

## BETONARME YÜKSEK KİRİŞLERDE BOŞLUK KONUMU VE ŞEKLİNİN YAPISAL DAVRANIŞ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

*Fatih Mehmet ÖZKAL\**

Alınma: 28.11.2016; düzeltme: 18.07.2017; kabul: 31.07.2017

**Öz:** Yükseklik ve açıklık değerlerinin birbirine nispeten yakın olduğu yüksek kirişler, yapısal kararlılığa katkı vermesi amacıyla gün geçtikçe betonarme yapılarda daha çok kullanılır hale gelmiştir. Bununla birlikte, söz konusu yapılardaki elektrik, haberleşme, su, kanalizasyon, ısıtma ve havalandırma tesisatlarının kurulumu için kiriş gövdelerinde boşluk bırakma ihtiyacı doğmaktadır. Yüksek kirişlerde eğilme etkisine kıyasla kesme etkisinin daha belirgin olmasına ilaveten boşluklar sebebiyle yapısal davranışta daha önemli değişimler görülmekte, gerilme ve şekil değiştirmelerin hesabında doğrusal yaklaşımlar geçerliliğini yitirmektedir. Bu çalışmada, muhtelif konumlardaki ve şekillerdeki boşluklarla tasarlanan 9 ayrı betonarme yüksek kirişin tekdüze yükleme altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Gövde boşluklarının göçme tipine, azami taşıma gücüne, yapısal süneklik ve rijitlik değerlerine olan etkileri deneyler sonucunda belirlenerek birbirleriyle mukayesesi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme yapılar, Yüksek kirişler, Gövde boşlukları, Kesme davranışı

### Experimental research on the structural behavior effects of web-opening position and shape in RC deep beams

**Abstract:** Deep beams, in which depth and span values are close to each other, have recently been used more in reinforced concrete structures for the purpose of assuring structural stability. Additionally, it is a necessity to leave spaces on the web of deep beams for the installation of electrical, communication, water, sewage, heating and conditioning facilities. Shear effects are already more dominant than flexural effects in deep beams, however, web-openings cause significant changes regarding structural behavior and linear approaches are not applicable for the analysis of stress and strain. In this study, structural behavior of 9 reinforced concrete (RC) deep beams, which have web-openings with various position and shapes, were experimentally investigated under monolithic loading. Effects of web-openings on the failure mechanism, ultimate bearing load, structural ductility and rigidity were examined and compared throughout test results.

**Keywords:** Reinforced concrete structures, Deep beams, Web-openings, Shear behavior

## 1. GİRİŞ

Yüksek kirişlerin tanımlanması için bilimsel literatürde ve muhtelif ülkelerin yapı yönetmeliklerinde bulunan ifadeler dikkate alındığında, net açıklık ile kesit yüksekliğinin birbirine oranının 2'nin altında kalması halinde bu eğilme elemanları yüksek kiriş olarak tasarlanmaktadır. Ekseriyetle sanayi yapılarında karşılaşılan yüksek kirişler; kıyı yapıları, kazık başlıkları, yüksek binalardaki bölmeler, geniş alanlara sahip salonlar, ambar ve silolar gibi yapılarda da mühendislik ihtiyaçları doğrultusunda tercih edilmektedirler. Bazı yapılarda

\* Erzincan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 24060, Erzincan  
İletişim Yazarı: Fatih Mehmet Özkal (fmozkal@erzincan.edu.tr)

üzerlerindeki kolon yüklerini dağıtarak temele aktarmak için teşkil edilirken (havalandırma-soğutma suyu istasyonları, vs.), bazı yapılarda ise üzerlerindeki çatı yüklerini ve kendi ağırlıklarını kolonlara paylaşırması amacıyla (ambarlar, silolar, vs.) tasarlanmakta olup (Sharp, 1977) yıllar geçtikçe yapı mühendisliğindeki kullanım alanı genişlemektedir. Betonarme yüksek kirişler için mihenk taşı niteliğinde sayılabilecek Prentzas (1968) tarafından gerçekleştirilen geniş ölçekli deneysel çalışmada dairesel, kare, paralel kenar, üçgen, ikizkenar yamuk ve hatta düzensiz boşluklar ele alınmıştır. Konuya dair ilginin literatürdeki başlangıç ve gelişimi için örnek gösterilebilecek bazı çalışmalar ise Mansur ve Tan'ın (1999) araştırmasında şöyle özetlenmiştir; Savin (1951), Heller (1953), Bower (1966a, 1966b), Nasser ve diğ. (1967), Somes ve Corley (1974), Mansur ve Hasnat (1979), Mansur ve diğ. (1985).

Basit eğilme durumundaki temel kuramlar, doğrusal elastik yaklaşım altında bile yüksek kirişler için geçerliliğini yitirmektedir. Zira yüksek kirişler, düzlem içi yüklenen düşey bir levha gibi davranmaktadır. Kiriş yüksekliği yönünde ortaya çıkan gerilme ve şekil değiştirme dağılımı artık düz bir çizgi olmayıp; bu dağılımın şekli, kirişin açıklık/yükseklik oranına bağlı olarak değişebilmektedir. Dolayısıyla yüksek kirişlerin çözümlemesinde iki boyutlu bir düzlem gerilme problemi olarak ele alınmalı ve gerçeği temsil edebilecek sonuçlar için buna uygun yöntemler kullanılmalıdır (Kong, 2002). Kiriş narinliği azaldıkça gerilme dağılımı doğrusallıktan uzaklaşmakta ve iç kuvvetler manivela kolu küçülmektedir (Aksu, 1993). Kiriş yüksekliğinin büyük değerlerde olması sebebiyle ortaya çıkan kemerlenme etkisi, yüksek kirişlerdeki çekme donatısı miktarının düşük değerlerde kalmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla çok ayrıntılı bir donatı hesabı yerine bu elemanlarda kuramsal çalışmalara ilaveten deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara da dayanan yaklaşık çözüm yöntemleri tercih edilmektedir (Celep ve Kumbasar, 2005). Genelde tercih edilen boyutlara sahip betonarme kirişlerin aksine yüksek kirişlerde gerilme ve şekil değiştirmeler yönünden doğrusal olmayan davranış görülürken; buna ilaveten yanal burkulmaya ve çekme donatısı için önemli kenetlenme gereksinimlerine karşı da önlem alınması ihtiyacı doğmaktadır.

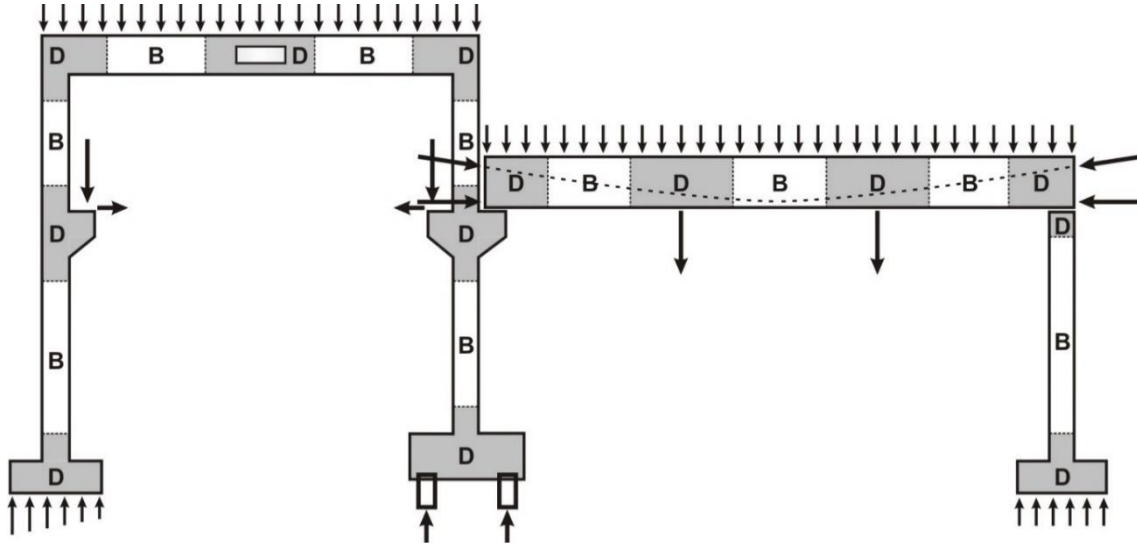
Mevcut çalışmalar dâhilinde gerçekleştirilen deneylerde, yüksek kirişlerin boyutlandırma ve donatı hesabında dikkate alınması gereken üç çeşit göçme durumu tespit edilmiştir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

- Yatay ve düşey yöndeki gövde donatılarının sınır durumlara ulaşması halinde kesme kuvvetinin etkisiyle asal çekme gerilmelerinden oluşan eğik çatlaklar göçmeye sebep olabilir.
- Asal basınç gerilmeleri doğrultusunda betonun ezilmesiyle kiriş taşıma kapasitesini kaybedebilir.
- Yeterince donatı kullanılmaması halinde mesnet bölgesinde kenetlenmenin yok olması ve mesnet ezilmesi gibi durumlarla da karşılaşılabilir.

Yüksek kirişlerde yük ve mesnet noktaları arasında hayali olarak tanımlanan basınç çubukları aracılığıyla yükün taşındığı kabul edilmektedir. Uzun yıllar boyunca normal kirişlerdeki gibi tasarlanırsa da; deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda kesme dayanımı ve hasar öncesinde iç kuvvetlerin dağılımı yönünden çok farklı bir şekilde ele alınması gerektiği ortaya konmuştur (Yang ve diğ., 2006). Literatürde yüksek kirişler üzerine gerçekleştirilen daha kapsamlı ve çok sayıda araştırma bulunsa da, gövde boşluklarının kesme dayanımını çok büyük miktarda etkilemesine rağmen boşluklu yüksek kirişler nispeten daha az yer kaplamaktadır (Hu ve Tan, 2007). Zira elektrik, haberleşme, su, kanalizasyon, ısıtma ve havalandırma tesisatlarının tavandan geçirilişi sırasında kiriş gövdelerinde boşluk bırakılması ihtiyacı, yapı mühendislerinin sık karşılaştığı sorunlardandır. Yapı bütünlüğü bozulmadan kiriş gövdesinde boşluklar bırakılarak bu tür tesisatın kurulumu ile kullanılabilir kat yüksekliğinden azami şekilde faydalanılması, ayrıca kiriş etrafında dolaştırılmasının getireceği maliyet artışı ve akışkan borularındaki yersel yük kayıplarının önlenmesi amaçlanmaktadır (Elçi, 2005).

Kiriş gövdesindeki bu boşluklar yapısal tasarım esnasında belirlenip beton dökümü esnasında teşkil edilebildiği gibi, kiriş yan yüzünün sonradan geliştiği güzel kırılarak delik oluşturulduğu da sıklıkla görülmektedir. İkinci uygulamanın son derece sakıncalı olacağı ve kabul edilemez olduğu bilinen bir gerçektir (Aykaç ve Yılmaz, 2011). Betonarme kiriş gövdelerinde bırakılan boşluklar, kolay imalat maksadıyla genelde dörtgen veya daire şeklinde olmaktadır. Daire şekilli gövde boşluklarında dörtgen şekilli boşluklara nazaran gerilme yığılmaları düşük seviyede kaldığından daha çok tercih edilmektedirler. Bu boşlukların boyut, konum ve şekillerine bağlı olarak kirişlerin yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde değişmektedir (Elçi ve Saylan, 1999). Bu boşluklar, kirişlerin yük taşıma kapasitelerini düşürmekle birlikte kullanım yükleri altında ortaya çıkan sehim değerlerini ve çatlak genişliklerini de önemli derecede artırmaktadır. Boşluklu betonarme kirişlerin göçme türüne bağlı olmaksızın, servis yükleri seviyesine ulaştığında boşluk çevresindeki kayma gerilmelerine bağlı şekil değiştirmelerin etkisi dikkate değer seviyelere ulaşmaktadır (Kalkan, 2014).

Betonarme bir yapıda Bernoulli ve Navier varsayımının geçerli olduğu yani gerilmelerin eleman kesiti boyunca düzgün yayılı şekilde dağıldığı B-bölgeleri neredeyse kesin bir doğrulukta tasarlanabilmektedir (Özkal, 2012). Zira kesit zorlarından (eğilme ve burulma momentleri ile aksenal ve kesme kuvvetleri) faydalanılarak başlangıçtaki gerilme durumu kolayca belirlenebilmektedir (Schlaich ve diğ., 1987). Ancak kesit boyutlarındaki ani değişiklikler, tekil yüklemeler veya mesnet tepkileri sonucu, bu bölgelerdeki iç kuvvetler akımındaki karışıklık nedeniyle süreksizlik durumları görülmektedir (Cook ve Mitchell, 1988). D-bölgeleri olarak isimlendirilen bu bölgelerdeki şekil değiştirme dağılımı belirgin bir şekilde doğrusallığını yitirdiği için boşluklu yüksek kirişlerde donatı hesabı yapılırken boşluk kenarlarındaki gerilme dağılımı özellikle göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 1’de muhtelif yüklemeler ve mesnet şartlarının bulunduğu iki açıklıklı bir çerçevedeki B- ve D-bölgeleri görülmektedir.



**Şekil 1:**  
*İki açıklıklı bir çerçevedeki B- ve D-bölgeleri*

Betonarme yüksek kirişlerdeki esas donatı, eğilme etkileri altında çekme donatısı olarak çalıştığı gibi ayrıca kirişin kesme dayanımına da katkı sağlamaktadır. Gövde donatıları ise sehim ve çatlak genişliğini kısıtlama yönünde çalışmaktadır. Gövde donatısı olarak kırılma düzlemine (kritik kesme çatlağı) dik şekilde yerleştirilen çapraz donatı, donatı kaymasına karşı en etkili çözümü sunmaktadır. Uygulanabilirliği kolay ve davranışı etkili olan diğer gövde donatısı türü ise yatay ve düşey donatıların birlikte kullanılmasıdır. Hangi tür kullanılırsa

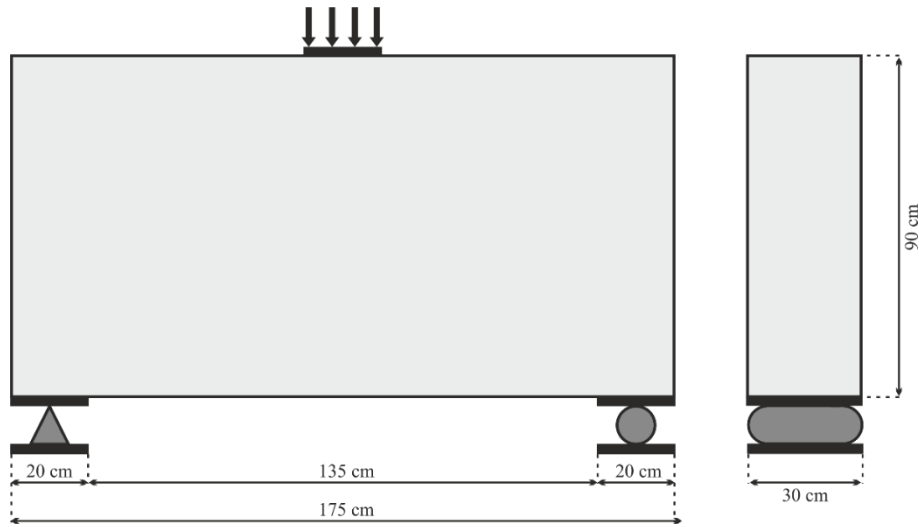
kullanılsın, gövde donatısı sayesinde ani bir göçme yerine daha yavaş şekilde gerçekleşen bir göçme durumu elde edilmektedir (Kong, 2002). Boşluklu yüksek kiriş tasarımında da çapraz şekilde yerleştirilen gövde donatısı sayesinde hem kiriş taşıma kapasitesi artırılmakta hem de göçme durumu sünekleşmektedir. Boşluklu yüksek kirişlerin maruz kaldığı yüklemeye altındaki davranışını etkileyen yapısal özellikleri aşağıdaki maddeler halinde özetlenebilir.

- Net açıklığın kiriş yüksekliğine oranı;
- Kesme açıklığının kiriş yüksekliğine oranı;
- Gövde boşluklarının boyut, konum ve şekli;
- Yükleme tipi ve konumu;
- Kiriş kesitinin şekli;
- Beton ve donatının malzeme özellikleri;
- Çekme donatısının miktar ve konumu;
- Gövde donatısının miktar ve konumu.

Günümüze dek boşluklu yüksek kirişler üzerine geneli kuramsal olmak üzere birçok çalışma gerçekleştirilmiş olmakla birlikte deney elemanı çeşidi olarak daha kapsamlı bir deneysel çalışmanın literatüre katkı sunacağı düşünülmüştür. Bu fikirden hareketle, muhtelif konumlardaki ve şekillerdeki boşluklarla tasarlanan 9 ayrı betonarme yüksek kirişin tekdüze yüklemeye altındaki davranışları deneysel incelemeye tabi tutulmuştur. Gövde boşluklarının göçme tipine, azami taşıma gücüne, yapısal süneklik ve rijitlik değerlerine olan etkileri deneyler sonucunda belirlenerek birbirleriyle mukayesesi gerçekleştirilmiştir.

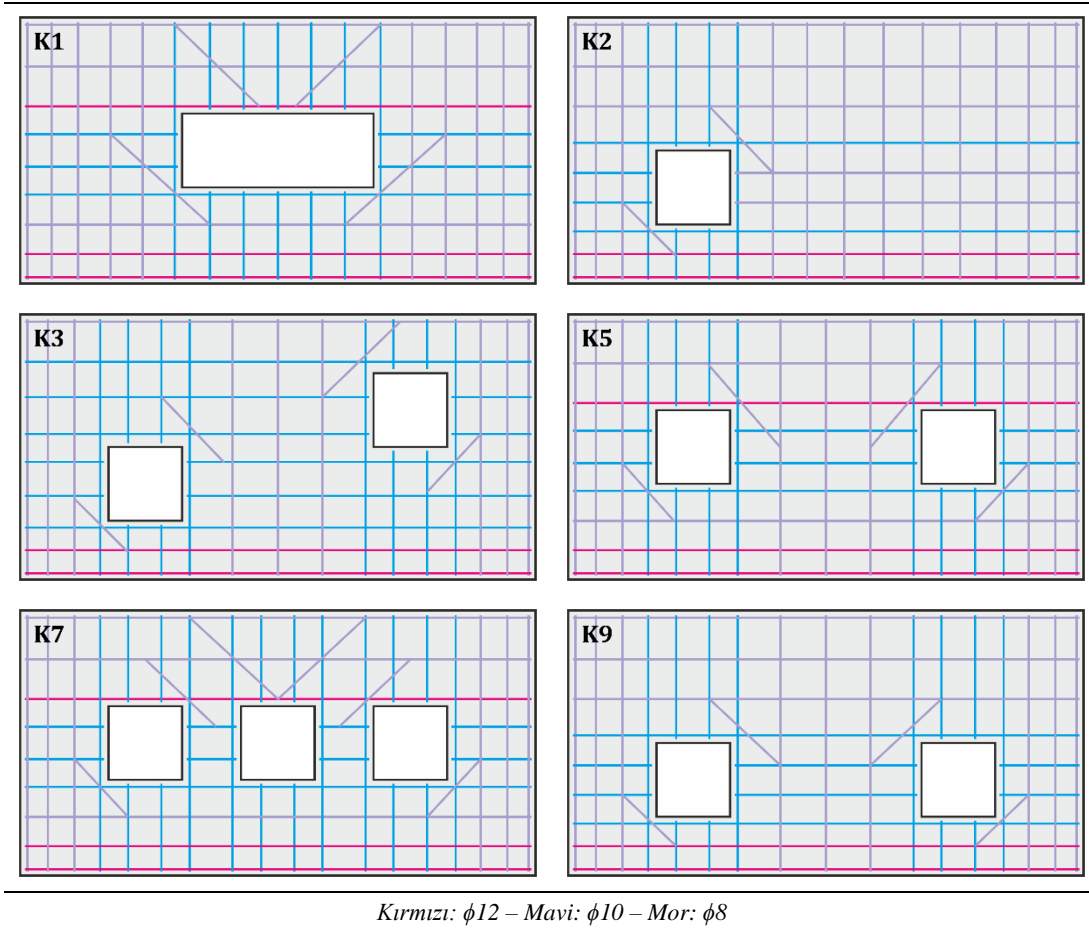
## 2. DENEY ELEMANLARININ TASARIMI

Bu çalışma kapsamındaki yüksek kirişler; 175 cm açıklık, 90 cm yükseklik ve 30 cm kesit genişliğindeki boyutlarda oluşturulmuştur. Şekil 2’de de görüleceği üzere basit kiriş şeklinde mesnet şartları teşkil edilmiş ve üst orta noktadan tekdüze artırımlı bir yüklemeye karşı gösterecekleri yapısal davranış incelenmiştir. Dikdörtgen (650x250 mm), kare (250x250 mm) ve daire (çap=250 mm) olmak üzere muhtelif şekillerde belirlenen gövde boşlukları yine muhtelif sayı ve konumda teşkil edilmiştir. Deney elemanlarındaki boşlukların geometrileri, yerleri ve sayıları belirlenirken konuya yakın çalışmalardan faydalanılmış, ayrıca çeşitli tesisat kurulumlarına uygun olacak şekilde boyutlar tercih edilmiştir. Deney elemanlarının teşkilinde kullanılan betonun 28 günlük basınç dayanımı 25 MPa (C20/25) olup çelik donatı ise S420 sınıfındadır.



**Şekil 2:**  
Deney elemanlarının boyutları ve sınır koşulları

Donatı yerleşimi için ise TS 500 (2000) dâhilindeki yüksek kiriş hesabında kullanılabilir yönergeler takip edilmiştir. Kirişlerin 600 kN taşıma kapasitesine sahip olacağı şekilde 2 $\phi$ 12 çekme donatısı ve  $\phi$ 8/150 mm gövde donatısı, mesnet ezilmesine karşı da  $\phi$ 8/175 mm olacak şekilde bir şablon belirlenerek sadece boşluk civarları için değişiklikler uygulanmıştır. Bu uygulamada boşluk civarlarındaki yatay ve düşey gövde donatıları  $\phi$ 10 veya  $\phi$ 12 ile değiştirilmek suretiyle, mümkün olduğunca ani bir kırılma gerçekleşmesi engellenerek kiriş gövdesindeki çatlak gelişiminin daha detaylı takip edilebilmesi hedeflenmiştir. Zira boşluklu betonarme yüksek kirişlerde ilk çatlakların mesnetler, boşluklar ve yükleme noktaları arasında olduğu bilinmektedir. Yine aynı maksatla, çubuk benzeşimi yöntemi fikrinden hareketle kiriş içerisinde olduğu varsayılan hayali kafesteki basınç çubuklarına dik doğrultuda ve özellikle boşluk yakınlarında çapraz donatılar yerleştirilmiştir. Bu donatılar, sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için davranışı çok iyileştirmeyecek boy ve miktarda yerleştirilmiştir. Deney elemanları için bu kabullere göre belirlenen donatı yerleşimleri Şekil 3'te sunulmuştur. Daire boşluklu kirişlerde de kare boşluklularla birebir aynı donatı yerleşimi uygulandığından şekilde sadece kare boşluklu kirişler bulunmaktadır.



Kırmızı:  $\phi$ 12 – Mavi:  $\phi$ 10 – Mor:  $\phi$ 8

**Şekil 3:**  
Deney elemanlarında donatı yerleşimi

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA ve BULGULAR

Çalışmada 9 adet betonarme boşluklu yüksek kiriş modeli belirlenerek deneye tabi tutulmuştur. Deney elemanları, basit kiriş şeklinde mesnetlenmiş ve üst orta noktalarından tekdüze artımlı olarak yükleme yapılmıştır. Toplam 1.200 kN kapasiteli iki adet hidrolik silindir

ve el pompalarıyla eş zamanlı olarak uygulanan yük değerleri, her silindirin ucuna yerleştirilen 1.000 kN kapasiteli yassı tip yük hücreleri aracılığıyla veri toplama sistemine aktarılmıştır. Kirişlerinin her birindeki boşlukların konumu farklı olduğundan ve her deney elemanında farklı bir bölgede azami sehim görülebileceğinden, sehim ölçümü için tek bir noktadan veri almanın yeterli olmayacağı düşünülmüştür. Bu sebeple kirişlerin altına 0,01 mm ölçüm hassasiyetine sahip 5 adet potansiyometrik cetvel eşit aralıklarla yerleştirilmiş ve sehim değerinin belirlenmesinde bu potansiyometrik cetvellerden alınan değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Deneylerin gerçekleştirildiği Erzincan Üniversitesi 13 Mart Yapı Mekanığı Laboratuvarı'ndaki rijit yükleme çerçevesi ve deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 4'te görülmektedir.

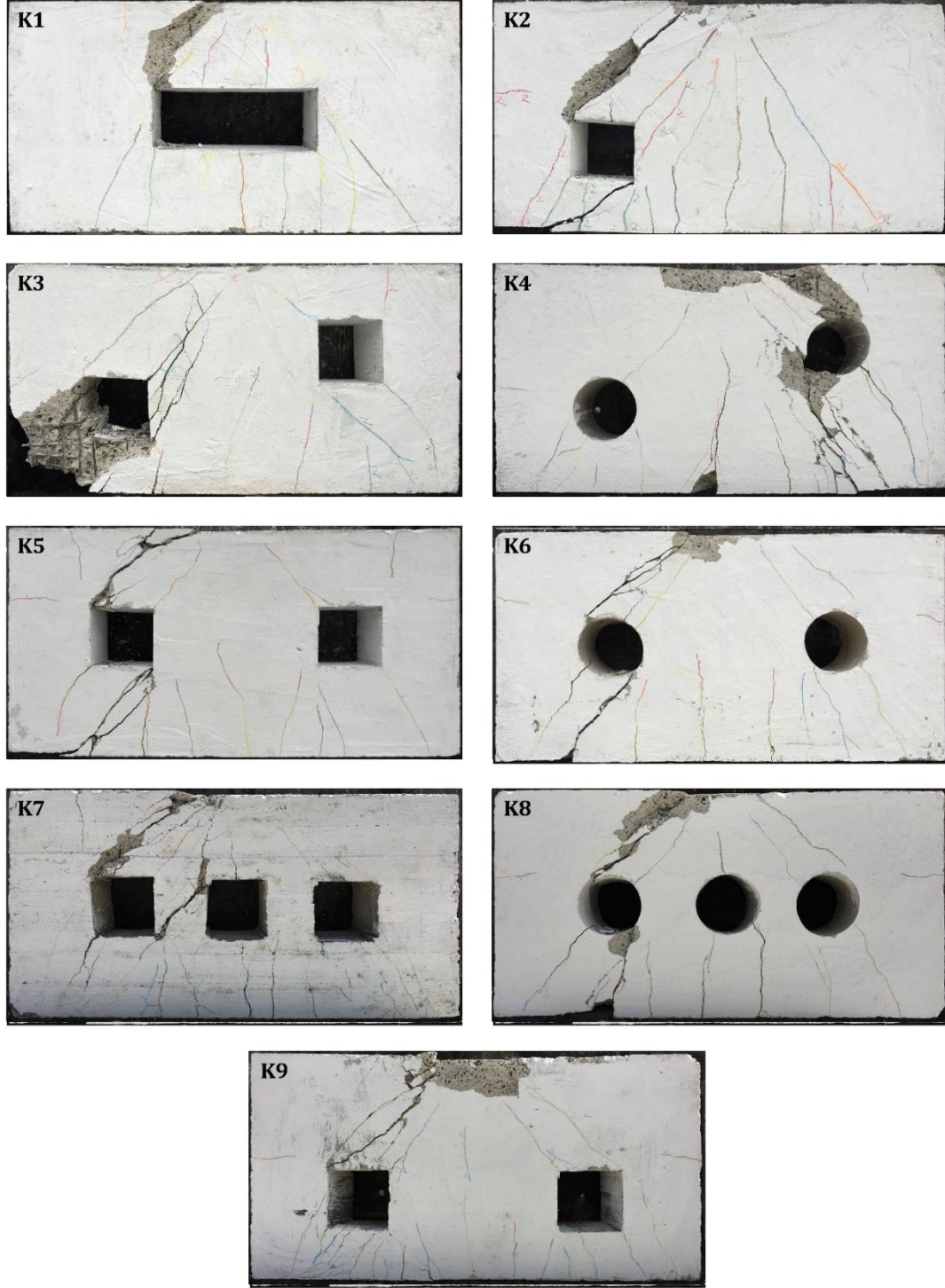


**Şekil 4:**  
*Rijit yükleme çerçevesi ve deney düzeneği*

K ön takısıyla isimlendirilen deney elemanları, yük değerlerinde ani ve yüksek oranda bir düşüş gerçekleştiği veya sehim değerlerindeki hızlı artışa rağmen artık yük taşıyamaz hale geldiği ana dek kontrollü olarak yüklenmiştir. Belirli aralıklarda yükleme duraklatılarak kirişler üzerinde çatlak incelemesi yapılmış, ortaya çıkan çatlaklar çizilerek çatlak genişliklerindeki değişimler de gözlenmiştir. Veri kayıtları tamamlandıktan sonra, kirişlerin göçme mekanizmalarının ve özellikle göçmeye sebep olan esas çatlakların nihai durumunun daha iyi görülebilmesi amacıyla yüklemeye devam edilmiştir.

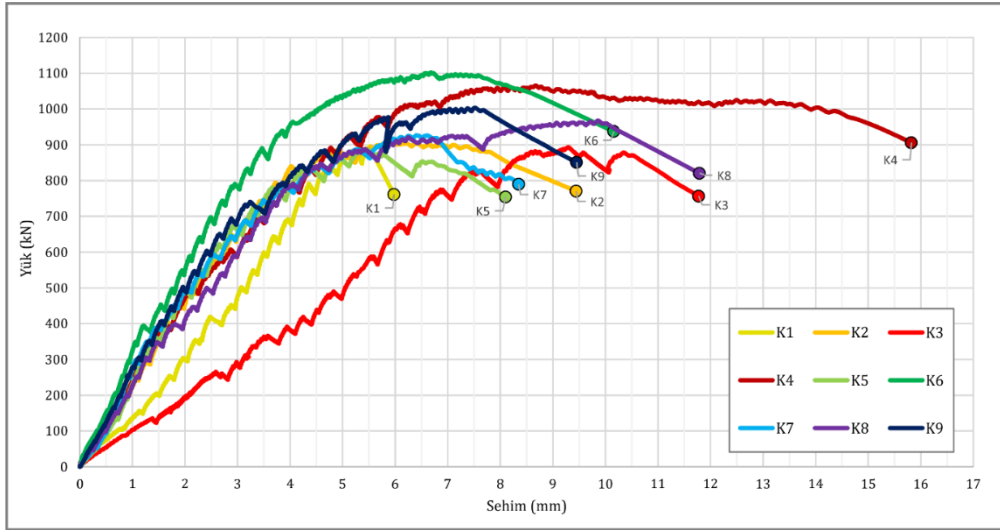
Boşluklu yüksek kirişlerin geometrik özelliklerinden dolayı, yapısal başarımlarının yani performans seviyelerinin ortaya konmasında çatlak gelişiminin doğru bir şekilde takip edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Deneyler sona erdirildikten sonra fotoğrafları çekilen boşluklu yüksek kirişler Şekil 5'te gösterilmektedir. Fotoğraflardan da görüleceği üzere, deney elemanlarındaki göçme mekanizması genel olarak kayma gerilmeleri bağlantılı olsa da bazı elemanlarda eğilme etkilerinin biraz daha ön plana çıktığı görülmüştür. Deney elemanlarında ortaya çıkan farklı çatlak dağılımları bunu ortaya koymaktadır. İstisnasız olarak bütün elemanlarda ilk çatlaklar gövde boşluklarından başlayarak yükleme ve mesnet bölgelerine doğru yönelmiş, deney süresince de bu çatlaklar bariz bir şekilde hem uzamış hem de genişlemiştir. Simetrik olmayan gövde boşluklarının bulunduğu yüksek kirişlerde daha alt seviyede bulunan boşluklar sol tarafta teşkil edildiğinden ve gerilme yörüngeleri mesnetler civarında –özellikle sabit mesnet- daha da sıklaştığından çatlaklar da genel olarak kirişlerin sol tarafında

yoğunlaşmıştır. K4 kirişinde de ilk çatlaklar sol kısımda başlamasına karşın, gerilme yığılması etkisinin dairesel boşluklarda daha zayıf olması sebebiyle farklı bir kırılma davranışı söz konusu olmuştur. Ayrıca gövde boşluklarının mesnetlere yakın olduğu deney elemanlarında ise mesnet ezilmesi gözlenmiştir. Bu hasar özellikle K3 elemanında daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır.

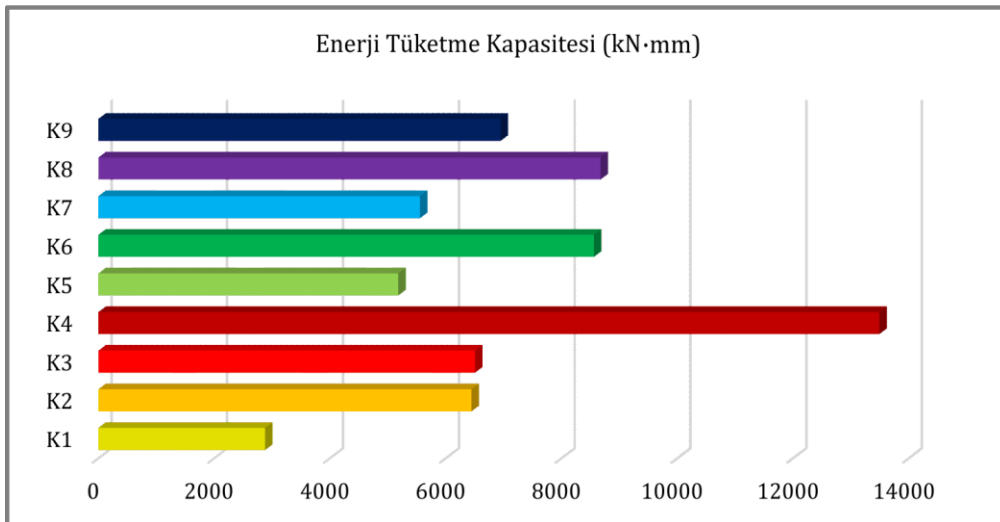


**Şekil 5:**  
*Deneye tabi tutulan boşluklu yüksek kirişlerin fotoğrafları*

Deneye tabi tutulan boşluklu yüksek kirişlerin yapısal davranışlarını tahlil edebilmek için ilk olarak yük-sehim eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur. Kaba bir şekilde bu grafik incelendiğinde K3 elemanında akmaya kadarki aşamada, K4 elemanında ise akma sonrası aşamada diğer deney elemanlarına kıyasla daha fazla sehim oluştuğu görülürken genel olarak birbirine yakın eğriler elde edilmiştir. Taşıma gücü kapasitesi üzerinden bir değerlendirme yapıldığında ise en yüksek değerlere sırasıyla K6, K4, K9 ve K8 elemanları sahipken diğer elemanlar 900 kN civarında değerlere ulaşmıştır. Yük-sehim ilişkilerinden hareketle yapısal davranışın daha detaylı bir şekilde irdelenmesine fırsat tanıyacak olan bazı hesaplamalar da yapılmıştır. Deney elemanlarının enerji tüketme kapasitelerinin verildiği Şekil 7 incelendiğinde K4 elemanının 13492 kN·mm değerinde çok yüksek kapasitesine ilaveten K8 ve K6 elemanları da genel ortalamaya nispeten yüksek değerlere sahiptir. Bu üç elemanın ortak özelliği daire kesitli gövde boşluklarına sahip olmalarıdır. K1 elemanı ise 2879 kN·mm değeriyle en düşük enerji tüketme kapasitesini sergilemiştir ki, diğer elemanlara nazaran kare ya da daire değil de dikdörtgen şeklinde bir gövde boşluğuyla tasarlanmıştır.



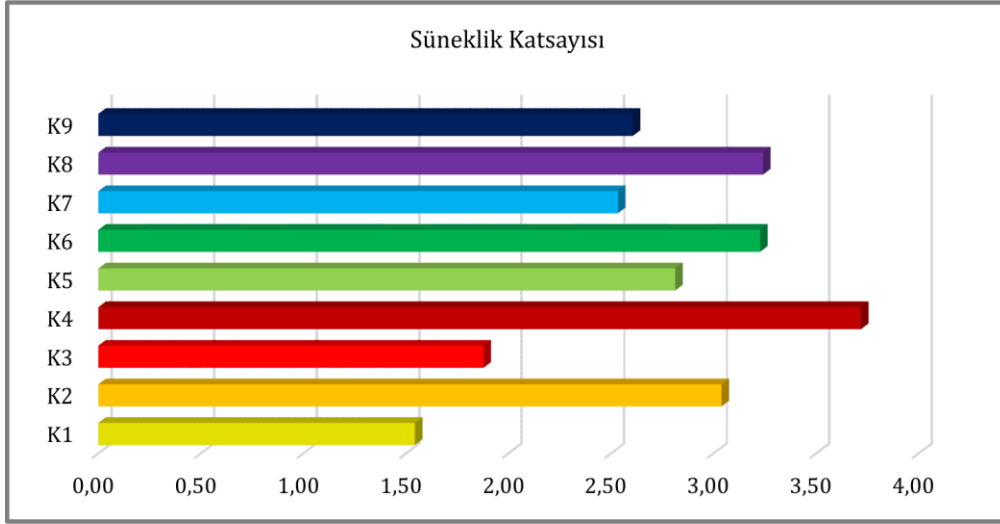
Şekil 6:  
Deney elemanlarının yük-sehim eğrileri



Şekil 7:  
Deney elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri



Yüksek kirişlerin yapısal başarımlarını kıyaslamak için kullanılan diğer bir sayısal sonuç ise Şekil 8'de verilen süneklik katsayılarıdır. Bu katsayıyı hesaplamak için göçme anındaki sehim değerinin akma anındaki sehim değerine oranı kullanılmıştır. Ancak şunu belirtmekte fayda vardır ki, literatürde birçok çalışmada da tercih edildiği üzere, deney elemanlarının akma yükü olarak taşıma gücünün %75'i, göçme yükü olarak da taşıma gücünün %85'i alınmıştır. Böylece bütün elemanların davranışından bağımsız olarak daha sağlıklı bir mukayeseye imkân tanınmıştır. Zira deney elemanlarının yük-sehim eğrileri de bu kabule göre çizilmiştir. Süneklik katsayılarına bakıldığında, en yüksek değerler sırasıyla K4, K8 ve K6 elemanlarında çıkmıştır. Ancak nispeten sıra dışı davranışı dikkate alındığında, K4 yüksek kirişinde eğilme etkisinin biraz daha belirgin olmasıyla birlikte deney esnasında ölçmeye bağlı bir hatanın da muhtemel etkisi yazar tarafından göz ardı edilmemektedir. Diğer elemanlar ise enerji tüketme kapasiteleri ile benzer değerlere sahipken K3 elemanında ise beklenenden daha düşük bir değere rastlanmıştır. Bunun birincil sebebi olarak, daha önceden de bahsedildiği üzere sol mesnet bölgesindeki ezilmeyi öne sürmek yanlış olmayacaktır.



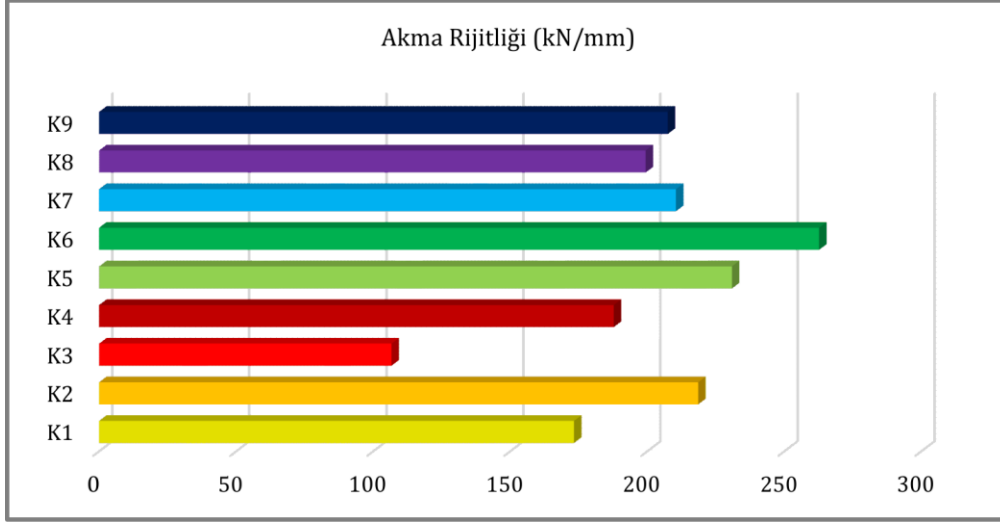
**Şekil 8:**  
*Deney elemanlarının süneklik katsayıları*

Son olarak deney elemanlarının aktığı kabul edilen andaki (Şekil 9) ve taşıma gücü kapasitesine erişildiği andaki (Şekil 10) rijitlikleri irdelenmiştir. Betonarme yapı elemanlarında sünekliğin yanı sıra üst seviyelerde rijitliğe sahip olması da istenen ve yapısal başarımları artıran bir özelliktir. Bu grafiklerde de mesnet ezilmesi görülen K3 elemanının en düşük rijitliğe sahip olmasıyla birlikte K6 elemanı en yüksek rijitlik değerine ulaşmıştır. Ayrıca diğer deney elemanlarının aksine K1 yüksek kirişinin akma anındaki ve taşıma gücü anındaki rijitlik değerlerinin nispeten uyumsuz olduğu göze çarpmaktadır. Fakat enerji tüketme kapasitesi ve süneklik değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde bu uyumsuzluğun olağan olduğu anlaşılmaktadır. Zira bu eleman diğerlerine nispeten daha gevrek bir davranış sergilemiştir.

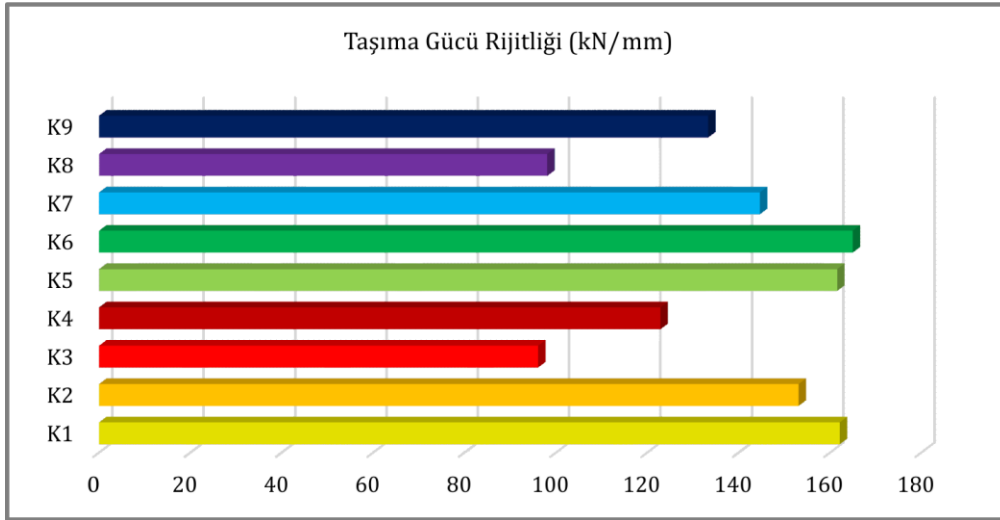
#### 4. SONUÇLAR

Muhtelif konumlarda ve şekillerde teşkil edilen gövde boşluklarına sahip betonarme yüksek kirişlerin yapısal davranışlarının ele alındığı bu çalışmada 9 adet model üzerinde deneysel inceleme gerçekleştirilmiştir. Boşluklu yüksek kirişler üzerine geçmişte yapılan birçok kuramsal ve deneysel çalışma mevcut ise de farklı ve çok sayıda tasarımın dâhil edildiği bu çalışmayla konuya güncel ve farklı bir bakış açısı getirmek hedeflenmiştir. Boşluklu yüksek kirişlerin geometrik özelliklerinden dolayı, beklendiği üzere bütün deney elemanlarında kesme kırılması

gerçekleşmiş, ancak gövde boşlukları açısından sahip oldukları farklılıklar yine farklı çatlak dağılımları ile enerji tüketme kapasitesi, süneklik ve rijitlik kavramları bağlamında farklı yapısal başarımlar seviyelerine yol açmıştır.



**Şekil 9:**  
Deney elemanlarının akma rijitlikleri



**Şekil 10:**  
Deney elemanlarının taşıma gücü rijitlikleri

Deney sonuçları incelendiğinde en önemli davranış farkına boşluk şekli sebep olmuştur. Dairesel boşlukların dörtgen boşluklara nazaran gerilme yığılmaları açısından daha elverişli olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda taşıma gücü kapasitesi, enerji tüketme kapasitesi ve süneklik seviyesi belirgin şekilde yüksekken rijitlik olarak birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Çatlak dağılımları da nispeten benzer kabul edilebilse de dairesel boşluklu yüksek kirişlerde eğilme etkisinin daha yoğun olmasından dolayı kiriş altındaki çekme çatlaklarının daha geniş olduğu göze çarpmaktadır. Gövde boşluğunun dikdörtgen olması halinde ise yine aynı başarımlar göstergeleri çok daha düşükken rijitlik değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Sadece yüksek seviyede rijitliğin varlığı ise gevrek bir davranış işaret etmektedir.

Gövde boşluklarının konumu üzerinden değerlendirme yapıldığında ise çok kesin bir tespitte bulunmak mümkün değildir. Ancak boşluksuz kiriş içerisinde oluşacağı varsayılan hayali kafesin basınç çubuklarının doğrultusunda boşluk bulunmayan yani kemerlenme etkisinin kolayca elde edilebildiği elemanlarda genel olarak daha yüksek yapısal başarımlar seviyesine ulaşılmaktadır. Boşlukların kiriş tabanına yaklaşmasıyla ise eğilme etkisi varlığını daha çok hissettirmekte, buna bağlı olarak çatlak sayısı ve süneklik artmakta, rijitlik seviyesi ise düşmektedir. Yine mesnet bölgesine yakın boşluklar sebebiyle mesnet ezilmesi tehlikesi daha da artmakta ve buna karşı önlem alınması ihtiyacını ön plâna çıkarmaktadır.

Son olarak boşluk sayılarının etkisi üzerine kısa bir yorum gerektiğinde, gerilme yığılmalarının çok üst seviyelerde olması dolayısıyla kare boşluklara sahip yüksek kirişlerin davranışında belirgin farklılıklar söz konusu değildir. Ancak dairesel boşluklu kirişlerin ortaya koyduğu üzere, fazla sayıda boşluk bulunması, enerji tüketme kapasitesi açısından biraz daha üstünlük kazandırsa da süneklik ve rijitlik bağlamında boşluk sayısının azaltılmasıyla yüksek kirişlerde yapısal davranışın iyileştirilebileceği görülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Erzincan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir (Proje Numarası: FEN-A-240215-0131). Yazar ayrıca deney numunelerinin üretiminde sağladıkları yardımdan ötürü Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Dr. Hakan Yalçın ve Dr. Atila Kumbasaroğlu'na teşekkürlerini sunmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Aksu, T. (1993). Silo çeperlerinin yüksek kiriş davranışı, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XII. Teknik Kongresi*, 25-27 Mayıs 1993, Ankara, 583–596.
2. Aykaç, S., Yılmaz, M.C. (2011). Düzenli üçgen veya dairesel boşluklara sahip betonarme kirişlerin davranış ve dayanımı, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(3), 711–718.
3. Bower, J.E. (1966a). Elastic stresses around holes in wide-flange beams, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 92(ST2), 85–101.
4. Bower, J.E. (1966b). Experimental stresses in wide-flange beams with holes, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 92(ST5), 167–186.
5. Celep, Z., Kumbasar, N. (2005). *Betonarme Yapılar*, Beta Dağıtım, İstanbul.
6. Cook, W.D., Mitchell, D. (1988). Studies of disturbed regions near discontinuities in reinforced concrete members, *ACI Structural Journal*, 85(2), 206–216.
7. Elçi, H., Saylan, Ş. (1999). Boşluklu betonarme kirişlerin dizaynı için TS 500'de yapılması önerilen düzenlemeler, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XV. Teknik Kongresi*, 24-26 Kasım 1999, Ankara, 43–58.
8. Elçi, H. (2005). Büyük boşluklu betonarme kirişlerin statik-betonarme analizi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 50(437), 17–24.
9. Ersoy, U., Özcebe, G. (2001). *Betonarme*, Evrim Yayınevi, İstanbul.
10. Heller, S.R., Jr. (1953). Reinforced circular holes in bending with shear, *Journal of Applied Mechanics, ASME*, 2, 279–285.
11. Hu, O.E., Tan, K.H. (2007). Large reinforced-concrete deep beams with web openings: test and strut-and-tie results, *Magazine of Concrete Research*, 59(6), 423–434. doi:10.1680/mac.2007.59.6.423

12. Kalkan, İ. (2014). Düzenli boşluklu betonarme kirişlerin düzlem içi eğilme davranışları, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(1), 155–163. doi:10.17341/gummfd.94985
13. Kong, F.K. (2002). *Reinforced Concrete Deep Beams*, Taylor & Francis, London.
14. Mansur, M.A., Hasnat, A. (1979). Concrete beams with small openings under torsion, *Journal of the Structural Division, ASCE*, 106(ST11), 2433–2447.
15. Mansur, M.A., Tan, K.H., Lee, S.L. (1985). Design method for reinforced concrete beams with large openings, *ACI Journal, Proceedings*, 82(4), 517–524.
16. Mansur, M.A., Tan K.H. (1999). *Concrete Beams with Openings: Analysis and Design*, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
17. Nasser, K.W., Acavalas, A., Daniel, H.R. (1967). Behavior and design of large openings in reinforced concrete beams, *ACI Journal, Proceedings*, 64(1), 25–33.
18. Özkal, F.M. (2012). Topoloji eniyilemesi ve çubuk benzeşimi yöntemleri kullanılarak betonarme yapı elemanlarında en uygun donatı düzeninin belirlenmesi ve deneysel gerçekleştirilmesi, *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
19. Prentzas, E.G. (1968). Behaviour and reinforcement of concrete beams with large rectangular apertures, *Doktora Tezi*, University of Sheffield, Sheffield.
20. Savin, G.N. (1951). *Stress Concentration Around Holes*, Pergamon Press, New York (1951 tarihli Rusça eserin 1961 tarihli çevirisidir).
21. Schlaich, J., Schaefer, K., Jennewein, M. (1987). Toward a consistent design of structural concrete, *PCI Journal*, 32(3), 74–150.
22. Sharp, G.R. (1977). Reinforced concrete deep beams with web openings, *Doktora Tezi*, University of Nottingham, Nottingham.
23. Somes, N.F., Corley, W.G. (1974). Circular openings in webs of continuous beams, *Shear in Reinforced Concrete*, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 359–398.
24. TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40)*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
25. Yang, K.H., Eun, H.C., Chung, H.S. (2006). The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams, *Engineering Structures*, 28(13), 1825–1834. doi:10.1016/j.engstruct.2006.03.021