



## Investigation of the effects of recycled aggregate concrete on the performance of reinforced concrete buildings

Zeynep Fırat Alemdar\*<sup>1</sup>, Yavuz Selim Kurt<sup>2</sup>

Civil Engineering Department, Yıldız Technical University, İstanbul, 34220, Turkey

### Highlights:

- Recycled aggregate concrete included silica fume
- Performances of reinforced concrete buildings constructed with normal and recycled aggregate
- Nonlinear pushover analysis of reinforced concrete buildings with frames or shear walls

### Keywords:

- Recycled aggregate concrete
- Nonlinear pushover analysis
- Performance evaluation
- Reinforced concrete building
- Turkey Building Earthquake Code

### Article Info:

Research Article  
Received: 29.07.2020  
Accepted: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.775698

### Correspondence:

Author: Zeynep Fırat Alemdar  
e-mail:  
zalemdar@yildiz.edu.tr  
phone: +90 212 383 5142

### Graphical/Tabular Abstract

Performance analyses of reinforced concrete buildings with frames or shear walls are presented. Recycled aggregate concrete and conventional concrete material properties utilized in the modelling are obtained from experiments. Nonlinear pushover analysis is considered to evaluate the earthquake performance levels of the buildings. The effects of recycled aggregate concrete on the performance of the buildings are also examined.

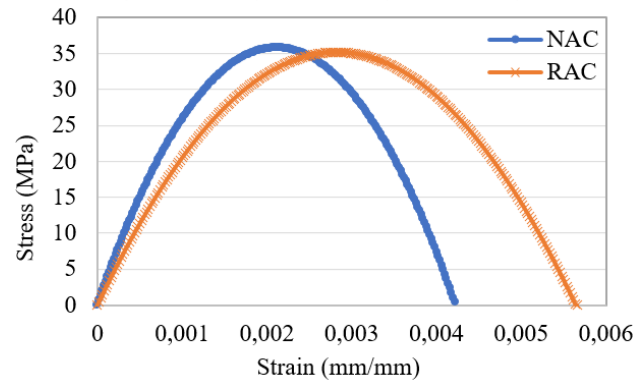


Figure A. Stress-strain relationships of recycled aggregate concrete and conventional concrete

**Purpose:** This study aims to investigate the effects of recycled aggregate concrete on the performance of reinforced concrete buildings constructed using frames or shear walls.

### Theory and Methods:

Performances of reinforced concrete buildings with frames or shear walls constructed containing 30% of recycled aggregates or C30/37 strength class conventional concrete are examined according to Turkey Building Earthquake Code. Nonlinear pushover analysis is used to evaluate the buildings under vertical loads and earthquake forces.

### Results:

It has been observed that the cross sectional damage levels of structural elements and shear force contributions of vertical bearing elements in buildings produced from recycled aggregate concrete are similar to the results obtained for traditional concrete buildings. It is determined that the earthquake performance levels of all the buildings examined are the same.

### Conclusion:

It may be an appropriate step for the use of RAC in green buildings since conventional concrete and recycled aggregate concrete show similar results in terms of earthquake performance of buildings. It is proposed that a more elastic design should be considered especially in cases where the structure is built using recycled concrete by considering the differences in the production of concrete building material in Turkey Building Earthquake Code.



## Geri kazanılmış agregalı betonun betonarme binaların performansına etkisinin incelenmesi

Zeynep Fırat Alemdar\*<sup>ID</sup>, Yavuz Selim Kurt<sup>ID</sup>

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, Esenler, İstanbul, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Silis dumanı içeren geri kazanılmış agregalı beton
- Doğrusal olmayan modelleme ve statik itme analizi
- Betonarme binaların hasar düzeylerinin belirlenmesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.07.2020

Kabul: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.775698

### Anahtar Kelimeler:

Statik itme analizi,  
geri kazanılmış agrega,  
betonarme çerçeve yapı,  
perdeli sistem,  
performans değerlendirme.

### ÖZ

Geri kazanılmış agregalı beton kullanılarak üretilen betonun (sürdürülebilir beton) yeni inşa edilecek betonarme çerçeve veya perde + çerçeve olarak projelendirilmiş binalarda dikkate alınmasını inceleyen bu çalışmada, geleneksel beton ve sürdürülebilir betondan elde edilen binaların şekil değiştirme temeline dayalı performans değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma kapsamında %30 oranında geri kazanılmış agregalı beton içeren sürdürülebilir beton ve C30/37 dayanım sınıfına sahip geleneksel beton kullanılarak üretilen kabul edilen 8 katlı ve 5 açıklıklı yapılar Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY 2018) göre doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemi ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda taşıyıcı sistem elemanlarında kat seviyelerinde oluşan kesme kuvvetleri ve katlar arası göreli ötelenme değerleri belirlenmiştir. Sürdürülebilir betondan elde edilen yapıların geleneksel betonlu yapılar gibi deprem etkilerine karşı gereken performansı sağladığı görülmüştür. Ayrıca sürdürülebilir betonun geleneksel betona göre daha elastik bir davranışa sahip olması nedeni ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde yapıların üretildiği beton malzeme farklılığının dikkate alınarak, yapının özellikle geri dönüşümlü beton kullanılarak inşa edildiği durumlarda, daha elastik olarak tasarlanması gerektiği önerilmektedir.

## Investigation of the effects of recycled aggregate concrete on the performance of reinforced concrete buildings

### H I G H L I G H T S

- Recycled aggregate concrete included silica fume
- Nonlinear modeling and static pushover analysis
- Damage assessment of reinforced concrete buildings

### Article Info

Research Article

Received: 29.07.2020

Accepted: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.775698

### Keywords:

Pushover analysis,  
recycled aggregate,  
reinforced concrete frame  
building,  
shear wall system,  
performance evaluation

### ABSTRACT

In this study, which examines the consideration of concrete (sustainable concrete) produced by using recycled aggregate in projected buildings as reinforced concrete frame or shear wall + frame systems, performance evaluation based on strain levels of buildings constructed with traditional concrete and sustainable concrete was made. Reinforced concrete buildings with eight floors and five-span assuming erected using 30% recycled aggregates or C30/37 strength class conventional concrete are examined according to Turkey Building Earthquake Code (TBDY 2018) by nonlinear pushover analysis. As a result of the analyses, the shear forces occurring at the floor levels in structural elements and the interstory drift ratios were determined. It has been observed that structures obtained from sustainable concrete provide the required performance against earthquake forces similar to the traditional concrete structures. Furthermore, it is proposed that a more elastic design should be considered especially in cases where the structure is built using recycled concrete by considering the differences in the production of concrete building material in Turkey Building Earthquake Code since recycled concrete shows more elastic behavior than conventional concrete.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geri kazanılmış agregalarının, normal beton agregası (NA) olarak kullanılabilmesi üzerine yapılan araştırmalar yaklaşık 40 yıldır devam etmekte ve geri kazanılmış agreganın malzeme özellikleri yoğun deneysel ve analitik çalışmalar ile belirlenmektedir. Ayrıca, geri kazanılmış agreganın (RA) betonda kullanımı üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış ve sürdürülebilir beton olarak da tanımlayabileceğimiz geri kazanılmış agregalı betonların (RAC) mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri belirlenmiştir [1]. Sürdürülebilir betonun yapısal elemanlarda kullanımı üzerine elastisite modülü ve enerji kapasiteleri araştırılmıştır [2]. Çin'de 1996-2011 yılları arasında yapılan kapsamlı araştırmalar ile RAC basınç, kayma ve çekme gerilmelerinin geleneksel betona (NAC) göre düşük olduğu ve RAC dayanımlarının betonda artan RA kullanım oranı ile düştüğü görülmüştür [3]. Ayrıca, RAC maksimum şekil değiştirme değerinin NAC maksimum şekil değiştirme değerinden büyük olsa da, RAC elastisite modülünün betonda artan RA kullanım oranıyla ters orantılı olarak azaldığı belirlenmiştir. RAC ile tasarlanmış çerçeve sistem binaların yapısal ve eleman (kiriş, kolon, döşeme, kiriş-kolon bağlantısı, perde) performansları incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda uygun tasarım ve yapım koşulları altında, inşaat sektöründe yapısal bir malzeme olarak RAC kullanımının uygun ve güvenilir olduğu belirlenmiştir.

Döndüren ve Şişik [4] genellikle aynı çimento miktarı ve işlenebilirlik için, geri kazanılmış agregalardan elde edilen beton mukavemetinin, geleneksel betondan bir sınıf daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Beton teknolojisinde (örn: işleme teknolojisi) yapılabilecek birkaç değişiklik ile geri kazanılmış agregaların kalitesinin yükseltilebilmesi ve inşaat betonu üretiminde, geri kazanılmış beton agregasının, ana agrega olarak kullanılabilmesi görülmüştür.

Çakır ve Dilbas [5] yaptıkları çalışmada, çeşitli oranlarda (%0-30-40-70-100) geri kazanılmış agrega (RA) içeriği ile çeşitli oranlarda (%0-5-10) silis dumanı (SF) mineral katkısının; çift-K kırılma modeli ve hayali çatlak modeli kullanılarak kırılma parametreleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Ayrıca, silis dumanı (SF) kullanılan geri kazanılmış agregalı betonun (RAC) donatılı kiriş performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda RA için tavsiye edilebilecek kullanım oranı %30, SF kullanımı için ise %5-10 oranındadır.

Sürdürülebilir betondan üretilen kolon [6, 7], kiriş [8, 9], perde duvar [10], döşeme [11, 12] ve kolon-kiriş birleşim bölgelerinin [13] monotonik ve çevrimsel yüklemeler altında performansları da bazı araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir. Bu çalışmalardan yeni beton üretiminde RA oranı arttıkça geri kazanılmış agregalı betonun ve bu betondan üretilen yapısal elemanların performanslarının, NA ile üretilen beton ve yapısal elemanların performanslarından daha az olduğu elde edilmiştir. Ayrıca donatılı betonarme kirişler üzerine yapılan çalışmalarda %50-100 oranlarında RA içeren RAC kullanılan kirişlerin NAC ile üretilen

kirişlere benzer yük-düşey yer değiştirme değerleri verdiği gözlenmiştir [14]. RAC içeren kirişlerin kesme kuvveti etkisi altındaki davranışının NAC içeren kirişler ile benzer olduğu sonucu elde edilmiştir [15].

Literatürde geleneksel betondan üretilen betonarme çerçeve ve perdelerden oluşan binaların TBDY 2018'e uygun olarak deprem performansının doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle belirlenmesi üzerine çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmı analitik olarak ve bir kısmı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda bazı çalışmalarda ise incelenen yapısal elemanın veya tüm yapının hem deneysel ölçümleri yapılmış hem de sonlu eleman yöntemi kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kazaz ve Gülkan [16] deneyleri gerçekleştirilmiş perde elemanlar için sonlu elemanlar yöntemi ile yönetmelikte verilen kriterlerin geçerliliğini araştırmış ve yeni koşullar önermiştir. Tuna Değer [17] 2010 yılında Japonya'da NIED E-Defense sarsma tablası üzerinde üç eksenli dinamik deneyleri yapılan tam ölçekli, dört katlı, taşıyıcı sistemi bir yönde perdelerden, diğer yönde ise iki açıklıklı çerçevelerden oluşan betonarme bir binanın sonlu elemanlar modelinden elde edilen hasar düzeylerini deneyde gözlemlenen hasarlar ile karşılaştırmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları arasında birtakım farklılıklar olduğu gözlenmiştir. Yönetmelikte verilen modelleme ve kesit hasar sınırları ile ilgili hükümlerin geçerliğinin irdelenmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Literatürde RAC içeren betonarme yapıların sismik performansını inceleyen deneysel çalışmalar ise azdır. Farklı oranlarda RA (%0-30-50-100) kullanılarak üretilen betondan elde edilen dört adet 1/2 ölçekli çerçeve (iki kolon ve bir kirişten oluşan) numuneler sabit düşey yükler ve düşük frekanslı çevrimsel yatay yükler altında test edilmiştir [18]. Uygun oranda RA karışımı ile elde edilen betondan tasarlanmış çerçeve sistemlerin Çin Deprem Standardına (GB 50011-2001) uygun olarak depreme dayanacak kadar iyi oldukları ve inşaat mühendisliğinde RAC içeren yapıların kullanılmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, iki açıklıklı altı katlı RAC çerçeve yapısının 1/4 ölçekli modeli bir sarsma masasında test edilmiş ve yapının dinamik karakteristikleri beyaz gürültü testleri ile değerlendirilmiştir [19]. Uyarılar daha şiddetli hale geldiğinde bina daha fazla hasar görmüş ve hasar betonun çatlamasından ezilmesine kadar değişiklik göstermiştir. Bununla birlikte, bina 1.170g'e kadar pik yer ivmesine (PGA) sahip yer hareketleri etkisi altında çökmemiştir. Görelî kat öteleme oranları, sismik kuvvet, görelî kat kesme kuvvetleri, histeresis eğrileri, kapasite eğrisi, süneklik katsayısı ve rijitlik azalması hesaplanmıştır. Test sonuçları, deprem bölgeleri dışında ve Sichuan Wenchuan deprem sonrası yeniden yapılanma alanında altı kattan daha az RAC çerçeve yapılarının uygulanmasının ve yaygınlaştırılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

Tamamı kaba RA içeren betondan üretildiği kabul edilen 2 katlı ve 2 açıklıklı düzlem çerçeve betonarme yapı Türkiye

Bina Deprem Yönetmeliği'ne [20] göre doğrusal olmayan statik itme yöntemiyle analiz edilmiş ve performans değerleri doğal agrega (NA) içeren betondan üretilen aynı taşıyıcı sistem özelliklerine sahip betonarme yapının performans sonuçları ile karşılaştırılmıştır [21]. Elde edilen sonuçlara göre RA içeren betonun ve NA içeren betonun dayanım ve elastisite modülleri arasında önemli oranda fark olmasına rağmen bu iki yapının taban kesme kuvveti-yerdeğiştirme eğrilerinin benzer olduğu görülmektedir. Bu eğrilerde RA yapısına ait rijitlik kaybına neden olan etkenin RA içeren betonun elastisite modülü olduğu ve her iki yapının da tüm performans göstergelerinin benzer olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın literatürdeki çalışmalara katkıları iki yönlüdür. Birincisi, geleneksel beton ve geri kazanılmış agrega ile üretilen beton kullanılarak, çerçeve ve perde+çerçeve (perdeli) olarak projelendirilmiş 8 katlı ve 5 açıklıklı dört farklı betonarme binanın performansları incelenmiştir. İkincisi, çalışmada kullanılan geri kazanılmış agregadan üretilen beton %30 geri kazanılmış agrega ve %5 oranında silis dumanı içermekte ve basınç dayanımı geleneksel betona çok yakın elde edilmektedir. Ayrıca, bu beton geleneksel betona göre daha fazla enerji yutma kapasitesine ve böylece yüksek tokluk değerine sahip olmaktadır. Bu nedenle, geri kazanılmış agregadan üretilen betonun betonarme çerçeve ve perdeli binalarda kullanımının uygunluğu TBDY 2018 esaslarına göre araştırılmıştır.

## 2. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ VE ANALİZ SONUÇLARI

### (FINITE ELEMENT ANALYSIS AND ANALYSIS RESULTS)

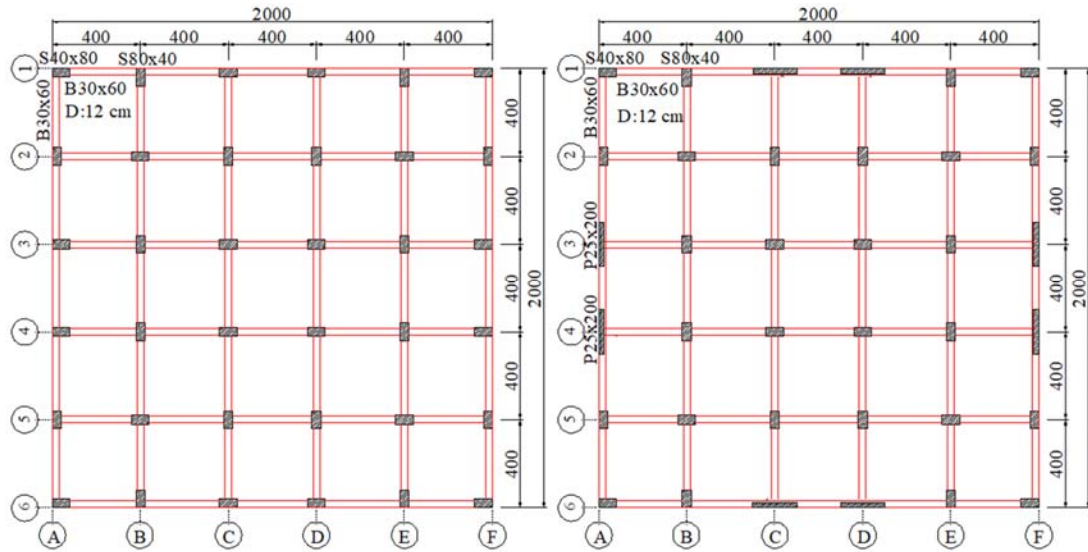
Çalışmada ele alınan çerçeve ve perdeli tasarlanmış binaların 3 boyutlu sonlu elemanlar modelleri SAP2000 v. 15.1.0 [22] analiz programında gerçekleştirilmiştir. Kiriş elemanlardaki ölü ve hareketli yükler tanımlanmıştır. Döşemeler ise modele

eklenmeden döşeme öz yükü ve üzerindeki hareketli yükler kirişlere aktarılmıştır. Her kat seviyesinde rijit diyaframlar tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan analizlerin yapıldığı binaların deprem performansının belirlenmesinde TBDY 2018'e göre deprem yer hareketi düzeyi DD-2 seçilmiştir. Yerel zemin sınıfı ZC olan bölgenin konumu Enlem: 41.0173°, Boylam: 29.0977° olarak belirlenmiştir. Bu özelliklere sahip konumun kısa periyot harita spektral ivme katsayısı ( $S_s$ ) 0,849, 1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı ( $S_1$ ) 0,236, kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{DS}$ ) 1,019 ve 1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{D1}$ ) 0,354 olarak belirlenmiştir. Bu konuma ait en büyük yer ivmesi (PGA) 0,350 g ve en büyük yer hızı (PGV) 21,691 cm/s olarak elde edilmiştir. TBDY 2018 Tablo 3.2'de tanımlanan değerlere göre çalışmada incelenen binaların kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ( $S_{DS}$ ) değeri  $1,019 \geq 0,75$  olduğundan Deprem Tasarım Sınıfı DTS = 1 olmaktadır.

### 2.1. Geometri ve Malzeme Özellikleri

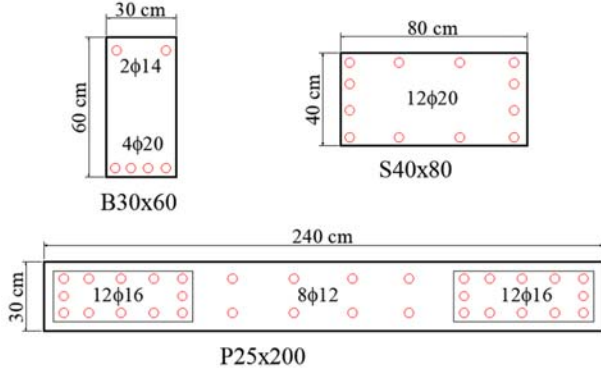
(Geometry and Material Properties)

İncelenen binalar çerçeve ve perdeli sistem olarak, 8 katlı, 5 açıklıklı ve iki farklı beton kullanılarak projelendirilmiş betonarme yapılarıdır. Her iki binada da akslar arası mesafe 4 m ve kat yükseklikleri 3 m alınmıştır. Çerçeve sistemde kolon boyutları 40 cm\*80 cm ve 80 cm\*40 cm olarak seçilmiştir. Kiriş boyutları her iki sistemde de 30 cm\*60 cm olarak seçilmiştir. Perdeli sistemde ise çerçeve sisteme ek olarak 4 adet 200 cm\*25 cm ve 4 adet 25 cm\*200 cm boyutlarında perdeler sisteme dahil edilmiştir. Çerçeve ve perdeli sistem binalara ait kat kalıp planları Şekil 1'de verilmiştir. Kolonlarda minimum donatı oranı dikkate alınarak 12 adet  $\phi 20$  boyuna donatı kullanılmıştır. Perde uç bölgesinde ise 8 adet  $\phi 12$  boyuna donatı kullanılmıştır. Kolonlarda ve perdelerde enine donatı olarak 10 cm arayla  $\phi 10$  donatı seçilmiştir. Kirişte montaj donatısı olarak 2 adet



Şekil 1. Çerçeve ve perdeli binalara ait kat kalıp planları (Floor formwork plans for frame and shear wall structures)

$\phi 14$  kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak 4 adet  $\phi 20$  kullanılmıştır. Enine donatı 20 cm arayla  $\phi 8$  olarak seçilmiş ve sıklaştırma yapılmamıştır. Kolon, kiriş ve perde kesitlerine ait donatı detayları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Donatı detayları (Reinforcement details)

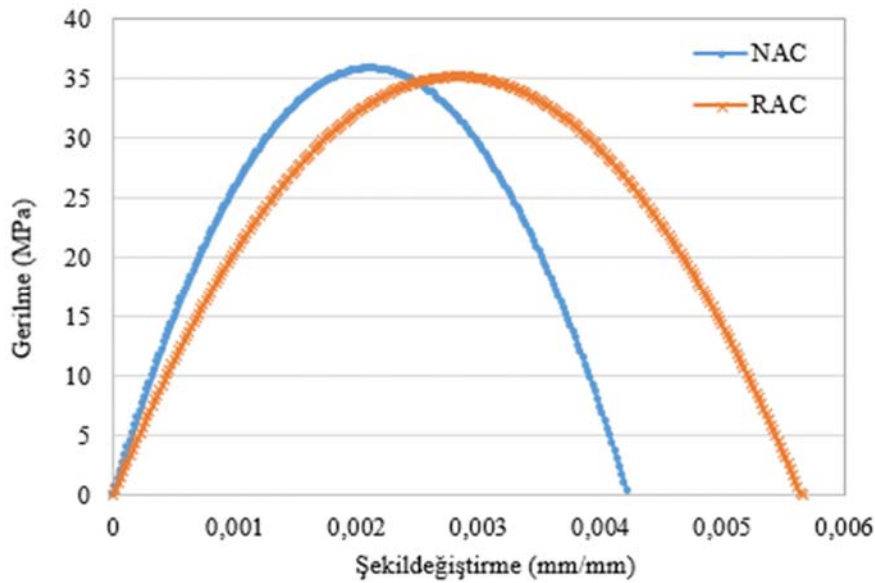
İncelenen binalarda kullanılan beton türlerinden biri C30/37 dayanım sınıfına sahip geleneksel betondur (NAC). Diğer beton türü geri kazanılmış agregalardan üretilen sürdürülebilir (RAC) betondur. Bu çalışmada referans alınan NAC ve RAC betonlarına ait mekanik özellikler Ref. [2] ve Ref. [5]’den alınmıştır. Analizlerde kesit tasarımı dayanım esaslı yapılmış olup, çalışmada dikkate alınacak NAC betonu basınç dayanımına en yakın değer %30 oranında geri kazanılmış agrega ve %5 oranında silis dumanı kullanımı ile üretilen numuneler ile sağlanmıştır. Bu geri kazanılmış beton (RAC) numunelerde, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranının ciddi ölçüde arttığı, betonun tokluk değerinin arttığı ve enerji yutma kapasitesinin olumlu yönde etkilendiği rapor edilmiştir. Bu nedenle, bu oranlara sahip RAC betonu bu çalışmada referans alınmıştır. Basınç dayanımları NAC beton için 35,8 MPa ve RAC beton için 35,2 MPa elde edilmiştir. Modelde kullanılan sargısız NAC

ve RAC betonlarının gerilme-şekil değiştirme eğrileri, pik yük sonrası ezilme davranışını da içermekte olup doğrusal olmayan malzeme davranışı modele tam olarak yansıtılmıştır (Şekil 3). RAC betonunun daha fazla enerji yutarak daha fazla yerdeğiştirme sergileyerek kırıldığı buna rağmen doğal agregalı betonun daha gevrek kırıldığı görülmektedir.

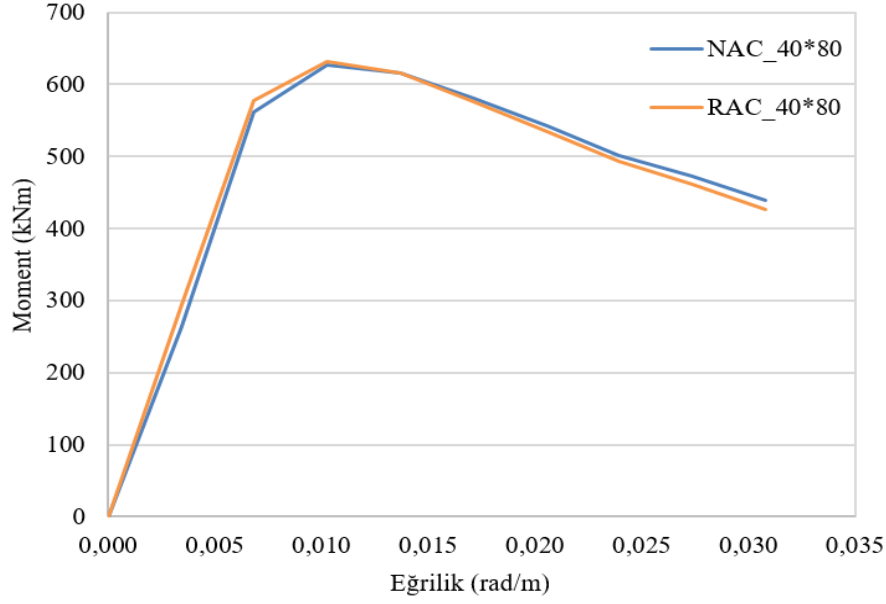
Doğrusal olmayan yöntemler ile şekildeğiştirmeye göre değerlendirmede, sargılı beton modeli için TBDY 2018’de verilen beton modeli dikkate alınmıştır. Ayrıca, kullanılan boyuna ve enine donatılar için de TBDY 2018’de tanımlanan B420C donatı çeliği modeli dikkate alınmıştır.

## 2.2. Plastik Mafsallık Özellikleri ve Eğilme Rijitlikleri (Plastic Hinge Properties and Bending Rigidities)

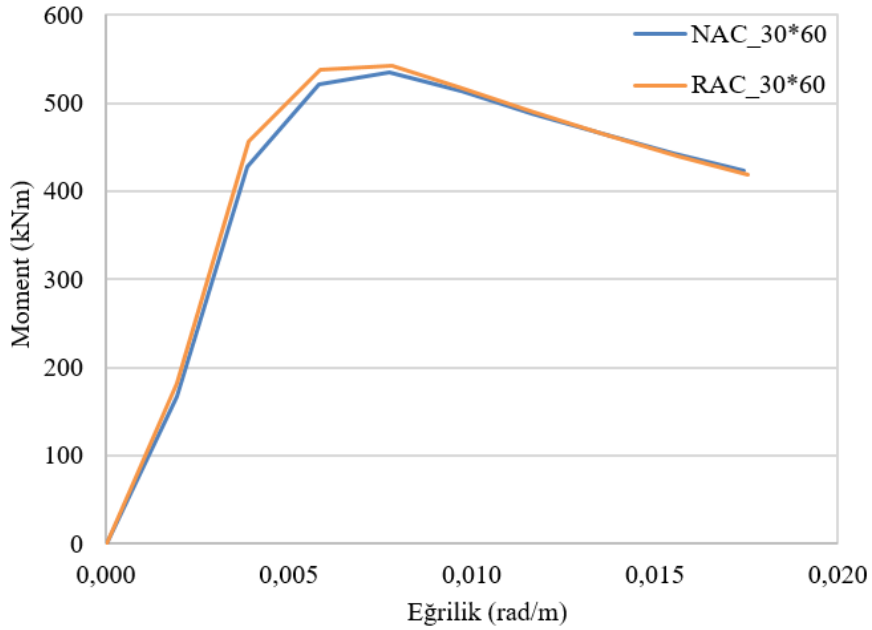
Kolonlarda oluşan aksel yük değerleri, deprem hesabında esas alınan toplam kütlelerle uyumlu yüklerin göz önüne alındığı yük birleşiminin (G+Q) ve çatlamamış kesit özelliklerinin kullanıldığı bir ön düşey yük hesabından elde edilmiştir. Taşıyıcı sistemdeki kolon ve kirişlerde yığılı plastik mafsallık kabulü yapılmış ve plastik mafsallık özelliklerinin hesaplanmasında XTRACT [27] yazılımı kullanılmıştır. Kolon ve kirişlerin etkin kesit rijitlikleri TBDY 2018 Denklem 5.2’ye göre hesaplanmıştır. Doğal agrega ve RA içeren betondan üretilen kolonlara, kirişlere ve perdeler için moment-eğrilik değerleri sırasıyla Şekil 4-Şekil 6’da görülmektedir. Plastik eğrilik değerleri TBDY 2018’de tanımlanan plastik mafsallık boyu ile çarpılarak moment-plastik dönme ilişkileri elde edilmiştir. Ayrıca, hem doğal agrega hem de RA içeren betondan üretilen kolonların karşılıklı etkileşim diyagramları da XTRACT programı ile Şekil 7’deki gibi elde edilmiştir. Tüm kirişler için hesaplanan Moment-Dönme ilişkileri ve tüm kolonlar için elde edilen Normal Kuvvet-İki Eksenli Moment etkileşim yüzeyleri SAP2000 programında oluşturulmuştur. Perdeler programdaki doğrusal olmayan *shell* eleman özelliğinden



Şekil 3. Betonlara ait gerilme-şekil değiştirme ilişkileri (Stress-strain relationships of the NAC and RAC concrete)



Şekil 4. Kolonların moment-eğrilik ilişkileri (Moment-curvature relationships of columns)



Şekil 5. Kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri (Moment-curvature relationships of beams)

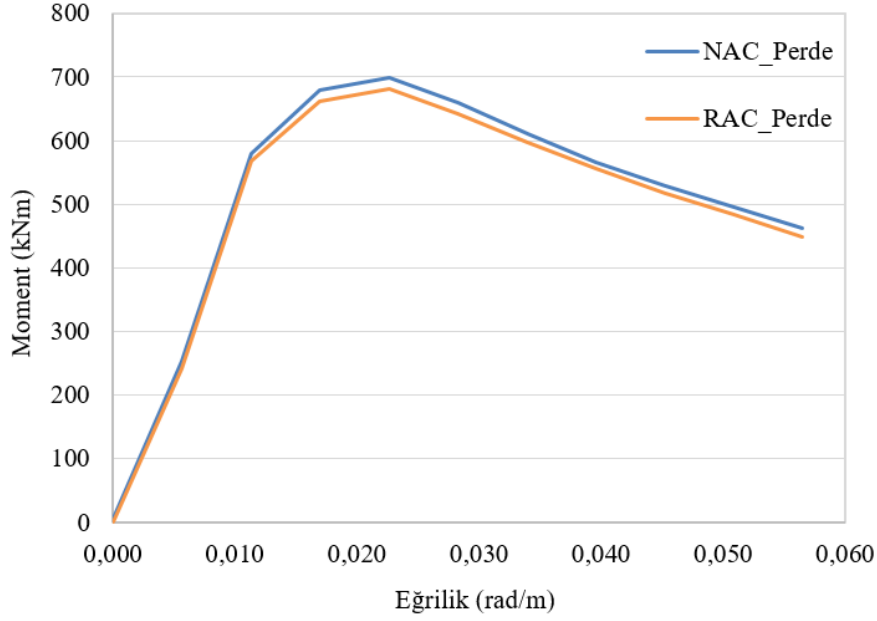
faydalanılarak tanımlanmıştır. Doğrusal olmayan statik itme analizi öncesi tüm kolon ve kirişler için etkin kesit rijitlikleri ilgili taşıyıcı elemanlara tanımlanmıştır.

### 2.3. Eşdeğer Deprem Yüğü ve Performans Noktalarının Belirlenmesi

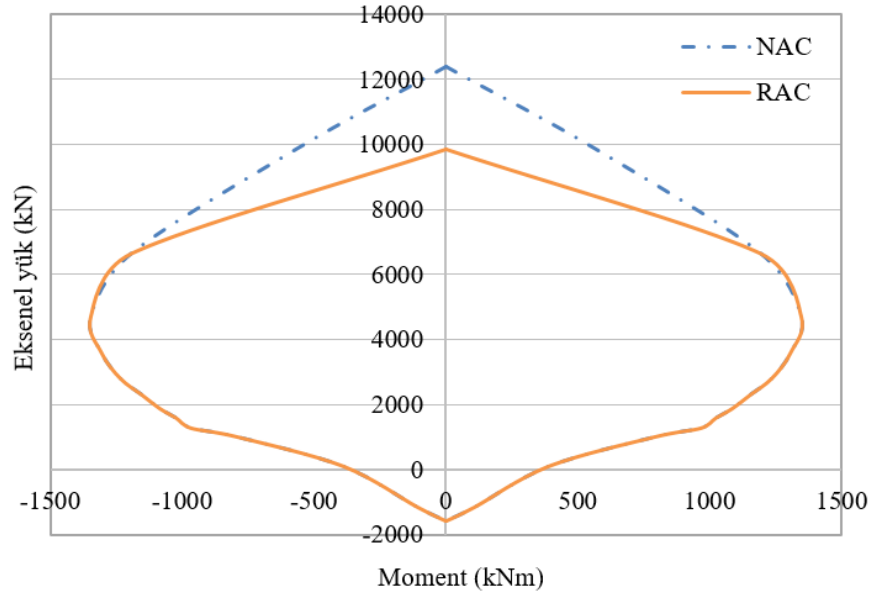
(Equivalent Earthquake Load and Determination of Performance Points)

Doğrusal elastik davranış için hesaplanan birinci doğal titreşim periyotları NAC ve RAC çerçeve sistem yapıları için sırasıyla 0,4656s, 0,4652s ve etkin kütle katılım oranları 0,79 olarak gerçekleştirilmiştir. Perdeli sistem yapılarında ise birinci

doğal titreşim periyotları NAC yapıda 0,4636s ve RAC yapıda 0,4620s olarak bulunmuş ve etkin kütle katılım oranları 0,78 olarak hesaplanmıştır. Yöntemin uygulanabilme koşullarından birisi sağlanmış olmaktadır. Eşdeğer deprem yükü dağılımı her katta deprem doğrultusundaki hakim doğal titreşim mod şekli genliği ile ilgili kütlelerin çarpımından elde edilen değerlerle orantılı olacak şekilde yapılara uygulanmaktadır. Çalışmada analizleri yapılan çerçeve ve perdeli binalar için hesaplanan eşdeğer deprem yükü dağılımları ilk 3 kat için sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. Her kat için elde edilen bu değerler SAP2000 sonlu elemanlar modelinde kat



Şekil 6. Perdelerin moment-eğrilik ilişkileri (Moment-curvature relationships of shear walls)



Şekil 7. Kolon karşılıklı etkileşim diyagramları (Column interaction diagrams)

Tablo 1. Eşdeğer deprem yükü dağılımları (Çerçeve Sistem) (Equivalent earthquake load distributions (Frame system))

Yapı	Kat	$\Phi_{i1}$	$m_i$	$m_i \Phi_{i1}$	$m_i \Phi_{i1}^2$	$M_{x1}$	$\Gamma_{x1}$
NAC	1	0,0902	1072	96,67	8,72	6820,96	212,02
	2	0,2536	1072	271,85	68,95		
	3	0,4299	1072	460,78	198,08		
RAC	1	0,0903	1061	95,81	8,65	6751,93	210,34
	2	0,2541	1061	269,58	68,50		
	3	0,4308	1061	457,04	196,88		

seviyelerindeki diyaframlara yatay yükler olarak uygulanmıştır. Bu eşdeğer deprem yükleri ve binaya etki

eden düşey yükler altında yapıların statik olarak artımsal itme analizleri yapılmıştır.

Analizler sonucunda itme eğrisi (kapasite eğrisi) olarak adlandırılan taban kesme kuvveti- tepe yerdeğiştirme eğrileri çerçevesel ve perdeli yapılar için hesaplanmıştır. Yapılar için tanımlanan deprem yer hareketi düzeyi için yatay elastik istem spektrumunun (EİS) ordinatları olan yatay elastik tasarım spektral ivmeleri  $S_{ac}(T)$  doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi (g) cinsinden, yatay elastik spektral yerdeğiştirmeleri  $S_{de}(T)$  doğal titreşim periyoduna bağlı olarak metre (m) cinsinden elde edilmiştir. Çerçeve ve perdeli sistemlerde EİS spektrumu NAC ve RAC yapılara ait modal kapasite eğrileri ile örtüştürülerek modal yerdeğiştirme istemleri Şekil 8 ve Şekil 9'dan elde edilmiştir.

İncelenen çerçeve yapıların hakim titreşim modlarına ait doğal titreşim periyotları  $T_{1,NAC}=0,4656s$  ve  $T_{1,RAC}=0,4652s$ , ilgili konuma ait zemin sınıfının spektrum periyodu  $T_B=0,35$  s'den daha büyük olduğu için eşit yerdeğiştirme kuralına göre titreşim periyotlarına karşılık gelen yerdeğiştirme değeri ( $S_{del}$ )  $d_1=0,041$  m olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde perdeli yapıların doğal titreşim periyotları  $T_{1,NAC}=0,4636s$  ve  $T_{1,RAC}=0,4620s$  ilgili konuma ait zemin sınıfının spektrum periyodundan büyük olduğundan titreşim periyotlarına karşılık gelen yerdeğiştirme değeri  $d_1=0,041$  m olarak belirlenmiştir. Deprem doğrultusunda meydana gelen tepe yerdeğiştirme istemleri ( $u_{xN}$ ) değerleri çerçeve yapılar için

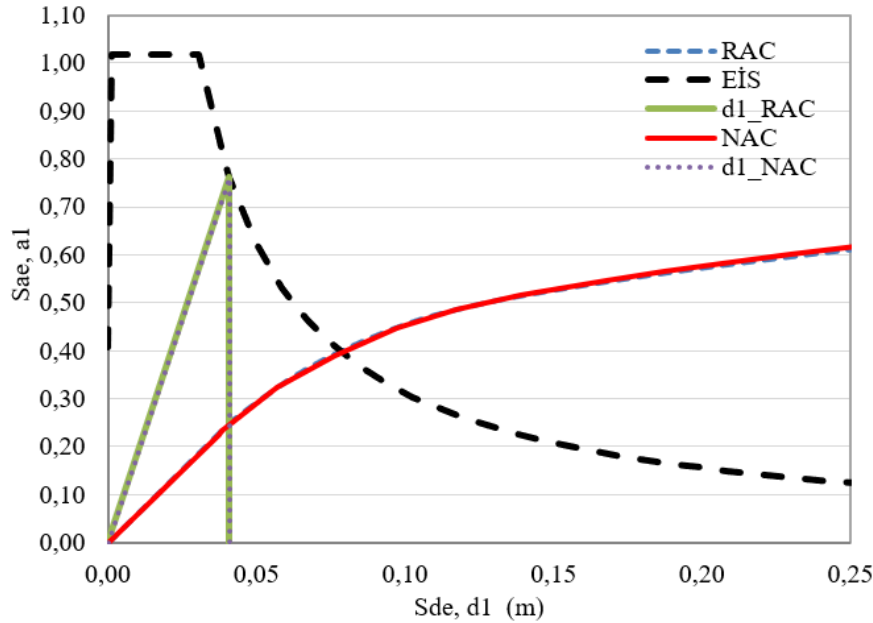
0,053 m olarak hesaplanmıştır. Perdeli yapılarda ise NAC bina için bu değer aynı kalırken RAC bina da 0,058 m bulunmuştur.

#### 2.4. Taşıyıcı Kesit ve Eleman Hasarlarının Tanımlanması (Determination of Cross-Sectional and Structural Element Damage Levels)

Doğrusal olmayan statik itme analizleri sonucunda sünek elemanlar için kesit düzeyinde hasar durumları ve hasar sınırları tanımlanmıştır. Kesit hasar durumlarını belirlemek için yapılan analizlerden tepe yerdeğiştirme istemlerine karşılık gelen hesap adımlarındaki her binadaki taşıyıcı elemanlarda oluşan plastik dönme ( $\theta_p$ ) istemleri elde edilmiştir. Kesitlerde eksenel kuvvet istemi altında yapılan analizlerden elde edilen eşdeğer akma eğriliği ( $\phi_y$ ) ile plastik eğrilik ( $\phi_p$ ) değerleri toplanarak toplam eğrilik ( $\phi_t$ ) değerleri hesaplanmıştır. Toplam eğrilik değerlerine karşılık gelen beton ve donatı çeliğine ait birim şekildeğiştirme ( $\epsilon_c$ ,  $\epsilon_s$ ) istemleri XTRACT yazılımı yardımıyla belirlenmiş ve TBDY 2018'de tanımlanan kesit hasar sınırlarını belirleyen birim şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yönetmelikte bina performans düzeyleri; Kesintisiz Kullanım (KK), Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyleri olarak tanımlanmıştır. Tablo 3 ve Tablo 4'te sırasıyla NAC ve RAC

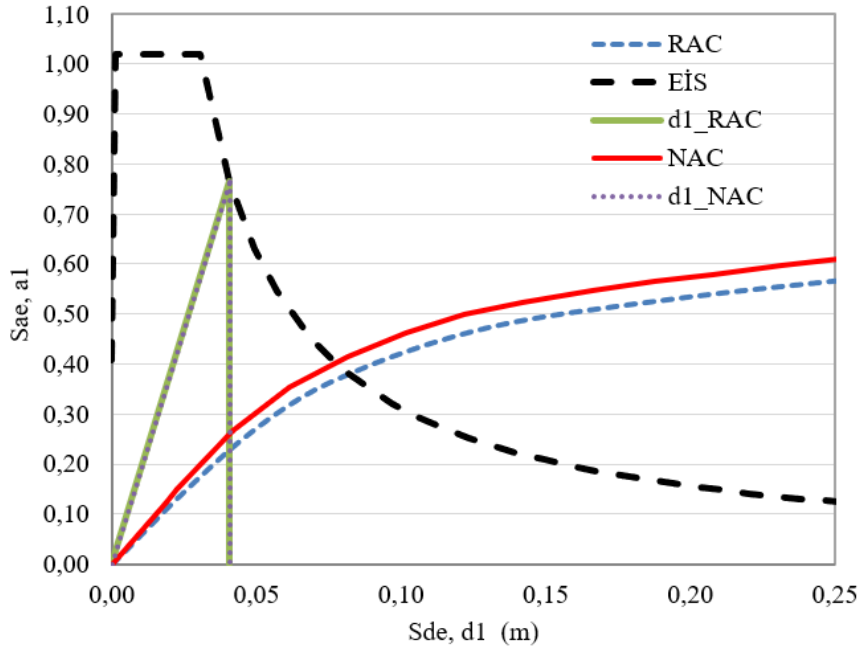
**Tablo 2.** Eşdeğer deprem yükü dağılımları (Perdeli Sistem) (Equivalent earthquake load distributions (Shear wall system))

Yapı	Kat	$\Phi_{i1}$	$m_i$	$m_i \Phi_{i1}$	$m_i \Phi_{i1}^2$	$M_{x1}$	$\Gamma_{x1}$
NAC	1	0,0914	1106	101,10	9,24	7045,77	207,96
	2	0,2550	1106	282,07	71,94		
	3	0,4309	1106	476,60	205,38		
RAC	1	0,0485	1094	53,10	2,58	6305,68	34434,05
	2	0,1542	1094	168,72	26,02		
	3	0,2927	1094	320,20	93,72		



**Şekil 8.** Elastik istem spektrumu ve modal kapasite spektrumlarının örtüştürülmesi (Çerçeve sistem)  
(Intersection of elastic demand and modal capacity spectra (Frame system))





**Şekil 9.** Elastik istem spektrumu ve modal kapasite spektrumlarının örtüşürülmesi (Perdeli sistem)  
(Intersection of elastic demand and modal capacity spectra (Shear wall system))

**Tablo 3.** Taşıyıcı elemanlarda şekildeğiştirme ve kesit hasar seviyeleri (Çerçeve sistemler)  
(Strain in the structural elements and cross-sectional damage levels (frame systems))

Yapı	Kesit Ölçüsü	$\theta_p$ (rad)	$\phi_p$ (rad/m)	$\phi_t$ (rad/m)	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	Çelikteki Performans	Betondaki Performans	Kesit Hasar Bölgesi
NAC	C80*40	0,0025	0,0062	0,0110	0,0072	0,0076	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C40*80	0,0001	0,0003	0,0102	0,0030	0,0034	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C80*40	0,0025	0,0062	0,0110	0,0072	0,0076	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	B30*60	0,0037	0,0123	0,0172	0,0087	0,0093	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0044	0,0146	0,0195	0,0099	0,0106	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0055	0,0183	0,0232	0,0118	0,0126	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
RAC	C80*40	0,0021	0,0053	0,0102	0,0066	0,0071	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C40*80	0,0001	0,0005	0,0107	0,0030	0,0035	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C80*40	0,0022	0,0055	0,0104	0,0068	0,0072	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	B30*60	0,0030	0,0101	0,0153	0,0078	0,0083	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0037	0,0123	0,0175	0,0089	0,0095	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0045	0,0151	0,0204	0,0103	0,0111	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar

betonları ile üretilen çerçeve ve perdeli sistem binalara ait plastikleşmenin meydana geldiği bazı kolon ve kiriş kesitleri için hesaplanan şekildeğiştirme değerleri ve kesit hasar durumları verilmiştir. Gevrek davranışa ilişkin olarak taşıyıcı elemanların iç kuvvet istemlerinin, iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılması gerekmektedir. İtme analizi ile deprem yüklemeleri sonucunda tepe yerdeğiştirme istemine karşılık gelen itme adımındaki kiriş, kolon ve kiriş-kolon birleşim bölgelerinde oluşan kesme kuvveti değerleri elde edilmiştir. Kolon ve kiriş kesitlerinin kesme kuvveti kapasiteleri beton katkısı ve kesme donatısı katkıları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Betonun katkısı TS 500'de [28] öngörülen kesme çatlama dayanımının %80'i olarak

belirlenmiştir. Kolonlarda aksel kuvvetin basınç olması nedeni ile kesitin kesme çatlama dayanımı hesabında normal kuvvetin katkısı dikkate alınmıştır. Hem NAC hem RAC çerçeve ve perdeli binalarda kolon ve kiriş elemanlarda kesme kuvveti dayanımları sırasıyla  $V_r=328$  kN ve  $V_r=207$  kN olarak hesaplanmıştır. Analizler sonucunda kolon ve kiriş elemanlarda meydana gelen kesme kuvvetleri hesaplanan kapasite değerlerinden küçük çıkmıştır ve bu taşıyıcı elemanlar gevrek olarak hasar görmeyen elemanlar olarak değerlendirilmiştir.

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde her iki deprem doğrultusunda kesme kuvveti değerleri, hem NAC hem de

**Tablo 4.** Taşıyıcı elemanlarda şekildeğiştirme ve kesit hasar seviyeleri (Perdeli sistemler)  
(Strain in the structural elements and cross-sectional damage levels (shear wall systems))

Yapı	Kesit Ölçüsü	$\theta_p$ (rad)	$\phi_p$ (rad/m)	$\phi_t$ (rad/m)	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	Çelikteki Performans	Betondaki Performans	Kesit Hasar Bölgesi
NAC	C80*40	0,0020	0,0049	0,0097	0,0063	0,0067	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C40*80	0,0000	0,0002	0,0100	0,0029	0,0033	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C80*40	0,0023	0,0057	0,0078	0,0067	0,0068	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	B30*60	0,0029	0,0098	0,0147	0,0074	0,0080	<SH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0035	0,0117	0,0166	0,0084	0,0090	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0043	0,0143	0,0192	0,0097	0,0104	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
RAC	C80*40	0,0023	0,0057	0,0106	0,0069	0,0073	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C40*80	0,0000	0,0002	0,0105	0,0031	0,0035	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	C80*40	0,0026	0,0066	0,0085	0,0072	0,0074	<SH	SH< $\epsilon_c$ <KH	Belirgin Hasar
	B30*60	0,0033	0,0109	0,0161	0,0082	0,0088	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0039	0,0131	0,0183	0,0093	0,0100	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar
	B30*60	0,0049	0,0162	0,0214	0,0109	0,0116	SH< $\epsilon_s$ <KH	KH< $\epsilon_c$ <GÖ	İleri Hasar

**Tablo 5.** Kat kesme kuvveti katkıları (Çerçevesel Sistemler) (Story shear force contributions (Frame systems))

Yapı	Kat	$\Sigma V$ (kN)	$\Sigma V_{SH}$ (kN)	$\Sigma V_{BH}$ (kN)	$\Sigma V_{IH}$ (kN)	$\Sigma V_G$ (kN)	$\Sigma V_{SH}/\Sigma V$	$\Sigma V_{BH}/\Sigma V$	$\Sigma V_{IH}/\Sigma V$	$\Sigma V_G/\Sigma V$	Sonuç
NAC	1. Kat	4603	2130	1975	498	0	46%	43%	11%	0%	Kontrollü Hasar
	2. Kat	4213	1514	2265	434	0	36%	54%	10%	0%	
	3. Kat	3856	2067	1479	310	0	54%	38%	8%	0%	
RAC	1. Kat	4405	2111	1876	418	0	48%	43%	9%	0%	Kontrollü Hasar
	2. Kat	4103	1501	2240	362	0	37%	55%	9%	0%	
	3. Kat	3716	1854	1638	224	0	50%	44%	6%	0%	

RAC binalarda TBDY 2018'e göre Eş. 1 ile hesaplanmıştır. Çalışmadaki tüm binalarda birleşim bölgeleri için kesme kuvveti değerleri ( $V_c$ ) 821 kN ve 162 kN olarak elde edilmiştir. İncelenen binalardaki kolon-kiriş birleşimleri kuşatılmış birleşimler olduğu için kesme kuvveti sınır değerleri TBDY 2018'de verilen Eş. 2 ile hesaplanmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki kesit boyutları arasındaki farklılıklar göz önüne alınarak NAC binalarda birleşim kesme kuvveti sınır değerleri 8194 kN ve 2607 kN, RAC binalarda 8850 kN ve 2816 kN olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere hesaplanan birleşim bölgesi kesme kuvveti değerleri kesme kuvveti sınırlarını aşmamaktadır ve böylece kolon-kiriş birleşim bölgeleri gevrek olarak hasar görmeyen elemanlar olarak değerlendirilmiştir.

$$V_e = 1,25 f_{yk} (A_{s1} + A_{s2}) - V_{kol} \quad (1)$$

$$V_e \leq 1,7 b_j h \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

İncelenen binaların deprem performansının belirlenmesi için taşıyıcı elemanların kesit hasar durumlarına ek olarak TBDY 2018'de tanımlandığı üzere farklı hasar bölgelerindeki düşey

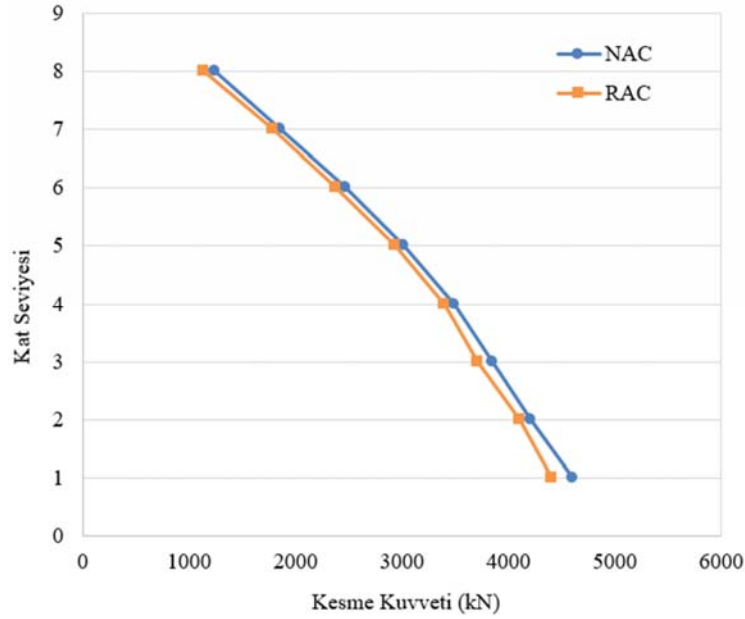
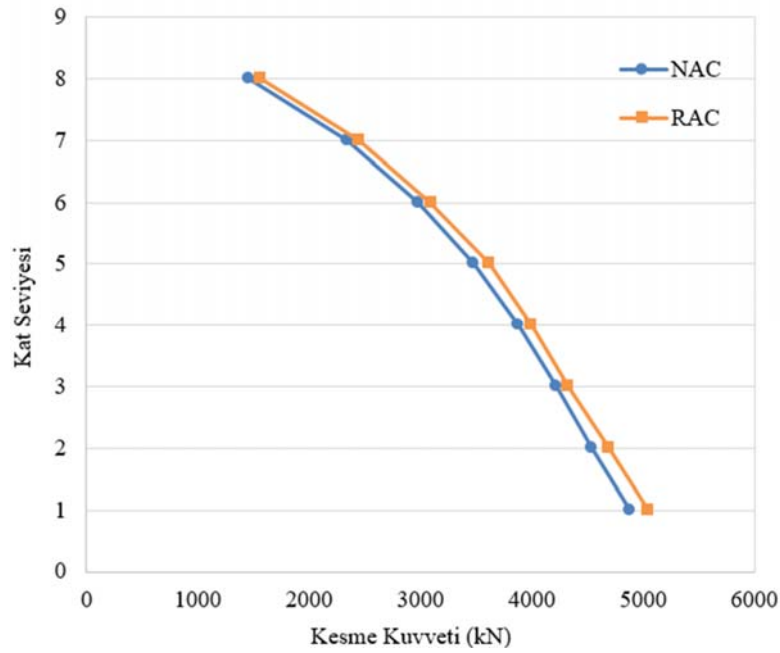
taşıyıcı elemanların her bir katta taşınan kesme kuvvetine katkılarının belirlenmesi gerekmektedir. Tablo 5'de örnek olarak NAC ve RAC çerçeve binaların 1., 2. ve 3. Katlarına ait sonuçlar gösterilmektedir. Perdeli binalara ait aynı katlarda bulunan düşey elemanların kat kesme kuvvetine katkıları da Tablo 6'da verilmiştir. Yönetmelikte verilen sınır değerlerle hesaplanan kesme kuvveti katkı oranları karşılaştırılmıştır. Düşey elemanlar bakımından binaların performans düzeyleri Kontrollü Hasar düzeyi olarak belirlenmiştir.

#### 2.5. Bina Deprem Performanslarının Belirlenmesi (Assessment of Building Earthquake Performance Levels)

İncelenen binaların deprem performans düzeylerinin TBDY 2018'e göre belirlenmesi için Tablo 3 ve Tablo 4'de hesaplanan taşıyıcı sistem elemanlarının kesit hasar sınırları ve Tablo 5 ve Tablo 6'da gösterilen düşey elemanların kesme kuvveti katkı oranları dikkate alınacaktır. NAC çerçeve sistem binada kiriş hasarları bakımından en elverişsiz sonuç yapının alt katlarında Kontrollü Hasar olarak tespit edilmiştir. Kolonlar bakımından hasarlar incelendiğinde ise yapının en üst katı hariç diğer tüm katlarda TBDY 2018

**Tablo 6.** Kat kesme kuvveti katkıları (Perdeli Sistemler) (Story shear force contributions (Shear wall systems))

Yapı	Kat	$\Sigma V$ (kN)	$\Sigma V_{SH}$ (kN)	$\Sigma V_{BH}$ (kN)	$\Sigma V_{IH}$ (kN)	$\Sigma V_G$ (kN)	$\Sigma V_{SH}/\Sigma V$	$\Sigma V_{BH}/\Sigma V$	$\Sigma V_{IH}/\Sigma V$	$\Sigma V_G/\Sigma V$	Sonuç
NAC	1. Kat	4876	2728	1581	567	0	56%	32%	12%	0%	Kontrollü Hasar
	2. Kat	4536	2011	2064	461	0	44%	46%	10%	0%	
	3. Kat	4217	2261	1570	386	0	54%	37%	9%	0%	
RAC	1. Kat	5046	3030	1430	586	0	60%	28%	12%	0%	Kontrollü Hasar
	2. Kat	4692	2305	1904	483	0	49%	41%	10%	0%	
	3. Kat	4324	1900	2016	408	0	44%	47%	9%	0%	

**Şekil 10.** Çerçeve sistem binalarda kat kesme kuvvetleri (Story shear forces in frame system buildings)**Şekil 11.** Perdeli sistem binalarda kat kesme kuvvetleri (Story shear forces in shear wall system buildings)

performans koşullarına göre ileri hasar bölgesinde bulunan düşey elemanların toplam kata gelen kesme kuvvetine katkı

oranı %20'den az olduğundan hasar seviyesi Kontrollü Hasar düzeyi olarak belirlenmiştir (Tablo 5). Hem kirişler

hem kolonlar açısından elde edilen sonuçlar binanın performans düzeyinin Kontrollü Hasar olduğunu göstermektedir. NAC perdeli binada kirişlerde elde edilen hasarların NAC çerçeve sistem binaya göre daha az olduğu fakat performans düzeyinin Kontrollü Hasar seviyesinde kaldığı görülmektedir (Tablo 4). Düşey elemanlar açısından hasarlara bakıldığında NAC çerçevesi bina ile aynı davranışı gösterdiği görülmüştür (Tablo 6). Bu durumda NAC perdeli binanın performans düzeyi de Kontrollü Hasar performans düzeyi olarak belirlenmiştir. RAC çerçeve sistemde kirişlerde oluşan şekildeğişikliklerin NAC çerçeve sisteme göre daha az olduğu fakat hasar seviyeleri bakımından aynı hasar sınırında kaldıkları görülmüştür. Kolonlarda oluşan hasarlar incelendiğinde ise ileri hasar bölgesine geçen elemanların sayısının NAC çerçeve sisteme göre daha az olduğu dikkat çekmektedir (Tablo 5). Sonuç olarak RAC çerçeve yapının performans düzeyi de Kontrollü Hasar olarak tespit edilmiştir. RAC perdeli sistemde ise kirişlerde elde edilen şekildeğiştirme değerlerinin NAC perdeli sisteme göre daha fazla olduğu görülmüştür. Kolonlardaki hasar seviyeleri dikkate alındığında ise oluşan hasar sınırlarının NAC perdeli sistem ile aynı seviyelerde olduğu tespit edilmiştir (Tablo 6). RAC perdeli sistemin performans düzeyi Kontrollü Hasar performans düzeyidir.

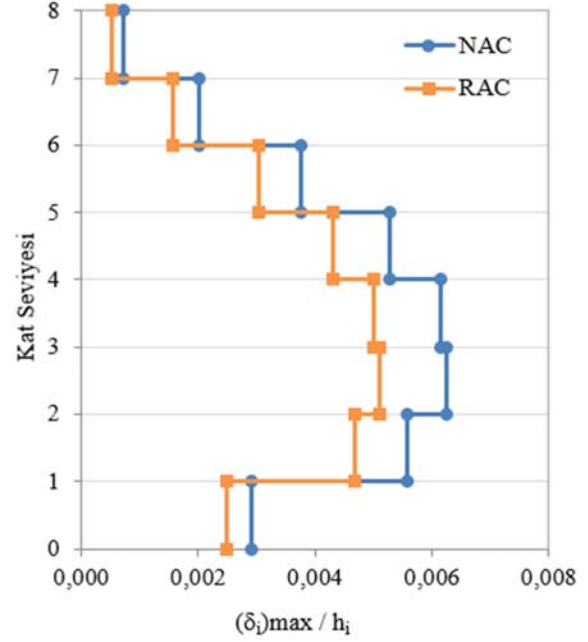
## 2.6. Kat Kesme Kuvveti İlişkileri (Story Shear Force Relationships)

Çalışmada incelenen tüm binalarda itme analizleri sonucunda tepe yerdeğiştirme istemlerine karşılık gelen kat kesme kuvvetleri her bir deprem doğrultusunda elde edilmiştir. Perdeli binalarda yapıya etkileyen taban kesme kuvvetleri artış gösterdiğinden katlara etkileyen kesme kuvvetleri artmaktadır. Şekil 10'da NAC ve RAC çerçeve sistem binalara ait en büyük kat kesme kuvvetleri gösterilmiştir. NAC çerçeve sistem binada RAC çerçeve sisteme kıyasla katlara etki eden kesme kuvvetleri daha fazla hesaplanmıştır. NAC perdeli sistem binada ise RAC perdeli sisteme kıyasla kat kesme kuvvetleri daha azdır (Şekil 11). Elde edilen karşılaştırmalar esas alındığında, RAC betonu NAC betonuna göre daha sünek bir davranışa sahip olduğu için çerçeve sistem yapıda daha iyi performans gösterdiği; buna rağmen perdeli sistemde daha kötü performans sergilediği sonucuna ulaşılabilir. Ayrıca, NAC betonunun daha rijit bir malzeme olması dolayısı ile perdeli sistemde daha iyi bir performans gösterdiği düşünülmektedir.

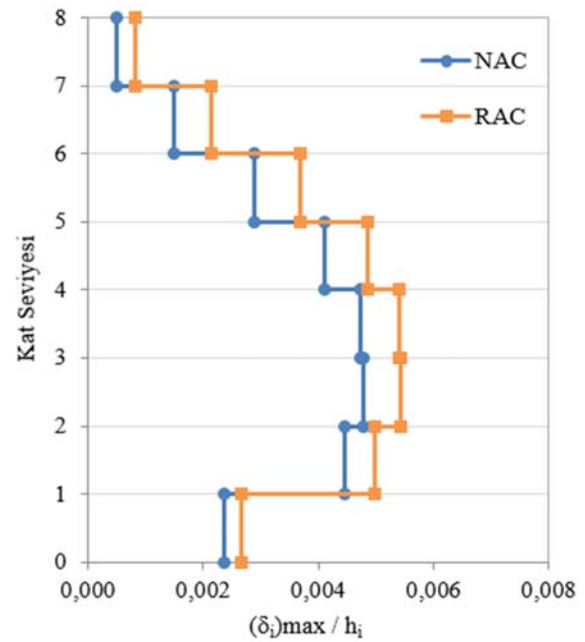
## 2.7. Görelî Kat Ötelemesi Oranları (Interstory Drift Ratios)

Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda her bina için yatay yerdeğiştirme değerleri elde edilmiş ve görelî kat ötelemeleri hesaplanmıştır. NAC çerçeve sistem binada, RAC çerçeve sistem binaya göre etkin görelî kat ötelemesi oranları daha fazladır (Şekil 12). RAC perdeli sistem binada ise, NAC perdeli sistem binaya kıyasla görelî kat ötelemesi oranları daha fazladır (Şekil 13). İncelenen binalarda etkin görelî kat ötelemesi oranları arasındaki ilişki kat kesme kuvvetleri arasındaki ilişki ile aynıdır. Görelî kat ötelemelerinin fazlalığı katlara etkileyen kesme kuvvetlerinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca RAC perde sistem binada deprem doğrultusunda meydana gelen tepe

yerdeğiştirme isteminin ( $u_{xN}$ ) NAC perde sistem binadan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun RA içeren betonun NAC'e göre daha elastik davranış göstermesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Etkin görelî kat öteleme oranları incelendiğinde, TBDY 2018'de tanımlanan  $\lambda(\delta_i)_{\max} / h_i \leq 0,008$  sınır koşulunun binaların tüm katları için sağlandığı görülmektedir.



Şekil 12. Çerçeve sistemlerde maksimum etkin görelî kat ötelemeleri oranları (Max. interstory drift ratio for frame systems)



Şekil 13. Perdeli sistemlerde maksimum etkin görelî kat ötelemeleri oranları (Max. interstory drift ratio for shear wall systems)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, normal beton agregası (NA) ve %30 oranında geri kazanılmış agrega (RA) kullanılarak üretildiği kabul edilen betonlar ile çerçeve ve perdeli sistem olarak, 8 katlı ve 5 açıklıklı olarak projelendirilmiş dört farklı betonarme binanın deprem yükleri altındaki performansı değerlendirilmiştir. TBDY 2018'e göre yapılan doğrusal olmayan statik itme analizi yöntemi sonuçlarına göre incelenen tüm binaların performans düzeylerinin Kontrollü Hasar Performans Düzeyi olduğu belirlenmiştir. Çalışmadaki binalar Deprem Tasarım Sınıfının DTS = 1 olması ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre TBDY 2018'de Normal Performans Hedefi olarak tanımlanan Kontrollü Hasar performans sınırını sağlamaktadır.

Geleneksel beton (NAC) ve sürdürülebilir beton (RAC) açısından bu çalışmadaki binalar değerlendirildiğinde aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir.

- Geleneksel beton ile geri kazanılmış agregalı betonun binaların deprem performansı açısından benzer sonuçlar göstermesi, yeşil binalarda yeşil betonun (RAC) kullanımı için uygun bir adım olabilir.
- İki beton türünün yoğunlukları farklıdır. Geleneksel beton 2,4 gr/cm<sup>3</sup> iken; geri kazanılmış agregalı beton 2,2 gr/cm<sup>3</sup> tür. Bu durum çevreci betonun aynı performansta fakat daha hafif olması ve yapıya daha az ölü yük uygulaması anlamına gelmektedir.
- İki beton türünün elastisite modülleri farklıdır. Geri kazanılmış agregalı beton daha fazla birim şekil değiştirme yapabilme ve yük altında daha fazla enerji yutma kabiliyetine sahiptir. Geleneksel betonun daha rijit fakat geri kazanılmış agregalı betonun daha sünek davranış sergilemesi RAC betonun yüksek tokluğa sahip olduğunu göstermektedir. Gevrek malzeme olan betonun tokluğunun yüksek olması binalar için avantajlı bir durum oluşturmaktadır.
- RAC betonu NAC betonuna göre daha elastik bir davranışa sahip olduğu için perdeli sistem gibi rijit bir yapıda daha kötü performans sergilemiştir. Bunun aksine NAC betonu, RAC betonuna göre daha gevrek bir malzeme olduğu için perdeli sistem daha iyi bir performans göstermiştir.
- Yatay yük etkisinde oluşan kesme hasar durumu RAC perdeli sistem binada daha fazladır. Bu nedenle RAC perdeli sistem tasarımı yapılacaksa düşey taşıyıcı elemanlardaki kesme donatısı NAC sistem binaya göre bir miktar daha fazla olacaktır.
- Taşıyıcı elemanlarda meydana gelen dönmeler RAC perdeli sistem binada NAC perdeli sistem binadan daha büyük değerler vermektedir fakat kesit hasar seviyeleri yaklaşık aynı kalmıştır. Bu durumda her iki beton kullanılarak tasarlanacak taşıyıcı sistem elemanlarında hesaplanan eğilme donatısı miktarları benzer sonuçlar verecektir.

Sonuç olarak, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde yapıların üretildiği beton malzeme farklılığının dikkate

alınarak, yapının özellikle geri kazanılmış agregalı beton kullanılarak inşa edildiği durumlarda, daha sünek olarak tasarlanması gerektiği önerilmektedir. Ayrıca, TBDY 2018 esaslarına uygun olarak tasarlanacak farklı betonarme çerçeve ve perdeli bina sistemleri için analitik ve deneysel çalışmaların yapılması, geri kazanılmış agregalı betonun çerçeve ve perdeli sistemlerde kullanımının uygunluğunun belirlenmesi açısından faydalı olacaktır.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Duan Z.H., Poon C.S., Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Material Design*, 58, 19-29, 2014.
2. Dilbas H., Çakır Ö., Şimşek M., Recycled aggregate concretes (RACs) for structural use: an evaluation on elasticity modulus and energy capacities, *International Journal of Civil Engineering*, 15 (2), 247-261, 2017.
3. Xiao J., Li W., Fan Y., Huang X., An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011), *Constr. Build. Mater.*, 31, 364-83, 2012.
4. Döndüren M.S., Şişik Ö., Properties of concretes produced with recycled aggregates, *Selcuk University Technical Education Faculty Technical-Online Journal*, 2, 125-137, 2016.
5. Çakır Ö., Dilbas H., Silica fume effect on fracture parameters and cracking pattern maps of recycled aggregate concrete, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 137-154, 2019.
6. Soleimani F., McKay M., Yang C.S.W., Kurtis K.E., DesRoches R., Kahn L.F., Cyclic testing and assessment of columns containing recycled concrete debris, *ACI Struct. J.*, 113 (5), 1009-1020, 2016.
7. Saribas I., Goksu C., Binbir E., Ilki A., Seismic performance of full-scale RC columns containing high proportion recycled aggregate, *Bull. Earthquake Eng.*, 17, 6009-6037, 2019.
8. Fathifazl G., Razaqpur A.G., Abbas O.B., Fournier B., Foo S., Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams without stirrups, *Eng. Struct.*, 33 (3), 1025-1033, 2011.
9. Knaack A.M., Kurama Y.C., Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates, *J. Struct. Eng.*, 141 (3), 1-11, 2015.
10. Liu W., Cao W., Zhang J., Qiao Q., Ma H., Seismic performance of composite shear walls constructed using recycled aggregate concrete and different expandable polystyrene configurations, *Materials*, 9 (3), 148, 2016.
11. Rise N., De Brito J., Correia J.R., Arruda M.R.T., Punching behavior of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates, *Eng. Struct.*, 100, 238-248, 2015.
12. Goksu C., Saribas I., Binbir E., Akkaya Y., Ilki A., Structural performance of recycled aggregates concrete sourced from low strength concrete, *Structural Engineering and Mechanics*, 69 (1), 77-93, 2019.

13. Xiao J., Zhu X., Study on seismic behaviour of recycled concrete frame joints, *Journal of Tongji University*, 33 (4), 436–40, 2005.
14. Ignjatovic I.S., Marinkovic S.B., Miskovic Z.M., Savic A. R., Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading, *Mater. and Struct.*, 46, 1045-59, 2013.
15. Choi W.C., Yun H.D., Shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams without shear reinforcements, *Journal of Civil Engineering and Management*, 23 (1), 76-84, 2017.
16. Kazaz İ., Gülkan P., Süneklik düzeyi yüksek betonarme perdelerdeki hasar sınırları, *İMO Teknik Dergi*, 387, 6113-6140, 2012.
17. Değer Z.T., Damage assessment of a reinforced concrete test building based on Turkish Seismic Code 2007, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 481-488, 2017.
18. Xiao, J., Sun Y., Falkner H., Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete, *Eng. Struct.*, 28 (1), 1–8, 2006.
19. Xiao J., Wang C., Li J., Tawana M.M., Shake-table model tests on recycled aggregate concrete frame structure, *ACI Struct. J.*, 109 (6), 777–786, 2012.
20. TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2018.
21. Sarıbaş İ., Performance Evaluation of Reinforced Concrete Plane Frame Structure Containing Recycled Aggregate, 3rd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Van-Türkiye, 150-161, 25-27 Ekim, 2019.
22. SAP2000 Advanced 15.1.0, (2019). Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
23. TS EN 12390-2. Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.
24. TS EN 12390-3. Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.
25. TS EN 12390-3. Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.
26. ASTM C 469. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, U.S.A., 2014.
27. XTRACT 3.0.8. (2007) Cross-sectional structural analysis of components. TRC, Rancho Cordova
28. Türk Standartları Enstitüsü, TS-500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara, 2000.