



Çelik fiber katkılı etriyesiz betonarme kirişlerin davranışı

Selçuk Saatçi^{ID*}, Baturay Batarlar^{ID}

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35430, Urla, İzmir, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Çelik fiber katkısının betonarme kiriş eğilme davranışına etkisi
- Çelik fiber katkılı betonarme kirişte çatlakta çekme gerilmelerinin modellenmesi
- Çelik fiber katkılı betonarme kiriş eğilme davranışının modellenmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 15.07.2016

Kabul: 15.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.369512

Anahtar Kelimeler:

Betonarme kirişler,
çelik fiber katkılı beton,
betonarme kirişlerde kesme
davranışı,
betonarme kirişlerde eğilme
davranışı,
çelik fiber katkısının
modellenmesi

ÖZET

Sunulan çalışmada çelik fiber katkısının farklı boyuna donatı oranlarına sahip etriyesiz betonarme kirişlerin eğilme davranışına olan etkileri deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada düşük ve yüksek boyuna donatı oranına sahip iki grup kiriş imal edilmiştir. Her bir gruptaki kirişler hacimce %0, %0,5, %1,0 ve %1,5 çelik fiber oranına sahip olup toplam sekiz kiriş açıklık ortasına uygulanan yük altında test edilmiştir. Düşük boyuna donatı oranına sahip kirişlerde çelik fiber katkısı eğilme kapasitesini %50'ye yakın oranlarda arttırmış, ancak deformasyonların tek bir çatlakta toplanması sebebiyle boyuna donatıda kopmaya yol açarak çelik fiber katkısız kirişe göre daha az yerdeğiştirme yapmasına sebep olmuştur. Yüksek boyuna donatı oranına sahip kirişlerde ise çelik fiber katkısı etriye görevi yaparak çelik fiber katkısı olmaması durumunda gevrek eğik çekme göçmesi gösteren kirişlerin sünek eğilme göçmesi göstermelerini sağlamıştır. Her iki grupta çelik fiber oranının artırılması çatlak dağılımını etkilemekle birlikte davranışta önemli bir farklılığa yol açmamıştır. Kirişler analitik yöntemlerle modellendiğinde literatürde yaygın kullanılan ve çatlakta çelik fiberlerin taşıdığı çekme gerilmesini sabit kabul eden yaklaşımın güvenli tarafta olmakla birlikte eğilme kapasitesinin olduğundan düşük hesaplanmasına yol açtığı, çekme gerilmelerini çatlak genişliği ile ilişkilendiren daha hassas modellerin daha iyi sonuç verebilecekleri görülmüştür.

Behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups

H I G H L I G H T S

- Effects of steel fiber on the bending behavior of reinforced concrete beams
- Modeling crack tensile stresses in steel fiber reinforced concrete beams
- Modeling bending behavior of steel fiber reinforced concrete beams

Article Info

Received: 15.07.2016

Accepted: 15.11.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.369512

Keywords:

Reinforced concrete beams,
steel fiber reinforced concrete,
shear behavior in reinforced
concrete beams,
bending behavior in reinforced
concrete beams,
modeling steel fiber
contribution

ABSTRACT

In this study, effects of steel fibers on the bending behavior of reinforced concrete beams of varying longitudinal reinforcement ratios and without stirrups are investigated experimentally and analytically. In the experimental work, two groups of simply supported beams of low and high longitudinal reinforcement ratio were manufactured. Each group had 0%, 0.5%, 1.0% and 1.5% steel fiber ratio in volume. Eight beams were tested under a load applied at midspan. In the group with lower longitudinal reinforcement ratio, steel fibers increased the bending capacity by almost 50%. However, since deformations were concentrated on a single crack, longitudinal reinforcement has ruptured and the beams could not displace as much compared to the one without steel fibers. In the group with higher longitudinal reinforcement ratio, steel fibers acted like stirrups and changed the brittle shear failure mode to a ductile bending failure. Although increasing the steel fiber ratio affected crack distributions, it did not cause a significant difference in the behavior. When analytically modeled using a common model that assume constant tensile stress at crack, computed bending capacities were lower than actual, although on the safe side. More precise models that relate tensile stresses to the crack width could give better estimations.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: selcuksaatci@iyte.edu.tr / Tel: +90 232 750 6814

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

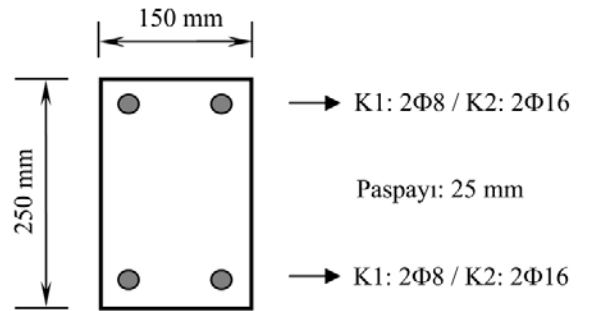
Betonun çekme dayanımına olan katkısı sebebiyle özellikle çatlamının istenmediği endüstriyel yapı zeminleri, silolar, sıvı tankları, iklim ve dış etkiler bakımından agresif ortamlarda inşa edilen yapılar gibi yapılarda çelik veya polipropilen lifler yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Çelik fiber genel olarak betonun malzeme ve yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmakta olup yük taşıyıcı elemanlarda betonun çekme dayanımını arttırmak amacıyla donatı takviyesi olarak kullanımı ise ancak son zamanlarda artan çalışmalarla mümkün olabilmektedir [2]. Çelik fiberlerin betonun çekme dayanımına olan katkılarından dolayı kayma dayanımını önemli ölçüde arttırdıkları görülmüş ve elde edilen bulgular doğrultusunda yapı yönetmeliklerinde kayma donatısı olarak kullanımına yer verilmeye başlanmıştır. Örneğin Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) yayınladığı ACI 318 yapı yönetmeliğinde belirli bir oranda çelik fiber kullanılan ve kayma gerilmesinin belirlenen limitlerin altında olduğu kirişlerde etriye kullanılmamasına izin verilmiş, başka bir deyişle çelik fiberlerin kullanılması zorunlu olan minimum etriye oranını karşıladığı kabul edilmiştir [3]. Ancak çelik fiber katkısının yapısal etkileri üzerine yapılan çalışmalar halen yetersiz düzeyde olduğundan güncel yönetmelikler çelik fiber katkısının eğilme kapasite ve davranışına olan katkılarının göz önüne alınmasına izin vermemektedirler.

Literatürde çelik fiber katkısının betonarme yapı elemanlarının davranışı üzerine olan etkilerini inceleyen çok sayıda araştırma mevcuttur [4]. Betonarme kirişler üzerine son zamanlarda yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak çelik fiber katkısının kesme davranışına olan etkileri üzerine odaklanmıştır [5]. Kirişlerin eğilme davranışı üzerine olan etkileri hakkında kapsamlı çalışmaların sayısı daha sınırlıdır [6]. Eğilme davranışı üzerine olan deneysel çalışmalar genelde basınç donatısı olmayan kirişler üzerinde dört noktalı eğilme yükü altında yapılmakta olup araştırılan ana konular çelik fiberin türü, boyu, oranı gibi parametrelerin davranışa olan etkileri olduğu için deney numunelerinde boyuna donatı oranı sabit tutulmaktadır [7]. Çelik fiber katkısının betonarme kirişlerin eğilme davranışına olan etkilerinin daha iyi anlaşılması için uygulamada çok yaygın olan basınç donatısı varlığının göz önüne alınması ve farklı boyuna donatı oranlarının davranış üzerine olan etkisinin araştırılması gerekmektedir. Bu amaçla burada sunulan çalışmada çelik fiber katkılı basınç donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışının anlaşılması yönünde bir deneysel çalışmaya yer verilmiş, yapılan çalışmada değişen boyuna donatı oranının davranışa olan etkileri de incelenmiştir. Yürütülen deneysel programda deney numuneleri boyuna donatı oranlarına göre iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup (K1 serisi) sahip olduğu düşük boyuna donatı oranından dolayı eğilme kapasitesi kesme kapasitesinden düşük olduğundan eğilme göçmesi gösterirken ikinci grup (K2 serisi) daha yüksek boyuna donatı oranıyla kesme kapasitesinden daha yüksek eğilme kapasitesine sahiptir ve çelik fiber katkısı olmaması

durumunda eğik çekme göçmesi göstermektedir. Her iki grubun da boyuna donatı oranı denge altıdır. Her iki grupta da etriye kullanılmamış, bu şekilde çelik fiberlerin eğilme davranışına olan etkilerinin etriye oranından bağımsız olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Tüm numunelerde basınç donatısı oranı çekme donatısı oranına eşit tutulup kirişlerin yüksek derecede süneklik göstererek yüksek çatlak genişliklerine ulaşması sağlanmış, bu şekilde çelik fiberlerin geniş bir çatlak genişliği aralığında etkilerinin incelenmesi mümkün olmuştur. Her iki deney grubunda da dört farklı çelik fiber katkısı oranı ile üretilen numuneler test edilerek çelik fiber katkı oranının davranışa olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların literatürde yaygın olarak kullanılan mevcut modellere göre analizleri yapılarak bu modellerin hassasiyet dereceleri de irdelenmiştir.

2. DENEY PROGRAMI (EXPERIMENTAL PROGRAM)

Çelik fiber katkılı betonarme kirişlerin davranışının incelenmesi amacıyla toplam sekiz adet kiriş numunesi test edilmiştir. Tüm deney numuneleri 150x250x2300 mm boyutlarındadır. Numuneler altta ve üstte simetrik olacak şekilde ikişer boyuna donatıya sahip olup paspayı 25 mm olarak bırakılmıştır (Şekil 1). Mesnetlerin merkezinden merkezine açıklık 2000 mm'dir. Numunelerin tasarımında herhangi bir ölçek gözetilmemiştir. Numunelerin dördünde 8 mm çaplı (K1 serisi), dördünde ise 16 mm çaplı donatılar kullanılmıştır (K2 serisi). Boyuna donatılar uçlarında yaklaşık 150 mm kanca boyu bırakacak şekilde 90° bükülmüş, bu şekilde hem alt ve üst donatılar birbirlerine kancalarından bağlanarak üst donatıların etriyesiz yerleştirilmesi sağlanmış hem de boyuna donatıların ankraji temin edilmiştir. Hiçbir numunede etriye kullanılmamıştır. Numune isimleri, kullanılan boyuna donatı ve çelik fiber katkısı oranları Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Kiriş numuneleri kesiti (Beam specimen cross section)

Çelik fiberler arzu edilen hacimsel orana göre metreküp başına düşen çelik fiber ağırlığı hesaplanıp tartılarak beton karışımına eklenmiş, karışım üreticinin tavsiyeleri doğrultusunda beton mikserinde karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlardan 150x300 mm'lik standart silindir numuneler alınarak basma ve çekme dayanımları bulunmuştur. Tablo 2'de 28 günlük basma dayanımları ile yaklaşık olarak deneylerin yapıldığı günlerde (dökümden yaklaşık 12 ay

Tablo 1. Numune donatıları ve çelik fiber katkısı oranları (Specimen reinforcement and steel fiber ratios)

Numune	Boyuna Donatı (altta + üstte)	Çekme Donatısı Oranı	Çelik Fiber Oranı (%, hacimsel)
K1s0	2Φ8 + 2Φ8	0,003	0
K1s05	2Φ8 + 2Φ8	0,003	0,5
K1s10	2Φ8 + 2Φ8	0,003	1,0
K1s15	2Φ8 + 2Φ8	0,003	1,5
K2s0	2Φ16 + 2Φ16	0,012	0
K2s05	2Φ16 + 2Φ16	0,012	0,5
K2s10	2Φ16 + 2Φ16	0,012	1,0
K2s15	2Φ16 + 2Φ16	0,012	1,5

Tablo 2. Beton mekanik özellikleri (Concrete mechanical properties)

Fiber oranı, %	Basınç Dayanımı (MPa)		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
	28 gün	Deney günleri (dökümden yaklaşık 12 ay sonrası)	
0	33,8	42,4	2,3
0,5	36,7	49,3	3,5
1,0	35,2	45,4	5,1
1,5	49,4	56,5	10,7

sonrası) bulunan basma ve yarmada çekme dayanımları verilmektedir. Kullanılan çelik fiber 0,75 mm çapında 60 mm uzunluğunda iki ucu kancalı olup Dramix® RC-80/60-BN ticari markasına sahiptir. Boyuna donatı S420 çeliği olup yapılan çekme deneyleri sonucu akma dayanımı 480 MPa, çekme dayanımı 590 MPa, akma birim uzaması 0,0025, pekleşmenin başladığı birim uzaması 0,024, kopma birim uzaması 0,12 olarak bulunmuştur.

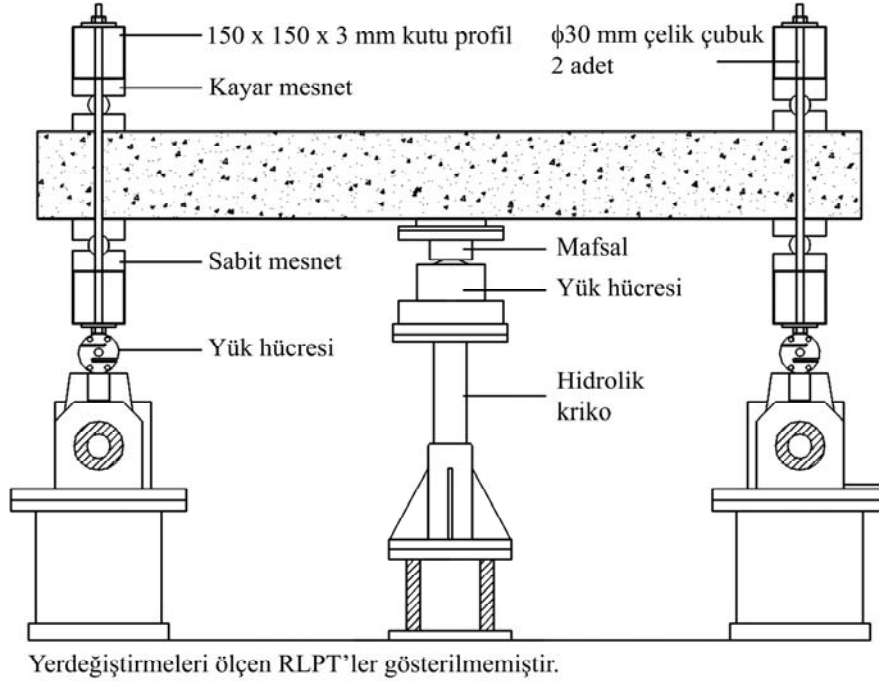
Deney düzeneği Şekil 2'de verilmiştir. Yükleme bir hidrolik krikö vasıtasıyla aşağıdan yukarı yönlü uygulanmış olup mesnetler dönmeleri ve bir uçta yanal ötelenmeyi serbest bırakacak şekilde düzenlenmiş, bu şekilde basit mesnet koşulu elde edilmiştir. Yükleme yüzeyi 200 mm çapında dairesel çelik bir plakadan oluşmaktadır. Deneylerde uygulanan yük ve mesnetlerde ölçülen tepki kuvvetleri yük hücreleri ile, yerdeğiştirmeler ise kiriş altına ve biri tam açıklık ortasına olmak üzere üzerine belli aralıklarla yerleştirilen 13 adet RLPT (Resistive Linear Position Transducer) ile ölçülüp kaydedilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Deney sonuçlarının sağlıklı değerlendirilebilmesi için çelik fiber katkısı olmayan kirişlerin beklenen davranışlarının incelenmesi yerinde olacaktır. Tüm kirişler etriyesiz olup kesme açıklığının (a: mesnet ve yük arasındaki mesafe) faydalı yüksekliğe (d) oranı K1 serisi için $1000/221=4,52$, K2 serisi için $1000/217=4,60$ 'tır. Bu a/d oranlarına sahip kesme donatısı ve çelik fiber katkısı bulunmayan kirişlerde boyuna donatının sağladığı eğilme kapasitesine göre eğik çekme göçmesi veya eğilme göçmesi beklenir. Kirişlerin eğik çatlama dayanımları hesabında TS 500'de [8] verilen

formül (TS 500 Denklem 8.1) açıkça belirtilmeyen güvenlik katsayıları içerdiğinden etriyesiz kirişlerin eğik çatlama dayanımı hesabı için yaygın kabul gören ve ACI 318M-11'de de yer alan $V_{cr} = 0.17\sqrt{f'_c}b_wd$ formülü kullanılmış [3] ve buna göre hesaplanan kesme dayanımları K1s0 için 36,7 kN, K2s0 için 36,0 kN bulunmuştur. Bu kesme kuvvetleri sırasıyla 73,4 kN ve 72,0 kN uygulanan yüke karşılık gelmektedirler. Kirişlerin eğilme kapasiteleri ise TS 500'e göre K1s0 için 11,0 kN.m, K2s0 için 40,7 kN.m olarak hesaplanmış, kirişleri açıklık ortasında bu moment kapasitelerine ulaştıracak yükler, yükün 0,2 m'lik yükleme plakası boyunca düzgün yayılı olarak uygulandığı varsayımıyla, sırasıyla 23,2 kN ve 85,7 kN olarak bulunmuştur. Eğilme kapasitesi hesabında donatı pekleşmesi ihmal edilmiş, her iki kirişte de hesaplara göre boyuna çekme donatısının betonun ezilmesinden önce aktığı, dolayısıyla boyuna donatı oranının denge altı olduğu tespit edilmiştir. Maksimum eğilme ve kesme kapasiteleri dikkate alındığında eğilme kapasitesi kesme kapasitesinden çok daha düşük olduğu için K1s0 kirişinin eğilme göçmesi, K2s0 kirişinin ise kesme kapasitesi eğilme kapasitesinden düşük olduğu için eğik çekme göçmesi göstermesi beklenir.

Kirişlerin statik deneylerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3'te verilmektedir. Deneylerde ölçülen maksimum yük ve yerdeğiştirme değerleri Tablo 3'te özetlenmekte, tüm kirişlerin göçme sonrası fotoğrafları ise Şekil 4 ve 5'te sunulmaktadır. Düşük boyuna donatı oranına sahip K1 serisi kirişlerin tamamı beklenildiği gibi eğilme göçmesi göstermişlerdir. Çelik fiber katkısı olmayan K1s0 numunesinde 26,2 kN yükte çekme donatısı akması görülmüştür. Deneyde gözlemlenen akma yükü TS 500 kullanılarak hesaplanan yükten yaklaşık %12 daha yüksektir. Bu kirişlerde çelik fiber katkısı kirişlerin yük kapasitesini



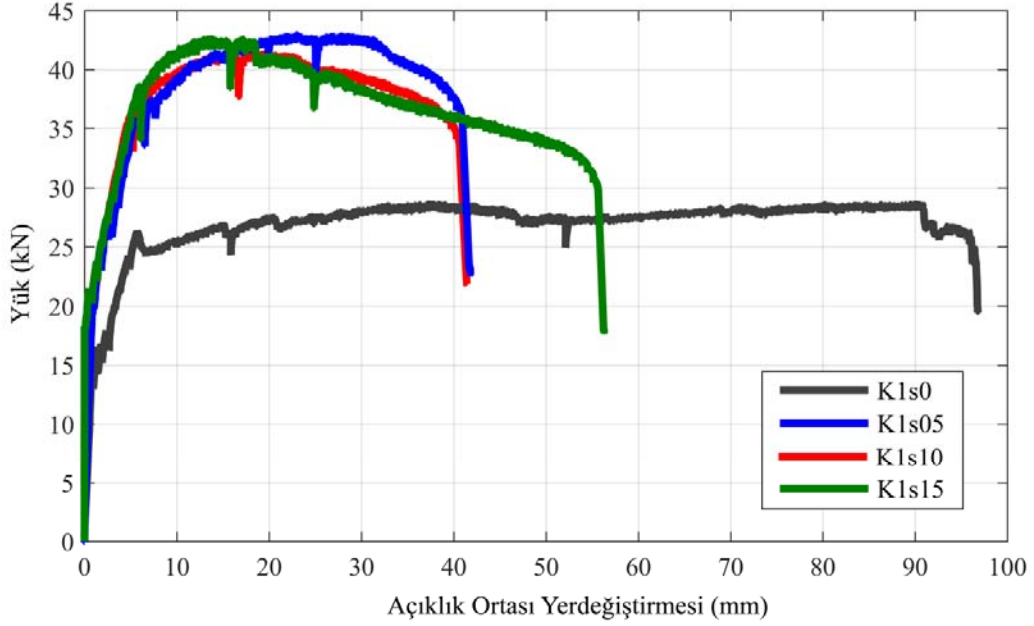
Şekil 2. Deney düzeneği (Test setup)

önemli oranda arttırmıştır. Çelik fiber katkısı olmayan K1s0 numunesi 28,7 kN yükte geçerken çelik fiber katkılı kirişler yaklaşık 42 kN yükte çekme donatısının kopmasıyla göçmeye uğramışlardır. Çelik fiber katkısı yük kapasitesini yaklaşık %45 arttırmıştır. Ancak çelik fiber katkı oranının artırılmasının bu kapasite artışına önemli bir etkisi gözlemlenememiş, %0,5, %1 ve %1,5 çelik fiber katkılı kirişlerin davranışları ve yük kapasiteleri büyük oranda aynı olmuştur.

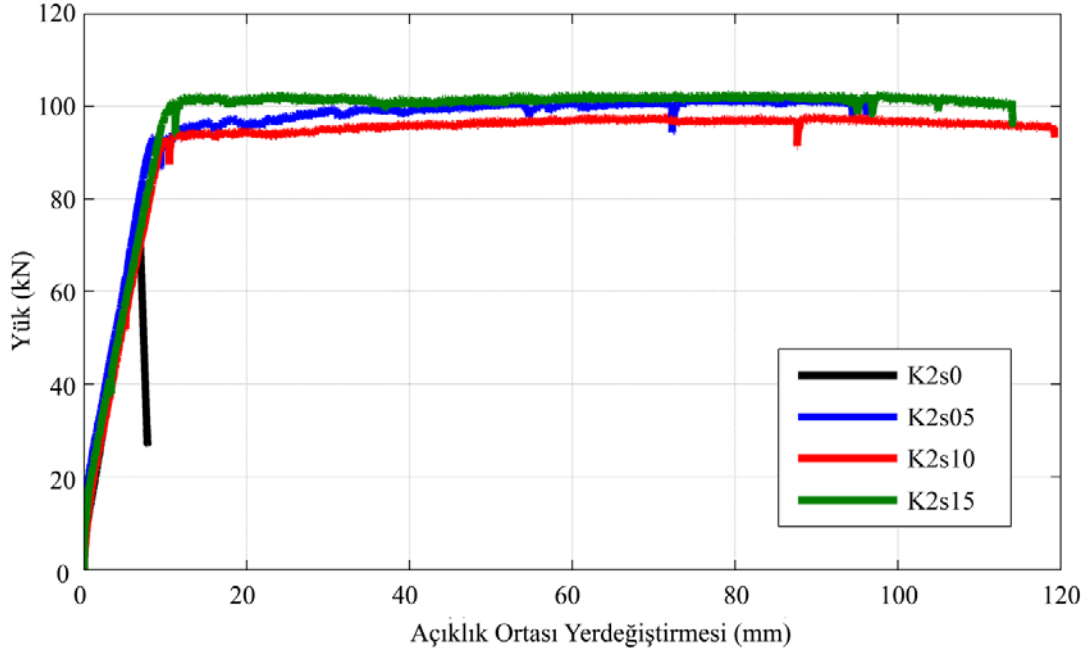
Çelik fiber oranının artmasının çatlak dağılımını etkilediği gözlemlenmiştir. K1s05 numunesinde ortadaki ana çatlak göçme anında yaklaşık 4 mm genişliğinde iken bu çatlak her iki yanında genişlikleri 0,1 mm ile 0,9 mm arasında değişen altı büyük çatlak daha oluşmuştur. K1s10 numunesinde ise ortadaki ana çatlak 6 mm genişliğe ulaşırken bu çatlak dışında orta bölgede 1,2 mm genişliğinde bir tane büyük çatlak oluşmuştur. En yüksek çelik fiber oranına sahip K1s15 numunesinde ise ana çatlak 10 mm'ye kadar açılmışken yanında 0,9 mm ve 0,7 mm genişliğinde iki çatlak daha oluşmuştur. Genel olarak çatlak dağılımları incelendiğinde artan çelik fiber oranının çatlak gelişimini az sayıda çatlakta topladığı, diğer çatlakların genişlemesini engellediği görülmektedir. Çelik fiber katkılı kirişler arasındaki en belirgin davranış farkı %1,5 oranında çelik fiber katkılı kirişin diğer çelik fiber katkılı kirişlere oranla daha yüksek yerdeğiştirme değerlerine ulaşmasıdır. %0,5 ve %1 çelik fiber katkılı kirişler yaklaşık 41 mm yerdeğiştirmede göçmeye uğrarken %1,5 çelik fiber katkılı kiriş 56 mm yerdeğiştirmede göçmüştür. Yaklaşık %36 oranında fazla yerdeğiştirme yapan bu kirişin yüksek fiber oranından kaynaklanan çatlakları kesen çelik fiberlerin sayıca çok daha fazla olmasından dolayı ortadaki ana çatlakın 10 mm açılmasına kadar yük taşıyabilmesi kirişin daha fazla

yerdeğiştirme yapmasına sebep olarak gösterilebilir. Daha düşük fiber oranına sahip kirişler bu çatlak genişliklerine ulaşmadan sıyrılarak yük taşıma kapasitelerini yitirmişlerdir. Çelik fiber katkısı olmayan K1s0 numunesi ise çelik fiber katkısı olan kirişlere oranla çok daha düşük yük kapasitesine sahip olmakla beraber çok daha yüksek yerdeğiştirme değerlerine ulaşabilmiştir. Bu kirişin çatlak dağılımına bakıldığında çelik fiber katkılı kirişlerin aksine bu kirişte orta bölgede genişlikleri 2 mm ile 5 mm arasında değişen dört büyük çatlak oluştuğu görülmektedir. Çelik fiber katkılı kirişlerde ortada oluşan ana çatlak dışında oluşan çatlaklar çelik fiberlerden dolayı genişleyememekte, tüm deformasyon en büyük momentin geliştiği orta bölgedeki ilk çatlakta toplanmaktadır. Boyuna çekme donatısı bu çatlakta yerel olarak çok yüksek birim şekil değiştirmelere maruz kalmakta ve artan yük altında çatlakın genişlemesi sonucu çelik fiberlerin sıyrılmasıyla boşalan çekme yükünü taşıyamayarak kopmaktadır. Ancak çelik fibersiz kirişte oluşan tüm çatlaklar genişleyebilmekte, bunun sonucunda boyuna donatı üzerindeki gerilme yoğunlaşmaları daha uzun bir bölgede oluşarak daha yüksek uzamalara izin vermekte ve kiriş çok daha yüksek yerdeğiştirme değerlerine ulaşabilmektedir.

K2s0 numunesi çelik fiber katkısı içermeyip beklenildiği gibi çok ani bir şekilde gelişen eğik çekme çatlakları neticesinde göçmüştür (Şekil 5.a). Göçme yükü 72,8 kN olup hesaplanan yükten yaklaşık %1 daha yüksektir. Bu serideki diğer kirişler ise yüksek yerdeğiştirme kapasitesi göstermiş, kirişler göçmeye uğramadan deney düzeneğinin deformasyon kapasitesine ulaşıldığı için deneyler durdurulmak zorunda kalmıştır. Çelik fiber katkılı kirişler K2s0'a göre yaklaşık %38 daha yüksek yük kapasitesine ulaşmışlardır. Çelik fiberlerin davranışa en önemli katkısı



(a) K1 serisi

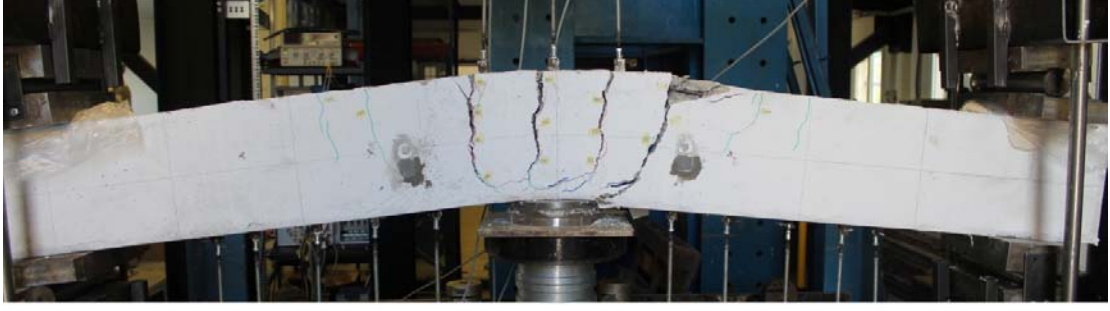


(b) K2 serisi

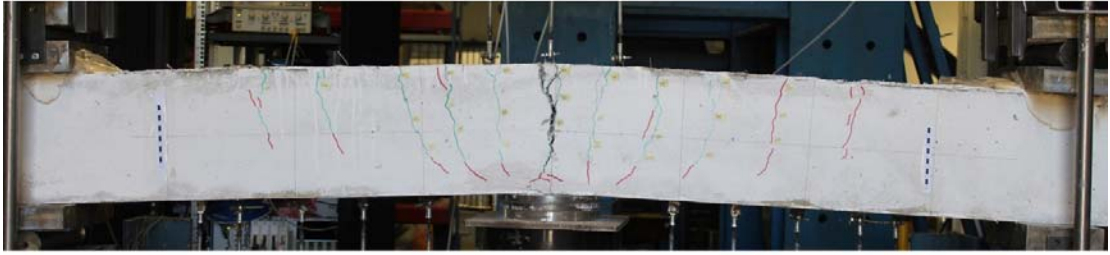
Şekil 3. Kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrileri (Load-displacement curves for beams)

gevrek kesme göçmesini sünek eğilme göçmesine çevirmeleri olmuştur. Çelik fiberler kirişlerde ilk oluşan eğik kesme çatlaklarının açılmasını engellemiş, etriye görevi görerek boyuna donatının akmasına imkân verecek şekilde kirişin yük kapasitesini arttırmışlardır. Ancak K1 serisi kirişlerde gözlemlenen duruma benzer olarak K2 serisi kirişlerde de çelik fiber katkısı oranının artırılması dikkate değer bir yük kapasitesi artışına yol açmamıştır. Artan fiber oranının yerdeğiştirmelere olan etkisi ise kirişlerdeki yüksek

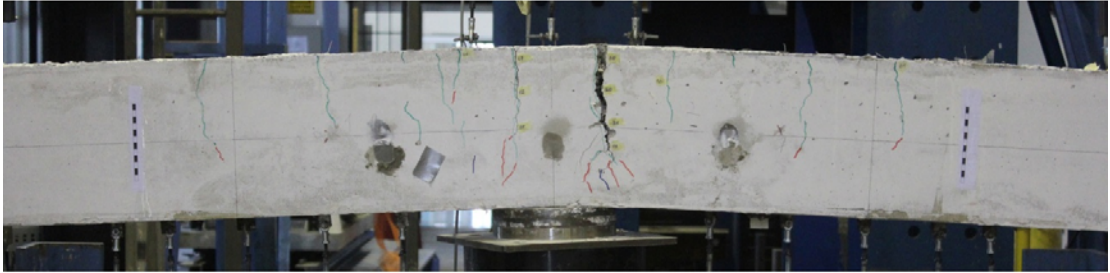
deformasyonun test düzeneğinin sınırlarına dayanması sebebiyle deneylerin göçme olmadan durdurulmak zorunda kalınması neticesinde gözlemlenememiştir. Öte yandan çelik fiber oranının çatlak dağılımına etkisi gözlemlenebilmiştir. Çelik fiber oranı arttırıldıkça çatlak sayısı azalmış, çatlak genişlikleri artmıştır. Başka bir deyişle düşük çelik fiber oranı olan K2s05 numunesinde orta bölgede çok sayıda dar çatlaklar oluşurken yüksek çelik fiber oranına sahip K2s15 numunesinde daha az sayıda ancak daha geniş çatlaklar



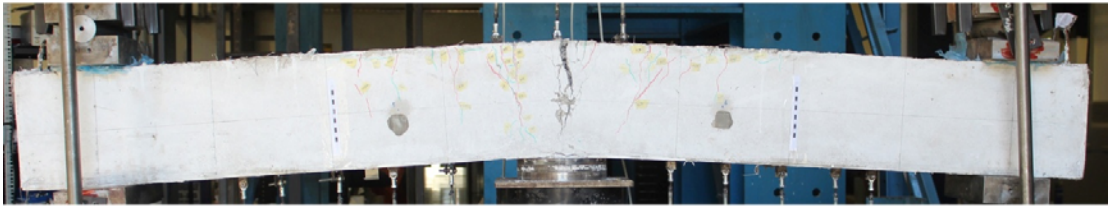
(a) K1s0



(b) K1s05



(c) K1s10



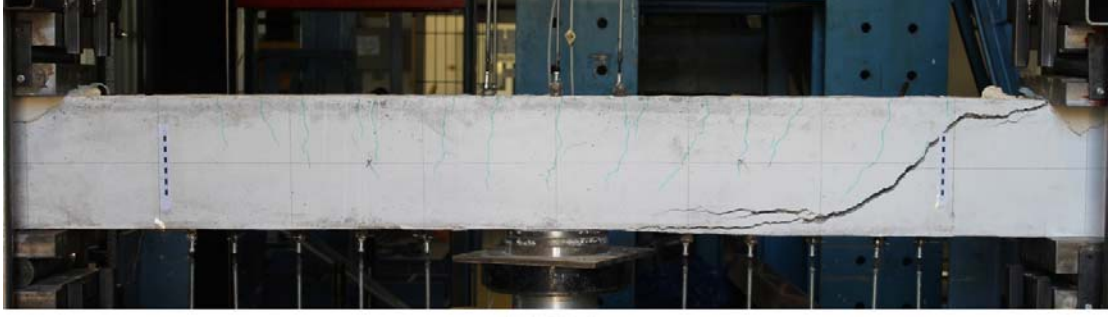
(d) K1s15

Şekil 4. K1 serisi kirişlerin göçme sonrası görünüşleri (After failure views of K1 series beams)

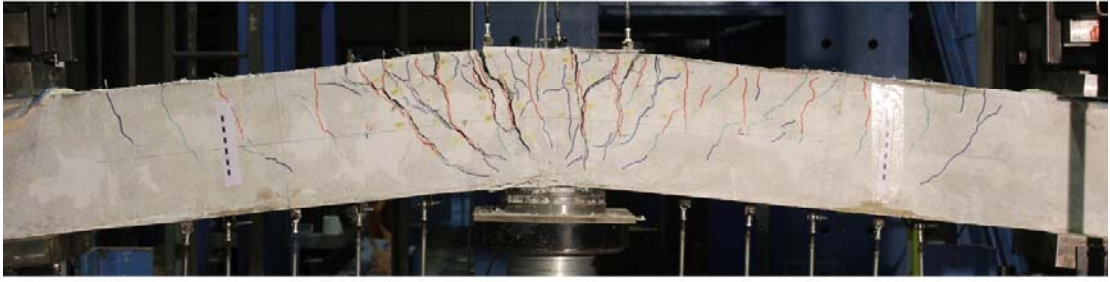
oluşmuştur. K1 serisinde gözlemlendiği gibi burada da yüksek çelik fiber oranının oluşan çatlakların daha fazla genişlemesine izin vermeyerek tüm deformasyonun az sayıda çatlakta toplanmasına sebep olduğu sonucu çıkarılabilir.

Çelik fiber katkısının temel işlevi çatlayan betonda çatlak yüzeyleri arası bir köprü oluşturarak betonun çatlama sonrası da çekme yükü taşımaya olanak sağlamasıdır [9]. Çatlama sonrası çelik fiberlerin çatlak yüzeyleri arasında iletebildikleri çekme gerilmesinin çatlak genişliğine bağlı değişiminin modellenmesi üzerine literatürde çok sayıda

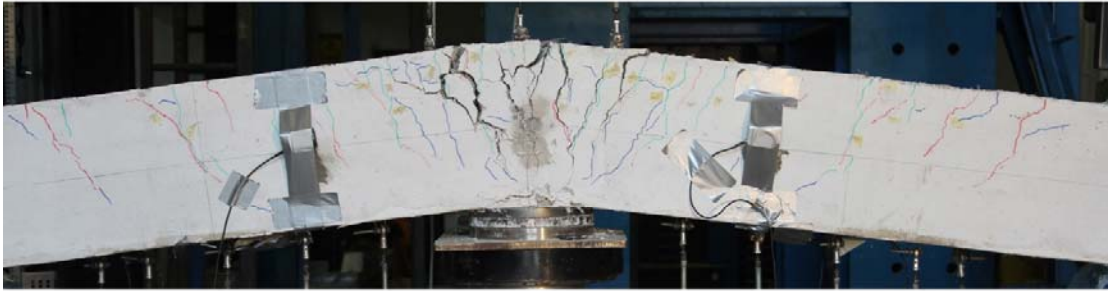
çalışma mevcut olup bu modeller genellikle doğrudan çekme deneyleri üzerinde geliştirilen modellerdir [10]. Bu modellerin çelik fiber katkılı kirişlerin eğilme davranışının belirlenmesi amacıyla kullanımında iki farklı yaklaşım takip edilmektedir. Birinci yaklaşımda çatlak genişliği veya kirişin anlık eğriliğinden bağımsız olarak kesitin çatlama bölümünde sabit ortalama bir çekme gerilmesi kabul edilmekte ve eğilme kapasitesi hesapları bu gerilmeye göre yapılmaktadır [7]. İkinci ve daha karmaşık yaklaşımda ise çatlama kesimindeki gerilmeler çatlak genişliği ile ilişkilendirilmekte ve dolayısıyla kirişin geometrik özellikleri, çelik donatı miktarı ile yükleme ve mesnet



(a) K2s0



(b) K2s05



(c) K2s10



(d) K2s15

Şekil 5. K2 serisi kirişlerin göçme sonrası görüntüleri (After failure views of K2 series beams)

koşullarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [11]. İlk bahsedilen yaklaşım genelde güvenli tarafta kalacak şekilde basit ve hızlı bir kesit eğilme kapasitesi hesabına imkan vermekte, ikinci yaklaşım ise çekme gerilmelerinin dağılımının daha doğru tahminine olanak verdiği için çatlak genişliklerinin tahmin edilebildiği koşullarda gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Ancak eğilme yükü altındaki kirişlerde çatlak genişliklerinin yüksek doğrulukla tahmini

ancak kirişte çatlakın tek bir noktada oluşmasının sağlandığı (örneğin maksimum momentin olduğu kesitte çekme bölgesinde çentik bırakarak) durumlarda mümkün olduğundan ve daha genel yük ve sınır koşulları altında çatlak sayısı ve genişliğinin tahmini kaba varsayımlara dayandığından ikinci yöntemin uygulanabilirliği daha kısıtlıdır. Bu çalışmada uygulanabilirliği daha yüksek olduğu için deney kirişlerinin analizi için ilk yaklaşım tercih

edilmiştir. Bu yaklaşıma ait çatlama ve çatlama kesitte öngörülen tipik gerilme dağılımları Şekil 6'da verilmiştir. Modelde düzlem kesitlerin deformasyon sonrası düzlem kaldığı varsayılmıştır. Betonun çatlama kadar gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi doğrusal kabul edilmiş, Naaman [12] tarafından tavsiye edildiği gibi çelik fiber katkı betonun eğilmede çatlama dayanımı f_{cr} normal betonla aynı kabul edilerek $f_{cr}=0.7\sqrt{f'_c}$ (MPa) olarak hesaplanmıştır.

Betonun elastisite modülü E_c çelik fiber katkısından etkilenmediği varsayımıyla $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ (MPa) olarak hesaplanmış, betonun birim çatlama şekil değiştirme ε_{cr} ise $\varepsilon_{cr} = f_{cr}/E_c$ bağıntısıyla bulunmuştur [3]. Bu denklemlerde f'_c çelik fiber katkısız normal betonun basma dayanımı olup hesaplarda Tablo 2'de belirtildiği gibi 42,4 MPa alınmıştır. Çelik fiber katkılı betonun basmada birim şekil değiştirme-gerilme ilişkisi basitleştirilmiş bir varsayımla normal betonda olduğu gibi parabolik kabul edilmiş ve Hognestad modeli [13] kullanılmıştır. Bu modelde normal betondan farklı olarak çelik fiber katkılı betonun çok yüksek birim şekil değiştirmelere ulaşabildiği göz önüne alınıp tepe noktasından sonraki doğrusal kısım 0,010 birim şekil değiştirmesine kadar uzatılmıştır [14] (Eş. 1-Eş. 3).

$$f_c = f_{cc} \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_0 \geq \varepsilon_c > 0 \text{ için} \quad (1)$$

$$f_c = f_{cc} \left[1 - \frac{0,15}{0,004 - \varepsilon_0} (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \right]$$

$$0,010 \geq \varepsilon_c > \varepsilon_0 \text{ için} \quad (2)$$

$$f_c = 0$$

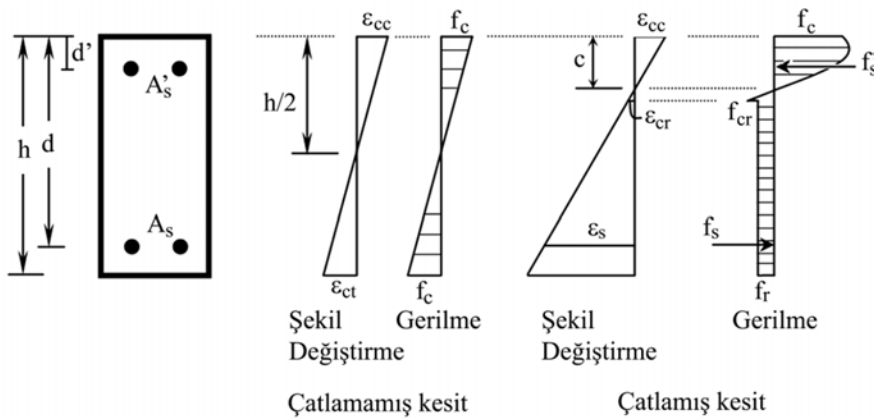
$$\varepsilon_c > 0,010 \text{ için} \quad (3)$$

Bu denklemlerde çelik fiber katkılı betonun maksimum basma gerilmesi f_{cc} için Tablo 2'de verilen deney günlerinde tespit edilen basma dayanımları kullanılmış, bu gerilmeye denk gelen birim şekil değiştirme ise $\varepsilon_0 = 2f_{cc}/E_c$ olarak

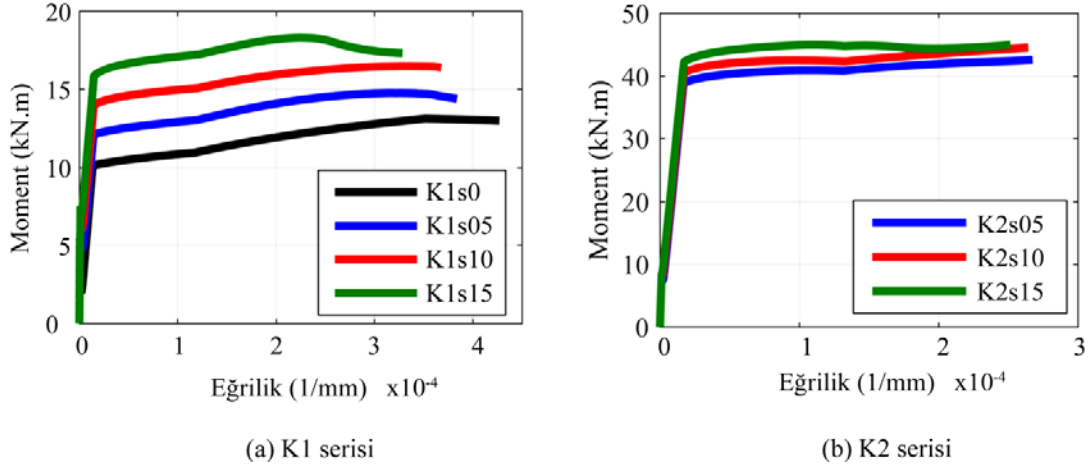
hesaplanmıştır. Çatlama betonundaki çekme gerilmesi f_r sabit kabul edilmiş, değeri ise Naaman'ın [12] çalışmasına dayanarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$f_r = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \tau V_f (L/d) \quad (4)$$

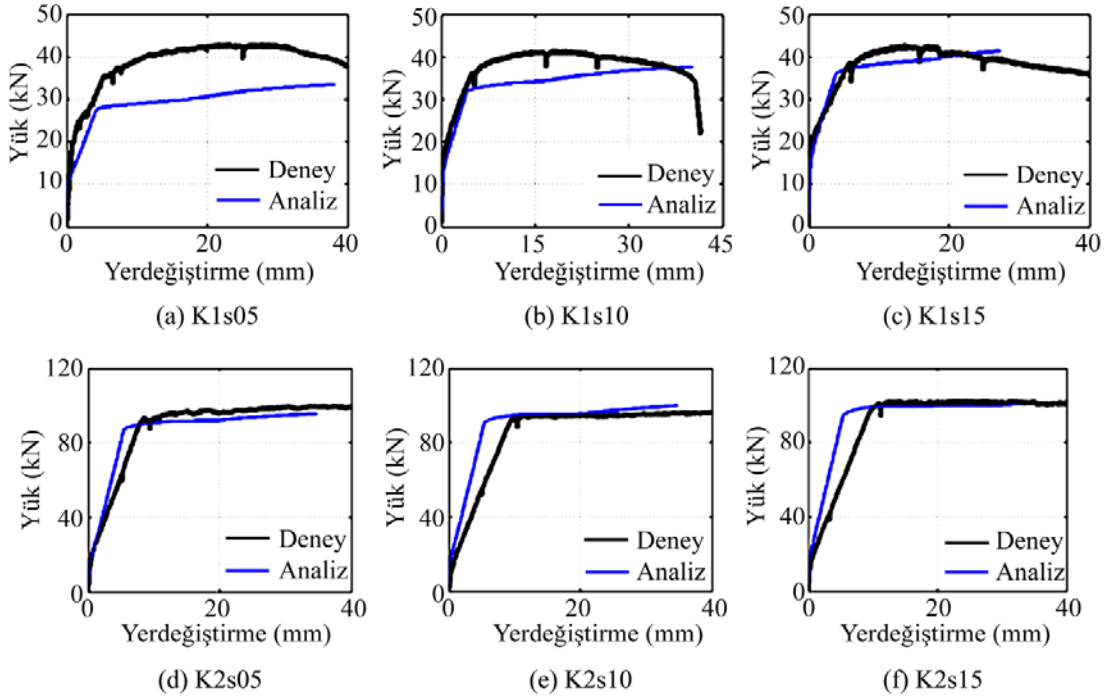
Bu denklemden λ_1 tahmini sıyrılma uzunluğu oranını, λ_2 fiberlerin çatlaktaki konumuna göre etkinliğini, λ_3 fiberlerin yoğunluktan dolayı azalan etkinliklerini hesaba katan katsayılarıdır. $\lambda_1 = 0,25$, $\lambda_2 = 1,2$, $\lambda_3 = 1,0$, Naaman [12] tarafından ucu kancalı çelik fiberler için önerilen değerlerdir. V_f çelik fiber katkısı hacimsel oranını, L/d ise fiber uzunluğunun fiber çapına oranını vermektedir. Denklemden τ çelik fiber ile beton arasındaki sıyrılma gerilmesi olup Valle ve Büyüköztürk [15] tarafından $\tau = 0,66\sqrt{f'_c}$ (MPa) olarak hesaplanması önerilmiştir. Çelik için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi, pekleşme de göz önüne alınarak, üç parçalı doğrusal eğri olarak varsayılmıştır. Kirişlerin kesit analizleri, kesitin katmanlara bölünerek betonda varsayılan bir maksimum basma birim şekil değiştirmesine (ε_{cc}) denk gelen moment ve eğriliğin kuvvetlerin dengesinden hesaplanması ve bu varsayılan ε_{cc} değerinin -0,010'a kadar geniş bir aralıkta değiştirilerek moment-eğrilik ilişkisinin tamamının elde edilmesi suretiyle yapılmıştır [16]. Elde edilen moment-eğrilik davranışı Şekil 7'de verilmektedir. K2s0 kirişi kesme etkisiyle göçtüğünden bu kirişin moment-eğrilik ilişkisi hesaplanmamıştır. Hesaplanan moment-eğrilik ilişkileri kirişlerin yük-yerdeğiştirme eğrilerinin hesabında kullanılmıştır. Kirişin yarısı 20 eşit parçaya bölünmüş, belli bir yük altında her parçanın başı ve sonundaki noktadaki moment ve bu momente denk gelen eğrilikler hesaplanan moment-eğrilik ilişkisinden bulunmuştur. Kirişin yarısı boyunca elde edilen eğrilik dağılımı kullanılarak bu yüke denk gelen açıklık ortası yerdeğiştirme moment-alan teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Yük değeri sıfırdan itibaren adım adım artırılarak her bir kirişin yük-yerdeğiştirme eğrisi elde edilmiştir (Şekil 8). Bu yöntemde kiriş üzerinde belli bir yük altında moment dağılımı elde edilirken mesnetlerde ve yükün uygulandığı plakada yüklerin düzgün yayılı olduğu varsayılmış, kirişin kendi ağırlığı da hesaba katılmıştır. Kullanılan bu yöntemde yerdeğiştirme hesabı ancak kirişteki maksimum momentin hesaplanan moment-eğrilik



Şekil 6. Kesitte birim şekil değiştirme ve gerilme dağılımları (Strain and stress distribution on the cross-section)



Şekil 7. Hesaplanan moment-eğrilik davranışı (Calculated moment-curvature response)



Şekil 8. Hesaplanan yük-açıklık ortası yerdeğiştirmesi davranışı (Calculated load-midspan displacement response)

ilişkisindeki maksimum momente denk geldiği yüke kadar yapılabilmektedir. Bir başka deyişle analiz artan yük üzerinden yapıldığından artan yerdeğiştirmelerde düşen yükü modellemek mümkün olmamıştır.

Şekil 8'den görüldüğü gibi K1 serisi kirişlerde boyuna donatı akması öncesi eğilme rijitliği daha yakın hesaplanmışken K2 serisi kirişlerde hesaplanan eğilme rijitliği deneylerde gözlemlenenenden daha yüksektir. Buna sebep olarak kirişlerin çatlak dağılımları gösterilebilir. Çelik fiber katkılı K1 serisi kirişlerde tek bir ana çatlak oluşmuş olup diğer çatlaklar çok daha dardır. K2 serisi kirişlerde ise çok daha fazla geniş çatlak oluşmuştur. Hesaplarda izlenen yöntem çatlak sayısını ve çatlak aralıklarını hesaba katmadığından ve moment dağılımına göre en büyük eğriliğin her zaman

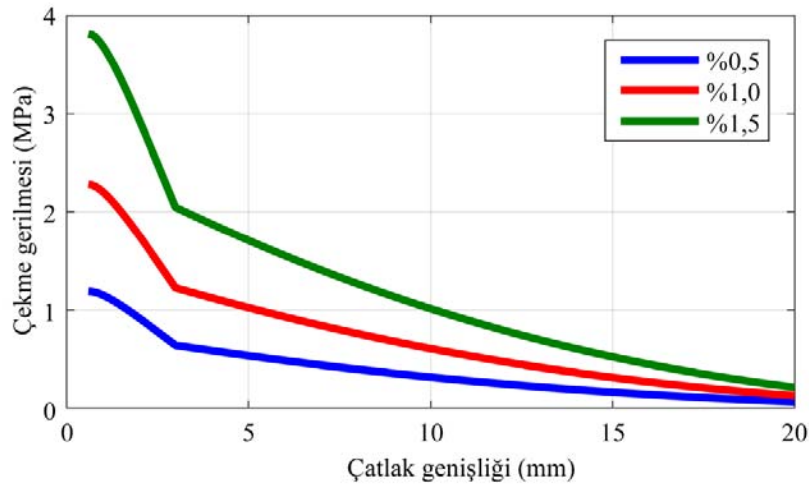
ortadaki ana çatlakta olduğu varsayıldığından tek çatlak oluşması durumunda rijitlik açısından daha doğru sonuç alınmaktadır. Ancak çok sayıda geniş çatlak oluşumunda kiriş yapılan varsayımlara aykırı olarak daha yumuşak davranmakta ve hesabın yapıldığı belli bir yüke denk gelen yerdeğiştirmeler gerçektekinden daha düşük çıkmaktadır. Tablo 3'te kirişlerin deney ve analizden elde edilen maksimum yük ve maksimum yerdeğiştirme değerleri ve maksimum yükte deney ve analiz arasındaki hata oranı verilmiştir. Bazı deneyler göçme olmadan durdurulduğundan ve analizlerde maksimum yerdeğiştirme tam olarak elde edilemediğinden yerdeğiştirmeler için hata oranı hesaplanmamıştır. Tablo 3'ten de görüldüğü gibi genel olarak maksimum yük için hesaplanan analiz sonuçları deney sonuçlarından düşüktür. K1 serisi kirişlerde hata oranı

K2 serisine göre çok daha fazladır. Hesaplanan moment-eğrilik ilişkileri incelendiğinde K1 serisi kirişlerde çelik fiber katkısının K2 serisi kirişlere göre daha büyük rol oynadığı görülmektedir. Artan çelik fiber katkısı K1 serisi kirişlerde hesaplanan yük kapasitesini K2 serisi kirişlerle kıyaslandığında daha çok arttırmaktadır. Bu gözlemlerde boyuna donatı oranının etkisi öne çıkmaktadır. Düşük boyuna donatı oranına sahip K1 serisi kirişlerde çelik fiber katkısının sebep olduğu çekme gerilmeleri daha büyük rol oynamakta, dolayısıyla farklı çelik fiber oranları için hesaplanan çekme gerilmeleri ve bu gerilmelerin hesabındaki hassasiyet eğilme kapasitesi hesabını daha büyük oranlarda etkilemektedir. Yüksek boyuna donatı oranına sahip K2 serisi kirişlerde ise boyuna donatı davranışı hakim olmakta, çelik fiber katkısının getirdiği çekme kuvvetleri boyuna donatıda oluşan çekme kuvvetleri yanında çok daha küçük kalmaktadır. Sonuç olarak boyuna donatının davranışı daha iyi modellenemediğinden çelik fiberden kaynaklanan çekme gerilmelerinin hesabındaki hata kesit davranışını fazla etkilememekte ve kesit eğilme kapasitesi ile yük-yerdeğiştirme eğrisi çok daha yüksek hassasiyetle hesaplanabilmektedir. Çatlamış kesitte çelik fiberlerin sebep olduğu çekme gerilmeleri analizlerde Eş. 4 kullanılarak hesaplanmıştır. Yaygın olarak kullanılan bu denklem basit ve kolay hesaplanır olmakla birlikte çekme gerilmelerini

çatlak genişliğinden bağımsız ele almaktadır ve tüm çatlamış kesitte hesaplanan değeri sabit kabul etmektedir. Ancak yapılan çalışmalar çelik fiberlerin sebep olduğu çekme gerilmelerinin çatlak genişliği ile ilişkili olduğunu, çatlak genişliğinin artmasıyla çelik fiberlerin betondan sıyrılmaları neticesinde çatlak yüzeyleri arasında iletilen çekme gerilmelerinin azaldığını ortaya koymuştur [14]. Dolayısıyla bu çalışmadaki gibi bir eğilme durumunda çatlak boyunca çekme gerilmeleri değişken olacaktır. Çelik fiberlerin taşıdıkları çekme gerilmelerini çatlak genişliğine bağlı olarak veren modellere örnek olarak Basitleştirilmiş Kapsamlı Gömülme Modeli (Simplified Diverse Embedment Model, SDEM) örnek verilebilir [11]. Naaman'ın modeline [12] göre daha karmaşık olan bu model çok sayıda deneysel veri ile kıyaslanmış ve doğruluk derecesinin yüksek olduğu bildirilmiştir. Burada uzunluğundan dolayı ilgili formülasyona yer verilmemiştir. Ancak bu model kullanılarak bu çalışmadaki deney parametrelerine göre hesaplanan çatlak genişliğine karşı çelik fiberlerin taşıdığı çekme gerilmesi ilişkisi Şekil 9'da verilmektedir. Tablo 4'te kullanılan çelik fiber katkısı oranları için Eş. 4'ten hesaplanan çekme gerilmesi değerleri ve SDEM formülasyonuna göre bu gerilmelere denk gelen çatlak genişlikleri verilmektedir. Deneyde ölçülen çatlak genişlikleri göz önüne alındığında Naaman [12] tarafından

Tablo 3. Deney ve analizlerde maksimum yük ve yerdeğiştirmeler (Maximum load and displacements in experiments and analyses)

Numune	Deney		Analiz		
	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm)	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Yük Hata (%)	Maksimum Yerdeğiştirme (mm)
K1s0	28,7	97	-		
K1s05	42,9	42	33,4	-22,1	38
K1s10	41,5	41	37,4	-9,9	40
K1s15	42,6	56	41,4	-2,8	27
K2s0	72,8	8	-		
K2s05	101,8	96	95,4	-6,3	35
K2s10	97,9	119	99,8	1,9	35
K2s15	102,8	114	100,6	-2,1	33



Şekil 9. SDEM'e göre çekme gerilmesi-çatlak genişliği ilişkisi (Tensile stress-crack width relationship according to SDEM)

önerilen gerilme değerlerinin SDEM modeline göre göçme anına yakın yüksek deformasyonda görülen çatlak genişliklerine denk geldiği görülmektedir. Bu durum hesaplanan eğilme kapasitesinin deneyde gözlemlenen daha düşük olması durumunu da açıklamaktadır. Eğilme altında çatlama kesitte Eş. 4'te verilen çekme gerilmesi değerlerine ancak boyuna donatı aktıktan ve çatlak genişlikleri 4-5 mm mertebelerine ulaştıktan sonra düşmekte, daha öncesinde çatlakta çok daha yüksek çekme gerilmeleri taşınabilmektedir. Dolayısıyla bunu dikkate almayan Eş. 4'e göre hesaplanan eğilme kapasiteleri Şekil 8'den de görüldüğü gibi güvenli tarafta olmakla birlikte gerçeğin altında hesaplanmaktadır.

Tablo 4. Çatlakta hesaplanan çekme gerilmeleri
(Calculated tensile stresses at crack)

Çelik fiber katkı oranı (%)	f_r (Eş. 4) (MPa)	SDEM'e göre denk çatlak genişliği (mm)
0,5	0,52	5,2
1,0	1,03	4,9
1,5	1,54	6,1

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada çelik fiber katkısının betonarme kirişlerin eğilme davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Betonda çatlama sonrası çekme gerilmelerinin taşınmasını sağlayan çelik fiberler tüm kirişlerde eğilme kapasitesini önemli ölçüde arttırmış, çelik fiber katkısı olmadığı durumda gevrek kesme göçmesine uğrayan yüksek boyuna donatı oranına sahip kirişler çelik fiber katkısı ile sünek eğilme göçmesi göstermişlerdir. Ancak çelik fiber katkısı düşük boyuna donatı oranına sahip kirişlerde eğilme kapasitesini arttırmış olmakla birlikte deformasyonların tek bir çatlakta yoğunlaşmasına sebep olduğu için sünekliği azaltmış, kirişin donatı kopması ile aniden göçmesine sebep olmuştur. Bu durum bu kirişlerde boyuna donatı oranının çok düşük olması ve yükün tekil olarak uygulanması sebebiyle maksimum momentin tek bir noktada yoğunlaşmasından kaynaklanmış olabilir ve donatı oranının daha yüksek olması veya düzgün yayılı yük uygulanması durumunda farklılık gösterebilir.

Dolayısıyla bu tür kirişlerde çelik fiber katkısının kullanımının yol açabileceği sakıncalı durumlar için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Tüm kirişlerde çelik fiber oranının artırılması eğilme davranışlarında önemli bir farklılığa yol açmamış, %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında çelik fiber katkısı kullanılan kirişler birbirlerine çok yakın yük-yerdeğiştirme ilişkisi göstermişlerdir. Tek farklılık düşük boyuna donatı oranına sahip %1,5 oranında çelik katkısı olan kirişte görülmüş, bu kiriş diğer çelik fiber katkılı kirişlere göre daha fazla yerdeğiştirme yapabilmektedir. Buna sebep olarak yüksek oranda çelik fiber içeren bu numune çelik fiberlerin daha yüksek çatlak genişliklerine kadar yük taşıyabilmeleri gösterilebilir. Ancak aynı oranda çelik fiber katkısı içeren yüksek boyuna donatı oranına sahip kirişlerde deney düzeneğinin deformasyon sınırlarına ulaşıldığından

kirişlerin göçme yerdeğiştirmeleri görülemedi, dolayısıyla aynı durumun bu kirişler için de geçerli olup olmadığı tespit edilememiştir. Bu sebeple çelik fiber katkı oranının %1 üzerinde artırılmasının yerdeğiştirme kapasitesine olası etkilerini araştırmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Elde edilen deneysel sonuçların literatürde yaygın kullanılan modellere göre yapılan analizlerinde çatlama kesitte çelik fiberlerin taşıdığı çekme gerilmelerinin doğru hesabının özellikle düşük boyuna donatı oranına sahip kirişlerde daha önemli olduğu gözlemlenmiştir. Bu kirişlerde çatlama kesitte çelik fiberlerin çekme gerilmelerini sabit kabul eden basit yaklaşımın güvenli tarafta olmakla birlikte gerçeğinden daha düşük kapasite verdiği, daha doğru hesap için çekme gerilmelerini çatlak genişliği ile ilişkilendiren modellere ihtiyaç olduğu anlaşılmıştır. Boyuna donatı oranının yüksek olduğu kirişlerde ise çelik fiber katkısı kesme kapasitesini arttırmak suretiyle kirişin davranışını önemli ölçüde değiştirmiş, ancak boyuna donatı gerilmeleri davranışa hakim olduğundan çelik fiberlerdeki çekme gerilmelerinin hesabındaki hassasiyet kapasite hesabını fazla etkilememiştir. Çelik fiber katkısının yük taşıyıcı elemanlarda donatı takviyesi olarak kullanımı için farklı yük, donatı ve mesnet koşullarında deneysel ve analitik çalışmalar yapılması ve daha hassas ve pratik modeller geliştirilmesi gerekmektedir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

A_s	çekme donatısı alanı
A'_s	basınç donatısı alanı
E_c	betonun elastisite modülü
L/d	çelik fiber uzunluğunun fiber çapına oranı
V_{cr}	betonun eğik çatlama dayanımı
V_f	çelik fiber katkısı hacimsel oranı
a	mesnet ve yük arasındaki mesafe
b_w	kiriş genişliği
d	faydalı yükseklik (çekme donatısının kirişin basınç altındaki yüzünden olan mesafesi)
d'	basınç donatısının kirişin basınç altındaki yüzünden olan mesafesi
h	kiriş toplam yüksekliği
f_c	betonda basma gerilmesi
f'_c	çelik fiber katkısı olmayan betonun basma dayanımı
f_{cc}	çelik fiber katkısı olan betonun basma dayanımı
f_{cr}	betonun eğilmede çatlama dayanımı
f_r	çatlama kesitte çelik fiberlerden kaynaklanan çekme gerilmesi
f_s	çekme donatısı gerilmesi
f'_s	basınç donatısı gerilmesi
f_i	betonda çekme gerilmesi
ϵ_c	betonun birim şekil değiştirmesi
ϵ_{cc}	eğilmede betonda görülen maksimum basma birim şekil değiştirmesi
ϵ_{cr}	betonun çatlama birim şekil değiştirmesi
ϵ_{ct}	eğilmede betonda görülen maksimum çekme birim şekil değiştirmesi
ϵ_s	çelik boyuna donatının birim şekil değiştirmesi

ε_0	betonda maksimum gerilmeye denk gelen birim şekil değiştirme
λ_1	tahmini sıyrılma uzunluğu oranını hesaba katan katsayı
λ_2	çelik fiberlerin çatlaktaki konumuna göre etkinliğini hesaba katan katsayı
λ_3	çelik fiberlerin yoğunluktan dolayı azalan etkinliklerini hesaba katan katsayı
τ	çelik fiber ile beton arasındaki sıyrılma gerilmesi

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makalede sunulan çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 112M822 sayılı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Murathan A., Murathan A., Karadavut S., Useability of high density polypropylene textile waste in composite material production, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (1), 9-14, 2014.
2. American Concrete Institute, Fiber Reinforced Concrete in Practice, Special Publication SP-268, Farmington Hills, Michigan, A.B.D., 2010.
3. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11), Farmington Hills, Michigan, A.B.D., 2011.
4. Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P., Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres, Constr. Build. Mater., 36, 704-710, 2012.
5. Susetyo J., Gauvreau P., Vecchio F.J., Steel fiber-reinforced concrete panels in shear: Analysis and modeling, ACI Struct. J., 110 (2), 285-295, 2013.
6. Hameed R., Sellier A., Turatsinze A., Duprat F., Flexural behaviour of reinforced fibrous concrete beams: Experiments and analytical modelling, Pak. J. Engg. & Appl. Sc., 13, 19-28, 2013.
7. Campione G., Simplified flexural response of steel fiber-reinforced concrete beams, J. Mater. Civ. Eng., 20 (4), 283-293, 2008.
8. Türk Standartları Enstitüsü, TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara, Türkiye, 2000.
9. Deluce J.R. ve Vecchio F.J., Cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete members containing conventional reinforcement, ACI Struct. J., 110 (3), 481-490, 2013.
10. Michels J., Christen R., Waldmann D., Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete, Eng. Fract. Mech., 98, 326-349, 2013.
11. Lee S.C., Cho J.Y., Vecchio F.J., Simplified diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete elements in tension, ACI Struct. J., 110 (4), 403-412, 2013.
12. Naaman A.E., Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites, Fourth International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Ann Arbor-A.B.D., 95-113, 2003.
13. Ersoy U. ve Ozcebe G., Betonarme, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2015.
14. American Concrete Institute, ACI 544.4R-88 Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, Farmington Hills, Michigan, A.B.D., 1988.
15. Valle M. ve Buyukozturk O., Behaviour of fiber reinforced high-strength concrete under direct shear, ACI Struct. J., 90 (2), 122-133, 1993.
16. Collins, M.P. ve Mitchell, D., Prestressed Concrete, Response Publications, Toronto, Kanada, 1997.