

Farklı Donatı Oranlarına Sahip Düzenli Kare Boşluklu Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışları

İlker KALKAN², Ebru KAHRAMAN², Boğaçhan BAŞARAN¹

ÖZET: Sıhhi tesisat, elektrik tesisatı ve mekanik tesisat için kullanılan borular, kablolar, kanallar ve iletim hatları, yapı içinde kapladıkları hacim dolayısıyla hem kullanım açısından hem de görsel açıdan bazı sorunlara yol açar. Bu sorunların aşılması için kullanılan en etkili çözüm yolu, iletim hatlarının kiriş içine önceden veya sonradan açılan boşluklardan geçirilmesidir. Ancak, bu boşluklar kirişin eğilme rijitliğini azaltmakta, kiriş göçme tipini değiştirmekte ve kullanılabilirlik sınırı durumlarını daha kritik hale getirmektedir. Açıklığı boyunca sadece bir tane veya her yarı açıklığında bir adet gövde boşluğu bulunduran betonarme kiriş davranışının incelendiği geçmiş çalışmaların aksine, mevcut çalışmada açıklığı boyunca çok sayıda düzenli kare gövde boşluğuna sahip betonarme kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, oluşturulan boşluklu kiriş sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları literatürdeki deney sonuçları ile kıyaslanarak, nümerik analiz sonuçlarının gerçek sonuçlara yakınlığı irdelenmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçların yakın uyumunun görülmesi üzerine, çekme donatı oranının düzenli kare boşluklu kiriş eğilme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmada özellikle kiriş eğilme rijitliği ve kullanım yükü sehimleri incelenmiş ve boşluklu kirişlerde boyuna donatı oranı arttıkça kullanım yükü sehimlerinin arttığı, fakat yönetmelik üst sınırının altında kaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düzenli gövde boşluğu, kare boşluk, boşluklu betonarme kiriş, sonlu eleman analizi

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Regular Square Web Openings and Different Longitudinal Reinforcement Ratio

ABSTRACT: Pipes, cables and conduits used for plumbing, electrical and mechanical installations, circulating within the structure, lead to some usage and aesthetic problems in structures due to the volume they occupy. The most efficient solution for overcoming these shortcomings is the passage of these installations through pre-formed or post-drilled web openings in the beams. Nonetheless, this application reduces the beam flexural rigidity, increases the service-load deflections and might alter the failure mode of the beam. In the present study, flexural behavior of reinforced concrete beams with multiple regular square web openings along the beam length was investigated different from the previous studies in the literature, which concentrated on behavior of beams with a single or a couple of web openings along the whole length. In the first part of the study, analysis results from the finite element models of beams with openings were compared to the available experimental results in the literature and the accuracy of the numerical results were investigated. Upon observing close agreement between the numerical and experimental results, effects of the tension reinforcement ratio on flexural behavior of reinforced concrete beams with openings was investigated through finite element analysis. In the study, flexural rigidity and service-load deformations of the beams were examined in particular and service load deformations were found to increase with increasing tension reinforcement ratio, yet to always remain below the service load limits of the structural concrete codes.

Keywords: Regular web openings, square openings, reinforced concrete beams with openings, finite element analysis

¹ Boğaçhan BAŞARAN (Orcid ID: 0000-0002-5289-8436), Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Amasya, Türkiye

² İlker KALKAN (Orcid ID: 0000-0002-5987-631X), Ebru KAHRAMAN (Orcid ID: 0000-0001-6433-8359), Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Boğaçhan BAŞARAN, e-mail: bogachan.basaran@amasya.edu.tr

GİRİŞ

Neredeyse tüm üst yapılarda kullanılan mekanik tesisat, elektrik tesisatı ve sıhhi tesisat; kablolar, kanallar ve borular vasıtasıyla yapı boyunca iletilirler. Bu kanal, kablo ve boruların yapının kullanım alanlarından geçirilmesi, estetik ve mimari sebeplerle tercih edilmemektedir. Bu soruna çözüm olarak ülkemizde genellikle asma tavan uygulaması yapılmaktadır. Ancak asma tavan uygulaması, yapı iç hacminde bir azalma meydana getirmesi nedeniyle yapı kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Bu sorun, imar planının izin verdiği ölçülerde genellikle kat yüksekliğinin artırılmasıyla giderilmektedir. Ancak kat yüksekliğinin artırılması durumunda karşılaşılabilecek öncelikli tehlike, yumuşak kat oluşumuna yol açılabileceğidir. Ayrıca kat yüksekliğinin artırılması yapının zati ağırlığını artırmakta, taşınan ve temele aktarılan yüklerin artmasına sebep olmaktadır. Bu olumsuz durumları engellemek amacıyla kullanılan çözümlerden biri de, mekanik, elektrik ve sıhhi tesisatın yapım aşamasında bırakılan veya sonradan oluşturulan kiriş gövde boşluklarından geçirilmesidir. Ancak bu boşluklar, kirişlerin kesme ve eğilme dayanımını düşürmekte ve ayrıca kiriş göçme davranışlarını değiştirebilmektedir.

Literatürde, önceden bırakılan ya da yapıldıktan sonra gövde boşluğu açılan betonarme kirişlerin kesme ve eğilme davranışları, birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Mansur ve Paramasivam (1984), enine gövde boşluğu içeren betonarme bir kirişin burulma ve eğilme yüklerine maruz kaldığı durumlarda, kirişlerin farklı göçme modlarına göre dayanımlarının belirlenebilmesi için kullanılacak bir metod önermişler ve bir takım denklemler geliştirmişlerdir. Mansur ve ark. (1985), gövde boşluklu betonarme kirişlerde boşluk derinliğini, uzunluğunu ve konumuna ilave olarak köşe donatılarının uzunluğunu ve

dizilişini, deney değişkenleri olarak kullanmıştır. Boşluklu kirişler üzerine yapılan deneyler, köşe donatısı olarak kullanılan donatıların (çapraz donatılar) çatlak genişliğini sınırlamada düşey etriyelere göre daha etkin olduğunu göstermiştir. Ayrıca çapraz donatıların, bu kirişlerin kesme dayanımlarının %75'ini karşıladığını belirtmişlerdir. Mansur ve ark. (1991) çalışmalarında, gövde boşluklu betonarme kiriş davranışına, gövde boşluklarının sayısının, boyutunun ve konumunun etkisini incelemiştir. Bu çalışma, gövde boşluk yüksekliğinin ve uzunluğunun artmasıyla, kirişlerin göçme yükünün ve eğilme rijitliğinin azaldığını göstermiştir. Tan ve ark. (1996), birden fazla boşluk bulunan kirişlerin dayanımının, tek gövde boşluğu bulunan kirişlere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Mansur ve ark. (1999), betonarme kirişlerde sonradan açılan boşlukların (etriyelere zarar verilmemek koşuluyla) kiriş rijitliğini asgari düzeyde etkilediğini, ancak boşluğun tekrar doldurulmasıyla kiriş rijitliğinin eski seviyelerine ulaşmadığını gözlemlemişlerdir. Betonarme kirişin yapım aşamasında açılan dairesel boşluğun mesnet bölgelerine yaklaşmasıyla kirişlerde göçmenin daha erken olduğu ve kiriş rijitliğinin olumsuz yönde etkilendiği belirtilmiştir. Ashour ve Rishi (2000), iki açıklıklı ve gövde boşluğuna sahip betonarme kirişlerde, boşluk boyutunun, konumunun ve çevresindeki donatıların kiriş davranışına etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, diğer değişkenler sabit tutulduğunda, boşluk konumuna bağlı olarak iki farklı göçme tipi gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Tan ve ark. (2001) dairesel boşluklu T-kesitli betonarme kirişler kullanarak yaptığı deneyler neticesinde boşluk çevresinde kullanılan çapraz donatıların kesme çatlaklarının genişlemesine engel olduğunu belirlemiştir. Ayrıca, yeterli miktarda çapraz donatı kullanılmasıyla da kesme kuvvetlerinin, alt ve üst kirişçikler arasında kesit alanları ile orantılı olarak dağıtıldığını

belirlemişlerdir. Bu çalışma, boşluk çevresinde konumlanan düşey donatıların, yatay donatılara göre, kirişin kesme kapasitesini daha fazla arttırdığını göstermiştir. Ahmed ve ark. (2012), geçmişte gövde boşluklu betonarme kirişlerin davranışları ile ilgili yapılmış olan çalışmaların büyük bir kısmını özetleyerek, bu kirişlerin tasarımında kullanılan farklı yaklaşımları tartışmıştır. Ayrıca, boşluklu kirişlerin güçlendirilmesinde lifli polimer (FRP) malzeme ve çelik levha kullanımı ile ilgili yapılan geçmiş çalışmalara da değinilmiştir. Salama ve ark. (2018), büyük gövde boşluğuna sahip T-kesitli betonarme kirişlerin salt burulma momentleri etkisi altındaki davranışlarını incelemiş ve tabla genişliği, tabla kalınlığı ile boşluk yüksekliği gibi geometrik değişkenlerin bu davranışı önemli etkide belirlediğini belirtmiştir. Elsanadedy ve ark. (2019), kesme açıklıklarının her birinde dikdörtgen büyük bir gövde boşluğu bulduran betonarme kirişlerin dayanım ve eğilme rijitliklerinin boşluksuz kiriş seviyesine çekilebilmesi amacıyla kullanılan güçlendirme yöntemlerini araştırmıştır. Bu yöntemlerden kesme açıklıklarında birbirine dik iki doğrultuda lif bulduran iki katman CFRP plaka kullanımının, yine kesme açıklıklarına bulonlu çelik levhalarla tespit edilmiş GFRP plaka katmanı kullanımına göre daha az etkin olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen çalışmaların birçoğunda gövde boşluklu kiriş davranışının, boşluk konumuna, boyutuna ve geometrisine bağlı değiştiği belirtilmiştir. Ayrıca bu kirişlerde, genellikle göçme davranışının, kesme dayanımı yetersizliğinden dolayı, kritik bölge olan delik çevresinde ortaya çıktığı ve dolayısıyla göçmenin gevrek bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmalardan farklı olarak Dünder (2008), Aykaç ve Yılmaz (2011), Aykaç ve ark. (2013) ve Aykaç ve ark. (2014) çalışmalarında boşluk içeren betonarme kirişlerin sünekliğini artırmak için, kirişlerde

düzenli boşluklar kullanarak, boşluk çevresinde oluşan gerilme birikmelerini tüm kirişe yaymayı hedeflemişlerdir. Ayrıca çalışmalarında dairesel boşlukların dışında üçgen ve dikdörtgen boşlukların kiriş davranışına etkisini incelemişlerdir. Dünder (2008) ve Aykaç ve ark. (2014), düzenli boşluklara sahip betonarme kirişlerin boyuna donatı oranını deney parametresi olarak belirlemiştir. Bu çalışma, boşluk etrafındaki donatılarda gerekli düzenlemelerin yapılmasıyla, yüksek donatı oranına sahip olmayan boşluklu kirişlerin boşluksuz kirişlerden daha sünek eğilme davranışına ulaşabildiğini göstermiştir. Kirişlerde bırakılan düzenli boşlukların, kirişin kesme yerine sünek eğilme davranışına yönelmesini sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, dairesel boşluklu kirişlerin kare boşluklulara göre daha büyük süneklik, dayanım ve rijitlik değerlerine sahip olduğu ve boşluk kenarlarında bulunan tam etriyelerin kesme çatlaklarını engellediği görülmüştür.

Gövde boşluklu olsun yada olmasın betonarme bir kirişin göçme davranışını ve eğilme dayanımını belirleyen en önemli etmenlerden birisi de boyuna donatı oranıdır. Ancak düzenli gövde boşluklu kirişlerin farklı boşluk çevresi donatısı düzenlemelerine sahip olması durumlarında, kullanılan boyuna donatı oranlarının, kirişin eğilme dayanımını ve göçme davranışını hangi oranda etkileyeceği açık değildir. Mevcut çalışma, boşluk çevresinde farklı donatı düzenlemeleri yapılmış düzenli boşluklu betonarme kirişlerde boyuna donatı oranının eğilme davranışına etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Kare boşluklar, dairesel boşluklara göre kiriş davranışı üzerinde daha olumsuz etkilere sahip olduğu için, çalışmada sadece kare boşluklu betonarme kirişler incelenmiştir. Düzenli kare gövde boşluklu betonarme kirişlerin özellikle eğilme rijitlikleri ve kullanım yükleri altındaki sehim değerleri incelenmiştir. Sonlu eleman modellerinin

güvenilirliğinin saptanması amacıyla, bu modellerin analizlerinden elde edilen sonuçlar, Dündar (2008) tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasında yakın bir uyum bulunduğunun belirlenmesi üzerine, boşluklu kirişler farklı boyuna donatı oranlarına göre analiz edilmiş ve rijitlik ile sehim değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Referans Olarak Kullanılan Deneysel Kirişler

Düzenli boşluklu betonarme kirişlerde boyuna donatı oranının, kiriş davranışına etkilerini

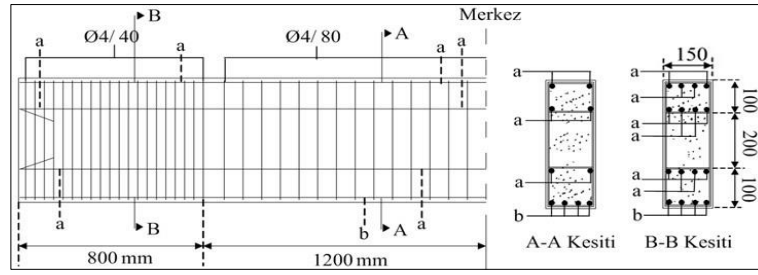
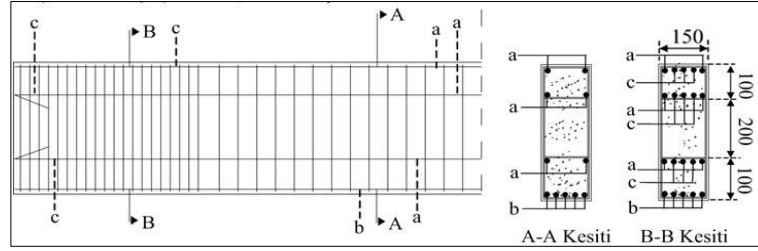
nümerik olarak incelemek maksadıyla, sonlu eleman modellerinin hazırlanması ve hazırlanan modellerin kalibrasyonlarının yapılabilmesi için, Dündar'ın (2008) deney kirişleri kullanılmıştır. Çalışmada referans alınan 4 m uzunluğa ve 3.8 m serbest açıklığa sahip 6 adet deney kirişinden ikisinde gövde boşluğu bulunmamakta (RBn ve RBb) ve diğer dördünde ise kare gövde boşlukları bulunmaktadır (RRxn, RRxcn, RRxb ve RRxcb). Çalışmada kullanılan deneysel kirişlerinin donatı detayları Şekil 1 ve 2'de verilmiştir. Deney kirişlerinde kullanılan donatı detayları ve gövde boşluk durumları Çizelge 1'de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Referans alınan deney kirişleri (Dündar 2008)

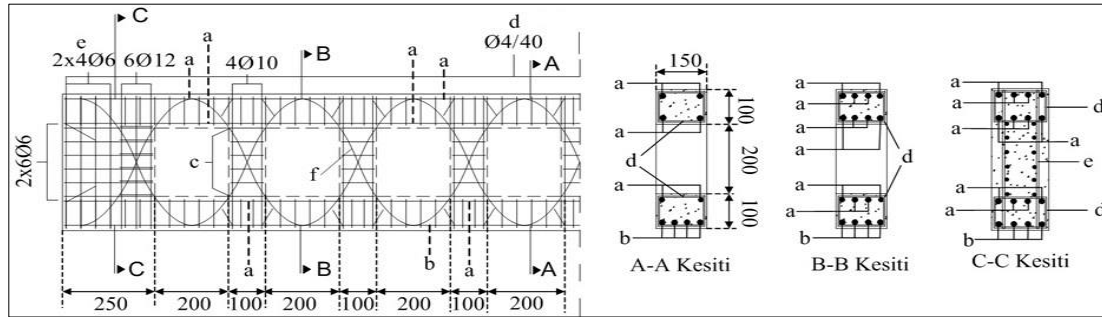
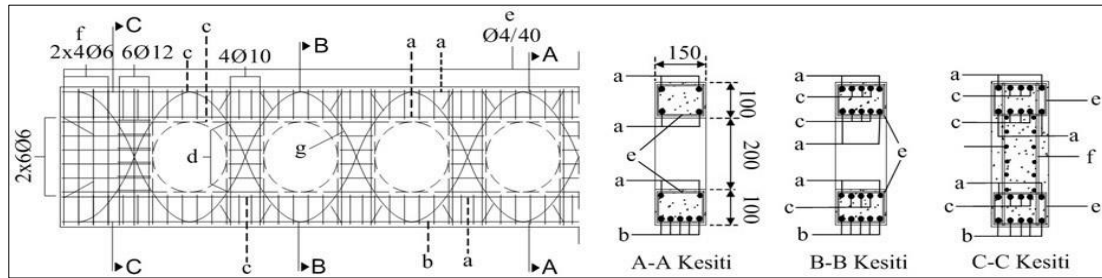
Kiriş İsmi	Gövde Boşluğu	Boyuna Donatı Oranı	Dikmelerde Etriye	Çapraz Donatı
RBn	Yok	0.0052	-	-
RBb	Yok	0.0094	-	-
RRxn	Kare	0.0052	Yok	Var
RRxcn	Kare	0.0052	Var	Var
RRxb	Kare	0.0094	Yok	Var
RRxcb	Kare	0.0094	Var	Var

Deney kiriş isimlerinde ikinci sırada kullanılan büyük harf kirişte gövde boşluğu durumunu göstermektedir. “B” harfi boşluksuz kirişi, “R” harfi ise kare boşluklu kirişi sembolize etmektedir. Ayrıca ikinci büyük harften sonra kullanılan küçük harflerden “x”, kiriş içinde çapraz donatı bulunduğunu, “c” dikmelerde yatay etriye kullanıldığını, “n” kirişte kullanılan çekme donatısı oranının %0.52 olduğunu, “b” harfi kirişte kullanılan çekme

donatısının oranının %0.94 olduğunu belirtmektedir. Yüksek donatı oranına (%0.94) sahip deney kirişlerinde, TS 500 (2000) tarafından betonarme kirişlerde izin verilen en yüksek boyuna donatı oranı, yani dengeli donatı oranının %85'i kadar donatı ($\rho_{max}=0.85\rho_b$) kullanılmıştır. Normal donatı oranına (%0.52) sahip deney kirişlerinde ise en yüksek donatı oranı (ρ_{max}) ile TS 500 (2000) minimum boyuna donatı oranı sınırının (ρ_{min}) aritmetik ortalaması kadar donatı bulunmaktadır.

a-)RBn kirişi [a-2 Φ 10; b-4 Φ 10]b-)RBb kirişi [a-2 Φ 12; b-5 Φ 12; c-3 Φ 12]

Şekil 1. Gövde boşluğu bulunmayan kirişlerin boyut ve detayları (Dündar, 2008; Kalkan, 2014)

a-)RRxn, RRxcn kirişleri [a-2 Φ 10; b-4 Φ 10; c-RRxn (etriye yok), RRxcn (Φ 4/40); f- Φ 10 kablo]b-)RRxb, RRxcb kirişleri [a-2 Φ 12; b-5 Φ 12; c-3 Φ 12; d-RRxb (etriye yok), RRxcb (Φ 4/40); g-RRxb, RRxcb (Φ 10 kablo)]

Şekil 2. Gövde boşluğu bulunan kirişlerin boyut ve detayları (Dündar, 2008; Kalkan, 2014)

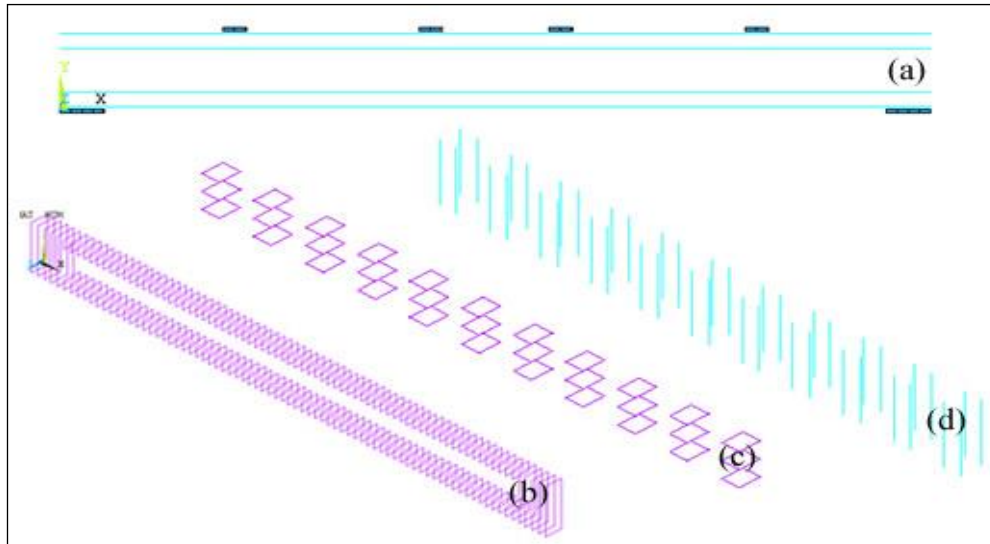
Deney Düzeneği ve Deney Prosedürü

Dündar (2008), 3.8 m serbest açıklığa sahip deney kirişlerinde düzgün yayılı yük etkisini oluşturmak maksadı ile kiriş sol mesnet noktasından sırasıyla 700 mm, 1600 mm, 2200 mm, 3100 mm uzaklıktaki noktalara yükleme yaparak, gövde boşluklu kirişleri 6 noktali eğilme deneyine tabi tutmuştur. Deneye tabi tutulan kirişlerin deneyler sırasında sehimlerini, mesnet çökmelerini ve gövde boşluk çevresi kayma deformasyonlarını belirleyebilmek için potansiyometreler kullanmıştır. Ayrıca uygulanan yükü ölçebilmek maksadıyla yük hücresi (Load Cell) kullanılmıştır. Deneyler esnasında kirişlerde oluşan tüm çatlaklar işaretlenerek, çatlak genişlikleri düzenli olarak ölçülmüştür.

Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Çalışmada sonlu eleman analizleri "ANSYS Mechanical APDL" (Ansys, 2013) programı kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan

kiriş modellerinde (Şekil 3) beton, üç eksende üç adet serbestlik derecesi bulunan ve plastik deformasyon, ezilme, kırılma, sünme gibi özelliklere sahip olan "Solid 65" tipi elemanlarla modellenmiştir. Kiriş yük takozlarında ise plastisite, hiperelastisite, büzülme, yüksek deformasyon ve uzama kapasitelerine sahip olan "Solid185" tipi elemanlar kullanılmıştır. Donatılar, her düğümde üç serbestlik derecesine sahip tek eksenli bir eleman olan "Link180" tipi elemanlarla modellenmiştir. Bu çalışmada modellenen kirişler, Dündar (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada test edilen deney kirişler olduğu için, oluşturulan tüm modellerde de Dündar (2008) tarafından gerçekleştirilen malzeme deneylerinin sonuçları kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan betonun 28 günlük silindirik basınç dayanımları ise RBn, RRxb ve RRxcb kirişleri için 26.56 MPa, RRxn ve RRxcn kirişleri için 26.95 ve RBb kirişi için 32.56MPa'dır.



Şekil 3. Kiriş modellerinde kullanılan a)mesnet noktaları ve boyuna donatılar b)üst ve alt kirişçik etriyeleri c)dikme etriyeleri d)boşluk kenarı düşey etriyelerinin gösterimi

Deney kirişlerinde çekme ve basınç donatısı olarak S420 kalitesine sahip 10 mm ve 12 mm çaplarında betonarme çeliği kullanılmış olup bu donatıların deneysel ortalama akma dayanımları sırasıyla 476 MPa ve 551 MPa'dır.

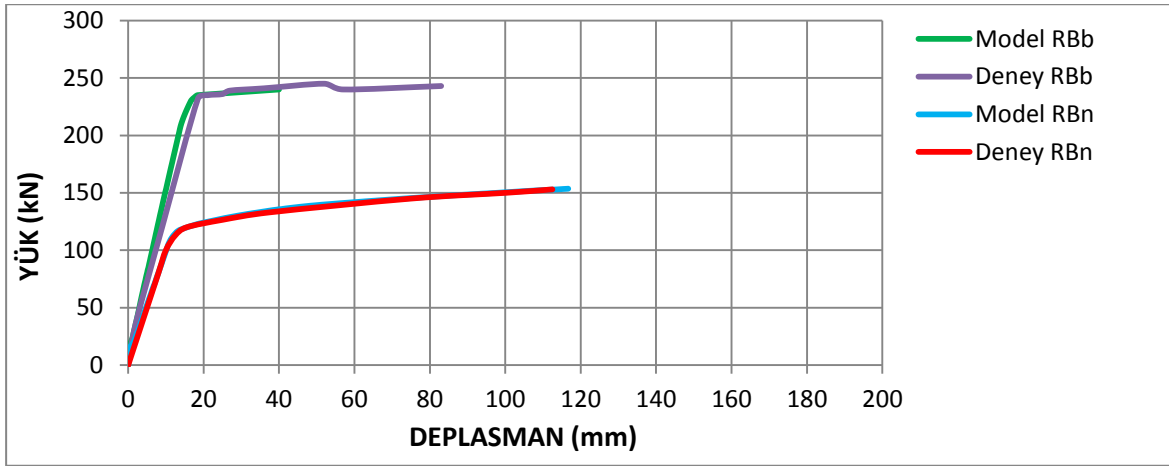
Etriyelerin yapımında ise, S220 kalitesine sahip 4 mm ve 6 mm çaplarındaki betonarme çeliği kullanılmış olup, bu donatıların çekme testlerinin yapılmamasından dolayı akma dayanımları 220MPa olarak kullanılmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

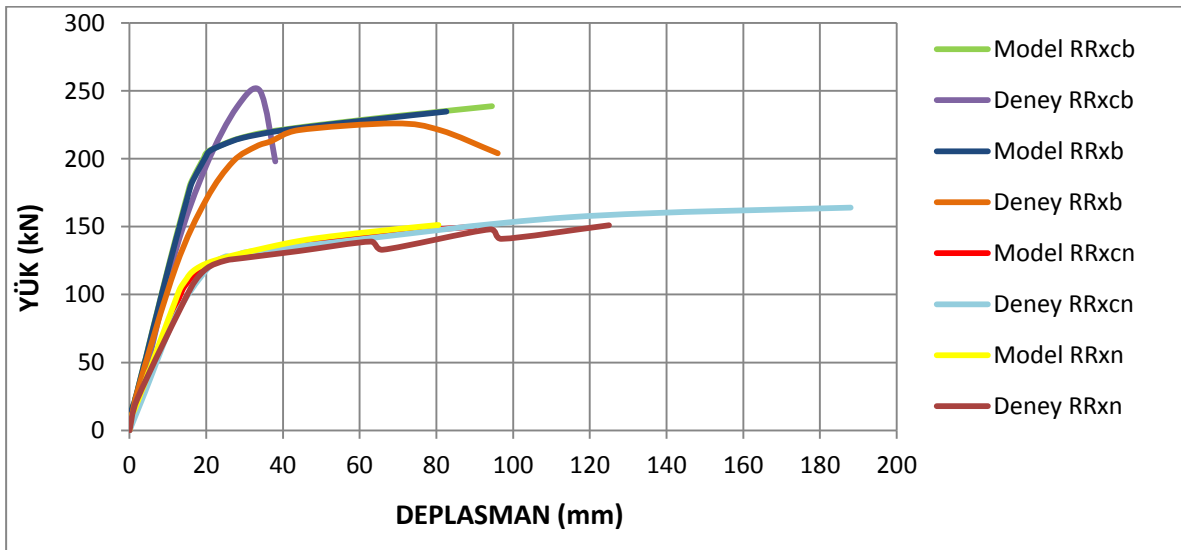
Deneysel ve Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

Deneysel kirişlerdeki detaylar ve malzeme özellikleri kullanılarak hazırlanan nümerik modellerin yük-deplasman eğrileri ile deneysel sonuçlar (RRxcb modeli haricinde) çok iyi bir uyum sergilemişlerdir (Şekil 4-5). Tamamen eğilme kırılmasının ortaya çıktığı referans elemanlarda (RBn ve RBb) ve boşluklu RRxcn elemanında nümerik ve deneysel eğriler arasındaki uyum son derece yüksektir. Ancak, RRxn ve RRxb kirişlerinin deneylerinde,

kirişciklerde “Vierendeel” tipi kesme kırılması nedeniyle plastik mafsallaşma ve dikmelerinde kesme kırılması ortaya çıkmış olmasına rağmen sonlu eleman analizleri eğilme kırılması öngörmüş ve gerçek kırılma tipini tahmin edememiştir. Bu nedenle küçükte olsa iki eğri arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Ancak, bu farklılıklar, RRxcb elemanına göre sınırlı düzeyde kalmıştır. Genel olarak, eğilme kırılması sonucu göçen ve tam kapasitelerine ulaşabilen boşluklu elemanlarda sonlu eleman analizlerinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür.



Şekil 4. RBn ve RBb elemanının nümerik ve deneysel yük-sehim eğrileri.



Şekil 5. RRxn, RRxb, RRxcn ve RRxcb elemanının nümerik ve deneysel yük-sehim eğrileri.

Donatı oranı yüksek olan RRxcb kirişi, normal donatı oranına sahip RRxcn kirişinden oldukça yüksek eğilme momenti kapasitesi göstermiştir. Şekil 6’da da görüldüğü gibi bu eleman, eğilme kırılmasına uğramadan önce kesme altında diyagonal gövde betonu ezilmesi (“diagonal web crushing failure”) sonucu göçmüştür. Bu kesme kırılması çeşidinde, boşlukların altındaki ve üstünde kirişiklerden biri veya birkaçı kesme sonucu göçmekte, kirişiklerdeki çapraz ezilme kapasitesi kesme

kuvvetlerini karşılamakta yetersiz kalmakta ve kiriş, henüz eğilme kapasitesine ulaşmadan düşük yük seviyelerinde yük taşıyamaz hale gelmektedir.” Sonlu eleman analizleri, bu erken göçme modunu tahmin edemedikleri için, deneysel ve nümerik eğriler arasında önemli bir farklılık ortaya çıkmıştır. Ancak, iki eğri arasında yük kapasitesi ve başlangıç rijitliği açısından önemli bir farklılık bulunmadığından, bu farklılık çalışmanın geri kalanında ihmal edilmiştir.



Şekil 6. RRxcb elemanının göçmesi (Dündar, 2008)

Düzenli Kare Gövde Boşluklu Kirişlerde Boyuna Donatının Eğilme Davranışına Etkisi

Özellikle eğilme davranışı görülen düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerde sonlu eleman analizleri ile mevcut deneysel verilerin yakın uyumunun gözlemlenmesi üzerine, çalışmanın ikinci kısmını teşkil eden nümerik analizlere geçilmiştir. Bu kısımda, analiz edilecek düzenli kare gövde boşluğuna sahip betonarme kirişler iki gruba ayrılmıştır. RRxn ve RRxb elemanlarının yer aldığı birinci kiriş

grubunda, dikmelerinde etriye bulunmayan düzenli kare gövde boşluğuna sahip kirişler bulunmaktadır. RRxcn ve RRxcb elemanlarının yer aldığı ikinci kiriş grubunda ise kiriş dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare gövde boşluğuna sahip betonarme kirişler yer almaktadır. Her iki kiriş grubu için de Çizelge 2’de gösterildiği üzere nümerik modeldeki çekme donatısı oranı değiştirilerek analizler yapılmıştır.

Çizelge 2. Analiz edilen kiriş donatı oranları.

Kiriş İsmi	Donatı Oranı
1 (RRxn ve RRxcn)	0.0052
2	0.0060
3	0.0070
4	0.0080
5 (RRxb ve RRxcb)	0.0094

Bu kapsamda her grupta 5 adet olmak üzere toplam 10 adet sonlu eleman modeli oluşturularak analiz edilmiştir. Modellerde donatı oranının hangi ölçüde davranışı etkileyeceğini belirleyebilmek ve farklı donatı oranlarının etkisini karşılaştırabilmek için tüm modellerin yük deplasman eğrileri oluşturulmuştur. Bilindiği üzere çok noktalı tekil yükleme maruz kalan kirişlerde eğrilik değerleri kiriş üzerinde değişkenlik arzeder. Mevcut çalışmada kirişler, 4 noktalı yüklemeye, yani 6 noktalı eğilmeye maruz bırakılmıştır. Bu gibi deneylerde genellikle sabit moment bölgesinin (kiriş açıklık ortasına en yakın iki yükleme noktası arasındaki bölgenin) ortalama eğrilik değerleri kullanılarak, belirlenen ortalama eğrilik değerleri ve bu değerlere göre çizilen moment-eğrilik grafikleri kullanılır. Ancak, sadece bu orta bölgeyi esas alan grafiklerin kirişin tümünün rijitliğini ve davranışını doğru olarak yansıtmadığını düşüncesinden hareketle, kirişin bütütünün rijitliği ve eğilme davranışına bağlı olarak ortaya çıkan açıklık ortası sehim değerlerinin kiriş davranışının belirlenmesi ve kirişler arasında karşılaştırma yapılması açısından daha sağlıklı olduğu açıktır. Bu sebeple, mevcut çalışmada moment-eğrilik grafikleri yerine yük-sehim eğrilerine göre eleman karşılaştırmaları yapılmıştır.

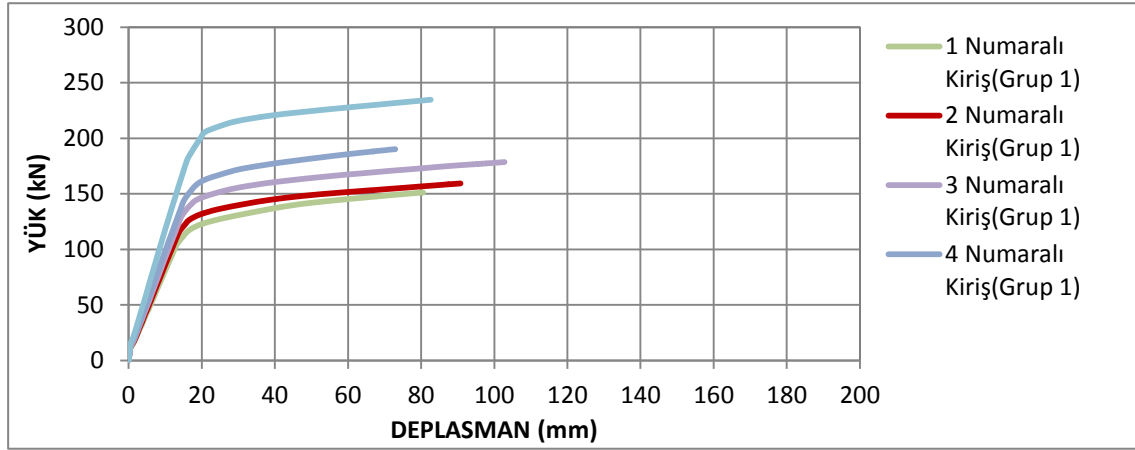
Sonlu eleman analizleri yapılan kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, yük-sehim eğrilerindeki en yüksek yük olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmada, başlangıç ve akma rijitliği olmak

üzere iki rijitlik tanımı kullanılmıştır. Başlangıç rijitliği kiriş yük-deplasman eğrisinde kirişin ilk çatladığı ana kadar olan rijitliktir. Başlangıç rijitliği, elemanın yük-deplasman eğrisinde ilk çatlağın olduğu noktayı (eğimin ani olarak azaldığı ilk nokta) başlangıç noktasına birleştiren doğrunun eğiminden elde edilmiştir. Akma rijitliği ise, yük-deplasman eğrisinde, başlangıç noktasından akma yük düzeyine karşılık gelen yük değerinin, bu noktadaki deplasmana bölünmesiyle hesaplanmıştır. Akma rijitliği ifadesi, akma anına kadar olan ortalama rijitliği ifade etmek için kullanılmıştır. Kirişlerin akma noktaları, yük-sehim eğrisinin eğiminin ani olarak değiştiği ikinci noktaya karşılık gelmektedir.”

Bu çalışmada, Eurocode 2 (2008) yönetmeliğinde bahsedilen kullanım yükü tanımı, kirişlerin kullanım yük değerlerini belirleyebilmek maksadıyla kullanılmıştır. Bu tanıma göre, kirişlerin kullanım yükleri altında en dış basınç lifinde $0.6f_{ck}$ büyüklüğünde bir basınç gerilmesi ortaya çıkmaktadır. Kullanım yükü hesaplarında, beton basınç bloğundaki gerilmelerin Todeschini ve ark. (1964) beton modeline uygun olarak dağıldığı varsayılmıştır.

Dikmelerinde etriye bulunmayan kirişlerin analizleri (1. grup kirişler)

Kirişlerin yük-deplasman eğrileri Şekil 7’de gösterilmiş, yük taşıma kapasiteleri, başlangıç ve akma rijitlikleri ile kullanım yükü deformasyonları ise Çizelge 3’te verilmiştir.



Şekil 7. 1.Gruptaki kirişlerin yük-deplasman grafikleri

Çizelge 3. Birinci grup kirişlerinin analiz sonuçları

Kiriş No	Yük Kapasitesi (kN)	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği (kN/mm)	Kullanım Momenti (kN.m)	Kullanım Yüğü (kN)	Kullanım Yüğü	
						Mutlak (mm)	Sehim (mm) Oran
1	151.2	25.50	7.73	34.30	54.87	6.58	1.00
2	159.3	25.73	8.34	35.15	56.23	6.35	0.96
3	178.6	26.08	9.03	36.12	57.79	6.06	0.92
4	190.2	26.37	9.55	37.06	59.30	5.81	0.88
5	234.7	28.67	11.23	38.28	61.25	4.95	0.75

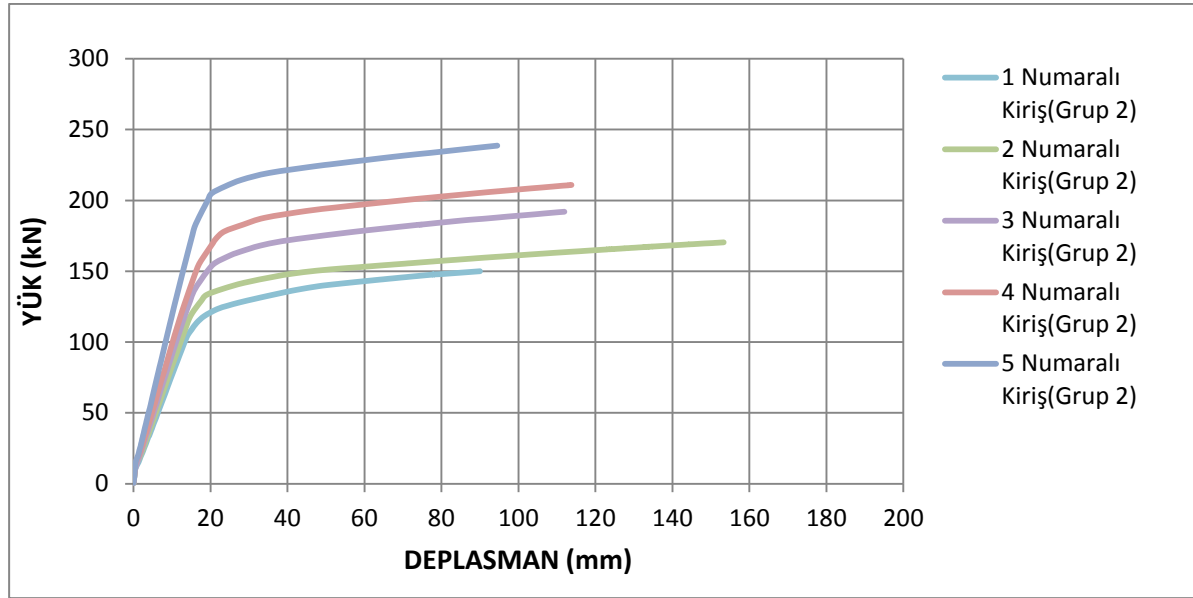
Çizelge 3’de görüldüğü gibi, artan donatı oranlarında kirişin yük taşıma kapasitesi, başlangıç ve akma rijitliklerinin artmakta, ama kullanım yüğü sehimleri azalmaktadır. 1. Grup kirişlerinde en yüksek donatı oranına sahip olan 5 numaralı kirişin donatı oranı, 1 numaralı kirişin donatı oranının neredeyse iki katı olmasına rağmen, yük kapasitesindeki artış sadece %55 düzeylerinde kalmıştır. Aynı donatı oranı artışında, başlangıç rijitliği sadece %12 artarken, akma rijitliği ise %45 oranında artmıştır. Başlangıç rijitliğinin betonun çatladığı ana kadar geçerli olmasından dolayı akma rijitliğinin, başlangıç rijitliğine göre donatı oranından daha fazla etkilenmesi beklenen bir durumdur. Çünkü çatlakların kiriş tarafsız eksenine doğru ilerlemesiyle, betonun eğilme rijitliğine etkisi azalmakta ve eğilme rijitliğinin

büyük kısmı boyuna çekme donatıları tarafından sağlanmaya başlamaktadır.

Çizelge 3’den de görüleceği üzere kullanım yüğü sehim değerleri, boyuna donatının 2 katına çıkarılması ile %25 azalmıştır. Ayrıca tüm kirişlerin kullanım yüğü sehim değerleri, TS 500’de (2000) kiriş serbest açıklığının 240’a bölünmesiyle elde edilen üst sehim sınır değerlerinin altında kalmıştır. TS500’de (2000) geçen üst sehim sınırı tüm kirişler için $3800\text{mm}/240=15.83\text{mm}$ ’dir. Çizelge 3’de verilen sehim değerlerinin tümü, bu üst sınırın altında kalmaktadır.

Dikmelerinde etriye bulunan kirişlerin analizleri (2. grup kirişler)

Kirişlerin yük-deplasman eğrileri Şekil 8’de, yük taşıma kapasiteleri, başlangıç ve akma rijitlikleri ile kullanım yüğü deformasyonları ise Çizelge 4’te verilmiştir.



Şekil 8. 2. Gruptaki kirişlerin yük-deplasman grafikleri

Çizelge 4. İkinci grup kirişlerinin analiz sonuçları

Kiriş No	Yük Kapasitesi (kN)	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği (kN/mm)	Kullanım Momenti (kN.m)	Kullanım Yüğü (kN)	Kullanım Yüğü Sehim (mm)	
						Mutlak (mm)	Oran
1	147.8	25.31	7.46	34.30	54.87	6.96	1.00
2	170.4	25.82	7.93	35.15	56.23	6.58	0.94
3	192	26.67	8.69	36.12	57.79	6.12	0.88
4	210.9	27.00	9.24	37.06	59.30	5.78	0.83
5	238.6	28.67	11.46	38.28	61.25	4.90	0.70

Çizelge 4'ten de görüldüğü gibi, artan donatı oranlarında kirişin yük taşıma kapasitesi, başlangıç ve akma rijitlikleri artmakta, fakat kullanım yüğü sehimleri azalmaktadır. 2. Grup kirişlerinde en yüksek donatı oranına sahip olan 5 numaralı kirişte, 1 numaralı kirişe göre nerdeyse 2 kat donatı daha fazla boyuna donatı bulunmasına rağmen, yük kapasitesindeki artış %61 düzeylerinde olmuştur.

Aynı donatı oranı artışında, başlangıç rijitliği sadece %13 artarken, akma rijitliği ise %54 oranında artmıştır. Dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare boşluklu betonarme

kirişlerin yük kapasiteleri ve rijitlikleri, dikmelerinde etriye bulunmayan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlere göre boyuna donatı oranından daha fazla etkilenmektedir. Dikmelerde etriye bulunması, boşluklar arasında yer alan dikmelerin boşluk çevresi kayma gerilmelerinden daha az etkilenmelerini ve boşluğu çevreleyen kirişçikler ve dikmeler arasındaki bütünlüğün artmasını sağlar. Dolayısıyla, dikmelerde etriye bulunması, boşluklu kiriş davranışının boşluksuz kiriş eğilme davranışına yaklaşmasını sağlar. Boyuna donatı oranındaki artış, basit eğilme davranışı

gösteren kirişlerin kapasitesinde diğer davranış özelliklerine sahip kirişlere göre daha büyük artışlara sebep olur. Bu sebeplerle, dikmelerinde etriye bulunan düzenli boşluklu betonarme kirişlerin boyuna donatı oranından daha büyük ölçüde etkilenmeleri beklenen bir durumdur.

Çizelge 4'ten de görüleceği üzere kullanım yükü sehim değerleri, boyuna donatının 2 katına çıkarılması ile %30 azalmıştır. Dikmelerinde etriye bulunan elemanlarda boyuna donatı oranı artışıyla sehimlerde ortaya çıkan azalma, dikmelerinde etriye bulunmayan elemanlara göre daha fazla olmaktadır. Tüm kirişler için $3800\text{mm}/240=15.83\text{mm}$ 'dir. Çizelge 4'te verilen sehim değerlerinin tümü, TS500'de (2000) geçen üst sehim sınırının (bu çalışma için 15.83mm) altında kalmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, boyuna donatı oranının düzenli kare boşluklu betonarme kiriş davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Çalışma kapsamında esas alınan deneysel çalışmalar ve yapılan analitik çalışmalar neticesinde aşağıdaki genel sonuçlara ulaşılmıştır;

- Basit eğilme davranışı gösteren düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin sonlu eleman analizleri, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar vermektedir. Fakat bu durum, kesme kırılması ile göçmeye ulaşan kirişler için geçerli değildir. Sonlu elemanlar programlarının boşluklu kirişlerde genellikle basit eğilme davranışı öngörmesi, kesme kırılmasına uğrayan kirişler için doğru tahminler üretememesine sebep olmaktadır.
- Boyuna donatı oranının arttırılmasıyla dikmelerinde etriye bulunan düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin taşıma yük kapasitesi, başlangıç rijitliği ve akma

(eğilme) rijitliğinde görülen artışlar, dikmelerinde etriye bulunmayan kirişlerin ilgili değerlerine göre daha yüksek olmaktadır.

- Boşluklu betonarme kirişlerde boyuna donatı oranının arttırılmasıyla, akma anına kadar olan ortalama eğilme rijitliği artmıştır ve bu artış dikmelerinde etriye bulunan kirişlerde %55, dikmelerinde etriye bulunmayan kirişlerde ise %45 seviyelerine kadar çıkmıştır. Boyuna donatı oranının arttırılması ile başlangıç eğilme rijitliği, akma rijitliği kadar artış göstermemiştir (%12-13).
- Boyuna donatı oranının arttırılmasıyla tüm kirişlerin kullanım yükü sehimleri azalmıştır. Buna ilaveten, analiz edilen tüm kirişlerin sehim değerleri, TS 500 (2000) standardında belirtilen sehim üst sınırı değerinin altında kalmıştır. Ancak, düzenli kare gövde boşluklu kirişlerde eğilme göçmesi dışında kalan göçme davranışlarının gerçekleşmesi durumunda, bu modların sehimleri arttırıcı etkilerinden ötürü, eğilme sehimlerinin mümkün olduğunca düşük tutulmasında fayda vardır.

Bu çalışma, düzenli gövde boşluklu betonarme kirişlerde çekme oranının arttırılmasıyla yük kapasiteleri ve akma anına kadar ortalama eğilme rijitliklerinde önemli artışlar sağlanabileceğini göstermiştir. Aynı şekilde donatı artışıyla kullanım yükleri altındaki sehimlerde de önemli azalmalar sağlanmıştır. Donatı artışının kiriş yük ve sehim değerlerine bu önemli yansımaları, özellikle boşluklar arasında etriye bulunan boşluklu kirişlerde daha önemli seviyelere ulaşmıştır. Kirişlerde açıklık boyunca düzenli gövde boşluğu bulunduranın temel amacı, gerilmeleri kiriş geneline yayarak, kirişin eğilme bölgelerinde de boşluk bulunması yoluyla daha sünek bir kiriş davranışı elde etmek ve boşluksuz kiriş davranışına yaklaşımdır. Bu

çalışmada elde edilen sonuçlar, çekme donatı oranının artmasıyla boşluksuz kiriş davranışına daha çok yaklaşmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Özellikle, kiriş sehimlerinin kritik olduğu yapılarda çekme donatı oranının artırılması sehim problemlerine çözüm olacaktır.

Bu çalışmada, kare boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda, çekme donatısı miktarındaki değişimin betonarme kiriş davranışına etkisi, farklı boşluk geometrilerine sahip olan kirişler ve düzenli boşluk sayısı farklı olan kirişler için araştırılabilir. Bu çalışma, özellikle çok farklı göçme şekillerine (basit eğilme, Vierendeel, kiriş-tipi kesme, çerçeve-tipi kesme, çapraz beton ezilmesi) sahip boşluklu betonarme kirişlerde, sonlu eleman analizlerinin bazı durumlarda gerçek göçme şeklini doğru olarak belirleyemediğini ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalarda bu durumun sebeplerinin araştırılması ve deney sonuçları ile daha çok bağdaşan nümerik modellerin nasıl elde edileceğinin araştırılması faydalı olacaktır.”

KAYNAKLAR

ANSYS V.15, 2013. Engineering Simulation Software. ANSYS Inc., Canonsburg, USA.

Ahmed A, Fayyadh MM, Naganathan S, Nasharuddin K, 2012. Reinforced Concrete Beams with Web Openings: A State of the Art Review. *Materials and Design*, 40: 90-102.

Ashour AF, Rishi G, 2000. Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams with Web Openings. *ACI Structural Journal*, 97 (3): 418-426.

Aykac B, Aykac S, Kalkan I, Dunder, B, Can H, 2014. Flexural Behavior and Strength of Reinforced Concrete Beams with Multiple Transverse Openings. *ACI Structural Journal*, 111(2): 267-278.

Aykac B, Kalkan I, Aykac S, Egriboz YE, 2013. Flexural Behavior of RC Beams with Regular Square or Circular Web Openings. *Engineering Structures*, 56: 2165-2174.

Aykac S, Yilmaz MC, 2011. Behavior and Strength of RC Beams with Regular Triangular or Circular Web Openings. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(3): 711-718.

Dunder B, 2008. Düzenli Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Elsanadeny HM, Al-Salloum YA, Almusallam TH, Alshenawy AO, Abbas H, 2019. Experimental and Numerical Study on FRP-Upgraded RC Beams with Large Rectangular Web Openings in Shear Zones. *Construction and Building Materials*, 194: 322-343.

Eurocode 2, 2008. Design of Concrete Structures. British Standards Institution, London.

Kalkan İ, 2014. Düzenli Boşluklu Betonarme Kirişlerin Düzlem İçi Eğilme Davranışları. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(1):155–163.

Mansur MA, Paramasivam P, 1984. Reinforced Concrete Beams with Small Opening in Bending and Torsion. *American Concrete Institute Journal*, 81(2): 180-185.

Mansur MA, Tan KH, Lee SL, 1985. Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Openings. *American Concrete Institute Journal*, 82(4): 517-524.

Mansur MA, Tan KH, Wei W, 1999. Effects of Creating an Opening in Existing Beams. *ACI Structural Journal*, 96(6): 899-905.

- Mansur MA, Lee YF, Tan KH, Lee SL, 1991. Tests on RC Continuous Beams with Openings. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 117(6): 1593-606.
- Salama AE, Kassem ME, Mahmoud AA, 2018. Torsional Behavior of T-Shaped Reinforced Concrete Beams with Large Web Openings. *Journal of Building Engineering*, 18: 84-94.
- Tan KH, Mansur MA, Huang LM, 1996. Reinforced Concrete T-beams with Large Web Openings in Positive and Negative Moment Regions. *ACI Structural Journal*, 93(3): 277-289.
- Tan KH, Mansur MA, Wei W, 2001. Design of Reinforced Concrete Beams with Circular Openings. *ACI Structural Journal*, 98(3): 407-415.
- Todeschini CE, Bianchini AC, Kesler CE, 1964. Behavior of Concrete Columns Reinforced with High Strength Steels. *ACI Journal Proceedings*, 61(6): 704-716.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, 29-31.