

ÇOKLU DEPREM SERİLERİNİN DÜZENSİZ YAPILARIN SİSMİK DAVRANIŞINA ETKİLERİ

Reşat A. OYGUÇ *
Çağatay TOROS **

Alınma: 22.01.2022; düzeltme: 08.07.2022; kabul: 18.08.2022

Öz: Depremden sonra hasar görmüş bölgelerde yürütülen yerinde inceleme çalışmalarında çoklu deprem etkileri sıklıkla görülmektedir. Birçok yapı, ana depremi hasarsız ya da az hasarlı atlatırken, rijitlik ve dayanımı azalmış yapıya artçı deprem etkimesi durumunda gözlenen hasar genellikle artmaktadır. Bazı durumlarda yapı ana depremi güvenli bir şekilde atlatırken, artçı depremden sonra göçebilmektedir. Literatürde, çoklu deprem serilerine maruz kalmış düzensiz betonarme yapıların sismik davranışlarını inceleyen az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmada, çoklu deprem serilerinin düzensiz betonarme yapıların kalıcı deplasman değerlerine etkilerini araştırılmaktadır. Bu sebeple, düzensiz üç adet mevcut betonarme yapı seçilmiş ve çoklu deprem serileri altında, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Malzemedeki bozulma etkilerini incelemek için, seçilen yapılar hem azalım etkilerini dikkate alabilen hem de azalım etkilerini dikkate alamayan malzeme modelleri kullanılarak analiz edilmişlerdir. Analiz sonuçlarının incelenmesinden, azalım etkilerini dikkate almayan malzeme modellerinin çoklu deprem serileri altındaki sismik davranışı gerçekçi bir şekilde yansıtamadıkları belirlenmiştir. Bu sebeple bozulma etkilerini doğru olarak yakalayabilmek için azalım etkilerini dikkate alan malzeme modellerinin kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, çalışmanın sonucunda düzensizlik etkilerinin kalıcı deplasmanları arttırdıkları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu depremler, Düzensiz betonarme yapılar, Azalımsal malzeme modelleri, Artçı depremler, Genişletilmiş N2 yöntemi

Effects of Multiple Earthquake Sequences on Seismic Behavior of Irregular Buildings

Abstract: Effects of multiple earthquakes are frequently observed after conducted reconnaissance studies in the earthquake affected region. Many structures withstand the main shock without having intense damage. However, when an aftershock hits the previously deteriorated structure, the observed damage is generally altered. There are some cases where the structure withstands the main excitation, however collapsed when an its subjected to a ground sequence. Fewer studies in the literature have focused on the seismic behavior of irregular reinforced concrete structures subjected to multiple earthquakes. This research investigates the effects of multiple earthquake sequences on residual displacement values of irregular reinforced concrete structures. For that reason, three irregular existing reinforced concrete structures are selected, and nonlinear time history analysis are conducted under multiple earthquake sequences. To demonstrate the effect of deteriorations on the material, the selected structures were analyzed using both non-degrading and degrading material models. The results of the analyses revealed the fact that non-degrading models are incapable of estimating the seismic response under multiple earthquake sequences. Hence, degrading material models should be used to capture the deterioration effects accurately. Further, it is concluded that irregularity effects increase the values of the residual displacements.

* İstanbul Teknik Üniversitesi, Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği ABD, 34469, Maslak, İstanbul

** Toros Mühendislik, İstiklal Mahallesi, Şair Fuzuli Caddesi, No:60, Odunpazarı, Eskişehir

İletişim Yazarı: Reşat A. Oyguc (oyguc@itu.edu.tr)

Keywords: Multiple earthquakes, Irregular RC structures, Degrading material models, Aftershocks, Extended N2 method

1. GİRİŞ

Literatürde çoklu depremler, öncül, ana ve artçı depremlerden oluşan deprem serileri ve farklı fayların oluşturduğu bağımsız deprem serileri olmak üzere iki ana grupta tanımlanmaktadır. Artçı deprem, ana deprem ile aynı bölgeye etkiyen ve ana depremden daha düşük büyüklüğe sahip olan yer hareketidir. Artçı depremin ana depremden daha büyük olduğu durumlarda, ana deprem öncü deprem hareketi olarak, artçı deprem ise ana deprem olarak kabul edilir. Bağımsız deprem serilerine ise 17 Ağustos Kocaeli ve 12 Kasım Düzce depremleri güzel bir örnek oluşturmaktadır. Her iki deprem de farklı iki fay segmenti tarafından üretilmiş olmalarına rağmen aynı bölgeyi etkilemişlerdir (Erdik, 2000).

Depremlerden sonra sahada yürütülen çalışmalar, yapıda ana depremden sonra meydana gelen hasarların artçı depremlerden sonra daha da artabildiğini göstermiştir. Bu durumun en önemli sebebi, ana depremden sonra yapının rijitlik ve dayanım kapasitelerinin düşmesidir. Yapıların sismik davranışlarının belirlenmesi için yürütülen analizlerde kullanılan klasik malzeme modelleri ana depremden sonra malzemede meydana gelen rijitlik ve dayanım azalmalarını dikkate alamamakta ve dolayısıyla eksik bir tasarım yapılmasına yol açmaktadır. Yapılan çalışmalar özellikle betonarme yapıların çoklu depremler altında zayıf sismik davranışa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 1’de ve Şekil 2’de ana depremden hasar gören ve artçı depremler ile hasar düzeyinin arttığı tespit edilen örnek yapılara yer verilmiştir.



Şekil 1:

Zemin kat kolonundaki hasarın ilerleyişi



Şekil 2:

Dolgu duvar hasarının ilerleyişi

Bu önemli olgu üzerine literatürde birçok çalışma yapılmış olup, bu çalışmalar genel olarak, yapısal sistemin davranışını basitleştirilmiş yaklaşımlar kullanarak tespit etmeyi

hedeflemektedir. Bahsedilen çalışmalara örnek vermek gerekirse: (i) Tek serbestlik dereceli sistemlerin (TSD) davranışlarını azaltımsal çevrimsel kuvvet-yerdeğiştirme bağıntıları tanımlayarak elde eden çalışmalar ve (ii) Çok serbestlik dereceli sistemlerin (ÇSD) davranışlarını kolon-kiriş birleşim bölgelerinde plastik mafsallar tanımlayarak elde eden çalışmalar. Çoklu deprem serilerine maruz kalan yapıların davranışlarının bu idealize edilmiş sistemler kullanılarak tespit edilmeye çalışılması yanlış değerlendirmeler yapılmasına yol açmaktadır. Bu sistemlerde yüksek mod etkilerinin ve plastikleşmenin donatı üzerindeki burkulma etkilerinin dikkate alınmamasından dolayı farklı bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı gidermek adına çoklu depremlere maruz kalmış betonarme yapılarda, çevrimsel davranıştaki azalmaları dikkate alabilecek malzeme modelleri önerilmiştir.

Malzemedeki dayanım kayıplarını dikkate alan literatürdeki ilk çalışma Aschheim ve Black (1999) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, Takeda çevrimsel davranış modeli, dayanım kayıplarını dikkate alabilecek şekilde geliştirilmiştir. Amadio vd. (2003) üç farklı çevrimsel davranış modeli (rijitlik ve dayanımdaki kayıpları dikkate almayan klasik model, rijitlikteki kaybı dikkate alan dayanımdaki kaybı dikkate almayan model hem rijitlik ve hem de dayanımdaki kayıpları dikkate alan model) kullanarak TSD sistemlerin çoklu deprem serileri altında doğrusal olmayan davranışlarını incelemişlerdir. Hatzigeorgiou ve Beskos (2009), çoklu depremlerin TSD sistemlerin maksimum elastik ötesi deplasman ve elastik ötesi deplasman oranlarına belirgin etkileri olduğunu göstermişlerdir. Hatzigeorgiou ve Liolios (2010) kiriş kolon birleşim noktalarında iki doğruyla idealize edilmiş moment eğrilik ilişkileri tanımlayarak çoklu depremler altında ÇSD sistemlerin davranışlarını incelemişlerdir. Geliştirdikleri model, ikinci mertebe etkilerini dikkate alırken malzemenin davranış eğrisindeki bozulmaları dikkate alamamaktadır. Bu çalışmanın en önemli sonucu, kalıcı deplasman değerlerinin rijitlik kayıplarının esas etken olduğunun belirlenmesidir. Abdelnaby ve Elnashai (2014) çoklu depremlerin etkilerini iki boyutlu çerçeveler üzerinde malzeme davranış eğrisindeki bozulmaları dikkate alan yayılı plastik modeller kullanarak dikkate almışlardır. Bu çalışmanın sonucunda çoklu deprem etkileri altında, TSD sistemleri ve ÇSD sistemleri esas alan idealize yaklaşımların dayanım azalmalarını doğru tespit edemediğini belirtmişlerdir.

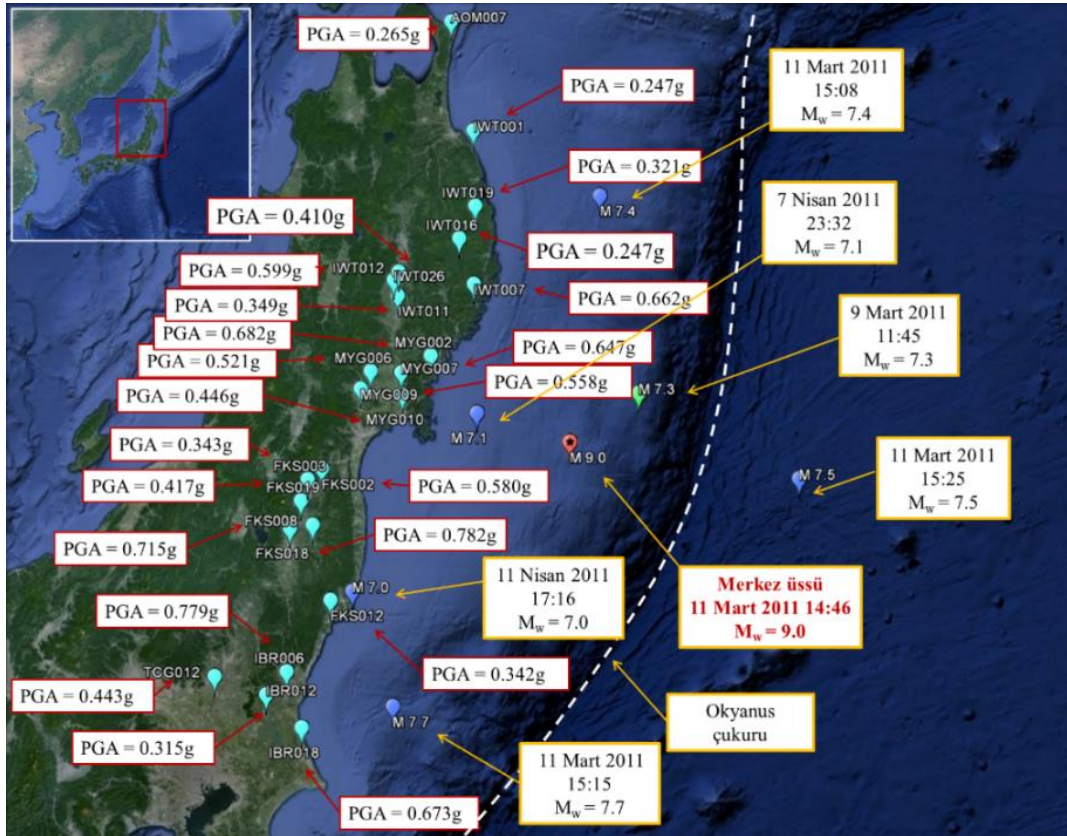
Bu araştırmada, Lee ve Fenves (1998) tarafından geliştirilen beton için plastik hasar modeli ve Gomes ve Appleton (1997) tarafından değiştirilerek kullanılan Menegotto-Pinto (1973) çelik modeli esas alınmıştır. Çalışmanın amacı, düzensiz betonarme yapıların çoklu deprem serileri altındaki sismik davranışlarını araştırmaktır. Bu nedenle, çoklu deprem etkilerini inceleyebilmek için seçilen 3 adet düzensiz betonarme yapıya 2011 Tohoku deprem serileri uygulanmıştır. Bu deprem serileri kullanılarak 516 adet doğrusal olmayan dinamik analizler ZEUS-NL (2002) programı kullanılarak iki durum için yürütülmüştür: (a) yapıların herhangi bir değişikliğe uğratılmamış, orijinal, boyutları değiştirilmemiş durumları ve (b) toplam rijitlik değerleri aynı kalacak şekilde sadece planda ve eleman boyutları bazında değişiklik yapıldığı durum. Bu çalışmanın bulguları rijitlik ve malzeme dayanımlarındaki azalmaları dikkate alabilen ve alamayan modeller için karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu iki farklı model için seçilen Tohoku deprem serileri altında yapılarda gözlenen plastik mafsallı dağılımları, kalıcı deformasyonlar ve iç kat ötelenme oranları mukayese edilmiştir.

2. 2011 TOHOKU DEPREM YER HAREKETİ SERİLERİ

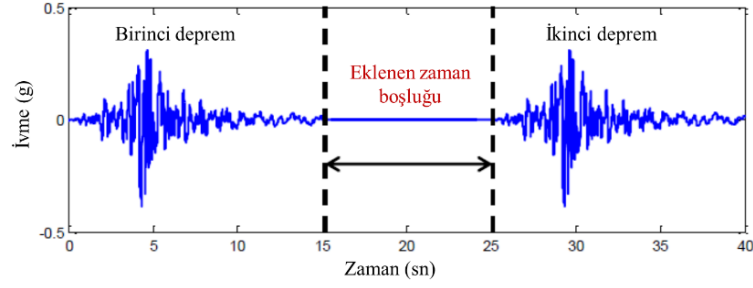
11 Mart 2011'de Tohoku, Japonya'da moment büyüklüğü (M_w) 9.0 olan yıkıcı bir deprem meydana gelmiştir. Japon Meteoroloji Ajansı (JMA) depremin odak mekanizmasının 24 km derinliğinde doğu batı doğrultusunda basınç eksenini olan ters faylanma olarak açıklamıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde Tohoku deprem serilerinin kullanılmasının başlıca nedeni, öncü depremler ve artçı depremler açısından benzersiz olmasıdır. Zhao (2011), Tohoku deprem serisinin ana depremden iki gün önce gerçekleşen M_w 7.3 olan öncü depremler ile oluştuğunu belirtmiştir. JMA, depremden sonra moment büyüklüğü 4 ve üzeri olan 1000'den fazla artçı depremin meydana geldiğini rapor etmiştir. Kazama ve Noda (2012) 11 Mart ve 11

Haziran arasındaki 3 aylık dönemde beş tanesi 7 ve daha fazla büyüklüğe sahip toplam 593 artçı deprem etkinliği olduğunu belirtmiştir. 2011 Tohoku deprem serilerinin Japon adaları ve çevresindeki sismik aktiveyi de tetiklediği ve arttırdığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada 23 istasyondaki kayıtlar dikkate alınmıştır. İstasyonlara ait en büyük yer ivmesi (PGA) değerleri ve istasyon konumları Şekil 3'te gösterilmiştir. Kayıtlar, Ulusal Yer bilimi ve Afet Önleme Araştırma Enstitüsü (NIED) veri tabanından alınmış olup, kayıtların alındığı istasyonların zemin tiplerine ve deprem odağına uzaklıklarına gibi parametreler hakkında daha detaylı bilgiye ilgili referanstan ulaşılabilecektir. Kayıtlarda yakın fay etkilerin bulunmaması için depremin merkez üssünden 20 km uzakta olan istasyonlar seçilmiştir. Ayrıca, yumuşak zeminden kaynaklı büyütme ve sıvılaşma etkilerini ihmal etmek için $V_{s,30}$ değeri 360 ile 800 m arasındaki istasyonlardaki kayıtlar kullanılmıştır. PGA değeri 0.2g ile 0.8g arasındaki deprem yer hareketi serileri göz önüne alınmıştır. 0.2g'nin altındaki kayıtların hasar oluşturması beklenmediğinden ve 0.8g'nin üstündeki kayıtların yıkıcı sonuçlar doğuracağı düşünüldüğünden, bu değerler ihmal edilmiştir. Deprem serilerinin düşey bileşenlerinin etkileri FEMA 356 (2000) doğrultusunda ihmal edilmiştir. Deprem serileri oluşturulurken, yukarıda açıklanan kriterlere göre seçilen deprem kayıtlarının arasına Şekil 4'te gösterildiği gibi 10-20sn'lik zaman boşlukları ilave edilmiştir. Bunun nedeni, ilk kayıt etkisi altında zorlanmış titreşime maruz kalan yapısal sistemin ikinci kayıt etkimeye başlamadan önce tekrar serbest konumuna dönmesinin sağlanmasıdır.

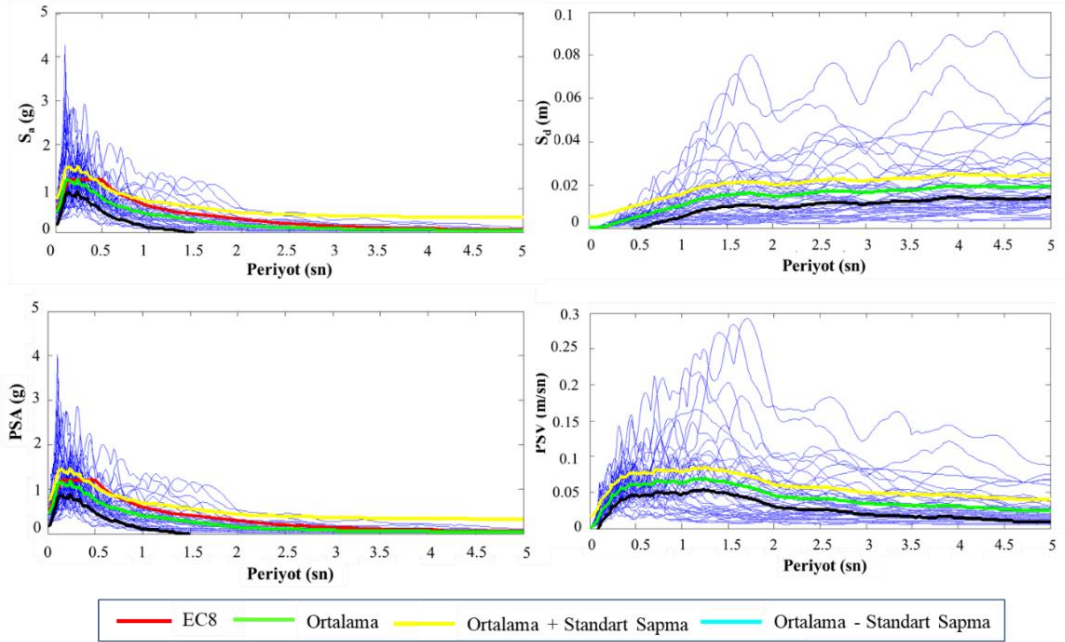


Şekil 3:
Dikkate alınan deprem serilerinin merkez üssü ve PGA değerleri



Şekil 4:
Depremler arası eklenen zaman boşluğu

Deprem serilerine ait spektral yer değiştirme (S_d), spektral ivme (S_a), sözde spektral hız (PSV) ve sözde spektral ivme (PSA) grafikleri Şekil 5'te gösterildiği gibidir. Ayrıca Şekil 5, ortalama, ortalama + standart sapma (σ), ve ortalama - standart sapma (σ) değerlerini de göstermektedir. Ek olarak Eurocode 8'de (2006) tanımlanan zemin sınıfı B ye ait tepki spektrumu da karşılaştırma amacı ile çizilmiştir.



Şekil 5:
Yer hareketi parametreleri

3. İNCELENEN BETONARME BİNALARIN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada üç adet planda düzensiz mevcut betonarme yapı dikkate alınmıştır: SPEAR (Seismic Performance Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings), ICONS (Innovative Concepts for Seismic Design of New and Existing Structures) ve mevcut bir okul binası. İnceleme konusu yapılardan SPEAR ve ICONS yapıları, 1970'li yıllardaki yapım teknolojilerini temsil eden, Avrupa Birliği tarafından desteklenen kapsamlı deneysel araştırma projelerinde kullanılan test yapılarıdır. Seçilen okul binası ise 1975 Afet Bölgelerinde Yapılacak

Yapılar Hakkında Yönetmeliği'ne (ABYYHY 1975) göre tasarlanmış bir yapıdır. Türkiye'deki bina stokunun incelenen yapılara benzer özellikler gösterdikleri bilinmektedir.

Düzensiz betonarme yapıların çoklu deprem serileri altındaki sismik davranışlarını belirleyebilmek için seçilen bu yapılar iki farklı durum gözetilerek analiz edilmişlerdir. Birinci durum, yapıların tasarlandıkları orijinal şekilleri ile analiz edildikleri; ikinci durum ise yapıların toplam rijitliğini değiştirmeden geometrilerinin değiştirilerek analiz edildikleri durumdur.

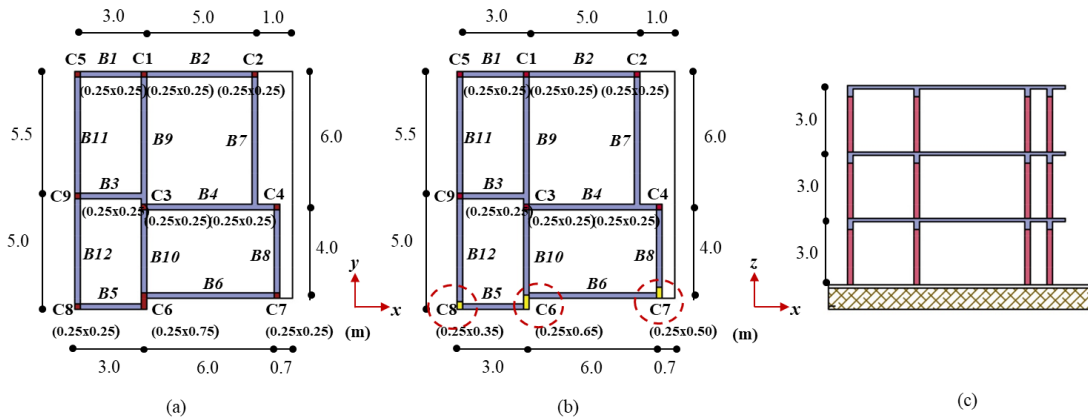
3.1. Düzenli ve Düzensiz Durum için SPEAR Binası

SPEAR binası Fardis (2002) tarafından tasarlanmıştır. Bina planda düzensiz olup üç katlıdır ve kat yükseklikleri üç metredir. Her iki doğrultuda da bina iki açıklığa sahiptir. Betonun basınç dayanımı 25 MPa (Jeong ve Elnashai, 2004), çeliğin akma dayanımı 400 MPa (Papanikolaou vd., 2005) olarak belirtilmiştir. Eurocode 8'e (2006) göre hesaplanan burulma özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu tabloda e_{ox} ve e_{oy} X ve Y doğrultusundaki dış merkezliliği, r_x ve r_y X ve Y doğrultusundaki burulma yarıçapını ve I_s ise katın plandaki atalet yarıçapını göstermektedir. Bina Y doğrultusunda daha büyük dışmerkezliğe sahiptir ve Eurocode 8'e (2006) göre düzensizdir. Binaya ait yapısal özellikler için daha detaylı bilgi Stratan ve Fajfar (2003) ve Papanikolaou vd. (2005) makalelerinde bulunabilir.

Tablo 1. Hesaplanan düzensizlik değerleri

e_{ox} (m)	r_x (m)	$0.3r_x$ (m)	e_{oy} (m)	r_y (m)	$0.3r_y$ (m)	I_s (m)
1.31	1.45	0.43	1.04	3.53	1.06	4.38

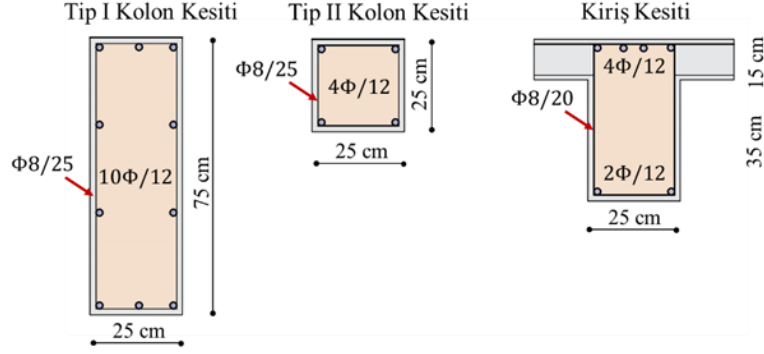
Y doğrultusundaki büyük dışmerkezlikten ötürü, düzenli durum bu yönde oluşturulmuştur. Yapının rijitlik değişiminden etkilenmemesi için düzensiz durumla aynı rijitlik değeri kullanılmıştır. Binanın Y doğrultusundaki rijitlik değeri düzensiz durumda yaklaşık olarak 152 kN/m iken binayı düzenli duruma getirmek için Şekil 6'da daire içine alınan C6, C7 ve C8 kolonlarının boyutları değiştirilmiştir. Bu haldeki yeni rijitlik değeri yaklaşık olarak 149 kN/m olarak hesaplanmıştır. Düzenli ve düzensiz durum için yanal rijitlikteki fark %2 olarak belirlenmiştir. Şekil 7'te gösterilen yapısal elemanlarda yapılan değişikliklere ait detaylar Tablo 2'de verilmiştir. Özgün binanın değiştirilmesinden sonra elde edilen düzensizlik parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 6:

SPEAR binasının;

a. Özgün planı b. Değiştirilmiş planı c. Kat yükseklikleri



Şekil 7:
Boyutları değiştirilen yapısal elemanlar

Tablo 2. Şekil 7’de gösterilen elemanların detayları

Kolon adı	Düzensiz durum (cmxcm)	Düzenli durum (cmxcm)	Kolon adı
C6	25 × 75	25 × 65	C6
C7	25 × 25	25 × 50	C7
C8	25 × 25	25 × 35	C8

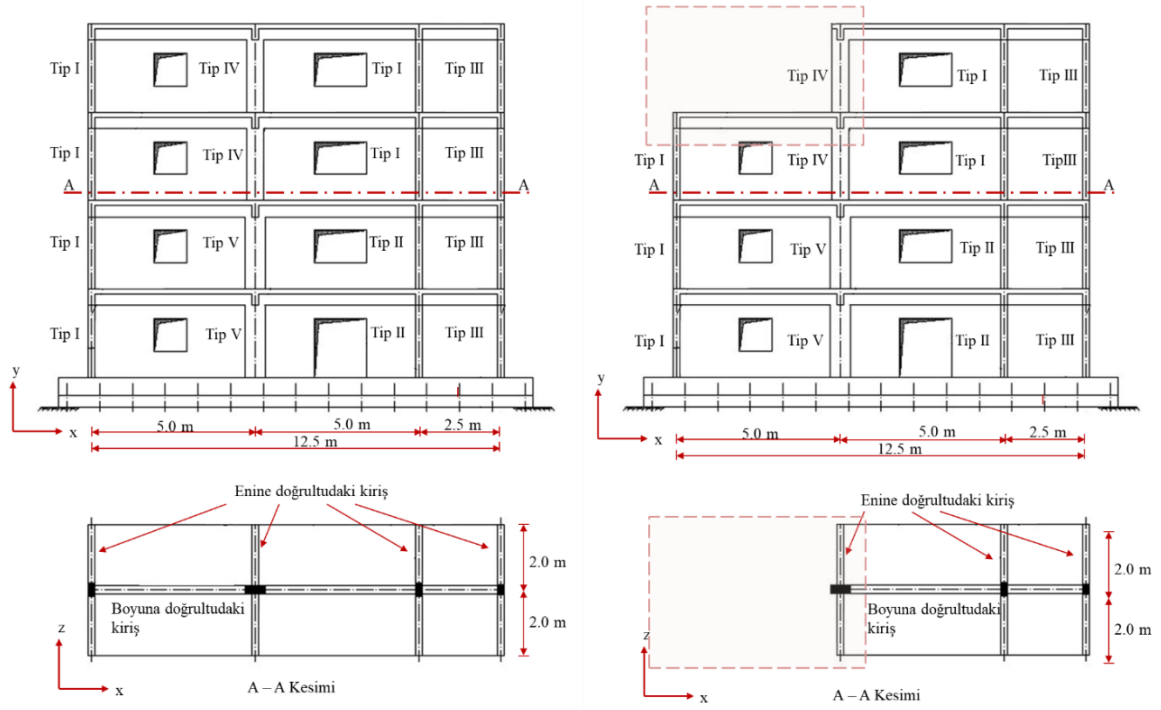
Tablo 3. Seçili elemanları değiştirdikten sonra hesaplanan düzensizlik değerleri

e_{ox} (m)	r_x (m)	$0.3r_x$ (m)	e_{oy} (m)	r_y (m)	$0.3r_y$ (m)	l_s (m)
0.23	1.86	0.55	1.36	5.86	1.76	4.38

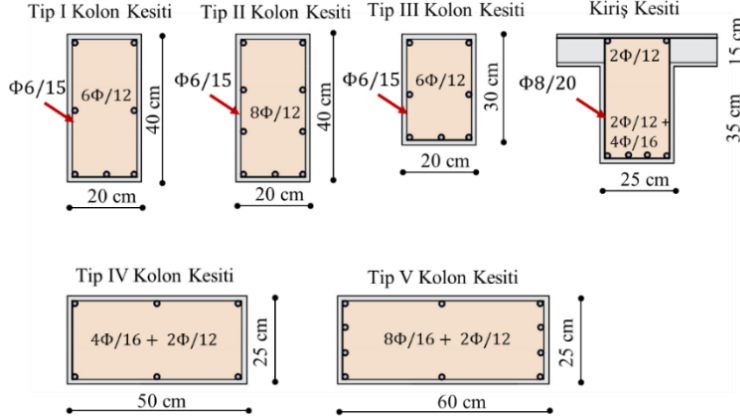
3.2. Düzenli ve Düzensiz Durum için ICONS Binası

ICONS yapısı düşey yükler göz önüne alınarak Carvalho vd. (1999) tarafından dört katlı olarak tasarlanmıştır. Kat yükseklikleri 2.7 metredir. Sadece tek bir doğrultuda 3 açıklığa sahip olup diğer doğrultuda açıklığı yoktur. ICONS yapısı özgün durumunda düzenli bir yapıdır. Betonun basınç dayanımı 16.3 MPa, çeliğin akma dayanımı ise 343 MPa’dır (Pinho ve Elnashai, 2000).

ICONS yapısını düşeyde düzensiz duruma getirmek için Eurocode 8’de (2006) belirtilen geri çekilme sınırları uygulanmıştır. Şekil 8’de binanın özgün ve değiştirilmiş durumu gösterilmiştir.



Şekil 8:
ICONS yapısının özgün (sol) ve değiştirilmiş (sağ) plan düzeni ve kesiti



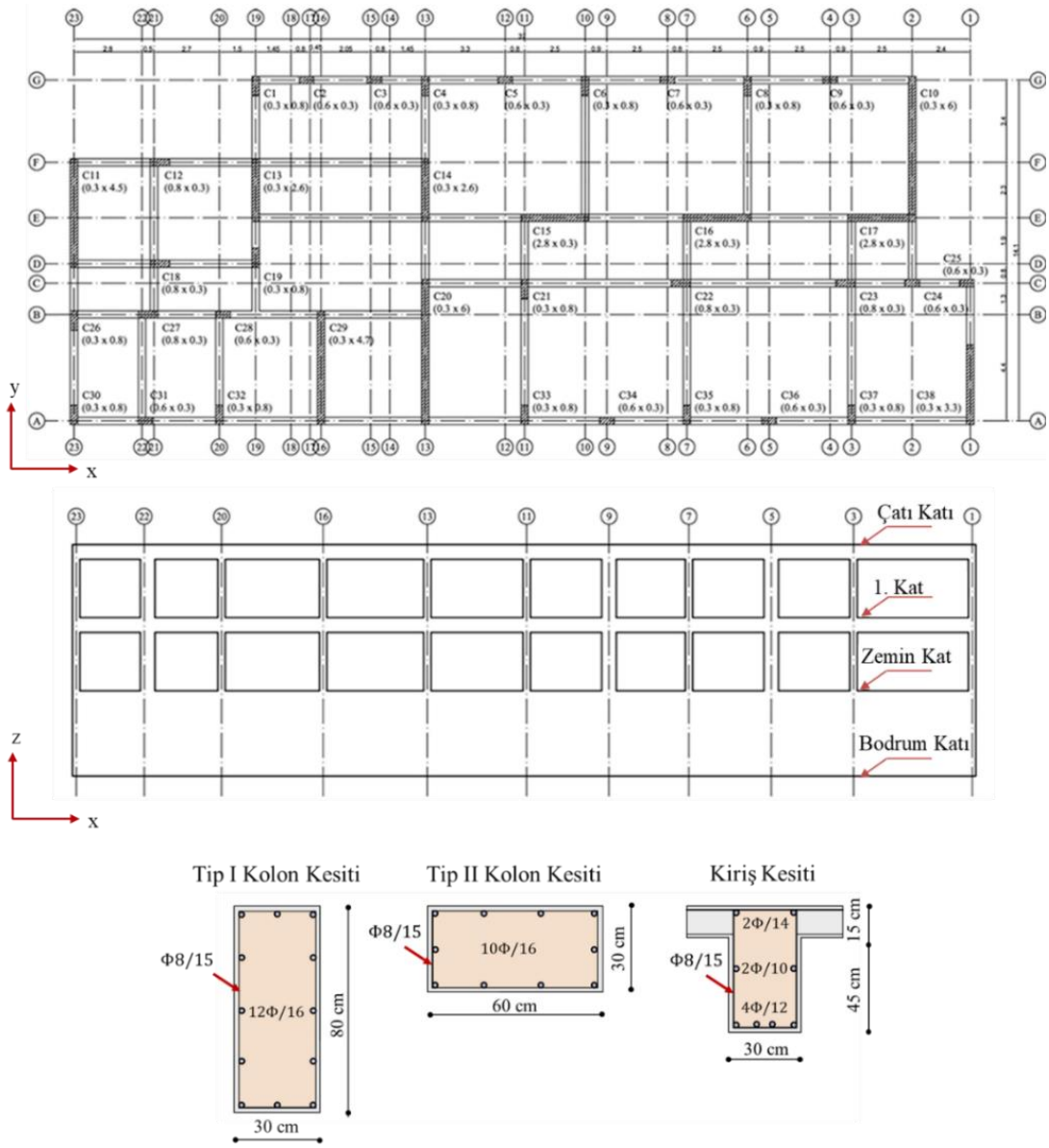
Şekil 9:
ICONS binasının donatı düzeni

3.3. Düzenli ve Düzensiz Durum için Okul Binası

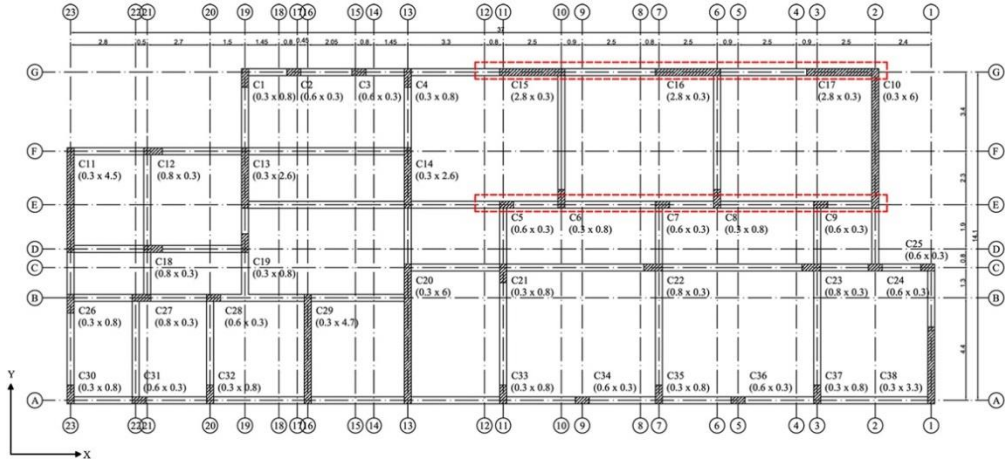
Okul binası Türkiye'nin doğusunda Van ilinde bulunmaktadır. Van ilinde, 23 Ekim ve 9 Kasım 2011 tarihlerinde M_w değerleri sırası ile 7.2 ve 5.6 olan iki deprem meydana gelmiş ve bu bölgede ciddi hasarlara yol açmıştır. Deprem ve yol açtığı hasarlara ait detaylı bilgilere, Oyguc (2016), Oyguc ve Güley (2017) çalışmalarından ulaşılabilir. 2011 Van depreminden sonra yapılan saha çalışmalarında inceleme konusu okul binasının ağır hasarlı olduğu tespit edilmiştir. Bina bir bodrum kat ve iki normal kattan oluşmaktadır. Bodrum katın yüksekliği 3.5 metre olup bodrum perdeleri ile çevrilidir. Üst katlar ise 3 metre yüksekliğindedir. Yapıda kullanılan betonun basınç dayanımı 20 MPa, çeliğin akma dayanımı ise 420 MPa olarak

belirlenmiştir. Yapısal düzensizlik kontrolü Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (2018) göre yapılmıştır. Mevcut durumda η_{bi} burulma düzensizlik katsayısı 1.06 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer yönetmelikte belirtilen 1.2 limit değerinden küçük olduğundan, söz konusu yapının mevcut durumunda düzenli davranış gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 10'da inceleme konusu binanın plan ve donatı detaylarına yer verilmiştir.

Bina Şekil 11'de gösterilen yapısal elemanların yerlerinin değiştirilmesi ile düzensiz duruma getirilmiştir. E aksında bulunan üç adet perde G aksına kaydırılmıştır. Böylece binanın dışmerkezliği artmış ve η_{bi} katsayısı 1.21 olarak belirlenmiştir.



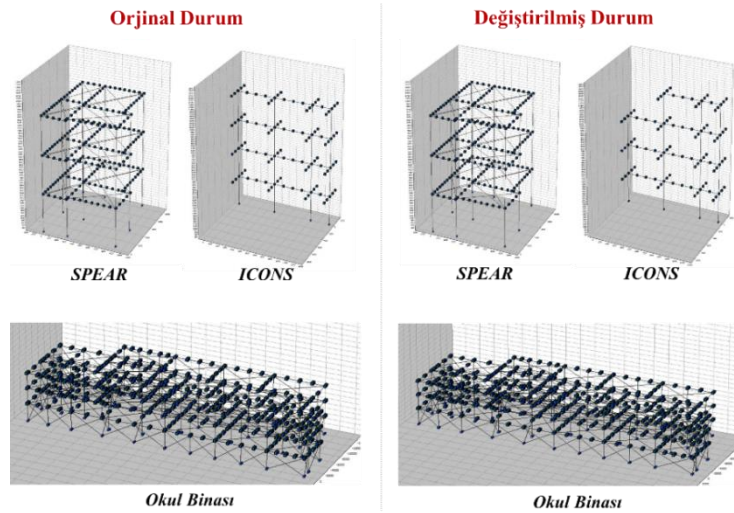
Şekil 10:
Okul binasının plan ve donatı düzeni



Şekil 11:
Okul binasının değiştirilmiş plan düzeni

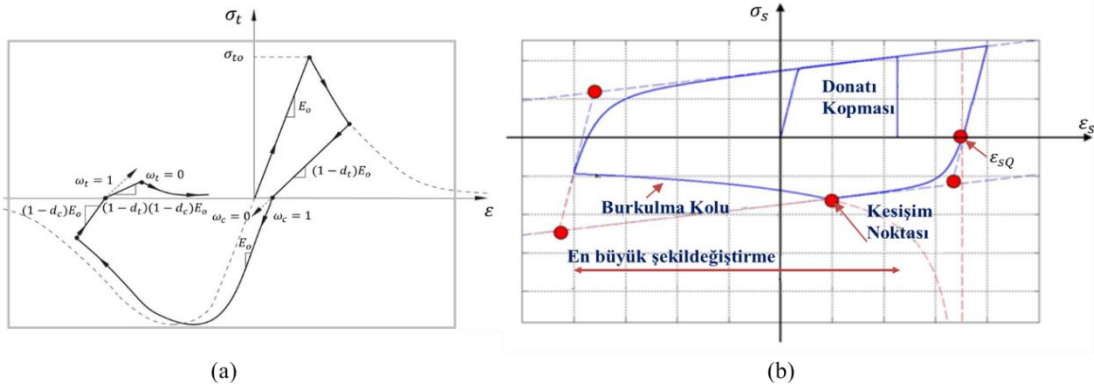
4. ANALİZLERDE KULLANILAN YAPISAL MALZEME MODELLERİ

Yukarıdaki bölümlerde plan ve kesit özellikleri verilen düzensiz mevcut betonarme yapıların 3 boyutlu sonlu eleman modelleri fiber-esaslı (yayıllı plastik dağılım) yaklaşımla analiz yapan Zeus-NL (Elnashai vd., 2002) programı kullanılarak oluşturulmuştur. İnceleme konusu yapılara ait 3 boyutlu sonlu eleman model görüntülerine Şekil 12’de yer verilmiştir. Yapısal elemanlar 3 boyutlu kübik elasto-plastik kiriş-kolon elemanları kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan yazılım hem malzemenin hem de geometrinin doğrusal olmama durumunu statik ve dinamik analizlerde göz önüne alabilmektedir. Analizlerde, her kolon ve kiriş elemanı 4 alt parçacığa bölünerek tasarlanmıştır. Kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki plastikleşmeyi doğru bir şekilde yakalayabilmek için kolon veya kiriş elemanları üzerinde oluşturulan bu alt parçacıklar başlangıç ve bitiş noktalarında daha küçük uzunluklarda tanımlanmıştır. Buna göre, ZEUS-NL programında, L uzunluğundaki bir eleman 4 alt parçaya şu şekilde ayrılmaktadır: 0.15L, 0.35L, 0.35L ve 0.15L.



Şekil 12:
İnceleme konusu betonarme yapıların ZEUS-NL ile oluşturulan üç boyutlu modelleri

Geleneksel beton ve çelik modelleri çoklu depremler altında oluşabilecek rijitlik ve dayanım azalma etkilerini dikkate alamamaktadır. Bu sebepten dolayı, bu çalışmada, rijitlik ve dayanım etkilerini dikkate alabilen malzeme modelleri tercih edilmiştir. Lee ve Fenves (1998) çalışmalarında, enerji esaslı çatlak hasar teorisi ve sürekli ortam mekaniğinde hasar teorilerine dayanan bir beton modeli geliştirmişlerdir. Şekil 13.(a)'da bu modele ait gerilme-şekil değiştirme grafiğine yer verilmiştir. Geliştirilen bu beton modelinde çekme ve basınç etkileri altında farklı düzeylerde oluşabilecek dayanımdaki azalım etkilerini dikkate alabilmek için 0 ile 1 arasında hasar değerleri alabilen iki farklı termodinamik sertlik değişkeni tanımlanmıştır: d_t çekme hasarı ve d_c basınç hasarı. Bu değişkenlerin değeri 0'a eşit olduğunda hasarsız, 1'e eşit olduğunda ise hasarlı duruma karşılık gelmektedir. Aynı modelde çekme ve basınç etkileri altında oluşabilecek rijitlik azalım etkilerini dikkate alabilmek için sırasıyla, ω_t ve ω_c malzeme ağırlık çarpanları tanımlanmıştır. Beton elemanda oluşacak çatlakların açılma ve kapanma durumlarının elastik rijitlik üzerindeki etkilerini anlayabilmek adına geliştirilmiş olan bu basit model azalım etkilerini dikkate alabilmektedir. Bu modelde dayanımdaki azalım çatlama betonun etkin gerilme değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Şekil 13.(a)'da gösterilen gerilme-şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, rijitlik değerinde gözlenen kayıplardan dolayı, başlangıç rijitliğinin diğer çevrimlerdeki rijitlik değerlerinden farklı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 13:

- a.** Lee ve Fenves (1998) tarafından geliştirilen çevrimsel yükleme altında rijitlik ve dayanımdaki azalımları dikkate alabilen beton modeli, **b.** Gomes-Appleton (1997) modeli dikkate alınarak güncellenen çelik modeli

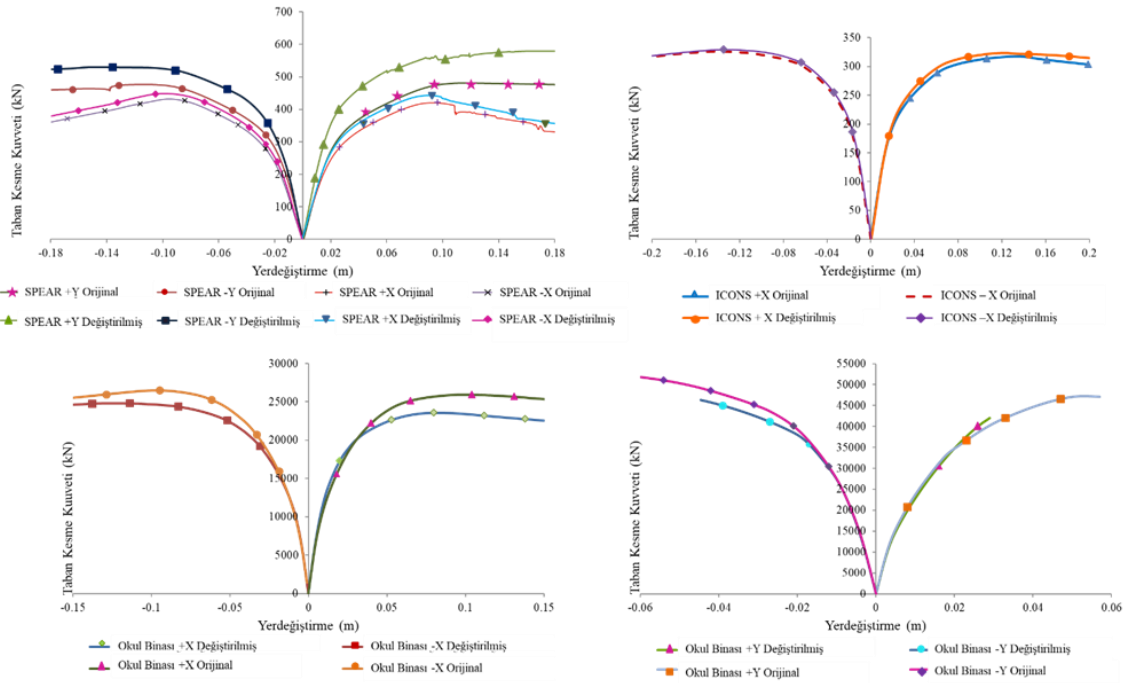
Çelik malzeme için, Gomes ve Appleton (1997) tarafından önerilen ve azalım etkilerini dikkate alabilen değiştirilmiş Menegotto-Pinto (1973) çelik modeli esas alınmıştır. Belirtilen azalım etkileri sırasıyla Bauschinger etkisi ve donatıda burkulma etkisidir. Bu çalışma kapsamında kullanılan çelik modeli Şekil 13.(b)'de gösterilmiştir. Bu model donatı kopma etkilerini de dikkate alabilecek şekilde geliştirilmiştir. Model ilk döngüde elastik, akma ve pekleşme bölgelerinden oluşmaktadır. Yükleme durumu yön değiştirdiği zaman ise Bauschinger etkileri görülmektedir. Çevrimsel döngüler sırasında donatı kopma şekil değiştirmesine ulaşırsa, donatılar kopmuş kabul edilmektedir. Ayrıca donatı modeli, paspayının dökülmesinden sonra donatıların elastik olmayan burkulma davranışını yansıtmaktadır (Abdelnaby ve Elnashai, 2014).

5. ANALİTİK ÇALIŞMA SONUÇLARI

5.1. Seçilen Binaların Düzenli ve Düzensiz Durumları için Kapasitelerinin Değerlendirmesi

ATC-76-6'da (2010) planda düzensizliği olmayan az ve orta katlı yapıların kapasite tayinlerinde, Fajfar ve Gaspersic (1996) tarafından önerilen N2 yönteminin güvenle kullanılabileceği ve bu yöntem ile hesaplanan değerlerin doğrusal olmayan dinamik analiz sonucunda bulunan değerlere yakın olduğu belirtilmiştir (Oyguç, 2016). Bundan dolayı bu çalışmada düzenli binaların kapasitelerini belirlemek için N2 yöntemi kullanılmıştır.

Yapıların düzensiz durumlarına karşı gelen kapasite değerleri bulunurken Kreslin ve Fajfar (2012) tarafından önerilen genişletilmiş N2 yöntemi uygulanmıştır. Bu metod, N2 yönteminin plan ve yapı yüksekliği boyunca oluşabilecek düzensizlik etkilerini de dikkate alabilecek şekilde geliştirilmiş halidir. Metodun geliştirilmiş halinde, plan ve yükseklik boyunca oluşan düzensizlikler için tanımlanmış C_E ve C_T düzeltme katsayıları bulunmaktadır. Düzeltme katsayıları, normalize edilmiş itme analizi sonuçlarının, elastik modal analiz sonuçlarına oranıdır. SPEAR ve ICONS yapılarında düzeltme katsayıları sırasıyla, $C_E = 1.23$ ve $C_T = 1.02$ olarak hesaplanmıştır. Okul binası hem planda hem de yükseklik boyunca düzensizliğe sahip olduğundan düzeltme katsayıları $C_E = 1.12$ ve $C_T = 1.01$ olarak bulunmuştur. Genişletilmiş N2 yöntemi kullanılarak elde edilen kapasite eğrilerine Şekil 14'te yer verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği gibi okul binasının kapasitesi diğerlerine nazaran daha fazla bulunmuştur. Bunun nedeni, okul binasının bodrum katında rijit betonarme perdelerin varlığıdır. Ayrıca, pozitif doğrultuda SPEAR ve okul binaları yüksek kapasiteye sahip iken, negatif doğrultuda ICONS çerçevesi daha yüksek kapasite değerine sahiptir.



Şekil 14:
Genişletilmiş N2 yöntemi kullanılarak elde edilen kapasite eğrileri

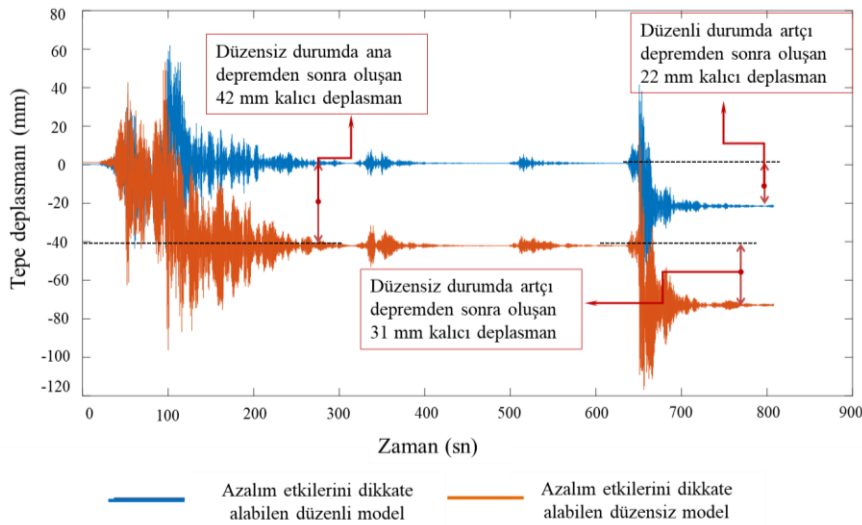
5.2. Dayanım Kayıplarının Dikkate Alındığı Modellerde Düzensizlik Etkilerinin Sismik Davranışa Etkisi

Düzensizlik etkilerinin, dayanım ve rijitlik kayıplarını dikkate alan modeller üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için, seçilen betonarme yapılarda doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Söz konusu yapılar düzenli ve düzensiz durumları için Şekil 1’de gösterilen 23 istasyon kaydından elde edilen 2011 Tohoku deprem serilerine maruz bırakılmış ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan toplam 516 adet analiz yürütülmüştür. Her yapı için en fazla kalıcı deplasman değerinin elde edildiği 5 kayıt belirlenmiş ve bu 5 kayıt için SPEAR, ICONS ve okul binalarının tepe deplasman-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 15, 16 ve 17’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi, artçı şokların etkimesi ile kalıcı deplasman değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

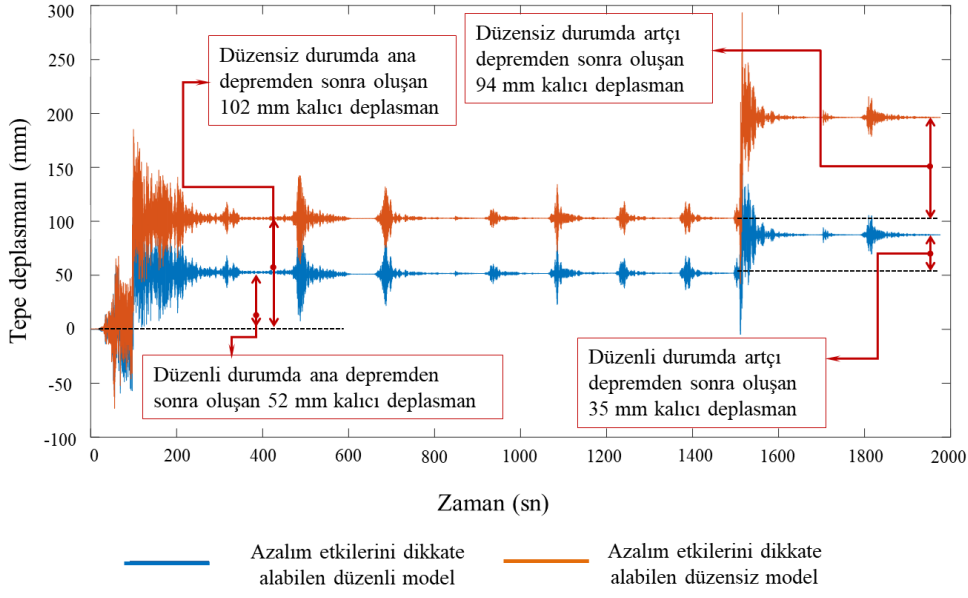
Analizlerin neticesinde, SPEAR binasının düzenli durumunun ana depremde kalıcı deplasman üretmediği, ancak artçı depremlerin etkimesi ile 22mm’lik kalıcı deplasman değerinin elde edildiği anlaşılmıştır. Şekil 15’ten de görülebileceği üzere aynı yapının düzensiz durumu ise ana depremden sonra 42mm’lik kalıcı deplasman değeri, artçı depremlerden sonra ise 31mm’lik kalıcı deplasman değeri üretmiştir. Tüm deprem serilerinin sonunda düzenli durum için 22mm toplam kalıcı deplasman ve düzensiz durum için 73mm toplam kalıcı deplasman değerleri hesaplanmıştır.

ICONS çerçevesi ana depremden sonra 52mm’lik kalıcı deplasman değerine ulaşırken, artçı şokların etkimesi ile bu sayı 35mm daha artmıştır. Şekil 16’da gösterildiği gibi, bu çerçevenin düzensiz durumu dikkate alındığında, kalıcı deplasman değerleri ana deprem ve artçı depremler için sırasıyla, 102mm ve 94mm olarak belirlenmiştir. Düzenli ve düzensiz durumlar için hesaplanan toplam kalıcı deplasman değerleri sırasıyla 87mm ve 196mm olarak hesaplanmıştır. SPEAR ve ICONS yapılarında beklenildiği gibi artçı şoklar ek kalıcı deplasman değerleri üretmiş ve tüm seri sonunda yapıların düzensiz durumları daha fazla kalıcı deplasman değeri üretmişlerdir.

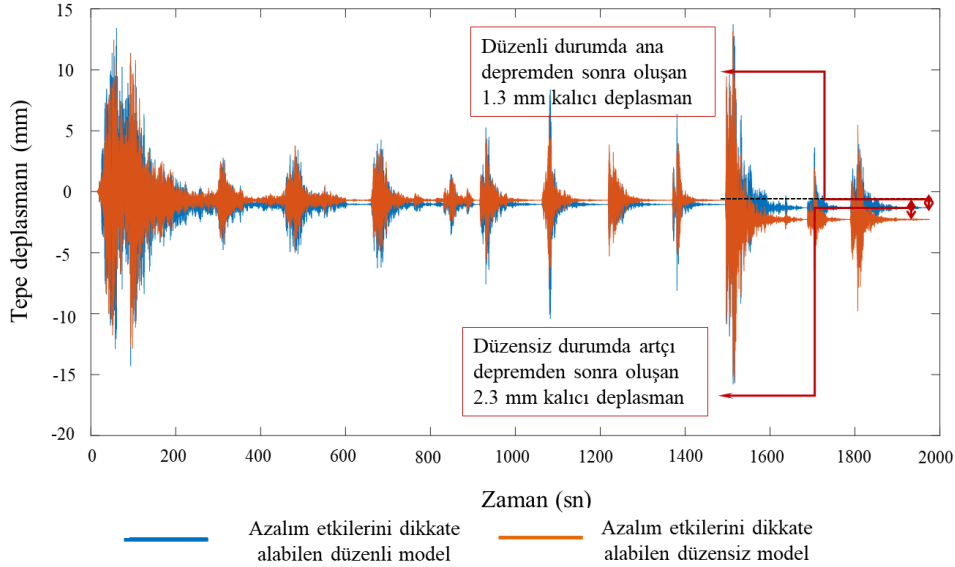
Yine beklenildiği gibi, okul binasının diğer yapılardan daha rijit olması sebebiyle deplasman değerleri diğerlerine nazaran daha az hesaplanmıştır. Şekil 17’de gösterildiği gibi, düzenli durum için ana depremden sonra 1.3mm’lik kalıcı deplasman değeri bulunurken, düzensiz durum için artçı şoklar 2.3mm’lik kalıcı deplasman değeri üretmişlerdir. Bu yapının da düzensiz durumu düzenli durumuna göre daha fazla kalıcı deplasman değeri üretmiştir.



Şekil 15:
SPEAR binasının deplasman-zaman grafiği



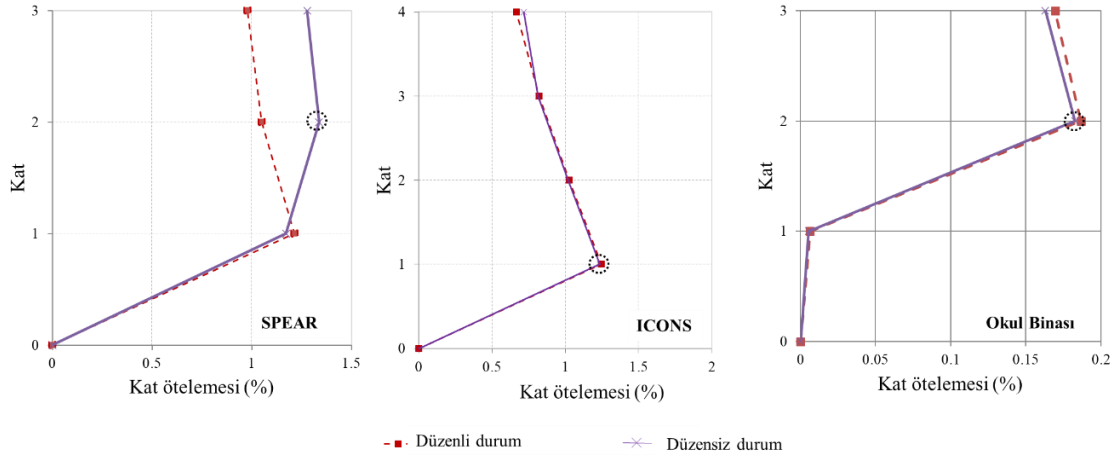
Şekil 16:
ICONS çerçevesinin deplasman-zaman grafiği



Şekil 17:
Okul binasının deplasman-zaman grafiği

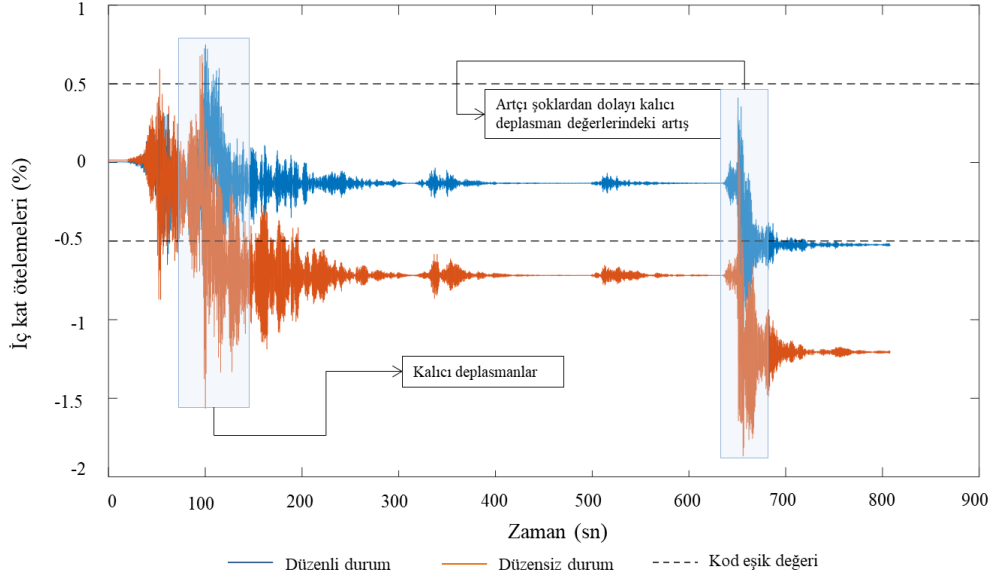
6. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

İnceleme konusu betonarme yapıların, rijitlik ve dayanımdaki kayıpları dikkate alabilen malzeme modelleri kullanılarak yürütülen dinamik analizleri neticesinde, düzenli ve düzensiz durumları için, Şekil 18'de gösterilen ortalama kat öteleme profilleri elde edilmiştir. En fazla öteleme değerinin hesaplandığı kat seviyeleri daire içerisine alınarak gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, düzensiz durumlara ait kat öteleme değerleri düzenli durumlara göre daha fazladır.

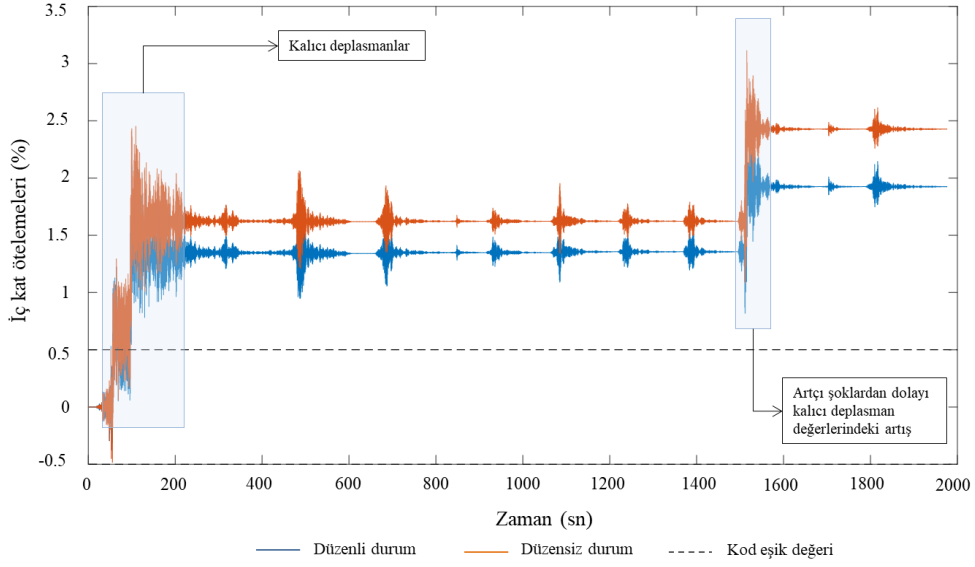


Şekil 18:
İnceleme konusu binaların ortalama kat öteleme profilleri

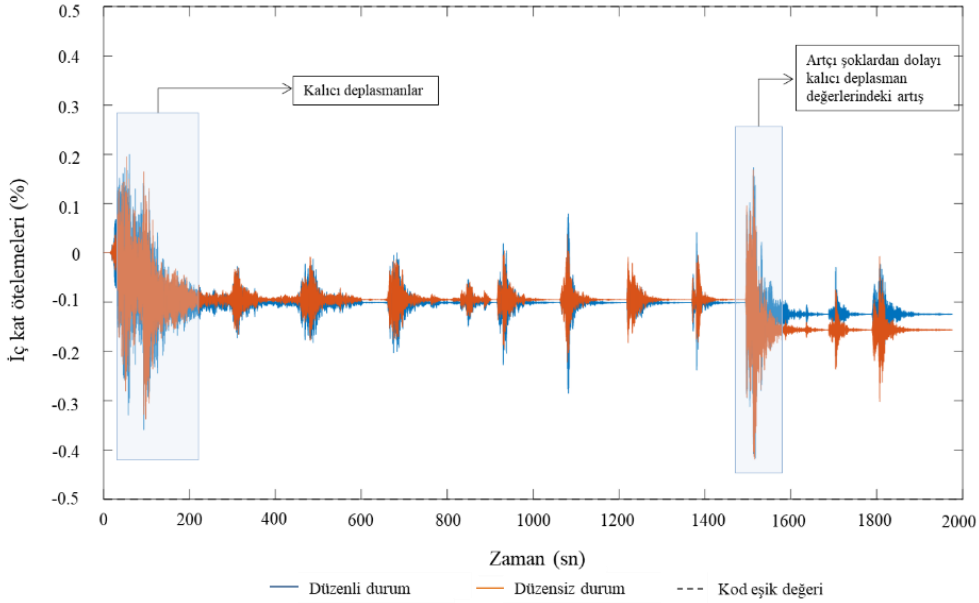
Güncel deprem yönetmeliklerinde ve literatürde, iç kat öteleme değerleri etkin bir hasar kontrol parametresi olarak kullanıldığından, Şekil 18’de belirlenen kat seviyeleri için iç kat öteleme-zaman değişimi grafikleri elde edilmiş ve inceleme konusu binaların düzenli ve düzensiz durumları için Şekil 19, Şekil 20 ve Şekil 21’de sunulmuştur. Aynı şekiller üzerinde, Eurocode 8 (2006)’da verilen %0.5 hasar eşik değeri de işlenerek binaların hasar dereceleri gösterilmiştir. Sunulan şekillerden de anlaşılacağı gibi, artçı şok etkileri kalıcı deplasman değerlerini arttırmaktadır. Ayrıca, düzensiz durum için hesaplanan kalıcı deplasman değerleri düzenli duruma göre daha fazladır. SPEAR ve ICONS binalarında Eurocode 8 (2006)’da belirtilen hasar eşik değerinin hem düzenli hem de düzensiz durumlar için aşıldığı, okul binasında ise bu değer aşılmadığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak, okul binasının en alt katını çevreleyen betonarme perdelerin varlığı gösterilebilir.



Şekil 19:
SPEAR binası iç kat öteleme-zaman grafiği



Şekil 20:
ICONS binası iç kat öteleme-zaman grafiği



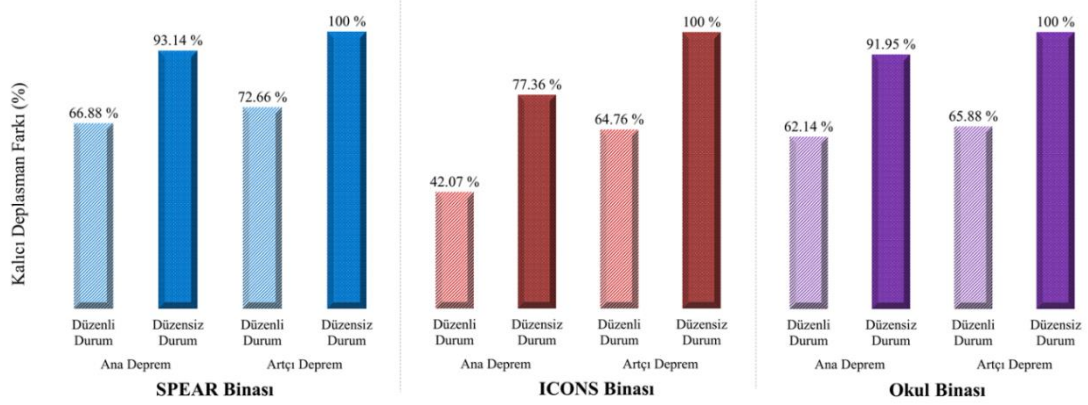
Şekil 21:
Okul binası iç kat öteleme-zaman grafiği

Bilindiği üzere, literatürde betonarme yapıların iki boyutlu ya da üç boyutlu analizlerinde kullanılmak üzere önerilmiş birçok hasar bünye denklemi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, Hatzivassiliou ve Hatzigeorgiu (2015), Zhang vd. (2013) ve Moshref vd. (2017) tarafından sürekli hasar mekaniğinde kullanılmak amacı ile önerilen modellerdir. Bu modellerde çekme ve kesme hasarları için değişkenler tanımlanmakta ve betonun makro-mekanik özelliklerindeki kayıplar dikkate alınmaya çalışılmaktadır. Ayrıca, Palermo ve Trombetti (2016), daha önce literatürde önerilmiş hasar modellerini de dikkate alarak, özellikle gelişmekte olan ülkeler için

albenisi olan hafif betonarme panellerde kullanılmak üzere yeni bir modelleme stratejisi önermişlerdir. Bu çalışmada ise, önceki bölümlerde de belirtildiği üzere Lee ve Fenves (1998) tarafından önerilen beton modeli ve Gomes ve Appleton (1997) tarafından önerilen çelik modeli kullanılmıştır.

Şekil 22’de, dikkate alınan SPEAR, ICONS ve okul binalarının düzenli ve düzensiz durumları için hesaplanan rölatif kalıcı deplasman değerlerinin ana deprem ve artçı depremler etkisi altında özeti paylaşılmıştır. Buna göre, ana deprem etkisi altında, SPEAR, ICONS ve okul binalarının düzensiz durumlarına ait kalıcı deplasman değerlerinin yapıların düzenli durumlarına göre sırasıyla %26.26, %35.29, ve %29.81 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, söz konusu yapıların düzensiz durumlarına tüm deprem serisinin etkilendiği hallerde kalıcı deplasman değerleri düzenli durumlarına karşılık sırasıyla, %27.34, %35.24 ve %34.12 daha fazla belirlenmiştir.

SPEAR, ICONS ve okul binalarının düzenli durumları dikkate alındığında, artçı şokların kalıcı deplasmanları sırasıyla %5.78, %22.69 ve %3.74 arttırdığı belirlenmiştir. Yapıların düzensiz durumları için ise bu değerler %6.86, %22.64 ve %8.05 olarak belirlenmiştir. Bu bulgular artçı deprem serilerinden sonra ve yapısal düzensizlikler durumunda kalıcı deplasman değerlerinin arttığının açık bir ispatıdır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında, dayanım ve rijitlikteki kayıpları dikkate alamayan malzeme modellerinin çoklu deprem etkileri altında, yapısal davranışı gerçekçi olarak belirleyemediği gösterilmiştir.



Şekil 22:
SPEAR, ICONS ve okul binalarındaki rölatif kalıcı deplasman farkları

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada planda ya da yükseklikte düzensizlikler içeren, SPEAR, ICONS ve okul binalarının sismik davranışları 2011 Tohoku deprem serileri altında incelenmiştir. Söz konusu yapılar dayanım ve rijitlik azalım etkilerini dikkate alabilen malzeme modelleri kullanılarak ZEUS-NL programı ile modellenmişlerdir. Daha sonra, yapıların rijitliği değiştirilmeden geometrileri ile oynanarak düzenli durumları elde edilmiştir. N2 ve genişletilmiş N2 metotları kullanılarak yapıların düzenli ve düzensiz durumları için kapasiteleri hesaplanmıştır. Aynı analizler azalım etkilerini dikkate alamayan malzeme modelleri ile de tekrarlanmış ve sonuçta bu malzeme modellerinin artçı depremlerin sismik davranışa olan etkilerini düzgün bir biçimde yansıtamadıkları anlaşılmıştır. Bu sebeple, yapıların doğrusal olmayan analizlerinde sadece azalım etkilerini dikkate alabilen malzeme modelleri ile devam edilmiştir. Söz konusu üç yapı düzenli ve düzensiz durumları için 516 adet doğrusal olmayan analize tabi tutulmuş ve aşağıdaki sonuçlara erişilmiştir:

- Seri depremlerin düzenli yapılara nazaran düzensiz yapılarda daha fazla deplasman değerleri oluşturdukları belirlenmiştir. Tohoku deprem serisi özelinde SPEAR, ICONS

ve okul binalarının düzensiz durumları için rölatif kalıcı deplasman değerlerinin sırasıyla %26.26, %35.29, ve %29.81 arttığı tespit edilmiştir.

- Ana depremden sonra düzensiz yapılarda hasar yığılıklarının düzenli yapılara nazaran daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Çoklu deprem etkilerinin basit nümerik analiz metotları kullanılarak düzgün bir biçimde belirlenemeyeceği tespit edilmiştir. Çoklu depremlerden dolayı, yapısal malzemede ve bileşenlerde ortaya çıkacak hasar yığılıklarının nümerik modele dahil edilmemesi bulunacak sonuçların doğruluğu hakkında şüphe uyandıracaktır.
- Özellikle çoklu deprem etkileri altında klasik malzeme modellerinin sismik davranışı yeterli bir biçimde yansıtamadığı anlaşılmış olup, bu tarz etkilerin incelenmesinin dayanım ve rijitlik kayıplarını dikkate alabilen malzeme modelleri kullanılarak yapılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Genişletilmiş N2 metodu sonuçları ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları birbirine yakın olduklarından, genişletilmiş N2 metodunun çoklu deprem etkilerine maruz kalan düzensiz yapıların kapasitelerinin tayininde güvenle kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Çoklu depremler altında, betonarme yapılarda dayanım ve rijitlik kayıplarına yol açan en önemli parametrelerin betonun ezilmesi ve çeliğin burkulması ve kırılması gösterilebilir. Sistemin dayanım ve rijitlik kaybında çeliğin akmasının ve betonun çatlamasının çok etkin bir rolü olmadığı belirlenmiştir.
- Bu çalışma 3 düzensiz mevcut betonarme binanın çoklu deprem etkileri altındaki sismik davranışına odaklanmıştır. Çalışmanın sonucu dikkate alınan bu durumlar için sınırlıdır. Ancak, analiz sonuçları daha detaylı modeller kullanılması gerektiğini ve daha detaylı analizler yaparak çoklu deprem etkilerine maruz yapıların sismik davranışlarının daha gerçekçi belirlenebileceğini göstermiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Yazarlardan; Reşat A. Oyguç, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesini yapmıştır; Çağatay Toros, veri toplama, veri analizi ve yorumlamasını yapmıştır.

KAYNAKLAR

1. Abdelnaby, A.E., Elnashai A.S. (2014) Performance of Degrading Reinforced Concrete Frame Systems Under the Tohoku and Christchurch Earthquake Sequences, *Journal of Earthquake Engineering*, 18 (7), 1009-1036. doi: 10.1080/13632469.2014.923796
2. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY). (1975) T.C. İmar ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
3. Amadio, C., Fragiacomio, M., Macorini, L. (2003) The Effects of Repeated Earthquake Ground Motions on The Non-linear Response of SDOF Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 291-308. doi: 10.1002/eqe.225
4. Aschheim, M., Black, E. (1999) Effects of Prior Earthquake Damage on Response of Simple Stiffness-Degrading Structures, *Engineering Spectra*, 15, 1-24. doi: 10.1193/1.1586026

5. Carvalho, E.C., Coelho, E., Compos-Costa A. (1999) Preparation of the Full-Scale Test on Reinforced Concrete Frames: Characteristic of the Test Specimens, Materials and Testing Conditions, ICON Report, Innovative Seismic Design Concepts for New and Existing Structures, European TMR Network, LNEC.
6. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V., Lee, D. (2002) ZEUS-NL – A system for inelastic analysis of structures. Mid-America Earthquake Center, Urbana-Champaign Program Release 2002.
7. Erdik, M. (2000) Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) earthquakes, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Control, Paris-France*, 6–8 July 2000, 149-186. doi: 10.1142/9789812811707_0018
8. Eurocode 8. (2006) Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Standard EN 1998-1, European Committee for Standardization, Brüksel.
9. Fajfar, P., Gaspersic, P. (1996) The N2 Method for the Seismic Damage Analysis of RC Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25: 31-46. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199601)25:1<31::AID-EQE534>3.0.CO;2-V
10. Fardis, M.N. (2002) Design of an irregular building for the SPEAR project-description of the 3-storey structure. Res Report Univ Patras Greece.
11. Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000) Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 356. Washington DC, Amerika Birleşik Devletleri.
12. Gomes, A., Appleton, J. (1997) Nonlinear Cyclic Stress-Strain Relationship of Reinforcing Bars Including Buckling, *Engineering Structures*, 19(10): 822-826. doi: 10.1016/S0141-0296(97)00166-1
13. Hatzigeorgiou, G.D., Beskos D.E. (2009) Inelastic Displacement Ratios for SDOF Structures Subjected to Repeated Earthquakes, *Engineering Structures*, 31, 2744-2755. doi: 10.1016/j.engstruct.2009.07.002
14. Hatzigeorgiou, G.D., Liolios, A.A. (2010) Nonlinear Behavior of RC Frames Under Repeated Strong Ground Motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 1010-1025. doi: 10.1016/j.soildyn.2010.04.013
15. Hatzivassiliou, M., Hatzigeorgiou, G.D. (2015) Seismic Sequence Effects on Three Dimensional Reinforced Concrete Buildings, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 77–88. doi: 10.1016/j.soildyn.2015.02.005
16. Japon Meteoroloji Ajansı (JMA). https://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html, Erişim Tarihi: 16.11.2021.
17. Jeong, S.H.J., Elnashai, A.S. (2004) Analytical Assessment of an Irregular RC Full Scale 3D Test Structure. Mid-America Earthquake Center, Urbana-Champaign Üniversitesi, Amerika Birleşik Devletleri.
18. Kazama, M., Noda, T. (2012) Damage Statistics (Summary of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake damage), *Soils and Foundations*, 52(5), 780-792. doi: 10.1016/j.sandf.2012.11.003
19. Kreslin, M., Fajfar, P. (2012) The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10, 695–715. doi: 10.1007/s10518-011-9319-6

20. Lee, J., Fenves, G. (1998) Plastic Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 124 (8), 829-900. D,doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892)
21. Menegotto, M., Pinto, P. (1973) Method of Analysis for Cyclically Loaded RC Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behavior of Elements Under Combined Normal Force and Bending, Symp. Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, IABSE Reports Vol 13, Lisbon.
22. Moshref, A., Khanmohammadi, M., Tehranizadeh, M. (2017) Assessment of the Seismic Capacity of Mainshock-damaged Reinforced Concrete Columns. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15, 291–311. doi: 10.1007/s10518-016-9952-1
23. Oyguç, R. (2016) Seismic Performance of RC School Buildings After 2011 Van Earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(3):821–47. doi: 10.1007/s10518-015-9857-4
24. Oyguç, R., Güley, E. (2017) Performance Assessment of Aseismically Designed RC School Buildings After October 23, 2011 Van Earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000938.
25. Palermo, M., Trombetti, T. (2016) Experimentally-validated Modeling of Thin RC Sandwich Walls Subjected to Seismic Loads. *Engineering Structures*, 119, 95–109. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.03.070
26. Papanikolaou, V.K., Elnashai, A.S., Pareja, J.F. (2005) Limits of Applicability of Conventional and Adaptive Pushover Analysis for Seismic Response Assessment. Mid-America Earthquake Center, Urbana-Champaign Üniversitesi, Amerika Birleşik Devletleri.
27. Pinho, R., Elnashai A.S. (2000) Dynamic Collapse Testing of a Full-scale Four Storey RC Frame. ISET. *Journal of Earthquake Technology*, 37(4):143–63.
28. Stratan, A., Fajfar, P. (2003) Seismic Assessment of the SPEAR Test Structure. IKPIR report. Ljubljana Üniversitesi. Çek Cumhuriyeti.
29. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY). (2018) Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
30. Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü. (2010) Applicability of nonlinear multiple-degree-of-freedom modeling for design. ATC-76-6. National Institute of Standards and Technology. California, Amerika Birleşik Devletleri.
31. Ulusal Yer bilimi ve Afet Önleme Araştırma Enstitüsü (NIED). National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. <http://www.kyoshin.bosai.go.jp>. Erişim tarihi: 26.08.2021
32. Zhang, S., Wang, G., Sa, W. (2013) Damage Evaluation of Concrete Gravity Dams Under Mainshock-Aftershock Seismic Sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50,16–27. doi: 10.1016/j.soildyn.2013.02.021
33. Zhao, D. (2015) The 2011 Tohoku Earthquake (Mw 9.0) Sequence and Subduction Dynamics in Western Pacific and East Asia. *Journal of Asian Earth Science*, 98, 26–49. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.10.022