

Çelik fiber ilaveli etriyesiz betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile belirlenmesi

Determination of the behavior of steel fiber reinforced concrete beams without stirrups under bending by nonlinear finite element analysis

Sena TAYFUR^{1*}, Selçuk SAATCI², Ninel ALVER³

^{1,3}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

senatayfur@ege.edu.tr, ninel.alver@ege.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye.

selcuksaatci@iyte.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 21.12.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 26.04.2017

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.98700

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Çelik fiber katkılı betonarme elemanların kullanımı son yıllarda artmakla birlikte bu elemanların yapısal davranışlarının modellenmesinde mevcut analitik yöntemler yetersiz kalmakta ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada üç noktalı statik yüklemeye altındaki davranışı deneysel olarak belirlenmiş çelik fiber katkılı iki kiriş ile çelik fiber katkısı olmayan bir kiriş Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi'ne dayanan bir doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Kullanılan yöntemde çatlama betonunda çatlak yüzeyleri arasında çelik fiberlerin ilettiği çekme gerilmelerinin modellenmesinde Basitleştirilmiş Kapsamlı Gömülme Modeli seçilmiştir. Analiz sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında kullanılan sonlu elemanlar yönteminin kirişlerin eğilme kapasitelerini ve oluşan ana çatlakları yüksek hassasiyetle belirlediği, ancak kirişlerin deplasman kapasitelerini olduğundan çok daha düşük bulduğu görülmüştür. Modelin ana çatlakları doğru tespit etmekle birlikte oluşan çok sayıda küçük çatlakları doğru tespit edememesi ve bunun sonucu olarak ana çatlaklarda donatı kopmasının olduğundan erken gerçekleşmesi sonucu kirişin düşük deplasmanlarda göçtüğü değerlendirilmiştir. Daha hassas çözümler için çelik fiber katkısının modellenmesinde daha gelişmiş modellere ihtiyaç olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Doğrusal olmayan sonlu eleman analizi, Çelik fiber katkılı beton, Eğilme davranışı

Abstract

Although the use of steel fiber reinforced concrete elements is on the rise in recent years, present analytical models to determine the structural behavior of these members are inadequate, requiring numerical methods such as nonlinear finite element method. In this study, two steel fiber reinforced concrete beam and one ordinary reinforced concrete beam tested under static three-point bending were modeled with a Modified Compression Field Theory based nonlinear finite element method and results were investigated. In the method, Simplified Diverse Embedment Model was selected to model the tensile stresses transmitted between crack faces in cracked concrete. When analysis results were compared with experimental results, it was observed that the bending capacities and major cracks were captured with high accuracy, whereas displacement capacities were highly underpredicted. Although the major cracks were predicted with high accuracy, the fact that the model could not predict smaller cracks accurately and, as a result, the occurrence of a premature reinforcing bar failure at major cracks is believed to be the major reason for earlier failure of beams. More advanced models are needed for modeling the steel fiber reinforcement in order to obtain more accurate solutions.

Keywords: Nonlinear finite element analysis, Steel fiber reinforced concrete, Bending behavior

1 Giriş

Betonarme elemanlarda betonun çekme dayanımını arttırmak amacıyla çelik fiber katkısı kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Çelik fiber katkısı betonda çatlama sınırlandırılması gibi yapısal olmayan amaçlarla kullanıldığı gibi özellikle betonarme elemanların kayma kapasitelerine olan önemli katkısından dolayı donatı takviyesi amacıyla da kullanılmaktadır [1]. Çelik fiber katkılı betonarme elemanların yapısal davranışlarının modellenmesi üzerine kesit analizlerine dayalı çalışmalar literatürde mevcuttur [2]-[4]. Ancak genellikle basit mesnetli kirişler üzerine yapılan bu modelleme çalışmaları daha karmaşık geometri ve yüklemeye koşullarına sahip elemanların analizleri için uygun olmamakta, bu tür elemanların analizi için doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi gibi daha genel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

Betonarme elemanların doğrusal olmayan analizi karmaşık bir problem olup bu konuda farklı yaklaşımlar bulunmaktadır

[5]. Bu yaklaşımların en önemlilerinden biri olan Modified Compression Field Theory (Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi, MCFT) betonda oluşan çatlakları yayılı olarak kabul eden ve yüklemeye durumuna çatlak açısındaki değişimleri de göz önüne alan bir yöntem olup hassasiyeti ilk ortaya atıldığı yıllardan itibaren yapılan çok sayıda çalışma ile gösterilmiştir [6],[7]. MCFT'yi temel olarak geliştirilen doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yazılımları yıllar içinde geliştirilmiş ve çelik fiberlerin etkisini de göz önüne alacak şekilde genişletilmiştir [8]. Ancak çelik fiber katkısının betondaki çekme gerilmelerine olan katkısının modellenmesi ve MCFT'ye uyarlanması görece yeni bir konu olduğundan bu yöntem kullanılarak yapılan doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerinin hassasiyetini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır [9]. Bu çalışmada davranışları deneysel olarak tespit edilen çelik fiber katkılı kirişlerin MCFT'yi temel alan VecTor2 [8] yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri yapılmış ve sonuçlar

deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak yöntemin çelik fiber katkılı kirişlerde etkinliği irdelenmiştir.

2 Deneysel Çalışma

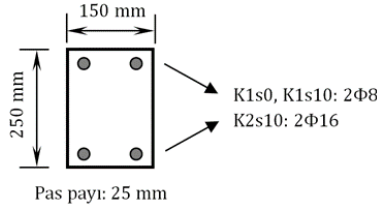
2.1 Deneysel programı

Deneysel çalışmada Tablo 1'de özellikleri verilen üç adet betonarme kiriş basit mesnet koşullarında açıklık ortasından yüklenilerek test edilmişlerdir. Kirişlerin boyutları 150x250x2350 mm olup, biri çelik fiber katkısı olmadan normal betonla, ikisi ise hacimsel olarak %1 oranında çelik fiber katkısı kullanılarak imal edilmişlerdir.

Tablo 1: Çalışmada kullanılan kirişlerin özellikleri.

Kiriş	Boyuna Donatı	Çelik Fiber Oranı (% , hacimsel)
K1s0	2Φ8 + 2Φ8	0
K1s10	2Φ8 + 2Φ8	1.0
K2s10	2Φ16 + 2Φ16	1.0

Şekil 1'de gösterildiği üzere kirişler etriyesiz olup, K1s0 ve K1s10 kirişlerinde kesitin altında ve üstünde 2Φ8, K2s10 kirişinde ise 2Φ16 boyuna donatılar kullanılmıştır. Boyuna donatılar uçlarında yaklaşık 150 mm kanca boyu bırakılacak şekilde 90° bükülmüş, bu şekilde hem alt ve üst donatılar birbirine kancayla bağlanarak üst donatıların etriyesiz yerleştirilmesi sağlanmış hem de boyuna donatıların ankrajı temin edilmiştir.



Şekil 1: Kiriş numunelerinin en kesiti.

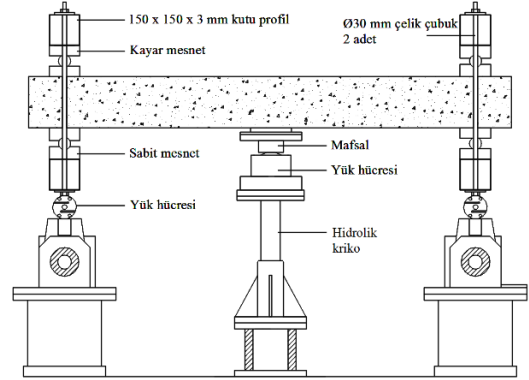
Deneysel elemanlarının üretiminde kullanılan beton C25/30 sınıfıdır ve çimento tipi CEM II B-M (L-W) 42.5R'dir. Karışımda kullanılan su/çimento oranı 0.63 ve maksimum agrega çapı 16 mm'dir. Ayrıca betonun çelik fiberler sebebiyle azalan işlenebilirliğini artırmak için süper akışkanlaştırıcı da kullanılmıştır. Hazırlanan beton karışımından alınan 150x300 mm'lik silindirik numunelerden elde edilen mekanik test sonuçlarından çelik fiberin beton basınç ve çekme dayanımlarına katkısı Tablo 2'de görülmektedir. Beton karışıma katılan 0.75 mm çapında 60 mm uzunluğunda çelik fiberler iki ucu kancalı olup Dramix® RC-80/60-BN ticari markasına sahiptir ve çekme dayanımı 1050 MPa'dır. Boyuna donatı olarak kullanılan S420 çeliğinin çekme deneyleri sonucu elde edilen akma dayanımı 480 MPa, çekme dayanımı 590 MPa, akma birim uzaması 0.0025, pekleşmenin başladığı birim uzaması 0.024, kopma birim uzaması 0.12'dir.

Tablo 2: Beton mekanik test sonuçları.

Çelik Fiber Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
	28 gün	Deney günleri (dökümden 12 ay sonra)	
0	33.8	42.4	2.3
1	35.2	45.4	5.1

Kirişler Şekil 2'de gösterilen deney düzeneğinde açıklık ortasından yukarı yönlü yüklenerek test edilmiştir. Mesnet

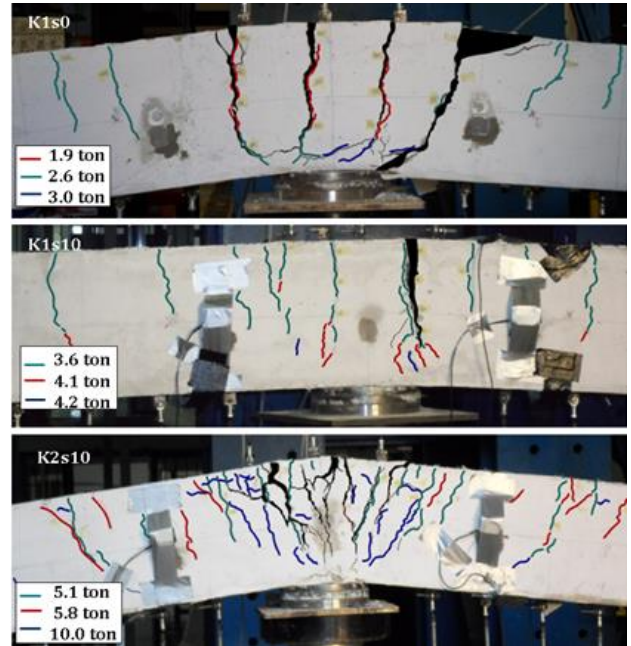
dönmeleri ve bir uçta yatay ötelenme serbest bırakılmıştır. Yükleme 200 mm çapında dairesel çelik bir plaka ile yapılmıştır.



Şekil 2: Deneysel düzeneği.

2.2 Deneysel bulgular

Deneysel elemanlarının eğilme etkisi altında test edilmesi ile gözlenen nihai durumları ve ana çatlakların oluştuğu yükler Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3: Göçme sonrası kirişlerin nihai durumları.

K1s0 kirişi 1.5 ton'a kadar oldukça rijit bir davranış göstermiş ve ilk çatlaklar 1.9 ton yük seviyesinde gözlenmiştir. Çekme donatısı 2.6 ton'da akmış ve kiriş en fazla 3.0 ton yük taşıyabilmiştir. Maksimum yük kapasitesinde kiriş orta deplasmanı 43 mm olarak ölçülmüş, daha sonra kiriş 97 mm'ye kadar deplasman yaparak dört ana çatlak ile eğilmeden göçmüştür. K1s10 kirişi 1.5 ton yük değerine kadar K1s0 kirişinden daha rijit bir davranış göstermiş olup, ilk çatlakları 5.1 ton'da gözlenmiştir. Boyuna donatı 3.6 ton'da akmış ve kiriş en fazla 4.2 ton yük taşıyabilmiştir. Maksimum yük kapasitesinde kiriş orta deplasmanı 15 mm olarak ölçülmüş, daha sonra kiriş 41 mm'ye kadar deplasman yaparak tek ana çatlak ile göçmüştür. K2s10 kirişinin ilk çatlakları 5.1 ton yük seviyesinde gözlenmiş olup, boyuna donatı 9.1 ton'da akmıştır.

Kiriş en fazla 10.0 ton yük taşıyabilmiştir. Bu yük seviyesinde kiriş orta deplasmanı 70 mm olarak ölçülmüştür, daha sonra kiriş 119 mm'ye kadar deplasman yaparak çok sayıda çatlak ile eğilmeden göçmüştür. Deneysel bulgular çelik fiberin varlığının yapısal özelliklere etkisini gözler önüne sermektedir. %1 hacimsel oranda çelik fibere sahip K1s10'un akma yükü ve yük taşıma kapasitesi, aynı boyuna donatı oranına sahip K1s0'a göre sırasıyla %38 ve %40 daha yüksektir. K2s10 kirişi ise çelik fiber katkısı olmaması durumunda eğilme kapasitesi kayma kapasitesinden yüksek olan, dolayısıyla kayma göçmesi beklenen bir kiriştir. Ancak çelik fiber katkısı kirişin gevrek kayma davranışını sünek eğilme davranışına çevirmiş, ACI 318'de yer verildiği gibi kayma donatısı görevi görmüştür [10].

3 Sonlu elemanlar analizi

3.1 Değiştirilmiş basınç alanı teorisi (MCFT) ve çelik fiber katkısının modellenmesi

Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi (MCFT) çatlama betonun yük-deformasyon ilişkisini ortaya koyan bir modeldir. Modelde betonda oluşan çatlakların tüm hacme dağıldığı (smeared crack) varsayılmakta ve çatlama betonun mekanik özellikleri asal gerilme yönlerine göre tanımlanmaktadır. Bu yaklaşımda çatlama ve donatılı beton mekanik özellikleri farklı bir malzeme olarak düşünülmekte, birim şekil değiştirmeler çatlak genişlemelerini, çatlaklar arası çatlama betonun deformasyonunu, çatlak yüzeyleri arası kaymayı ve donatı sıyrılmasını da içine alacak şekilde ortalama yer değiştirmeler üzerinden hesaplanmaktadır. Modelde çatlakların açısının değişen asal gerilme yönleriyle beraber değiştiği (rotating crack) göz önüne alınmıştır. Asal gerilmeler asal birim şekil değiştirmelerle ilişkilendirilerek deneysel olarak bulunan bünye denklemleri önerilmiştir. Modelin detayları ilgili kaynaklarda bulunabilir [6].

MCFT birim şekil değiştirme ve gerilmeleri ortalama değerler üzerinden hesapladığı için çatlama betonunda mevcut olan ortalama çekme kuvvetleri de hesaba katılmakta, bu amaçla bir çekme pekleşmesi (tension stiffening) modeli önerilmektedir. Çelik fiber katkılı betonun modellenmesi için ise çatlak yüzeyinde çatlak genişliğine bağlı olarak çelik fiberlerden kaynaklanan çekme gerilmeleri de hesaba katılmaktadır. Literatürde bu amaçla yapılmış çalışmalar ve geliştirilmiş çeşitli modeller bulunmaktadır [11]-[14]. Bu çalışmada bu modellerin önde gelenlerinden Simplified Diverse Embedment Model (Basitleştirilmiş Kapsamlı Gömülme Modeli, SDEM) seçilmiştir [15]. Bu modelde uçları kancalı çelik fiberlerin çatlak yüzeyleri arasında ilettikleri çekme gerilmeleri çelik fiberin betondan sıyrılma gerilmeleri ile kancanın mekanik ankrajından kaynaklanan gerilmelerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Modelde çelik fiberlerin sıyrılma gerilmesi f_{st} için aşağıdaki bağıntı önerilmektedir.

$$f_{st} = \alpha_f V_f K_{st} \tau_{f,max} \frac{l_f}{d_f} \left(1 - \frac{2w_{cr}}{l_f}\right)^2 \quad (1)$$

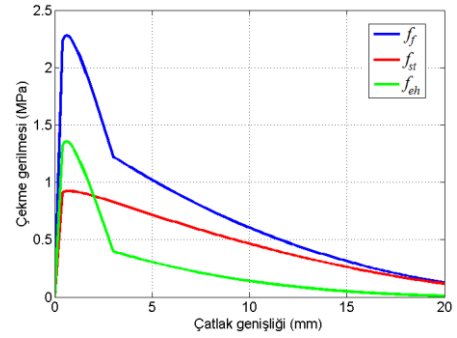
Bu denklemde α_f çelik fiberlerin yönelim faktörü olup 0.5 alınmaktadır. V_f çelik fiberlerin hacimsel oranını, K_{st} bağ modülünü, $\tau_{f,max}$ tek bir fiberin sıyrılma gerilmesini, l_f fiber boyunu, d_f fiber çapını, w_{cr} ise çatlak genişliğini ifade etmektedir. Çelik fiberlerin uçlarındaki kancaların mekanik ankrajından kaynaklanan gerilme f_{eh} için ise aşağıdaki bağıntı verilmektedir.

$$f_{eh} = \alpha_f V_f K_{eh} \tau_{eh,max} \frac{2(l_i - 2w_{cr})}{d_f} \quad (2)$$

Bu denklemde, K_{eh} mekanik ankraj modülünü, $\tau_{eh,max}$ tek bir fiberin mekanik ankraj dayanımını, l_i ise fiber üzerinde kancalar arasında kalan net mesafeyi vermektedir. Çatlak yüzeyleri arasında çelik fiberler tarafından iletilen toplam çekme gerilmesi f_f aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$f_f = f_{st} + f_{eh} \quad (3)$$

Bu çalışmada kullanılan %1 oranında çelik fiber katkılı beton için f_f , f_{st} ve f_{eh} 'nin çatlak genişliğine bağlı değişimi Şekil 4'te sunulmuştur. Modelin ayrıntıları ve parametrelerin hesap detayları ilgili kaynakta verilmektedir [15].



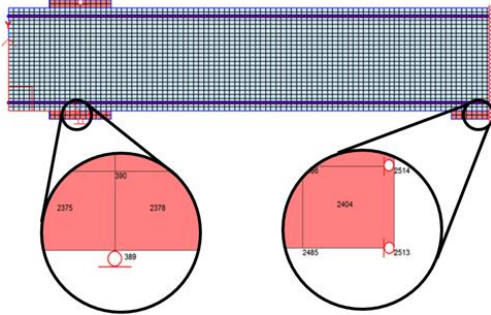
Şekil 4: %1 çelik fiber katkılı beton için çekme gerilmelerinin çatlak genişliğine bağlı değişimi.

3.2 Deneysel kirişlerinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi

Deneysel kirişlerinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi için VecTor2 programı kullanılmıştır. VecTor2, betonarme elemanların MCFT'ye dayalı doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile iki boyutlu düzlem gerilme problemi olarak modellendiği bir yazılımdır. Yazılım Toronto Üniversitesi'nde 1991 yılında TRIX ilk adı ile geliştirilmiş ve zamanla yeni özellikler ve modeller eklenerek bugünkü şeklini almıştır. Yazılım FormWorks adlı arayüzü ile kullanıcıya malzeme özellikleri atama, yapı ve sonlu eleman boyutlarını belirleme, otomatik sonlu eleman ağı oluşturma ve yük koşullarını tanımlayarak modeli oluşturma analiz etme olanağı sunmaktadır. Yazılımın içerisinde beton için çok sayıda doğrusal olmayan model olup betonarme malzemenin kompozit yapısına uygun olarak değişken geometriler ve yüklemeler ve çatlak ilerlemesi gibi karmaşık problemlerin çözümüne olanak sağlamaktadır [8].

Deneysel kirişlerinin modellenmesinde beton dikdörtgen düzlem gerilme elemanlarıyla modellenmiştir. Simetriden faydalanılarak kirişin yarısı modellenmiş, kiriş yüksekliği 25, kiriş yarısı 94 eşit parçaya bölünerek 10x12.5 mm boyutlarında elemanlardan oluşan bir sonlu elemanlar ağı elde edilmiştir. Boyuna çelik donatı tek yönlü çubuk elemanlarla modellenmiş, betonla donatı arasında mükemmel bağ olduğu kabul edilerek çubuk elemanlar beton için kullanılan dikdörtgen elemanlarla aynı düğüm noktaları ve serbestlik derecelerine bağlanmışlardır. Kirişin sınır koşullarını daha doğru modelleyebilmek için deneyde kullanılan yükleme ve mesnet plakaları da modelle dahil edilmiş, bu plakalarda betonda olduğu gibi dikdörtgen 10x12.5 mm boyutlarındaki elemanlarla modellenmiştir.

Modelde simetri yüzeyinde yatay serbestlik dereceleri kısıtlanırken düşey serbestlik dereceleri serbest bırakılmış, mesnetlerde ise mesneti temsil eden plaka yüzeylerinde orta düğüm noktalarında düşey serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5: Kirişlerin sonlu elemanlar ağı.

Beton ve çelik için VecTor2'de tanımlanan malzeme modelleri kullanılmıştır. Kullanılan malzeme modelleri Tablo 3'te verilmektedir. Çelik fiberlerin modellenmesinde yukarıda bahsedilen SDEM modeli seçilmiştir. Diğer modeller programın önerdiği varsayılan modellerdir. Mesnetlerin modellenmesi için kullanılan elemanlara çelik özellikleri atanmıştır. Beton için kullanılan malzeme parametreleri Tablo 2'de verilen deney günleri bulunan değerlerdir.

Kirişlere yük artan düşey deplasmanlar olarak yükleme plakasından verilmiştir. Yükleme plakasının yüzeydeki dokuz düğüm noktasına eşit deplasman verilmiş, deplasmanlar sıfırdan başlayıp 0.1 mm aralıklarla arttırılarak kirişin göçmesine kadar devam ettirilmiştir.

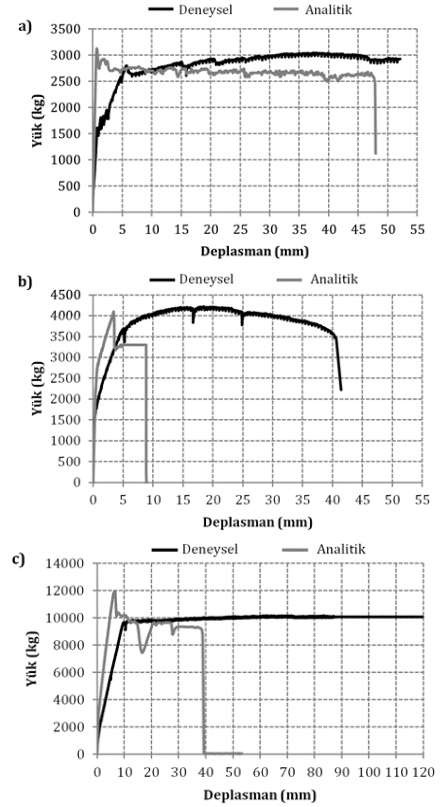
Tablo 3: Beton ve donatı için seçilen modeller [8].

Özellik	Seçilen Model
Basınç piki öncesi	Hognestad (Parabol)
Basınç piki sonrası	Düzeltilmiş Park-Kent
Basınç yumuşaması	Vecchio 1992-A (e1/e2 Formu)
Çekme sertleşmesi	Düzeltilmiş Bentz 2003
Çekme yumuşaması	Doğrusal olmayan (Yamamoto)
FRC Çekmesi	SDEM-Monotonik
Beton histeretik davranışı	Doğrusal olmayan/ Plastik
Donatı histeretik davranışı	Bauschinger Etkisi (Seckin)
Kaldıraç etkisi	Tassios (Çatlak kayması)

3.3 Sonlu elemanlar analizi sonuçları

Sonlu elemanlar analizi ile deneylerden elde edilen yük-çıkıklık ortası deplasmanı eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Analizlerde K1s0 kirişi açıklık ortası deplasmanı henüz 0.6 mm iken nihai taşıma kapasitesi olan 3.04 ton'a ulaşmıştır. Kirişte ilk çatlaklar 1.9 ton yük seviyesinde oluşmuş,

deplasmanın artmasıyla mevcut çatlaklar gelişmiş ve yeni çatlaklar oluşmuştur.



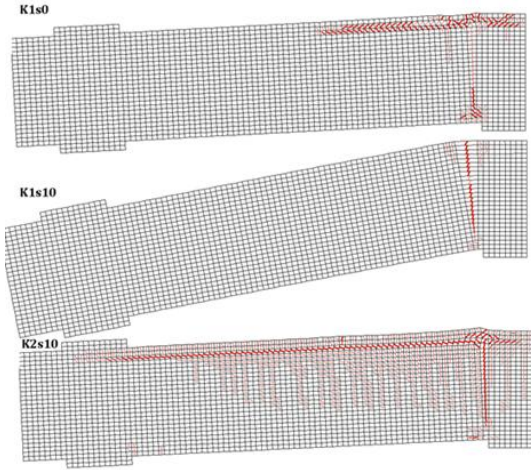
Şekil 6: Kirişlerin deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri. (a): K1s0, (b): K1s10, (c): K2s10.

Deplasman seviyesi 48 mm'ye ulaştığında yarım kiriş iki (gerçekte dört) ana çatlak ile eğilmeden göçmüştür. K1s10 kirişi açıklık ortası deplasmanı henüz 3.4 mm iken nihai taşıma kapasitesi olan 4.1 ton'a ulaşmıştır. Kirişte ilk çatlaklar 2.8 ton yük seviyesinde gözlenmiş olup, deplasmanın artmasıyla mevcut çatlaklar gelişmiş ve yeni çatlaklar oluşmuştur. Deplasman seviyesi 9 mm'ye ulaştığında yarım kiriş tek ana çatlak ile eğilmeden göçmüştür. K2s10 kirişi açıklık ortası deplasmanı henüz 5.5 mm iken nihai taşıma kapasitesi olan 12 ton'a ulaşmıştır. Kirişte ilk çatlaklar 10 ton yük seviyesinde gözlenmiş olup, deplasmanın artmasıyla mevcut çatlaklar gelişmiş ve yeni çatlaklar oluşmuştur. Deplasman seviyesi 39 mm'ye ulaştığında kiriş çok sayıda çatlak ile eğilmeden göçmüştür (Şekil 7).

Tablo 4'te deneysel veriler ve analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri yük taşıma kapasitesi tahmininde kabul edilebilir sonuçlar vermiştir.

Tablo 4: Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması.

Deney Elemanı	Akma Yüğü (t)			Akma Deplasmanı (mm)			Yük Taşıma Kapasitesi (t)			Göçme Deplasmanı (mm)			Süneklik Oranı		
	Deney	Analiz	Hata	Deney	Analiz	Hata	Deney	Analiz	Hata	Deney	Analiz	Hata	Deney	Analiz	Hata
K1s0	2.70	3.10	%13	5.30	0.6	%89	3.0	3.1	%3	52	48	%8	9.80	80	%88
K1s10	3.60	4.04	%11	4.50	3.3	%27	4.2	4.1	%2	41	9.0	%78	9.11	2.72	%70
K2s10	9.10	11.9	%30	9.20	6.4	%30	10.0	12.0	%20	119	39	%67	12.93	6.10	%53



Şekil 7: Kirişlerin analitik olarak belirlenen çatlak haritaları.

Kirişlerin analiz sonucu bulunan taşıma kapasiteleri deneysel değerlere çok yakındır. Analizler sonucu elde edilen çatlak haritaları incelendiğinde genel olarak kırılmada karşılaşılan ana çatlak sayıları deney sırasında gözlenenlerle uyusmaktadır. K1s0 kirişi gerçekte ve analiz sonuçlarında dört ana çatlak ile K2s10 ise hem deneyde hem de analizde çok sayıda çatlak ile göçmüştür. K1s10 ise deneyde tek bir ana çatlakla göçerken analizde görülen tek çatlak simetriden dolayı iki ana çatlak olarak değerlendirilmektedir. Ancak yine de bu kirişin de deneyde zayıf bir noktadan tek bir ana çatlakla göçmesinin tahmin edilebileceği söylenebilir.

Ancak analizlerde hesaplanan deplasman değerleri deneyde elde edilenlerden oldukça uzak sonuçlar vermiştir. Analizler kirişlerin akma öncesi rijitliklerini deneyde gözlemlenenenden daha yüksek hesaplanırken ulaştıkları maksimum deplasmanları ise çok daha düşük hesaplamışlardır. Bu durum hesaplanan çatlak haritalarının deneyde gözlemlenenlerle karşılaştırılmasıyla açıklanabilir. Analizlerde göçmeye sebep olan ana çatlaklar yüksek hassasiyetle tahmin edilebilirken kirişin diğer yerlerinde oluşan daha küçük çatlaklar analizde sayıca daha az bulunmaktadır. Deneyler sırasında gözlemlenen bu küçük ve dar çatlaklar kirişin yük kapasitesine önemli bir katkıde bulunmamakta, ancak rijitliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, analizlerde hesaplanan gerçeğinden az sayıda çatlak, ana çatlak üzerinde çatlakların açılmasından kaynaklanan donatı gerilmelerinin olduğundan çok daha yüksek hesaplanmasına yol açmakta, bu da donatının çatlakta kopma gerilmesine ulaştığı deplasmanların olduğundan daha düşük bulunmasına sebep olmaktadır. Bunlara ek olarak deformasyonun yüksek olduğu noktalarda donatının kayması, aderans problemleri, kaldıraç etkisi, geometrik doğrusalsızlık gibi etkilerin önemli olmaya başlaması ve analizlerde bu etkilerin hesaba katılmamasının da bu sonucu doğurmuş olabileceği düşünülmektedir.

4 Sonuç

Bu çalışmada çelik fiberli betonarme kirişlerin eğilme etkisindeki davranışının MCFT'ye dayalı doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmesi için sayısal bir çalışma yürütülmüş ve analiz sonuçları daha önceden elde edilmiş olan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Üç noktalı yüklemeye test edilen kirişlerin yapılan analizlerinde kullanılan MCFT'ye dayalı doğrusal olmayan

sonlu elemanlar yönteminin yük taşıma kapasitesi ve ana çatlakların tahmininde kabul edilebilir sonuçlar verdiğini görülmüştür. Ancak analizlerde hesaplanan nihai deplasman değerlerinin çelik fiberli betonarme kirişler için deney sonuçlarından oldukça uzak olması MCFT'ye dayalı doğrusal olmayan sonlu eleman analizinin çelik fiberli betonarme kirişlerin deplasman kapasitelerinin tahmininde yetersiz kaldığını ortaya konmuştur. Yapılan analizlerde deneylerde gözlemlenenenden daha az sayıda çatlak hesaplanmış, bu durum kirişin yük kapasitesini etkilememekle birlikte rijitliğinin olduğundan daha fazla bulunmasına ve olduğundan daha az deplasmanda göçme tahminine yol açmıştır. Çelik fiber katkısı olmayan kirişte nihai deplasmanın daha yakın hesaplandığı göz önüne alındığında çatlaklı betonda çatlaklar arası çelik fiberlerle iletilen çekme gerilmelerinin hesabında kullanılan modelin hassasiyetinin ve çatlak aralıklarını ve genişliklerini tahmin eden modellerin doğruluk derecelerinin bu sonuca sebep olduğu değerlendirilmektedir. Bu eksikliklerin daha detaylı araştırılması ve daha hassas modellerin geliştirilmesi gerekmektedir.

5 Teşekkür

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

6 Kaynaklar

- [1] Parra-Montesinos GJ. "Shear strength of beams with deformed steel fibers". *Concrete International*, 28(11), 57-66, 2006.
- [2] Campione G. "Simplified flexural response of steel fiber-reinforced concrete beams". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(4), 283-293, 2008.
- [3] Hameed R, Sellier A, Turatsinze A, Duprat F. "Flexural behaviour of reinforced fibrous concrete beams: experiments and analytical modelling". *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, 19-28, 2013.
- [4] Lim TY, Paramasivam P, Lee SL. "Bending behavior of steel-fiber concrete beams". *ACI Structural Journal*, 84(6), 524-536, 1987.
- [5] Vecchio FJ, Palermo D. "NLFEARC Look both ways before crossing". *ACI Fall 2000 Convention*, Toronto, 17-18 October, 2000.
- [6] Vecchio FJ, Collins MP. "The Modified Compression Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear". *ACI Journal*, 83(2), 219-231, 1986.
- [7] Vecchio FJ. "Analysis of shear-critical reinforced concrete beams". *ACI Structural Journal*, 97(1), 102-110, 2000.
- [8] Wong PS, Vecchio FJ, Trommels H. *VecTor2, FormWorks User's Manual*, 1st ed. Toronto, Canada, University of Toronto, 2002.
- [9] Susetyo J, Gauvreau P, Vecchio FJ. "Steel fiber-reinforced concrete panels in shear: analysis and modeling". *ACI Structural Journal*, 110(2), 285-295, 2013.
- [10] American Concrete Institute. "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)". United States of America, 2014.
- [11] Voo JYL, Foster SJ. "Variable Engagement Model for Fibre Reinforced Concrete in Tension". in Unicity Report No. R-420. University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia. 86, 2003.

- [12] Barragan BE, Gettu R, Martin MA, Zerbino RL. "Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete-a parametric study". *Cement & Concrete Composites*, 25(7), 767-777, 2003.
- [13] Naaman AE. "Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites". *Fourth International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4)*, Ann Arbor, USA, 95-113, 16-18 June, 2003.
- [14] Deluce JR, Vecchio FJ. "Cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete members containing conventional reinforcement". *ACI Structural Journal*, 110(3), 481-490, 2013.
- [15] Lee SC, Cho JY, Vecchio FJ. "Simplified diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete elements in tension". *ACI Structural Journal*, 110(4), 403-412, 2013.