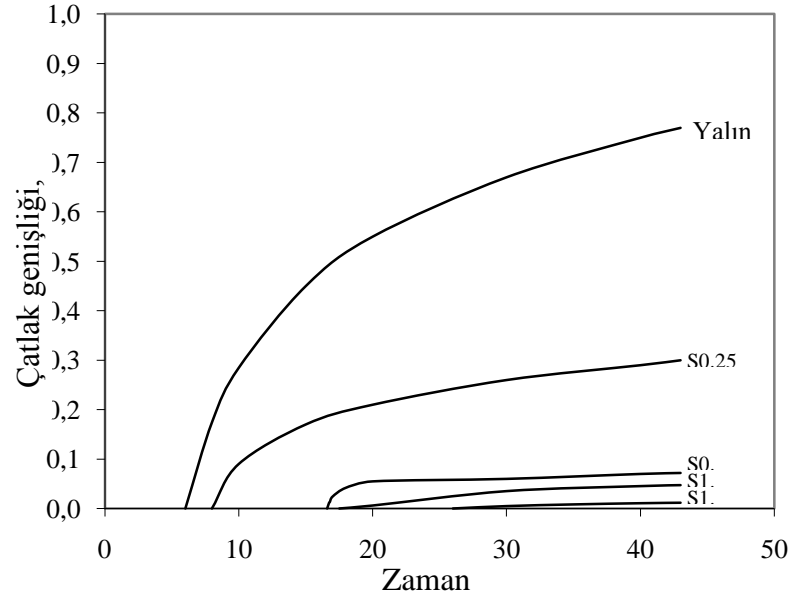
Grzybowski ve Shah (1987) çelik tel miktarının betonların büzülme çatlamaına etkisini araştırmışlardır. 20 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeriğinde bile betonda çatlak genişliğinin azaldığını ve yalın betonda ortalama büzülme çatlak genişliği 1 mm iken çelik tel içeren betonlarda bu değerin 0,2 mm'den daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Bu araştırma sonucunda elde edilen çatlak genişliği-zaman ve çatlak genişliği-çelik tel hacmi ilişkileri sırasıyla Şekil 2.8 ve 2.9' da verilmektedir.

Edgington (1973) ise 12 ay boyunca sünme etkisine maruz bırakılan ÇTDB'ların sünme şekil değiştirmelerinin normal betonlarınkinden farklı olmadığını ifade etti.

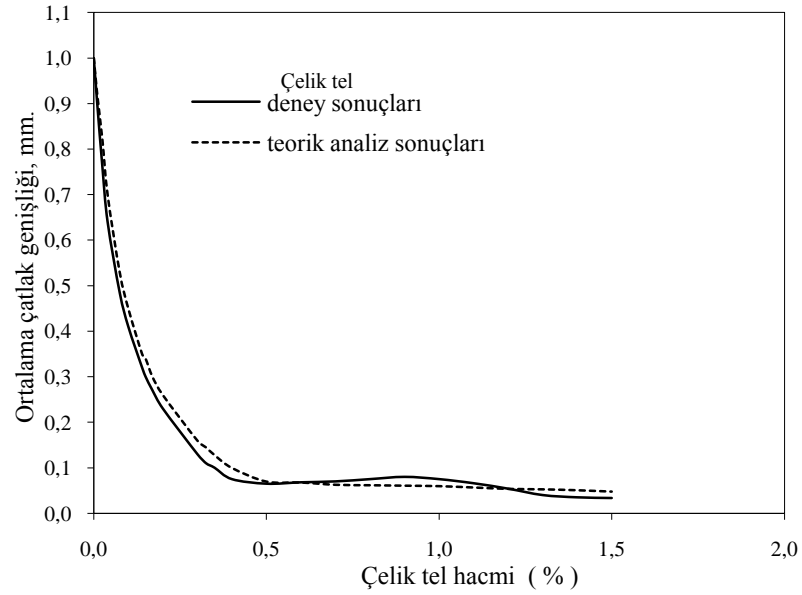
Swamy ve Stavrides (1979) yaptıkları araştırmada çelik tellerin ile çatlak miktarını ve çatlak derinliğini azaldığını ifade ettiler.

### **2.1.7.3. Donma-Çözülme**

Çelik tellerin betonun donma-çözülme direncine önemli bir etkisi olmadığı söylenebilir. Geleneksel betonların dayanıklılığı için geçerli uygulamalar ve hava sürüklenme kriterleri ÇTDB'lar için de kullanılmalıdır. Çelik teller mikro çatlak oluşumunu ve yayılmasını geciktirdiğinden donma-çözülme esnasında betonun göçme ve hasar görmesini yavaşlatmaktadır. Ancak, göçme modundaki bu iyileşme çelik telin çatlak köprüleme etkisine ve çatlak-tutma becerisine bağlı olmaktadır. Beton içerisinde rastgele dağılı olarak bulunan çelik tellerin betonun boşluk oranına ve doygunluk derecesine bir etkisi olmadığından çözülme sırasında beton yüzeyindeki oluşabilecek pullanmayı önleyememektedir. Bu nedenle, ÇTDB donma çözülme etkisinde kütle kaybı normal betonlardakine benzer olmaktadır [49].



Şekil 2.8 Farklı tel hacimlerinde çatlak genişliği-zaman ilişkisi [88].



Şekil 2.9 Ortalama çatlak genişliği-çelik tel hacmi ilişkisi [88].

Balaguru ve Ramakrishnan (1989) su/çimento oranı 0,40 ve çimento miktarı 415 kg/m<sup>3</sup>'den az olan ÇTDB'ların donma-çözülme direncinde en az %6 hava sürüklenmesi durumunda iyileşme görüldüğünü ifade ettiler.

Vares (1992) farklı tel içeriklerinde donma-çözünme etkisine maruz ÇTDB'ların mikro yapısını inceledi. %2 ve %4 çelik tel ilave edilmesiyle elde edilen betonların 100 ve 200 çevrim sonunda (suda saklanan) donma dirençlerini belirlemek için



tokluklarındaki ve mikro yapılarındaki değişikliklere inceledi. 200 çevrim sonunda ÇTDB'ların mikro yapılarında ciddi hasarlar oluşmadığını belirtti.

Mu ve diğ. (2002) ise donma-çözülme ve tuz etkisine maruz ÇTDB'ların normal betonlara kıyasla bozunmaya karşı direncini arttığını belirtmişlerdir.

#### **2.1.7.4. Aşınma, Erozyon ve Kavitasyon Direnci**

Yapılan çalışmalarda çelik tellerin genel olarak betonların aşınma, erozyon ve kavitasyon dirençleri arttırdığı ifade edilmektedir [49,91]. Çelik teller su yapılarında kullanılan betonların aşınma, kavitasyon ve kimyasal etkilerle meydana gelen erozyona karşı dirençlerini kısmen iyileştirmektedir [49,91]. Ayrıca çelik teller darbeli aşınma ile oluşan mikro-kırılma çatlaklarını kontrol ederek betonların aşınma hasarlarını azaltmaktadır [57].

Hidrolik yapılarda düşük hızlarda, küçük taneciklerin yuvarlanması ile beton yüzeyinde oluşan düzenli aşınma olayında, agrega kalitesinin ve yüzey sertliğinin erozyon miktarını belirleyen en önemli etkenlerdir [73,92]. Buna karşılık çelik tellerin, yüksek hızların ve büyük parçaların çarpması sonucu oluşan aşınmaya karşı betonların erozyon direncini önemli ölçüde arttırdığını belirtmektedir.

Nanni (1989) çelik tellerin beton kaplamaların yüzeylerinin pullanmasını önleyiciliği bir etki yaptığını, ancak çelik tel donatılı betonların aşınma dirençlerinin normal betonlarınkine kıyasla fazla değişmediğini belirtti.

Sustersic ve diğ. (1991) su/çimento oranı 0,30–0,65 arasında değişen betonlara kancalı uçlu çelik tellerin hacimce %0,25-%2 arasındaki miktarlarda katılmasıyla elde edilen beton numunelerin aşınma-erozyon dirençlerini araştırdı. Çelik tellerin betonun erozyon ve aşınma dirençlerini iyileştirdiğini, ayrıca su/çimento oranı ve çelik tel içeriği arttıkça betonların aşınma ve erozyon dirençlerinin arttığını ifade ettiler.

### 2.1.8. Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları

Tokluk ve dinamik yüklere karşı dayanım çelik tel donatılı betonları karakterize eden en önemli özellik olduğu söylenebilir. Basınç ve eğilme-çekme gerilmeleri çelik teller etkisinden çok beton kalitesine, ancak tokluk ise çelik tellerin performansına bağlı olmaktadır. Çelik teller, taze betonda safhasında oluşmaya başlayan mikro çatlaklar arasında çatlak köprüleme etkisi ile iç gerilmeleri bütün kitle içine yayılmasını sağlar, ayrıca servis yükleri altında çatlak yayılmasını ve büyümesinin sınırlandırır Servis yüklerinin yanı sıra, ani etkileyen deprem gibi dinamik yük durumlarına karşı yüksek enerji yutma kapasitelerinden dolayı betonun dağılmasını engellerler.

Taşıyıcı sistemlerde betonarme kolon-kiriş birleşim bölgeleri, özellikle deprem yüklerine maruz kalan yapılarda en kritik bölgeyi oluşturur. Yapı şartnamelerinde bu bölgelerde etriyelerin devamını ve sıklaştırılmasını öngörmesine rağmen, ülkemiz genel olarak beton yerleştirme işleminin zorlaşması ve kesit yetersizliklerinden dolayı bu kural uygulanamamaktadır. Yapılan birçok araştırmada çelik tellin betonun gevrek olan yapısını sünek hale getirdiğini ve enerji yutma kapasitesini arttırdığı ifade edilmektedir. Benzer şekilde çelik teller geleneksel donatılı betonarme elemanların sünekliklerini de arttırmaktadır [95,103]. Yapıların çalışmalarda genel olarak çelik teller, kolon-kiriş birleşim bölgelerinde sargı donatısı olarak kullanılan ilave donatının yerini alabileceği, çelik tel donatılı betonarme elemanların geleneksel betonarme elemanlara kıyasla daha sünek davrandığı, daha büyük yüklerde göçtüğü ve daha büyük enerji yutma yeteneğine sahip olduğu ifade edilmektedir [95,103].

Dupont ve Vandewalle (2002) çelik tellerin betonarme kiriş elemanların çatlak özelliklerine etkisi araştırılmışlar ve 30–40 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeriğinde betonarme kirişlerin çatlak özelliklerine çelik tellerin katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Ganesan and Shivananda (2002) % 0,5, 1,0 ve 1,5 çelik tel hacimsel oranlarında betonarme kirişlerde çatlak özellikleri deneysel olarak incelenmişler ve çatlak genişlikleri çelik tel içeriğine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Alavizadeh-Farhang (1998) 30 mm boyunda ve 0,5 mm çapındaki çelik tellerin 60 kg/m<sup>3</sup> miktarda kullanımı ile üretilen betonarme kirişlerin ısı, düşey yük ve ısı+düşey yük yüklemeleri durumundaki taşıma kapasiteleri araştırmış ve çelik telin statik yük taşıma kapasitesini artırdığı belirtmiştir.

Hartman (1999) 60 kg/m<sup>3</sup> ve 100 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren betonarme kirişlerin dayanımları araştırmış ve 60 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren betonarme kirişlerin deneysel dayanım sonuçlarının teorik dayanım değerlerine oranının, 100 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren dozajlı betonarme kirişe kıyasla daha iyi sonuç verdiği ifade etmiştir.

Altun ve diğ. (2006) 30 kg/m<sup>3</sup> ve 60 kg/m<sup>3</sup> çelik tel ikamesi ile betonarme kirişlerin taşıma gücünün arttığı, çatlakların daha az sayıda ve düzenli olarak meydana geldiği belirtmişlerdir.

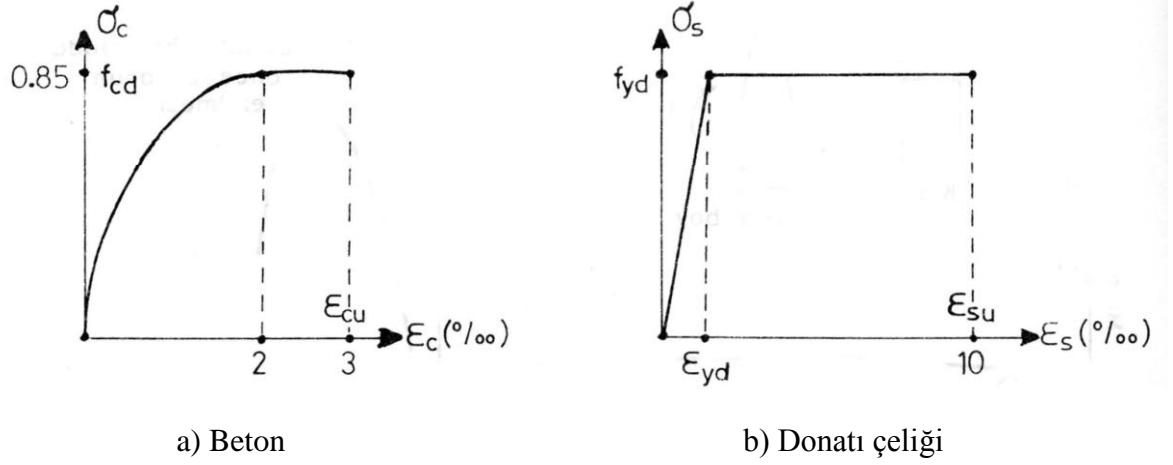
## **2.2. Betonarme Elemanların Basit Eğilme Altındaki Davranışı ve Kesit Hesabı**

Betonarme yapılarda kiriş ve döşeme gibi elemanlar uygulanan yükler altında eğilmeye çalışırlar. Gerçekte ise bu elemanlar eğilmeye ek olarak kesme kuvveti etkisindedirler. Bu iki içi kuvvetin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı gerçekçi bir yaklaşım olmaktadır. Bundan dolayı betonarme elemanlarda kesit tasarımındace eğilme momenti etkisinde göre ve daha sonra da kesme kuvveti etkisini karşılamak üzere boyutlandırılıp donatılandırılır.

Betonarme elemanların basit eğilme altındaki kesit hesabında aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.[105].

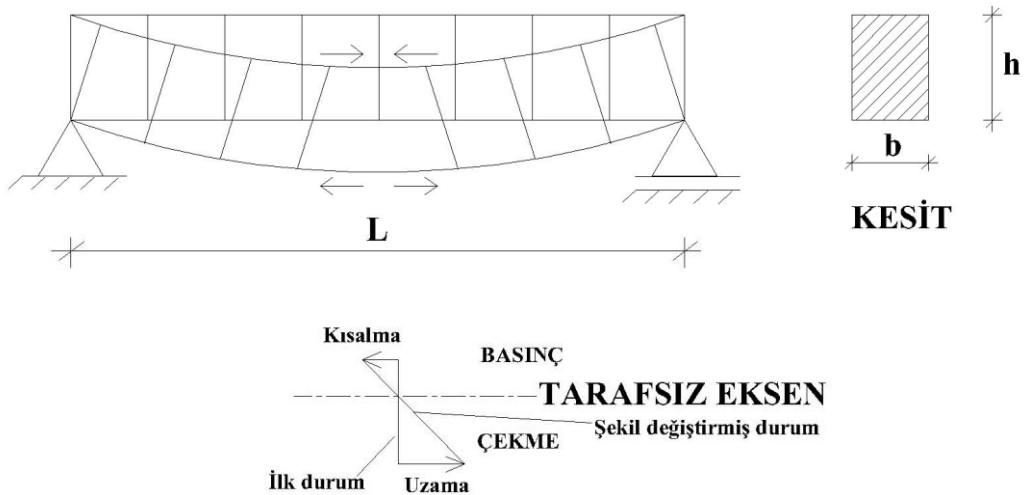
1. Eğilme etkisinde düzlem kesitin şekil değiştirmeden sonra da düzlem kaldığı kabul edilir (Bernouli hipotezi).
2. Betonun çekme dayanımı ihmal edilir.
3. Donatı çubuğu ile çevresini saran beton arasında tam aderans bulunduğu düşünülerek, donatının birim şekil değiştirmesi, aynı düzeydeki beton lifinin birim şekil değiştirmesine eşit alınır.

4. Taşıma gücüne erişildiğinde, tarafsız eksene en uzak beton basınç lifindeki birim kısalma  $\epsilon_{cu} = 0.003$  alınır (Şekil 2.10.a)
5. Donatı çeliğinin elasto plastik davrandığı kabul edilir. Tüm donatı çelikleri için, elastisite modülü  $E_s = 2 \times 10^5$  Mpa ve kopma birim uzaması  $\epsilon_{su} = 0.1$  alınır. (Şekil 2.10.b)

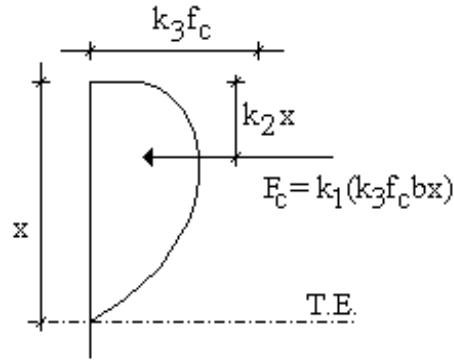


**Şekil 2.10** Eğilme etkisinde betonarme kesit tasarımında beton ve çelik için kabul edilen varsayımlar.

Basit eğilme durumunda düzgün yayılı yüklemeye altındaki kiriş kesitinin tipik şekil değişimi, deformasyon şekli ve gerilme dağılımı Şekil 2.1’de verilmektedir.



Kırılma yükü teorisi ile ilgili ilk çalışma 1886'da Koenen tarafından yapıldı. Bu çalışma tarafsız eksenin ortasında kabul etmekte ve buna bağlı doğrusal bir gerilme yayılımı önermekteydi. 1960'lı yıllara kadar bu konuda yaklaşık birçok teori ortaya konuldu. 1955'de ABD'de Hognestad yönetiminde Portland Çimento Birliği'nde– Portland Cement Association (PCA) ve Almanya'da Rüsç yönetiminde Münih Teknoloji Enstitüsü'nde çok kapsamlı deneysel çalışmalar yapıldı. Bu araştırmalarda kırılma durumunda kesitte oluşan basınç gerilmelerinin durumu deneysel olarak belirlendi. Şekil 2.12'de kırılma bloğunu belirleyen parametreler görülmektedir.



Şekil 2.12 Eğilme altında betonarme kesitte basınç dağılımı.

Burada;  $k_1$ , ortalama basınç gerilmesinin maksimum gerilmeye oranı,  $k_2$ , basınç bileşkesinin basınç lifine uzaklığının tarafsız eksen derinliğine oranı,  $k_3$  ise maksimum basınç gerilmesinin beton silindir mukavemetine oranını ifade etmektedir. Bu parametreler kullanılarak, Şekil 2.12'de de ifade edildiği gibi  $\sigma_m$  ortalama gerilme değeri,  $f_c$  ise silindir basınç mukavemeti olmak üzere,

$$k_1 = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\max}} \quad (2.2)$$

$$k_3 = \frac{\sigma_m}{f_c} \quad (2.3)$$

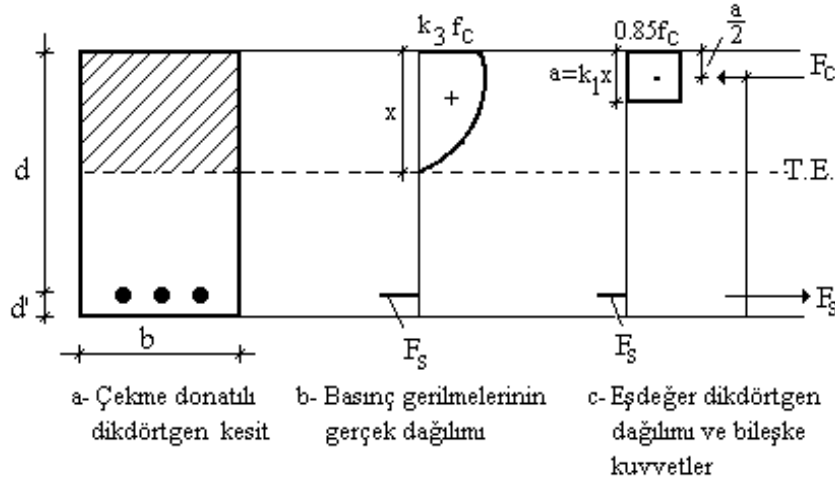
$$k_1 k_3 = \frac{\sigma_m}{f_c} \Rightarrow \sigma_m = k_1 k_3 f_c \quad (2.4)$$

olarak elde edilir. Bu durumda beton basınç kuvveti ise,

$$F_c = k_1 k_3 f_c b x \quad (2.5)$$

olarak bulunur. Hognestad ve Rüsç tarafından yapılan deneysel çalışmalar sonucunda,  $k_1$ ,  $k_3$  ve  $k_2$  değerlerinin beton mukavemeti ile orantılı olarak değiştiği ifade etmişlerdir. TS500 (Şubat 2000) normal betonlar için ( $f_{ck} \leq 25$  MPa) bu değerler sabit tutulmuştur [105].

Basit eğilme altındaki elemanlarda kesitin eğilme kapasitesini belirleyen iki önemli parametre basınç bileşkesinin değeri ve yeridir. Beton basınç bölgesine etkiyen parabolik yük dağılımı yerine ve hesaplarda kolaylık sağlayacak herhangi bir eşdeğer dağılım kullanılması birçok yönetmelikte uygun görülmüştür. ACI (Amerikan Beton Enstitüsü) 1956'dan beri eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu dağılımını önermektedir. Benzer olarak TS500'de hesaplarda aynı eşdeğer dağılımı önermiştir. Beton basınç bölgesi için önerilen eşdeğer dağılım Şekil 2.13'de verilmektedir [105].



**Şekil 2.13** TS500'de beton basınç bölgesi için önerilen eşdeğer dağılım.

Şekil 2.13'den görüldüğü gibi dikdörtgen gerilme bloğunun genişliği  $0.85f_c d$  alınmıştır. Bu değer  $k_3$ 'ün 0.85 varsayılması ile sağlanmış olup genel kabul edilen bir değerdir. TS500 normal betonlar için,  $f_{ck} \leq 25$  MPa halinde  $k_1 k_3 = 0.72$  olarak alınması öngörülmektedir.  $k_3 = 0.85$  alındığına göre  $k_1$  değeri normal betonlar için 0.85 olmaktadır. Normal betonda mukavemetin 25 MPa'ı geçen her 1 MPa artışı için  $k_1$  değeri 0.006 azalmaktadır.  $k_2$  değeri ise b genişliği sabitse, Şekil 2.3'ten  $k_2 = a/(2x)$  olacaktır. Genişlik farklı olursa eşdeğer gerilme kamasının ağırlık merkezinin basınç kenarına uzaklığı  $a = k_2 x$  dir. Şekil 2.13 (b) ve (c) durumlarının eşdeğer olması

için  $F_c$  değerinin ve yerinin aynı olması gerekir. Buna göre kesitte kuvvet dengesinin sağlanması için;

$$0.85 f_c \chi k_1 \chi b \chi x = 0.85 f_c \chi b \chi a \quad (a = k_1 x) \quad (2.6)$$

yazılabilir.

Betonarme kesitte sabit  $b$  genişliği için  $a/2=k_2x$  ve  $k_2=k_1/2$ , yani  $k_2= 0.425$  bulunur. Betonarme bir kesitte en dış basınç lifinde betonun birim kısalmasının ezilme birim kısalmasına ulaşmasıyla ( $\epsilon_{cu} =0.003$ ) kesit taşıma gücünü kaybeder. Bu nedenle betonarme elemandaki çekme donatısının miktarı kirişin davranışını ve kırılma türünü etkiler ve belirler.

Basit eğilme etkisi altındaki betonarme elemanlarda tek donatılı dikdörtgen kesitlere dış kuvvet olarak yalnızca eğilme momenti etkidiğine göre iç kuvvetlerin bileşkesi bir normal kuvvet vermemelidir. Bir kuvvet çifti sözkonusu ve

$$F_c = F_c \quad (2.7)$$

olmalıdır. Çekme gerilmesinin bileşkesi olan çekme kuvveti,  $F_s$ ,

$$F_s = A_s \sigma_s \leq A_s f_y \quad (2.8)$$

Basınç gerilmesinin bileşkesi olan beton basınç kuvveti,  $F_c$  ise

$$F_c = 0.85 f_c a b \quad (2.9)$$

olacaktır.

Basit eğilme altındaki elemanlarda çekme kırılması, betonun basınç birim kısalması ( $\epsilon_{cu}$ ) ulaşmadan donatının akma sınırına ulaşması olarak ifade edilmektedir [105]. Bu şekilde kesit taşıma gücüne ulaşmadan donatının akma sonucu büyük uzama ve

çekme yükü taşıması sağlanmış olur. Bu da kesitin sünek davranışına neden olur. Çekme kırılması için sınır değerler;

$$\varepsilon_s > \varepsilon_{yk} \text{ ve } \sigma_s = f_{yk} \quad (2.10)$$

yazılabilir. Denklem 2.5 ve 2.6'dan;

$$a = \frac{A_s f_{yk}}{0.85 f_{ck} b} \quad (2.11)$$

bulunur.  $\rho = A_s / bd$  donatı oranı olarak yazılırsa ve denklem 2.7, 2.8, ve 2.9 kullanılarak

$$M_u = \rho b d^2 f_{yk} \left(1 - 0.59 \rho \frac{f_{yk}}{f_{ck}}\right) \quad (2.12)$$

elde edilir. Dengeli kırılma için  $\rho_b$  donatı oranı ise;

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{bd} = 0.85 k_1 \frac{f_{ck}}{f_{yk}} \frac{600}{600 + f_{yk}} \quad (2.13)$$

bulunur.



### 3. BÖLÜM

#### DENEYSEL ÇALIŞMA

##### 3.1. Kullanılan Malzemeler

###### 3.1.1. Çimento

Çalışmada Yozgat Yibitaş-Lafarge Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R (PÇ 42.5) tipi Portland Çimentosu kullanıldı. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1.' de verildi.

**Tablo 3.1** Portland Çimentosunun (CEM I 42.5 R) özellikleri.

<b>Kimyasal Bileşim</b>	
<b>Bileşen, (%)</b>	
MgO	2.75
SiO <sub>2</sub>	19.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.39
Na <sub>2</sub> O	-
CaO	63.17
SO <sub>3</sub>	2.74
K <sub>2</sub> O	1.00
Kızdırma Kaybı	2.33
Çözünmeyen Kalıntı	0.49
<b>Fiziksel Özellikler</b>	
Özgül Ağırlık g/cm <sup>3</sup>	3.09
Özgül Yüzey cm <sup>2</sup> /g.	3114

###### 3.1.2. Agregata

İnce agregata olarak Kırmataş Kum (0–4 mm), kaba agregata olarak Kırmataş I (4–13 mm) ve Kırmataş II (13–22 mm) kullanıldı. Çalışmada en büyük agregata boyutu 22,4 mm olarak seçildi. Agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 3.2.' de verildi.

**Tablo 3.2** Agregaların fiziksel özellikleri.

Agrega	Su emme % (ağırlıkça)	Birim Ağırlık kg/m <sup>3</sup>	Tane Birim Ağırlığı, kg/m <sup>3</sup>
Kırma Kum	1.56	1675	2704
Kırmataş I	0.32	1635	2709
Kırmataş II	0.30	1615	2738

### 3.1.3. Süper Akışkanlaştırıcı

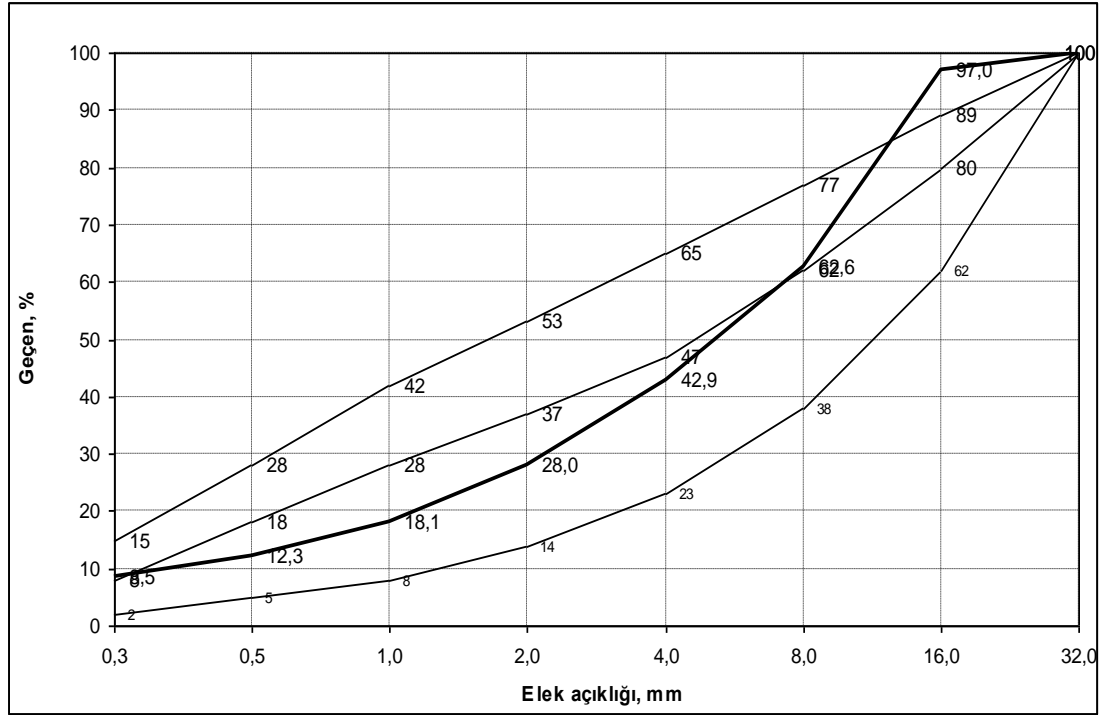
İşlenebilirliğin sağlanması Yapı Kimyasalları Sanayi (YKS) firmasından temin edilen orta akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldı.

### 3.1.4. Çelik Tel

Çalışmada Beksa Çelik Tel ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilen RC 65/60 BN tipi kancalı uçlu çelik teller kullanıldı. Kullanılan çelik tellerin özellikleri Tablo 3.5’ de verilmektedir. Çelik telin çekme dayanımları 1100 N/mm<sup>2</sup> ve yoğunluğu ise 7.85 g/cm<sup>3</sup>’tür. Çelik telin uzunluğu 60 mm, çapı 0,92 mm ve narinliği ise (uzunluk/çap) 65’dir.

## 3.2. Beton Karışımları

Numunelerin üretiminde kullanılan karışım agregasına ait tane dağılımı eğrisi Şekil 3.1.’de, taze beton özellikleri ve gerçek karışım miktarları ise Tablo 3.3’de verilmektedir. Üretilen betonlara ait kodlamada B betonu, BK, betonarme kirişi, ÇT çelik teli ve ÇT’nin yanında bulunan sayı ise çelik tel içeriğini ifade etmektedir. Örnek olarak B-ÇT40 seri kodu 40 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren beton numuneleri, BK-ÇT40 seri kodu 40 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeren betonarme kiriş numuneleri ifade etmektedir.



Şekil 3.1 Karışım agregası tane dağılımı eğrisi.

Tablo 3.3 Beton karışım oranları

Seri Kodu	Çimento kg	Su kg	Orta Akış. Katkı %	Çelik Tel Miktarı kg.	Kırma Kum kg.	Kırmataş No.I kg.	Kırmataş No.II kg.	Hava içeriği %	Çökme Değeri cm	Birim Ağırlık Kg/m <sup>3</sup>
B-ÇT0	340	180	3,30	0	890	572	276	0,9	13	2261
B-ÇT20	340	180	3,30	20	890	572	276	1,1	11	2272
B-ÇT40	340	180	3,30	40	890	572	276	1,1	8	2289
B-ÇT60	340	180	3,30	60	890	572	276	1,2	6	2309
B-ÇT80	340	180	3,30	80	890	572	276	1,3	3	2318
B-ÇT100	340	180	3,30	100	890	572	276	1,4	1	2329

### 3.3. Üretilen Betonların Özellikleri

Bu çalışmada C30/37 beton sınıfı betonlara 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 kg/m<sup>3</sup> oranlarda çelik tel katılmasıyla elde edilen beton ve betonarme numuneler üretildi. Beton numuneler üretildikten bir gün sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün süreyle standart bakıma tabii tutuldu.

Her seri için 3 adet standart silindir ( çap= 150 mm ve yükseklik= 300 mm ) ve 3 adet standart küp (150 mm x150 mmx150 mm) ve 2 adet 150 mm x 150 mm x 750 mm boyutlarında 2 adet prizmatik beton kiriş numuneler üretildi.

Ayrıca her bir seri için 200 cm uzunluğunda ve 30cmx30cm kesit alanına sahip 2 adet betonarme kiriş üretildi. Bunun için belirtilen boyutlarda kalıplar yaptırılmış ve beton dökülmeden önce kalıpların iç yüzeyleri ve etrafı gerekli aderansın sağlanması için yabancı maddelerden temizlenmiştir. Kirişlerin priz süresi sonunda kalıplardan ayrılmasını kolaylaştırmak amacıyla kalıp yüzeyleri uygun şekilde yağlanmıştır. Beton dökümü esnasında betonun kalıbın her tarafına yayılmasını sağlamak, donatıların devamlı şekilde kaplanmasını temin etmek, betonu sıkıştırarak hava boşluklarını dışarı atmak ve kompoziteyi artırmak amacı ile betona vibrasyon ve şişleme işlemi yapılmıştır. Üretilen çelik tel takviyeli betonarme kirişler ise 1 gün sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında günde üç kez olmak üzere her gün sulanmış ve uygun kür şartlarında 28 gün boyunca muhafaza edilmiştir.

Küp numuneler üzerinde basınç dayanımı, silindir numuneler üzerinde basınç ve elastisite modülü tayini deneyleri, Kiriş numuneler üzerinde ise eğilme dayanımı tayini deneyi yapıldı. Ayrıca eğilme deneyi ile birlikte yük-sehim eğrileri elde edildi. Betonarme kirişler üzerinde ise eğilme deneyleri yapıldı. Beton üretim sırasında çekilen fotoğraflar Şekil 3.3–3.5’de verilmektedir.



**Şekil 3.2** Beton numuların üretimi-1



**Şekil 3.3** Beton numuların üretimi-2



**Şekil 3.4** Beton numulerin üretimi–3

Üretilen çelik tel takviyeli betonarme kirişlerde çekme donatısı olarak  $2 \Phi 16$ , basınç donatısı olarak  $2\Phi 12$ , sargı donatısı (etriye) olarak ise  $\Phi 8/16/8$  kullanıldı. Kullanılan donatının sınıfı BÇIIIa (S420)'dir. Çelik tel takviyeli betonarme kirişlere ait özellikler Tablo 3.4'de verildi

**Tablo 3.4** Kirişlere Ait Donatı ve Teorik Kırılma Yükleri.

Seri Kodu	Çelik lif miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )	Çekme Donatısı	Kesme Donatısı	Teorik Kırılma Yüğü (kN)
BK-ÇT0	0	$2\Phi 16$	$\Phi 8/16/8$	152,7
BK-ÇT20	20	$2\Phi 16$	$\Phi 8/16/8$	153,2
BK-ÇT40	40	$2\Phi 16$	$\Phi 8/16/8$	153,4
BK-ÇT60	60	$2\Phi 16$	$\Phi 8/16/8$	153,5
BK-ÇT80	80	$2\Phi 16$	$\Phi 8/16/8$	153,7
BK-ÇT100	100	$2\Phi 16$	$\Phi 8/16/8$	153,8

Betonarme kirişlerin teorik kırılma yükü hesaplarında silindir numunelerden elde edilen  $f_{ck}$  değeri dikkate alınmıştır. Deneyleerde ise,  $f_{ck}$  olarak silindir numunelerden ölçülen değerler kullanılmıştır. Teorik kırılma yükü hesabında çelik telin etkisi ihmal edilmiştir.

### **3.4. Beton Deneyleeri**

#### **3.4.1. Taze Beton Deneyleeri**

##### **3.4.1.1. Birim Ağırlık Deneyi**

Üretilen betonlar üzerinde TS EN 12350-6' ya uygun olarak birim ağırlık deneyi yapıldı [106]. Deney sonuçları Tablo 3.3'de verildi.

##### **3.4.1.2. İşlenebilme Deneyi**

Çelik tel ilavesiyle taze betonların işlenebilmesine etkisinin belirlenmesi için Çökme (slump) deneyi yapıldı. Vebe süresi tayini deneyi TS EN 12350-2' e uygun olarak yapıldı [107]. Deney sonuçları Tablo 3.3'de verildi.

##### **3.4.1.3. Taze Betonun Hava İçeriği Deneyi**

Üretilen betonlar üzerinde TS EN 12350-7' ye uygun olarak birim ağırlık deneyi yapıldı [108]. Deney sonuçları Tablo 3.3'de verildi.

#### **3.4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleeri**

##### **3.4.2.1. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini Deneyi**

Basınç dayanımı deneyleeri her seri beton için 3 adet küp ve 3 adet standard numuneler üzerinde TS 3114 ISO 4012'e uygun olarak yapıldı [109]. Elastisite modülü tayini için basınç deneyine tabii tutulan 2 adet silindir numunesi üzerinde

kompresometre ile dūşey deplasman ölçümü yapıldı. Deney düzeneđi Őekil 3.3' te verildi.



**Şekil 3.5** Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü Tayini Deney Düzeneği.

**Tablo 3.5** Mekanik özellikler deney sonuçları.

Seri Kodu	Küp Basınç Dayanımı MPa	Silindir Basınç Dayanımı MPa	Elastise Modülü GPa	Eğilme Dayanımı MPa	Tokluk (10 mm sehime kadar) Joule
B-ÇT-0	42,8	38,5	32,4	3,81	-
B-ÇT-20	44,8	42,4	26,1	4,43	161,30
B-ÇT-40	44,9	44,3	24,3	4,71	170,00
B-ÇT60	45,2	45,2	23,7	6,70	294,00
B-ÇT80	45,4	47,8	21,8	7,68	324,80
B-ÇT100	46,4	48,0	20,5	7,17	292,60



Elastisite modülü basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen maksimum yükün %5 ve %45 aralıklarına düşen gerilme-şekil değiştirme noktalarının doğrusal kabul edilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi olarak alındı. Küp ve silindir basınç dayanımı ile elastisite modülü deney sonuçları Tablo 3.5’de verilmektedir.



**Şekil 3.6** Eğilme Deney Düzeneği.

#### **3.4.2.2. Eğilme Dayanımı Tayini Deneyi**

Numunelerin eğilme dayanımları ve toklukların her grup için 2 adet 150x150x750 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde ASTM C 1018 [82] standartlarına uygun olarak üçtebir noktalarından yüklenerek yapılan deneyle belirlendi. Eğilme deney düzeneği Şekil 3.4’te verilmektedir. Yükleme kapalı çevrim-geri beslemeli sehim kontrollü cihazda 0.2 mm/dk. yükleme hızında yapıldı. Elde edilen eğilme dayanımı ve yük-sehim eğrisi altında 10 mm sehime kalan alan olarak hesaplanan tokluk değerleri Tablo 3.5’de verilmektedir.

#### **3.4.2.3. Betonarme Kirişler Üzerinde Eğilme Deneyi**

Betonarme kirişler üzerinde eğilme deneyi 350 kN yükleme kapasitesine sahip yükleme çerçevesinde yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.6’de verilmektedir.



200 cm uzunluğundaki betonarme kirişler mesnet noktalarına kenarlardan 10 cm boşluk bırakılacak şekilde yerleştirilmiş ve üzerindeki yükleme aparatı ile yükün betonarme kirişe, kiriş açıklığının 1/3’ü oranında aktarılması sağlanmıştır. Ayrıca betonarme kirişlerin orta noktalarına yerleştirilen deplasman ölçerler ile yükleme sırasında kirişin sehim ölçülmüştür. Bu şekilde yüke karşı gelen sehim kaydedilerek yük-sehim eğrilerini elde edilmiştir.

## 4. BÖLÜM

### DENEYSEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 4.1. Taze Beton Özellikleri

Çelik tel içeriği arttıkça betonların işlenebilmesinin azalma, buna bağlı olarak çökme değerlerinin düşme gözlemlendi. Buna karşılık çelik tel içeriği arttıkça taze betonun birim ağırlığında artış görüldü. Çelik teller genel olarak işlenilebilmeyi azaltmakta, hatta yüksek miktarda kullanıldığında topaklanmaya ve homojen dağılımı önlemektedir. Çelik tellerin birim ağırlığı betonun diğer bileşenlerine göre daha yüksek olduğundan betonun birim ağırlığını artırıcı bir etki yapmaktadır.

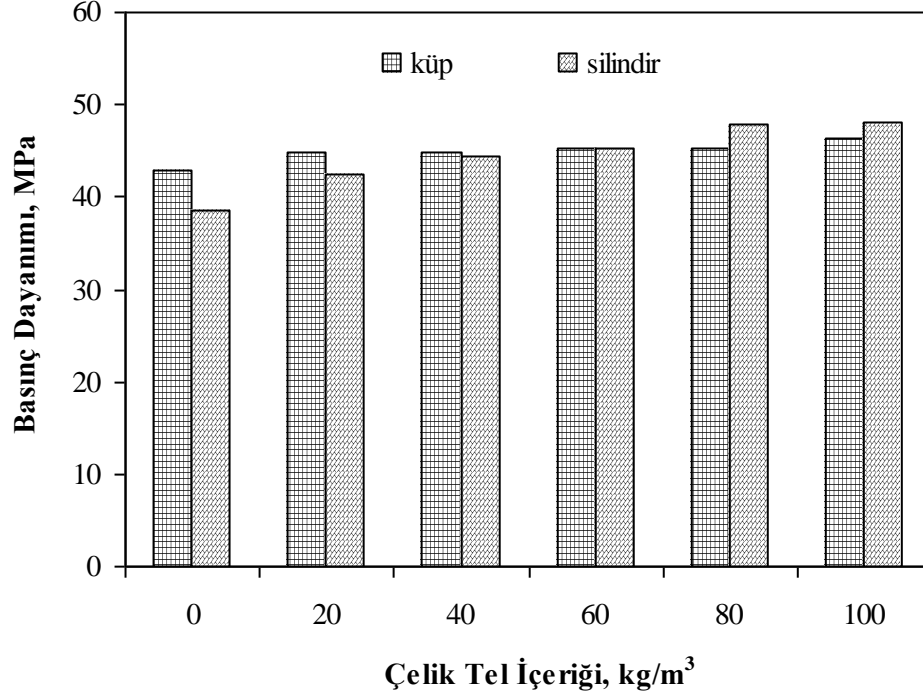
#### 4.2. Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülü

Çelik teller kullanımının betonun basınç dayanımına etkisi eğilme ve çekme dayanımlarına kıyasla oldukça az olmaktadır [62]. Çelik tel içeriği arttıkça betonların küp ve silindir basınç dayanımlarında artış gözlemlendi. Basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.1’de verildi.

**Tablo 4.1** Mekanik özellikler deney sonuçları.

Seri Kodu	Basınç Dayanımı (küp) MPa	Basınç Dayanımı (silindir) MPa	Elastisite Modülü GPa	Eğilme Dayanımı MPa	Tokluk Joule
B-ÇT-0	42,8	38,5	32,4	3,81	-
B-ÇT-20	44,8	42,4	26,1	4,43	161,30
B-ÇT-40	44,9	44,3	24,3	4,71	170,00
B-ÇT60	45,2	45,2	23,7	6,70	294,00
B-ÇT80	45,4	47,8	21,8	7,68	324,80
B-ÇT100	46,4	48,0	20,5	7,17	292,60

Basınç dayanımındaki değişikliğin elik tel içeriğine bağlı değişimi Şekil 4.1’de verilmektedir. elik tel içeriğine bağlı basınç dayanımındaki artış kp numunelere kıyasla silindir numunelerde daha fazla elde edildi.



**Şekil 4.1** Basınç dayanımının elik tel içeriğine bağlı değişimi.

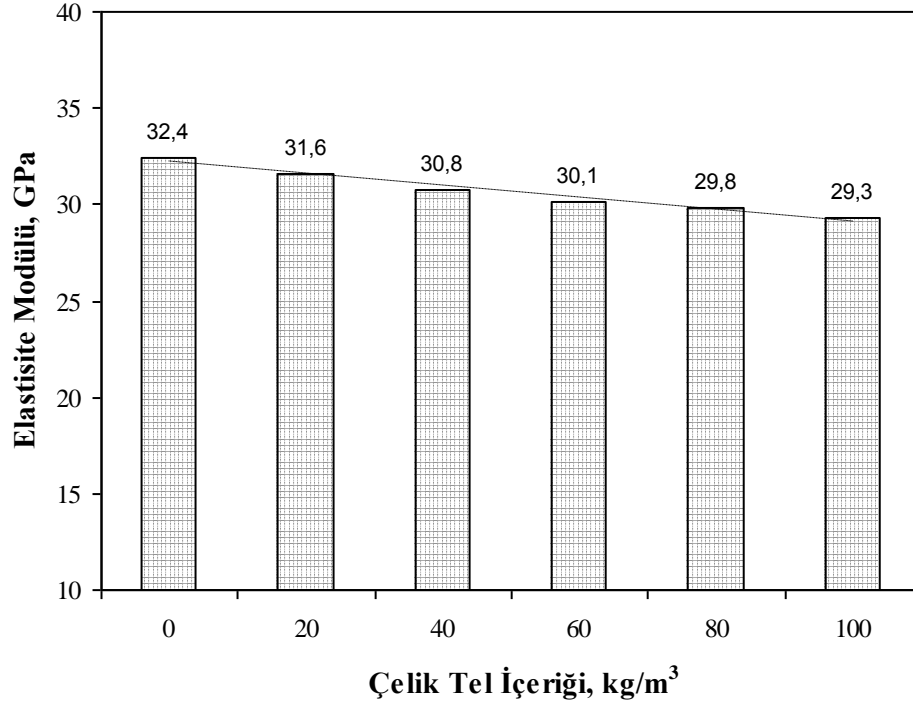
100 kg/m<sup>3</sup> elik tel içeren kp numunelerdeki basınç dayanımı değerinde artış elik tel içermeyen (kontrol serisi) numunelere kıyasla %8,3 olurken, aynı elik tel içeriği için bu artış silindir numuneler için %24,5 oldu. Bunun nedeni elik tellerin yüksekliliği fazla numunelerin basınç altında yatay deformatsiyonu daha fazla önleyici bir davranış göstermesi olarak yorumlanabilir.

elik teller betonun gerilme Şekil değiştirme eğrisini fazla etkilemediği ve elastisite modüllerinde çok az değişiklik yaptığı yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir [29,68].

Bu çalışmada ucu kancalı uçlu elik tellerin betonlara 20 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup>, 80 kg/m<sup>3</sup> ve 100 kg/m<sup>3</sup> ilavesiyle elde edilen numunelerin elastisite modüllerinin elik tel içermeyen kontrol grubuna ait numunelerinkine kıyasla azaldığı, ancak bu azalmanın fazla olmadığı gözlendi. 20 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup>, 80 kg/m<sup>3</sup> ve 100

$\text{kg/m}^3$  çelik tel içeriklerinde elastisite modülündeki azalma kontrol serisi betonlara kıyasla sırasıyla %2,5, %4,9, %7,1, %8,0 ve %9,6 olarak elde edildi. Numunelere ait elastisite modülü deney sonuçları Tablo 4.1’de verildi.

Çelik tel içeriğine bağlı betonların elastisite modüllerindeki değişim Şekil 4.2’de verildi.

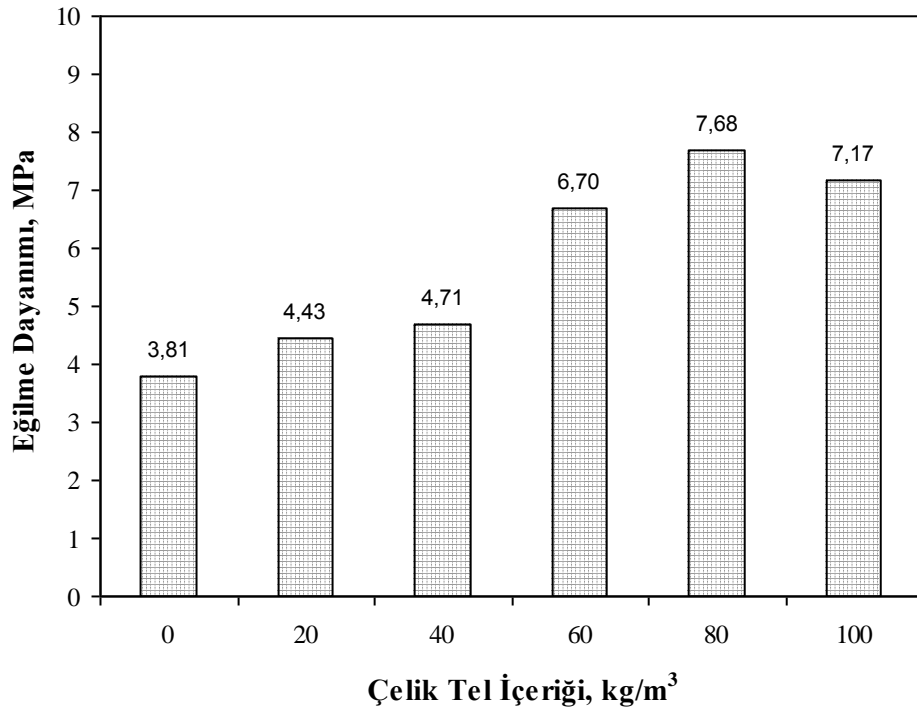


Şekil 4.2 Elastisite modülü-çelik tel içeriği ilişkisi.

### 4.3. Eğilme Dayanımı ve Tokluk

Çelik tel donatılı betonları çelik tel içermeyen betonlardan ayıran en belirgin özellik sünekliliklerinde farklılık olduğu söylenebilir. ÇTDB’ların tokluk değerleri yük-sehim eğrilerinden elde edilebilir. Yapılan araştırmalarda çelik tel donatılı betonların tokluklarının büyük ölçüde, çelik tel tipine, hacmine, matris içerisindeki yönelmesine ve telin matristen sıyrılma direncine bağlı olduğu ifade edilmektedir [55,110]. Ayrıca, ÇTDB’ların eğilme dayanımlarının da çelik telin tipine ve hacmine bağlı olduğu ifade edilmektedir [13,36,86]. Bu çalışmada çelik tel içeriğinin, ÇTDB’ların tokluğuna ve eğilme dayanıma etkisi araştırılmıştır.

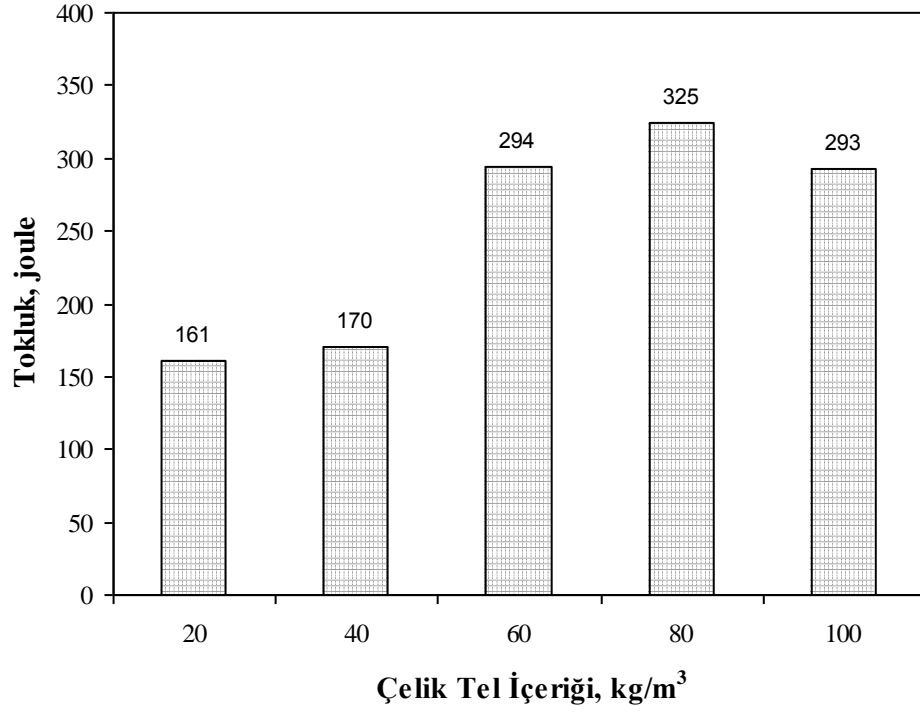
Çelik tel içeriğinin artmasıyla ÇTDB'ların eğilme dayanımlarında kontrol grubuna (çelik tel içermeyen) kıyasla artışlar gözlemlendi. Bu artışlar  $20 \text{ kg/m}^3$ ,  $40 \text{ kg/m}^3$ ,  $60 \text{ kg/m}^3$ ,  $80 \text{ kg/m}^3$  ve  $100 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriklerinde sırasıyla %16,3, %23,5, %75,8, %101,6 ve %88,2 olarak elde edildi. En büyük artış  $80 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde elde edildi. Eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 4.1'de verildi. Çelik tel içeriğine bağlı eğilme dayanımındaki değişiklik ise Şekil 4.3'de gösterildi.



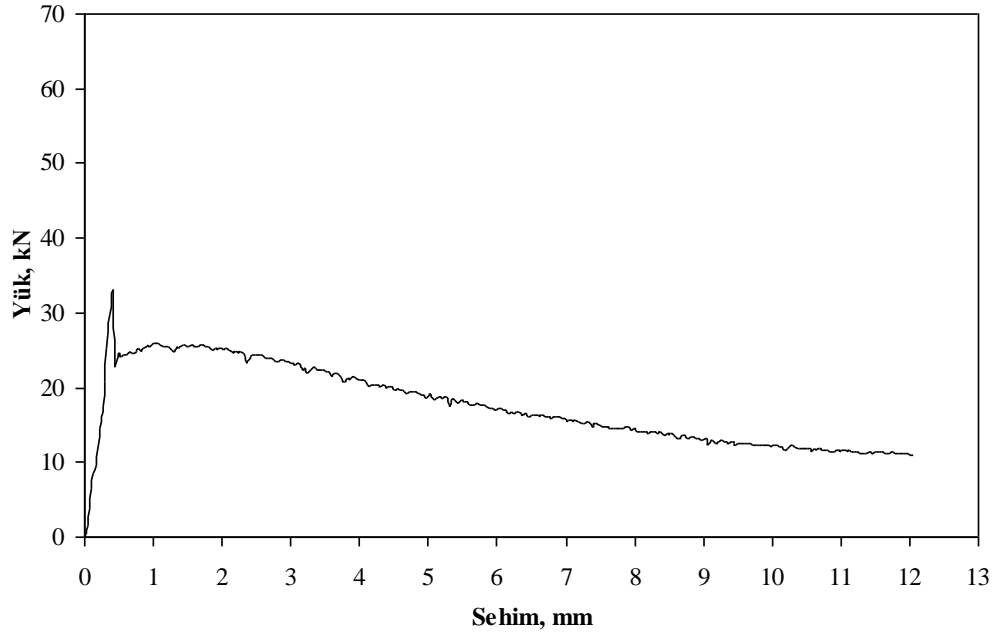
**Şekil 4.3** Eğilme dayanımının çelik tel içeriği bağlı değişimi.

Bu çalışmada her grup için tokluk değerleri, 2 adet prizmatik kiriş numunesinin 10 mm sehime kadar ölçülen yük-sehim eğrisi altında kalan alanların ortalaması alınarak elde edildi. Çelik tel içeriği arttıkça numunelerin tokluklarında artış olduğu gözlemlendi.  $20 \text{ kg/m}^3$ ,  $40 \text{ kg/m}^3$ ,  $60 \text{ kg/m}^3$ ,  $80 \text{ kg/m}^3$  ve  $100 \text{ kg/m}^3$  için tokluk değerleri sırasıyla 161 joule, 170 joule, 294 joule, 325 joule ve 293 joule olarak elde edildi. En büyük tokluk değeri  $80 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeren betonlarda elde edildi. Hesaplanan tokluk değerleri Tablo 4.1'de ve çelik tel içeriğine bağlı tokluk değerleri ise Şekil 4.4'de verildi.

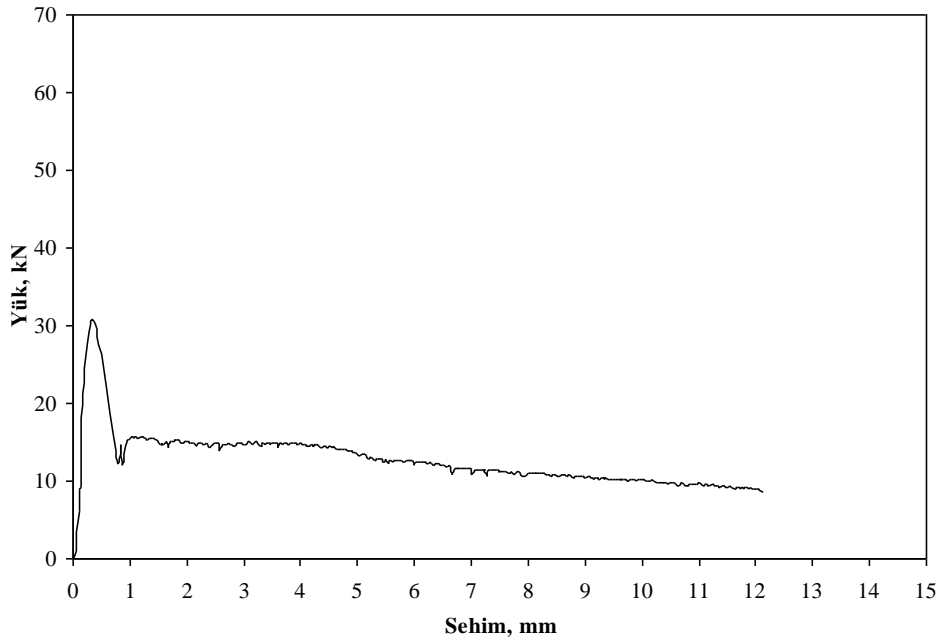
Eğilme deneyinden  $20 \text{ kg/m}^3$ ,  $40 \text{ kg/m}^3$ ,  $60 \text{ kg/m}^3$ ,  $80 \text{ kg/m}^3$  ve  $100 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriklerinde elde edilen yük sehım eğrileri sırasıyla Şekil 4.5–4.14’de verilmektedir. Farklı tel içeriklerinde yük-sehım eğrileri ise Şekil 4.15’de verildi.



Şekil 4.4 Tokluk-çelik tel içeriği ilişkisi.

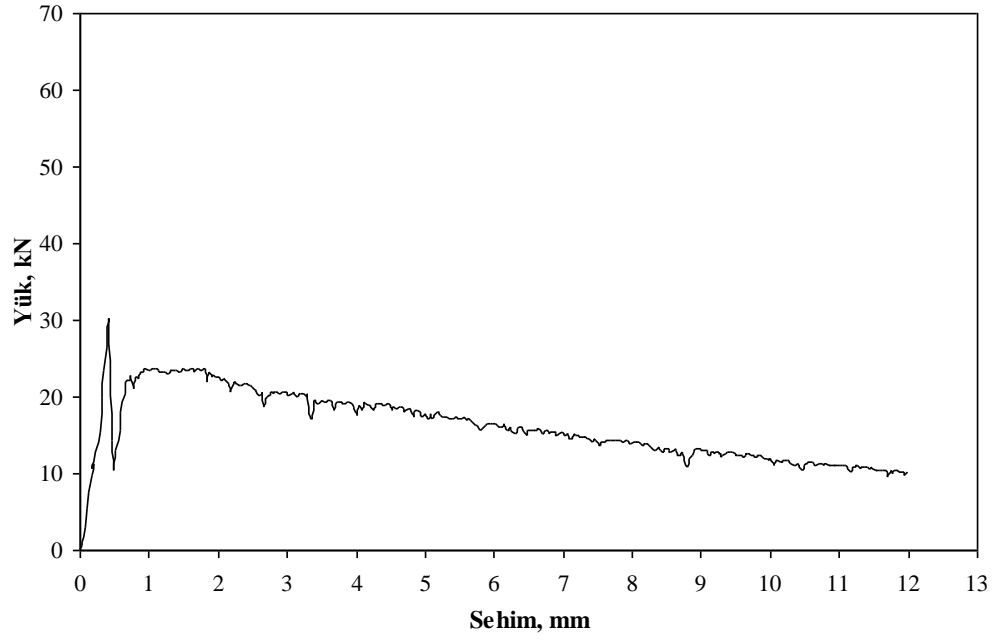


Şekil 4.5 20 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 1)

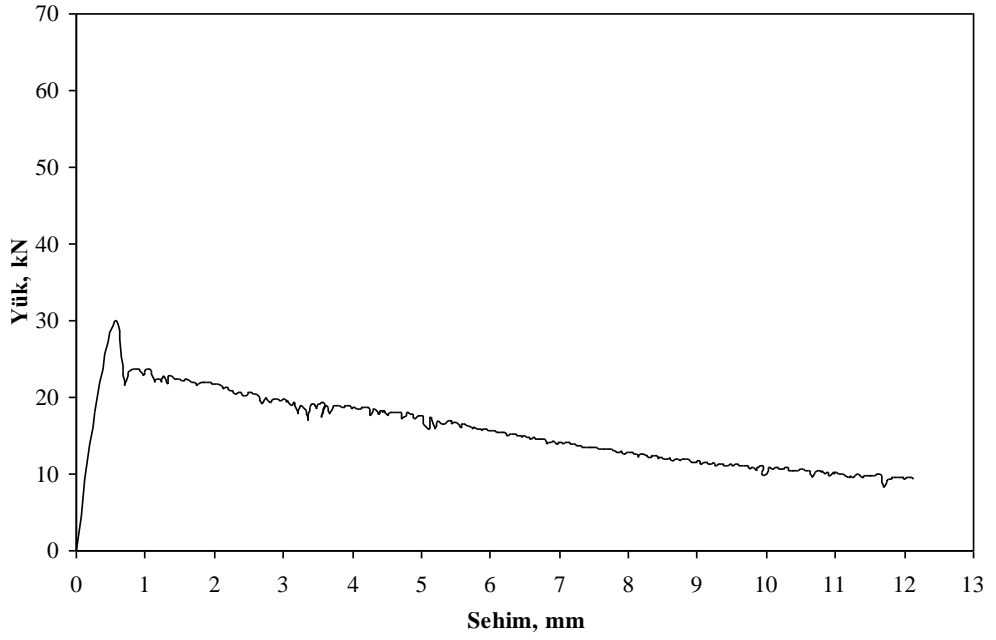


Şekil 4.6 20 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 2)

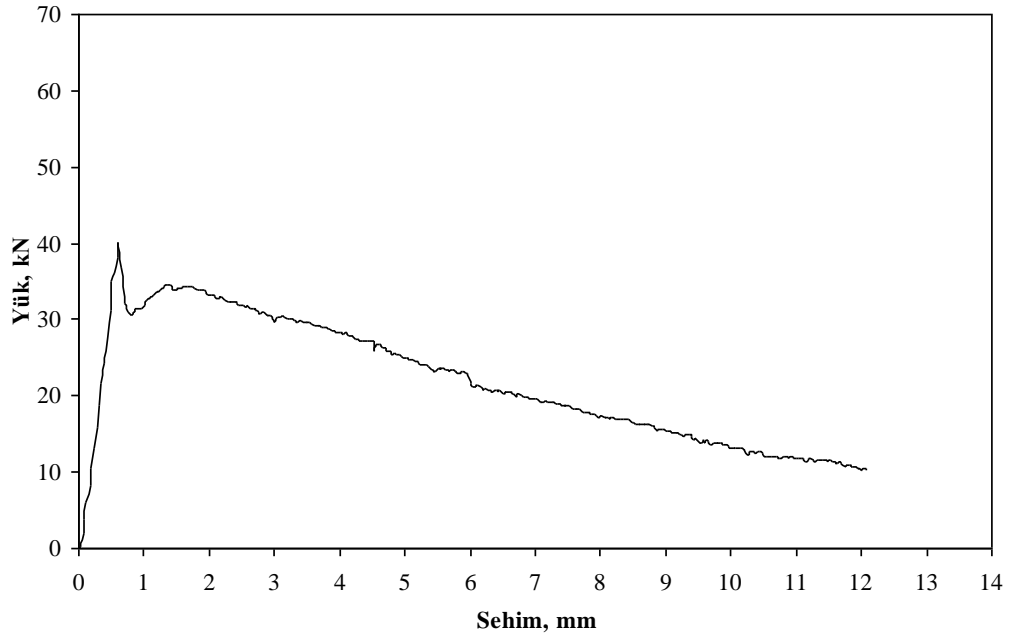




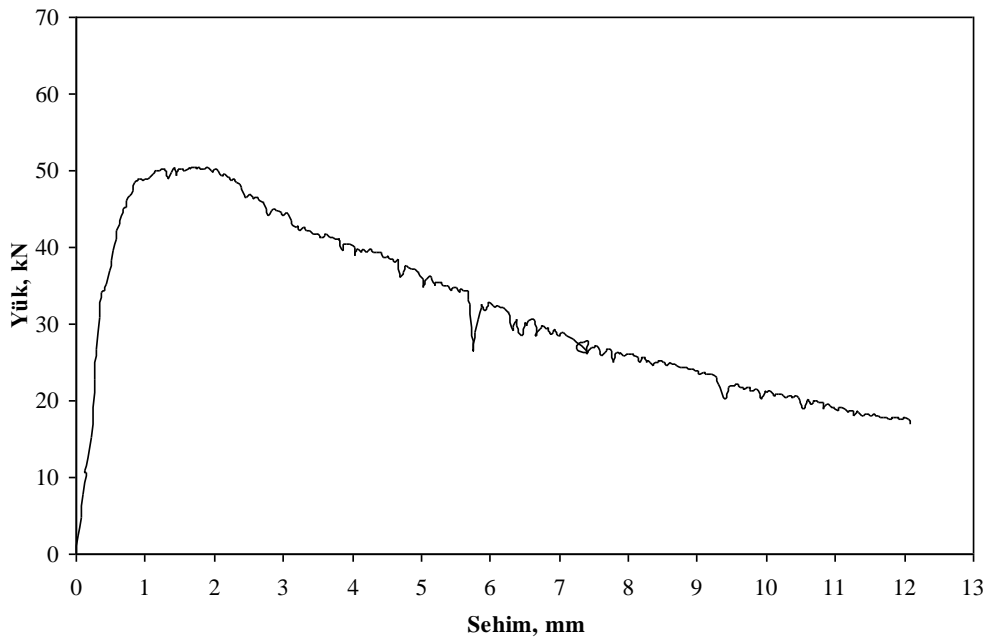
Şekil 4.7 40 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 1)



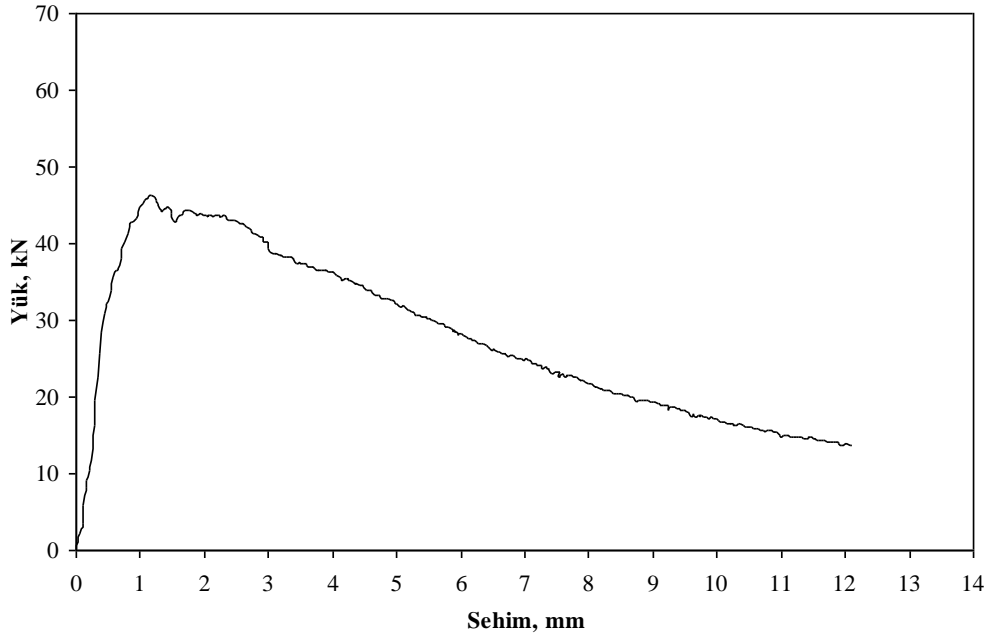
Şekil 4.8 40 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 2)



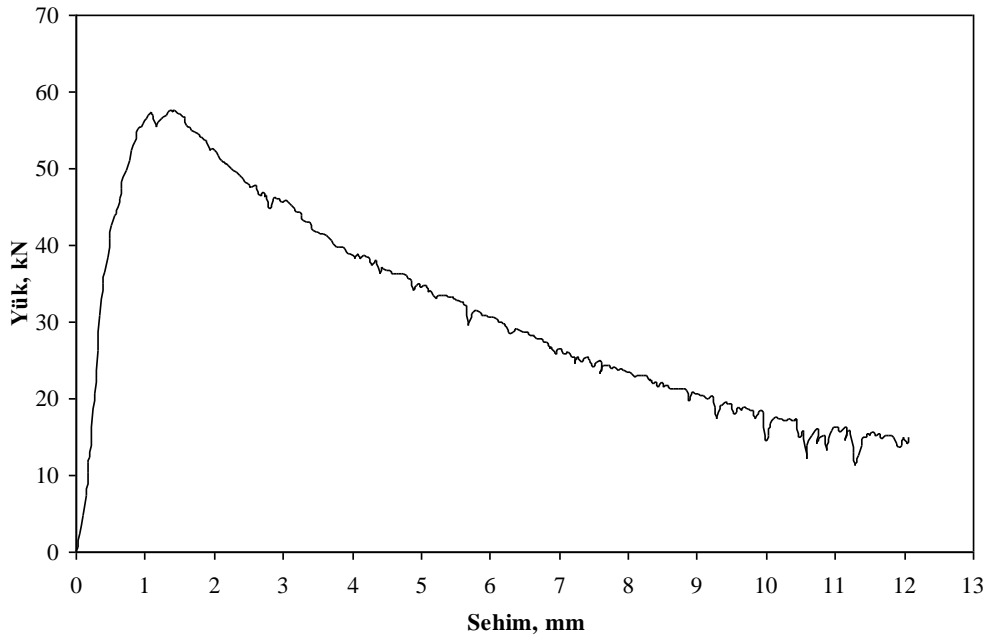
Şekil 4.9 60 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 1)



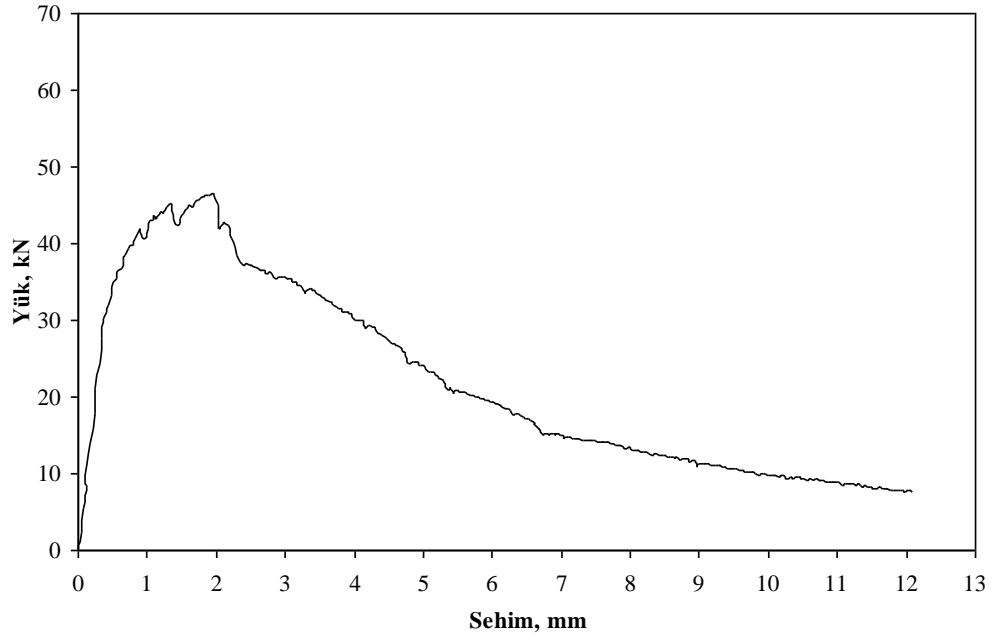
Şekil 4.10 60 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 2)



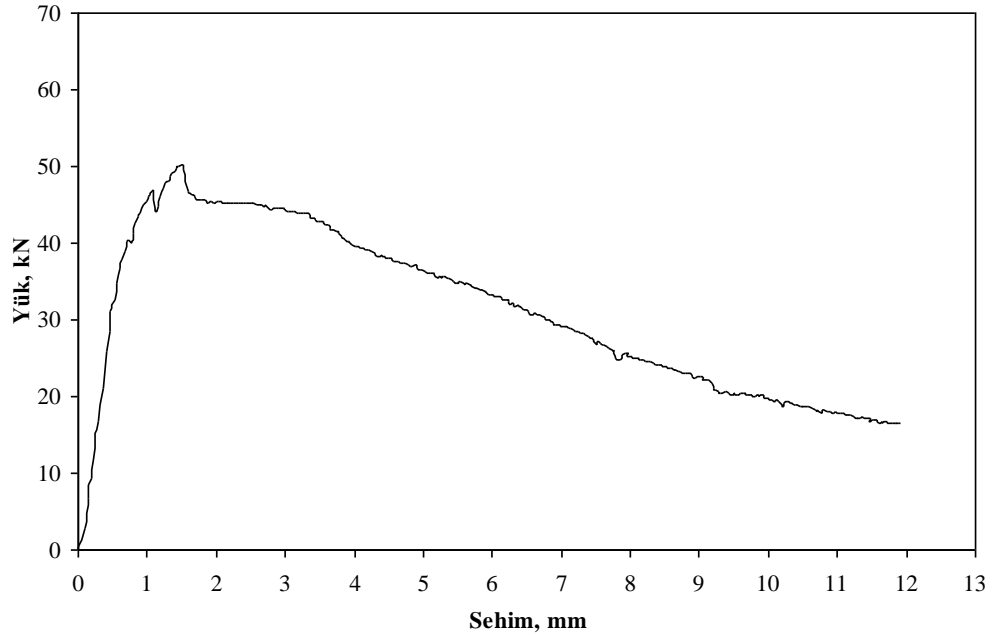
Şekil 4.11 80 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 1)



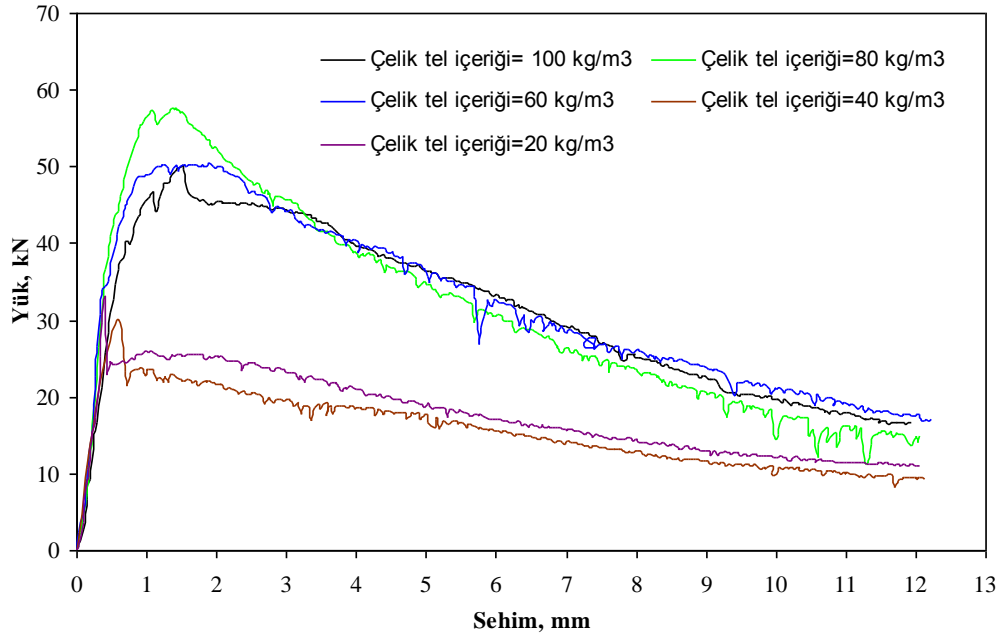
Şekil 4.12 80 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 2)



Şekil 4.13 100 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 1)



Şekil 4.14 100 kg/m<sup>3</sup> tel içeriği için yük-sehim eğrisi (numune 2)



**Şekil 4.15** Farklı tel içeriği için yük-sehim eğrileri.

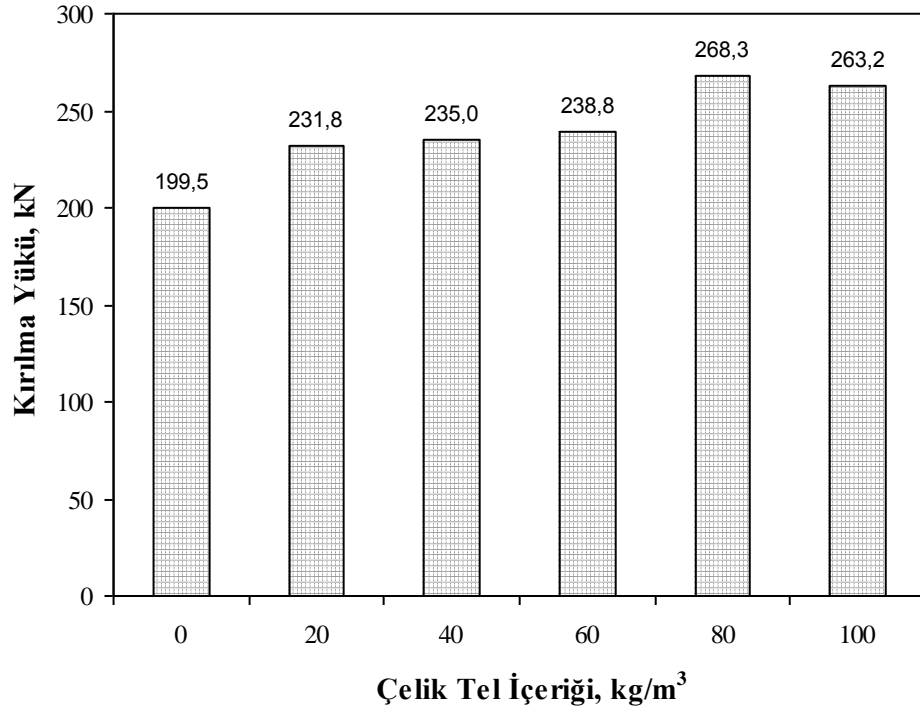
#### 4.4. Çelik Tel Takviyeli Betonarme Kirişlerin Eğilme Dayanımı

Bu çalışmada 200 cm uzunluğunda ve 30x30 cm<sup>2</sup> kesit alanına sahip 2Φ16 çekme donatılı betonarme kirişlerin 0 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>, 60 kg/m<sup>3</sup>, 80 kg/m<sup>3</sup> ve 100 kg/m<sup>3</sup> çelik tel içeriklerindeki eğilme davranışları incelenmiştir. Üçtebir noktalarından yükleme metotuna göre yapılan eğilme deneyinde numunelerin kırılma yükleri ve yük-sehim eğrilerinin belirlenmesi için yüke bağlı 30 mm'ye kadar orta nokta sehimini elde ölçülmüştür. Çelik telin takviyeli betonarme kirişlerin eğilme deneyinden elde edilen kırılma yükleri, 30 mm sehime kadar hesaplanan toklukları ile kırılma yüklerindeki ve tokluklarındaki % artışlar Tablo 4.2'de verilmektedir.

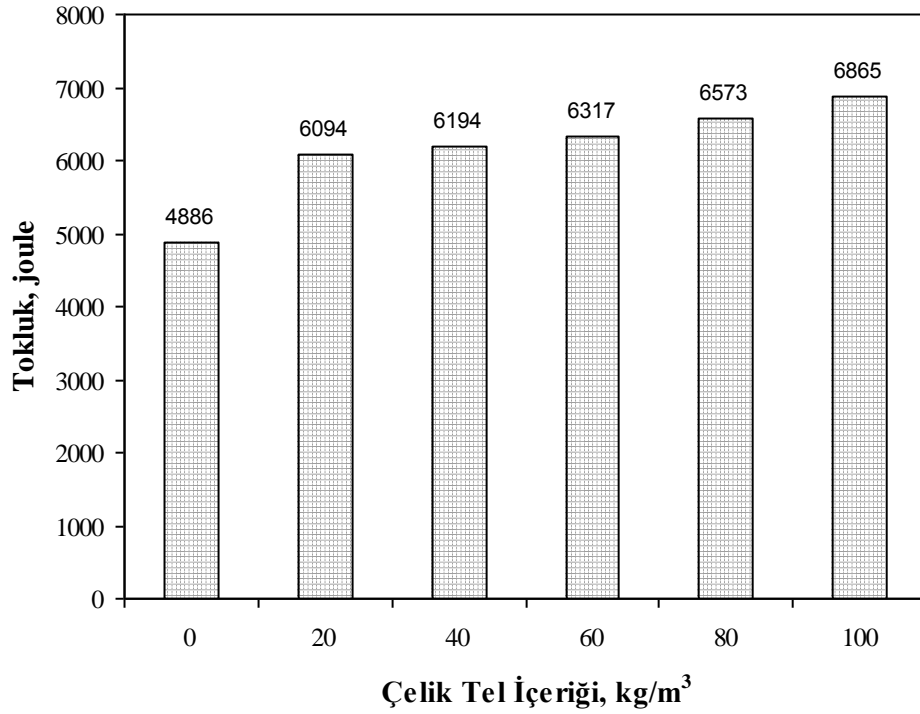
**Tablo 4.2** Betonarme kirişleri ait eğilme deney sonuçları

Seri Kodu	Çelik lif miktarı, $\text{kg/m}^3$	Deneysel kırılma yükü, kN	Tokluk (30 mm sehime kadar), joule	Kırılma yükündeki artış, %	Tokluktaki artış, %
BK-ÇT0	0	199,5	4886	-	-
BK-ÇT20	20	231,8	6094	16,2	24,7
BK-ÇT40	40	235,0	6194	17,8	26,8
BK-ÇT60	60	238,8	6317	19,7	29,3
BK-ÇT80	80	268,3	6573	34,5	34,5
BK-ÇT100	100	263,2	6865	31,9	40,5

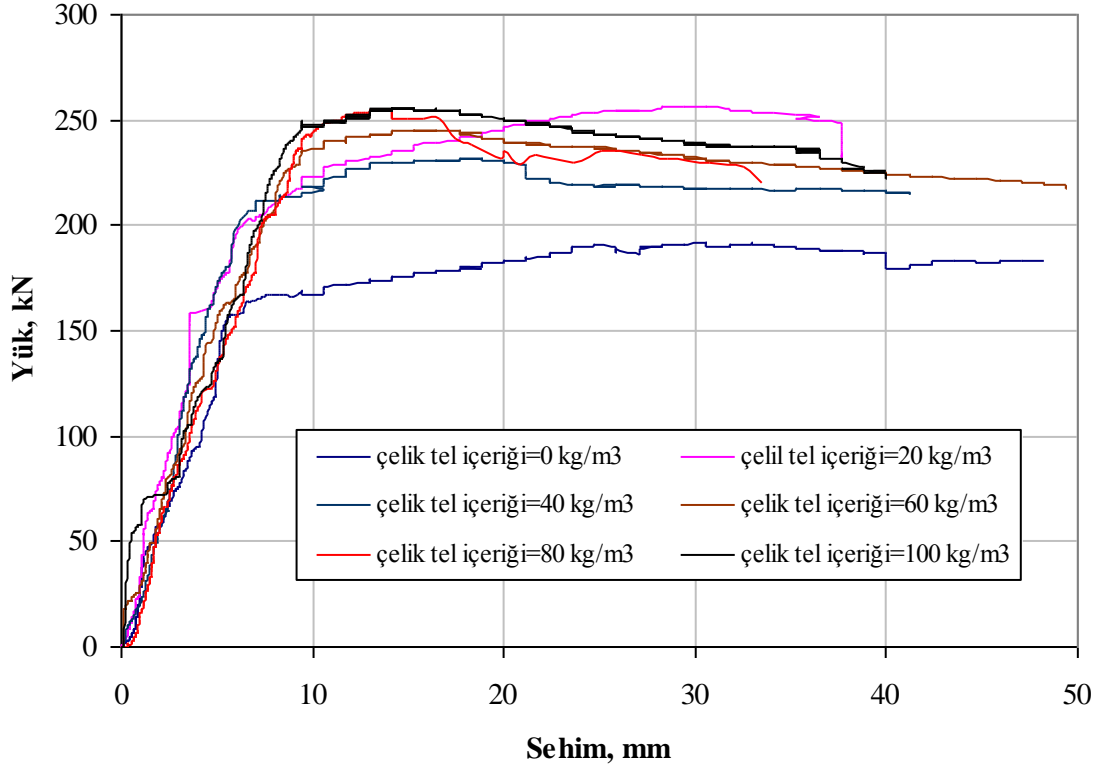
Tablo 4.2'den de görüldüğü gibi çelik tel içeriğinin artmasıyla betonarme kirişlerin deneysel kırılma yüklerinde ve tokluklarında belirgin artış elde edilmiştir. Kırılma yükündeki en büyük artış 80  $\text{kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde %34,5 olarak elde edilmiştir. Kırılma yükündeki artışlar 20  $\text{kg/m}^3$ , 40  $\text{kg/m}^3$ , 60  $\text{kg/m}^3$  ve 100  $\text{kg/m}^3$  için ise sırasıyla %16,2, %17,8, %19,7 ve %31,9 olmuştur. Tokluk değerindeki en büyük artış 100  $\text{kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde %40,5 olarak belirlenmiştir. 20  $\text{kg/m}^3$ , 40  $\text{kg/m}^3$ , 60  $\text{kg/m}^3$  ve 80  $\text{kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde tokluk değerlerindeki artışlar ise sırasıyla %24,7, %26,8, %29,3 ve %34,5 olarak elde edilmiştir. Çelik tel içeriğine bağlı kırılma yükü ve tokluk değerlerinin değişiminin grafiksel gösterimi Şekil 4.16 ve 4.17'de verilmektedir.



Şekil 4.16 Deneysel kırılma yükü-çelik tel içeriği ilişkisi.



Şekil 4.17 Betonarme kirişlerde tokluk-çelik tel içeriği ilişkisi



Şekil 4.18 Betonarme kirişlere ait yük-sehim eğrileri.

Çelik tel takviyeli betonarme kirişler ile çelik tel içermeyen betonarme kirişlerin eğilme deneyinden elde edilen yük-sehim eğrilerinin birlikte gösterimi ise Şekil 4.18'de verilmektedir.



## SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik telin farklı miktarlarda beton ve betonarme kirişlere ikamesiyle elde edilen çelik tel takviyeli betonlar ve betonarme kirişler üzerinde yapılan deneylere bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Çelik tel içeriği arttıkça betonların işlenebilmesi azalmakta, buna karşılık birim ağırlıkları ise artmaktadır.
2. Betonun basınç dayanımında çelik tel içeriğine bağlı olarak artışlar elde edilmiştir. En büyük artış  $100 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde küp ve silindir basınç dayanımı için sırasıyla %8,3 ve %24,5 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık elastisite modülünün çelik tel içeriği arttıkça azaldığı ve en büyük azalmanın ise  $100 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde %9,6 olduğu belirlenmiştir.
3. Çelik tellerin en belirgin iyileşmeleri betonların eğilme dayanımları ve toklukları üzerinde yaptığı gözlenmiştir. Çelik tel içeriği arttıkça betonların eğilme dayanımlarında ve tokluklarında belirgin artışlar elde edilmiştir. Eğilme dayanımındaki en büyük artış  $80 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde %101,6 olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde betonların tokluk değerindeki en büyük artış da  $80 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde 325 joule olarak elde edilmiştir.
4. 200 cm uzunluğunda ve  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  kesit alanına sahip,  $2\Phi 16$  çekme donatılı betonarme kirişlerin eğilme altında kırılma yüklerinin ve tokluklarının çelik tel kullanılmasıyla arttığı görülmüştür. Kırılma yükündeki en büyük artış  $80 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde %34,5 olarak elde edilmiştir. Tokluk değerindeki en büyük artış ise  $100 \text{ kg/m}^3$  çelik tel içeriğinde %40,5 olarak belirlenmiştir.
5. Günümüzde çelik tellerin taşıyıcı yapı malzemelerindeki kullanım alanları ve oranları sürekli artmaktadır. Bunun nedeni çelik tellerin özellikle malzemelerin süneklik üzerinde yaptığı iyileştirmelerden kaynaklanmaktadır. Süneklik depreme dayanıklı yapı ve yapı malzemesi için önemli bir kavramdır. Bu nedenle çelik tel kullanımı özellikle deprem kuşağında olan ülkemizde depreme dayanıklı yapı tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel betonarme elamanların süneklikleri çelik tel kullanımı ile arttırılarak depremlerde yapıların göçme riski azaltılabilir.

6. elik tellerin narinliklerinin farklı olmasının elik tel içeren betonarme kirişlerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri ve farklı su imento oranlarına bağlı olarak elik tel içeren betonarme kirişlerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri yüksek lisans tezi olarak araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

1. Köksal, F., Çelik Tel Donatılı Betonların Mekanik Davranışı ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
2. Kharita, M.H., Takeyeddin, M., S.Alnassar, M., Yousef, S., Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics, *Progress in Nuclear Energy*, 50, 33-36, 2008.
3. I. Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S., Mavi B., Akkurt, A., Radiation shielding of concretes containing different aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 28, 153–157, 2006.
4. Şahin Y., Çelik Tel Dayanımının Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 151 sayfa, 2007.
5. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Pitmann Publishing, London, 1975.
6. Taşdemir, M.A., Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 9-11, 24 Kasım, 1999.
7. Taşdemir, M.A., Bayramov F., Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *İtü dergisi/d Cilt 1, Sayı 2*, 125-144, Aralık, 2002.
8. Balaguru, P.N., Narahari, R., Patel, M., Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 89 (6), 541-545, 1992.
9. Banthia, N., Trottier, J-F., Concrete Reinforced with Deformed Steel Fibers Part II:Tougness Characterization, *ACI Materials Journal*, 92 (2),146-154, 1995.
10. Köksal, F., Eyyubov, C., Özcan, D.M., Çelik Tel İçeriğinin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi", 5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, İstanbul, Türkiye, 169-179, 25-27 Eylül, 2002.
11. Marar, K., Eren, Ö., Çelik, T., Relationship Between Impact Energy and Compression Toughness Energy of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete, *Materials Letters*, 47, 201-304, 2001.

12. Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Şamhal, E., Yerlikaya, M., Endüstriyel Zemin Betonları, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 2006.
13. Ramakrishnan, V., Wu, G.Y., Hosalli, G., Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes" , Transportation Research Record, No. 1226, 69-77, 1989.
14. Shah, S. P., Rangan, B.V., Fiber Reinforced Concrete Properties, ACI Materials Journal, 68 (2), 126-135, 1971.
15. Soroushian, P., Bayasi, Z., Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, 88 (2), 129-134, 1991.
16. Taşdemir, M.A., İlki, A., Yerlikaya, M., Mechanical Behaviour of Steel Fibre Reinforced Concrete Used in Hydraulic Structures, Proceedings of HYDRO 2002: International Conference of Hydropower and Dams, Antalya, Turkey, 159-166, November 4-7, 2002.
17. Constantin E. Chalioris, Chris G. Karayannis, Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams, Cement and Concrete Composites, Volume 31, Issue 5, May 2009, Pages 331-341
18. R.S. Olivito, F.A. Zuccarello, An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete, Composites Part B: Engineering, Volume 41, Issue 3, April 2010, Pages 246-255
19. Şemsi Yazıcı, Gözde İnan, Volkan Tabak, Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 6, June 2007, Pages 1250-1253
20. Jean-Louis Granju, Sana Ullah Balouch, Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 3, March 2005, Pages 572-577
21. Antonio Nanni, Fatigue behaviour of steel fiber reinforced concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 13, Issue 4, 1991, Pages 239-245

22. Köksal F., Altun F, Yiğit İ., Şahin Y., “Combined Effect of Silica Fume and Steel Fiber on The Mechanical Properties of High Strength Concretes”, Journal of Construction and Building Materials, 22 (8), p.1874–1880, Aug 2008.
23. Şahin Y., Köksal F., “The Influences of Matrix and Steel Fibre Tensile Strengths on The Fracture Energy of High-Strength Concrete”, Journal of Construction and Building Materials, 25 (4), p.1801–1806, April 2011.
24. ACI Commitee 544, 1993. Guide for specifying, mixing, placing and finishing steel fibre reinforced concrete (ACI544.3R-93), ACI Materials Journal, 90(1), 94-101.
25. Van Gaysel, A., 1999. A Pull-out model for hooked-end steel fibres, High Performance Fibre Reinforced Composites (HPFRCC3), pp.351-359, Reinhardt, H.W., Naaman A.E.,(eds.), RILEM Publishers.
26. TS10153, 1992. Çelik teller-beton takviyesinde kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
27. Bayramov F., Ilki A., Taşdemir C., Taşdemir M.A. and Yerlikaya M., 2004. SFRCs for Concrete Roads in Heavily Trafficked Situations, 9th International Symposium on Concrete Roads, 2, Istanbul, Turkey, April 4-7, 73-82.
28. Otter, D.E. and Naaman, A. E., 1988. Fiber reinforced concrete under cyclic and dynamic compression load, Research Report, No. UMCE 88-9, Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, 178 pp.
29. Swamy, R.N. and Mangat, P.S., 1974. Influence of fibre-aggregate interaction of some properties of SFRC, Materials and Structures, 7(41), 307-313.
30. Swamy, R.N., 1971. Fibre reinforcement of cement and concrete evaluation of fibre reinforcement cement and composites, Materials and Structures, 19 FRC Commitee, 8(45), 235-254.
31. Arslan, A. ve Aydın, A.C., 1999. Lifli betonların darbe etkisi altındaki genel özellikleri, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, s.44-53

32. Taşdemir, M.A., 2000. Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından getirilen dramix çelik tel donatılı beton plaklar üzerinde yapılan deneyler ile ilgili, Teknik Rapor 1, Proje No:2000/323, İTÜ, İstanbul.
33. Ünal, O., 1999. Isıl işlem uygulanmasının betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 24 Kasım, s.72-79.
34. Hartmann, T., 1999. Steel Fibre Reinforced Concrete, Stockholm.
35. Acun, S., 2000. Yüksek dayanımlı beton üretiminde dizayn parametrisi olarak lifsel katkıların irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
36. Chang, D-I. and Chai, W-K., 1995. Flexural fracture and fatigue behaviour of steel fibre reinforced concrete structures, Nuclear Engineering and Design, 156, 201-207.
37. Chenkui H. and Guafon Z., 1995. Properties of steel fibre reinforced concrete, Cement and Concrete Composites, 17,199-206.
38. Yıldırım, M.A. 1994. Hafif ve yarı hafif betonlarda çelik tel kullanımının etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
39. Taylor, M., Lydon, F.D. and Barr, B.I.G., 1997. Toughness measurement on steel fibre-reinforced high strength concrete, Cement and Concrete Composites, 19, 329-340.
40. Eren, Ö. and Çelik T., 1997. Effect of silisa fume and steel fibres on some properties of high-strength concrete, Construction and Building Materials, 11(7), 373-382.
41. Bayramov, F., Taşdemir, C. and Taşdemir, M.A., 2002. Optimum design of cement-based composites materials using statistical response surface method”, Fifth International Congress on Advanced in Civil Engineering, ITU, İstanbul, Turkey, September 25-27, 725-734.

42. Cengiz Duran Atiş, Okan Karahan, Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete ,Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 1, January 2009, Pages 392-399
43. Fushu Jeng, Ming-Lang Lin, Shih-Che Yuan Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 17, Issue 1, January 2002, Pages 69-82
44. Fatih Altun, Tefaruk Haktanir, Kamura Ari Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams , Construction and Building Materials, Volume 21, Issue 3, March 2007,Pages 654-661
45. M. K. Lee, B. I. G. Barr Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete , Cement and Concrete Composites, Volume 25, Issue 3, April 2003, Pages 321-332
46. F. Buyle-Bodin, M. Madhkan Performance and modelling of steel fibre reinforced piles under seismic loading, Engineering Structures, Volume 24, Issue 8, August 2002, Pages 1049-1056.
47. Tayfun Uygunoğlu Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete, Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 2, February 2011, Pages 766-772
48. Betterman, L.R., Ouyang, C. And Shah, S.P., 1995. Fiber matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, Advanced Cement Based Materials, 2, 53-61.
49. Miao, C., Mu, R., Tian, Q. and Sun, W., 2002. Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fibre reinforcement, Cement and Concrete Research, 32, 31-34.
50. Romualdi, J. P. and Batson, G. B., 1963. Mechanics of crack arrest in concrete, Journal of Engineering Mechanics, 89, No. EM3, June, 147-168.
51. Sullivan, A.P., 1999. The effect of hydro-thermal curing at 90°C and the use of 13 mm steel fibres on reactive powder concrete”, *Master Science Thesis*, University of Wales, Cardiff.

52. Lange-Kornbak, D., ve Karihaloo, B.L., 1998. Design of fibre-reinforced DSP mixes for minimum brittleness, *Advanced Cement Based Materials*, 7, 89-101.
53. Swamy, R.N. and Mangat P.S., 1974. A Theory for flexural strength of fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 4(2), 315-325.
54. Soroushian, P., Aouadi, F. and Hsu, J-W., 1995. Theoretical optimization of fibre reinforced cement composites, *ACI Materials Journal*, 92(4), 373-382.
55. Balendran, R.V. and Zhou, F.P., 2002. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete” , *Building and Environment*, 6, 255-258.
56. Trottier, J.-F. and Banthia, N., 1994. Toughness characterization of steel fiber reinforced concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 6(2), 264-289.
57. Ezeldin, A. S. and Balaguru, P. N., 1989. Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 86(5), 515-524.
58. Taerwe, L. R., 1992. Influence of steel fibers on strain-softening of high-strength concrete" *ACI Materials Journal*, 89(1), 54-60.
59. Williamson, G. R., 1974. The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete, *A State-of-art report*, ACI SP-44, American Concrete Institute, Detroit, MI, 195-207.
60. Naaman, A.E., Moavenzadeh, F. and McGarry, F., 1974. Probabilistic analysis of fiber reinforced concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, April, 100, No. EM2, 397-413.
61. Ezeldin, A. S. and Balaguru, P. N., 1992. Normal- and high-strength fiber-reinforced concrete under compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(4), 415-429.
62. Paul Z, Shuaib A. and Michael L., 1996. High-performance concretes a state-of-art report (1989-1994) FHWA-RD-97-030 .
63. Halpin, J. C. and Tsai, S. W., 1969. Effects of environmental factors on composite materials, *Technical Report*, AFML-TR 67423, NY.



64. Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D. and Wood D., 1994. Properties of steel fibre reinforced shotcrete, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21, 564-575.
65. Husamuddin, S.N. and Antoine, E.N., 1995. Prediction model for elastic modulus of high-performance fiber reinforced cement-based composites, *ACI Materials Journal*, 92(3), 304-314.
66. Najm, H. and Naaman, A. E., 1995. Prediction model for elastic modulus of high performance fiber reinforced cement composites, *ACI Materials Journal*, 92(3), 304-314.
67. Shah, P., Stroeven, P., Dalhuisen, D. and Stekelenburg P. V., 1978. Complete stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete in uniaxial tension and compression, *Testing And Test Methods of Fibre Cement Composites*, pp.399-408, The Construction Press, Lancaster, England.
68. Fanella, D. A. and Naaman, A. E., 1985. Stress-strain properties of fiber reinforced concrete in compression. *ACI Materials Journal*, 82(4), 475-483
69. Ezeldin, A. S. And Lowe, S. R., 1991. Mechanical properties of steel fiber reinforced rapid-set materials, *ACI Materials Journal*, 88(4), 384-389.
70. Gasparini, D.A., Verna, D. and Abdallah, A., 1989. Post cracking tensile strength of fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 6, 10-15.
71. Lim, T. Y., Paramavisam, P. and Lee, S. L., 1987. Analytical model for tensile behavior of steel fiber concrete. *ACI Materials Journal*, 84(4), 286-298.
72. ACI Committee 544, 1982. Fiber reinforced concrete, A State-of-the-art report ACI 544.1R-82, *Concrete International*, May, 5, 9-30.
73. Edington, J., Hannant, D.J. and Williams, R. I. T., 1974. Steel fiber reinforced concrete, Building Research Establishment, CP 69174 Garston, Waterford, England.
74. ACI Committee 544, 1990. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. *ACI Manual of Concrete Practice, Part 5*, American Concrete Institute, Detroit, MI., USA.

75. Naaman, A.E., 1985. High strength fiber reinforced cement composites, Proceedings Of Symposium On Potential Of Very High Strength Cement-Based Materials, pp. 217-229, Materials Research Society; Ed. by J. F. Young.
76. Lim, D.H. and Oh, B.H., 1999. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams, Engineering Structures, 21, 937-944.
77. Gao, J., Sun, W. and Morino, K., 1997. Mechanical properties of steel fibre reinforced high-strength lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 19, 307-313.
78. Shah, S. P., 1991. Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?, ACI Materials Journal, Nov-Dec, Vol. 88, 6, 595-602.
79. Romualdi, J. P. and Mandel, J. A., 1964. Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed closely spaced short lengths of wire reinforcement. ACI Journal, 61(6), 657-671.
80. Batson, G.B., 1991. Fatigue strength toughness indices of fiber reinforced concrete. durability of concrete. Second International Conference held in Montreal, pp.715-728. Canada; Ed. by V.M. Malhotra; American Concrete Institute, Detroit, MI, Vol. 2, (ACI SP-126).
81. Yan, H., Sun, W. and Chen, H., 1999. The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete, Cement and Concrete Research, 29, 423-426.
82. ASTM C 1018, 1992. Standart test methods for flexural thoughness and first crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading), American Society of Testing Materials, USA.
83. JSCE Standart SF-4, 1984. Method of test of flexural strength and flexural thoughness of fiber reinforced concrete, Japan Society of Civil Engineering, Japan.
84. RILEM TC 162-TDF, 2000. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, RILEM.

85. EN 14651, Test Method for Metallic Fibered Concrete-Measuring the Flexural Tensile Strength, June, 2005.
86. Moyson, D., Nemegeer, D. and Vandewalle, M., 1994. The design of steel fibre reinforced concrete tunnel linings, Technical Report, March, Belgium.
87. Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B., 1995. Drying shrinkage of fibre reinforced concrete containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, 29, 1835-1840.
88. Grzybowski, M. ve Shah, S.P., 1987. Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 87(2), 138-148.
89. Edington J., 1973. Steel fiber reinforced concrete", Ph.D. Thesis, University of Surrey, UK.
90. Swamy R.S. and Stavrides H., 1979. Influence of fibre reinforcement on restraining shrinkage and cracking, *Journal of ACI*, 75, 443-460.
91. Schrader, E.K. and Munch, A.V., 1976. Fibrous concrete repair of cavitation damage, *ASCE Journal of the Construction Division*, 102, 385-399.
92. ACI Committee 544, 1988. Design considerations for steel fiber reinforced concrete (ACI 544.4R-88). *Manual of Concrete Practice*, 5, American Concrete Institute, Detroit, MI.
93. Nanni, 1989. Abrasion resistance of roller compacted concrete. *ACI Materials Journal*, 86(6), 559-565.
94. Sustersic, J., Mali, E., and Urbancic, S., 1991. Erosion-abrasion resistance of steel fibre reinforced concrete, *Second International Conference in Durability of Concrete*, pp 729-743, Montreal, Canada; Ed. by V. M. Malhotra; American Concrete Institute, (ACI SP-126), Detroit, MI.
95. Ocean Concrete Products, Ocean Heidelberg Cement Group, Steel Fibre Reinforcement, *Working Together to Build Our Communities Report*, 1999, USA.
96. Dupont, D., Vandewalle, L., Bending Capacity of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) Beams, *International Congress on Challenges of Concrete Construction*, Dundee, pp. 81-90, 2002.

97. Ganesan, N., Shivananda, K. P., Spacing and Width of Cracks in Polymer Modified Steel Fibre Reinforced Concrete Flexural Members, International Congress on Challenges of Concrete Construction, Dundee, pp. 244-253, 2002.
98. Alavizadeh-Farhang, A., Plain and Steel Fibre Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Mechanical and Thermal Loading, Thesis, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Bulletin No.38, Stockholm, Sweden, 1998.
99. Hartman, T., Steel Fiber Reinforced Concrete, Thesis, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1999.
100. Abolhassan A. A., Casey H., Qiuhong Z., Analysis of Car-Bomb Effects on Buildings using MSC-Dytran
101. Software and Protective Measures, Proceedings of The MSC Software Virtual Product Development Conference, Dearborn, Michigan, pp. 1-10, October 13 15, 2003
102. Corley W. G., Applicability of Seismic Design in Mitigating Progressive Collapse, Construction Technology Laboratories Report, Inc., Skokie, Illinois, Nist workshop, 2002.
103. Vandenberghe M., B. Zwevegem., Steelfibres for the Construction of military shelters, IV. International Dramix Conference, Belgien, November 7-8, 1990.
104. Altun F., Yılmaz C., Durmuş A., Arı K. Çelik Lif Katkılı ve Katkısız Betonarme Kirişlerin Basit Eğilme ve Patlama Yükleme İle Davranışlarının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 22(1-2) 112-120 (2006)
105. TS500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları Türk Standartları Enstitüsü, Şubat 2000 Ankara.
106. TS EN 12350-6, Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
107. TS EN 12350-2 , Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi Türk Standartları Enstitüsü, 2002, Ankara.

108. TS EN 12350-7 Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini- Basınç Metotları 2002, Türk Standartları Enstitüsü, 2002, Ankara.
109. TS 3114 ISO 4012, Beton basınç mukavemeti tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
110. Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., Batson, G.B., Criswell, M.E., Ramakrishnan, V. and Wecharatana, M., 1991. Fracture toughness of fibre reinforced concrete, ACI Materials Journal, 88(4), 339-353.

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Yozgat'ta doğan Hasan EROL, orta ve lise öğrenimini sırasıyla Fatih Sultan Mehmet İlkokulu, İstiklal Ortaokulu ve Erdoğan Akdağ Anadolu Öğretmen lisesinde tamamlamıştır. 1999 yılında kazandığı Dumlupınar Üniversitesi Mimarlık- Mühendislik Fakültesi İnşaat mühendisliği bölümünü 2003 yılında başarıyla bitirmiştir.

2009 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. Doç.Dr. Ziyafeddin BABAYEV ve Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL danışmanlığında “Çelik Tel İçeren Betonarme Kirişlerin Mekanik Davranışı” başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamaktadır.

2003 yılından beri İnşaat Mühendisi olarak çalışmakta olan Hasan EROL, evli ve 1 çocuk babasıdır.

### İletişim Bilgileri

Adres: Aşağı Nuhutlu Mah. Geçit Sok. Ufuk Apt. Altı No: 6/14

Merkez/YOZGAT

66100 YOZGAT

Telefon: (354) 212 61 15

Faks: (354) 212 61 15

E-posta: mimasinsaat@gmail.com