



Deprem Yükleme Etkisinde Betonarme Kirişlerin Davranışına Beton Basınç Dayanımı ve Kesme Donatısı Oranının Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Experimental Investigation of the Effects of Concrete Compressive Strength and Shear Reinforcement Ratio on the Behaviour of RC Beams Under Earthquake Load

Sercan Tuna AKKAYA^{1*}, Ömer MERCİMEK², Özgür ANIL³, Merve Nilay TOKGÖZ³

¹Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, TÜRKİYE

²Ankara Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, TÜRKİYE

³Gazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 08/02/2024 **Kabul / Accepted:** 30/05/2024 **Çevrimiçi Basım / Published Online:** 30/06/2024
Son Versiyon/Final Version: 30/06/2024

Öz

Betonarme kirişlerde ani ve gevrek olarak gerçekleşen kesme kırılması birçok sebepten meydana gelmektedir. Kirişlerdeki kesme donatısı oranının yetersizliği, kesme donatılarının kancalarının doğru şekilde bükülmemesi, perde veya büyük boyutlu kolonlara bağlanan kısa kirişlere çok yüksek değerlerde kesme kuvveti etki etmesi ve deprem yükleri etkisiyle ortaya çıkan ikinci mertebe etkiler bu nedenlerden başlıcalarıdır. Ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen Kahramanmaraş depremleri sonrasında betonarme kirişlerin birçoğunda yukarıdaki nedenlerden dolayı ağır kesme hasarları meydana gelmiştir. Bu çalışma kapsamında beton basınç dayanımı (düşük-normal dayanım) ile kesme donatıları arasındaki mesafe (75-300 mm) değişken olarak seçilmiş ve tersinir deprem yüklemesi etkisinde betonarme kirişlerin davranışına etkisi deneysel sonuçlar dikkate alınarak yorumlanmıştır. Beton basınç dayanımının artması ve kesme donatıları arasındaki mesafenin azalması maksimum taşıma kapasitesi, başlangıç rijitliği, deplasman süneklilik oranı ve enerji tüketim kapasitesi değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Kesme dayanımı yetersiz olan deney elemanlarında kesme göçmesi, kesme dayanımı yeterli olan deney elemanlarında ise eğilme göçme modu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

“betonarme kiriş, basınç dayanımı, kesme donatısı eksikliği, tersinir deprem yüklemesi”

Abstract

Sudden and brittle shear fracture in reinforced concrete beams occurs due to many reasons. Inadequate shear reinforcement ratio in the beams, improper bending of the hooks of the shear reinforcement, too high shear forces acting on short beams connected to shear walls or large-sized columns, and second-order effects caused by earthquake loads are the main reasons. After the Kahramanmaraş earthquake on 6 February 2023, many of the reinforced concrete beams suffered severe shear damage due to the above reasons. In this study, concrete compressive strength (low-normal strength) and the distance between shear reinforcement (75-300 mm) are selected as variables and their effects on the behaviour of reinforced concrete beams under reversible earthquake loading are interpreted by considering the experimental results. It was found that increasing the compressive strength of concrete and decreasing the distance between shear reinforcements increased the maximum bearing capacity, initial stiffness, displacement ductility ratio and energy consumption capacity values. Shear failure was observed in the experimental members with insufficient shear strength and flexural failure mode was observed in the experimental members with sufficient shear strength.

Key Words

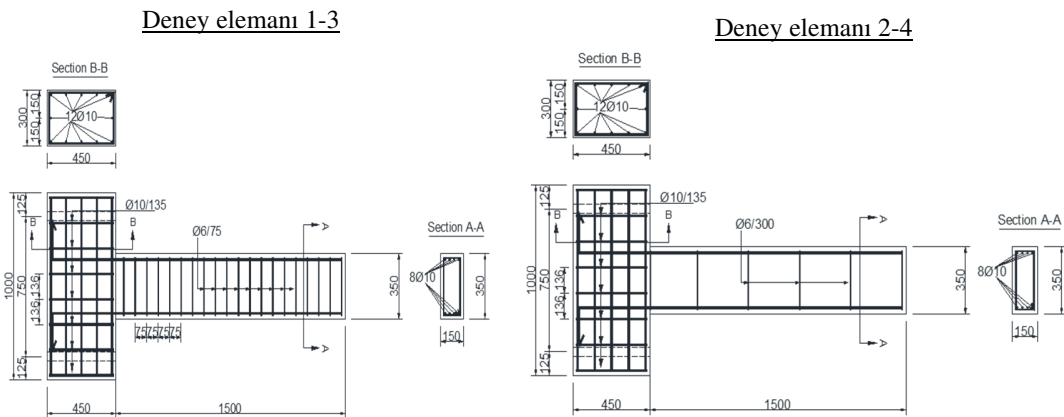
“RC Beam, compressive strength, shear deficient, cyclic earthquake load”

1. Giriş

Betonarme çerçeve türünde taşıyıcı sisteme sahip yapılardaki betonarme kirişler yapı için son derece önemli olup bu yatay taşıyıcı elemanların görevi döşemelerden gelen yükleri kolonlara iletmektir. Betonarme kiriş elemanlar çeşitli nedenlerden dolayı çok fazla kesme yüküne maruz kalabilmekte ve eğilme kapasiteleri yeterli olsa da kesme yüklerinden dolayı ciddi hasarlar alabilmektedir. Kesme yükünden dolayı meydana gelen göçme şekli önceden uyarı vermeden gerçekleştiği için çok fazla can ve mal kaybına neden olmaktadır. Gevrek bir göçme şekli olan kesme göçmesinde ortaya çıkan çatlakların genişliği eğilme çatlaklarına göre oldukça fazladır. Birçok betonarme yapıda gerek tasarımları aşamasında gerek üretim aşamasındaki uygulamalarda yapılan hatalar sonucunda betonarme kirişler ağır hasar alarak buldukları taşıyıcı sistemin stabilitesi ve deprem performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Betonarme kiriş elemanlarına yerleştirilen kesme donatısı oranı bu elemanların tersinir tekrarlanır deprem yüklemesi etkisi altındaki performanslarını ve yük-deplasman davranışlarını en fazla etkileyen özelliklerin başında gelmektedir (Altın vd., 2003, 2005). Kesme donatısının yetersiz olması başta betonarme kiriş elemanlar olmak üzere betonarme yapının tamamını olumsuz etkilemektedir. Yeterli oranda kesme donatısına sahip olmayan kirişler tersinir deprem yüklemesi etkisi altında hiçbir uyarı vermeden sünek olmayan ani ve gevrek kesme kırılması sergilerler. Ani ve gevrek kırılan bu tür kirişler, tasarım aşamasında öngörülen eğilme kapasitelerine ulaşmadan ve boyuna donatılarında akma meydana gelmeden çok daha düşük taşıma gücü düzeylerinde eğik kesme çatlaklarından dolayı göçmektedir (Altın vd., 2010, 2011, 2011; Alyousif vd., 2015, 2016). Tektonik olarak aktifliği ve depremselliği ile öne çıkan ülkemiz başta olmak üzere yeryüzünde de birçok büyük deprem meydana gelmiştir. Meydana gelen büyük depremlerden sonra ağır hasarlı ve deprem performansı düşük betonarme yapılarda saha incelemesi yapıldıktan sonra bu türdeki yapıların betonarme kirişlerinde de kesme dayanımı yetersizliği nedeniyle meydana gelen kesme kırılması örneklerine sıkça rastlanılmıştır. Son olarak ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapılan saha çalışmalarında betonarme kirişlerde kesme kırılmasının en fazla karşılaşılan ve öne çıkan kırılma mekanizmasının olduğu bir kere daha görülmüştür (Doğangün, 2004; Tapan vd., 2013; Baltzopoulos vd., 2023; Schmitt vd., 2023; Stein vd., 2023; Yurdakul vd., 2021; Erdik vd., 2023; Gülerce vd., 2023). Saha çalışmaları sonucunda karşılaşılan hataların başlıcaları tasarımda veya imalatla yapılan hatalardan dolayı kirişlerdeki kesme donatısının yetersiz olması, kirişlerin kolonlar ile birleştiği uç bölgelerinde kesme donatısı sıklaştırmasının yapılmaması, kirişlere yerleştirilen kesme donatılarının kancalarının 135° bükülmemesi nedeniyle açılmaları ve sargılama görevlerini yerine getirememeleridir. Bu hatalara ek olarak taşıyıcı sistem belirlenirken yapılan bir tasarım hatası olarak betonarme perde ve büyük boyutlu betonarme kolonlara bağlanan kısa kirişlerin ağır kesme hasarları aldıkları görülmüştür. Bu çalışma kapsamında betonarme kirişlerin deprem yüklemesi etkisi altındaki davranışlarına beton basınç dayanımının ve kesme donatısı aralığının etkisinin deneysel olarak incelenmesi için 4 adet $\frac{1}{2}$ ölçekli kiriş deney elemanı üretilmiş ve tersinir deprem yüklemesi etkisi altında bu deney elemanları test edilmiştir. Deney elemanlarının testleri sonucunda her bir eleman için yük-deplasman grafiği elde edilmiştir. Yük-deplasman grafikleri kullanılarak maksimum taşıma güçleri, başlangıç rijitlikleri, deplasman süneklik oranları, enerji tüketim kapasiteleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Deney elemanlarının rijitlikleri ile birlikte enerji tüketim kapasitelerinin değişimleri ve göçme mekanizmaları değerlendirilerek çalışmada yer alan değişkenlerin betonarme kiriş elemanın davranışına etkileri incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışma

Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin tersinir tekrarlanır deprem yüklemesi etkisi altındaki davranışlarına beton basınç dayanımının ve kesme donatısı aralığının etkilerinin yorumlanabilmesi için $1/2$ ölçekli 150×350 mm dikdörtgen kesit boyutlarında ve 1500 mm uzunluğunda toplam 4 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişlere deprem yüklemesinin uygulanabilmesi amacıyla kirişler $450 \times 300 \times 1000$ mm boyutlarında betonarme bir mesnet bloğu ile birlikte üretilmiş ve kirişler rijit test platformuna bu blok aracılığı ile mesnetlenerek deprem yüklemesi etkisi altında test edilmiştir. Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı detayları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı detayları

Deneyel çalışma kapsamında beton basınç dayanımı ve kesme donatısı aralığı olmak üzere iki farklı değişkene sahip toplam 4 adet deney elemanı üretilmiş olup bu deney elemanlarının özellikleri ve değişkenler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Deney elemanlarının özellikleri ve değişkenler

Deney Elemanı #	Beton Basınç Dayanımı f_c (MPa)	Kesme Donatısı Aralığı (mm)
1	25	75
2		300
3	10	75
4		300

Deneyel çalışmada kiriş deney elemanının ilk iki tanesi olan Deney Elemanı-1 ve Deney elemanı- 2 beton basınç dayanımları deprem yönetmeliğinde tanımlanan minimum beton dayanımı olan 25 MPa olarak üretilmiştir. 1 numaralı deney elemanının kesme donatıları 75 mm aralıkla yerleştirilmiş olup, bu deney elemanı yönetmeliklere uygun olarak donatılandırılmış kiriş elemanıdır. Deney elemanı-2'nin ise kesme donatıları 300 mm aralıkla yerleştirilmiş olup, bu deney elemanı kesme dayanımı bakımından yetersiz bir kiriş olarak tasarlanmıştır. Deneyel programda yer alan 3 ve 4 numaralı deney elemanlarının ise beton basınç dayanımları ülkemizdeki 2000 öncesindeki betonarme binaların beton basınç dayanımlarını temsil etmesi amacıyla 10 MPa olarak düşük dayanımlı beton ile üretilmiştir. Deney elemanı-3 ve Deney elemanı-4 deney elemanlarına kesme donatıları sırasıyla 75 mm ve 300 mm aralıkla yerleştirilmiş olup, bu deney elemanları sırasıyla kesme dayanımı yeterli ve yetersiz olarak tasarlanan düşük beton basınç dayanımlı test elemanlarıdır. Ülkemizdeki mevcut betonarme yapı stoku dikkate alındığında hazır beton kullanımının henüz yaygınlaşmadığı 2000 yılı öncesinde inşa edilen birçok betonarme yapıda yetersiz beton kalitesi öne çıkmaktadır. Bu sebeple gerçekleştirilen deneyel çalışmada mevcut yapı stokundaki yetersiz beton kalitesini temsil etmesi amacıyla düşük dayanımlı olarak 10 MPa basınç dayanımına sahip beton sınıfı tercih edilmiştir. Betonarme kiriş elemanlarında kesme kuvvetini karşılayan enine donatılar TS500’de verilen konsrütif esaslar gereğince sarılma bölgelerinde 150 mm’den daha fazla olmayacak şekilde tasarım yapılmalıdır. Aktif deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizde yaşanan büyük depremler sonrasında yapılan gözlemsel incelemeler neticesinde ağır hasar alan veya toptan göçen betonarme binalarda yetersiz kesme donatısı kullanımı en önemli hasar mekanizması olarak değerlendirilmektedir. Ülkemizdeki mevcut yapı stokunun durumunu göz önüne almak amacıyla yetersiz kesme donatısı aralığı olarak 300 mm seçilmiştir. Her bir deney elemanının beton basınç dayanımlarının belirlenebilmesi amacıyla her kiriş deney elemanından 150×150 mm boyutlarında 5 adet standart küp beton numunesi örneği alınmıştır. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları testlerinin gerçekleştirildiği gün küp numuneleri de test edilip belirlenmiştir. Hem deney elemanları hem de küp beton numuneleri aynı şekilde kür edilmiştir. Deney elemanları ve küp beton numuneleri beton dökümünün ertesi günü kalıplarından çıkarıldıktan sonra ilk 7 gün ıslak çuvallar ile sarılıp, sulanarak ve sulandıktan sonra üstü plastik brandalarla örtülerek kür uygulanmıştır. 7 günden sonra üstleri açılarak 21 gün laboratuvar ortamında bekletilmiş ve toplamda 28 günlük kür süreleri tamamlanmıştır. 28 gününün sonunda deney elemanlarının beton basınç dayanımlarının belirlenmesi için alınan standart küpler bilgisayar kontrollü ve yükleme hızı sabitlenebilen bir hidrolik pres kullanılarak 0.1 mm/saniye yükleme hızı ile test edilmiştir. Yapılan eksenel yükleme sonucunda 10 MPa ve 25 MPa olarak hedeflenen beton basınç dayanımına sahip kirişlerden alınan küp beton numunelerin ortalama basınç dayanımları sırasıyla 9.9 MPa ve 24.9 MPa olarak hesaplanmıştır. Eksenel basınç testi sonucunda üretilen deney elemanlarının beton basınç dayanımları ile hedeflenen beton basınç dayanımlarının oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde Ø10 nervürlü ve Ø6 düz donatı olmak üzere iki farklı çap ve türde S420 donatı kullanılmıştır. Tüm deney elemanlarında özdeş mekanik dayanım değerlerine sahip olabilmesi için tek seferde alınmıştır. Donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için her türdeki donatıdan alınan üçer adet test elemanına bilgisayar kontrollü bir deney düzeneği ile eksenel çekme testi uygulanmıştır. Yükleme hızı sabit olarak 0.1 mm/sn olarak ayarlanan test sistemi ile deneyleri gerçekleştirilen donatı örneklerinden elde edilen mekanik dayanım değerlerinin birbirlerine son derece yakın oldukları belirlenen nervürlü ve düz donatıların mekanik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri

Donatı Özellikleri	Ø6	Ø10
Akma Dayanımı (MPa)	421	546
Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	478	615
Elastik Modülü	201	208
Tür	Düz	Nervürlü

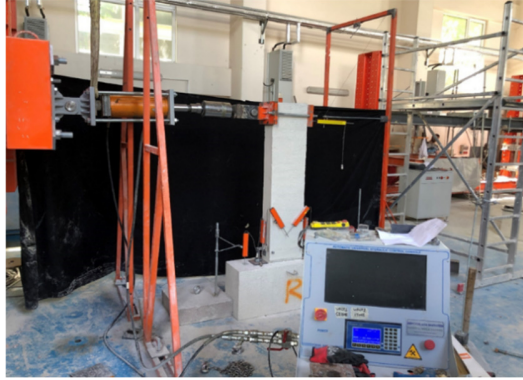
Deney elemanlarının üretilmesine Şekil 1’deki donatı detaylarına göre betonarme kirişlerin donatı kafeslerinin hazırlanması ve plywood ahşap levhalardan kalıpların hazırlanması ile başlanırken bu iki işlem eş zamanlı olarak yapılmıştır. Donatı ve kalıp işleri tamamlandıktan sonra donatı kafesleri plywood ahşap kalıplara yerleştirilerek deney elemanları beton dökümüne hazır hale

getirilmiştir. Beton dökümünde hazır beton kullanılmış, döküm sırasında betonun yerleştirilmesi, hava boşluğu kalmaması için vibratör kullanılmış ve kalıpların doldurulması tamamlandıktan sonra beton yüzeyi düzeltilerek beton dökümü tamamlanmıştır. Beton dökümü tamamlanan deney elemanlarına kür uygulandıktan sonra, deney elemanları laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır. Deney elemanlarının üretilmesi ve kür aşamalarında alınmış fotoğraflardan seçilen örnekler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deney elemanlarının üretim ve kür aşamaları

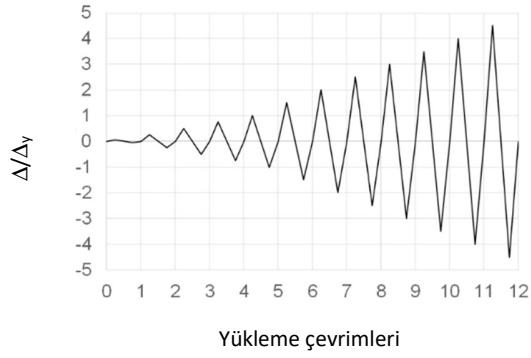
Deneyel çalışma kapsamında üretilen betonarme kiriş deney elemanlarının rijit laboratuvar döşemesine sabitlenmesinde kiriş uç bölümünde yer alan betonarme blok üzerinde bırakılan iki adet delik kullanılmıştır. Kirişler bırakılan deliklerden 45 mm çapında yüksek dayanımlı çelikten üretilmiş bulonlar ile bağlanarak mesnetlenmiştir. Mesnetlenen deney elemanları rijit laboratuvar duvarına bağlanan bir hidrolik yükleme sistemi ile tersinir tekrarlanır deprem yüklemesi etkisinde test edilmiştir. Çalışmada kapsamında kullanılan deney düzeneği Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği ve deneyde kullanılan ekipmanlar

Deneyler 1000 kN yükleme kapasiteli ve buna ek olarak yükleme hızı sabit olarak ayarlanabilen bir hidrolik yükleme sistemi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan yükleme ise 600 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Deney elemanlarından birbirinden farklı konumlarda deplasman ölçer (LVDT) ile ölçümler alınmıştır. Betonarme kiriş deney elemanlarının deprem yüklemesinin uygulandığı uç noktasından LVDT ile deplasman ölçümü alınmış ve kiriş uç noktasına uygulanan yük-deplasman grafikleri takip edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları uç noktalarındaki deliklerden rijit laboratuvar döşemesine yüksek dayanımlı bulonlar ile hareket etmeyecek şekilde bağlanmasına rağmen tersinir tekrarlanır yükleme etkisiyle bulonlarda meydana gelebilecek gevşemeler nedeniyle deney elemanlarında meydana gelebilecek rijit ötelenme ve dönme hareketleri de iki adet LVDT ile ölçülmüştür. Bu rijit ötelenme ve dönme hareketleri ile kiriş uç noktasında meydana gelebilecek deplasmanlar kiriş uç deplasmanı değerinden çıkartılarak deney elemanlarında deprem yüklemesi nedeniyle meydana gelen net deplasman değeri hesaplanmıştır. Yük-deplasman grafikleri mesnet hareketlerinin etkilerinin çıkarıldığı net deplasman değerleri kullanılarak çizilmiştir. Ayrıca betonarme kiriş deney elemanlarının mesnet bloğuna bağlandığı uç bölümünde kiriş üst ve alt yüzeyinden iki LVDT ile eğrilik ölçümü ve kiriş yan yüzeyine çapraz şekilde yerleştirilen iki LVDT ile kesme çatlağı genişlikleri de ölçülmüştür.

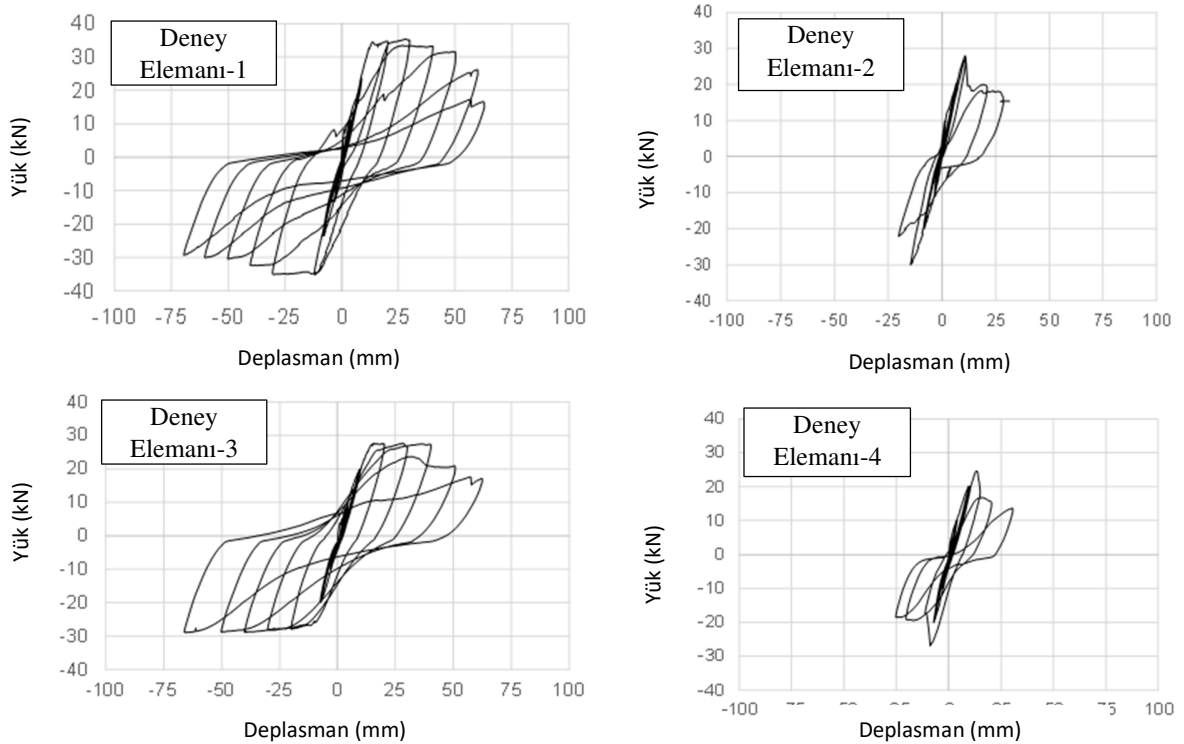
Deney elemanlarına uygulanan yük, ölçülen deplasmanlar ve birim deformasyon değerlerinin hepsi bir veri toplama sistemi ile toplanarak bilgisayara aktarılmış ve kaydedilmiştir. Deney elemanlarına uygulanan yükleme geçmişi Şekil 4'te verilmiş olup, bütün deney elemanlarına özdeş yükleme çevrimleri uygulanmıştır. Deney elemanlarına uygulanan yükleme çevrimleri deplasman kontrollü olup, uygulanan yükleme çevrimlerinin tepe noktası deplasman değerleri (Δ) akma deplasmanı değerinin (Δ_y) katları şeklinde uygulanmıştır.



Şekil 4. Deney elemanlarına uygulanan yükleme çevrimleri

3. Deneysel Sonuçlar ve Yorumlar

Bu deneysel çalışma kapsamında beton basınç dayanımı ve kesme donatısı aralığı olmak üzere iki farklı değişkene sahip 4 adet 1/2 ölçekli betonarme kiriş elemanının tersinir deprem yüklemesi altında davranışlarına değişkenlerin etkilerinin tespit edilmesinde ve sonuçların yorumlanmasında her bir deney elemanı için elde edilen yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır. Deney elemanlarına uygulanan tersinir tekrarlanır deprem yüklemesi ve kirişlerin net deplasman değerleri kullanılarak çizilen ileri ve geri yöndeki yük-deplasman grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri

Deneysel çalışma kapsamında değişkenlerin betonarme kirişlerin tersinir deprem yüklemesi altındaki performansına etkilerinin yorumlanması için ileri ve geri yöndeki maksimum taşıma gücü ve deplasmanı, başlangıç rijitliği, deplasman süneklik oranları ve

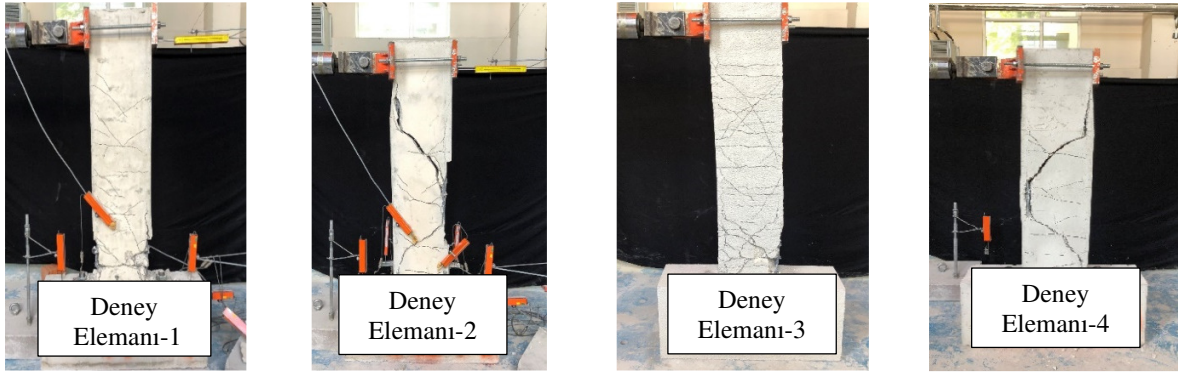
toplam kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca betonarme kiriş deney elemanlarında kullanılan boyuna donatıların ileri ve geri yöndeki akma dayanımına ek olarak deplasmanı değerleri de elde edilmiş, bütün bu değerlerden yola çıkarak deney elemanlarının göçme modları belirlenmiştir. Betonarme kiriş elemanların başlangıç rijitliği değerleri her deney elemanı için ileri ve geri yükleme çevrimleri için ayrı ayrı hesaplanmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak her deney elemanı için tek bir başlangıç rijitliği değeri elde edilmiştir. Deney elemanlarının deplasman süneklik oranları da betonarme kirişlere uygulanan ileri ve geri yükleme çevrimleri için ayrı ayrı hesaplanmış ve elde edilen iki deplasman süneklik oranının ortalaması alınarak her test elemanı için bir tek deplasman süneklik oranı elde edilmiştir. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerleri her yükleme çevriminin altında kalan alanın hesaplanması ve üst üste toplanması ile hesaplanmıştır. Deney elemanlarının toplam enerji tüketim kapasiteleri her betonarme kiriş için göçme noktasına kadar olan yükleme çevrimleri dikkate alınarak hesaplanmış ve bu noktadan sonraki yükleme çevrimleri hesaplamaya dahil edilmemiştir. Tüm deney elemanları için göçme noktası maksimum taşıma gücü değerinin %15 azalarak kapasitenin %85'ine düştüğü nokta olarak tanımlanmıştır. Her bir deney elemanı için elde edilen bu sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Kesme tipi hasar modu ile göçme mekanizması meydana gelen betonarme kirişlerde betonarme donatılar akma dayanımına ulaşmamıştır. Ancak, deneysel çalışma sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesinde kullanılan akma yükü betonarme donatısının değil, kesitin akma noktasını temsil etmektedir. Kesitin akma konumuna ulaştığı anda betonarme elemanda doğrusal elastik davranış son bularak hasar başlangıcı ile plastik deformasyonlar belirgin hale gelmektedir. Betonarme yapı elemanlarının tersinir tekrarları yanıl yükleme altında yük deplasman ilişkilerinin idealleştirilip akma ve nihai noktaların belirlenmesinde Sezen ve Mohle (2004) tarafından önerilen yaklaşım kullanılabilir. Böylece kesite ait akma ve nihai yük taşıma kapasitesi noktaları donatıdaki birim deformasyondan bağımsız olarak belirlenebilir.

Tablo 3. Deney elemanları için elde edilen deneysel sonuçlar

Deney Elemanı Numarası		1	2	3	4
Akma Yüğü (kN)	İleri	34.44	28	27.64	24.61
	Geri	-34.64	-30.09	-26.99	-26.98
Akma Noktasındaki Deplasman (mm)	İleri	13.49	10.78	15.69	13.26
	Geri	-12.64	-14.55	-12.39	-9.59
Maksimum Taşıma Kapasitesi (kN)	İleri	35.31	28	27.64	24.61
	Geri	-35.17	-30.09	-28.98	-26.98
Maksimum Taşıma Kapasitesindeki Deplasman (mm)	İleri	28.38	10.78	15.69	13.26
	Geri	-30.15	-14.55	-65.43	-9.59
Başlangıç Rijitliği (kN/mm)		7.59	6.61	5.41	4.63
Deplasman Süneklik Oranı		4.33	1	3.92	1
Kümülatif Enerji Tüketim Kapasitesi (kN-mm)		9268	1429	7458	1346
Göçme Modu		Eğilme	Kesme	Eğilme	Kesme

Deneysel sonuçlar incelendiğinde kesme dayanımı yeterli 25 beton basınç dayanımlı Deney elemanı-1'in maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği, deplasman süneklik oranı ve kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerleri kesme dayanımı yeterli 10 MPa beton basınç dayanımlı Deney elemanı-3'e göre sırasıyla %27.75, %40.3, %10.46, ve %24.27 oranlarından daha büyük değerler olduğu sonucuna varılmıştır. Kesme dayanımı yetersiz 25 beton basınç dayanımlı Deney elemanı-2'in maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği ve kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerlerinin kesme dayanımı yetersiz 10 MPa beton basınç dayanımlı Deney elemanı-4'ün sırasıyla yaklaşık 1.14 , 1.43, 1.07 katı iken deplasman süneklik oranının değişmediği tespit edilmiştir. Beton basınç dayanımları özdeş 25 MPa olan ancak kesme dayanımı yeterli Deney elemanı-1 ve yetersiz olan Deney elemanı-2 maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği, deplasman süneklik oranı ve kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerleri açısından karşılaştırıldığında Deney elemanı-1'in Deney elemanı-2'den sırasıyla %26.11, %14.83, %333, ve %548 oranlarında daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. 10 MPa beton basınç dayanımına sahip olan ancak kesme dayanımı birbirlerinden farklı olan Deney elemanı-3 ve Deney elemanı-4 numaralı deney elemanlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yeterli kesme donatılı 3 numaralı deney elemanı yetersiz kesme donatılı 4 numaralı deney elemanından maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği, deplasman süneklik oranı ve kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerleri açısından sırasıyla %12.3, %16.85, %292, ve %455 oranlarında daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Deney elemanları göçme modları açısından karşılaştırıldığında kesme dayanımı yeterli olan 1 ve 3 numaralı deney elemanlarında boyuna donatılarının akma kapasitesine ulaşmaları ile sünek eğilme kırılması gerçekleşmiştir. Kesme dayanımı yetersiz olan 2 ve 4 numaralı deney elemanlarında boyuna donatıları akma kapasitesine ulaşmadan ani ve gevrek kesme kırılması meydana gelmiştir. 1 ve 3 numaralı deney elemanlarında belirgin çatlaklar olmamasına karşın 2 ve 4 numaralı deney elemanlarında kiriş köşe noktalarından başlayan 45 ° kesme çatlakları meydana gelmiştir. Deney elemanlarında meydana gelen göçme modları ve çatlak dağılımları Şekil 6'da göstermiştir.



Şekil 6. Deney elemanlarının göçme modları ve çatlak dağılımları

4.Sonuç ve Öneriler

Betonarme yapılarda taşıyıcı sistemin önemli bir parçası olan kirişlerin deprem yüklemesi etkisi altındaki davranışları üzerinde en etkili parametrelerin başında kesme donatısı oranları gelmektedir. Tersinir tekrarlanır deprem yüklemesi etkisi altında kesme dayanımı yetersiz olan betonarme kirişler çok gevrek ve ani kesme kırılması sergileyerek ağır hasarlar alabilmekte veya tamamen yük taşıma kapasitelerini kaybederek göçebilmektedir. Ayrıca büyük ve yıkıcı depremler sonrasında yapılan incelemeler betonarme yapılarda kesme donatısı yetersizliğinin yanı sıra beton basınç dayanımı düşüklüğünün de görüldüğünü gözler önüne sermektedir. Bu çalışmada betonarme kirişlerin deprem yüklemesi etkisi altındaki davranışlarına beton basınç dayanımının ve kesme donatısı aralığı etkisinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla beton sınıfı ve kesme donatısı aralığı değişken olarak seçilen toplam 4 adet ½ ölçekli kiriş deney elemanı üretilmiş ve tersinir deprem yüklemesi etkisi altında bu deney elemanları test edilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- Beton basınç dayanımı arttıkça maksimum taşıma kapasitesine ek olarak başlangıç rijitliği, deplasman süneklilik oranı ve enerji tüketim kapasitesinde de artış meydana gelmiştir.
- Aynı beton basınç dayanımına sahip deney elemanlarından kesme dayanımı yeterli olan deney elemanı ile yetersiz olan deney elemanı karşılaştırıldığında kesme dayanımı yeterli olan deney elemanının akma dayanımı ve akma noktasında yaptığı deplasman değerinin daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.
- Akma dayanımı, akma noktasındaki deplasman, maksimum taşıma kapasitesi, maksimum taşıma kapasitesindeki deplasman, başlangıç rijitliği, deplasman süneklilik oranı, enerji tüketim kapasitesi açısından en yüksek değerlere sahip olan deney elemanının yüksek basınç dayanımlı ve kesme dayanımı yeterli olan 1 numaralı deney elemanı olduğu tespit edilmiştir.
- Kesme donatısı aralığı az olan yani kesme dayanımı yeterli olan deney elemanlarının göçme modu eğilme iken kesme donatısı aralığı fazla olan yani kesme dayanımı yetersiz olan deney elemanlarının ani ve gevrek kırılma olan kesme göçme moduna sahip olduğu gözlenmiştir.
- Beton basınç dayanımının maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği, deplasman süneklilik oranı ve kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerlerine etkisini incelemek amacıyla 1-3 ve 2-4 deney elemanları kendi arasında karşılaştırıldığında bu değerler sırasıyla ortalama olarak 1.2, 1.41, 1.05 ve 1.15 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- Kesme donatısı aralığının maksimum taşıma gücü, başlangıç rijitliği, deplasman süneklilik oranı ve kümülatif enerji tüketim kapasitesi değerlerine etkisini incelemek amacıyla 1-2 ve 3-4 deney elemanları kendi arasında karşılaştırıldığında bu değerler sırasıyla ortalama olarak 1.19, 1.15, 4.12 ve 6.01 kat arttığı gözlenmiştir.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında ilerleyen çalışmalarda kesmeye karşı dayanımı yetersiz olan deney elemanları farklı güçlendirme malzemeleri ile güçlendirilerek test edilebilir. Test sonuçlarının referans deney elemanı ile karşılaştırılmasından yola çıkarak güçlendirme malzemelerinin akma dayanımı, akma noktasındaki deplasman, maksimum taşıma kapasitesi, maksimum taşıma kapasitesindeki deplasman, başlangıç rijitliği, deplasman süneklilik oranı, enerji tüketim kapasitesine etkileri tespit edilebilir.

Referanslar

- Altin, S., Anil, Ö., Koprman, Y., Mertoğlu, Ç., & Kara, M. E. (2010). Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips. *Journal of reinforced plastics and composites*, 29(19), 2975-2991.
- Altin, S., Anil, Ö., & Kara, M. E. (2005). Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates. *Engineering structures*, 27(5), 781-791.
- Altin, S., Anil, Ö., Ocaklı, R. Ö., & Koprman, Y. (2011). Retrofitting of shear damaged RC beams using diagonal CFRP strips. *Journal of reinforced plastics and composites*, 30(17), 1495-1507.

Altin, S., Özgür, A. N. I. L., TOPTA, T., & Kara, M. E. (2011). Retrofitting of shear damaged RC beams using CFRP strips. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 11(3), 207-223.

Altin, S., Tankut, T., Anil, Ö., & Demirel, Y. (2003). Response of reinforced concrete beams with clamps applied externally: an experimental study. *Engineering Structures*, 25(9), 1217-1229.

Alyousif, A., Anil, O., Sahmaran, M., Lachemi, M., Yildirim, G., & Ashour, A. F. (2015). Tests of high-performance fiber-reinforced concrete beams with different shear span-to-depth ratios and main longitudinal reinforcement. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(18), 1491-1505.

Alyousif, A., Anil, O., Sahmaran, M., Lachemi, M., Yildirim, G., & Ashour, A. F. (2016). Comparison of shear behaviour of engineered cementitious composite and normal concrete beams with different shear span lengths. *Magazine of Concrete Research*, 68(5), 217-228.

Baltzopoulos, G., Baraschino, R., Cito, P., Chioccarelli, E., & Iervolino, I. Preliminary engineering report on ground motion data of the Feb. 2023 Turkey seismic sequence; 2023.

Erdik, M., Tümsa, M. B. D., Pinar, A., Altunel, E., & Zülfikar, A. C. (2023). A preliminary report on the February 6, 2023 earthquakes in Türkiye. *Research Briefs*.

Doğangün, A. (2004). Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, 26(6), 841-856.

Gülerce, Z., Askan, A., Kale, Ö., Sandıkkaya, A., Işık, N.S., İlhan, O., Can, G., Ilgac, M., Ozacar, A.A., Sopacı, E., et al. February 6, 2023 Kahramanmaraş-Pazarcik (Mw = 7.7) and Elbistan (Mw = 7.5) Earthquakes: Preliminary Analysis of Strong Ground Motion Characteristics; 2023.

Tapan, M., Comert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakcal, K., & Ilki, A. (2013). Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34, 606-628.

Schmitt R, Herman M, Barnhart W, Furlong K, Benz H. The 2023 Kahramanmaraş, Turkey, Earthquake Sequence. Published March 27, 2023. Accessed April 20, 2023. <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html>

Sezen, H & Moehle, JP 2004, Shear strength model for lightly reinforced concrete columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol 130(11) 1692-703.

Stein RS, Toda S, Özbakir AD, et al. Interactions, stress changes, mysteries, and partial forecasts of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquakes. Published March 2, 2023. Accessed April 20, 2023. <https://temblor.net/temblor/insights-stress-changes-mysteries-turkeyearthquakes-2023-15070/>

Yurdakul, Ö., Duran, B., Tunaboyu, O., & Avşar, Ö. (2021). Field reconnaissance on seismic performance of RC buildings after the January 24, 2020 Elazığ-Sivrice earthquake. *Natural Hazards*, 105(1), 859-88