



Effects of steel fibers on the punching behavior of reinforced concrete slabs with different longitudinal reinforcement ratios

Selçuk Saatcı*^{ID}, Süleyman Yaşayanlar^{ID}, Yonca Yaşayanlar^{ID}, Baturay Batarlar^{ID}

Department of Civil Engineering, Izmir Institute of Technology, Izmir, 35430, Turkey

Highlights:

- Eight slabs with two different longitudinal reinforcement ratios and varying steel fiber ratios were tested
- Steel fibers increased the ultimate load capacity for all slabs
- Contribution of steel fibers to the displacement capacity was more significant for slabs with higher longitudinal reinforcement ratio

Keywords:

- Reinforced concrete slabs
- Steel fiber reinforced concrete
- Punching behavior
- Modeling steel fiber contribution in concrete

Article Info:

Research Article
Received: 30.10.2017
Accepted: 18.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460507

Acknowledgement:

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) with the project number 112M822.

Correspondence:

Author: Selçuk Saatcı
e-mail:
selcuksaatci@iyte.edu.tr
phone: +90-232-750 6814

Graphical/Tabular Abstract

Addition of steel fibers in concrete mixture is known to increase the punching resistance of slabs. There are numerous studies, both analytical and experimental, in the literature investigating the effects of steel fibers on the punching behavior of steel fiber reinforced concrete slabs.

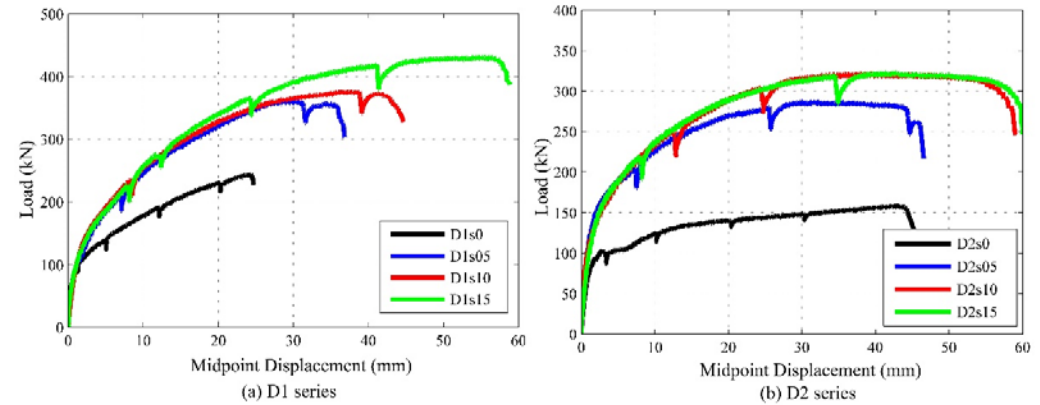


Figure A. Load-displacement curves for slabs

Purpose: This study is concentrates on the effects of steel fibers on the punching behavior of reinforced concrete slabs with different longitudinal reinforcement ratios. Experimental studies on the subject were usually performed with either no or constant longitudinal reinforcement. This study aims to investigate the coupling effects of steel fibers with varying longitudinal reinforcement ratios.

Theory and Methods: Reinforced concrete slabs in two groups, having 0.004 (D1 series) and 0.002 (D2 series) longitudinal reinforcement ratios in two orthogonal directions, were cast with concrete mixes containing 0%, 0.5%, 1% and 1.5% steel fiber ratios in volume. Slabs were 2150x2150x150 mm in dimensions. Eight slabs were tested in total under static loads applied at their midpoints. An analytical study of the test specimens were also performed using Critical Shear Crack Theory and based on comparisons of experimental and analytical results some improvements in the model were proposed.

Results: For slabs without steel fibers, the slab with higher reinforcement ratio showed punching failure before the yielding of longitudinal bars, whereas the slab with lower reinforcement ratio displayed a significantly higher ductility before final punching failure. Addition of steel fibers increased the punching load capacity up to two times. However, although addition of steel fibers also increased the maximum displacements in D1 series slabs, it did not make any significant effect on the maximum displacements of D2 series slabs. Maximum displacements were still controlled by the yielding of longitudinal reinforcement. Increasing the steel fiber ratio increased both the punching capacity and the maximum displacements in D1 series slabs, but it did not make a significant difference in behavior of D2 series beyond 1% fiber ratio (Figure A).

Conclusion: Role of steel fibers on the behavior of slabs is dependent on the longitudinal reinforcement ratio. For slabs with low reinforcement ratio, steel fibers increase the load capacity but do not have a significant effect on the displacement capacity since displacement capacity is still controlled by the yielding of the longitudinal reinforcements. For slabs with high reinforcement ratio, which do not show yielding before punching, steel fibers increase both punching capacity and displacement capacity. Increased punching capacity in these slabs allows yielding of longitudinal reinforcement before punching.



Çelik fiber katkısının farklı boyuna donatı oranına sahip betonarme döşemelerin zımbalama davranışı üzerinde etkileri

Selçuk Saatcı*^{ID}, Süleyman Yaşayanlar^{ID}, Yonca Yaşayanlar^{ID}, Baturay Batarlar^{ID}
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35430, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Çelik fiber katkısının betonarme döşemelerin zımbalama davranışına etkisi
- Çelik fiber katkılı betonarme döşemelerde boyuna donatı oranının zımbalama davranışına etkisi
- Çelik fiber katkılı betonarme döşemelerinin zımbalama yük dayanımlarının tahmini

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 30.10.2017
Kabul: 18.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460507

Anahtar Kelimeler:

Betonarme döşemeler,
çelik fiber katkılı beton,
zımbalama davranışı,
betonda çelik fiber katkısının
modellenmesi

ÖZET

Sunulan çalışmada her iki yönde birbirine dik 0,004 (D1 serisi) ve 0,002 (D2 serisi) oranında boyuna donatı içeren 2150x2150x150 mm boyutlarında iki grup betonarme döşeme, hacimce %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranında çelik fiber katkısı içeren beton karışımlarıyla dökülmüştür. Üretilen toplam sekiz döşeme orta noktalarından statik yük altında test edilmişlerdir. Çelik fiber katkısı olmayan numunelerde yüksek boyuna donatı oranına sahip döşeme boyuna donatısında akma gerçekleşmeden gevrek bir şekilde zımbalama göçmesi olurken düşük boyuna donatı oranına sahip döşeme zımbalama gerçekleşmeden önce çok daha sünek bir davranış göstermiştir. Çelik fiber katkısı her iki boyuna donatı oranında da iki kata varan oranlarda zımbalama dayanımı artışlarına sebep olmuştur. Ancak D1 serisi döşemelerde çelik fiber katkısı maksimum yer değiştirmeleri önemli ölçüde artırırken D2 serisinde maksimum yer değiştirmelerde önemli bir fark oluşmamış, bu döşemelerin yer değiştirmesi boyuna donatının akması tarafından kontrol edilmiştir. Çelik fiber katkısı oranının artırılması D1 serisi döşemelerde dayanımın ve maksimum yer değiştirmelerin artmasına sebep olurken, D2 serisi döşemelerde %1'in üstü çelik fiber katkı oranları davranışta önemli bir fark oluşturmamıştır. Yapılan deneyler Kritik Kesme Çatlağı Teorisi kullanılarak analitik olarak modellenmiş ve bu tip modelleme ile ilgili bazı iyileştirmeler önerilmiştir.

Effects of steel fibers on the punching behavior of reinforced concrete slabs with different longitudinal reinforcement ratios

H I G H L I G H T S

- Effects of steel fiber on the punching behavior of reinforced concrete slabs
- Effects of longitudinal reinforcement ratio on the punching behavior of steel fiber reinforced concrete slabs
- Predicting the punching load capacity of steel fiber reinforced concrete slabs

Article Info

Research Article
Received: 30.10.2017
Accepted: 18.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460507

Keywords:

Reinforced concrete slabs,
steel fiber reinforced
concrete,
punching behavior,
modeling steel fiber
contribution in concrete

ABSTRACT

In this study, reinforced concrete slabs in two groups, having 0.004 (D1 series) and 0.002 (D2 series) longitudinal reinforcement ratios in two orthogonal directions, were cast with concrete mixes containing 0%, 0.5%, 1% and 1.5% steel fiber ratios in volume. Slabs were 2150x2150x150 mm in dimensions. Eight slabs were tested in total under static loads. For slabs without steel fibers, the slab with higher reinforcement ratio showed punching failure before the yielding of longitudinal bars, whereas the slab with lower reinforcement ratio displayed a significantly higher ductility before final punching failure. Addition of steel fibers increased the punching load capacity up to two times. However, although addition of steel fibers also increased the maximum displacements in D1 series slabs, it did not make any significant effect on the maximum displacements of D2 series slabs. Maximum displacements were still controlled by the yielding of longitudinal reinforcement. Increasing the steel fiber ratio increased both the punching capacity and the maximum displacements in D1 series slabs, but it did not make a significant difference in behavior of D2 series beyond 1% fiber ratio. An analytical study of the test specimens were also performed using Critical Shear Crack Theory and based on comparisons of experimental and analytical results some improvements in the model were proposed.

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

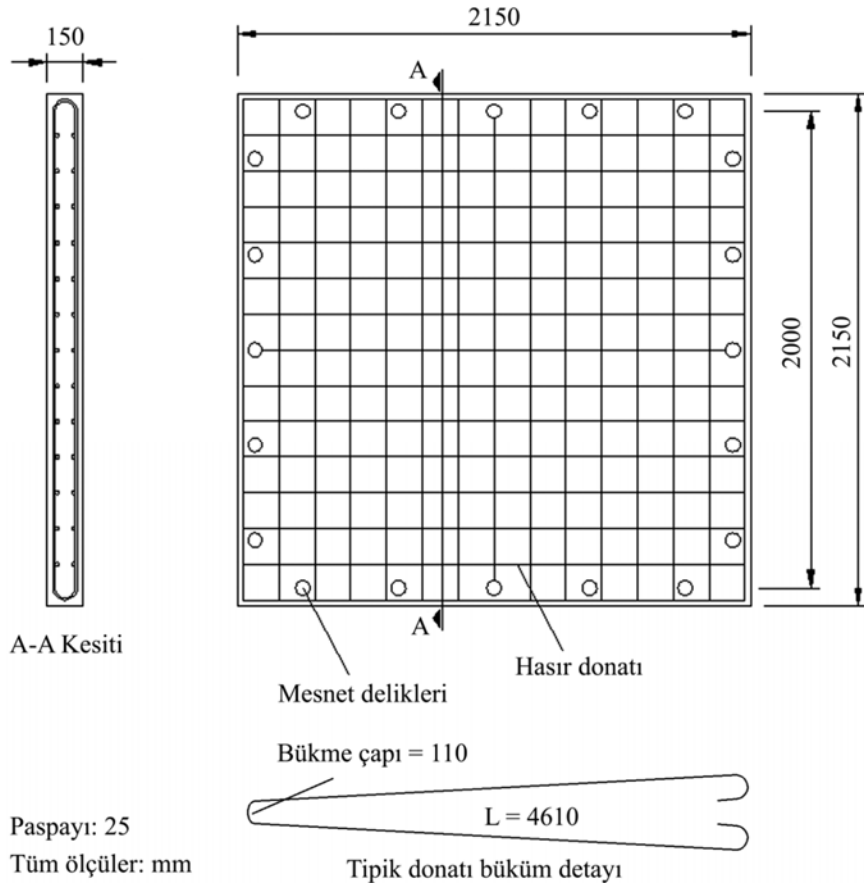
Betonarme yapılarda yapısal davranışın iyileştirilmesi amacıyla beton katkısı olarak fiber kullanımı son yıllarda gittikçe artmaktadır [1]. Çatlamış betonda çekme gerilmelerinin taşınmasını sağlayan çelik veya sentetik fiberler betonun çekme ve büzülme sonucu çatlama dayanımını önemli ölçüde arttırmaktadırlar [2]. Fiber katkısı aynı zamanda betonarme elemanların kesme dayanımlarına önemli katkılarda bulunmaktadır [3]. Çelik fiberlerin betonarme kirişlerde kesme dayanımını arttırmak amacıyla kullanımı uzun zamandır araştırılan bir konu olup Amerikan Beton Enstitüsü'nün yayınladığı betonarme yapılar ile ilgili şartnamede belirli koşulları sağlayan betonarme kirişlerde hacimce yaklaşık %0,8 oranında çelik fiber kullanılması durumunda minimum etriye koşulunun uygulanmayabileceği belirtilmiştir [4]. Yapılan araştırmalar çelik fiber katkısının kirişlere benzer şekilde betonarme döşemelerin zımbalama dayanımını arttırdığını göstermektedirler. Örneğin Özden vd. [5] yaptıkları deneylerde çelik fiber katkısının döşemelerde hem zımbalama dayanımını, hem döşeme rijitliğini hem de döşemenin yer değiştirme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemişlerdir. Choi vd. [6] yaptıkları deneysel çalışmada betonarme döşemelerde metalik (çelik veya amorf metal) fiber kullanımının etriye ve kayma çivisi kullanımına göre zımbalama dayanımı ve maksimum yer değiştirmeleri daha yüksek oranda arttırdığını bulmuşlardır. Barros vd. [7] yaptıkları deneylerde betonun basınç dayanımı 50 ile 70 MPa arasında olan betonarme döşemelerde hacimce %1 oranında çelik fiber katkısının zımbalama göçmesini eğilme göçmesine çevirdiğini ve döşemelerinin sünekliğini yüksek oranda arttırdıklarını ortaya koymuşlardır. Sermet ve Özdemir [8] yaptıkları çalışmada çelik fiber katkısının zımbalama dayanımını %20'ye varan oranlarda arttırdığını bulmuşlardır. Cheng ve Parra-Montesinos'un [9] yaptıkları çalışmalarda hacimce %1,5 oranında çelik fiber katkısının zımbalama dayanımını %55 arttırdığını gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Goveia vd. [10] yaptıkları deneylerde hacimce %1,25 çelik fiber katkısının zımbalama dayanımını %64'e varan oranlarda arttırdığını görmüşlerdir. Fall vd. [11] ise bir yöndeki eğilme donatısı oranının diğer yöndeki donatının iki katı olduğu iki yönlü betonarme döşemelerde çelik fiber katkısının zayıf yönde taşınan yükü artırarak döşemede yük dağılımını değiştirdiği ve dayanımı önemli ölçüde arttırdığını bulmuşlardır. Yapılan bu ve benzeri araştırmalar genel olarak çelik fiber kullanımının betonarme döşemelerde zımbalama dayanımını arttırdığını göstermekle birlikte bu konudaki bilgi birikimi zımbalama dayanımını arttırmak amacıyla çelik fiber kullanımının yapı şartnamelerine girmesini sağlayacak olgunluğa henüz ulaşamamıştır. Ayrıca çelik fiber katkısının zımbalama davranışı üzerindeki etkisini inceleyen deneysel çalışmaların çoğunda yüksek oranda boyuna donatı kullanılarak ani bir zımbalama davranışı hedeflenmiş, çelik fiber katkısı ve farklı boyuna donatı oranlarının döşeme zımbalama davranışı üzerinde olan birleşik etkisi çok az sayıda çalışmada incelenmiştir.

Çelik fiber katkılı betonarme döşemelerin zımbalama dayanımlarının modellenmesi üzerine yapılmış başlıca çalışmalar ampirik olup model tabanlı yöntemlerin sayısı kısıtlıdır. Harajli vd. [12] çelik fiber katkısının zımbalama dayanımına etkisini çelik fiber oranına bağlı olarak kendi yaptığı ve literatürden aldığı deney sonuçlarına en iyi uyan doğrusal bir ilişkiyle ifade etmiştir. Ju vd. [13] çelik fiberlerin zımbalama konisi etrafında oluşturduğu çekme gerilmelerinin tahminine dayalı yarı-ampirik bir model önermiştir. Zımbalama sırasında oluşan mekanizmayı esas alarak geliştirilmiş yarı-ampirik bir yöntem olan Kritik Kesme Çatlağı Teorisi (Critical Shear Crack Theory, KKÇT) bu konuda öne çıkan az sayıdaki model tabanlı yaklaşımlardan biridir [14]. Döşemelerde zımbalamanın zımbalama bölgesinde oluşan basınç çubuğunu kesen kritik bir çatlak neticesinde olduğu ve bu çatlağın genişliğinin döşemenin yer değiştirmelerden kaynaklanan eğimi ile doğru orantılı olduğu varsayımına dayanan yöntem, çatlak genişliğinin ampirik yöntemlerle bulunan bir değere ulaşmasıyla zımbalama göçmesinin meydana geldiğini öngörmektedir. Çelik fiber katkılı döşemelerde ise bu kritik çatlağın yüzeyleri arasında fiberler tarafından taşınan çekme kuvvetleri çelik fiber olmayan döşemenin zımbalama dayanımına eklenerek çelik fiberli döşemelerin toplam zımbalama dayanımları tanımlanmaktadır [15]. Döşemenin boyuna donatı oranı yük-eğim ilişkisine etki ettiğinden bu yöntemde boyuna donatı oranı bir değişken olarak devreye girmektedir. Yöntem genelde başarılı sonuçlar vermekle birlikte bu konuda yapılan deneysel çalışmaların az olması sebebiyle güvenilirliğinin doğrulanması için daha fazla veriye ihtiyaç duyulduğu açıktır.

Burada sunulan çalışma, büyük ölçekli, değişen boyuna donatı ve çelik fiber katkısı oranlarına sahip betonarme döşemelerin zımbalama davranışlarını ortaya koymayı, boyuna donatı oranının çelik fiberli döşemelerin davranışına olan etkilerini irdelemeyi ve literatüre modelleme çalışmalarında kullanılabilecek deneysel veri kazandırmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda yapılan deneylerde bulunan zımbalama dayanımları bu konuda öne çıkan KKÇT yöntemi ile bulunan dayanımlarla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında bu yöntemde bir iyileştirme önerilmiştir.

2. DENEY PROGRAMI (EXPERIMENTAL PROGRAM)

Çelik fiber katkılı betonarme döşemelerin zımbalama davranışını incelemek amacıyla sekiz döşeme numunesi imal edilmiştir. Tüm deney numuneleri kare olup kenarları 2150 mm uzunluğundadır. Döşeme kalınlığı betonarme binalarda kirişsiz döşemelerde kullanılan tipik döşeme kalınlığına yakın olması amacıyla 150 mm olarak seçilmiştir. Numunelerin tasarımında herhangi bir ölçek gözetilmemiştir. Numunelerde boyuna donatı yaklaşık 4,6 m uzunluğunda 8 mm çaplı nervürlü donatı çubuğunun uçlarında kanca bırakacak şekilde bükülmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 1). Bu şekilde alt ve üstte aynı miktar boyuna donatı elde edilirken donatıların ankracı da temin edilmiş ve imalat kolaylığı sağlanmıştır. Boyuna donatı altta



Şekil 1. Döşeme numuneleri donatı detayları (Slab specimen reinforcement details)

ve üstte her iki yönde eşit miktarda olacak şekilde birbirine dik ve eşit aralıklı yerleştirilerek hasır şeklinde oluşturulmuştur. Donatı aralığı D1 serisi döşemelerde 100 mm, D2 serisi döşemelerde 200 mm olarak seçilmiş olup her bir yön için sırasıyla 0,004 ve 0,002 çekme donatısı oranlarına karşılık gelmektedirler. Bu şekilde D2 serisi numunelerin donatı oranı ve aralığı yaklaşık olarak TS 500'de [16] iki doğrultuda çalışan döşemeler için verilen minimum donatı oranı ve aralığına denk gelirken D1 serisi numunelerin donatı oranı minimum donatı oranının iki katı olmaktadır. Her iki seride %0, %0,5, %1,0 ve %1,5 olmak üzere dört farklı çelik fiber katkısıyla toplam sekiz döşeme numunesi dökülmüş ve test edilmiştir. Numune isimleri, kullanılan boyuna donatı ve çelik fiber katkısı oranları Tablo 1'de verilmektedir.

Çelik fiberler arzu edilen hacimsel orana göre metreküp başına düşen çelik fiber ağırlığı hesaplanıp tartılarak beton karışımına eklenmiş, karışım üreticinin tavsiyeleri doğrultusunda beton mikserinde hazırlanmıştır. Çelik fiber katkısı olmayan ve %1,0 çelik fiber katkısı olan numuneler farklı zamanlarda yapılan çalışmaların parçaları olduklarından bu numunelerin beton karışımları diğerlerinden az da olsa farklılık göstermektedirler. %0,5 ve %1,5 çelik fiber katkısı olan numuneler aynı beton karışımından dökülmüş olup önce %0,5 oranında çelik fiber eklenerek D1s05 ve D2s05 dökülmüş, sonra kalan betona

%1,5 oranında olacak şekilde çelik fiber ilave edilerek D1s15 ve D2s15 dökülmüştür. Her karışımında çelik fiber katkısı eklenmeden önce ve eklendikten sonra standart silindir (150x300 mm) numuneler alınmış ve basınç dayanımları bulunmuştur. Tablo 2'de beton karışımlarından alınan numunelerden elde edilen 28 günlük ve yaklaşık olarak deneylerin yapıldığı günlerde (dökümden yaklaşık 12 ay sonrası) bulunan basınç 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.

Döküm sırasında döşeme numunelerinin her bir kenarında her kenarda eşit aralıklı beşer adet 30 mm çapında delik bırakılmış ve numuneler bu deliklerden geçirilen çelik çubuklarla düzeneğe bağlanmıştır. Sağlanan bağlantılar mafsallı olup kenarlara paralel bir eksen etrafında dönmeye ve kenarlara dik yönde yatay harekete izin vermekte, düşeyde hareketi engellemektedir (Şekil 2). Numunelerin mesnetlendiği deliklerin merkezden merkeze açıklığı her iki yönde 2000 mm'dir. Yükleme bir hidrolik kriko vasıtasıyla yük kontrollü olarak döşemenin tam ortasından aşağıdan yukarı yönlü uygulanmış olup yükleme yüzeyi 200 mm

çapında dairesel çelik bir plakadan oluşmaktadır. Deneylerde uygulanan yük ve mesnetlerde ölçülen tepki kuvvetleri yük hücreleri ile yer değiştirmeler ise 23'ü döşeme altına ve biri üst yüzde tam döşeme ortasına yerleştirilen toplam 24 adet RLPT (Resistive Linear Position Transducer) ile ölçülüp kaydedilmiştir.

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

Numune	Boyuna Donatı*	Çelik Fiber Oranı
D1s0	Φ8/100 mm	%0
D1s05	Φ8/100 mm	%0,5
D1s10	Φ8/100 mm	%1,0
D1s15	Φ8/100 mm	%1,5
D2s0	Φ8/200 mm	%0
D2s05	Φ8/200 mm	%0,5
D2s10	Φ8/200 mm	%1,0
D2s15	Φ8/200 mm	%1,5

*Boyuna donatılar alt ve üstte her iki yönde eşit miktardadır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi amacıyla çelik fiber katkısı olmayan döşemelerin zımbalama ve eğilme dayanımlarının hesaplanması faydalı olacaktır. Çelik fiber katkısı bulunmayan D1s0 ve D2s0 döşemelerinin zımbalama dayanımları TS 500'e göre $V_{pr} = f_{ctd} u_p d$ bağıntısından bulunabilir. Bu bağıntıda u_p yükleme plakasından $d/2$ uzaklıkta olan kritik zımbalama çevresi olup test edilen numuneler için $u_p = \pi(200+121) = 1008$ mm olarak hesaplanabilir. f_{ctd} yerine karakteristik çekme dayanımı kullanılacak olursa bu döşemeler için zımbalama dayanımı $V_{pr} = 0,35.(28,6)^{0,5}.1008.121 = 228295$ N (228 kN) olarak bulunabilir. Döşemelerin eğilme dayanımları ise akma çizgileri teorisi kullanılarak, en kritik akma çizgilerinin kare döşemenin köşegenleri olduğu varsayımıyla, $V_{flex} = 8m_p$ olarak hesaplanabilir. Burada m_p döşemenin birim genişlikte bir kesitin sahip olduğu akma momenti olup test edilen döşemeler için her iki yönde de eşittir. Kesit analizi yapılarak m_p değerleri D1s0 ve D2s0 döşemeleri için sırasıyla 32 kNm/m ve 17 kNm/m bulunmuş olup karşılık gelen

Tablo 2. Beton mekanik özellikleri (Concrete mechanical properties)

Basınç Dayanımı (MPa)			
Numune	28 gün	Deney günleri (dökümden yaklaşık 12 ay sonrası)	Silindir Numune Çelik Fiber Oranı
D1s0, D2s0	22,1	28,6	%0
D1s10, D2s10	27,1	*	%0
D1s10, D2s10	29,9	*	%1,0
D1s05, D2s05, D1s15, D2s15	33,8	42,4	%0
D1s05, D2s05	36,7	49,3	%0,5
D1s15, D2s15	49,4	56,5	%1,5

*Alınan silindir numunelerin niteliği sağlıklı sonuç elde etmek için uygun olmadığından bu dayanımlar bulunamamıştır.

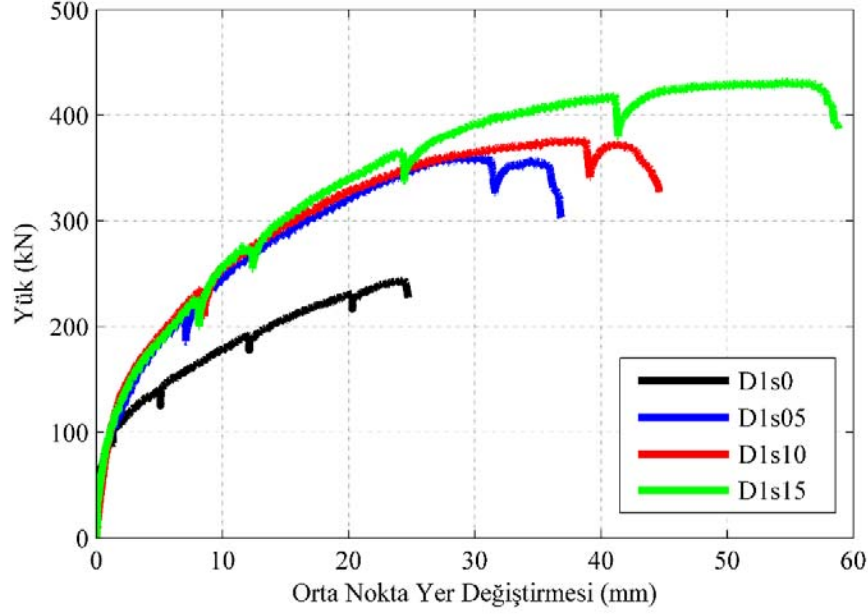


Şekil 2. Deney düzeneği (Test setup)

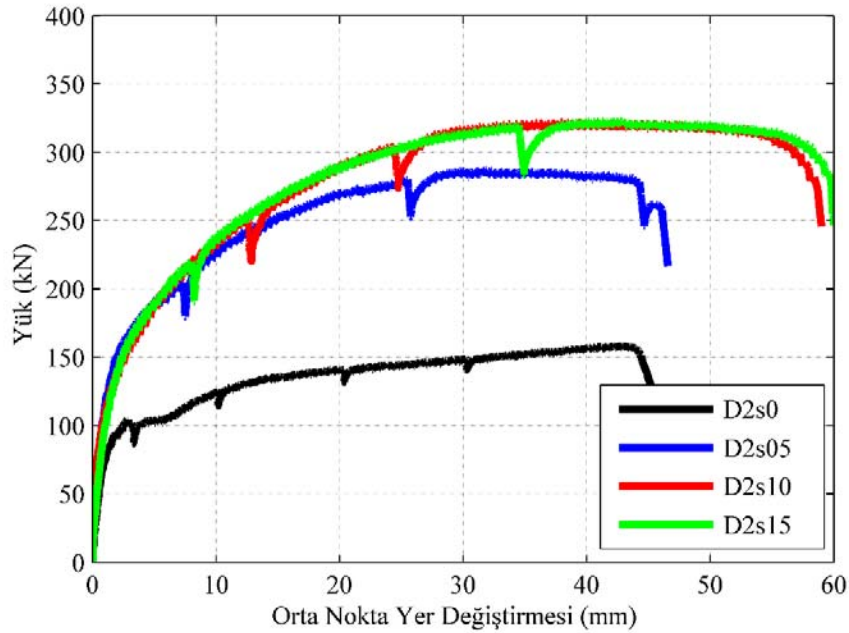
eğilmede göçme yükleri 256 kN ve 136 kN olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerlere bakıldığında yüksek donatı oranına sahip D1s0 döşemesinde zımbalama, düşük donatı oranına sahip D2s0 döşemesinde ise eğilme göçmesi beklenmektedir.

Döşemelerin statik deneylerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 3'te verilmekte, deneylerde ölçülen maksimum yük ve yer değiştirme değerleri Tablo 3'te özetlenmektedir. Tüm döşemeler yüklemenin son

aşamalarında zımbalama konisinin oluşması neticesinde göçmüşlerdir. Boyuna donatı veya çelik fiber katkısı oranından bağımsız olan bu durum genel olarak noktasal yüklenen döşemelerden beklenen bir davranıştır [14]. Ancak donatı ve çelik fiber katkısı oranı döşeme davranışını önemli ölçüde etkilemiştir. Çelik fiber katkısı olmayan döşemelerden yüksek donatı oranına sahip D1s0'da zımbalama orta noktada 24 mm yer değiştirmede ani gelişirken daha düşük donatı oranına sahip D2s0 döşemesinde göçmeden önce yaklaşık iki kat fazla yer



(a) D1 serisi



(b) D2 serisi

Şekil 3. Döşemelerin yük-yer değiştirme eğrileri (Load-displacement curves for slabs)

değiştirme yaparak 44 mm'de göçmüştür. D1s0 döşemesi hesaplanan zımbalama dayanımından yaklaşık %7 daha yüksek bir yükte, D2s0 döşemesi ise hesaplanan eğilme dayanımından yaklaşık %16 daha yüksek bir yükte göçmüştür. Dayanım hesaplarının bir tasarım yönetmeliğine göre yapıldığı göz önüne alınacak olursa deneylerde daha yüksek dayanım elde edilmesi beklenen bir durum olup görülen fark kabul edilebilir düzeydedir. Gerek hesaplanan yük kapasiteleri gerek gözlemlenen yük-yer değiştirme eğrileri gerekse deneylerdeki göçme davranışları incelendiğinde D1s0 numunesinin boyuna donatı akmadan doğrudan zımbalama neticesinde, D2s0 numunesinin ise boyuna donatıların akması sonrası sünek bir davranış gösterdikten sonra artan çatlak genişlikleri neticesinde zayıflayan orta bölgenin zımbalamasından dolayı göçtüğü sonucu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3. Göçme yükleri ve maksimum yer değiştirmeler (Failure loads and maximum displacements)

Numune	Göçme Yüğü (kN)	Maksimum Yer Değiştirme (mm)
D1s0	243	24
D1s05	360	36
D1s10	376	43
D1s15	432	58
D2s0	158	44
D2s05	287	45
D2s10	322	58
D2s15	323	60

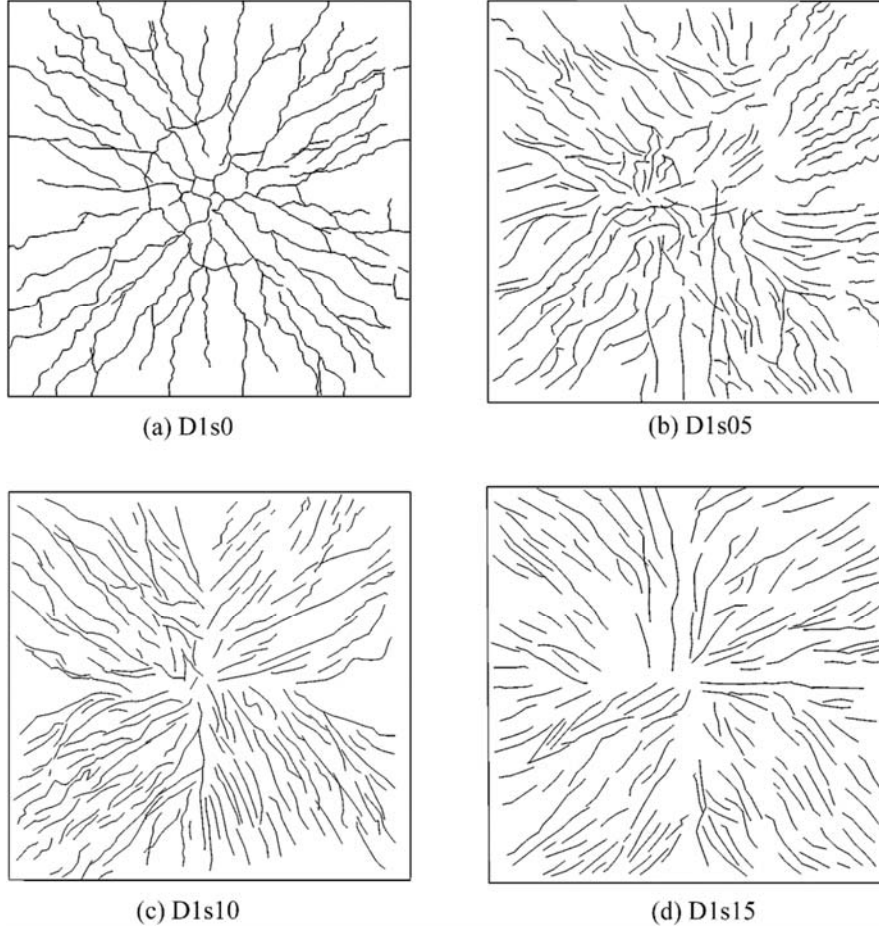
Çelik fiber katkısı davranışı önemli oranlarda etkileyerek hem yük dayanımını hem de sünekliği önemli ölçüde arttırmıştır. D1 serisi numunelerden %1,5 çelik fiber katkılı D1s15'de çelik fiber katkısız eşdeğerine göre dayanım artışı %78, D1s10 ve D1s05'de ise sırasıyla %55 ve %48'dir. Bu numunelerde çelik fiber oranlarındaki artış hem yük dayanımının hem de maksimum yer değiştirme değerlerinin belirgin bir şekilde artışına sebep olmuştur. D1s05 ve D1s10 numunelerinin yük-yer değiştirme eğrileri maksimum yük civarlarına kadar aynı gitmiş ve D1s10 diğerine göre daha fazla yer değiştirme yapmıştır. Öte yandan D1s15 numunesi diğerlerinden daha rijit davranmış ve daha fazla yer değiştirme yapmıştır. Görece düşük boyuna donatı oranına sahip D2 serisi numunelerde dayanım artışı bakımından D1 serisine benzer bir durum gözlemlenmiştir. Çelik fiber katkılı numuneler çelik fiber katkısız D2s0'la karşılaştırıldığında D2s05'de %82, D2s10 ve D2s15'de %104 dayanım artışı gözlenmiştir. D2s10 ve D2s15 numunelerinde yük-yer değiştirme eğrileri birbirini takip etmiş, D2s05 ise diğer çelik fiber katkılı numunelere göre daha düşük yük altında ve daha düşük yer değiştirme değerlerinde göçmeye uğramıştır. D2s05'in ulaştığı maksimum yer değiştirme D2s0 ile hemen hemen aynıdır; bu numunede çelik fiber katkısı sadece yük dayanımını arttırmış, yer değiştirme kapasitesine önemli bir etkide bulunmamıştır.

Çelik fiber katkısı her iki grup döşemenin davranışını önemli ölçüde etkilemekle birlikte bu etki boyuna donatı oranına göre farklılık göstermektedir. Her iki gruptaki döşemelerde

zımbalamaya yol açan kesme konisinde çelik fiberlerin katkısıyla döşemenin yük dayanımı artarken döşemenin nihai yer değiştirmeleri üzerinde ağırlıklı olarak boyuna donatı oranı etkin olmaktadır. Düşük boyuna donatı oranına sahip döşemelerde donatı aktığı için döşeme çelik fiber katkısı olmaması durumunda dahi göçmeden önce yüksek yer değiştirmeler yapabilmektedir. Yüksek boyuna donatı oranına sahip döşemelerde bu ancak çelik fiber katkısının zımbalama dayanımını arttırmasıyla ve dolayısıyla donatının zımbalama gerçekleşmeden önce daha yüksek birim şekil değiştirmelere ulaşmasıyla mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla çelik fiber katkısı zımbalamadan önce boyuna donatının akabildiği döşemelerde yük dayanımını önemli ölçüde arttırmakla birlikte yer değiştirmelere katkısının daha sınırlı olduğu sonuçları çıkarılabilir.

Genel olarak incelendiğinde fiber katkı oranının arttırılmasının dayanım ve yer değiştirme artışına aynı oranda yansımadağı görülmektedir. D1s05 ile D1s10, D2s10 ile D2s15 kendi içlerinde yaklaşık aynı yük-yer değiştirme eğrilerine sahiptir. Yani çelik fiber katkı oranının arttırılması bu elemanlar arasında önemli bir yük dayanımı veya rijitlik farkı oluşturmamıştır. D2s05 numunesinin yük dayanımı ve maksimum yer değiştirme değerlerinin aynı serideki diğer çelik fiber katkılı döşemelerin altında kalması %0,5 oranında çelik fiber katkısının çelik fiberlerin verebileceği maksimum ilave dayanımı vermeye yeterli olmayıp daha fazla dayanım artışı için hala imkân kalması şeklinde yorumlanabilir. Bu numunelerde çelik fiber katkısı oranının %1'den %1,5'e çıkarılması bir fark oluşturmamıştır, dolayısıyla bu döşemelerde çelik fiberlerin toplam dayanıma verebileceği maksimum katkının %0,5 ile %1 arasında bir çelik fiber oranında sağlandığı düşünülebilir. D1 serisi numunelerde ise yüksek donatı oranından dolayı zımbalama konisinin oluşumu ve ayrışması göçme mekanizması üzerinde daha baskındır. Çelik fiber katkısı doğrudan bu koniyi oluşturan çatlakların açılmasını geciktirdiği için bu döşemelerde çelik fiber oranının arttırılması döşemenin daha fazla yük taşınmasına ve daha yüksek yer değiştirmelere ulaşmasına sebep olmuştur. Öte yandan düşük boyuna donatı oranına sahip döşemelerde döşemenin eğilme davranışı da önemli olup göçme sadece zımbalama konisinin ayrışması nedeniyle gerçekleşmemiş, boyuna donatının akması ve eğilme çatlaklarının açılması dayanım ve maksimum yer değiştirmelerde etkili olmuştur. Zımbalama konisinin ayrışmasının göçme üzerindeki payı D1 serisine göre D2 serisinde daha az olduğundan bu koninin belli bir noktanın üzerinde güçlendirilmesi dayanıma daha fazla bir katkı sağlamamıştır. Ancak bu konuda kesin bir yargıya ulaşmak için daha fazla sayıda deney yapılması gerekliliği de görülmektedir.

Deney sonrası döşemelerde oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve genişlikleri ölçülmüştür (Şekil 4 ve Şekil 5). Çatlak profillerinin incelenmesi yapısal davranış hakkında daha ayrıntılı bilgi edinilmesine olanak sağlamaktadır. Genel olarak tüm numunelerde çatlaklar merkezden kenarlara doğru radyal bir dağılım göstermektedir. Ayrıca yükün uygulandığı orta nokta etrafında zımbalama konisi



Şekil 4. D1 serisi döşemeler deney sonrası çatlak profilleri (D1 series slabs crack profiles after tests)

oluşumuna paralel dairesel çatlaklar da gözlemlenmiştir. Esas olarak zımbalama konisi haricinde gözlemlenen en geniş çatlaklar orta noktadan köşelere doğru uzanan çatlaklar olup bu çatlaklar akma çizgileri teorisine de uygun şekilde oluşan çatlaklardır. Ancak tüm numunelerde orta bölgedeki zımbalama konisi çatlağı artan yükte beraber diğer çatlaklara göre çok daha hızlı genişlemiş ve nihai göçme zımbalama neticesinde oluşmuştur. Zımbalama çelik fiber katkısız numunelerde ani yük boşalmasıyla oluşurken çelik fiber katkılı numunelerde daha yavaş oluşmuş, koni belirgin bir şekilde zımbalanırken numune hala yük taşımaya devam edebilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen çatlak profillerinden de görüldüğü gibi daha sık donatıya sahip D1s0 numunesinde daha fazla sayıda çatlak oluşurken D2s0'da çatlak sayısı daha azdır. D2s0'da artan yer değiştirmeler mevcut çatlakların daha fazla açılmasıyla karşılanırken D1s0'da sık donatılar çekme kuvvetlerinin daha iyi yayılmasına ve numunenin daha çok sayıda çatlak geliştirmesine sebep olmuştur. Diğer taraftan çelik fiber katkısı sık donatıya benzer şekilde çatlakların sayısının artmasına ve genişliklerinin azalmasına yol açmıştır. Hem D1 hem D2 serisi döşemelerde %0,5 çelik fiber katkılı numunelerde referans numunelere göre daha fazla sayıda çatlak oluşmuştur. %1 çelik fiber katkılı numunelerde ise çatlak sayısı %0,5 çelik fiber katkılı numunelere göre belirgin bir şekilde daha fazladır, ancak çatlak genişlikleri

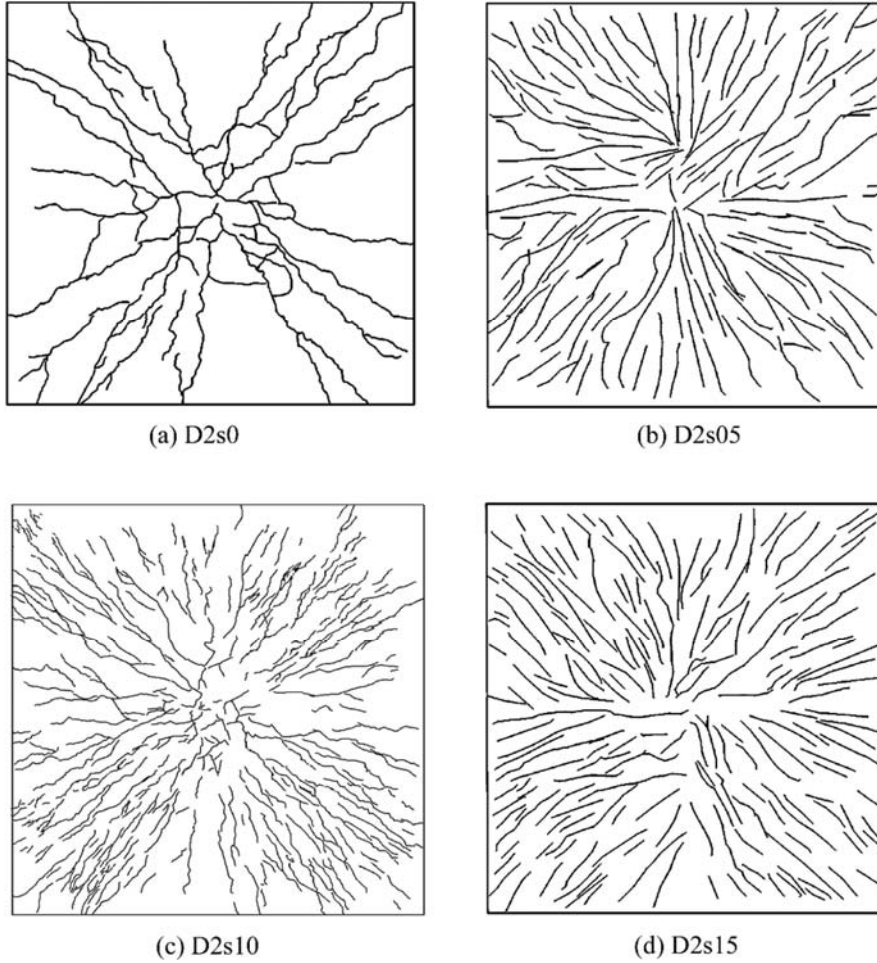
daha azdır. %1,5 çelik fiber katkılı numunelerde ise hem çatlak sayısı hem de çatlak genişlikleri diğer numunelere göre daha azdır. Genel eğilim ve beklentiye ters şekilde daha az çatlak gözlemlenen bu numunelerde çatlakların genişliklerinin gözle fark edilemeyecek kadar küçük olması ve dolayısıyla az sayıda çatlağın tespit edilebilmiş olması da olasılık dâhilindedir. Her halükarda çelik fiber katkısı numunelerde çatlakların sayısının artmasına, dolayısıyla çekme gerilmelerinin yayılarak numunelerin daha yüksek yer değiştirmelere ulaşmasına yol açmıştır. Çelik fiberler özellikle köşegenler doğrultusunda oluşan geniş eğilme çatlaklarında çekme gerilmeleri taşıyarak eğilme dayanımını arttırmıştır.

Çelik fiberler aynı zamanda zımbalama dayanımı da arttırdıklarından döşemeler zımbalama göçmesine uğramadan daha yüksek yük seviyelerinde eğilme davranışı gösterebilmişlerdir. Tüm çelik fiber katkılı numunelerde döşeme üzerinde oluşan radyal çatlakların genişlemesi yüklemenin son aşamalarına doğru önemli ölçüde durmuş, artan orta nokta yer değiştirmesinin zımbalama konisinin gelişmesi ve yerinden ötelenmesi neticesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Çelik fiberler bu koninin hem kesme dayanımını hem de şekil değiştirme kapasitesini arttırarak numunenin göçmeden önce çok daha yüksek yük ve yer değiştirmelere ulaşmasına olanak vermiştir.

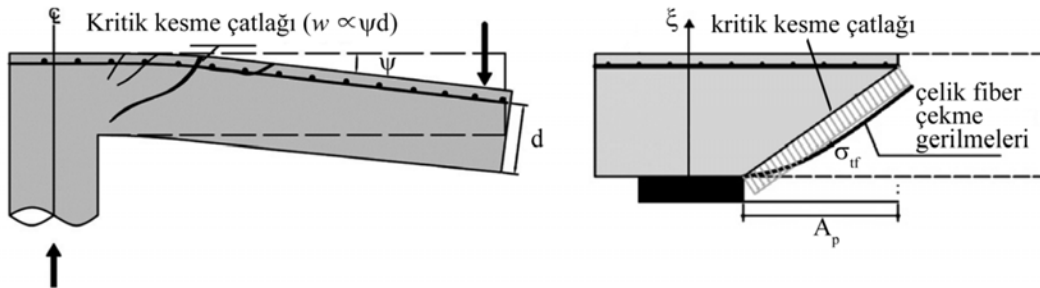
4. ZİMBALAMA DAVRANIŞININ MODELLENMESİ (MODELLING THE PUNCHING BEHAVIOR)

Çelik fiber katkısı olan veya olmayan betonarme döşemelerin zımbalama dayanımlarının bulunması amacıyla çok sayıda çalışma yapılmış olup önerilen yöntemlerin büyük çoğunluğu tamamen deneysel verilere dayanan ampirik yöntemlerdir. Son zamanlarda geliştirilen ve daha rasyonel olan yarı ampirik yöntemlerden ise Kritik Kesme Çatlağı Teorisi (Critical Shear Crack Theory, KKÇT) döşemelerin zımbalama dayanımının tahmininde öne çıkan bir yöntem olmuştur [14]. Söz konusu yöntem zımbalama

anında zımbalama konisi etrafında oluşan kritik bir kesme çatlağının o bölgede kesme kuvvetlerini taşıyan basınç çubuğunun dayanımını azalttığı ve zımbalamaya sebep olduğu tezine dayanmaktadır (Şekil 6). Yöntemde zımbalamaya sebep olan kritik kesme çatlağının genişliği yer değiştirmelerden kaynaklanan döşeme eğimiyle ilişkilendirilmekte ve deneysel verilere dayanan bir göçme kriteri tanımlanmaktadır. Çelik fiber katkısı olması durumunda çelik fiberlerin çatlak yüzeyleri arası oluşturduğu çekme gerilmeleri ayrıca hesaba katılabilmektedir. Yöntemde çelik fiber katkılı döşemelerin zımbalama dayanımı Eş. 1'den bulunabilir.



Şekil 5. D2 serisi döşemeler, deney sonrası çatlak profilleri (D2 series slabs, crack profiles after tests)



Şekil 6. Basınç çubuğunu kesen kritik kesme çatlağı, kaynak: Maya vd. [15]
(Critical shear crack crossing the compression strut, source: Maya et al. [15])

$$V_R = V_{R,c} + V_{R,f} \quad (1)$$

Bu eşitlikte V_R döşemenin toplam zımbalama dayanımı, $V_{R,c}$ çelik fiber katkısı olmadan döşemenin zımbalama dayanımını, $V_{R,f}$ ise çelik fiber katkısının zımbalama dayanımına olan katkısını vermektedir. $V_{R,c}$ aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Eş. 2).

$$\frac{V_{R,c}}{b_0 d \sqrt{f'_c}} = \frac{3/4}{1+15 \frac{\psi d}{d_{g0}+d_g}} \quad (2)$$

Bu eşitlik aynı zamanda çelik fiber katkısız döşemelerin zımbalama dayanımı için göçme kriteri olup d döşeme faydalı yüksekliğini, b_0 yükleme kenarından $d/2$ uzaklıkta alınması önerilen kritik zımbalama bölgesi çevresini, f'_c çelik fiber katkısı olmadan betonun silindir dayanımını (MPa), d_g maksimum agrega boyutunu (mm), d_{g0} referans agrega boyutunu (16 mm) temsil etmektedir. ψ ise döşemenin eğimi olup döşemeye uygulanan yükü orantılıdır. Döşemeye uygulanan yük-eğim ilişkisi doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi gibi analizlerle elde edilebileceği gibi simetrik durumlar için yaklaşık yöntemlerle de tahmin edilebilir. Maya vd. [15] aksisimetrik döşemeler için Eş. 3'ün kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

$$V = V_{flex} \left(\frac{\psi}{1.5 \frac{r_s f_y}{d E_s}} \right) \quad (3)$$

Dairesel döşemeler için türetilen bu eşitlik sınır koşulları tüm kenarlarında aynı olan kare döşemeler için de kullanılabilir. Bu eşitlikte r_s yük merkezinden momentin sıfır olduğu büküm noktasına olan mesafeyi, f_y donatının akma dayanımını, E_s donatının elastik modülünü temsil etmektedir. V_{flex} döşemenin eğilme yük dayanımı olup orta noktadan yüklenen kare döşemeler için daha önce belirtildiği gibi $V_{flex} = 8m_p$ alınabilir. Eş. 2 ve Eş. 3'ü birlikte sağlayan V değeri çelik fiber katkısı olmayan döşemenin zımbalama dayanımını vermektedir.

KKÇT'de çelik fiber katkısı, zımbalama yüzeyinde çelik fiberlerin iki yüzey arası taşıdıkları çekme gerilmelerinin sebep olduğu dayanım artışının doğrudan Eş. 1'de olduğu gibi çelik fiber katkısı olmadığı durumda elde edilen dayanıma eklenmesi ile hesaba katılmaktadır. Çatlamış çelik fiber katkılı betonda çatlak yüzeyleri arası çelik fiberler tarafından iletilen çekme gerilmeleri çatlak genişliği ile çatlak genişliği ise döşemenin eğimi ile ilintilidir. Çelik fiber katkısının zımbala dayanımına olan katkısı $V_{R,f}$ en genel haliyle Eş. 4'den hesaplanabilir.

$$V_{R,f} = \int_{A_p} \sigma_{tf}(w(\xi)) dA_p = \int_{A_p} \sigma_{tf}(\psi, \xi) dA_p \quad (4)$$

Bu eşitlikte σ_{tf} çelik fiberlerden kaynaklanan çatlak genişliği w 'ye bağlı çekme gerilmeleri olup çatlak genişliği ise döşeme eğimi ψ ve düşey koordinat ξ 'ye bağlıdır. A_p zımbalama yüzeyinin yatay izdüşümünün alanını temsil etmektedir. Maya vd. [15] çatlak genişliğine bağlı σ_{tf} dağılımının kritik

kesme çatlağı boyunca sabit kabul edilebileceğini, çekme gerilmesi değerinin ise çatlak genişliğinin $w = (\psi d)/6$ değeri için hesaplandığı değer olarak alınabileceğini belirtmişlerdir. Bu kabullerle $V_{R,f}$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Eş. 5).

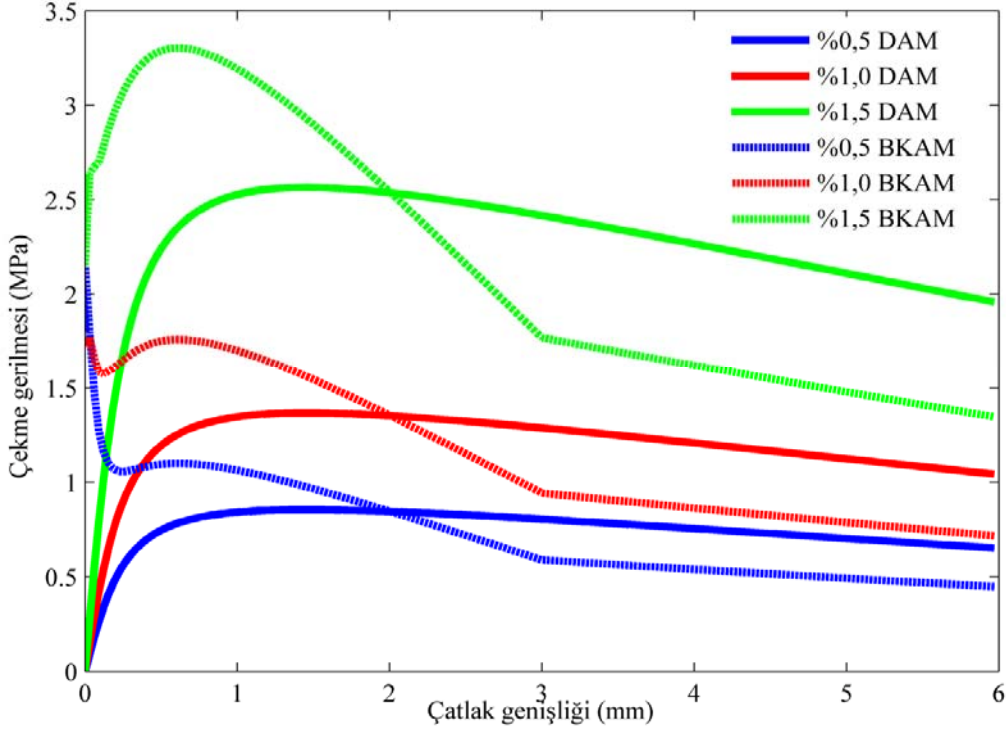
$$V_{R,f} = A_p \sigma_{tf} \left(w = \frac{\psi d}{6} \right) \quad (5)$$

Maya vd. [15] çatlak genişliğine bağlı çekme gerilmesini veren σ_{tf} bağıntısı için Voo ve Foster [17] tarafından geliştirilen Değişken Ankraj Modeli (Variable Engagement Model, DAM) kullanımını önermişlerdir. Bu model rastgele dağılan iki ucu kancalı çelik fiberlerde kopma olmadan sıyrılmamanın gerçekleştiği varsayımıyla çatlak yüzeyleri arasında iletilen çekme gerilmesini aşağıdaki şekilde vermektedir (Eş. 6).

$$\sigma_{tf}(w) = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(3,5 \frac{w}{d_f} \right) \left(1 - \frac{2w}{l_f} \right)^2 \frac{l_f}{d_f} \rho_f (0,8 \sqrt{f'_c}) \quad (6)$$

Bu eşitlikte d_f çelik fiberin çapını, l_f çelik fiberin uzunluğunu, ρ_f çelik fiberin hacimce oranını temsil etmektedir. Maya vd.'nin kullanımını önerdikleri bu model haricinde literatürde çelik fiberlerin çatlak yüzeyleri arasında ilettikleri çekme gerilmelerini modelleyen başka modeller de bulunmaktadır. Basitleştirilmiş Kapsamlı Ankraj Modeli (Simplified Diverse Embedment Model, BKAM) bu modellerin son zamanlarda geliştirilmiş en önde gelenlerine örnek olarak verilebilir [18]. Formülasyonu daha karmaşık olan bu model çok sayıda deneysel veri ile kıyaslanmış ve doğruluk derecesinin yüksek olduğu bildirilmiştir. Burada uzunluğundan dolayı ilgili formülasyonu yer verilmemiştir. DAM ve BKAM'den bu çalışmanın parametreleri kullanılarak elde edilen çekme gerilmesi-çatlak genişliği ilişkileri Şekil 7'de verilmektedir. DAM ağırlıklı olarak düz fiberler üzerinde geliştirilmiş olup fiberlerin bağ gerilmelerinin tüm fiber boyunca aynı olduğunu varsaymakta, BKAM ise ucu kancalı fiberlerde bağ gerilmelerinin çelik fiber boyunca değişimini göz önünde bulundurmada ve ayrıca kancanın mekanik kenetlenmesinden kaynaklanan gerilmeleri de hesaba katmaktadır. Özellikle fiber ucundaki kancanın mekanik kenetlenmesini hesaba kattığından dolayı tipik olarak BKAM düşük çatlak genişliklerinde DAM'ye göre daha yüksek gerilmeler öngörürken çatlak genişliği arttıkça fiber boyunca sabit bağ gerilmesi kabul eden DAM'nin öngördüğü gerilmeler daha fazla olmaktadır. Bu çalışmada her iki model de kullanılarak çelik fiber katkılı döşemelerin zımbalama dayanımları hesaplanmış ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak aralarında bir kıyaslama yapılmıştır.

Şekil 8 ve Şekil 9'da Eş. 1'de verilen göçme kriteri her bir döşeme için döşeme eğimine bağlı olarak çizdirilmiştir. Göçme kriterlerinde çelik fiber katkısının etkisi olan $V_{R,f}$, Eş. 5'te verilen σ_{tf} bağıntısı için DAM ve BKAM kullanılarak ayrı ayrı hesaplanarak sunulmuştur. Ayrıca döşemelerin yük-eğim ilişkisi hem deneylerde yapılan ölçümlerden elde edildiği gibi hem de Eş. 3'te verilen teorik bağıntıya göre aynı şekillerde çizdirilmiştir. Deneylerden elde edilen eğimler yer değiştirme ölçümlerinden hesaplanmıştır. Yük-



Şekil 7. DAM ve BKAM'a göre çatlak genişliği-çekme gerilmesi değişimi
(Crack width-tensile stress variation according to VEM and SDEM)

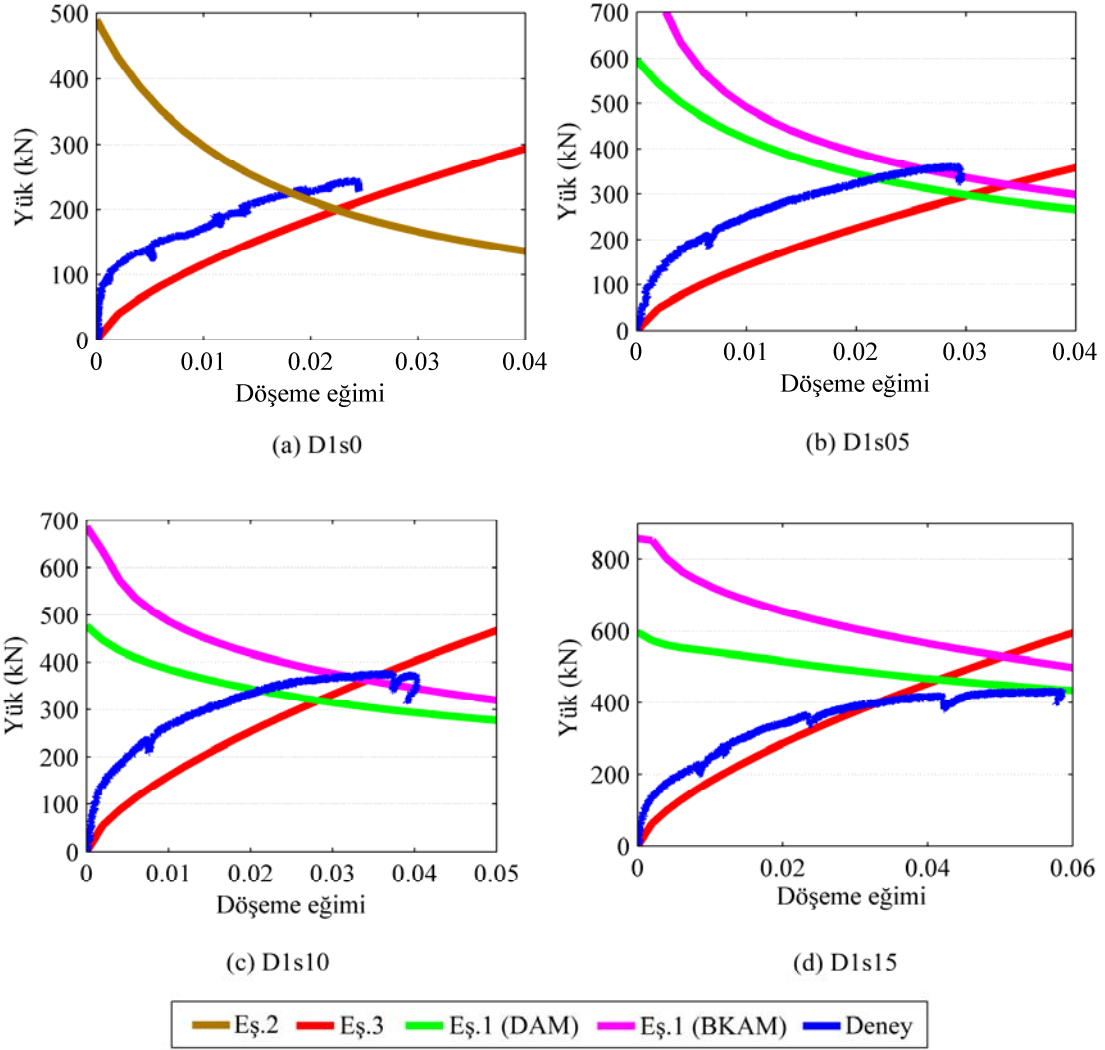
eğim eğrisinin göçme kriterini kestiği nokta döşemenin zımbalama göçme dayanımını vermektedir. Hem deneysel hem de Eş. 3'ten bulunan yaklaşık yük-eğim eğrilerinin DAM ve BKAM kullanılarak hesaplanan göçme kriteri eğrilerini kestikleri yükler Tablo 4'te özetlenmiştir. Tablo 4'te ayrıca $V_{flex} = 8m_p$ formülüne göre bulunan eğilmede göçme yükleri de verilmektedir. Çelik fiber katkılı döşemeler için m_p değerleri başka bir çalışmada önerilen yönteme göre yapılan kesit analizi ile hesaplanmıştır [19].

Şekil 8 ve Şekil 9 ile Tablo 4 incelendiğinde genel olarak Eş. 3 ile verilen teorik yük-eğim ilişkisi deneylerden elde edilen yük-eğim eğrilerinden farklılık göstermektedir. Deneylerden elde edilen yük-eğim eğrisinin göçme kriterini kestiği yük değeriyle Eş.3'e göre hesaplanan teorik yük-eğim eğrisinin göçme kriterini kestiği yük değeri arasındaki fark, DAM'ye göre hesaplanan göçme kriteri için %6 ile %15, BKAM'ye göre hesaplanan göçme kriteri için %2 ile %10 arasında değişmektedir. %1,5 çelik fiber katkılı döşemeler hariç diğer tüm döşemelerde teorik yük-eğim eğrisi güvenli tarafta daha düşük dayanım verdiği için aksisimetrik döşemeler için önerilen Eş. 3'ün kare döşemelerde de KKÇT'ye göre göçme yükü tahmininde kullanılabileceği görülmektedir.

%1,5 çelik fiber katkılı numuneler hariç olmak üzere, gerek deneysel yük-eğim eğrisinin gerekse Eş. 3 ile hesaplanan yaklaşık yük-eğim ilişkisinin hem DAM hem de BKAM'ye göre hesaplanan göçme kriterlerini gerçek göçme yüküne oldukça yakın değerlerde kestikleri görülmektedir. Ancak genel olarak Maya vd. [15] tarafından önerilen DAM,

BKAM'ye göre daha düşük göçme yükleri tahmin etmekte ve Eş. 3 ile kullanıldığında deney sonuçlarına göre %22'ye varan yüksek hatalar vermektedir. BKAM'ye göre hesaplanan göçme yükünün hata oranları ise çok daha düşük olup Eş. 3 ile kullanıldığında deney sonuçlarına göre en fazla %13, deneysel yük-eğim eğrisiyle birlikte kullanıldığında en fazla %2 hata bulunmuştur. Bu durum doğru bir yük-eğim ilişkisi ile çelik fiber katkısının çekme gerilmelerine etkisini yüksek hassasiyetle veren bir modelin birlikte kullanımında KKÇT yönteminin gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Öte yandan KKÇT'ye göre hesaplanan zımbalamada göçme yükleri $V_{flex} = 8m_p$ ile hesaplanan eğilme göçme yükleri ile karşılaştırıldığında bazı numunelerde göçme yükü ile ilgili çelişkiler de görülmektedir. Örneğin Tablo 4'te verilen göçme yükleri incelendiğinde D1s0 hariç diğer tüm döşemelerin eğilmede göçme göstermesi beklenir. Ayrıca deneyde ölçülen yük-eğim eğrileri D1s15 ve D2s05 numunesinde BKAM'ye göre hesaplanan göçme kriterini, D2s15 numunesinde ise her iki göçme kriterini de kesmediğinden bu döşemelerin eğilme göçmesi göstermelerinin beklendiği sonucu çıkmaktadır. Ancak bu numunelerde de göçme yükü hesaplanan eğilmede göçme yükünden sırasıyla %11, %59 ve %22 daha yüksektir. D1s15 ve D2s05'nin DAM'ye göre hesaplanan Eş. 1 göçme kriterine çok yakın bir noktada göçmesi KKÇT'nin zımbalama göçmesi tahminini güvenilir kılmaktadır. D2s15'te ise deneyde bulunan göçme yükü Eş. 3 kullanılarak yapılan yük-eğim ilişkisine göre bulunan zımbalama dayanımlarından

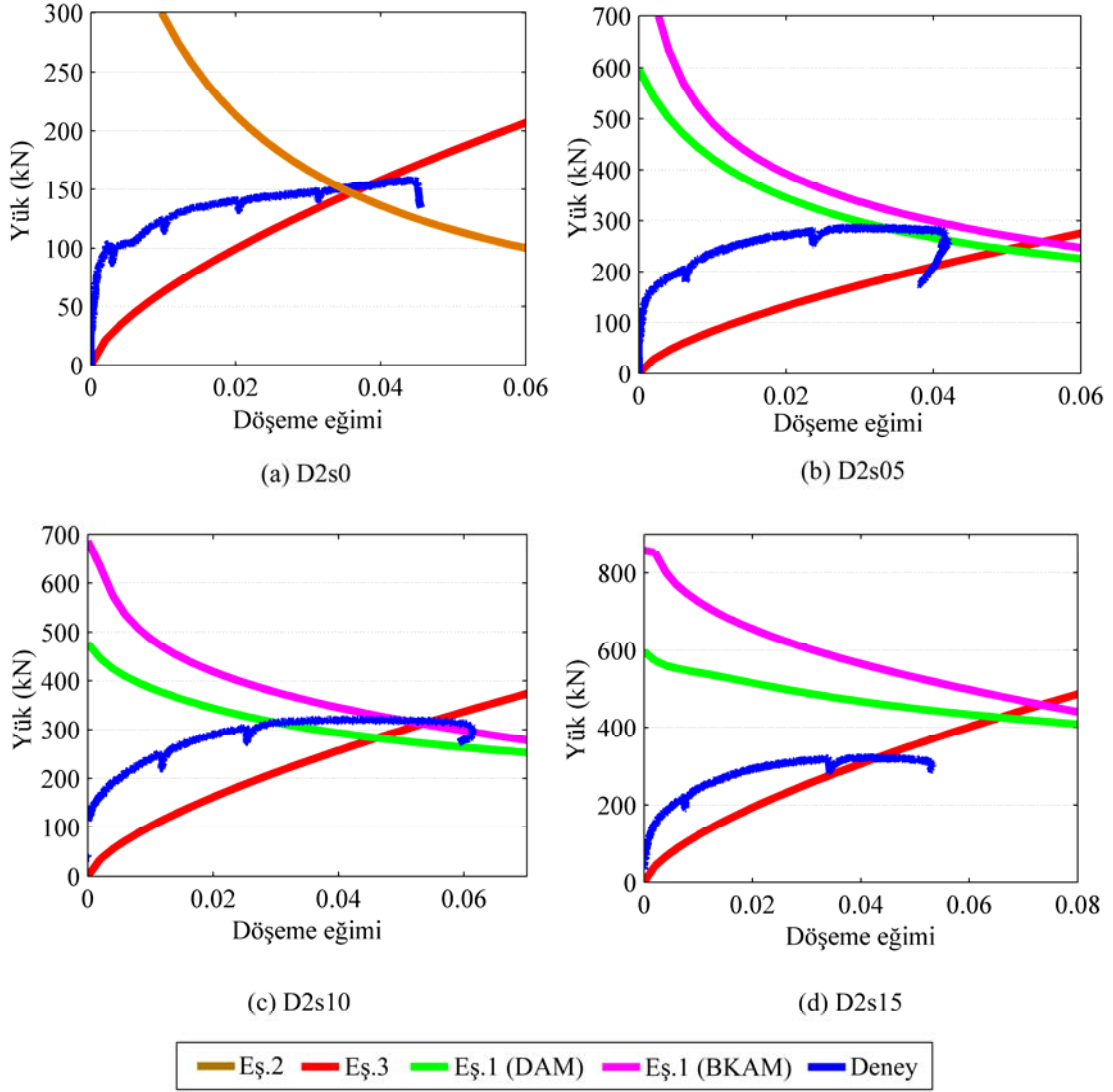


Şekil 8. D1 serisi döşemelerde yük-eğim değişimi ve göçme kriterleri
(Load-slope variations and failure criteria for D1 series slabs)

çok daha düşük ancak hesaplanan eğilmede göçme yükünden yüksektir. Bu bulgular iki temel sebebe dayandırılabilir. Birincisi, eğilmede göçme yükünün hesaplanmasında kullanılan akma çizgileri teorisi döşeme plağının tüm yer değiştirmelerinin orta noktadan köşelere uzanan akma çizgileri üzerinden gerçekleştiğini, bu çizgiler arasında yer alan parçaların hiç eğilme göstermediğini varsaymaktadır. Ancak çelik fiber katkılı döşemelerde çatlak yüzeyleri arası çekme gerilmeleri taşınmaya devam ettiği için döşemede yayılı çok sayıda çatlak oluşabilmekte ve tüm eleman eğilmeye maruz kalabilmektedir. Ayrıca yük noktasal değil dairesel bir plaka vasıtasıyla verildiğinden noktasal varsayımıyla yapılan hesap hata içermektedir.

Bu faktörler nedeniyle varsayılan akma çizgileri çelik fiber katkılı döşemeler için gerçeklikten uzaklaşmakta, döşemenin akma yükü hesaplanandan daha yüksek olmaktadır. Gözlemlenen çelişkilerin ikinci temel sebebi ise çelik fiber oranındaki artışın davranışa aynı oranda yansımaması, ancak

burada kullanılan modelin bu durumu göz ardı etmesidir. Çelik fiber katkısının zımbalama dayanımına etkisi Eş. 5'te verilen ifade ile hesaba katılmakta, bu ifadedeki çatlaklar arası taşınan çekme gerilmesi σ_f bağıntısı tipik olarak doğrudan çekme deneylerinden elde edilen çatlak genişliği-çekme gerilmesi bulgularından elde edilmektedir. Doğrudan çekme deneylerinde artan fiber katkısı çekme gerilmelerini de Şekil 7'de verildiği gibi arttırmakta, ancak betonarme elemanın yapısal davranışında etki aynı oranda olmamaktadır. Daha önce bahsedilen yük-yer değiştirme ve çatlak profillerinin analizlerinde de aynı durum görülmüştür. Dolayısıyla çelik fiber oranı arttıkça (özellikle %1 üzerine çıktıkça) hesaplanan dayanım gerçektekenden yüksek olmaktadır. Bu durum kirişler için ACI 318-14 [4] yönetmeliğine de yansıtılmış, yönetmelik bazı şartları taşıyan kirişlerde hacimce yaklaşık %0,8 oranında çelik fiber kullanımının minimum etriye koşulu yerine geçmesine izin verirken daha yüksek oranda çelik fiber katkısının getireceği ilave dayanımın hesaba katılmasına izin vermemiştir.



Şekil 9. D2 serisi döşemelerde yük-eğim değişimi ve geçme kriterleri
(Load-slope variations and failure criteria for D2 series slabs)

Tablo 4. Döşemelerin hesaplanan ve ölçülen dayanımları (Calculated and measured load capacities of slabs)

Göçme Yüğü (kN) / Hata						
Numune	Eş.3 ve Eş.1 (DAM)'e göre	Eş.3 ve Eş.1 (BKAM)'e göre	Deneysel yük-eğim ilişkisi ve Eş.1 (DAM)'e göre	Deneysel yük-eğim ilişkisi ve Eş.1 (BKAM)'e göre	Hesaplanan eğilmede göçme yüğü, V_{flex} (kN)	Deneyde bulunan göçme yüğü (kN)
D1s0	200 / %21		225 / %8		256	243
D1s05	296 / %22	320 / %13	334 / %8	355 / %2	309	360
D1s10	320 / %18	362 / %4	340 / %11	370 / %2	346	376
D1s15	465 / -	528 / -	425 / %2	-	390	432
D2s0	147 / %8		151 / %5		136	158
D2s05	244 / %18	258 / %11	286 / %0,3	-	181	287
D2s10	283 / %14	313 / %3	312 / %3	321 / %0,3	222	322
D2s15	428 / -	460 / -	-	-	264	323

6. SİMGELER (SYMBOLS)

A_p	: zımbalama yüzeyinin yatay izdüşüm alanı
b_0	: kritik zımbalama bölgesi çevresi
d	: faydalı yükseklik (çekme donatısının döşemenin basınç altındaki yüzünden olan mesafesi)
d_f	: çelik fiber çapı
d_g	: maksimum agrega boyutu
d_{g0}	: referans agrega boyutu (16 mm)
E_s	: boyuna donatının elastik modülü
f'_c	: çelik fiber katkısı olmadan betonun silindirik dayanımı
f_{ctd}	: betonun çekme tasarım dayanımı
f_y	: boyuna donatının akma dayanımı
l_f	: çelik fiber boyu
m_p	: döşemenin birim genişlikte bir kesitinin sahip olduğu akma momenti
r_s	: yük merkezinden momentin sıfır olduğu büküm noktasına olan mesafe
u_p	: TS 500'de yükleme plakasından $d/2$ uzaklıkta olan kritik zımbalama çevresi
V	: kesme kuvveti
V_{flex}	: döşemenin eğilme yük dayanımı
V_{pr}	: TS 500'e göre döşemenin zımbalama dayanımı
V_R	: döşemenin toplam zımbalama dayanımı
$V_{R,c}$: çelik fiber katkısı olmadan döşemenin zımbalama dayanımı
$V_{R,f}$: çelik fiber katkısının zımbalama dayanımına olan katkısı
w	: çatlak genişliği
ξ	: döşeme kesitinde düşey koordinat
ρ_f	: çelik fiberin hacimce oranı
σ_{ff}	: çelik fiberlerden kaynaklanan çekme gerilmeleri
ψ	d: öşemenin eğimi

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan çalışmada farklı oranlarda çelik fiber katkısının farklı boyuna donatı oranına sahip tekil yük ile yüklenen döşemelerin davranışına olan etkileri incelenmiştir. Döşemelerin yük-yer değiştirme davranışları incelendiğinde çelik fiber katkısının döşemelerin zımbalama dayanımlarını iki kata varan mertebelerde artırdığı görülmektedir. Ancak yer değiştirmelerde çelik fiber katkısının rolü döşemenin boyuna donatı oranına göre farklılık göstermektedir. Boyuna donatı oranının zımbalamadan önce donatının akmasına izin verecek ölçüde düşük olduğu döşemelerde çelik fiber katkısının varlığı maksimum yer değiştirmeleri fazla değiştirmemiştir. Öte yandan boyuna donatı akmadan zımbalamanın gerçekleştiği yüksek donatı oranına sahip döşemelerde çelik fiber katkısı doğrudan zımbalama dayanımını arttırdığı için donatının akmasına izin veren yük seviyelerine çıkılabilmekte, bu durum da ulaşılan maksimum yer değiştirmeyi önemli ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca bu döşemelerde göçme üzerinde ağırlıklı olarak zımbalama konisinin ayrışması etkin olduğu için bu koninin artan oranda çelik fiber katkısı ile güçlendirilmesi hem dayanım hem de maksimum yer değiştirmeleri arttırmıştır. Ancak zımbalama konisinin rolünün daha az olduğu düşük boyuna

donatılı döşemelerde ise çelik fiber oranının %1'den daha fazla artırılması önemli bir fark yaratmamıştır. Genel olarak çelik fiber katkısının yük dayanımını boyuna donatı oranından bağımsız olarak her durumda arttırdığı, ancak zaten sünek davranış gösteren döşemelerde süneklığe önemli bir katkı getirmediği söylenebilir.

Yapılan çalışmada ayrıca çelik fiber katkısının yük dayanımına olan etkilerinin modellenmesi için kullanılan Kritik Kesme Çatlağı Teorisi'nin (KKÇT) genel olarak başarılı olduğu teyit edilmiştir. Ancak bu model kullanılırken döşemenin yük-eğim ilişkisinin doğru tespiti ve çelik fiberlerin sağladığı çatlak yüzeyleri arası taşınan çekme gerilmelerinin hassas bir şekilde modellenmesinin büyük önem taşıdığı görülmüştür. Çalışmada çelik fiberlerin taşıdığı çekme gerilmeleri için KKÇT'nin önerdiği Değişken Ankraj Modeli yerine Basitleştirilmiş Kapsamlı Ankraj Modeli'nin kullanılmasının daha iyi sonuç verdiği ve teorinin bu modelin kullanımı ile iyileştirilebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. American Concrete Institute, Fiber Reinforced Concrete in Practice, Special Publication SP-268, Michigan, A.B.D., 2010.
2. Murathan, A., Murathan, A. ve 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.
3. Dinh, H.H., Parra-Montesinos, G.J. ve Wight, J.K., Shear Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Without Stirrup Reinforcement, ACI Struct. J., 107 (5), 597-606, 2010.
4. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14), Michigan, A.B.D., 2014.
5. Ozden, S., Ersoy, U. ve Ozturan, T., Punching Shear Tests of Normal- and High-Strength Concrete Flat Plates, Can. J. Civ. Eng., 33 (11), 1389-1400, 2006.
6. Choi, K.K., Truong, G.T., Kim, S.D. ve Choi, I.R., Punching Shear Behaviour of Shear Reinforced Concrete Slabs, Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build., 168 (6), 402-420, 2015.
7. Barros, J.A.O., Moraes-Neto, B.N., Melo, G.S.S.A. ve Frazao, C.M.V., Assessment of the Effectiveness of Steel Fibre Reinforcement for the Punching Resistance of Flat Slabs by Experimental Research and Design Approach, Composites Part B, 78, 8-25, 2015.
8. Sermet, F. ve Ozdemir, A., Investigation of Punching Behaviour of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete Slabs Under Normal Load, Procedia Eng., 161, 458-465, 2016.
9. Cheng, M.Y. ve Parra-Montesinos, G.J., Evaluation of Steel Fiber Reinforcement for Punching Shear Resistance in Slab-Column Connections-Part I: Monotonically Increased Load, ACI Struct. J., 107 (1), 2010.

10. Gouveia, N.D., Fernandes, N.A.G., Faria, D.M.V., Ramos, A.M.P. ve Lucio, V.J.G., SFRC Flat Slabs Punching Behaviour - Experimental Research, Composites Part B, 63, 161-171, 2014.
11. Fall, D., Shu, J.P., Rempling, R., Lundgren, K. ve Zandi, K., Two-Way Slabs: Experimental Investigation of Load Redistributions in Steel Fibre Reinforced Concrete, Eng. Struct., 80, 61-74, 2014.
12. Harajli, M.H., Maalouf, D. ve Khatib, H., Effect of Fibers on the Punching Shear Strength of Slab-Column Connections, Cem. Concr. Compos., 17, 161-170, 1995.
13. Ju, H., Cheon, N.R., Lee, D.H., Oh, J.Y., Hwang, J.H. ve Kim, K.S., Consideration on Punching Shear Strength of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Slabs”, Advances in Mechanical Engineering, 7 (5), 2015.
14. Muttoni, A., Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Without Transverse Reinforcement, ACI Struct. J., 105 (4), 440-450, 2008.
15. Maya, L.F., Ruiz, M.F., Muttoni, A. ve Foster, S.J., Punching Shear Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete Slabs, Eng. Struct., 40, 83-94, 2012.
16. Türk Standartları Enstitüsü, TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara, Türkiye, 2000.
17. Voo, J.Y.L. ve Foster, S.J., Variable Engagement Model for Fibre Reinforced Concrete in Tension, Uniciv Report No. R-420, University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, 2003.
18. Lee, S.C., Cho, J.Y. ve Vecchio, F.J., Simplified Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Elements in Tension, ACI Struct. J., 110 (4), 403-412, 2013.
19. Saatci S. ve Batarlar B., Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams Without Stirrups, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1143-1154, 2017.

