



Araştırma Makalesi / Research Article

Donatı tipi ve göçme modunun geri dönüşüm agregası ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma fonksiyonları üzerindeki etkileri

Effects of Reinforcement Type and Failure Mode on Fragility Functions of Columns Incorporating Recycled Concrete Aggregate

Çağlar Göksu*

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maslak, Sarıyer, İstanbul, goksuc@itu.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçişi:

Geliş: 26 Ocak 2021
Düzeltilme: 20 Şubat 2021
Kabul: 21 Şubat 2021

Anahtar kelimeler:

Çerçeve, geri dönüştürülmüş agregası, kolon, kırılma eğrisi

Doi: 10.24012/dumf.868449

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 January 2021
Revised: 20 February 2021
Accepted: 21 February 2021

Keywords: Frame, recycled aggregate, column, fragility function

ÖZET

Bu çalışma, bir depremden sonra performansa dayalı yapısal değerlendirme için, atık betondan dönüştürülmüş agreganın ikame edildiği beton ile üretilmiş (i) göçme modu eğilme olup kompozit donatılı, (ii) göçme modu kesme olup kompozit donatılı kolonların kırılma eğrilerinin elde edilmesini içermektedir. Elde edilen kırılma fonksiyonlarının birbirleri ile karşılaştırılması sonucunda göçme modunun farklı olması durumunun geri dönüştürülmüş agregası ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma eğrileri üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Diğer taraftan, (i) bendinde belirtilen kolon tipi için elde edilen kırılma eğrileri literatürde geri dönüştürülmüş agregası ikame edilen beton ile üretilmiş, göçme modu eğilme olup konvansiyonel donatılı kolon ve çerçeveler için elde edilmiş olan kırılma eğrileri ile karşılaştırılarak donatı farkının bu tip yapısal elemanların kırılma eğrileri üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmada, veri olarak, literatürde yer alan geri dönüştürülmüş agregası ikame edilen kolon ve çerçevelerde deprem tipi yüklemeye sonra meydana gelen hasar türleri kullanılmıştır. Öteleme oranı, talep parametresi olarak dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, göçme modu ve donatı tipi farketmeksizin geri dönüştürülmüş agregası ikame edilen tüm kolonlar için veri tabanındaki düşük eksenel yüke maruz kalan kolonlarda daha büyük deformasyonların meydana geldiği, yüksek eksenel yüke maruz kalan kolonlarda "ileri hasar" ile ilgili olan öteleme oranlarının ise daha erken geliştiği tespit edilmiştir. Göçme modları aynı olup (eğilme) donatı tipleri farklı (kompozit veya konvansiyonel) olan, geri dönüştürülmüş agregası ikame edilen kolonların kırılma eğrilerinin özellikle ileri hasarı temsil eden hasar durumu için farklılık gösterdiği, bu farklılığın kompozit donatılı numunelerin rijitliğinin konvansiyonel donatılı numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklanabileceği tespit edilmiştir.

ABSTRACT

This study presents the fragility functions for reinforced concrete columns incorporating recycled aggregates, which are obtained from waste concrete, for performance-based seismic assessment after an earthquake. The columns evaluated in generating fragility functions are either (i) flexure-critic columns with composite reinforcement, or (ii) shear-critic columns with composite reinforcement. Based on the comparison of these fragility functions, the effect of failure mode on the fragility functions of the columns incorporating recycled aggregates is obtained. On the other hand, according to the comparison of the fragility functions obtained for the column type specified in the statement (i), and the fragility functions, available in the literature, obtained for flexure-critic reinforced concrete columns/frames incorporating recycled aggregates with conventional reinforcement, the effect of reinforcement type on the fragility functions is revealed. The test data used in the development of the fragility functions are the types of damage occurring after an earthquake-type loading of columns and frames incorporating recycled aggregates in the literature. The drift ratio is considered as the demand parameter. As a result, larger deformations are observed for the columns subjected to lower axial loads in the database, while the drift ratios associated with "severe damage" develop earlier for the columns exposed to higher axial loads regardless of the failure mode and type of reinforcement. It is also found that that the fragility functions of the columns incorporating recycled aggregates, which have similar failure mode but have different reinforcement type, differ, particularly, for the damage state representing severe damage. This difference may be due to the higher stiffness of the columns with composite reinforcement than the columns with conventional reinforcement.

* Sorumlu yazar / Correspondence
Çağlar Göksu
✉ goksuc@itu.edu.tr

Giriş

Son yıllarda, Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar karbon ayak izinde en az %40 azalma ve 2050'ye kadar karbon nötr bir kıta haline gelmeyi hedefleyen döngüsel bir ekonomi eylem planı başlatmıştır [1]. Bu hedeflere, ancak inşaat gibi büyük miktarlarda malzemelerin kullanıldığı sektörlerle odaklanılarak ulaşılabılır. Bunun nedeni, yeni yapıların inşası sırasında önemli miktarlarda doğal hammadde tüketilmesidir. Ayrıca, sismik tasarım kriterlerini karşılamayan veya inşaat kusurları barındıran eski yapıların yıkımı sırasında ortaya çıkan beton atıklarının bertaraf edilmesi atık alanı talebini artırmaktadır [2]. Bu nedenlerle, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından, atık betonlardan elde edilen agregaların dönüştürülerek yeni yapılacak yapıların yapı elemanı üretiminde kullanılması, yalnızca hammadde tüketimini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda atık sahası talebinin azaltılması gibi inşaat atıklarının yönetimine de katkıda bulunabilecektir.

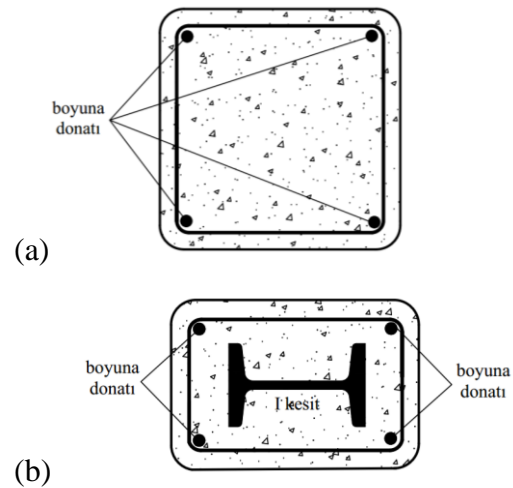
Son yıllarda, geri dönüştürülmüş beton agregalarının (GDA) yeni yapılacak yapıların yapı elemanı üretiminde kullanımının araştırılmasına yönelik olarak önemli sayıda deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır [3-9]. Bu çalışmaların sonuçları, yapışık bir harçla çevrelenmiş GDA'nın fiziksel ve mekanik özelliklerinin doğal agregadan (DA) farklı olmasına rağmen, uygun beton karışım tasarımı ve agregaların seçici kullanımı yoluyla yeni beton yapımında kullanımının etkili ve çevre dostu bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Dünyanın birçok ülkesindeki standartlarda yapısal elemanlar için DA'nın GDA ile belirli oranlarda değiştirilmesine izin verilmektedir [10]. Bu sebeple, bu ülkelerde bazı betonarme yapıların halihazırda GDA ile inşa edilmiş olması bu tür yapıların yakın gelecekte yaygınlaşabileceğini göstermektedir [11]. Bu nedenle, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş betonarme yapı elemanlarının deprem sonrası hasar görülebilirliği, hasar gören bu elemanların onarımı, onarım maliyeti ve onarım süresi açısından performansa dayalı sismik değerlendirmesi için olasılıksal bir yaklaşım geliştirmek önem kazanmaktadır.

Mevcut yapı stoklarının yapısal elemanlarında deprem sonrası oluşabilecek hasar tahmini için

kırılma fonksiyonlarının kullanımı, temel sismik risk/zarar değerlendirme araçlarından biridir ve tanımlanmış bir parametre için bir sınır durumuna ulaşma veya aşma olasılığının tahmin edilmesinde kullanılmaktadır [12]. Kırılma eğrileri genel olarak deneysel, analitik ve hibrit yöntemler kullanılarak üç farklı yaklaşım ile elde edilebilir. Bu çalışmada, kırılma eğrileri deneysel yaklaşım kullanılarak elde edilmiştir.

Deprem sonrası performansa dayalı yapısal değerlendirme için, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş betonarme kolonların ve çerçevelerin kırılma eğrileri literatürde ilk defa Goksu [13] tarafından modellenmiştir. Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada, kırılma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan verilerin tümü konvansiyonel donatılı, eğilme kritik kolon ve çerçevelere aittir. Şekil 1a'da örnek bir konvansiyonel donatılı kolona ait kesit sunulmuştur. Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, eğilme kritik, konvansiyonel donatılı kolon ve çerçevelerin deprem tipi yüklemeyi karakterize eden tersinir çevrimsel veya monotonik yüklemeye altında elde edilen deneysel verilerine dayanarak, üç farklı hasar durumu için kırılma eğrileri oluşturulmuş ve her bir hasar durumu için öteleme oranları açısından sınırlar belirlenmiştir. Ayrıca, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolon ve çerçevelerin deprem sonrası uygulanabilecek onarım kategorisinin tahmini için istatistiksel bir yaklaşım önerilmiştir.



Şekil 1. (a) Örnek konvansiyonel donatılı kolon kesiti, (b) Örnek kompozit donatılı kolon kesiti

Figure 1. Column section as an example (a) Conventional, (b) Composite

Ancak, literatürde, bugüne kadar, göçme modu farkının (eğilme veya kesme) veya donatı farkının (konvansiyonel veya kompozit) GDA ikame edilen beton ile imal edilen betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının kırılma eğrileri üzerindeki etkileri tanımlanmamıştır. Bu sebeple bu çalışmada,

(i) literatürde bulunan GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, göçme modu eğilme olup kompozit donatılı (Şekil 1b) kolon ve çerçevelerin verileri derlenerek kırılma fonksiyonları oluşturulmuştur. Bu kırılma fonksiyonları, Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada elde edilen kırılma eğrileri (GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, göçme modu eğilme olup konvansiyonel donatılı kolon ve çerçevelerin kırılma eğrileri) ile karşılaştırılmış, ve donatı farkının bu yapısal elemanların kırılma eğrileri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Farklı kesitlerdeki (I, H vb.) çelik kolonların lokal veya toptan burkulmasını azaltmak veya önlemek amacıyla bu tip kolonların beton ile sarılması sonucu ortaya çıkan kompozit donatılı kolonların yapılar da kullanımı oldukça yaygındır [14].

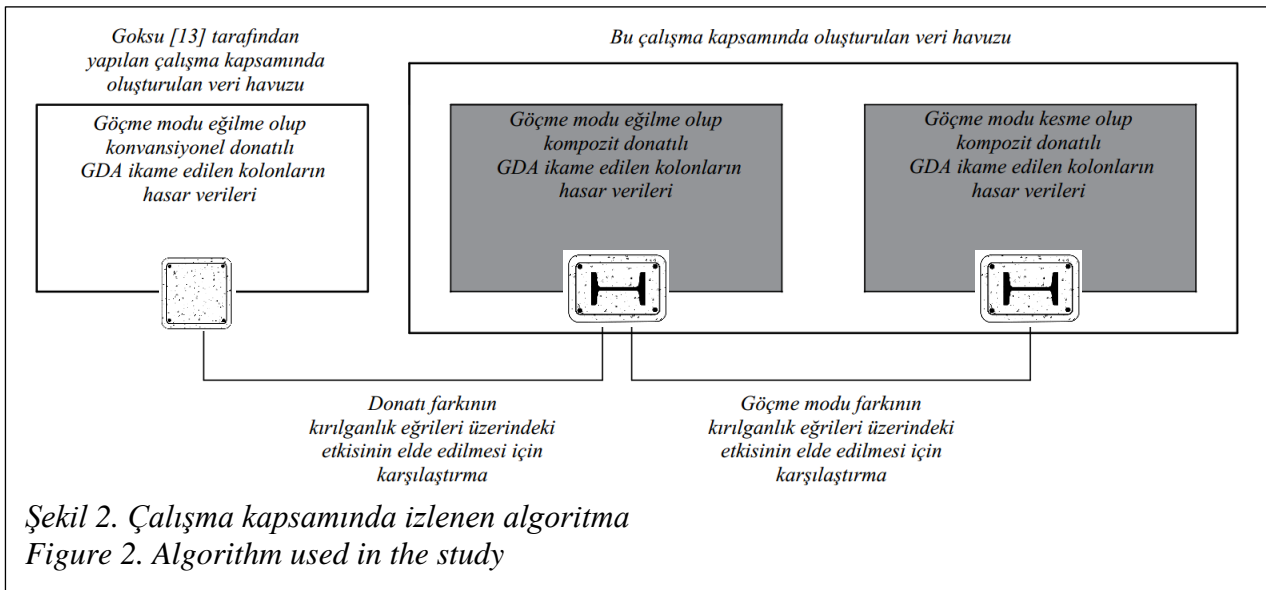
(ii) literatürde bulunan GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, göçme modu kesme olup kompozit donatılı kolonların verileri derlenerek kırılma fonksiyonları oluşturulmuştur. Bu kırılma fonksiyonları, (i) başlığı altında elde edilen kırılma eğrileri (GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, göçme modu eğilme olup kompozit donatılı kolon ve çerçevelere ait) ile

karşılaştırılmış, ve göçme modunun yapısal elemanların kırılma eğrileri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapı elemanı tipi olarak kolon seçilmesinin sebebi kolonların bir yapının taşıyıcı sistem elemanları arasında birincil derecede öneme sahip olmalarıdır. Bu çalışma kapsamında izlenen algoritma Şekil 2’de özetlenmiştir.

Veri Tabanının Oluşturulması

Literatürde sınırlı sayıda bulunan eğilme veya kesme kritik göçme moduna sahip kompozit donatılı olup GDA ikame edilen beton ile üretilmiş tüm kolon ve çerçevelerin deney verileri [3-4, 8] derlenerek bir veri tabanı oluşturulmuş ve bu veriler kırılma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır. Veri tabanında yer alan numunelerin karakteristik özellikleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1’den de görüleceği üzere, kolon/ çerçevelerin üretiminde kullanılan GDA oranı %30 ile %100, kolonların yükseklikleri ise 335 mm ile 1200 mm arasında değişmektedir. Kolonların, aksel yük kapasitelerinin %30-90’ı arasında değişen aksel yükler altında test edildiği, 40 MPa ile 52 MPa arasında değişen beton basınç dayanımına sahip oldukları görülmektedir. Tüm numuneler tersinir çevrimsel yükleme altında test edilmiştir.



Şekil 2. Çalışma kapsamında izlenen algoritma
Figure 2. Algorithm used in the study

Tablo 1. Kompozit kesitli olup GDA ikame edilen beton ile üretilmiş betonarme kolonların/çerçevelerin kırılma fonksiyonlarını oluşturmak için kullanılan verilerin özeti

Table 1. Summary of data of RAC columns/frames with composite sections used for generating the fragility functions

Araştırma	Numune adı	Numune tipi	GDA oranı (%)	Numune kesit alanı (mm×mm)	h (mm)	ρ_l (%)	Boyuna donatı çapı ve sayısı	Donatı tipi	ρ_t (%)	Enine donatı çapı	s (mm)	N_o (%)	f_c' (MPa)
Ma vd. [3]	SRRC12*	Kolon	70	180×240	930	4.98 I donatı, 1.42 boyuna donatı	4 Φ 14+ No14 I donatı	HRB 335+ Q235 I donatı	1.36	Φ 8	90	60	51
	SRRC13*		100	180×240	930				1.36	Φ 8	90	60	48
	SRRC14*		100	180×240	930				1.36	Φ 8	90	30	48
	SRRC15*		100	180×240	930				1.36	Φ 8	90	90	48
	SRRC16*		100	180×240	930				1.02	Φ 8	120	60	48
	SRRC17*		100	180×240	930				2.04	Φ 8	60	60	48
Ma vd. [4]	SRRC2**	Kolon	30	180×240	335	4.98 I donatı, 1.42 boyuna donatı	4 Φ 14+No 14 I donatı	HRB 335+ Q235 I donatı	1.36	Φ 8	90	60	50
	SRRC3**		70	180×240	335				1.36	Φ 8	90	60	52
	SRRC4**		100	180×240	335				1.36	Φ 8	90	60	48
	SRRC5**		100	180×240	335				1.36	Φ 8	90	30	48
	SRRC6**		100	180×240	335				1.36	Φ 8	90	90	48
	SRRC7**		100	180×240	335				1.02	Φ 8	120	60	48
	SRRC8**		100	180×240	335				2.04	Φ 8	60	60	48
	SRRC10*		100	180×240	565				1.36	Φ 8	90	60	48
Liu vd. [8]	SRRCF1*	Çerçeve	100	180×240	1200	4.98 I donatı, 1.42 boyuna donatı	4 Φ 14+No 14 I donatı	HRB 400+ Q235 I donatı	-	Φ 8	-	40	40
	SRRCF2*		100	180×240	1200				-	Φ 8	-	40	40
	SRRCF3*		100	180×240	1200				-	Φ 8	-	40	40
	SRRCF4*		100	180×240	1200				-	Φ 8	-	60	40
	SRRCF5*		100	180×240	1200				-	Φ 8	-	40	40

f_c' : Beton basınç dayanımı; N_o : Eksenel yük oranı; s : Enine donatı aralığı; ρ_l : Boyuna donatı oranı; ρ_t : Enine donatı oranı

*: Göçme modu eğilme

** : Göçme modu kesme

Ma vd. [3] tarafından yapılan çalışmada, göçme modu eğilme olan kompozit donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar, sabit aksenal ve ters çevrimsel yatay yüklemeler altında test edilmiştir. Bununla birlikte, Ma vd. [4] tarafından yapılan çalışmada, göçme modu gerek kesme gerekse eğilme olan kompozit donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar sabit aksenal ve ters çevrimsel yatay yüklemeler altında test edilmiştir. Liu vd. [8] tarafından yapılan çalışmada kompozit kesitli, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş çerçevelerin deprem performansı incelenmiştir.

Hasar Durumları

Bu çalışmada değerlendirilen hasar için, Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada belirtilen hasar durumları dikkate alınmıştır. Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada hasar durumları GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, konvansiyonel donatılı, göçme modu eğilme olan kolon ve çerçeveler için belirlenmiştir. Bu çalışmada, kırılma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, kompozit donatılı, göçme modu eğilme veya kesme olan kolon ve çerçeveler ile ilgili deney verilerinin kapsamlı incelemesinin ardından, hasar sınıflarının, tipik hasar modellerinin ve çatlak tipolojilerinin Goksu [13] ile uyumlu olduğu görülmüş ve bu çalışmada da Tablo 2'de sunulan hasar durumları dikkate alınmıştır.

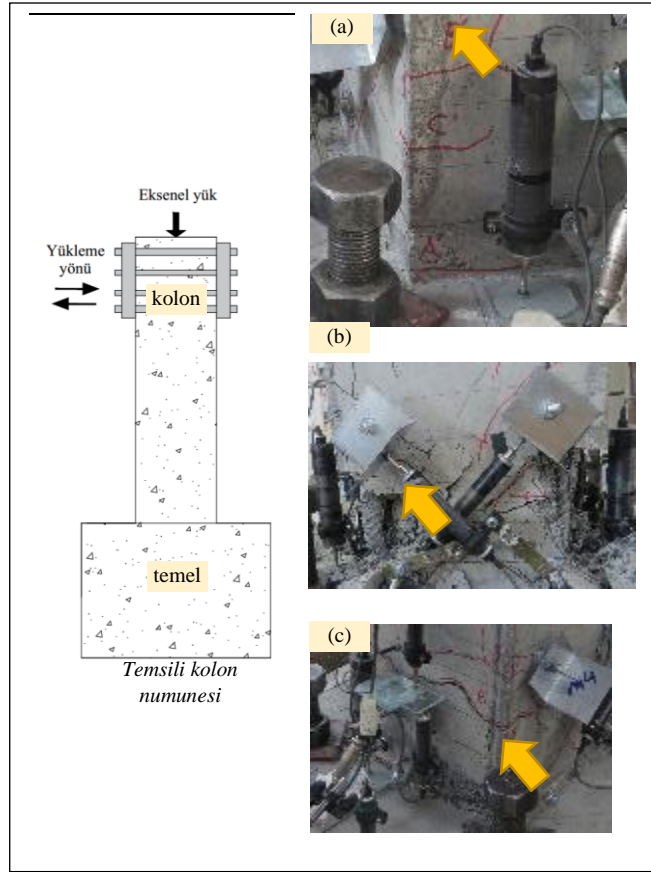
Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada, deprem tipi bir yüklemeye sonra meydana gelen fiziksel değişim dikkate alınmış ve kırılma eğrilerinin modellenmesinde kullanılan veriler deprem sonrası hasar istatistiklerine dayalı hasar durumları kullanılarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak, kırılma eğrilerinin gelişimi için bir eşik oluşturması için Hasar Durumu 1 (HD1), Hasar Durumu 2 (HD2) ve Hasar Durumu 3 (HD3) olmak üzere üç farklı hasar durumu tanımlanmıştır. Her bir hasar durumunun eşik değerleri, literatürde bulunan test sonuçlarının, FEMA 308 [15], ASCE 41-17 [16] gibi betonarme yapı elemanlarının deprem sonrası onarımı ve güçlendirilmesi için kullanılan standartların/spesifikasyonların değerlendirilmesi yoluyla belirlenmiştir. Hasar durumları Tablo 2'de listelenmiş ve 1.1'den 3.3'e kadar daha da alt kategorilere ayrılarak etiketlenmiştir. Tablo 2'de sunulan çeşitli hasar durumları için, veri tabanındaki kolonların

durumunu temsil eden fotoğraflar Şekil 3'te sunulmuştur.

Tablo 2. Hasar durumları

Table 2. Damage states

Hasar durumu (HD)	Hasar etiketi	Hasar gözlemi
1	1.1	0.5 mm'den az çatlak genişliği
2	2.1	Boyuna donatıda akma
	2.2	0.5 mm ile 3 mm arasında çatlak genişliği
3	3.1	Beton pas payında ezilme
	3.2	Boyuna donatıda burkulma
	3.3	3 mm'den fazla çatlak genişliği



Şekil 3. Tablo 2'de verilen çeşitli hasar durumları için veri tabanındaki kolonların durumunu temsil eden fotoğraflar, (a) 0.5 mm ile 3 mm arasındaki çatlak genişliği (Hasar Etiketi 2.2), (b) Boyuna donatıların burkulması (Hasar Etiketi 3.2), (c) 3 mm'den fazla çatlak genişliği (Hasar Etiketi 3.3) [17]

Figure 3. Photos representing the condition of the columns in the dataset for several damage states given in Table 2, (a) Crack width in between 0.5 mm and 3 mm (Damage ID 2.2), (b)

Buckling of longitudinal reinforcement (Damage ID 3.2), (c) Crack width more than 3 mm (Damage ID 3.3) [17]

Kırılmalık eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan veriler, test edilen numuneler üzerinde gözlenen hasar bilgisine dayanmaktadır. Tablo 1’de sunulmuş olan veri tabanında kayıtlı her bir kolon numunesi için Tablo 2’de sunulan her bir hasar etiketine karşı gelen öteleme oranları elde edilmiş ve kırılmalık eğrilerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Kırılmalık eğrilerinin geliştirilmesinde kullanılan hasar verisi sayıları Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Kırılmalık fonksiyonlarını oluşturmak için kullanılan verilerin özeti

Table 3. Summary of test data used to create fragility functions

No	Araştırma	Numune adı	Her bir hasar durumu (HD) için hasar verisi sayısı		
			HD1	HD2	HD3
1		SRRC12	1	2	2
2		SRRC13	1	2	2
3	Ma vd. [3]	SRRC14	1	2	2
4		SRRC15	1	2	2
5		SRRC16	1	2	2
6		SRRC17	1	2	2
7		SRRC2	1	2	1
8		SRRC3	1	2	1
9		SRRC4	1	2	1
10	Ma vd. [4]	SRRC5	1	2	1
11		SRRC6	1	2	1
12		SRRC7	1	2	1
13		SRRC8	1	2	1
14		SRRC10	1	2	1
15		SRRCF1	1	2	2
16		SRRCF2	1	2	1
17	Liu vd. [8]	SRRCF3	1	2	1
18		SRRCF4	1	2	1
19		SRRCF5	1	2	1

Veri tabanına dahil edilen veri noktaları için, verilerin bildirilmesi durumunda, her bir hasar etiketine karşı gelen öteleme oranı bir veri noktası olarak tanımlanmıştır. Bu durumda, belirli bir hasar durumu için, her bir kolon ile ilgili bir veya daha fazla veri noktası tanımlanabilmektedir. Başka bir deyişle, belirli bir hasar durumu için birden fazla veri noktası olabilmektedir. Örneğin bir çalışmada 0.5

mm'den az çatlak genişliği için (Hasar Etiketi 1.1) ve boyuna donatıda burkulma için (Hasar Etiketi 3.2) öteleme oranlarının bildirilmesi durumunda, bu kolon için veri tabanına iki veri noktası kaydedilmektedir.

Verilerin İstatistiksel Analizi

Deprem tipi yükleme altında hasar görmüş olan 19 adet, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, kompozit donatılı kolonlar ve çerçevelerden elde edilen veriler kırılmalık eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

Kırılmalık Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Kırılmalık fonksiyonu, seçilen bir parametre için belirli bir eşğin ulaşılması ya da aşılması olasılığını gösteren grafiksel gösterimdir. Bu çalışmada, bir deprem sırasında kompozit donatılı olup GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların sismik performansını tahmin etmek üzere kırılmalık eğrileri oluşturulmuştur. Kırılmalık eğrilerinin geliştirilmesi için göz önünde bulundurulmuş hasar durumlarının tanımları Tablo 2’de sunulmuştur. Bu çalışmada, talep parametresi olarak kolon tepe noktasındaki en büyük yerdeğiştirme değerinin kolon yüksekliğine oranı olarak tanımlanan “öteleme oranı” kullanılmıştır. Kırılmalık eğrileri geliştirilirken FEMA P-58 [18]’de önerilen prosedürler takip edilmiştir.

Bu çalışmada, veri tabanındaki hasar verilerini karakterize etmek için kümülatif dağılım fonksiyonu olarak sayısal uygulamalarda kolay kullanımı ve yapısal değişkenlere uyumda başarılı sonuçlar vermesi sebebiyle lognormal olasılık dağılımı kullanılmıştır (Denklem 1) [19].

$$P(\text{HD} \geq d_i) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_i} \ln \left(\frac{d}{\theta_i} \right) \right] \quad (1)$$

Denklem 1’de, $P(\text{HD} \geq d_i)$, bir hasar durumuna (HD) ulaşma veya aşma olasılığı olarak tanımlanmaktadır ve öteleme oranına (d_i) bağlıdır. Standart normal (Gauss) kümülatif dağılım fonksiyonu Φ ile, logaritmik standart sapma β_i ile, kümülatif dağılım fonksiyonunun medyan değeri ise θ_i ile temsil edilmektedir.

İstatistiksel analiz için öncelikle veri tabanındaki 19 kolonun Tablo 2’de yer alan her bir Hasar Etiketi için öteleme oranı belirlenmiştir. Öteleme oranları daha sonra küçükten büyüğe doğru sıralanmıştır. Kümülatif olasılık fonksiyonunun

veri tabanı ile uyumlu olmasını sağlamak ve istatistiksel bir modelin dağılım parametrelerini tahmin etmek üzere En Büyük Olabilirlik Tahmini yöntemi kullanılmıştır (Denklemler 2-4).

$$\beta_i = \sqrt{\beta_r^2 + \beta_u^2} \quad (2)$$

$$\beta_r = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M \left[\ln \left(\frac{d_i}{\theta_i} \right) \right]^2} \quad (3)$$

$$\theta_i = e^{\left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln d_i \right)} \quad (4)$$

Denklemler 2-4'te, β_r test verilerinde gözlemlenen rastgele değişkenliği, β_u ($\beta_u = 0.10$) ise belirsizliği temsil etmektedir [17]. Test edilen örnek sayısı ise M ile gösterilmiştir. Kırılma eğrileri, lognormal dağılımın kalitesini değerlendirmek üzere Lilliefors testi kullanılarak değerlendirilmiştir (Denklem 5).

$$H = \max |P_i(d) - S_M(d)| \quad (5)$$

Denklem 5'te H Lilliefors test parametresini temsil etmektedir. Deneysel kümülatif dağılım fonksiyonu ve gözlemlenen örnekler için önerilen kümülatif dağılım fonksiyonu $S_M(d)$ arasındaki en büyük mutlak fark olarak tanımlanmaktadır.

Ampirik olarak türetilen, ve i 'inci sıralı gözleme karşılık gelen i 'inci kümülatif olasılık için $S_M(d)$, $(i-1/2)/M$ olarak hesaplanmıştır ($i=1, \dots, M$) [20-21]. Lilliefors testi, iki kümülatif olasılık dağılımı fonksiyonunun (tahmin edilen ve gözlemlenen) benzerliğini ölçen bir Kolmogorov-Smirnov (K-S) testidir. Elde edilen H değeri, %5 anlamlılık düzeyinde kritik test parametresi H_{crit} ile karşılaştırılarak iki fonksiyon arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığı belirlenmektedir (Denklem 6 ve 7). Bu anlamlılık düzeyinde, Denklem 7 sağlanır ise sıfır hipotezi H_0 kabul edilmekte, aksi halde reddedilmektedir.

$$H_{crit} = 0.895 / (M^{0.5} - 0.01 + 0.85M^{-0.5}) \quad (6)$$

$$H < H_{crit} \quad (7)$$

Göçme Modu Eğilme Olup Kompozit Donatılı, GDA İkame Edilen Beton ile Üretilmiş Kolonların Kırılma Fonksiyonları

Göçme modu eğilme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma fonksiyonları için En Büyük Olabilirlik Tahmini yöntemi kullanılarak tahmin edilen, her bir hasar durumu Lilliefors testi (H , H_{crit}) kullanılarak değerlendirilen logaritmik dağılım parametreleri (medyan θ_i , logaritmik standart sapma β_i) Tablo 4'te sunulmuştur. FEMA P-58'e [18] göre kırılma eğrisi %5 anlamlılık düzeyinde yapılan Lilliefors testini geçerse ve logaritmik standart sapma değeri 0.6'dan düşük ise kırılma fonksiyonu yüksek kalite olarak kabul edilmektedir. Tablo 4'ten görüldüğü üzere, bu gereksinimler eğilme kritik olup kompozit donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş tüm kolonlarda her bir hasar durumu için sağlanmaktadır.

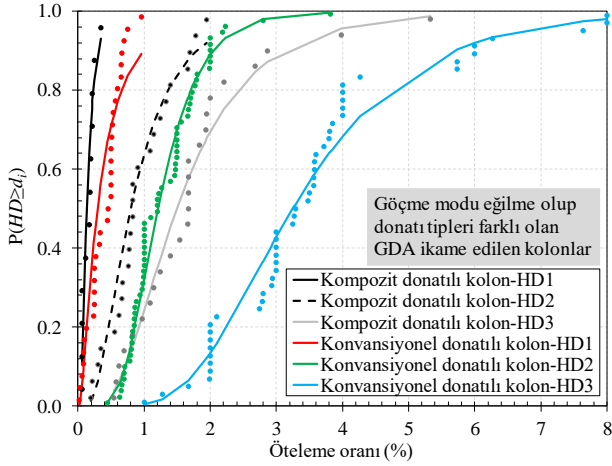
Şekil 4'te, göçme modu eğilme olup kompozit donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar için elde edilen kırılma eğrileri, Goksu [13] tarafından yapılan çalışmada elde edilen kırılma eğrileri (GDA ikame edilen beton ile üretilmiş, göçme modu eğilme olup konvansiyonel donatılı olan kolon ve çerçevelerin kırılma eğrileri) ile karşılaştırılmıştır. Böylece, donatı tipinin farklı olması durumunun kırılma eğrileri üzerindeki

Tablo 4. Geri dönüşüm agregası ikame edilen kolonların lognormal dağılım parametreleri ve Lilliefors testi sonuçları

Table 4. Lognormal distribution parameters and Lilliefors goodness-of-fit test results of RAC columns

Göçme modu	Donatı kesiti		HD1	HD2	HD3
Eğilme	Konvansiyonel donatılı kesit [13]	θ_i	0.30	1.21	3.25
		β_i	0.95	0.42	0.45
		H	0.20	0.14	0.13
		H_{crit}	0.15	0.11	0.12
	Kompozit kesitli donatı	θ_i	0.13	0.80	1.50
		β_i	0.65	0.63	0.58
		H	0.19	0.12	0.11
		H_{crit}	0.24	0.18	0.17
Kesme	Kompozit kesitli donatı	θ_i	0.35	1.75	3.21
		β_i	0.16	0.37	0.26
		H	0.22	0.20	0.11
		H_{crit}	0.30	0.23	0.30

etkisi araştırılmıştır. Şekil 4'ten görüldüğü üzere, sınırlı sayıda veri olmasına rağmen deneysel veriler ile kırılma eğrileri uyum içindedir. Şekil 4'ten görüldüğü üzere, eğilme kritik olup kompozit donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda HD1 (ilk çatlamanın başlangıcı), HD2 (donatı akması ve orta seviyede çatlamanın başlangıcı) ve HD3 (ciddi hasar) hasar durumları sırasıyla %0.06-%0.35, %0.19-%1.95, %0.54-%5.33 öteleme oranı aralıklarında meydana gelmektedir.



Şekil 4. Göçme modları aynı olup (eğilme) donatı tipleri farklı olan (kompozit veya konvansiyonel) GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar için kırılma eğrileri

Not: Kolon deneylerinden elde edilmiş veri noktaları da (ilgili ötelenme oranı ve olasılığı) grafikte daire şeklinde işaretçiler ile gösterilmiştir.

Figure 4. Fragility functions for flexure-critical RAC columns with different type of reinforcement (composite section or conventional reinforcement)

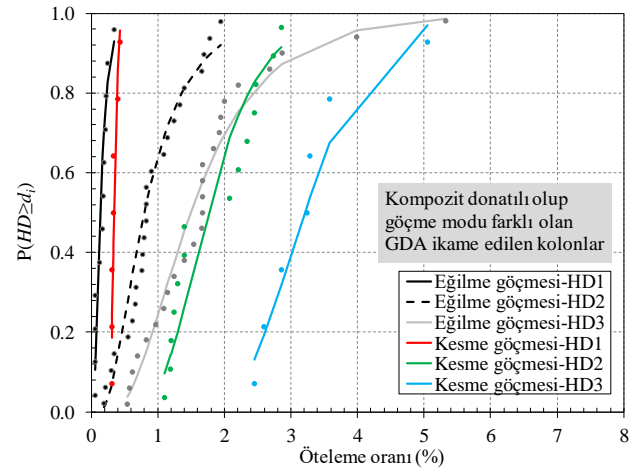
Note: The data points (related drift ratio and probability) obtained from tested columns are also shown with circle markers on the graph.

Göçme Modu Kesme Olup Kompozit Donatılı, GDA İkame Edilen Beton ile Üretilmiş Kolonların Kırılma Fonksiyonları

Göçme modu kesme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma fonksiyonları için En Büyük Olabilirlik Tahmini yöntemi kullanılarak tahmin edilen, her bir hasar durumu Lilliefors testi (H , H_{crit}) kullanılarak değerlendirilen logaritmik

dağılım parametreleri (medyan θ_i , logaritmik standart sapma β_i) Tablo 4'te sunulmuştur. Tablo 4'ten görüleceği üzere, kesme kritik olup kompozit donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş tüm kolonlar her bir hasar durumu için %5 anlamlılık düzeyinde yapılan Lilliefors testini geçmiştir.

Şekil 5'te göçme modu kesme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar için elde edilen kırılma eğrileri, göçme modu eğilme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar için elde edilen kırılma eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Şekilden görüleceği üzere veri sayısı sınırlı olmasına rağmen deneysel veri ile kırılma eğrileri uyum içindedir. Şekil 5'ten de görüleceği üzere, HD1, HD2, HD3 hasar durumları sırasıyla %0.31-%0.44, %1.10-%2.85, %2.45-%5.05 öteleme oranı aralıklarında meydana gelmektedir.



Şekil 5. Donatı tipleri aynı olup (kompozit donatılı) göçme modları farklı olan (eğilme veya kesme), GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar için kırılma eğrileri

Figure 5. Fragility functions for RAC columns, which have similar reinforcement type (composite section) while having different failure mode (flexure-critical or shear-critical)

Donatı Tipinin ve Göçme Modunun GDA İkame Edilen Beton ile Üretilmiş Kolonların Kırılma Eğrileri Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde, (i) göçme modu eğilme olup donatı tipleri farklı olan (konvansiyonel kesit veya kompozit kesit), GDA ikame edilen beton ile

üretmiş kolonların kırılma fonksiyonları ve (ii) donatıları aynı tip olup (kompozit kesit) göçme modları farklı olan (eğilme veya kesme), GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma fonksiyonları karşılaştırılmıştır. Kırılma fonksiyonları elde edildikten sonra öteleme talebi ile hasar arasındaki ilişkiyi etkileyen parametreler araştırıldığında aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır (Şekiller 4-5):

Göçme modunun eğilme veya kesme olması farketmeksizin kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda, göreceli olarak daha düşük aksel yük altında (Tablo 1) test edilen kolonların tüm hasar durumları için ilgili öteleme oranlarının diğer kolonların öteleme oranlarına göre daha fazla olduğu görülmüştür. Örneğin, göçme modu eğilme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda HD1, HD2, HD3 için en büyük öteleme oranına sahip numuneler sırasıyla ilgili veri tabanında yer alan diğer kolonlara göre daha düşük aksel yük altında test edilmiş olan SRRCF1 (Liu vd. [8]), SRRCF14 (Ma vd. [3]), SRRCF1 (Liu vd. [8]) numuneleridir. Düşük aksel yük altında test edilen kolonların belirli hasar durumları için ilgili öteleme oranlarının diğer kolonların öteleme oranlarına göre daha yüksek olması durumu göçme modu eğilme olup konvansiyonel donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda da gözlenmiştir [13]. Bu durum, düşük aksel yük altında betonun basınç bölgesi derinliğinin daha az olması sebebiyle betonun daha büyük deformasyon yapabilmesi ve dolayısıyla, betonda ezilmenin daha geç olması şeklinde açıklanabilmektedir [22].

Diğer taraftan, göçme modunun eğilme veya kesme olması farketmeksizin kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda veri tabanında en yüksek aksel yük oranına (aksel yük kapasitesinin %90'ına eşdeğer aksel yüke maruz kalan kolon) maruz kalan kolonlar için (Tablo 1, kolon SRRC15 ve kolon SRRC5), hasar durumu HD3 ile ilişkili öteleme oranının da en düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu öteleme oranını, aynı hasar durumu için, aksel yük kapasitelerinin %60'ına eşdeğer aksel yüke maruz (veri tabanında ikinci en yüksek aksel yük oranı) bırakılan kolonların öteleme oranları izlemektedir. Bunun nedeni, yüksek aksel yüke maruz kalan kolonlarda betonun daha erken ezilmesi ve dökülmesi şeklinde açıklanabilmektedir. Dökülmeden sonra betonun

basınca maruz kısmı artık mevcut olmadığından, donatıda oluşan gerilmeler sonucu donatıda burkulma meydana gelebilmektedir. Yüksek aksel yük altında test edilen kolonların belirli hasar durumları için ilgili öteleme oranlarının diğer kolonların öteleme oranlarına göre daha düşük olması durumu göçme modu eğilme olup konvansiyonel donatılı GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda da gözlenmiştir [13].

Göçme modu eğilme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda medyan değerleri göçme modu eğilme olup konvansiyonel donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların medyan değerlerine göre %33 ila %56 arasında, göçme modu kesme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların medyan değerlerine göre ise %53 ila %62 arasında daha düşük kalmaktadır. Bu farklılık, göçme modu eğilme olup kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlar için veri tabanının önemli bir kısmınının (yaklaşık olarak %42) çerçeve tipi numunelerden oluşması, çerçeve tipi numunelerin kolonlarında tüm hasar durumları için elde edilen öteleme oranlarının hem kolon hem de kirişlerdeki deformasyonları içermesi sebebiyle daha düşük değerlere doğru bir eğilim göstermesi şeklinde açıklanabilmektedir [18].

Şekil 4'te sunulan, göçme modları eğilme olup donatıları farklı tip olan, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma eğrileri özellikle hasar durumu HD3 için farklılık göstermektedir. Konvansiyonel donatılı, eğilme kritik numunelerde %8 oranına kadar öteleme oranı görülürken eğilme kritik, kompozit donatılı numuneler için öteleme oranı %5 civarındadır. Bu farklılık, kompozit donatılı numunelerin rijitliğinin konvansiyonel donatılı numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklanabilmektedir. Şekil 5'te sunulan, göçme modları farklı olup donatıları tipleri aynı olan, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma eğrilerinde de hasar durumu HD3 için farklılık göze çarpmaktadır. Bu farklılığın, kesme kritik numunelerdeki enine donatı oranının göreceli olarak uygun/yeterli olması sebebiyle (Tablo 1, %1.02-%2.04 arasında değişen oranlarda) daha ileri öteleme

oranlarının gözlenebilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Beton karışımındaki GDA oranının gerek göçme modu eğilme olup donatı tipleri farklı olan GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların öteleme oranları üzerinde gerekse donatıları aynı tip olup göçme modları farklı olan GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların öteleme oranları üzerinde etkisi gözlenememiştir.

Sonuçlar

Bu makale, bir depremde sonra performans dayalı yapısal değerlendirme için, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma eğrilerinin elde edilmesini içermektedir. Kırılma eğrilerinin elde edilmesinde, gerek eğilme kritik gerek ise kesme kritik kompozit donatılı kolon/çerçevelere ait deprem tipi yüklemelerden sonra meydana gelen hasar ile ilintili deneysel veriler kullanılmıştır. Göçme modu ve donatı tipi farkının GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma eğrileri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Öteleme oranı, talep parametresi olarak dikkate alınmıştır. İstatistiksel olarak analiz edilen verilere dayanarak aşağıdaki belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Gerek göçme modu eğilme olan gerekse kesme olan kompozit donatılı, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonlarda tüm hasar durumları için deneysel veriler ile teorik kırılma eğrilerinin uyumlu olduğu görülmektedir.
- Göçme modu ve donatı tipi farketmeksizin GDA ikame edilen beton ile üretilmiş tüm kolonlarda düşük eksenel yüklerde, betonun ezilmesinin ötelenmesini sağlayan daha küçük basınç bölgesi derinliği nedeniyle daha büyük deformasyonlar gözlemlenebilmektedir. Öte yandan, göçme modu ve donatı tipi farketmeksizin veri tabanındaki en yüksek eksenel yük oranına maruz kalan GDA ikame edilen beton ile üretilmiş tüm kolonlarda “ileri hasar” durumu ile ilişkili kolonun öteleme oranı değerinin, betonun erken ezilmesi ve dökülmesi nedeniyle en düşük olduğu gözlenmiştir.
- GDA ikame edilen beton ile üretilmiş çerçeve tipi numunelerin kolonlarında tüm hasar durumları için elde edilen öteleme oranları hem kolon hem de kirişlerdeki deformasyonları içerdiğinden daha düşük değerlere doğru bir eğilim göstermektedir.

- Göçme modları aynı olup (eğilme) donatı kesitleri farklı tip olan, GDA ikame edilen beton ile üretilmiş kolonların kırılma eğrileri özellikle “ileri hasar” durumu için farklılık göstermektedir. Bu farklılık, kompozit donatılı numunelerin rijitliğinin konvansiyonel donatılı numunelere göre daha fazla olmasından kaynaklanabilmektedir.

- Veri tabanında yer alan kolonlarda beton karışımındaki GDA oranının kolon öteleme oranları üzerinde etkisi gözlenememiştir.

Kaynaklar

- [1] European Commission (EU COM) Report 773 (2018). A European strategic long-term vision for prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, Brussels, Belgium.
- [2] Şeker, M., Bedirhanoglu, İ., (2019). Düşük Dayanımlı Betona Sahip Betonarme Kısa Kolonların Kesme Etkileri Altında Davranışlarının İncelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **10**(1), 385-395.
- [3] Ma, H., Xue, J., Luo, D., Zhang, X., (2013). Seismic Performance of Steel-Reinforced Recycled Concrete Columns under Low Cyclic Loads, *Construction and Building Materials*, **48**, 229-237.
- [4] Ma, H., Xue, J., Liu, Y., Zhang, X., (2015). Cyclic Loading Tests and Shear Strength of Steel Reinforced Recycled Concrete Short Columns, *Engineering Structures*, **92**, 55-68.
- [5] Soleimani, F., McKay, M., Yang, C.S.W., Kurtis, K.E., DesRoches, R., Kahn, L F., (2016). Cyclic Testing and Assessment of Columns Containing Recycled Concrete Debris, *ACI Structural Journal*, **113**(5), 1009-1020.
- [6] Saribas, I., Goksu, C., Binbir, E., Ilki, A. Shear-Flexure Interaction in RAC Columns Under Simulated Seismic Actions, *Engineering Structures*, **231**, 111746.
- [7] Saribas, I., Goksu, C., Binbir, E., & Ilki, A. (2019). Seismic performance of full-scale RC columns containing high proportion recycled aggregate. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **17**(11), 6009-6037.
- [8] Liu, Z., J. Xue, L. Qi, L. Gao, (2020). Experimental Study on Seismic Performance of Steel-Reinforced Recycled Concrete Frame with Infill Wall, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **29**(10), e1744.
- [9] Akyıldız, H., Efe, H., Önen, F., (2020). Baraj Yapımında Atık Malzemelerin Kullanımı: Kadıköy Göleti Örneği. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **11**(1), 439-445.

- [10] de Brito, J., Saikia, N., (2013). Recycled Aggregate in Concrete-Use of Industrial, Construction and Demolition Waste, Springer.
- [11] Xiao, J., (2018). Recycled Aggregate Concrete Structures, Springer, Berlin, Heidelberg.
- [12] Rossetto, T., Elnashai, A., (2005). A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-Based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures, *Engineering Structures*, **27**(3), 397-409.
- [13] Goksu, C., (2021). Fragility Functions for Reinforced Concrete Columns Incorporating Recycled Aggregates, *Engineering Structures*, 233, 111908.
- [14] Xiong, M.X., Xu, Z., Chen, G.M., Lan, Z.H., (2020). FRP-Confined Steel-Reinforced Recycled Aggregate Concrete Columns: Concept and Behaviour under Axial Compression, *Composites Structures*, **246**, 112408.
- [15] FEMA 308, (1998). Repair of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency.
- [16] ASCE/SEI 41-17, (2017). Seismic Rehabilitation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- [17] Saribas, I., (2018). Geri Dönüşüm Agregası İçeren Çevreci Betonun Yapısal Eleman Üretiminde Kullanılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] FEMA P-58-1, (2012). Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1- Methodology, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, US.
- [19] Tugsal Mert, Ü., (2016). Türkiye'deki Mevcut Betonarme Binaların Depremlerde Hasargörebilirliğinin İstatistiksel Kestirimi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] Cardone, D., (2016). Fragility Curves and Loss Functions for RC Structural Components with Smooth Rebars, *Earthquakes and Structures*, **10**(5) 1181-1212.
- [21] Gupta, B.C., Guttman, I., Jayalath, K.P., (2020). Statistics and Probability with Applications for Engineers and Scientists using Minitab, R and JMP, John Wiley&Sons, Inc., NJ, US.
- [22] Elwood, K.J., Moehle, J.P., (2005). Axial Capacity Model for Shear-Damaged Columns, *ACI Structural Journal*, **102**(4), 578-587.