



Orta yükseklikteki betonarme binalarda çekiçlemenin deplasman talepleri üzerindeki etkileri

Effects of pounding on displacement demands in mid-rise RC buildings

Muhammet KAMAL^{1*} , Mehmet İNEL² 

^{1,2}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
mkamal@pau.edu.tr, minel@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 01.09.2020
Kabul Tarihi/Accepted: 29.01.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.01.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.58897
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, yetersiz derz mesafesine sahip orta yükseklikteki betonarme komşu binaların sismik etkiler altındaki çekiçleme davranışları incelenmiştir. Orta yükseklikteki binaların temsil edilebilmesi için 5, 8, 10, 13 ve 15 katlı betonarme bina modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin doğrusal elastik olmayan davranış özellikleri kolon ve giriş uçlarına tanımlanan plastik mafsallar ile yansıtılmıştır. Doğrusal olmayan bina modelleri üç boyutlu (3B) kolon-kiriş çerçeve sistemi olarak modellenmiştir. Kelvin birleşim elemanları kullanılarak döşemeden döşemeye bağlanan ikili bina modelleri türetilmiştir. Kat adetleri farklı olan binaların kullanımı ile birlikte toplam 30 adet farklı ikili model oluşturulmuştur. Çarpışmanın görüldüğü ikili modellerde 5 m boşluk bırakılırken, çarpışmanın görüldüğü modellerde ise 0 m derz mesafesi seçilmiştir. Bu ikili binalar arasındaki çekiçleme etkilerinin araştırılabilmesi için TBDY-2018 ile uyumlu 22 adet gerçek ivme kaydı seçilerek ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirilen ivme kayıtları 30 adet ikili modele uygulanarak toplam 660 adet zaman tanım alanında dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen tepe deplasman talepleri, çarpışmalı ve çarpışmasız durumlar için kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda, komşu binaların çarpışması sonucu yapı taleplerinde ciddi değişimler görülmüştür. Komşu binaların periyot oranlarına bağlı olarak çekiçleme etkisi ile değişen yapı talepleri için deplasman büyütme faktörleri (β) önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Orta yükseklikteki betonarme binalar, Çekiçleme, Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, Dinamik analiz, Deplasman büyütme faktörü.

Abstract

In this study, the effects of pounding on seismic behavior of mid-rise reinforced concrete (RC) adjacent buildings with insufficient separation distance were investigated. 5, 8, 10, 13 and 15-storey RC building models were created to represent mid-rise buildings. The nonlinear behavior properties of these models are reflected by plastic hinges defined at the column and beam ends. The buildings are modeled as a three dimensional (3D) column-beam frame system. Adjacent building models are derived, which are connected from floor to floor level using Kelvin contact elements. Total of 30 different adjacent building models were created with the use of buildings having different number of floors. The "0" m gaps reflect inadequate separation distance between adjacent buildings while the "5" m gap is used for the reference building without collision. In order to investigate the pounding effects between adjacent buildings, 22 real acceleration records compatible with TBEC-2018 were selected and scaled. Total of 660 3D nonlinear time history analyses were carried out and the roof displacement demands obtained from these analyses were compared for collision and without collision cases. The outcomes of this study show that significant changes may occur in the building displacement demands due to the collision of the mid-rise RC neighboring buildings with insufficient seismic gap. Based on the findings obtained on significant number of adjacent building pairs with different period ratios, the displacement amplification factors (β) are proposed for the mid-rise RC buildings.

Keywords: Mid-Rise RC buildings, Pounding, Nonlinear time history analysis, Dynamic analysis, Displacement amplification factor.

1 Giriş

Kent nüfusunun yoğun olduğu metropol şehirlerde, ekonomik ve mimari nedenlerden dolayı yetersiz derz mesafesi ile inşa edilmiş orta katlı birçok bina mevcuttur. Farklı dinamik karakterlere (kat kütleleri ve yapısal rijitlikleri vb.) sahip komşu binaların deprem anında çarpışmaları sonucunda performans düzeyleri ciddi şekilde etkilenebilmektedir. Çekiçleme etkisi olarak da adlandırılan bu yapısal düzensizliğin, geçmişte kuvvetli depremler karşısında ağır yapısal hasarlara veya toptan göçmelere neden olduğu görülmüştür [1]-[5]. Mexico depremi (1985) sonrasında binaların yaklaşık %15'nin ağır hasar aldığı veya göçtüğü raporlanırken, yapısal hasarların %20-30'unda çekiçleme etkisinin rolünün olduğu belirtilmiştir [6]-[8]. Simav depreminden sonra İnel ve diğerleri tarafından yapılan saha gözlemleri ile sıralı komşu binaların çarpışması sonucu kalıcı hasarların meydana geldiği gözlenmiştir [9],[10].

Komşu binaların kat yüksekliklerinin, bina ağırlıklarının, rijitliklerinin veya bina yüksekliklerinin farklı olmasından dolayı, bitişik nizam olarak inşa edilen yapılarda çarpışmalar görülebilir. Bu çarpışmaların aslında, yapıların periyot değerlerinin birbirinden uzaklaşması ile meydana geldiği belirtilmektedir [11]-[13].

Kalabalık şehirlerdeki orta katlı binalar, arsa maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle bitişik nizam veya yetersiz derz mesafesi ile inşa edilmiştir. Buna örnek olarak Eskişehir ilinde yapılan istatistiksel çalışmaya göre; bitişik binaların sadece %36'sının birbirinden yeterli derz mesafesi ile ayrıldığı gözlenmiştir [14]. Dolayısıyla, konut stokumuzun büyük bir kısmının kuvvetli yer hareketleri karşısında çarpışma olasılığı yüksektir. Yetersiz derz mesafesinin bırakıldığı komşu binalarda, sismik tehlikelerin hafifletilmesi ve çekiçlemenin bina davranışı üzerindeki etkilerinin gerçekçi bir yaklaşım ile belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

*Yazışılan yazar/Corresponding author

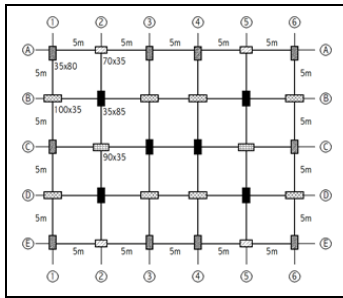
Bu çalışmada, bina yükseklikleri farklı olan ve yetersiz derz mesafesine sahip bitişik binaların deprem etkileri altındaki çekişme davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, 22 ivme kaydı ve 30 adet ikili bina modellerinin zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilerek tepe noktası deplasman talepleri incelenmiştir.

Çalışmada ele alınan bina modellerinde zemin-yapı etkileşimi veya sıvılaşma durumları dikkate alınmamıştır. Yumuşak zeminler üzerinde bulunan orta ve yüksek katlı binaların deplasman taleplerinde artışlar görülebilmektedir [15]. Özellikle, zemin ötelenmeleri ve temel dönmeleri ile birlikte komşu binalardaki çarpışma etkileri daha ciddi boyutlara ulaşabilir. Ayrıca, kat seviyelerinin farklı olduğu komşu binalarda döşemeden kolona çarpma kuvvetleri beklenmektedir. Kolon elemanların orta bölgesinde görülen bu ani ve şiddetli kuvvet, kesme dayanımının aşılması ile kolon elemanın göçmesine neden olabilir [16]. Ciddi hasarlara neden olabilecek bu tür düzensizliklerden kaçınılmalıdır.

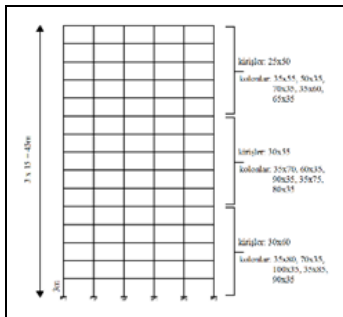
2 Bina özellikleri

2.1 Bina modellerinin özellikleri

Chandler ve diğerlerine göre; 5 ile 15 kat arasında değişen binalar kümesi orta katlı binaları temsil etmektedir [17]. Bu düşünceden yola çıkarak orta katlı binaları temsil etmesi amacıyla 5, 8, 10, 13 ve 15 katlı bina modelleri oluşturulmuştur. Denizli ilinde inşa edilmesi muhtemel olan bu betonarme binaların zemin sınıfı ZD olarak düşünülmüştür. Kullanım şekli konut olarak seçilen yapılarda 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan (DD-2) tasarım depremi kullanılarak binaların tasarımı gerçekleştirilmiştir. Konut binalarını temsil eden bu modellerde hareketli yük değeri 2 kN/m^2 seçilmiştir. [18]. Üç boyutlu (3B) bina modeli olarak tasarlanan bu yapılara ait tipik kat kalıp planı Şekil 1'de verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1. 15 katlı bina modelinin; (a): Zemin kat kalıp planı.
(b): Düşey açılım görünümü.

Figure 1(a): Plan views of first floor of 15-storey building.
(b): elevation view.

15 katlı bina modelinin zemin kattaki kolon boyutları (cm cinsinden) Şekil 1(a)'da verilirken, tüm katlar boyunca devam eden kolon boyutları ise Şekil 1(b)'de sunulmaktadır. Modellerin kat yükseklikleri 3 m seçilirken, kalıp planı boyutları x yönü için 25 m ve y yönü için ise 20 m olarak dikkate alınmıştır. Yüksek süneklik düzeyine göre tasarlanan bina modellerinde perde elemanlar bulunmadığı için taşıyıcı sistem davranış katsayı, $R=8$ alınmıştır. Sismik ağırlığın hesabında dikkate alınan hareketli yük azaltma katsayısı (n) ise binanın önemine göre 0.3 seçilmiştir. Beton basınç dayanımı 35 MPa ve çelik akma dayanımı 420 MPa olarak seçilmiştir.

TBDY-2018'e göre, tasarım aşamasında çatlamış kesit rijitliği göz önünde bulundurulmaktadır [19]. Modellerin periyot değerleri hesaplanırken, kolon elemanların etkin kesit rijitliği $0.70I$ seçilirken, bu değer kiriş elemanlar için $0.35I$ seçilmiştir. I, çatlamamış kesitin atalet momentini ifade etmektedir. Tasarımları gerçekleştirilen modellerin x yönündeki baskın periyotları ve sismik ağırlıkları Tablo 1'de verilmektedir. Ayrıca statik itme analizleri gerçekleştirilen bina modellerin için taban kesme kuvvetleri elde edilerek dayanım oranları hesaplanmıştır.

Tablo 1. Bina modellerine ait yapısal parametreler.

Table 1. Structural parameters of building models.

Kat Adedi	Periyot (s)	Sismik Ağırlık (kN)	Dayanım Oranı
5	0.75	22404	0.159
8	1.12	36733	0.103
10	1.39	46286	0.082
13	1.73	60926	0.064
15	1.95	70678	0.058

2.2 İkili Binalar ve birleşim elemanı

Bu çalışmada, doğrusal elastik olmayan özelliğın yansıtıldığı 5, 8, 10, 13 ve 15 katlı betonarme binaların kat seviyeleri eşittir. Döşemeden döşemeye çarpışmanın gerçekleşeceği bu binalar, kat seviyelerinden birbirlerine bağlanarak 10 farklı ikili model oluşturulmuştur. Komşu binalarda, binaların serbest ve çarpışma yönlerinin değiştirilmesi ile talep ve görelı kat ötelenme oranlarında ciddi değişimler görülebilmektedir [20]. Bu nedenle oluşturulan ikili modellerde bina dizilimleri de değiştirilerek toplamda 20 adet ikili model oluşturulmuştur (Tablo 2). Kat yüksekliklerinin eşit olduğu bu ikili modellerde çekişme etkilerini inceleyebilmek adına, modeller arasında "0" m derz mesafesi bırakılmıştır.

Tablo 2. İkili binaların etiketleri.

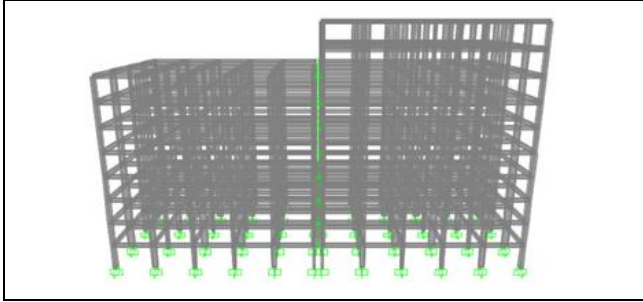
Table 2. Labels for adjacent buildings.

Kat	5	8	10	13	15
5	-	5s-8s	5s-10s	5s-13s	5s-15s
8	8s-5s	-	8s-10s	8s-13s	8s-15s
10	10s-5s	10s-8s	-	10s-13s	10s-15s
13	13s-5s	13s-8s	13s-10	-	13s-15s
15	15s-5s	15s-8s	15s-10s	15s-13s	-

Çarpışma etkilerinin görüldüğü 20 adet ikili model arasındaki derz mesafeleri "5" m seçilerek çarpışmasız ikili modeller oluşturulmak istenmiştir. Tablo 2'nin alt veya üst üçgen matrisindeki ikili modeller arasında yeterli derz mesafesi bırakılması ile çekişme etkileri görülmeyecektir. Böylece alt ve üst üçgen matrisindeki modellerin taleplerinde bina sırasının değişmesi nedeni ile bir değişim meydana gelmeyecektir. Örneğin, 8s-5s ile 5s-8s ikili modellerinin arasındaki derz mesafesi yeterli ise talepler eşit elde

edilecektir. Bu nedenle Tablo 2'nin alt üçgen matrisinde yer alan ikili modeller arasında derz mesafesi 5 m seçilerek 10 adet çarpışmasız model ilave edilmiştir. Böylece toplam ikili model sayısı 30'a yükseltilmiştir.

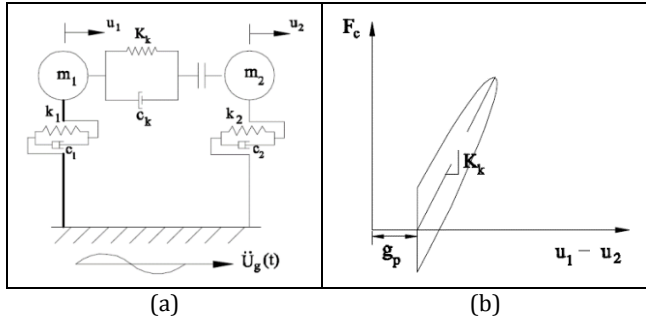
İkili modeller kat adetleri ile etiketlenmiştir. Örneğin; Şekil 2'de verilen 8s-10s ikili bina modeli, 8 ve 10 katlı binaların kullanılarak oluşturulduğu ikili bina modelini yansıtmaktadır. Ayrıca, aynı kat adedine ve periyot değerine sahip ikili modellerde çekiçleme etkileri görülemeyeceğinden dolayı, bu ikili modeller dikkate alınmamıştır. Bu sebeple Tablo 2'deki aynı kat adedine karşılık gelen hücrelerde veri bulunmamaktadır.



Şekil 2. 8s-10s ikili bina.

Figure 2. 8s-10s adjacent buildings.

Çalışmadaki bina modelleri, yapısal analiz programlarından biri olan SAP2000 yazılımı kullanılarak modellenmiştir [21]. Bu modellerden ikili bina modellerinin türetilmesi için viskoelastik (Kelvin) birleşim modeli kullanılmıştır [22]. Bu model, doğrusal yay, viskoz sönümleyici ve binalar arasındaki boşluk mesafesinin tanımlanabildiği gap elemanlarını içermektedir Şekil 3(a).



Şekil 3(a): Kelvin model. (b): Kuvvet deformasyon ilişkisi [22].

Figure 3(a): Kelvin model. (b): The force-displacement relationship of the kelvin model [22].

Viskoz sönümleyicinin çarpışma anında gerçekleşen enerji kayıplarını dikkate almasından dolayı, Kelvin modeli literatürde oldukça sık tercih edilmektedir. Viskoz sönümleyici ve yay sadece basınç altında (çarpışma anında) çalışarak kuvvet aktarımı meydana gelmektedir. Binalar arasındaki mesafe (g_p) yeterli olması durumunda, yay ve sönümleyici devre dışı kalarak herhangi bir kuvvet aktarımı oluşmamaktadır (Denklem 1).

$$F = \begin{cases} K_k(u_1 - u_2 - g_p) + c_k(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) & \text{eğer } (u_1 - u_2) \geq g_p \\ 0 & \text{eğer } (u_1 - u_2) < g_p \end{cases} \quad (1)$$

İkili binalar arasındaki çarpışma kat seviyelerinde meydana gelmektedir. Her iki binanın da rijit diyaframa sahip olması

nedeni ile çarpışmanın iki rijit cisim arasında gerçekleştiği varsayılır. Bu nedenle yay rijitliği (K_k), çarpışan katların eksenel rijitliklerinin toplamından daha büyük olmalıdır [22],[23]. Betondan betona çarpışmanın ele alındığı nümerik simülasyon ve deneysel çalışmalarda yay rijitlikleri yaklaşık $1e10$ ile $1e11$ N/m arasında alınmıştır [24]-[26]. Bu çalışmada da rijitlik değeri $1e10$ N/m seçilmiştir. Denklem 2-3'e göre birleşim elemanının viskoz sönüm katsayısı (c_k), bitişik binaların kütlelerine (m_1 ve m_2), yay rijitliğine ve enerji verimlilik katsayısına (e) bağlıdır. Birçok çalışmada e katsayısı, betondan betona çarpışma için 0.65 alınmıştır [27]-[30]. Bu katsayı için sönüm oranı (ξ) değeri, 0.136 olarak elde edilmiştir.

$$c_k = 2\xi \sqrt{K_k \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (2)$$

$$\xi = -\frac{\ln(e)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(e))^2}} \quad (3)$$

3 İvme kayıt özellikleri

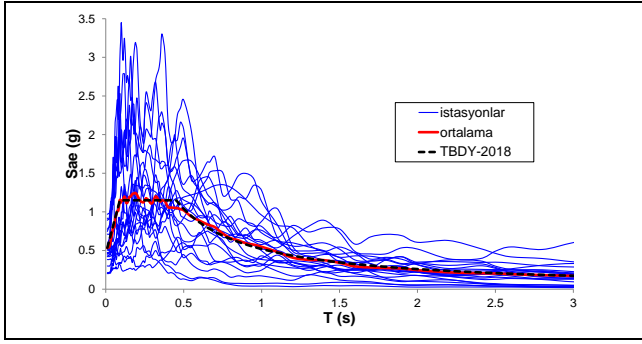
Dinamik analizlerde kullanılmak üzere TBDY2018 ile uyumlu gerçek deprem kayıtları seçilmiştir [19]. Bu kayıtların seçilme ve ölçeklendirme işlemleri için birçok mühendislik optimizasyon problemlerinde kullanılan Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır [31]-[33]. Zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan dinamik analizler için gereken ivme kayıtları, PEER veri tabanından yararlanılarak seçilmiştir [34]. Seçilen ivme kayıt takımlarına ait istasyon bilgileri, kayma dalgası hızı ($Vs30$) ve ölçek katsayıları Tablo 3'te verilmiştir. TBDY-2018'e göre 180-360 m/s aralığında kayma dalgası hızına sahip zeminler ZD zemin sınıfını temsil etmektedir. Görüldüğü üzere seçilen ivme kayıtları bu hız değerleri aralığındadır.

Tablo 3. İvme kayıtlarına ait özellikler.

Table 3. The properties of the acceleration records.

PEER No.	İstasyon	Vs30 (m/s)	Ölçek
3935	SMN003	344	1.779
165	Chihuahua	242	1.854
5805	Yokote City-Nobita	253	1.860
8606	Westside Elementary School	242	1.482
1615	Lamont 1062	338	1.788
5829	RIITO	242	1.950
5825	Cerro Prieto Geothermal	242.	1.893
5619	IWT011	279	1.923
1082	Sun Valley-Roscoe Blvd	321	1.585
4889	Joetsu Otemachi	315	1.849
6893	DFHS	344	1.891

Çalışma kapsamında, Tablo 3'te verilen istasyonlara ait ivme kayıtlarının H1 ve H2 yönleri dikkate alınmıştır. Böylece toplam 22 adet ivme kaydı elde edilmiştir. Bu ivme kayıtlarının ortalama spektrum grafiği Şekil 4'te çizdirilmiştir. İvme kaydı seçimi ve ölçeklendirme problemi için oluşturulan optimizasyon problemi, Kamal ve İnel tarafından gerçekleştirilen çalışmada detaylı bir şekilde açıklanmıştır [35]. İvme kayıtlarının ölçeklendirme işlemi sırasında, ölçek katsayılarının alt ve üst limitleri sırasıyla 0.5 ve 2 olarak seçilmiştir. Görüldüğü üzere seçilen ivme kayıtlarına ait ölçek katsayıları bu limitleri sağlamaktadır.



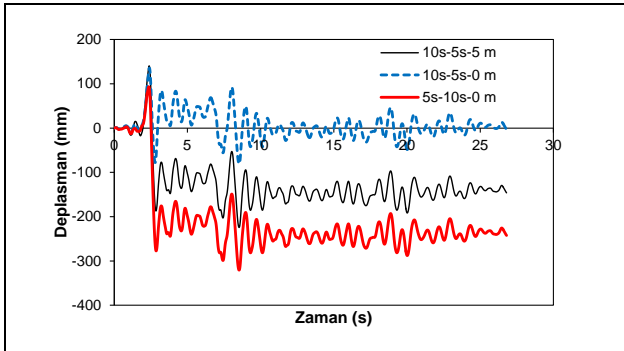
Şekil 4. İvme kayıtlarının spektrum grafikleri.

Figure 4. The spectrums of acceleration records.

4 Analiz sonuçları

Çalışmada, orta yükseklikteki komşu binalarda çekiçlemenin yapı talepleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda, 5, 8, 10, 13 ve 15 katlı binaların kullanımı ile 20 adedi çarpışmalı ve 10 adedi çarpışmasız olmak üzere toplam 30 adet ikili model türetilmiştir. Tablo 3'te verilen depremlerin H1 ve H2 yönlerine ait deprem kayıtları kullanılarak, toplam 660 adet 3B doğrusal olmayan dinamik analiz gerçekleştirilmiştir.

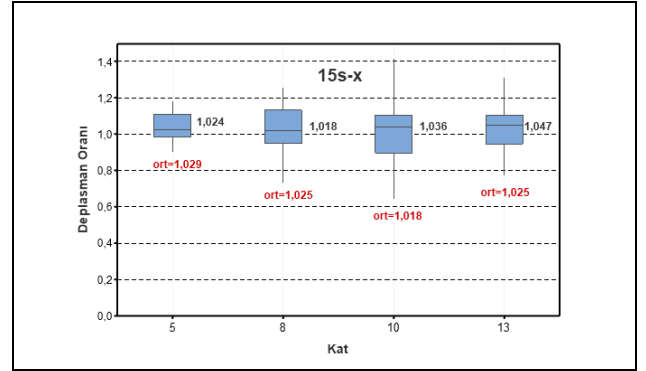
Bina diziliminin ve çekiçlemenin yapıların talepleri üzerindeki etkilerini daha net anlayabilmek adına 10 ve 5 katlı modeldeki 5 katlı binanın zamana bağlı çatı deplasman grafiği Şekil 5'te verilmiştir. 5s-10s-0m ikili modelin ivme kaydının yaklaşık 3. sn.'de çarpışması sonucu 5 katlı modelin talebinin arttığı açıkça görülmektedir. Ayrıca kalıcı deformasyon değeri ciddi oranda değişmektedir. Bu ikili modele karşılık, 10s-5s-0m ikili modelinde ise 5 katlı modelin talebinde azalma görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere, çekiçleme etkileri talepler üzerinde azaltıcı veya arttırıcı bir rol üstlenebilmektedir. Bu çalışmada bina dizilimi dikkate alınarak gerçekçi yapısal davranışlar ortaya konulmak istenmiştir.



Şekil 5. 10s-5s ikili modeldeki 5 katlı binanın "RSN1082-H2" ivme kaydı için çatı deplasman grafiği.

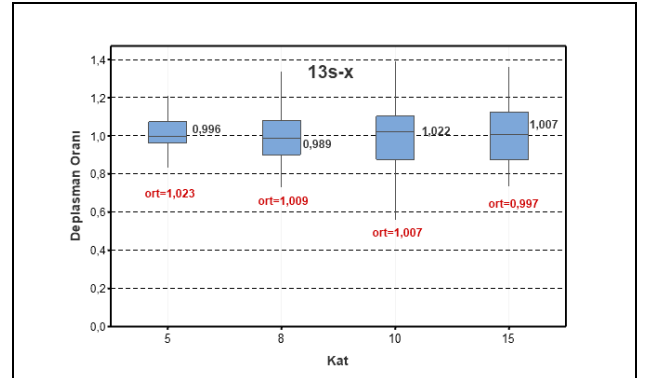
Figure 5. Roof displacement history of 5-storey building in 10s-5s building pair for the acceleration record "RSN1082-H2".

Gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda 20 adet çarpışmalı (derz mesafesi 0m) modellerden elde edilen deplasman talepleri, 10 adet çarpışmasız durumdaki (derz mesafesi 5 m) modellerin taleplerine oranlanarak Şekil 6-10'da verilmiştir. Bu şekillerde yer alan grafikler ilgili binanın diğer kat adedine sahip binalar ile olan çekiçleme etkilerini sunmaktadır. Örneğin; 15s-x başlığı, 15 katlı binanın 5, 8, 10 ve 13 katlı binalar (x) ile oluşturulan ikili modellerini temsil etmektedir.



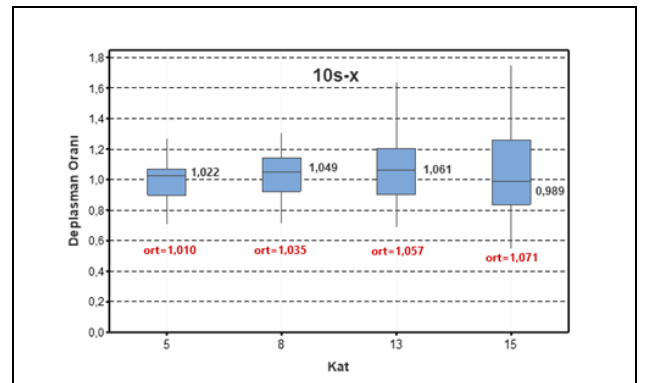
Şekil 6. 15 katlı binanın farklı kat adedine sahip binalar ile çarpışması sonucu elde edilen deplasman talebinin çarpışmasız duruma oranı.

Figure 6. The ratio of the displacement demand obtained as a result of the pounding of a 15-storey building with buildings with different floors to the without pounding case.



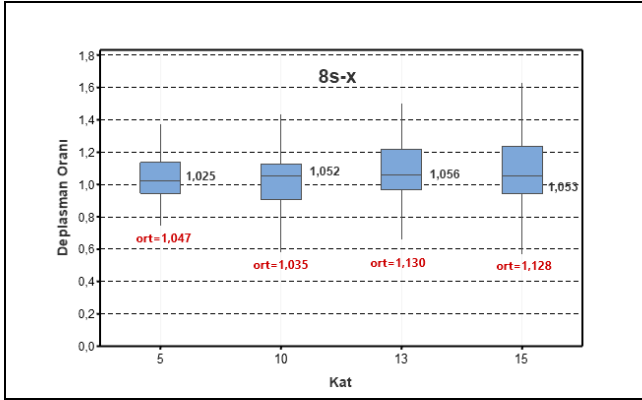
Şekil 7. 13 katlı binanın farklı kat adedine sahip binalar ile çarpışması sonucu elde edilen deplasman talebinin çarpışmasız duruma oranı.

Figure 7. The ratio of the displacement demand obtained as a result of the pounding of a 13-storey building with buildings with different floors to the without pounding case.



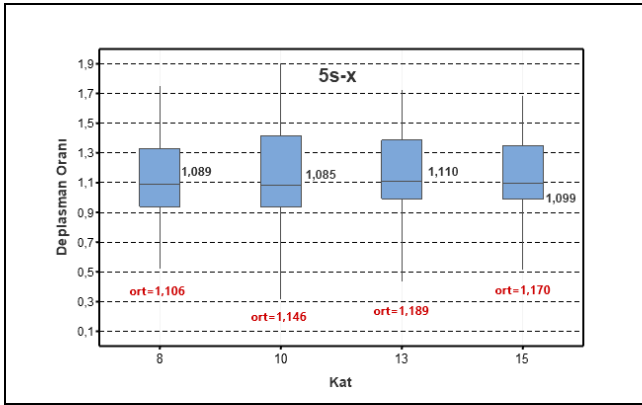
Şekil 8. 10 katlı binanın farklı kat adedine sahip binalar ile çarpışması sonucu elde edilen deplasman talebinin çarpışmasız duruma oranı.

Figure 8. The ratio of the displacement demand obtained as a result of the pounding of a 10-storey building with buildings with different floors to the without pounding case.



Şekil 9. 8 katlı binanın farklı kat adedine sahip binalar ile çarpışması sonucu elde edilen deplasman talebinin çarpışmasız duruma oranı.

Figure 9. The ratio of the displacement demand obtained as a result of the pounding of a 8-storey building with buildings with different floors to the without pounding case.



Şekil 10. 5 katlı binanın farklı kat adedine sahip binalar ile çarpışması sonucu elde edilen deplasman talebinin çarpışmasız duruma oranı.

Figure 10. The ratio of the displacement demand obtained as a result of the pounding of a 5-storey building with buildings with different floors to the without pounding case.

Kutu grafiklerde her bir deprem için hesaplanan deplasman oranlarının medyan ve ortalama değerleri verilmiştir. Çekiçleme etkisi ile talep oranlarında azalma veya artışlar görülebilmektedir. 22 depremin karakteristik özelliklerine bağlı olarak olumlu ya da olumsuz etkilerin meydana gelebileceği görülmektedir.

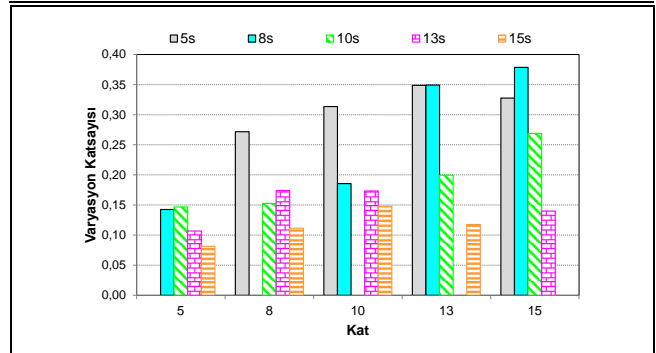
Çarpışmalı durumdaki deplasman talebinin çarpışmasız durumda elde edilen deplasman talebine oranlanması ile hesaplanan maksimum, minimum, standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

İtaliye ve altı çizili olan ifadeler ikili modelde dikkate alınan binanın deplasman oranını temsil etmektedir. Standart sapmanın ortalama etrafındaki saçılımını gösteren varyasyon katsayılarının ikili modeller üzerindeki etkileri Şekil 11'de verilmiştir. Bina ağırlığının artmasıyla birlikte deplasman oranlarının saçılımı azalmaktadır. 15 ve 13 katlı binaların kendinden daha hafif yapılar ile komşu olarak sismik kaynaklı çarpışması durumunda, taleplerdeki saçılım daha sınırlıdır. Hafif olan 5 ve 8 katlı binaların deplasman oranlarının saçılımı ise, komşu binanın kat adedinden etkilenecek artmaktadır.

Tablo 4. Binaların farklı ikili modellerdeki çarpışmalı durum deplasman taleplerinin çarpışmasız durum deplasman taleplerine oranları.

Table 4. The displacement demand of buildings with pounding normalized with displacement demands of buildings without pounding for different building pairs.

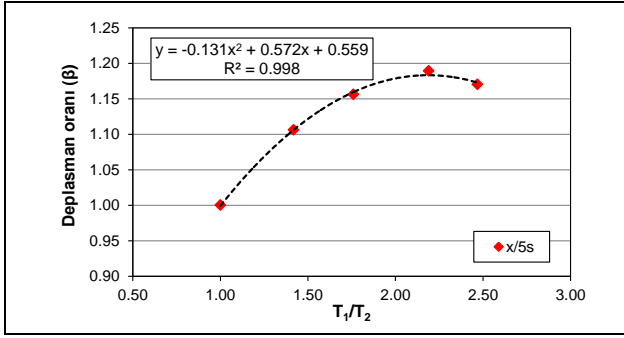
15s	<u>15s-5s</u>	<u>15s-8s</u>	<u>15s-10s</u>	<u>15s-13s</u>
Maks.	1.181	1.255	1.412	1.307
Min.	0.764	0.731	0.641	0.702
Ort.	1.029	1.025	1.018	1.024
St. Sp.	0.084	0.114	0.150	0.121
Var. K.	0.082	0.112	0.148	0.118
13s	<u>13s-5s</u>	<u>13s-8s</u>	<u>13s-10s</u>	<u>13s-15s</u>
Maks.	1.294	1.417	1.507	1.361
Min.	0.830	0.511	0.558	0.733
Ort.	1.023	1.009	1.007	0.997
St. Sp.	0.109	0.176	0.175	0.140
Var. K.	0.107	0.174	0.173	0.140
10s	<u>10s-5s</u>	<u>10s-8s</u>	<u>10s-13s</u>	<u>10s-15s</u>
Maks.	1.563	1.530	1.633	1.743
Min.	0.710	0.715	0.690	0.551
Ort.	1.010	1.035	1.057	1.071
St. Sp.	0.148	0.158	0.211	0.288
Var. K.	0.147	0.153	0.200	0.269
8s	<u>8s-5s</u>	<u>8s-10s</u>	<u>8s-13s</u>	<u>8s-15s</u>
Maks.	1.370	1.505	2.948	3.095
Min.	0.744	0.584	0.516	0.568
Ort.	1.047	1.035	1.130	1.128
St. Sp.	0.149	0.192	0.395	0.427
Var. K.	0.143	0.185	0.349	0.379
5s	<u>5s-8s</u>	<u>5s-10s</u>	<u>5s-13s</u>	<u>5s-15s</u>
Maks.	1.747	1.904	2.720	2.833
Min.	0.520	0.315	0.432	0.515
Ort.	1.106	1.146	1.189	1.170
St. Sp.	0.300	0.359	0.415	0.383
Var. K.	0.272	0.314	0.349	0.328



Şekil 11. Her bir binanın farklı ikili modelleri için hesaplanan deplasman oranlarının Varyasyon Katsayıları

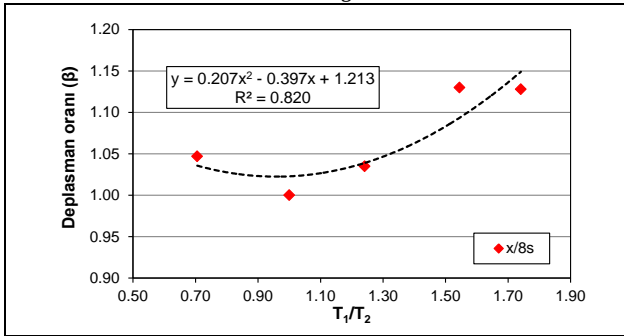
Figure 11. Coefficients of Variation (CoV) of displacement ratios calculated for different binary models of each building.

Her bir binanın farklı kat adedine sahip binalar ile etkileşimi sonucu taleplerindeki değişimi görebilmek için, ortalama deplasman oranları (β) Şekil 12-14'te verilmiştir. β , aynı zamanda çarpışma etkisi nedeni ile deplasman büyütme faktörü olarak isimlendirilmiştir. 5 katlı bina modelinin 8, 10, 13 ve 15 katlı binalar ile çarpışması sonucu ortalama çatı seviyesi deplasman talebi sırasıyla %10.6, %14.6, %18.9 ve %17 artış göstermektedir. Bu bina modelinin daha ağır yapılar ile çarpışmasından dolayı talepler ciddi oranda değişmektedir.



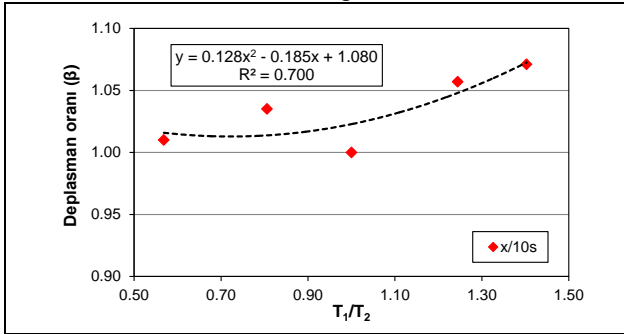
Şekil 12. 5 katlı bina için deplasman büyütme faktörü.

Figure 12. Displacement amplification factor for 5-storey building.



Şekil 13: 8 katlı bina için deplasman büyütme faktörü

Figure 13. Displacement amplification factor for 8-storey building.



Şekil 14. 10 katlı bina için deplasman büyütme faktörü

Figure 14. Displacement amplification factor for 10-storey building.

Şekil 12'de, 5 katlı binanın farklı periyot değerine sahip binalar ile ikili model oluşturulması durumundaki talep artış eğrisi verilmektedir. R^2 değeri 0.998 olan bu eğri, Denklem 4 ile tanımlanmıştır. T_1 , komşu binanın periyot değerini temsil ederken, T_2 dikkate alınan binayı temsil etmektedir. Bu çalışmada kullanılan ve aynı kat adedine sahip ikili modellerin (5s-5s gibi) periyot oranları (T_1/T_2) 1'e eşit olacaktır. Bu ikili binalarda herhangi bir çarpışma beklenmediği için talep oranları 1 olarak dikkate alınmıştır. Ancak, deplasman talepleri elde edilirken bina periyodunun en önemli faktör olması nedeni ile bu eğriler farklı periyot özelliklerine sahip aynı katlı bitişik binalar için de kullanılabilir.

$$\beta_{5s} = -0.131(T_1/T_2)^2 + 0.572T_1/T_2 + 0.559 \quad (4)$$

8 katlı bina modelinin de çarpışmalardan etkilendiği görülmektedir. 5, 10, 13 ve 15 katlı binalar ile çarpışması

sonucu ortalama çatı seviyesi deplasman talebi sırasıyla %4.7, %3.5, %13 ve %12.8 artış göstermektedir. İkili modeldeki binaların periyot oranlarının birbirine yaklaşması ile talep değişimleri önemsiz olurken, uzaklaşması durumunda talep artışları kayda değer olmaktadır. Şekil 13'te, 8 katlı binanın farklı periyot değerlerine sahip binalar ile ikili model oluşturulması durumundaki talep artış eğrisi verilmektedir. R^2 değeri 0.82 olan bu eğri, Denklem 5 ile tanımlanmıştır.

$$\beta_{8s} = 0.207(T_1/T_2)^2 - 0.397T_1/T_2 + 1.213 \quad (5)$$

15 ve 13 katlı bina modellerin kendinden daha hafif binalar ile çarpışması talepler üzerinde maksimum %3 artış göstererek sınırlı bir değişim elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan bina modelleri arasında kat adedi bakımından ortalamayı temsil eden 10 katlı bina ise, 5, 8, 13 ve 15 katlı binalar ile çarpışması sonucu maksimum çatı talebi sırasıyla %1, %3.5, %5.7 ve %7.1 artış göstermektedir. Benzer eğilim olarak, kendinden daha hafif yapılar ile çarpışmanın, 10 katlı binanın talepleri üzerinde sınırlı bir etki oluştururken, kendinden daha ağır yapılar ile çarpışması sonucu %7 civarında bir talep artışına neden olabilmektedir. Şekil 14'te, 10 katlı binanın farklı periyot değerlerine sahip binalar ile ikili model oluşturulması durumundaki talep artış eğrisi verilmektedir. R^2 değeri 0.700 olan bu eğri, Denklem 6 ile tanımlanmıştır.

$$\beta_{10s} = 0.128(T_1/T_2)^2 - 0.185T_1/T_2 + 1.080 \quad (6)$$

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, yetersiz derz mesafesine sahip komşu binalarda görülen çekiçlemenin, bina talepleri üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. 5, 8, 10, 13 ve 15 binalar kat seviyelerinden link elemanlar ile bağlanarak 10 adet ikili model oluşturulmuştur. Bina diziliminin talepler üzerindeki etkilerini görebilmek için ikili modellerde bina diziliminin yer değiştirmesi ile model sayısı iki katına çıkarılarak 20 olmuştur. Çekiçleme etkilerinin görebilmek için 20 model için binalar arası hiç boşluk bırakılmamıştır. Çarpışma olmaması durumunda bina diziliminin önemli olmaması nedeni ile ilk türetilen 10 adet modelde iki bina arasında 5 m boşluk bırakılarak referans olarak kullanılan çarpışmasız durum modelleri oluşturulmuştur. Çarpışmanın olduğu ve olmadığı durumlar için 30 adet ikili model için TBDY-2018'e göre 22 adet ivme kaydı seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Toplam 660 adet 3B doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiş ve bu analizlerden elde edilen çatı talepleri, çarpışmalı ve çarpışmasız durumlar için karşılaştırılmıştır.

Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- ✓ Komşu binaların sismik etkiler ile çarpışması sonucunda, bina yüksekliği (aynı zamanda yapı ağırlığı) fazla olan binanın deplasman taleplerinde sınırlı bir değişim görülmektedir. Özellikle 15 ve 13 katlı modellerin kendinden daha hafif yapılar ile çarpışması, bu modellerin çatı taleplerinde %3 gibi oldukça sınırlı düzeyde bir artışa neden olmaktadır,
- ✓ Daha hafif yapılar olarak dikkate alınan 10, 8 ve 5 katlı bina modellerinin kendinden daha ağır yapılar ile çarpışma sonucunda, çatı taleplerinde sırasıyla %7.1, %13 ve %18.9'a varan artışlar görülebilmektedir,
- ✓ Komşu binaların bina yüksekliklerinin birbirine yaklaşması durumunda, çekiçleme etkisi ile taleplerdeki değişim sınırlı kalabilmektedir. Bina

yükseklikleri arasındaki farkın artması durumunda ise çarpışma sonucu taleplerde daha ciddi artışlar görülmektedir,

- ✓ Çarpışmalı durum için dinamik analizlerden elde edilen talepler, çarpışmasız durumlara oranlanarak ortalama talep oranları hesaplanmıştır. Sismik kaynaklı çarpışmalar sonucu, komşu binaların kat adetlerine bağlı talep değişim eğrileri elde edilmiştir,
- ✓ 5, 8 ve 10 katlı binaların diğer binalar ile çarpışması durumundaki deplasman büyütme faktörleri (β) Denklem 4-6'da verilmiştir,
- ✓ Bina ağırlığının artmasıyla birlikte deplasman oranlarının saçılımı azalmaktadır. 15 ve 13 katlı binaların kendinden daha hafif yapılar ile sismik kaynaklı çarpışması durumunda, taleplerdeki saçılımı daha sınırlıdır. Hafif olan 5 ve 8 katlı binaların deplasman oranlarının saçılımı ise, komşu binanın kat adedinden etkilenerek artmaktadır.
- ✓ Komşu binaların sismik kaynaklı çarpışmaları sonucu talepler anlamında birbirlerini olumlu yönde etkileyerek taleplerde azalmalar görülebilmektedir. Fakat talepteki bu olumlu etkiye rağmen, çarpışma kuvvetlerinden dolayı önemli hasarların görülebileceği unutulmamalıdır.

Sonuçlar değerlendirildiğinde; yetersiz derz mesafesine sahip orta katlı betonarme komşu binaların çarpışması sonucu yapı taleplerinde ciddi değişimler meydana gelebilmektedir. Çalışma sonucu farklı periyot oranlarına sahip birçok komşu binalar üzerinde elde edilen bulgulara dayanarak orta katlı binaların bitişik nizam durumları için deplasman büyütme faktörleri (β) önerilmiştir.

6 Conclusions

In this study, the effects of the pounding in neighboring buildings with insufficient seismic gap on displacement demands are presented. 10 different adjacent building models were created by connecting 5-, 8-, 10-, 13- and 15-storey buildings with link elements from the floor levels. Another 10 building pairs were modelled by changing the building arrangement in order to see the effect of building arrangement on the displacement demands due to collision. There is no gap between building pairs for these 20 models to visualize the collision effect. Since the arrangement of building pairs is not important when there is no collision, the derived 10 models were used with 5 m gap between buildings to reflect reference cases. 22 acceleration records compatible with TBEC-2018 were selected and scaled. Total of 660 3D nonlinear time history analyses were carried out and the roof displacement demands obtained from these analyses were compared for collision and without collision cases. The findings obtained are summarized below:

- ✓ As a result of the collision of neighboring buildings with seismic effects, there is a limited change in the displacement demands of the higher buildings. The increase in displacement demands of 15- and 13-storey buildings due to collision with less number of storey buildings is very limited as being about 3%,
- ✓ If the 10-, 8- and 5-storey building models, which are considered as lighter structures, collide with the structures heavier than themselves, the displacement demands can increase up to 7.1%, 13% and 18.9%, respectively.

- ✓ The effect of collision on displacement demands is limited for the building pairs with similar number of storeys or heights. If the difference between building heights increases, significant increases are observed in the displacement demands due to the collision.
- ✓ The displacement demands obtained from the dynamic analyses for the collision case are normalized with the without collision cases and average displacement ratios are calculated. As a result of seismic-induced collisions, the curves of the displacement ratios based on the number of floors of neighboring buildings were obtained.
- ✓ The displacement amplification factors (β) due to collision of 5-, 8- and 10-storey buildings with other structures are given in Equation 4-6.
- ✓ As the weight of the building increases, the scattering of the displacement ratios decreases. The scatter in displacement demands is more limited for the collision of 15- and 13-storey buildings with buildings lighter than themselves,. The scattering of the displacement ratios of 5- and 8-storey buildings, which are light, increases as being affected by the number of floors of the neighboring building.
- ✓ In case of seismic-induced collisions between neighboring buildings, the buildings can affect each other positively and displacement demand can be reduced. However, it should not be forgotten that despite this positive effect on the demand, significant damages may occur due to the impact forces.

The outcomes of this study show that significant changes may occur in the building displacement demands as a result of the collision of the mid-rise RC neighboring buildings with insufficient seismic gap. Based on the findings obtained on significant number of adjacent building pairs with different period ratios, the displacement amplification factors (β) are proposed for the mid-rise RC buildings.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Muhammet KAMAL fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, analizlerin gerçekleştirilmesi ve veri toplama aşamalarında; Mehmet İNEL elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve incelenmesi kısmında; Muhammet KAMAL ve Mehmet İNEL yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesinde katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

- [1] Bertero VV, Collins RG. "Investigation of the Failures of the Olive View Stair-Towers During the San Fernando Earthquake and Their Implications on Seismic Design". Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, Report No. EERC 73-26, 1973.
- [2] Kasai K, Maison BF. "Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake". *Engineering Structures*, 19, 195-207, 1997.

- [3] Northridge Reconnaissance Team. "Northridge Earthquake of January 17, 1994". Oakland, California, Reconnaissance Report, EERI 25-47, 1996.
- [4] Youd TL, Bardet JP, Bray JD. "Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999". Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, Reconnaissance Report, 2000.
- [5] Uzarski J, Arnold C. "Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999". Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, Reconnaissance Report, Publ. No. 01-02, 2001.
- [6] Rosenblueth E, Meli R. "The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico city". *Concrete International*, 8(5), 23-34, 1986.
- [7] Anagnostopoulos S. "Earthquake induced pounding: State of the art". In: *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria, 28 August-2 September 1994.
- [8] Valles-Mattox R, Reinhorn A. "Evaluation, prevention and mitigation of pounding effects in building structures". In: *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, 23-28 June, 1996.
- [9] Ozmen HB, Inel M, Akyol E, Cayci BT, Un H. "Evaluations on the relation of RC building damages with structural parameters after May 19, 2011 Simav (Turkey) earthquake". *Natural Hazards*, 71, 63-84, 2014.
- [10] Inel M, Ozmen HB, Akyol E. "Observations on the building damages after 19 May 2011 Simav (Turkey) earthquake". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, 255-283, 2013.
- [11] Maison BF, Kasai K. "Analysis for type of structural pounding". *Journal of Structural Engineering*, 116, 957-977, 1990.
- [12] Anagnostopoulos SA, Spiliopoulos KV. "An investigation of earthquake induced pounding between adjacent buildings". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, 289-302, 1992.
- [13] Kose MM, Abacioglu MA. "Dynamic interactions of adjacent structures in different geometries". *KSU Journal of Science and Engineering*, 11(2), 45-51, 2008.
- [14] Doğan M, Günaydin A. "Pounding of adjacent RC buildings during seismic loads". *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 22, 129-145, 2009.
- [15] Ghandil M, Behnamfar F. "Ductility demands of MRF structures on soft soils considering soil-structure interaction". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 203-214, 2017.
- [16] Favvata MJ. "Minimum required separation gap for adjacent RC frames with potential inter-story seismic pounding". *Engineering Structures*, 15, 643-659, 2017.
- [17] Goody J, Chandler R, Clancy J, Dixon D, Wooding G. *Building type basics for housing*, 2nd ed. New Jersey, USA, Wiley, 2010.
- [18] Türk Standartları Enstitüsü. "Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri". Ankara, Türkiye, 498, 1997.
- [19] Afet ve Acil Durum Başkanlığı. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 30364, 2018.
- [20] Efraimiadou S, Hatzigeorgiou GD, Beskos DE. "Structural pounding between adjacent buildings subjected to strong ground motions. Part I: the effect of different structures arrangement and of seismic records". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42, 1509-1528, 2013.
- [21] Computers and Structures. "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual". New York, USA, 2019.
- [22] Muthukumar S, Desroches R. "Evaluation of impact models for seismic pounding". *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, British Columbia, Canada, 1-6 August, 2004.
- [23] Mahmoud S, Jankowski R. "Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding". *Transactions of Civil and Environmental Engineering*, 35, 51-62, 2011.
- [24] van Mier JG, Pruijssers A, Reinhardt HW, Monnier T. "Load time response of colliding concrete bodies". *Journal of Structural Engineering*, 117(2), 354-374, 1991.
- [25] Jankowski R. "Non linear viscoelastic modelling of earthquake induced structural pounding". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(6), 595-611, 2005.
- [26] Shakya K, Wijeyewickrema A. "Mid-Column pounding of multistory reinforced concrete buildings considering soil effects". *Advances in Structural Engineering*, 12(1), 71-85, 2009.
- [27] Anagnostopoulos SA. "Pounding of buildings in series during earthquakes". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(3), 443-456, 1988.
- [28] Azevedo J, Bento R. "Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems". *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, 23-28 June, 1996.
- [29] Mouzakis HP, Papadrakakis M. "Three dimensional nonlinear building pounding with friction during earthquakes". *Journal of Earthquake Engineering*, 8(1), 107-132, 2004.
- [30] Jankowski R. "Pounding force response spectrum under earthquake excitation". *Engineering Structures*, 28(8), 1149-1161, 2006.
- [31] Storn R, Price K. "Differential Evolution a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces". Technical Report, TR-95-012, 1-12, 1995.
- [32] Cakici Z, Murat YS. "A differential evolution algorithm-based traffic control model for signalized intersections". *Advances in Civil Engineering*, Article ID 7360939, 1-16, 2019.
- [33] Kamal M, Inel M. "Optimum design of reinforced concrete continuous foundation using differential evolution algorithm". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 8401-8415, 2019.
- [34] University of California, Berkeley. "PEER Ground Motion Database". <https://ngawest2.berkeley.edu/> (22.12.2020).
- [35] Kamal M, Inel M. "Required separation distance for reinforced concrete buildings with seismic pounding potential". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(3), 281-289, 2021.