



## Eğilme Etkisindeki Büyük Dairesel Boşluklu Kirişlerin Davranışının Deneysel İncelenmesi

### *Experimental Investigation of Behavior of Beams with Large Circular Opening Under Bending*

Abdulwahed Qaderi<sup>1</sup> , Mouad Ben Saoud<sup>2</sup> , Volkan Eren<sup>3</sup> , Abdullah Gündoğay<sup>1</sup> , Sıla Yaman<sup>1</sup> , Hamide Tekeli Kabaş<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>2</sup>Mouad Ben Saoud Tripoli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tripoli, Libya

<sup>3</sup>Volkan Eren Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Zonguldak, Türkiye

### Öz

Günümüzde betonarme binalarda hem ihtiyaç hem de estetik açıdan su tesisatı, telefon hattı, bilgisayar ağı, vb. hizmetlerin döşemelerin altından geçirilerek asma tavan ile kapatılması tercih edilmektedir. Ancak bu tesisat borularının geçirilmesi taşıyıcı sistem elemanlarının beton dökümü sonrasında gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden uygulamada bazen bu borular estetik kaygılarla uygulama mühendislerinin de haberi olmadan kiriş elemanlarda boşluk açılarak oluşturulmaktadır. Dikdörtgen, kare veya daire şeklinde olabilen bu boşluklar taşıyıcı elemanlarda önemli ölçüde zayıflamalara yol açmaktadır. Bu çalışmada betonarme kiriş gövdesinde bırakılan boşluk adedinin ve yatay doğrultudaki konum değişiminin kiriş davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla dokuz adet betonarme kiriş numunesi üretilmiş ve dört noktalı eğilme testine maruz bırakılarak deneyleri yapılmıştır. Bu kirişlerden bir adedi boşluksuz referans numunedir. Diğer tüm numunelerde dairesel boşluk bırakılmış ve kiriş üzerindeki boşluk adedi ve konumu değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan boşluk adedi arttıkça ve boşluğun yeri mesnete yaklaştıkça numune yük taşıma kapasitesinin, yerdeğiştirme yeteneğinin ve enerji tüketme kapasitesinin önemli mertebelerde azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme, Dairesel boşluk, Eğilme, Kiriş

### Abstract

It is preferred in reinforced concrete buildings nowadays from the structural and serviceability point of view to hide the service pipes and cables like telephone lines, computer networks, etc. under the suspended ceilings or raised floors. However, the installation of those services in the existing buildings leads in real life to an opening in structural elements especially beams without the knowledge of the structural engineers. These openings which may be in all shapes circular, rectangular, or square, can weaken the structural elements significantly. The effect of change the number and the location of these openings in the horizontal direction of the reinforced concrete beams on behavior is investigated in this study. For this reason, nine reinforced concrete beams are constructed and tested by performing a four-point bending experiment. One of these beams is beam without gaps as reference. The other beams have circular openings with different numbers and locations. The test results clearly show that the load-carrying capacity, deflection, and energy assumption of the specimen decreased significantly as the number of openings increased and the location of the openings approached the support.

**Keywords:** Reinforced concrete, Circular opening, Bending, Beam

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: hamidetekeli@sdu.edu.tr

Abdulwahed Qaderi [orcid.org/0000-0002-7405-9027](https://orcid.org/0000-0002-7405-9027)

Mouad Ben Saoud [orcid.org/0000-0002-0077-4124](https://orcid.org/0000-0002-0077-4124)

Volkan Eren [orcid.org/0000-0002-3525-7346](https://orcid.org/0000-0002-3525-7346)

Abdullah Gündoğay [orcid.org/0000-0002-5355-9014](https://orcid.org/0000-0002-5355-9014)

Sıla Yaman [orcid.org/0000-0003-3131-1090](https://orcid.org/0000-0003-3131-1090)

Hamide Tekeli Kabaş [orcid.org/0000-0002-3515-6836](https://orcid.org/0000-0002-3515-6836)



Bu eser "Creative Commons Atıf-GayriTicari-4.0 Uluslararası Lisansı" ile lisanslanmıştır.

## 1. Giriş

Ülkemizde son yıllarda meydana gelen depremler, mevcut binaların deprem güvenliğinin sağlanmasının ve depreme dayanıklı binaların inşa edilmesinin önemini ortaya çıkarmıştır. Mevcut binaların deprem güvenliği ancak taşıyıcı sistem elemanlarının güvenliği ile sağlanabilir. Betonarme binaların taşıyıcı sistemi tamamlandıktan sonra elektrik tesisatı, su tesisatı, telefon kablosu, vb. hatların geçirilmesi için kiriş elemanlarının gövdesinde hesaplamalarda dikkate alınmayan boşluklar oluşturulabilmektedir. Bu boşluklar boyut olarak küçük veya büyük, geometrisi ise genellikle kare, dikdörtgen veya daire şeklinde olabilmektedir (Şekil 1). Bırakılan bu boşlukların kiriş davranışını dolayısıyla bina davranışını olumsuz yönde etkileyeceği ortadadır. Bu nedenle kirişte bırakılan bu boşlukların betonarme kiriş davranışları üzerindeki etkilerinin tanımlanması büyük önem taşımaktadır.

Literatürde bulunan bazı araştırmalarda, kiriş gövdesinde açılan boşlukların şekil ve boyut değişimlerinin kiriş davranışları üzerindeki etkinliği deneysel olarak araştırılmıştır. Örneğin, Yang vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dayanımlı derin kirişlerde dikdörtgen boşlukların etkisi beton dayanımı, kesme açıklığı oranı ve boşluk boyutları için deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Deneyler sonucunda, boşluk boyutunun ilk yükleme adımlarında eleman yerdeğiştirmesini fazla etkilemediği ancak diyagonal çatlak oluşumundan sonra oldukça etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca beton dayanımı değişiminin eleman rijitliğini fazla etkilemediği de vurgulanmıştır. Yoo vd. (2007), boşluklu ve öngermeli derin kirişlerin taşıma gücü yükünü deneysel olarak araştırmış ve sonuçları mevcut tasarım yöntemleriyle karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlardan, mevcut tasarım yöntemlerinin boşluklu derin kirişlerde yetersiz kaldığı görülmüştür. Lee vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli konumlarda dairesel

boşlukları bulunan derin kirişlerin davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda boşluk bulunan numunelerin yük taşıma kapasitesinin, boşluksuz numuneye göre yaklaşık %10 azaldığı görülmüştür.

Campione ve Minafo (2012) tarafından yapılan çalışmada, düşük kesme açıklığı oranına sahip derin kirişlerde dairesel boşlukların etkisi deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Çalışmada boşluğun konumu ile enine ve boyuna donatı miktarı değişken parametre olarak seçilmiştir. Numuneler sonlu elemanlar programı ATENA2D ile modellenerek sonuçlar kıyaslanmıştır. Al-Sheikh (2014) yaptığı çalışmada, farklı konumlarda, boyutlarda ve şekillerde oluşturulan boşluğun kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada 27 adet kiriş deneyi yapılmıştır. Kirişlerdeki boşluk konumunun kesme bölgesinde olması durumunda yük taşıma kapasitesinde maksimum azalma olduğu ve dairesel boşluğa sahip elemanların yük taşıma kapasitesinin kare ve dikdörtgen boşluklu elemanlara göre daha fazla olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, Chin ve Doh (2015) tarafından yapılan çalışmada, gövdesinde iki adet kare veya dairesel boşluk bulunduran derin kirişlerde boşluk boyutu ve şeklinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda dairesel boşluklu kirişlerin yük taşıma kapasitesinde %30-35, kare boşluklu kirişlerde ise %40-80 azalma meydana gelmiştir.

Özkal (2017), derin kirişlerde düşey doğrultudaki boşluk konumunun ve şeklinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Boşluklar daire, kare ve dikdörtgen şeklinde seçilmiştir. Boşlukların hasar türü, taşıma gücü, süneklik ve rijitlik değerlerine olan etkileri değerlendirilmiştir. En önemli davranış farkına boşluk şeklinin neden olduğu görülmüştür. Shoeib ve Sedawy (2017) tarafından yapılan çalışmada, kirişlerdeki farklı boyutlarda ve şekillerde (kare, dikdörtgen ve dairesel) oluşturulan boşluğun davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla beton dökülmeden önce, beton döküldükten sonra ve kiriş belirli bir yüke maruz bırakılarak belli seviyede hasar gördükten sonra boşluk bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, boşluğun beton dökülmeden önce veya sonra oluşturulması arasında önemli bir davranış farklılığının ortaya çıkmadığı ve dairesel boşluğa sahip kirişlerin daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Abdo ve Mabrouk (2017), saf burulmaya maruz kalan dikdörtgen boşluklu kirişlerin davranışları üzerinde boşluk sayısının, kiriş yüksekliğinin ve etriye aralığının etkisini incelemiştir. ANSYS programı kullanılarak numuneler modellenmiş ve deneyler esnasında oluşan çatlakların dağılımı kıyaslanmıştır. Boşluk sayısının azalması, kiriş yüksekliğinin artması



Şekil 1. Kirişlerde bırakılan boşluklara örnekler.

veya etriye aralığının azalması kirişlerin burulma kapasitesini artırmıştır. Osman vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, dairesel boşluklu betonarme kirişlerin kesme dayanımı deneysel olarak ve sonlu elemanlar programı ANSYS kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada kiriş kesme açıklığı oranı, boşluk boyutu ve konumu değişken parametre olarak seçilmiştir. Deney ve analiz sonuçları birbiriyle uyumlu olarak elde edilmiştir.

Jasim vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, gövdesinde iki adet kare boşluk bulunan derin kirişlerde boşluk boyutu ve konumunun davranış üzerindeki etkisi incelenmiştir. Numuneler ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiş ve deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Elkersh vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, kemerli kirişlerde dikdörtgen boşluk bulunması durumunun etkileri deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. ANSYS programı kullanılarak analitik çalışma genişletilerek boşluk genişliği ve şeklinin incelendiği parametrik çalışma da yapılmıştır.

Aykaç ve Yılmaz (2011) tarafından yapılan çalışmada, gövdesinde daire veya üçgen şeklinde düzenli büyük boşluklar bulunan betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Boşluk geometrisi ve çekme donatısı oranı değişken parametre olarak seçilmiştir. Yapılan deneyler, dayanım ve süneklik açısından dairesel boşluklu kirişlerin, üçgen boşluklu kirişlere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Boşluklardan dolayı kirişlerin eğilme rijitliklerinde %10-30 arasında bir azalma meydana gelmiştir. Kalkan (2014) yaptığı çalışmada, düzenli boşluklara ve farklı donatı düzenine sahip betonarme kirişlerin deneylerinden bulduğu sehim değerlerini literatürde mevcut bulunan formüllerden elde edilen analitik değerlerle karşılaştırmıştır. Kalkan vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, çekme donatısı oranı değişen düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışı ANSYS programı kullanılarak araştırılmıştır. Donatı oranının artmasıyla kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve eğilme rijitliklerinde artış, sehim de ise azalma sağlanarak boşluksuz kirişin davranışına yaklaşmanın mümkün olduğu görülmüştür.

Murugesan ve Narayanan (2017), betonarme kiriş içerisinde farklı boyutlarda ve konumlarda oluşturulan bir adet dairesel boşluğun eğilme davranışı üzerindeki etkisini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Deneylerden elde edilen ilk çatlama yükünün ve eğilme dayanımının teorik hesaplamalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kumbasaroğlu ve Korkmaz (2020), betonarme kirişlerin içerisinde geçen tesisat borularının eğilme dayanımına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Kirişlerin boyuna doğrultusunda çekme,

basınç ve tarafsız eksen seviyesinde dairesel kesitli boşluklar bırakılmıştır. Boşlukların mümkün olduğunca tarafsız eksen seviyesinden geçmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

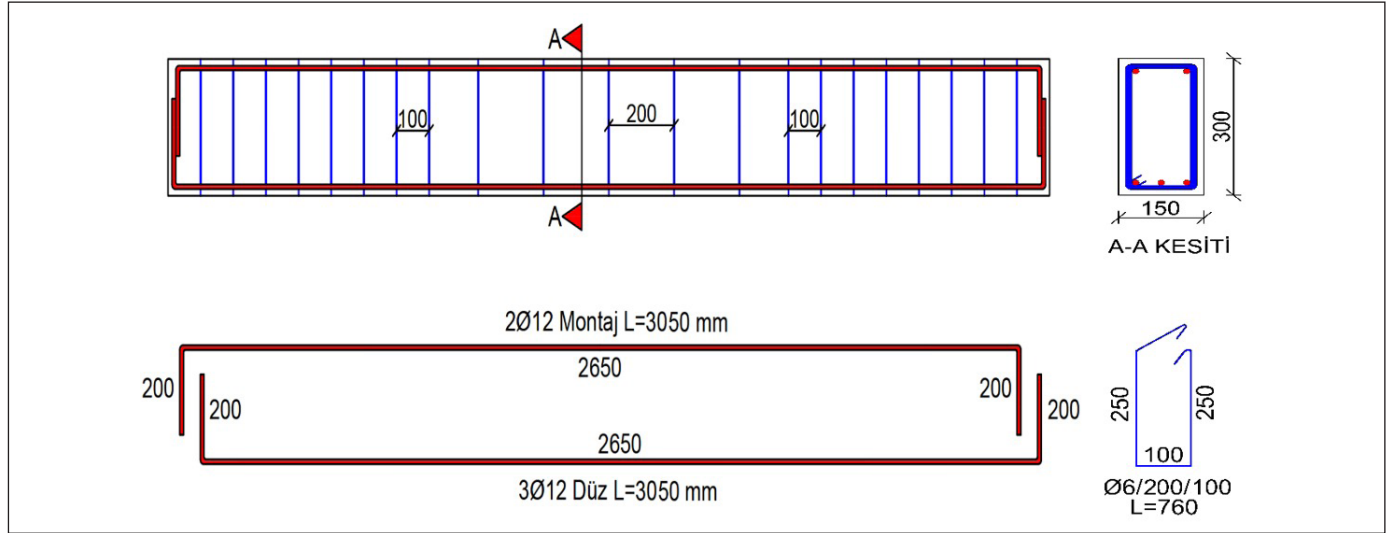
Literatürde genel olarak, kiriş gövdesinde düzenli şekilde boşluğun bırakıldığı veya derin kirişler için boşluğun incelendiği çalışmalara rastlanmaktadır. Özel bir donatı tasarımı yapılmaksızın tesisat borusu vb. gibi gereçlerle sonradan oluşturulan boşluğun davranış üzerindeki etkinliğini inceleyen çalışma sayısı oldukça az sayıdadır. Dolayısıyla bu konudaki verilerin artırılması, boşlukların eleman davranışını nasıl etkilediğinin anlaşılmasında ve onarım yönteminin seçiminde kolaylık sağlayacaktır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmada, betonarme kiriş üzerinde sonradan oluşturulan boşlukların adedinin ve yatay doğrultudaki konumunun değişmesinin kiriş davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda bir adedi boşluksuz diğerleri bir, iki ve üç adet dairesel boşluğa sahip olmak üzere toplam dokuz adet dikdörtgen kesitli kiriş numunesi üretilmiştir. Tüm kiriş numunelerinin dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden kirişlerin hasar dağılımları, yük taşıma kapasitesi, maksimum yerdeğiştirme, enerji tüketme kapasitesi ve eğilme rijitliği elde edilerek gerekli kıyaslamalar yapılmıştır.

## 2. Gereç ve Yöntem

Çalışma kapsamında 150 mm x 300 mm en kesitine ve 2700 mm uzunluğa sahip ½ ölçekli dokuz adet betonarme kiriş numune üretilmiştir. Kirişin üstünde 2f12, altında ise 3f12 boyuna donatı mevcuttur. Kiriş numune boyutlarının ve donatılarının seçiminde ülkemizdeki mevcut kirişlerin genel özelliklerini yansıtması amaçlanmıştır. Sarılma bölgesinde f6/100 mm, orta bölgede f6/200 mm aralıklarla enine donatı uygulanmıştır. Enine ve boyuna donatı miktarları, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY)'in minimum koşullarını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Etriye kancaları 135° olacak şekilde hazırlanmıştır. Üretilen betonarme kirişlere ait boyut ve donatı detayları Şekil 2'de verilmiştir.

Beton dökümü sırasında beton karışımdan 150 mm boyutlarında küp numuneler alınmış ve 28 gün süre ile kür edilmiştir. Kür işlemi sonunda deney gününde test edilen küp numunelerin ortalama beton basınç dayanımları (f) Çizelge 1'de verilmiştir.

Kiriş üretiminde kullanılan 6 ve 12 mm çapındaki nervürlü donatıdan üçer adet numune alınarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda 6 mm çapındaki donatı için ortalama akma dayanımı 330 MPa, 12 mm çapındaki donatı için 450 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Kirişlerin boyut ve donatı detayı.

Çizelge 1. Numunelere ait beton basınç dayanım değerleri.

Kiriş No	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
$f_c$ (MPa)	47	46	45	44	44	42	42	42	47

Üretilen dokuz adet kirişten bir adedi boşluksuz, dört adedi tek boşluklu, üç adedi iki boşluklu ve bir adedi ise üç boşluklu olarak tasarlanmıştır. Tüm boşluklu numunelerde dairesel boşluk çapı 150 mm olarak uygulanmıştır. Tek boşluklu dört adet kirişte boşluğun kiriş başlangıcına olan mesafeleri 375 mm, 525 mm, 825 mm ve 1350 mm olarak seçilmiştir. İki boşluklu ve üç boşluklu numunelerde kıyaslamaların yapılabilmesi için boşluğun başlangıç mesafesi 375 mm olarak sabit tutulmuş ve boşluklar arası mesafeler değiştirilmiştir. Kiriş numunelerindeki boşluk adedi ve konumları, mevcut binalardaki kiriş elemanlarda sonradan oluşturulan boşluk özelliklerine benzeştirilerek seçilmiştir. Üretilen deney numunelerine ait boşluk sayıları ve konumları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'de tanımlanan kodlamada N harfi "Numune" ifadesinin kısaltılmasını, N harfinden sonraki rakamlar sırasıyla numune numarasını, boşluk adedini, boşluğun kiriş başlangıcına olan mesafesini (mm) ve boşluklar arası mesafeyi (mm) göstermektedir.

Numuneler üretim ve kür işleminin tamamlanmasının ardından dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Deney sırasında kullanılan yükleme düzeneği şematik ve fotoğraf olarak Şekil 3'te verilmiştir. Kirişler, solda sabit, sağda ise hareketli olarak mesnetlenmiştir.

Deneyler sırasında uygulanan yükün değeri, 300 kN kapasiteli yük hücresi ile ölçülmüştür. Deney numunelerinin üzerindeki yerdeğistirmeler (düşey yükün uygulandığı noktalarda, kiriş açıklığının ortasında ve mesnet bölgelerinde) 0.01 mm hassasiyetli yerdeğistirme ölçerler (LVDT) ile ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan ölçüm aletlerinin konumları Şekil 4'te verilmiştir.

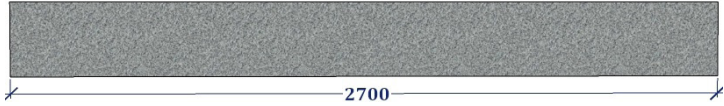
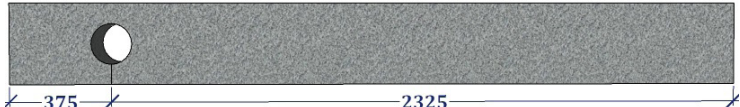
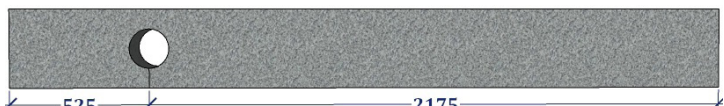

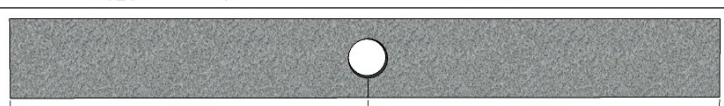


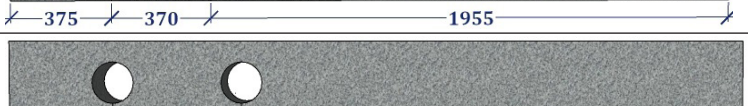
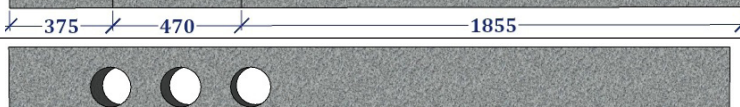
Betonarme kirişlerin deneyleri yerdeğistirme kontrollü olarak yapılmıştır. Deneylerde uygulanan yükleme protokolü Şekil 5'te verilmiştir.

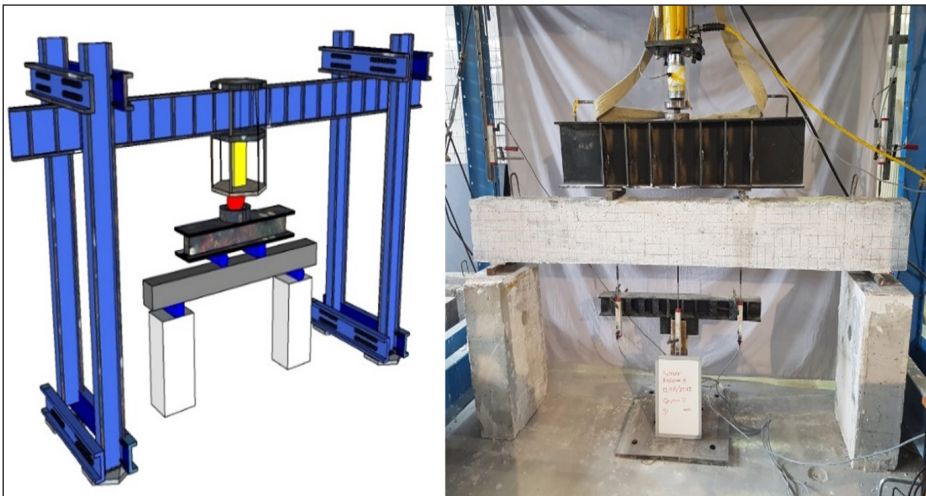
### 3. Bulgular

Deneylere başlamadan önce, deney esnasında oluşan hasarın net bir şekilde gözlenebilmesi için tüm kiriş numunelerin yüzeyleri kireç ile badana edilerek 50 mm aralıklarla karelej uygulaması yapılmıştır. Kiriş numuneleri sırasıyla deney düzeneğine yerleştirilerek dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Deneyler sırasında yükleme, el kumandalı hidrolik kriko yardımıyla yapılmıştır. Oluşan çatlaklar ve hasarlar, yükleme ve boşaltmanın her adımı için renkli tebeşir kullanılarak kirişler üzerine çevrim numarası ile birlikte işaretlenmiştir. Kiriş numunelerde deney sırasında oluşan hasarlara ait görünüm Şekil 6'da verilmiştir.

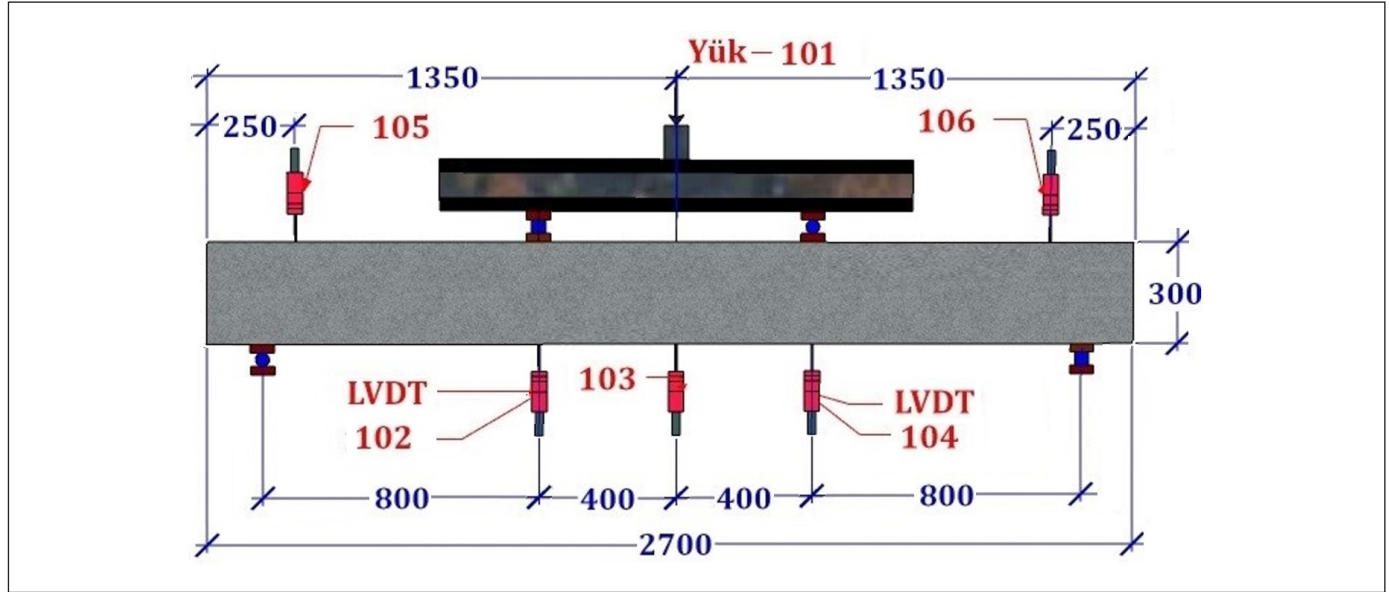


Çizelge 2. Üretilen deney numunelerine ait boşluk sayıları ve konumları.

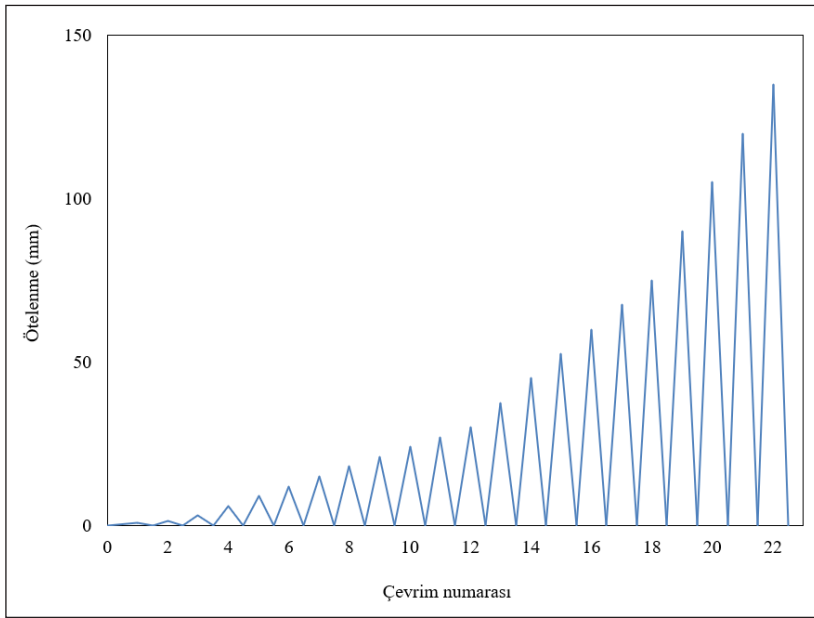
Numune Adı	Numune Özellikleri
N1-0	
N2-1-375	
N3-1-525	
N4-1-825	
N5-1-1350	
N6-2-375-260	
N7-2-375-370	
N8-2-375-470	
N9-3-375-260	



Şekil 3. Yükleme düzeneğinin görünümü.



Şekil 4. Ölçüm aletlerinin konumları.

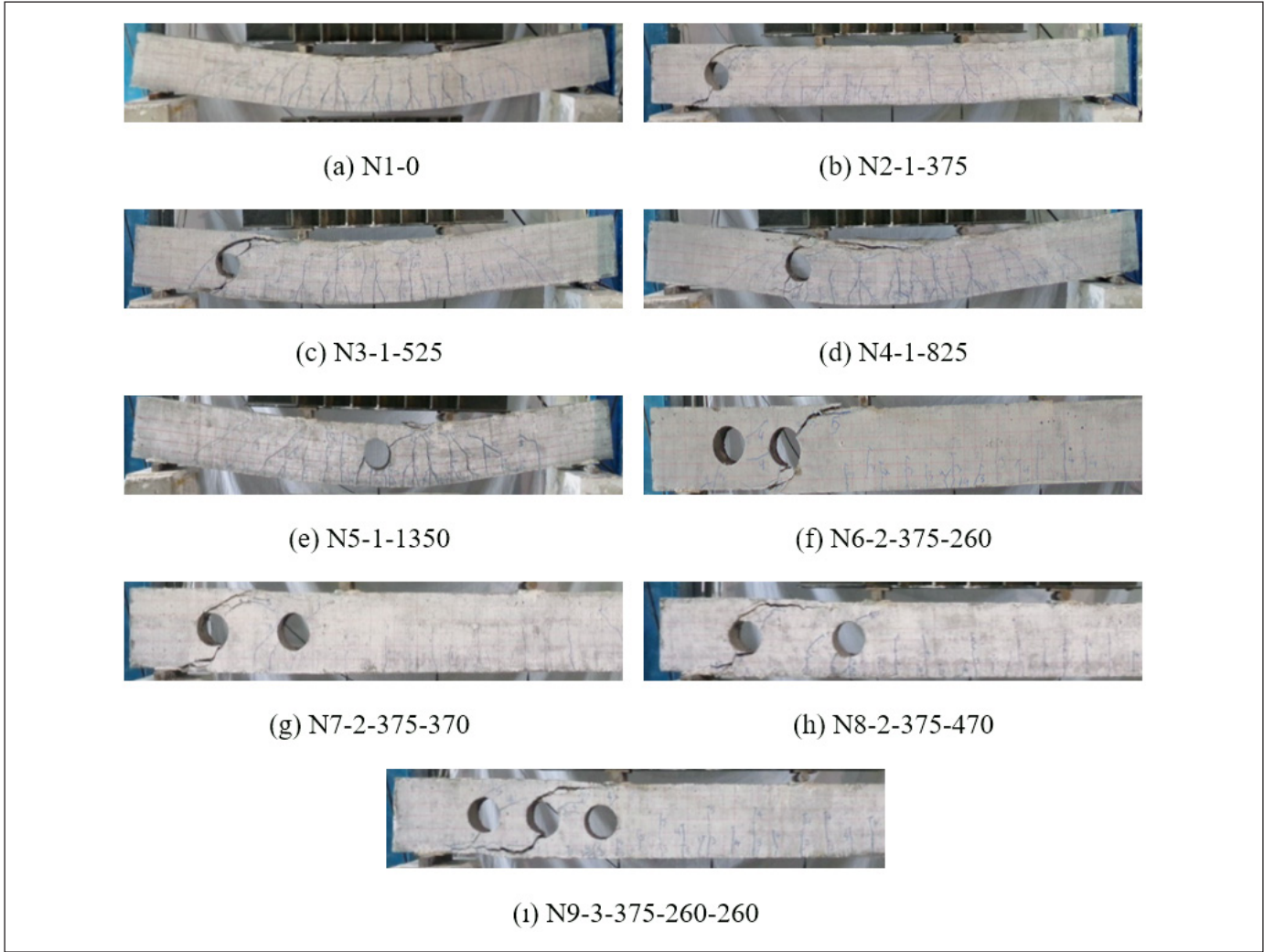


Şekil 5. Deneylerde uygulanan yükleme protokolü.

Boşluksuz referans kiriş numunenin (N1-0) hasarı sünek eğilme kırılması şeklinde ortaya çıkmıştır. Kiriş üzerinde çok sayıda kılcal eğilme çatlakları oluşmuştur. Yüklemin ilerlemesiyle çatlaklarda genişleme meydana gelmiştir. Numunenin basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile deney sonlandırılmıştır (Şekil 6.a). Boşluklu kiriş numunelerde, boşluksuz numuneye göre daha az sayıda eğilme çatlakları meydana gelmiş ve bunu takiben boşluk kenarından numunenin üst ve altına doğru çapraz devam eden ani kesme hasarının oluşması ile güç tükenmesine ulaşılmıştır.

Yük kapasitesinde meydana gelen ani düşme ile deneyler sonlandırılmıştır.

Tek boşluklu numunelerin (N2-1-375, N3-1-525, N4-1-825, N5-1-1350) hasarları kendi içerisinde genel olarak kıyaslandığında, boşluğun mesnete yaklaşması ile numunedeki eğilme çatlakları sayısının azaldığı ve kesme kırılması ile daha erken seviyelerde güç tükenmesine ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 6.b-e). Dolayısıyla kiriş davranışının, boşluğun kiriş mesnetine yaklaşması ile daha kritik hale geldiği söylenebilir. Boşluğun açıklık ortasına yaklaştığı



Şekil 6. Numunelere ait hasar görünümleri.

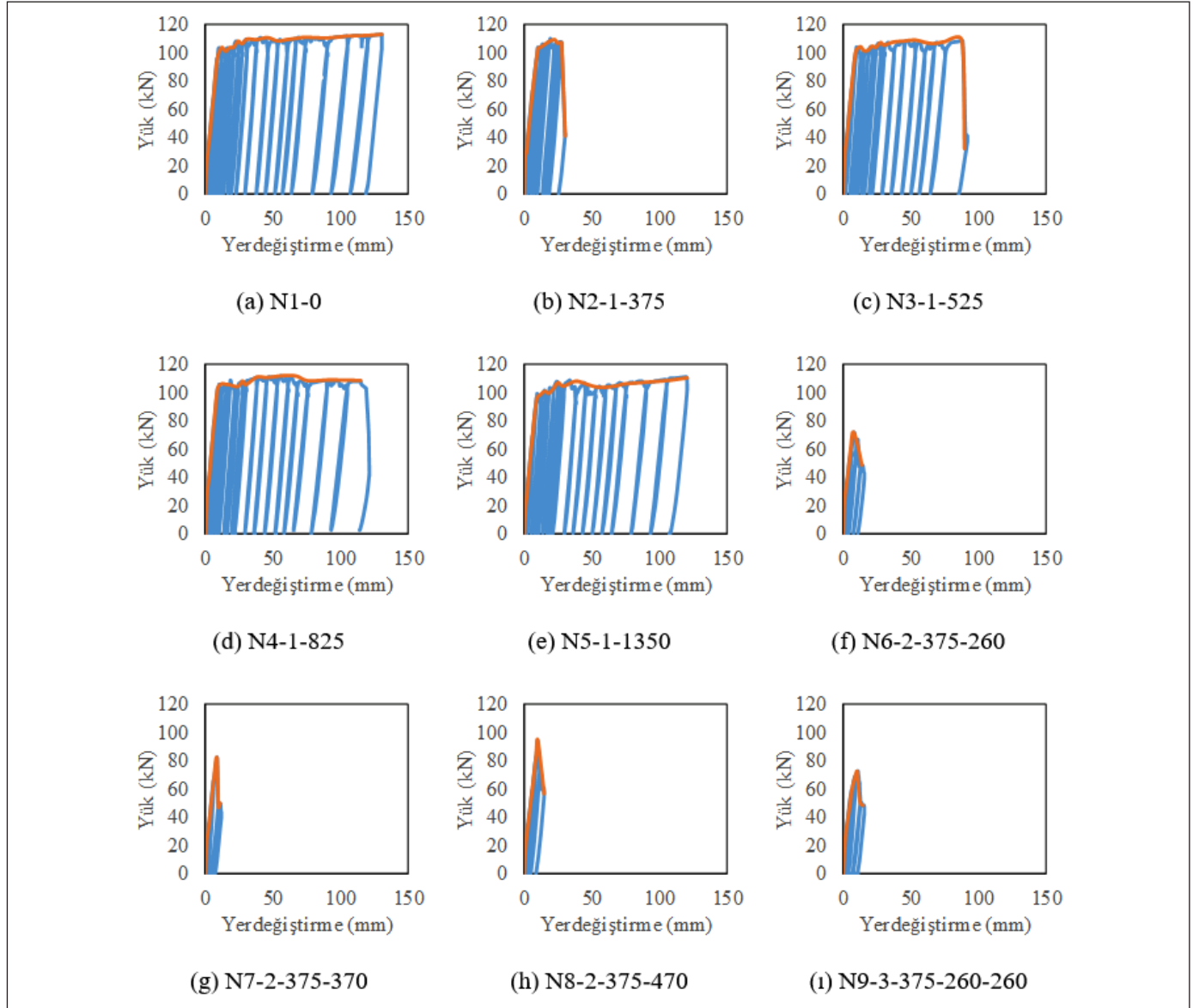
numunelerde (N4-1-825, N5-1-1350) güç tükenmesi sırasında, boşluğun üst tarafında meydana gelen eğik çatlamanın kiriş üstüne kadar uzanmasıyla bu bölgede beton basınç ezilmesinin de ortaya çıktığı görülmüştür (Şekil 6.d-e). Mesnete en uzak (tam ortasında) boşluk bulunan kiriş numunesinde (N5-1-1350) gözlenen davranış neredeyse boşluksuz kiriş (N1-0) davranışına benzemektedir. İki (N6-2-375-260, N7-2-375-370, N8-2-375-470) ve üç boşluklu (N9-3-375-260) numunelerde de güç tükenmesi boşluk etrafındaki ani kesme hasarı ile ortaya çıkmıştır (Şekil 6.f-ı). Ayrıca birden fazla boşluğa sahip numunelerde tek boşluklu numunelere göre daha az sayıda kılcal eğilme çatlaklarının ortaya çıktığı görülmüştür.

Deneysel sırasında elde edilen tüm numunelere ait çevrimsel yük – yerdeğiştirme grafikleri ve her bir çevrime ait tepe noktalarının birleştirilmesi ile oluşturulan zarf eğrileri

Şekil 7’de sunulmuştur. Grafikler, boşluk adedi ve yerleşim farklılığının eleman davranışını önemli derecede etkilediğini göstermektedir. İki ve üç boşluklu numunelerin tamamında kiriş ani şekilde gevrek kırılmaya maruz kalırken, tek boşluklu numunelerde boşluk açıklık ortasına yaklaştıkça boşluksuz referans kiriş numuneye yakın bir davranış sergilemiştir. Ancak boşluğun mesnete yakın bölgelerde konumlanmasıyla eleman yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve kısa bir süre sonra ani olarak güç tükenmesine ulaşmıştır. Benzer sonuçlar boşluksuz referans numunenin zarf eğrisi ile bir, iki ve üç boşluklu numunelerin zarf eğrilerinin kıyaslanması sonucunda da görülebilmektedir (Şekil 8).

Betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri (P), maksimum yerdeğiştirme (D), enerji tüketme kapasitesi ve eğilme rijitliği sonuçları Çizelge 3’te verilmiştir. Buradaki yerdeğiştirme maksimum yükün en fazla %15 azalma meydana geldiği





Şekil 7. Numunelere ait çevrimsel yük-yerdeğiştirme grafikleri ve zarf eğrileri.

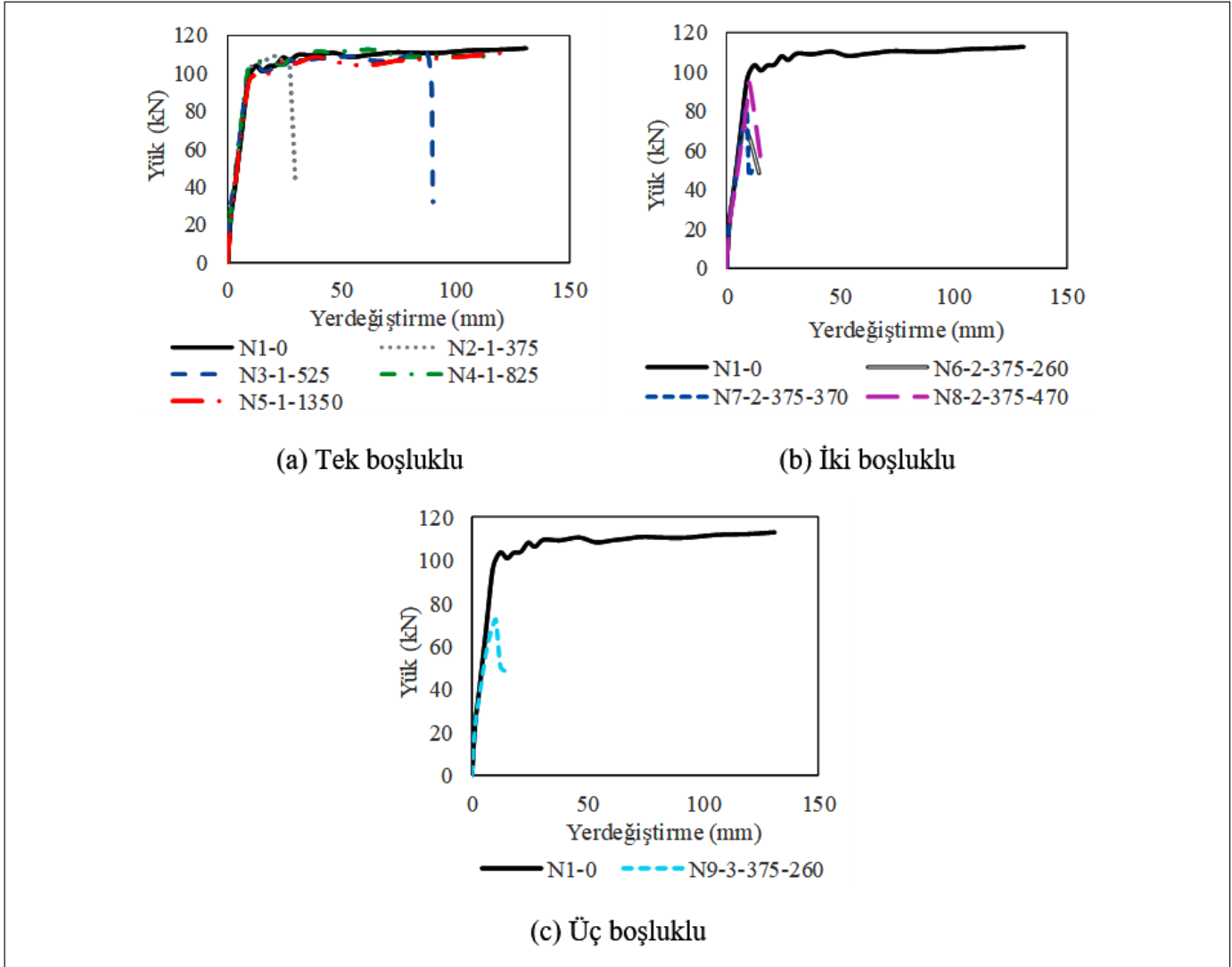
değere karşılık gelen yerdeğiştirme değerlerini temsil etmektedir. Yük-yerdeğiştirme grafiğindeki her bir çevrim içindeki alan hesaplanarak enerji tüketimi, elde edilen değerlerin toplanması ile de toplam enerji tüketimi elde edilmiştir. Burada toplam enerji tüketimi değeri maksimum yükün en fazla %15 azalmasına karşılık gelen değer için elde edilmiştir. Deney sonuçlarının yorumlanabilmesi açısından boşluklu numunelere ait değerler, boşluksuz referans numuneye oranlanarak elde edilen değişim yüzdeleri de Çizelge 3'te verilmiştir. Yüzdelerdeki artı işaret referans numuneye göre ortaya çıkan artışı, eksi işaret ise azalma oranını göstermektedir.

Çizelge 3 incelendiğinde tek boşluklu numunelerin yük taşıma kapasitesi değerleri boşluksuz referans numuneninki ile benzerlik göstermektedir. Ancak yerdeğiştirme değerleri açısından değerlendirildiğinde önemli azalmaların olduğu dikkati çekmektedir. En büyük azalma, boşluğun mesnete yakın olduğu numunelerde ortaya çıkmıştır. Boşluk açıklık ortasına doğru kaydıçça numunenin davranışı boşluksuz referans kirişe yaklaşmaktadır.

#### 4. Tartışma

Betonarme kirişlerin gövdesinde dikdörtgen, kare, daire veya üçgen şeklinde açılan boşluklar, kiriş davranışının





Şekil 8. Boşluk sayısına göre numunelerin zarf eğrilerinin kıyaslanması.

Çizelge 3. Numunelere ait deney sonuçlarının kıyaslanması.

Numune Adı	P (kN)	P (%)	D (mm)	D (%)	Enerji Tüketimi (kNmm)	Enerji Tüketimi (%)	Rijitlik (kN/mm)	Rijitlik (%)
N1-0	112.83	-	131	-	13978	-	41.15	-
N2-1-375	109.54	-2.92	28	-78.63	2238	-83.99	40.23	-2.24
N3-1-525	108.84	-3.54	88	-32.82	9524	-31.86	37.54	-8.77
N4-1-825	112.11	-0.64	115	-12.21	13172	-5.77	35.78	-13.05
N5-1-1350	110.59	-1.19	121	-7.63	13421	-3.98	24.61	-40.19
N6-2-375-260	71.96	-36.22	9	-93.13	332	-97.62	30.45	-26.00
N7-2-375-370	81.15	-28.08	9	-93.13	414	-97.04	24.85	-39.61
N8-2-375-470	94.00	-16.69	12	-90.84	483	-96.54	20.57	-50.01
N9-3-375-260-260	70.29	-37.70	11	-91.60	348	-97.51	22.61	-45.05

önemli derecede zayıflamasına yol açabilmektedir. Boşluklu kirişlerdeki boşluk şeklinin davranışı etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir (Özkal, 2017). Özellikle dairesel boşluğa sahip kirişlerin yük taşıma kapasitesinin, diğer boşluk şekillerine göre daha fazla olduğu farklı çalışmalarla ortaya konulmuştur (Aykaç ve Yılmaz, 2011; Al-Sheikh, 2014; Chin ve Doh, 2015; Shoeib ve Sedawy, 2017). Yapılan çalışma kapsamında betonarme kiriş gövdesinde sonradan ortaya çıkarılan dairesel boşlukların sayısının ve yerinin değişiminin kiriş davranışı üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Bu amaçla bir adedi referans boşluksuz kiriş, dört adedi tek boşluklu, üç adedi iki boşluklu ve bir adedi ise üç boşluklu olmak üzere dokuz adet kiriş numunesi üretilmiş ve dört noktali eğilme testine maruz bırakılmıştır.

Boşluksuz referans numunenin hasarı incelendiğinde, kiriş eğilme bölgesinde çok sayıda kılcal çatlakların meydana geldiği ve elemanın sünek eğilme hasarı ile güç tükenmesine ulaştığı görülmüştür. Boşluklu numunelerde ise ilk hasar genellikle boşluk etrafında kirişe doğru ilerleyen kesme çatlaması şeklinde ortaya çıkmıştır. Chin ve Doh (2015) tarafından yapılan boşluklu derin kirişlerin davranışının incelendiği çalışmada da, meydana gelen gerilme yığılmaları nedeniyle benzer hasarların oluştuğu vurgulanmıştır. Ortaya çıkan bu çatlamanın genişlemesi ile elemanda ani yük düşüşü meydana gelmiştir. Özellikle boşluk mesnete yaklaştıkça hasar ani olarak ortaya çıkmış ve elemanın gevrek bir davranış sergilemesine sebep olmuştur. Boşluğun açıklık bölgesinde bulunması durumundaki davranış ise neredeyse boşluksuz kirişe benzer şekilde çok sayıda eğilme çatlağı olarak ortaya çıkmıştır.

Tüm numuneler arasında en büyük taşıma gücü yükü boşluksuz referans kirişte ortaya çıkarken, en küçük taşıma gücü yükü üç boşluklu kirişte (N9) ve mesnete en yakın boşluklara sahip iki boşluklu kirişte (N6) meydana gelmiştir. Tek boşluklu numunelerde boşluğun yerine bağlı olarak referans numuneye oranla yük taşıma kapasitesinde %0.6 ile %3.5 arasında, iki boşluklu numunelerde %16.7 ile %36.2 arasında, üç boşluklu numunede ise %37.7 azalma meydana gelmiştir. Tek boşluklu numunedeki taşıma gücü yükü değerleri birbirine oldukça yakındır. İki boşluklu numunelerde ise boşluk mesnete yaklaştıkça numunenin yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Benzer olarak Elkersh vd. (2020), kare ve tek boşluklu betonarme kirişlerin davranışını incelenmiş ve boşluğun eğilme bölgesinde olması durumunda %0.1, kesme bölgesinde olması durumunda ise %5 azalma gerçekleştiğini vurgulamıştır.

Dolayısıyla literatürdeki çalışmalarda kirişteki boşluğun kesme bölgesinde olması durumunda yani boşluk mesnete yaklaştıkça eleman kapasitesinin daha fazla azalmış olduğunu doğrulamaktadır. Benzer sonuçlar Campione ve Minafo (2012) ile Al-Sheikh (2014) tarafından yapılan çalışmalarda da görülebilir. Özellikle iki boşluklu numunelerdeki ikinci boşluğun mesnete yaklaşması ile yük taşıma kapasitesindeki azalma daha büyük oranda ortaya çıkmaktadır. Taşıma gücü yükü boşluk sayısı arttıkça azalmaktadır.

Tek boşluklu numunelerde boşluk yerinin değişimi taşıma gücü yükünü çok değiştirmese de boşluğun mesnete yaklaşması ile yerdeğiştirme kapasitesinin oldukça azaldığı ve numunenin gevrek davranış sergilediği görülmektedir. Tek boşluklu numunelerde referans numuneye oranla yerdeğiştirme değerinde %7.6 ile %78.6 arasında, iki boşluklu numunelerde %90.8 ile %93.1 arasında, üç boşluklu numunede ise %91.6 azalma meydana gelmiştir. Genel olarak, buradaki küçük değerler boşluğun açıklık ortasında (eğilme bölgesinde), büyük değerler ise boşluğun mesnet tarafına yaklaştığı (kesme bölgesinde) durumdaki sonuçları ifade etmektedir. Dolayısıyla boşluk mesnete yaklaştıkça yerdeğiştirme kapasitesinin azaldığı söylenebilir. Elkersh vd. (2020) tarafından yapılan deneyler ve analizler sonucunda, kemerli kirişin yerdeğiştirme kapasitesinde, boşluğun eğilme bölgesinde olması durumunda %8, kesme bölgesinde olması durumunda ise %17 azalma gerçekleştiği vurgulanmıştır. Dolayısıyla literatürdeki çalışmalarla uyumlu olarak kesme bölgesindeki azalma eğilme bölgesindeki azalmadan daha fazla olarak karşımıza çıkmaktadır.

Numunelerin davranışı, yük-yerdeğiştirme grafiklerinden elde edilen enerji tüketme kapasiteleri açısından referans numuneye göre değerlendirildiğinde, tek boşluklu numunelerde enerji tüketme kapasitesinde %4.0 ile %84.0 arasında, iki boşluklu numunelerde %96.5 ile %97.6 arasında, üç boşluklu numunede ise %97.5 azalma meydana gelmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi boşluğun bulunması ile numunedeki enerji tüketme kapasitesi önemli miktarda azalmaktadır.

Numunelere ait rijitlik değerleri incelendiğinde, boşluk açıklık ortasına doğru yaklaştıkça ve boşluk sayısı arttıkça genel olarak numune rijitliği azalmıştır. Tek boşluklu numunelerde boşluğun yerine bağlı olarak rijitlik değerinde %2.2 ile %40.2 arasında, iki boşluklu numunelerde %26 ile %50 arasında, üç boşluklu numunede ise %45.1 azalma meydana gelmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, boşluk sayısı arttıkça ve boşluğun yeri mesnete yaklaştıkça numunenin yük taşıma kapasitesinin, yerdeğiştirme yeteneğinin ve enerji tüketme kapasitesinin önemli mertebelerde azaldığı söylenebilir.

## 5. Kaynaklar

- Abdo, T., Mabrouk, R. 2017.** Effect of web openings on the structural behavior of RC beams subjected to pure torsion. *MATEC W. Conf.*, 120: Doi: 10.1051/mateconf/201712001007
- Afet ve Acil Durum Başkanlığı. 2018.** Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. *Resmî Gazete*, Sayı:30364, Ankara.
- Al-Sheikh, SA. 2014.** Flexural behavior of RC beams with opening. *Concr. Res. Lett.*, 5(2): 812-824. Doi:-
- Aykaç, S., Yılmaz, MC. 2011.** Düzenli üçgen veya dairesel boşluklara sahip betonarme kirişlerin davranış ve dayanımı. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 26(3): 711-718. Doi:-
- Campione, G., Minafo, G. 2012.** Behaviour of concrete deep beams with openings and low shear span-to-depth ratio. *Eng. Struct.*, 41: 294-306. Doi: 10.1016/j.engstruct.2012.03.055
- Chin, SC., Doh, SI. 2015.** Behaviour of reinforced concrete deep beams with openings in the shear zones. *J. Eng. Tech.*, 6(1): 60-71. Doi:-
- Elkersh, IH., Lotfy, E., Abd Ellatif, E., Aboshosha, MR. 2020.** Flexural behavior of reinforced concrete beams with arched openings. *IOSR J. Mech. Civil Eng.*, 17(2): 25-36. Doi: 10.9790/1684-1702032536
- Jasim, WA., Allawi, AA., Oukaili, NK. 2019.** Effect of size and location of square web openings on the entire behavior of reinforced concrete deep beams. *Civ. Eng. J.*, 5(1): 209-226. Doi: 10.28991/cej-2019-03091239
- Kalkan, İ. 2014.** Düzenli boşluklu betonarme kirişlerin düzlem içi eğilme davranışları. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 29(1): 155-163. Doi: 10.17341/gummfd.94985
- Kalkan, İ., Kahraman, E., Başaran, B. 2019.** Farklı donatı oranlarına sahip düzenli kare boşluklu betonarme kirişlerin eğilme davranışları. *J. Inst. Sci. Tech.*, 9(3): 1417-1430. Doi: 10.21597/jist.474147
- Kumbasaroğlu, A., Korkmaz, E. 2020.** Betonarme kirişlerin içerisinden geçen tesisat borularının eğilme dayanımına etkisi. 4. Uluslararası GAP Matematik-Mühendislik Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi, s.12-35, Gaziantep.
- Lee, JK., Li, CG., Lee, YT. 2008.** Experimental study on shear strength of reinforced concrete continuous deep beams with web opening. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, p.12-17, Beijing.
- Murugesan, A., Narayanan, A. 2017.** Influence of a longitudinal circular hole on flexural strength of reinforced concrete beams. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, 22(2): 04016021. Doi: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000307
- Osman, BH., Wu, E., Ji, B., Abdulhameed, SS. 2017.** Shear behavior of reinforced concrete (RC) beams with circular web openings without additional shear reinforcement. *KSCE J. Civ. Eng.*, 21(1): 296-306. Doi: 10.1007/s12205-016-0387-7
- Özkal, FM. 2017.** Betonarme yüksek kirişlerde boşluk konumu ve şeklinin yapısal davranış üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. *Uludağ Üniv. Müh. Fak. Der.*, 22(2): 149-160. Doi: 10.17482/uumfd.338788
- Shoeib, AE., Sedawy, AE. 2017.** Shear strength reduction due to introduced opening in loaded RC beams. *J. Build. Eng.*, 13: 28-40. Doi: 10.1016/j.jobe.2017.04.004
- Yang, KH., Eun, HC., Chung, HS. 2006.** The influence of web openings on the structural behavior of reinforced high-strength concrete deep beams. *Eng. Struct.*, 28(13): 1825-1834. Doi: 10.1016/j.engstruct.2006.03.021
- Yoo, TM., Doh, JH., Guan, H., Fragomeni, S. 2007.** Experimental work on reinforced and prestressed concrete deep beams with various web openings. Proceedings of the 4th International Conference on Structural and Construction Engineering, Melbourne.