

DÜZENLİ BOŞLUKLU BETONARME KİRİŞLERİN DÜZLEM İÇİ EĞİLME DAVRANIŞLARI

İlker KALKAN

Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450 Kırıkkale/TÜRKİYE;
ilkerkalkan@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 22.11.2013; Kabul/Accepted: 30.01.2014)

ÖZET

Betonarme kirişlerde çok sayıda düzenli boşluk bırakılması, bir bina içerisinde çeşitli hizmetlerin ulaştırılabilmesi için gerekli olan boruların kirişin içinden geçişine imkan sağlaması ve boşluk çevresinde oluşan gerilme birikmelerinin kirişin bütününe yayılması gibi sebeplerle etkili bir tasarım niteliği taşımaktadır. Bu çalışmada, düzenli boşluklara sahip betonarme kirişlerin düzlem içi eğilme davranışları ile servis yükleri altındaki sehimleri incelenmiştir. Literatürde mevcut olan formüllerden elde edilen analitik değerler, çeşitli donatı düzenlerine sahip numunelerin deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deney kirişinin nihai göçme şekline bağlı olmaksızın, Vierendeel göçme moduna uygun olarak kullanım yükleri için hesaplanan sehim değerlerinin deneysel değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla beraber, eğilme göçmesine uğrayan kirişlerin yük-deplasman eğrilerinin başlangıç bölgelerinin, yalnızca eğilme deformasyonları hesaba katılarak elde edilen analitik eğrilerle uyumlu olduğu, Vierendeel göçme moduna karşılık gelen eğrilerle uyumlu olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boşluklu betonarme kiriş, kullanım yükü sehimi, eğilme davranışı, eğilme rijitliği, çapraz donatı, vierendeel panel.

IN-PLANE FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH REGULAR OPENINGS

ABSTRACT

The presence of multiple regular openings in beams provides an effective design by allowing passage of the pipes and ducts needed for different services in a building and by distributing the stress concentrations around the openings along the entire beam length. The present study investigated the in-plane flexural behavior and service-load deflections of reinforced concrete beams with regular openings. The analytical estimates obtained from different formulations in the literature were compared to the experimental results of specimens with different reinforcement schemes. Irrespective of the final failure of the beam, the service-load estimates calculated based on the Vierendeel failure mode were shown to be in close agreement with the experimental values. Nevertheless, the initial portions of the load-deflections curves of specimens failed in pure flexure coincided with the analytical curves corresponding to the flexural failure, rather than the curves corresponding to the Vierendeel failure.

Keywords: Reinforced Concrete Beam with Openings, Service-Load Deflection, Flexural Behavior, Flexural Rigidity, Diagonal Reinforcement, Vierendeel Truss.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mekanik, elektrik ve su işlerinin yapı içerisindeki iletimini sağlayan boruların ve kanalların kat kirişlerinin altından geçmesi, yapıların kullanılabilir net yüksekliklerinin azalmasına ve bu sebeple yapı maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu

kanalların ve boruların kiriş gövdesinde bırakılan boşluklardan geçirilmesi, kullanılabilir kat yüksekliğini arttırarak daha ekonomik ve etkili bir tasarıma imkan tanımaktadır. Bir yapı içerisindeki elektrik, internet, havalandırma, ısınma, su ve kanalizasyon gibi hizmetlerin iletimi için birçok boru ve kanala ihtiyaç duyulması, kat kirişlerinde birden

çok boşluk bırakılmasını gerekli kılmaktadır. Bu sebeple, çelik yapılarda kiriş uzunluğu boyunca düzenli birçok boşluğun yer aldığı petek kirişler yaygın olarak kullanılmaktadır. Betonarme ve önerilmeli beton kirişlerde ise düzenli boşluk bırakılması henüz yaygınlık kazanmamış bir tasarım şeklidir.

Kiriş gövdesindeki boşlukların varlığı, betonarme kirişlerin taşıma güçlerini azaltırken, kullanım yükleri altındaki sehim ve deformasyonlarını arttırmaktadır. Şu ana kadar yapılmış olan çalışmalar, boşlukların kirişin dayanım ve rijitliği üzerindeki etkilerini azaltmak için gerekli olan donatıların detayları ve miktarları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kirişlerde kullanılacak olan donatıların, boşlukların çevresindeki gerilme birikmelerinin kiriş üzerindeki olumsuz etkilerini asgari düzeye indirerek, boşluklu kirişlerde oluşacak çatlakları sınırlandırmaları ve boşluklu kirişlerin dayanımlarını ve sehimlerini boşluksuz kiriş mertebesine çekmeleri hedeflenmiştir.

Mansur ve diğ. [1] tarafından yapılan kapsamlı deneyler, bünyesinde büyük bir gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişlerin genellikle Vierendeel panel davranışına bağlı olarak göçtüğünü ve basit bir kiriş eğilme davranışı sergilemediğini göstermiştir. Ayrıca boşluğun uzunluğunun ve yüksekliğinin artırılmasıyla Vierendeel etkisinin arttığı ve göçme yükünün azaldığı görülmüştür. Mansur ve diğ. [2], gövdesinde büyük bir boşluk bulunduran betonarme kirişlerin sehimleri hesaplanırken, kirişin boşluk içeren kısımlarına azaltılmış eşdeğer kayma ve eğilme rijitliklerinin atandığı kiriş modelini benimsemiştir. Tan ve Mansur [3], büyük gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişlerin taşıma gücü ve kullanılabilirlik sınır durumları için tasarım ilkeleri belirlemiştir. Mansur [4], gövde boşluğu içeren betonarme kirişlerin farklı kesme göçme modlarını belirlemiş ve bu kirişlerdeki çatlak genişliklerinin belirlenmesi için eşitlikler geliştirmiştir. Daha sonra Tan ve diğ. [5], deneysel olarak çapraz donatı kullanımının dairesel boşluk içeren betonarme kirişlerin çatlak genişliklerinin sınırlandırılmasında etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Mansur [6], çapraz kesme çatlaklarının kiriş yüksekliği boyunca uzanıp göçmeye neden olduğu göçme moduna kiriş-tipi; deliklerin alt ve üstünde yer alan kirişçiklerde birbirlerinden bağımsız olarak ortaya çıkan diyagonal kesme çatlakları sonucu kirişçiklerden birinin kırılmasıyla meydana gelen göçme moduna da çerçeve-tipi göçme modu adını vermiştir. Amiri ve Masoudnia [7], 150x250 mm kesite ve 2 m serbest açıklığa sahip ve uzunluğu boyunca iki adet gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Bu analizler, dairesel boşluk çapının kiriş yüksekliğinin %48'inden küçük olduğu durumlarda kirişin her kesme açıklığında bir boşluk bırakılmasının kirişin

taşıma gücünü önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir.

Bu çalışmalardan farklı olarak Dündar [8], Aykac ve Yılmaz [9] ve Aykac ve diğ. [10], açıklığı boyunca çok sayıda düzenli dairesel, dikdörtgen ve üçgen boşluğa sahip betonarme kirişlerin davranışlarını detaylı olarak incelemiştir. Bir araştırma projesi kapsamında yapılan bu çalışmalarda, kiriş boyunca sürekli boşluk bırakılmasının boşluk çevresindeki gerilme birikmelerinin kirişin bütününe yayılmasını sağlayacağı düşünülmüştür. Uzunluğu boyunca yalnızca bir veya her kesme açıklığında birer gövde boşluğu bulunduran kirişlerin aksine, düzenli gövde boşluklu kirişlerde eğilme momenti etkisinin baskın olduğu kiriş orta bölgesinde de boşluklar bulunmaktadır. Kesmenin etkin olduğu kirişin kenar bölgelerinin yanı sıra, orta bölgede de boşluk bulunmasının, kirişi gevrek olan kesme davranışından sünek olan eğilme davranışına yaklaştırması hedeflenmiştir. Bu deneysel çalışmalarda, boşlukların alt ve üstlerindeki kirişçiklerde kısa etriyeler, boşluklar arasındaki dikmelerde yatay etriyeler, bir boşluğun alt köşesiyle diğer boşluğun üst köşesi doğrultusunda uzanan sürekli çapraz donatı ve boşlukların hemen sağ ve solunda yer alan tam etriyeler kullanılarak, düzenli boşluklu betonarme kirişlerin Vierendeel panel davranışı yerine daha sünek olan basit eğilme davranışına yönelmeleri amaçlanmıştır. Ayrıca, daire, kare ve üçgen boşluklu kirişler test edilerek, boşluk geometrisinin betonarme kiriş davranışına etkisi incelenmiştir. Özellikle Dündar [8] tarafından yapılan deneyler, çapraz donatı kullanımının veya dikmelerin yatay etriyelerle güçlendirilmesinin düzenli boşluklu betonarme kiriş davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve kirişin süneklik ve enerji sönmüleme kapasitesine çok önemli katkılarda bulunduğunu göstermiştir.

Kiriş gövdesindeki boşluklar, kirişlerin yük taşıma kapasitelerini düşürdüğü gibi sehimlerini ve çatlak genişliklerini de önemli derecede arttırmaktadır. Boşluklu kirişlerin özel donatı detaylandırmalarındaki temel amaçlardan biri de, boşluklar sebebiyle kirişin eğilme ve kayma rijitliklerinde meydana gelen azalmaların kiriş deformasyon ve çatlakları üzerindeki olumsuz etkilerini sınırlandırmaktır. Bugüne kadar, Mansur ve arkadaşları [2, 11] yaptıkları çalışmalarda, gövde boşluklu betonarme kirişlerin sehimlerinin ve çatlak genişliklerinin hesaplanmasında kullanılabilecek analitik eşitlikler geliştirmiş ve bu eşitliklerin uzunluğu boyunca bir veya iki tane boşluk bulunduran betonarme kirişlerin deney sonuçlarıyla uyumlu değerler verdiğini saptamıştır. Mevcut çalışmada, ilk defa düzenli boşluklu betonarme kirişlerin yük-sehim ilişkileri ve kullanım yükleri altındaki sehimleri araştırılmıştır. Dündar [8] tarafından test edilen farklı donatı oranlarına ve detaylarına sahip daire veya kare boşluklu kirişlerin kullanım yükleri altındaki sehimleri ve yük-

deplasman eğrileri, Mansur ve Tan [11] tarafından önerilmiş ve bu çalışmada düzenli boşluk düzenine uygun olacak şekilde geliştirilmiş olan formüllerden elde edilen analitik değerler ve eğrilerle karşılaştırılarak çok önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, düzenli boşluklu betonarme kirişlerin kullanılabilirlik sınır durumlarıyla ilgili tasarım esaslarının geliştirilmesinde önem taşımaktadır.

2. İNCELENEN DENEY ELEMANLARI (ANALYZED TEST SPECIMENS)

Bu çalışmada Dündar [8] tarafından test edilen iki adet boşluksuz referans, dört adet düzenli kare ve dört adet düzenli daire boşluklu betonarme kirişin deney sonuçları kullanılmıştır. 150x400 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli ve 4 m uzunluğunda ve 3,8 m serbest açıklıklı deney kirişlerinde bırakılan boşlukların merkezleri kiriş eksenine çakışmaktadır. Boyuna donatı oranı, çapraz donatı ve dikmelerde etriye kullanımı ile boşluk geometrisi deney parametreleri olarak seçilmiştir. Kirişlerin donatı detayları ve boşluk geometrileri Tablo 1’de verilmektedir. Ayrıca boşluksuz ve boşluklu kirişlerin boyut ve detayları sırasıyla Şekil 1 ve 2’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Deney kirişleri (Test beams)

Kiriş	Boşluk	Boyuna Donatı Oranı	Dikmelerde Etriye	Çapraz Donatı	Beton Grubu
Rbn	Yok	Orta	-	-	2
RBb	Yok	Yüksek	-	-	3
RRxn	Kare	Orta	Yok	Var	1
RRxcn	Kare	Orta	Var	Var	1
RRxb	Kare	Yüksek	Yok	Var	2
RRxcb	Kare	Yüksek	Var	Var	2
RCb	Daire	Yüksek	Yok	Yok	2
RCcb	Daire	Yüksek	Var	Yok	2
RCxb	Daire	Yüksek	Yok	Var	1
RCxcb	Daire	Yüksek	Var	Var	1

Deney elemanlarının adlarındaki ikinci büyük harf, elemanlardaki boşluk tipini göstermektedir. “B” boşluksuz referans kirişi, “R” kare boşluklu kirişi, “C” is daire boşluklu kirişi belirtmektedir.

Deney elemanı adlarındaki “x” harfi çapraz donatıyı, “c” harfi ise dikmelerdeki yatay etriyeleri simgelemektedir. Kirişlerdeki çapraz donatı, ön gerilmeye maruz bırakılmamış 10 mm çaplı kabloların bir boşluğun alt yüzünden diğer boşluğun üst yüzüne doğru uzanacak ve her dikmede iki adet X donatı bulunacak şekilde döşenmesiyle elde edilmiştir. Deney elemanı adlarındaki son harf ise, elemandaki boyuna donatı oranını göstermektedir. Buna göre, “n” harfi normal donatılı, “b” harfi ise çok donatılı kirişleri simgelemektedir. Normal donatılı kirişler, çekme donatı oranı % 0,78; çok donatılı kirişler ise % 1,4 olacak şekilde donatılandırılmıştır.

2.1 Malzeme Özellikleri (Material Properties)

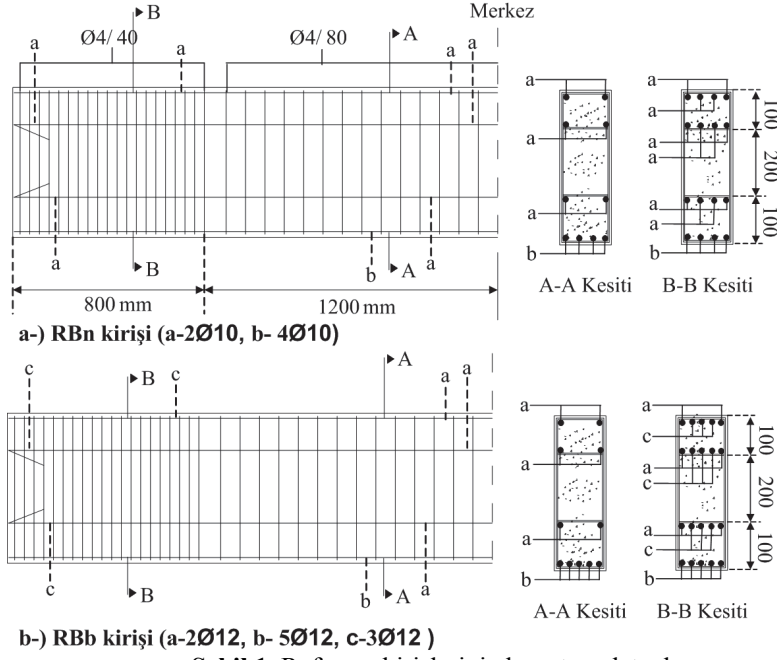
Deney elemanları için üç ayrı beton dökümü yapılmıştır. Her beton dökümü esnasında 150x300 mm’lik standart silindir numuneler alınmıştır. Deney kirişlerinin hangi beton dökümünde hazırlandığı Tablo 1’de verilmektedir. Silindir deneyleri sonucu, 1., 2. ve 3. grup beton karışımlarının standart silindir basınç dayanımlarının ortalama değerleri sırasıyla 26,9; 26,6; ve 32,6 MPa olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarında kullanılan S420 sınıfı Ø10 ve Ø12 nervürlü donatı çubuklarının akma dayanımları sırasıyla 480 ve 550 MPa; çekme dayanımları ise sırasıyla 700 ve 650 MPa olarak ölçülmüştür.

2.2 Deney Düzeni ve Deney Prosedürü (Test Setup and Test Procedure)

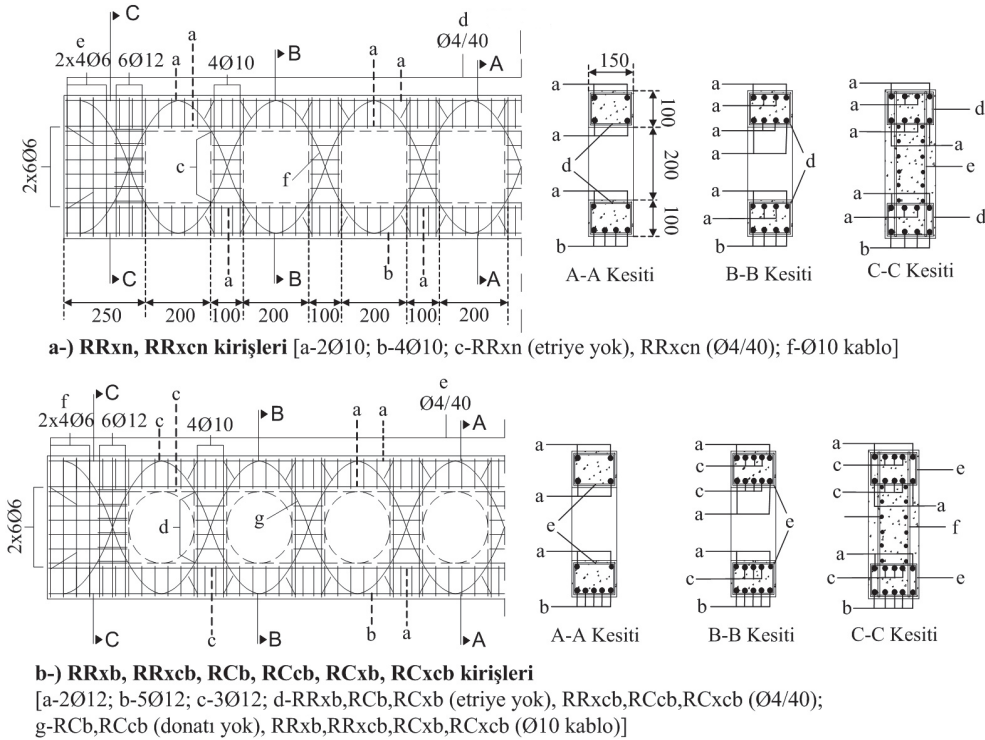
Deneyler, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda 200 kN kapasiteli kapalı bir çerçevede gerçekleştirilmiştir. Kirişlerde yükleme etkisiyle oluşacak moment diyagramını, düzgün yayılı yük etkisi altında oluşacak moment diyagramına benzeştirmek için hidrolik kriko tarafından uygulanan yük, bir ana ve iki yardımcı çelik kiriş aracılığıyla açıklık ortasına 300 ve 1200 mm uzaklıktaki 4 noktaya eşit olarak dağıtılmıştır. Bu sayede, basit mesnetli deney kirişleri altı noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kirişlerin mesnetler arası serbest açıklığı 3800 mm olarak seçilmiştir. Deney elemanlarının açıklık ortasındaki sehimleri, mesnet çökmeleri ve boşlukların çevresindeki kayma deformasyonları, elektronik deplasman ölçerler (LVDT); uygulanan yükün büyüklüğü ise yük hücresi (LC) yardımıyla ölçülmüştür. Kirişler göçmeye ulaşmaya kadar yük uygulanmaya devam etmiş ve deney esnasında kirişlerde oluşan çatlaklar işaretlenip çatlak genişlikleri düzenli olarak ölçülmüştür.

3. ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL STUDY)

Eğilme altındaki boşluksuz betonarme kirişlerde, kesme kuvvetlerinin oluşturduğu kayma gerilmeleri ve bu kayma gerilmelerine bağlı olarak ortaya çıkan sehimler, kesme kuvvetlerinin eğilme etkisiyle ortaya çıkardığı sehimlere göre ihmal edilebilecek derecede küçüktür. Bu sebeple, bu kirişlerde Euler-Bernoulli teorisine uygun olarak, kirişteki sehimleri yalnızca eğilme momentleriyle ilişkilendiren sehim denklemlerinin kullanılması gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Boşluklu betonarme kirişlerde ise boşlukların kirişin kayma rijitliğini azaltması sonucu, kirişteki kesme kuvvetlerinin doğrudan sebep olduğu kayma deformasyonları ve sehimleri de önem kazanmaktadır. Özellikle Vierendeel panel davranışı göstererek göçmeye ulaşan kirişlerde boşluk çevresindeki kesme kuvvetlerinin ortaya çıkardığı sehimler, eğilme deformasyonlarına bağlı olarak ortaya çıkan sehimlere yakın değerlere ulaşmaktadır. Bu bölümde eğilme ve kayma deformasyonlarına



Şekil 1. Referans kirişlerinin boyut ve detayları
(The dimensions and details of the reference beams)



Şekil 2. Boşluklu kirişlerin boyut ve detayları
(The dimensions and details of the beams with openings)

bağlı olarak ortaya çıkan sehimlerin hesabı anlatılacaktır.

3.1 Eğilme Etkisi Sonucu Ortaya Çıkan Sehimlerin Hesabı (Calculation of the Bending Deflections)

Boşluksuz kirişlerin (RBn ve RBb) analitik sehim değerlerini (δ_{an}) elde etmek için moment-alan teoremi kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$\delta_{an} = 1,024 \cdot 10^9 \cdot \frac{P}{E_c \cdot I_{ef}} \quad (1)$$

Burada P kN cinsinden uygulanan yük, E_c MPa cinsinden betonun elastisite modülü ve I_{ef} mm⁴ cinsinden kesitin etkili eylemsizlik momentidir. Kirişlerin I_{ef} değerleri ünlü Branson [12] denklemine göre hesaplanmıştır:

$$I_{ef} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \cdot I_c + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] \cdot I_{cr} \quad (2)$$

Burada M_{cr} eğilmede çatlama momenti, M_{max} elemanda servis yükleri altında oluşan en büyük eğilme momenti, I_c tüm kesit eylemsizlik momenti, I_{cr} tarafsız eksene göre çatlama kesit eylemsizlik momentidir. Bu çalışmada incelenen kirişlerin boyuna donatı oranları yüksek olduğu için, kesitteki boyuna donatılar da eşdeğer beton alanına dönüştürülerek I_c 'ye olan katkıları göz önünde bulundurulmuştur. Bu katkının ihmal edilmesinin sehim değerlerini %10'a varan oranlarda etkilediği görülmüştür. Sehim hesaplarında E_c , aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır:

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Burada f'_c MPa cinsinden betonun standart silindirik eksenel basınç dayanımıdır.

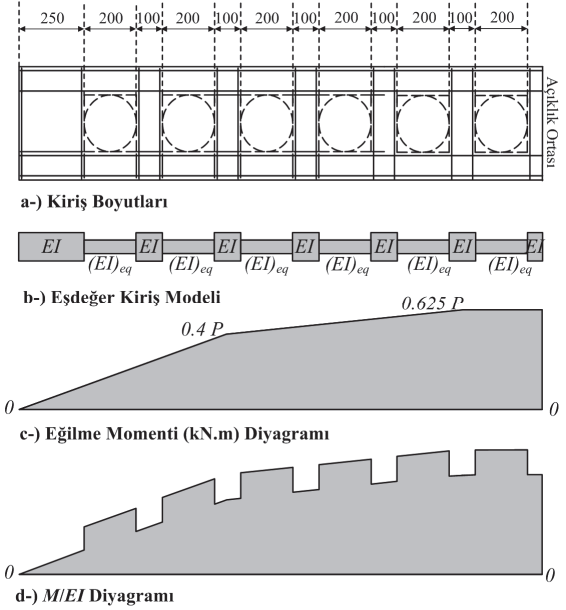
Boşluklu kirişlerde eğilme etkisine bağlı olarak ortaya çıkan sehimler hesaplanırken, Mansur ve Tan [11] tarafından önerilen eşdeğer kiriş modeli kullanılmıştır (Şekil 3). Bu modelde, kirişin boşluk içeren kısımları için boşluk etkisini hesaba katan $(EI)_{eq}$ azaltılmış eğilme rijitliği kullanılmıştır. Kiriş sonuna yakın olan yarısı $P/2$, diğer yarısı ise $P/4$ kesme kuvvetine maruz kalan basit mesnetli deney kirişleri için boşluk etkisini göz önünde bulunduran kiriş modeli oluşturulup, bu modele moment-alan teoreminin uygulanmasıyla, δ_{an} için aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir:

$$\delta_{an} = P \cdot \left(\frac{0,344 \cdot 10^9}{E_c \cdot I_{ef}} + \frac{0,680 \cdot 10^9}{(EI)_{eq}} \right) \quad (4)$$

Bu eşitlik elde edilirken, Şekil 3d'de verilen grafiğin altında kalan alan dikdörtgen ve üçgen parçalara ayrılarak, her parçanın açıklık ortasına göre momenti alınmış ve bu momentlerin toplanmasıyla açıklık ortasındaki sehim değerini veren analitik ifade elde edilmiştir.

3.2 Kesme Etkisine Bağlı Olarak Ortaya Çıkan Sehimler Hesabı (Calculation of the Shear Deflections)

Vierendeel panel davranışında kirişin göçme durumuna ulaşabilmesi için, ikisi üst kirişçikler ve ikisi alt kirişçiklerde olmak üzere toplam dört plastik mafsaldan meydana gelen bir göçme mekanizmasının oluşması gerekmektedir. Mansur ve Tan [11], uzunluğu boyunca bir veya iki gövde boşluğu bulunduran betonarme kirişlerde herhangi bir boşluk çevresindeki kesme kuvvetlerinin etkisiyle ortaya çıkan sehimlerin (δ_v) hesaplanması için aşağıdaki eşitliği geliştirmiştir:



Şekil 3. Boşluklu kirişlerin eşdeğer kiriş modeli ve sehim hesabı (The equivalent beam model for the beams with openings and calculation of deflections)

$$\delta_v = \frac{V \cdot l_e^3}{12 \cdot E_c \cdot (I_t + I_b)} \quad (5)$$

Burada V boşluğa etki eden kesme kuvveti, l_e kirişin boyuna eksenine yönünde plastik mafsallar arasındaki etkili uzaklık, I_t ve I_b sırasıyla üst ve alt kirişçiklerin etkili eylemsizlik momentleridir. Üst kirişçiklerde eğilme çatlakları bulunmaması dolayısıyla I_t boyuna donatı katkısını ihmal eden brüt kesit eylemsizlik momentinden, alt kirişçiklerdeki eğilme çatlakları dolayısıyla da I_b boyuna donatı katkısının da hesaba katıldığı çatlama kesit eylemsizlik momentinden hesaplanmıştır. Bu formülde, mafsallar arasındaki gerçek uzaklık (l_o) yerine mafsallar arasındaki etkili uzaklık (l_e) kullanılarak, kirişçik sonlarındaki çatlama sonucu kirişte meydana gelen ek dönmelerin ortaya çıkardığı sehimler de hesaba katılmıştır. Mansur ve diğ. [2] ve Huang [13] tarafından yapılan deneylerin sonuçlarını kullanarak, Mansur ve Tan [11] l_e için aşağıdaki formülü geliştirmiştir:

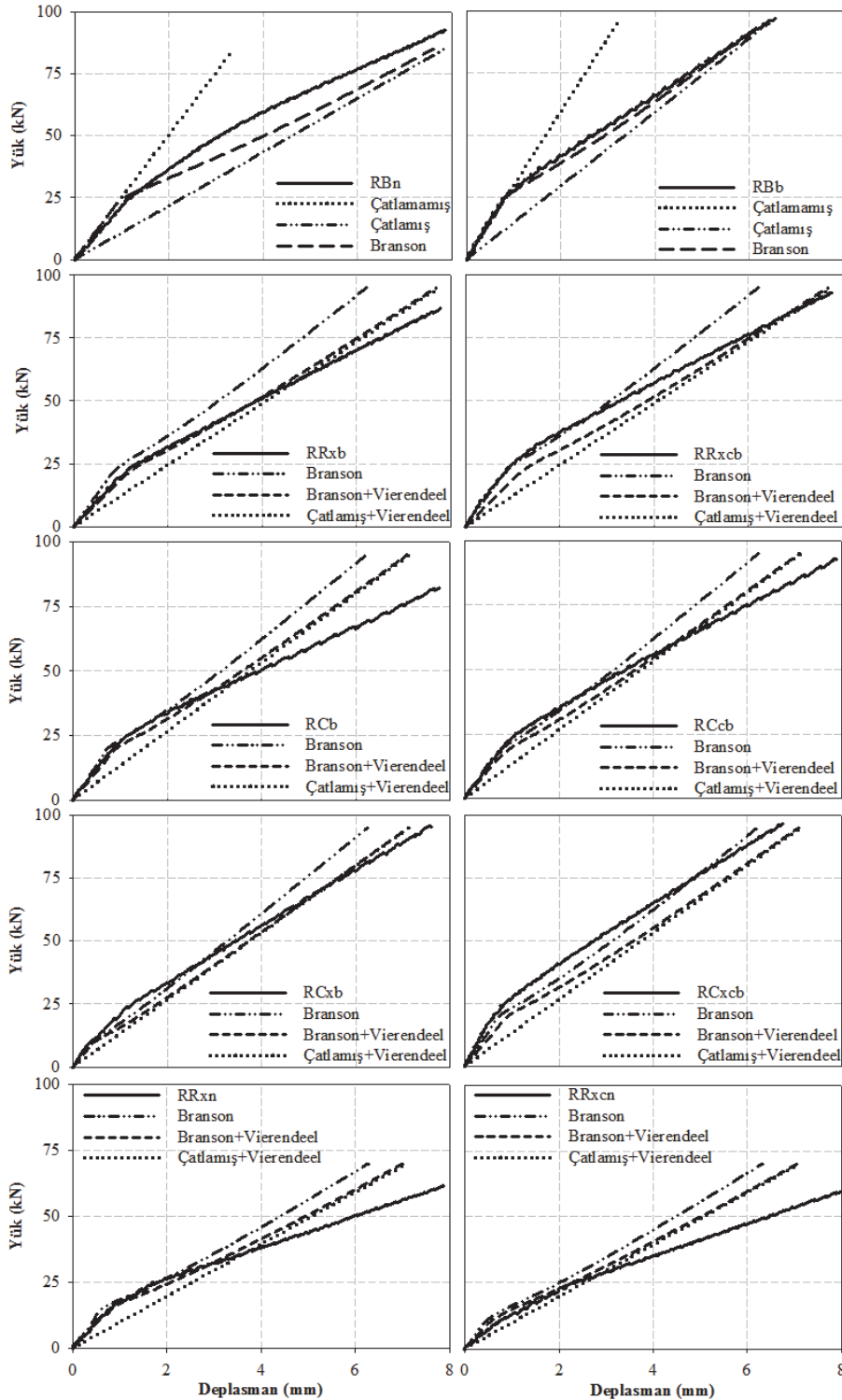
$$l_e = \frac{l_o}{1 - \left(\frac{d_o}{h} \right)^{1.5}} \quad (6)$$

Burada d_o boşluk derinliği, h kiriş yüksekliğidir. Dairesel boşluklu kirişlerde boşluk derinliği l_o boyunca değiştiği için, daireli boşlukla aynı alana sahip ve aynı merkezli bir eşdeğer kare boşluğun yüksekliği, d_o değeri olarak kabul edilmiştir. Dündar [8], RRxn kirişinde plastik göçme mekanizmasının kiriş sonundaki dört boşluk ve bunlar arasındaki dikmeleri içeren; RRxb kirişinde ise kiriş sonundaki beş boşluk ve bunlar arasındaki dikmeleri içeren bölgede oluştuğunu göstermiştir. Bu gözleme

dayanarak, normal donatılı kirişlerde l_o , 1120 mm, çok donatılı kirişlerde ise 1420 mm olarak alınmıştır. Boşluklu deney kirişlerinin yükleme koşulları gereği, her kirişin plastik göçme mekanizmasının kiriş sonuna yakın olan yarısı $P/2$, diğer yarısı ise $P/4$ kesme kuvvetine maruz kalmıştır. Bu sebeple, deney kirişlerinin δ_v değerleri aşağıdaki eşitlikten elde edilmiştir:

$$\delta_v = \frac{\frac{P}{2} \cdot \left(\frac{l_e}{2}\right)^3 + \frac{P}{4} \cdot \left(\frac{l_e}{2}\right)^3}{12 \cdot E_c \cdot (I_t + I_b)} \quad (7)$$

Daha önce de belirtildiği gibi, hesaplarda üst kirişçiğin çatlamamış olduğu kabul edilerek, I_t çatlamamış kesit eylemsizlik momenti, alt kirişçiğin de çatlamış olduğu kabulüne dayanarak, I_b çatlamış kesit eylemsizlik momenti olarak düşünülmüştür.



Şekil 4. Deney kirişlerinin yük-sehim eğrileri (The load-deflection graphs of the test beams)

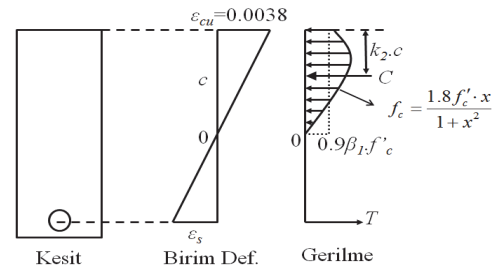
4. ANALİTİK VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF THE ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Dünder [8] tarafından test edilen boşluksuz referans kirişlerin deneysel yük-sehim eğrileri, denklem (2)'den hesaplanan etkili eylemsizlik momenti değerlerinin denklem (1)'de kullanılmasıyla elde edilmiş analitik yük-sehim eğrileriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4). Etkili eylemsizlik momenti değerleri, Branson [12] tarafından geliştirilmiş olan denklem (2)'den elde edildiği için bu analitik eğriler Branson eğrisi olarak adlandırılmıştır. Bu grafikler incelendiğinde, Branson formülü kullanılarak hesaplanan analitik sehim değerlerinin, deneysel değerlerle son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle donatı oranı yüksek olan RBb kirişinde deneysel eğri analitik eğriyle daha yakın bir uyum içerisindedir. Donatı oranı daha düşük olan RBn kirişinde analitik eğri deneysel eğriyle daha az bir uyum gösterse de, aynı yük değeri için hesaplanan değer deneysel değerden düşük olması, hesaplanan değerlerin güvenli tarafta kalmasını sağlamaktadır.

Düzenli boşluklu kirişlerin deneysel yük-sehim eğrileri, kirişte yalnızca eğilme etkisiyle ortaya çıkan sehimlere göre çizilmiş Branson eğrisi ile kirişin Vierendeel panel davranışı göstereceği esasına uygun olarak, eğilme sehim değerlerine Vierendeel kayma deformasyonları sonucu ortaya çıkan sehim değerlerinin eklenmesiyle elde edilmiş Vierendeel+Branson eğrileriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4). Boşluklu deney kirişlerinin eğilme sehimleri ve boşluk etkisiyle ortaya çıkan ilave kayma sehimleri, sırasıyla denklem (4) ve denklem (7)'den hesaplanmıştır. Bu grafikler incelendiğinde, nihai göçme modu Vierendeel olan RRxn ve RRxb kirişlerinin deneysel yük-sehim eğrilerinin başlangıç kısımlarının Vierendeel+Branson eğrisiyle; nihai göçme modu eğilme olan RRxcn, RRxcb, RCb, RCcb, RCxb, RCxcb kirişlerinin de başlangıç kısımlarının Branson eğrisiyle yakın bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Nihai göçme modu eğilme olan deney kirişlerinin başlangıç kısımlarının Vierendeel+Branson eğrisine göre daha dik olması, bu kirişlerin yüklemenin ilk safhalarında etkisi sonucu ortaya çıkan kayma deformasyonlarına uğramadığını ve daha rijit davrandığını göstermektedir. Buna göre, Vierendeel modu sonucu göçmeye ulaşan boşluklu betonarme kirişler, yüklemenin başlamasıyla Vierendeel kayma deformasyonlarına uğramakta ve bu deformasyonlar yüklenme boyunca artarak devam etmektedir. Yüklemenin ilerleyen aşamalarında betonun elastik davranışının yitirilmesi ve donatı akmaları sonucu bütün deney kirişlerinin sehim değerleri kayma ve eğilme sehimlerinin toplamını aşmaktadır.

Betonarme yapıların kullanılabilirlik durumları göz önünde bulundurularak, kirişlerin kullanım yükleri altındaki sehimlerinin sınırlandırılması gereklidir.

Tablo 2'de deney kirişlerinin eğilme yükleri (P_{uf}), kullanım yükleri (P_{sr}), kullanım yükleri altında yalnızca eğilme etkisi düşünülerek hesaplanan sehimleri (δ_{an}) ve bu yükler altında hem eğilme hem de kayma etkisi düşünülerek hesaplanan toplam sehimleri (δ_t) verilmektedir. Bu tabloda ayrıca, deney kirişlerinin servis yükü seviyesindeki deneysel sehim değerleri (δ_{exp}) ile nihai göçme modları da gösterilmektedir. Kirişleri eğilme momenti kapasitesine ulaştıracak olan yük değerleri (P_{uf}) ve kirişlerin kullanım yükleri (P_{sr}) hesaplanırken, Todeschini ve diğ. [14] tarafından geliştirilen beton gerilme-birim deformasyon modeli (Şekil 5) kullanılmıştır. Kirişlerin kullanım yükleri, kirişlerde karakteristik yük birleşimleri altında oluşabilecek en büyük basınç gerilmesinin, sünme deformasyonlarını ihmal ederek betonun karakteristik dayanımının %60 ile sınırlandırılması yoluyla hesaplanmıştır. Hesaplarda kirişlerdeki ani sehimlerin hesaplanmasından dolayı sünme etkisi dikkate alınmamıştır. Kayma deformasyonları ihmal edilerek hesaplanan sehimlerin deneysel değerlere oranları (δ_{an}/δ_{exp}) ile kayma deformasyonlarının da sehimlere katıldığı değerlerin deneysel değerlere oranları (δ_t/δ_{exp}) karşılaştırıldığında, kirişin göçme moduna (Vierendeel, eğilme, kesme) bağlı olmaksızın boşluklu kirişlerin deneysel sehim değerlerinin Vierendeel göçme moduna göre hesaplanan değerlerle daha uyumlu olduğu görülmektedir. Boşluklu deney kirişlerinin δ_{an}/δ_{exp} ve δ_t/δ_{exp} oranlarının ortalama değerleri, sırasıyla 0,73 ve 0,85 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, boşluklu kirişlerde boşluk çevresindeki kayma deformasyonlarının etkisiyle ortaya çıkan ilave sehimlerin servis yükü seviyesinde ihmal edilemeyecek seviyelere ulaştığını göstermektedir. Eğilme göçmesine uğrayan boşluklu kirişlerde dahi bu kayma deformasyonlarının ihmal edilmemesi gerektiği, kullanım yükü sehimlerinin kayma sehimleri ile eğilme sehimleri toplanarak elde edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Tablo 2'de verilen değerler incelendiğinde, eğilme göçmesine uğrayan kirişlerde δ_t ile δ_{exp} arasındaki farkın küçük olduğu (%10 ve altında), ancak Vierendeel göçmesine uğrayan kirişlerde bu farkın önemli değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu sebeple, Vierendeel göçmesinin beklediği durumlarda hesaplanan analitik değerlerin en az %30 seviyesinde artırılması uygun olacaktır.



$$\varepsilon_o = \frac{1.71 \cdot f'_c}{E_c}; x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}; \beta_1 = \frac{\ln[1+x^2]}{x}; k_2 = 1 - \frac{2[x - \arctan x]}{x^2 \cdot \beta_1}$$

Şekil 5. Todeschini ve diğ. [19] gerilme-birim deformasyon modeli (The stress-strain model of Todeschini et al. [19])

Tablo 2. Kirişlerin eğilme kapasiteleri, kullanım yükleri ve bu yükler altındaki sehimleri (Bending capacities, service loads and deflections under service loads of the beams)

R ef	Kiriş	Kırılma Şekli	P_{uf} (kN)	P_{sr} (kN)	δ_{exp} (mm)	δ_{an} (mm) Denk. 4	δ_{an} / δ_{exp}	δ_t (mm) Denk. 4 + Denk. 7	δ_t / δ_{exp}
	RBn	Eğilme	196	83	6,75	7,62	1,13	-	-
	RBb	Eğilme	320	135	9,61	9,05	0,94	-	-
Delikli Kiriş	RRxn	Vierendeel	196	87	12,00	7,67	0,63	8,58	0,70
	RRxcn	Eğilme	196	87	12,25	7,69	0,63	8,60	0,70
	RRxb	Vierendeel	315	101	9,40	6,55	0,70	8,11	0,86
	RRxcb	Kesme	315	101	8,63	6,55	0,76	8,11	0,94
	RCb	Kesme	315	101	9,71	6,56	0,68	7,48	0,77
	RCcb	Eğilme	315	101	8,69	6,57	0,76	7,49	0,86
	RCxb	Eğilme	316	106	8,58	6,92	0,81	7,89	0,92
	RCxcb	Eğilme	316	106	7,62	6,89	0,90	7,85	1,03
	Ort.						0,73		0,85
	% D.K						13		14

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Dündar [8] tarafından test edilen ikisi boşluksuz referans ve diğerleri düzenli boşluklu olmak üzere, toplam 10 adet betonarme kirişin deneysel sehim değerleri ve yük-sehim eğrileri; eğilme ve boşluk çevresindeki kayma etkilerini hesaba katan denklemlerden elde edilen analitik değerlerle karşılaştırılmıştır. Deney kirişlerinde boşluk geometrisinin, boyuna donatı oranının ve boşluk çevresindeki kayma deformasyonlarına karşı alınan ek önlemlerin değişken olması, bu çalışmada elde edilen sonuçların farklı donatı düzenlerine ve boşluk geometrilerine sahip kirişler için geçerli olmasını sağlamaktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Nihai göçme modu eğilme olan boşluklu betonarme kirişlerin yük-sehim eğrilerinin başlangıç kısımları sadece eğilme etkisi düşünülerek hesaplanmış analitik eğrilerle yakın uyum içindedir. Bu durum eğilme göçmesine uğrayan boşluklu betonarme kirişlerde Vierendeel etkisi olarak isimlendirilen kayma etkisinin düşük yük seviyelerinde etkin olmadığını göstermektedir.
2. Nihai göçme modu Vierendeel olan boşluklu betonarme kirişlerin yük-sehim eğrilerinin başlangıç kısımları ise kayma deformasyonları sonucu ortaya çıkan ilave sehimlerin eğilme sehimlerine eklenmesiyle hesaplanan analitik eğrilerle daha yakın bir uyum içindedir. Bu sebeple, panel davranışı gösteren boşluklu betonarme kirişlerde boşluk çevresi kayma deformasyonlarının etkisi yüklemeye boyunca ihmal edilemeyecek düzeydedir.
3. Boşluklu betonarme kirişlerin göçme moduna bağlı olmaksızın, bu kirişler servis yükleri seviyesine ulaştığında boşluk çevresindeki kayma deformasyonlarının etkisi önemli seviyelere ulaşmaktadır. Bu sebeple, bütün boşluklu kirişlerin kullanım yükleri altındaki sehim değerleri kayma ve eğilme sehimlerinin toplanmasıyla elde edilmelidir.

4. Vierendeel panel davranışı sonucu göçmeye ulaşan kirişlerde kayma ve eğilme sehimlerinin toplanmasıyla elde edilen sehim değerleri, deneysel sehimlerin altında kalmaktadır. Bu sebeple, nihai göçme modunun Vierendeel olması beklenen kirişlerin kullanım yükü sehimleri hesaplanırken, elde edilen toplam sehimlerin %30 düzeyinde artırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada ulaşılan sonuçlar, Dündar [8] tarafından test edilmiş düzenli dairesel veya dikdörtgen boşluklu betonarme kirişlerin deney sonuçlarına dayalı olarak elde edilmiştir. Test edilen bu kirişlerin tümünde, alt ve üst kirişçiklerde kısa etriyeler ve boşlukların hemen sağında ve solunda kirişin derinliği boyunca uzanan tam etriyeler yer almaktadır. Bu çalışmada elde edilen analitik eşitliklerin diğer boşluk ve donatı detaylarına sahip kirişler için de araştırılması amacıyla gelecekte bu konuda farklı çalışmalar yapılması yararlı olacaktır.

6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu makalede önerilmiş olan analitik formüller, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılmış olan deneylerin sonuçları esas alınarak geliştirilmiştir. Bu deneylerin gerçekleştirilmesinde büyük emeği geçen ve sonuçların bu çalışmada kullanılmasına izin veren öğretim üyesi Dr. Sabahattin Aykaç'a teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

1. Mansur, M.A., Lee, Y.F., Tan, K.H. ve Lee, S. L., "Tests on RC Continuous Beams with Openings", **ASCE, Journal of Structural Engineering**, Cilt 117, No 6, 1593-606, 1991.
2. Mansur, M.A., Huang, L.M., Tan, K.H. ve Lee, S.L., "Deflections of Reinforced Concrete Beams with Web Openings", **ACI Structural Journal**, Cilt89, No4,391-7, 1992.

3. Tan, K.H. ve Mansur, M.A., “Design Procedure for Reinforced Concrete Beams with Large Web Openings”, **ACI Structural Journal**, Cilt 93, No 4, 404-411, 1996.
4. Mansur, M.A., “Effect of Openings on the Behaviour and Strength of R/C Beams in Shear”, **Cement and Concrete Composites**, Cilt 20, No. 6, 477-486, 1998.
5. Tan, K.H., Mansur, M.A. ve Wei, W., “Design of Reinforced Concrete Beams with Circular Openings”, **ACI Structural Journal**, Cilt 98, No. 3, 407-415, 2001.
6. Mansur, M.A., “Design of Reinforced Concrete Beams with Small Openings under Combined Loading”, **ACI Structural Journal**, Cilt 96, No. 5, 675-681, 1999.
7. Amiri, S. ve Masoudnia, R., “Investigation of the Opening Effects on the Behavior of Concrete Beams Without Additional Reinforcement in Opening Region Using Fem Method”, **Australian Journal of Basic and Applied Sci.**, Cilt 5, No. 5, 617-627, 2011.
8. Dundar, B., **Düzenli Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
9. Aykac, S. and Yilmaz, M.C., “Behavior and Strength of RC Beams with Regular Triangular or Circular Web Openings”, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Vol. 26, No. 3, 711-718, 2011.
10. Aykac, B., Kalkan, I., Aykac, S. ve Egriboz, Y.E., “Flexural Behavior of RC Beams with Regular Square or Circular Web Openings”, **Engineering Structures**, Cilt 56, 2165-2174, 2013.
11. Mansur, M.A. ve Tan, K.H., **Concrete Beams with Openings: Analysis and Design**, CRC Press, Boca Raton, Florida, A.B.D., 1999.
12. Branson, D.E., **Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams**, HPR Report 7-1, Alabama Highway Department, Bureau of Public Roads, Alabama, A.B.D., 1965.
13. Huang, L.M., **Concrete Beams with Small Openings under Bending and Shear**, MEng Thesis, National Univer. of Singapore, 1989.
14. Todeschini, C.E., Bianchini, A.C. ve Kesler, C.E., “Behavior of Concrete Columns Reinforced with High Strength Steels”, **ACI Journal Proceedings**, Cilt 61, No. 6, 704-716, 1964.