

Sismik çarpışma olasılığı bulunan betonarme binalar için gerekli derz mesafesi

Required separation distance for reinforced concrete buildings with seismic pounding potential

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: 30.12.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 14.04.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 29.03.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.23697
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, düşük ve orta katlı betonarme yapıların deprem derzlerinin zaman tanım alanında dinamik analizlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Düşük ve orta yükseklikteki binaları temsil etmesi için 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 katlı betonarme bina modelleri 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY-2018) göre tasarlanmıştır. Bu modellerde doğrusal elastik olmayan davranışı yansıtabilmek için kolon ve kiriş uçlarında yığılı plastik mafsallar tanımlanmıştır. Üç boyutlu (3B) olarak modellenen bina modelleri, kat seviyelerinden doğrusal link (gap) elemanlar ile birbirlerine bağlanarak ikili bina modelleri türetilmiştir. Farklı bina yüksekliklerine sahip betonarme binalar arasında farklı kombinasyonlar türetilerek 28 farklı ikili model oluşturulmuştur. Bu binalar arasında bırakılması gereken minimum boşluk mesafesinin belirlenebilmesi için TBDY-2018 ile uyumlu bir deprem seti seçilmiştir. Seçilen deprem seti, 11 farklı ivme kayıt takımından oluşmaktadır. Zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan analizlerde kullanılmak üzere toplamda 22 adet ivme kaydı elde edilmiştir. 616 adet dinamik analiz sonucu ile elde edilen çarpışma mesafeleri, TBDY-2018’de yer alan derz mesafeleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda, mevcut yönetmelikte verilen gerekli boşluk mesafelerinin çarpışmayı önlemek için yeterli olmadığı görülmüştür. Sismik yükler altındaki derz mesafelerinin tahmininde kullanılan α katsayısı için komşu binaların periyot oranlarına bağlı olarak basitleştirilmiş yeni bir denklem önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalar, Derz mesafesi, Deprem kayıt seçimi, Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, Dinamik analiz.

Abstract

This study aims to investigate the determination of seismic separation distance of adjacent low and mid-rise reinforced concrete (RC) buildings using nonlinear time history analysis. The low and mid-rise RC buildings were reflected using 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10-story buildings designed per 2018 Turkish Building Earthquake Code (TBEC). Beam and column elements are modeled as nonlinear frame elements with lumped plasticity by defining plastic hinges at both ends of beams and columns. The adjacent three-dimensional (3D) building models are connected to each other by linear link elements at the floor levels. 28 different adjacent building models were created by using the RC buildings with different building heights. In order to determine the minimum separation distance between these buildings, an earthquake set compatible with TBEC-2018 was selected. The earthquake set consists of 11 different record pair. Nonlinear time history analyses were carried out for each binary model using 22 acceleration records. The distances necessary to avoid pounding obtained from the result of 616 dynamic analyses were compared with the separation distances defined in the TBEC-2018. As a result of the study, it is seen that the required seismic separation distance per the current code was not enough to prevent pounding. A new simplified equation is proposed based on the period ratios of neighboring buildings for the coefficient (α) used in the estimation of gap distances under seismic loads.

Keywords: Low and mid-rise RC buildings, Gap distance, Selection and scaling ground motion, Nonlinear time history analysis, Dynamic analysis.

1 Giriş

Geçmişte yaşanan birçok yıkıcı depremde binalar arasında bırakılan yetersiz boşluk mesafeleri ile çarpışmalar meydana gelmiştir. Bu çarpışmalar ile binalarda ağır hasar oluşumu, hatta toptan yıkımların gerçekleştiği gözlenmiştir [1]-[8]. Bunun yanı sıra karayolu köprü tabliyelerinin birbiri ile çarpışmasıyla lokal hasarlar ve göçmelere varan ağır hasarlar görülmüştür [9],[10].

Komşu yapıların farklı kat yüksekliklerine, bina ağırlıklarına, rijitliklerine, bina yüksekliklerine sahip olmasından dolayı, yapılar arasında çarpışmalar beklenebilir. Bu durumların hepsi dikkate alındığında, yapısal çarpışmanın genellikle komşu binalar arasındaki doğal titreşim periyotlarındaki farklılıklardan kaynaklandığı vurgulanmaktadır [11],[12].

Deprem anında komşu binalar arasında çarpışmanın önlenmesi için, binalar arasındaki boşluk mesafesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda, Jeng ve diğ. binalar arasındaki minimum boşluk mesafesini tahmin edebilen, rastgele titreşim teorisine dayanan bir yöntem sunmuştur [13]. Bu yöntem, yalnızca Tek Serbestlik Dereceli (TSD) sistemler için uygulanabilse de, ilk moddaki tepkinin, tüm modların toplam tepkisinin büyük bir kısmını oluşturan Çok Serbestlik Dereceli (ÇSD) sistemlerde de uygulanabileceği vurgulanmıştır. Periyot, yükseklik, sönüm ve deprem tipi ile minimum boşluk mesafesi arasındaki ilişki tartışılmıştır. Barbato ve Tubaldi, bitişik binalar arasındaki çarpışma mesafelerinin belirlenebilmesi için güvenilirlik esaslı bir metod önermişlerdir [14]. Önerilen metod, doğrusal elastik TSD ve ÇSD sistemleri ve ayrıca doğrusal elastik olmayan TSD sistemler için uygulanmıştır. Favvata, döşemeden kolona çarpışma olasılığı bulunan 8 ve 3 katlı 2 boyutlu (2B) çerçeve olarak modellenen

*Yazışılan yazar/Corresponding author

bitişik binaların 9 farklı sismik talep seviyelerine karşılık gelen çarpışma mesafelerini belirlemiştir [15]. Çarpışma mesafelerini belirlerken, bina modellerinin çatı katlarındaki deplasman taleplerine bağlı olarak minimum boşluk mesafeleri hesaplanmıştır. Ayrıca çarpışmanın görüldüğü dış kolonda, elastik sınırın aşılmayarak kesme kırılmasının önlenmesi durumu dikkate alınarak yeni bir çarpışma mesafesi belirlenmiştir. Abdel Raheem, düşük, orta ve yüksek pik yer ivmesi olmak üzere, 3 farklı deprem kategorisini ele alarak çarpışma mesafelerini incelemiştir [16]. Üç boyutlu (3B) ikili modeller arasında doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan temas elemanı (link) kullanarak çarpışma etkisini incelemiştir. Çarpışma sırasında, ani sertlik değişimlerini yumuşatabilen bir (shock absorber device) sistemi kullanılarak çarpışma etkilerinin azaltılabileceğini ortaya koymuştur.

Kalabalık şehirlerdeki mevcut binalarımız, yüksek arsa maliyetleri nedeniyle birbirine bitişik veya yetersiz boşluk mesafesi ile inşa edilmiştir. Dolayısıyla, konut stokunun önemli bir kısmının güçlü depremler karşısında çarpışma olasılığının yüksek olduğu söylenebilir. Bu nedenle yapıların sismik çarpışmalarının önlenmesi için deprem derz mesafelerinin doğru bir şekilde ortaya konması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada düşük ve orta katlı yapıların deprem derzlerinin zaman tanım alanında dinamik analizlerle belirlenmesi amaçlanmıştır.

2 Yapı özellikleri ve modelleme

2.1 Bina modelleri

Bu çalışmada, çarpışma olasılığının muhtemel olacağı düşünülen düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalar göz önüne alınmıştır. Denizli ilinde inşa edilmesi muhtemel 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 katlı betonarme binalar oluşturulmuştur. ZD zemin sınıfı üzerinde yer alan ve kullanım amacı konut olan bu binaların DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, çok sert veya yumuşak zeminlerin dışında yer alan zemin sınıfı dikkate alınmak istenmiştir. Bu nedenle ne çok sert ne de çok yumuşak zemin olmayan ZD zemin sınıfı tercih edilmiştir.

Tüm bina modellerinde döşeme kalınlıkları 15 cm olarak alınmıştır. Modellerin konut binalarını temsil etmesinden dolayı hareketli yük 2 kN/m² seçilmiştir [17]. Kiriş üzerinde bulunan duvar yükleri 3.25 kN/m olarak dikkate alınmıştır. Binaların x ve y yönündeki boyutları sırasıyla 25 m ve 20 m olarak seçilmiştir. Kat yükseklikleri her bir katta aynı olup 3 m kabul edilmiştir. Tasarım aşamasında süneklik şartlarını sağlayan kapasite tasarım ilkeleri benimsenmiştir. Kolon elemanlardaki boyuna donatı oranları %1.00-1.12 arasında değişmektedir. Enine donatı miktarı, aralığı ve donatı detaylandırmasında TBDY-2018 ilkeleri ile uyumludur [18].

TBDY-2018'de, dayanıma ve şekil değiştirmeye göre tasarımlarda veya değerlendirmede etkin kesit rijitliği göz önüne alınmaktadır. Binaların periyot değerlerinin elde edildiği modal analizde, kolon ve kiriş taşıyıcı sistem elemanları için etkin kesit rijitliği sırasıyla 0.35I ve 0.70I olarak dikkate alınmıştır. I, çatlamamış kesite ait atalet momentini temsil etmektedir.

Tasarım sonucunda bina modellerinin x yönündeki hakim titreşim periyotları Tablo 1'de verilmektedir. Ayrıca tüm bina modelleri için doğrusal elastik olmayan statik itme (pushover) analizi yapılarak taban kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Bu kuvvetler sismik ağırlığa oranlanarak dayanım oranları hesaplanmıştır.

Tablo 1. Bina özellikleri.

Table 1. Building properties.

Kat Sayısı	Periyot-x (s)	Sismik Ağırlık (kN)	Dayanım Oranı
3	0.49	12997	0.239
4	0.66	17521	0.180
5	0.83	22045	0.143
6	0.94	26798	0.131
7	1.07	31633	0.117
8	1.19	36467	0.103
9	1.32	41302	0.091
10	1.45	46136	0.081

2.2 İkili modeller ve link eleman

Çalışma kapsamında 3B doğrusal elastik olmayan betonarme binalar kat seviyelerinden birbirlerine bağlanmıştır. Oluşturulan 28 farklı ikili modele ait isimlendirmeler Tablo 2'de verilmektedir. İkili modeller sahip oldukları katsayıları ile isimlendirilmiştir.

Tablo 2. İkili modeller.

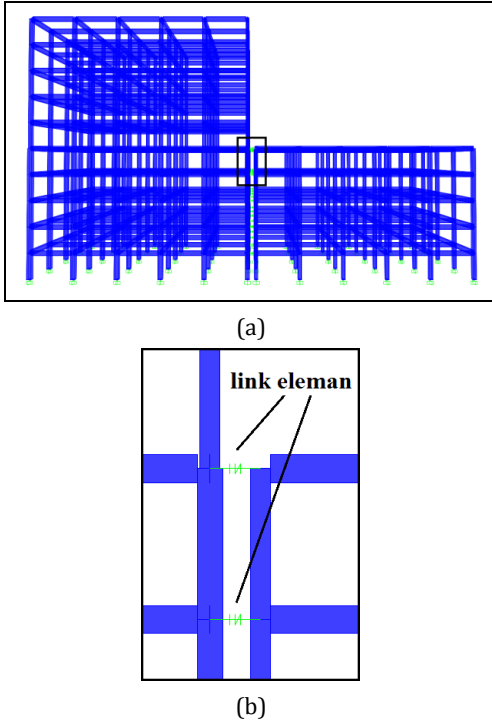
Table 2. Building pairs.

Kat	3	4	5	6	7	8	9
10	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8	10-9
9	9-3	9-4	9-5	9-6	9-7	9-8	-
8	8-3	8-4	8-5	8-6	8-7	-	-
7	7-3	7-4	7-5	7-6	-	-	-
6	6-3	6-4	6-5	-	-	-	-
5	5-3	5-4	-	-	-	-	-
4	4-3	-	-	-	-	-	-

Örneğin; 10-5, 10 ve 5 katlı binalardan oluşan ikili modeli temsil etmektedir. Çekiçleme etkilerinin görülmeyeceği bu ikili modellerdeki komşu binaların dizilimi değiştirilmemiştir. Bu nedenle Tablo 2'de ilgili alanlardaki model kısımları boş bırakılmıştır.

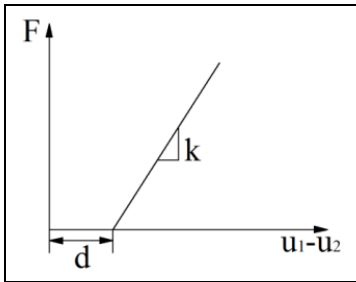
Kat seviyelerinin aynı olduğu ikili binalarda çarpışma etkilerinin görülmemesi adına, binalar arasındaki boşluk mesafesi 1000 mm olarak tercih edilmiştir. Link elemanların kat seviyelerinden bağlanma biçimi ve analizlerde kullanılan tipik üç boyutlu model görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan bina modelleri SAP2000 programı yardımıyla modellenmiştir [19]. Bu modelleri ikili bina haline dönüştürmek için yine bu programda yer alan link (Gap) eleman kullanılmıştır. Şekil 2'de verilen doğrusal yay modelini yansıtan birleşim elemanında, binalar arası boşluk mesafesi tanımlanabilmektedir. İkili binalar arasındaki deplasman farkı ($u_1 - u_2$) tanımlanan boşluk mesafesinden (d) büyük ise, link eleman bina modellerine kuvvet (F) denklem (1) ile aktarabilmektedir. Minimum gerekli derz mesafesinin araştırıldığı bu çalışmada, ikili binalar arasında herhangi bir çarpışma beklenmediği için link elemanın yay rijitliği (k) belirlenmemiştir. Bu rijitlik, çarpışmanın görülebileceği betonarme binaların kat seviyelerinin eksenel rijitliklerinin toplamından daha büyük bir değer olarak seçilmektedir. Literatürde, betondan betona çarpışmanın ele alındığı birçok çalışmada 1E10-1E11 N/m arasında bir rijitlik değeri seçilmiştir [20]-[22]. Link elemanlara bu değer atanmıştır. Ancak, çarpışma beklenmediği için çalışmada elde edilen mesafeler üzerinde bu değerın önemi yoktur.



Şekil 1(a): 10 ve 5 katlı ikili model. (b): Kat seviyelerinden bağlanan link eleman.

Figure 1(a): 10- and 5-storey adjacent buildings.
(b): Link element connected the floor levels.



Şekil 2. Doğrusal yay modeline ait kuvvet-yer değiştirme ilişkisi [23].

Figure 2. The force-displacement relationship of the linear spring model [23].

$$F = \begin{cases} k(u_1 - u_2 - d) & \text{eğer } (u_1 - u_2) \geq d \\ 0 & \text{eğer } (u_1 - u_2) < d \end{cases} \quad (1)$$

3 Deprem kayıt seçimi

Binaların sismik performanslarının belirlenmesi amacıyla kullanılan zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde, ivme kayıtlarının seçimi analiz sonuçlarını etkileyebilmektedir [24]. Bu nedenle, uygun ivme kaydı elde edebilmek için 3 farklı yöntem kullanılmaktadır: tasarım spektrumları ile uyumlu yapay ivme kaydı üretimi, benzetim yolu ile ivme kaydı üretimi ve gerçek depremlerin kullanımı [25]-[27]. Gerçek deprem kayıtlarının kullanılması ile yer hareketinin genlik, süre, faz ve frekans içeriğinde sağlıklı bilgiler elde edilmektedir. Bu nedenle gerçek deprem kayıtlarının kullanımı önerilmektedir [28].

Günümüzde, deprem kayıtlarının yer aldığı veri tabanlarının kolay ulaşılabilir olmasından dolayı, dinamik analiz için gerçek

deprem kayıtlarının kullanılması tercih edilmektedir. Deprem kayıtlarının elde edildiği istasyonların zemin özellikleri ve fayla olan uzaklıkları değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle belirli bir sahada, deprem tehlikesini yansıtacak ivme kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Modern yönetmeliklerde ivme kayıt seçimleri ile ilgili bazı parametrelere yer verilmektedir [18],[29]-[31].

Yönetmelik ile uyumlu deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirme işlemleri için optimizasyon teknikleri sıkça kullanılmaktadır [28],[32]. Deprem tasarım yönetmeliklerinde yer alan tepki spektrumları hedef alınarak kısıtlı optimizasyon problemi gibi çözüm yapılabilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği' ne (TBDY-2018) ait tasarım ivme spektrum koşullarını sağlayan ivme kayıtları seçilmiş ve ölçeklendirilmiştir. Problemin çözümü için sezgisel optimizasyon tekniklerinden Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılmıştır [33].

3.1 Tasarım ivme spektrumu ve deprem kaydı seçimi

3.1.1 Tasarım ivme spektrumu

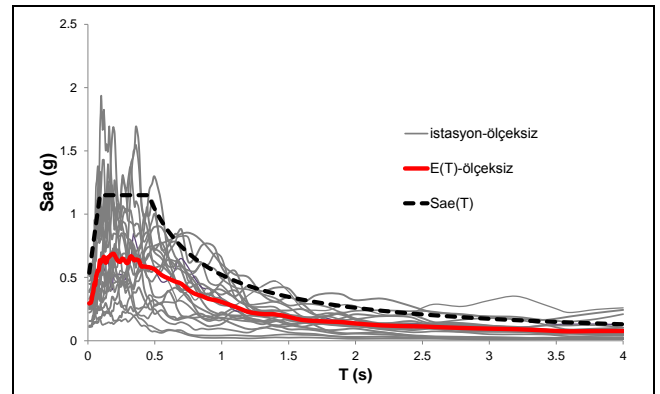
Çalışmada kullanılan binalara ait yatay spektrum grafiklerinin çizdirilebilmesi için tasarım spektrumunun şeklini kontrol eden parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Bu parametreler; S_{DS} , S_{D1} , T_A , T_B sırasıyla kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını, bir saniye periyoda karşılık gelen tasarım spektral ivme katsayısını, yatay elastik ivme spektrumun köşe periyotlarını ifade etmektedir.

Tablo 3. Spektrum şeklini kontrol eden parametreler.

Table 3. The parameters that control the spectrum shape.

Lokasyon	Zemin Sınıfı	S_{DS}	S_{D1}	T_A (s)	T_B (s)
Denizli	ZD	1.15	0.521	0.09	0.45

Bu değerler için elde edilen yatay spektrum grafiği Şekil 3'te çizdirilmiştir. 50 yılda aşılma olasılığı %10 ve geri dönüş periyodu 475 yıl olan deprem düzeyi (DD-2) referans alınmıştır.



Şekil 3. Seçilen ivme kayıtlarının ölçeksiz spektrum grafikleri

Figure 3. The unscaled spectra of selected acceleration records.

3.1.2 İvme kaydı seçim kriterleri

TBDY-2018'e göre zaman tanım alanında yapılacak 3B analizlerde kullanılacak ivme kayıtlarının seçimi için bazı kriterler yer almaktadır; deprem kaydı takımlarının sayısı en az 11 olmalı ve aynı depremden seçilecek kayıt ve kayıt takımı sayısı üçü geçmemelidir. Seçilen her bir deprem kaydı

takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmelidir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin, %5 sönümlü yatay elastik tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranı 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenleri ölçeklendirilmelidir. Ayrıca her iki yatay bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılmalıdır.

3.1.3 İvme kaydı seçiminde ilave kriterler

Dinamik analizlerde kullanılacak olan deprem kayıtları için PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) veri tabanı kullanılmıştır [34]. Dünyanın çeşitli bölgelerinden elde edilen deprem kayıtlarının bulunduğu bu veri tabanındaki depremlerin büyüklüğü, fay tipi, kaydın istasyonuna ait zemin özellikleri ve faya olan uzaklıkları değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, ivme kayıt seçiminde bazı kriterler dikkate alınmıştır. Deprem büyüklüğü M_w , 4.5 ile 7.5 arasında, deprem kayıtlarının elde edildiği istasyonların faya olan uzaklıkları 5 ile 50 km arasında seçilmiştir. Maksimum yer ivme değeri 0.1 g ve üzeri olan kayıtlar tercih edilmiştir. ZD zemin sınıfının dikkate alındığı bu çalışmada kayma dalgası hızı V_s , 200-360 m/s arasında seçilerek 180 adet ivme kaydı havuzu oluşturulmuştur.

3.2 Optimizasyon problemi

Tasarım spektrumu ile uyumlu deprem kaydı seçimi ve ölçeklendirme işlemi, Denklem (2)'de verilen amaç fonksiyonunun minimize edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu denklemde yer alan x , veri tabanından seçilen ivme kaydının numarasını ve bu ivme kaydına ait ölçeklendirme katsayısının saklandığı vektör ifade etmektedir. Karar değişkenleri olarak ifade edilen bu x vektöründe, seçilecek deprem sayısı ve deprem sayısı kadar da ölçekleme katsayısı yer almaktadır. Örneğin, 11 deprem kaydının yer aldığı bir deprem seti seçilmek istenirse x vektörü 22 adet değişkenden (11 adet deprem kaydı ve 11 adet ölçekleme katsayısı) oluşmaktadır. Ölçekleme katsayısı 0.5-2.0 arasında seçilmiştir [32].

$$\min F(x) = f(x) + h_1(x) + h_2(x) + h_3(x) \quad (2)$$

Çalışmada hedeflenen tasarım spektrumu $S_{ae}(T_i)$ ve seçilen kayıtlardan elde edilen spektrumların ortalaması $E(T_i)$ arasındaki farkların karelerinin toplamı Denklem (3)'te verilen $f(x)$ fonksiyonu ile tanımlanmıştır. TBDY-2018 ile uyumlu deprem kayıt seçiminde $E(T_i)$ değeri bileşke spektrumların ortalaması olarak dikkate alınmıştır. Hataların karelerinin minimize edildiği $f(x)$ fonksiyonu için, periyot aralığı 0.04 ile 4.00 s seçilmiştir. Bu periyot değerleri, çalışmada kullanılacak olan 3 ile 10 katlı bina modelleri için uygundur. Denklemdeki k , dikkate alınan periyot sayısını ifade etmektedir. Örneğin, PEER veri tabanından elde edilen her bir deprem kaydında, 111 periyot değerine karşılık gelen spektral ivme değerleri verilmektedir. Tüm periyot değerleri dikkate alınmak istenirse k değeri 111 adet olacaktır.

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (E(T_i) - S_{ae}(T_i))^2, \quad 0.04s \leq T_i \leq 4.00s \quad (3)$$

Minimizasyon probleminde $h_1(x)$ ve $h_2(x)$ fonksiyonları kısıt olarak dikkate alınmıştır. Seçilen bileşke spektrumların ortalama değeri ile hedef spektrum değeri arasındaki orana bağlı olan bu fonksiyonlar Denklem (4) ve (5)'te yer almaktadır.

g_1 , g_2 ifadeleri sırasıyla alt ve üst sınır koşulunu tanımlamaktadır. TBDY-2018'de ortalama spektrumun tasarım spektrumuna oranı için bir alt sınır verildiği için $g_1 = 1.3$ olarak dikkate alınmıştır. Bu yönetmelikte herhangi bir üst limit yer almamaktadır. Seçilen kayıtlar arasındaki saçılımı azaltabilmek adına üst sınır, $g_2 = 1.6$ seçilmiştir [35]. Kısıtlar sağlanırsa fonksiyon sıfır değerini alırken, sağlanmadığı durumda ise penaltı katsayısı (PK_i) uygulanır.

$$h_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } \max(E(T)/S_{ae}(T)) < g_1 \\ PK_1 & \text{değilse} \end{cases} \quad (4)$$

Penaltı katsayıları, kısıtlar üzerinde etkili olarak amaç fonksiyonunun minimize edilmesine yardımcı olur. Kısıtların gerekli koşulları sağladığı durumlarda penaltı katsayısı sıfır değerini alırken, koşulların sağlanmadığı durumlarda penaltı katsayısı devreye girer.

$$h_2(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } \min(E(T)/S_e(T)) > g_2 \\ PK_2 & \text{değilse} \end{cases} \quad (5)$$

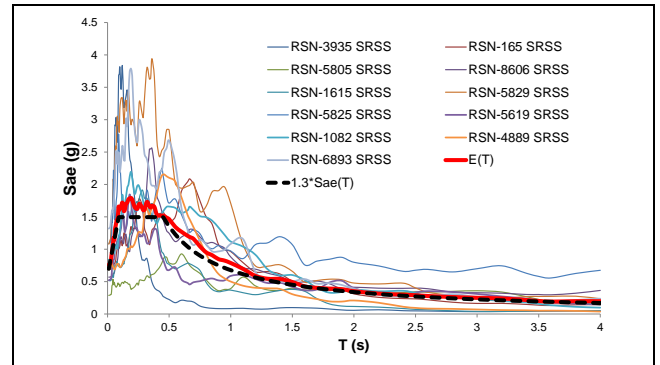
Son olarak, veri tabanından seçilen ivme kayıtlarının sadece bir kez kullanılması için $h_3(x)$ fonksiyonu Denklem (6) ile dikkate alınmıştır.

$$h_3(x) = \begin{cases} PK_3 & \text{set içinde aynı ivme kaydı seçilmişse} \\ 0 & \text{set içinde aynı ivme kaydı hiç seçilmemişse} \end{cases} \quad (6)$$

3.3 Seçilen ivme kayıtları ve ölçek katsayıları

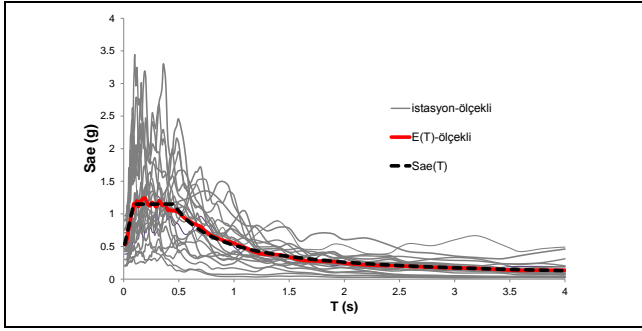
Çalışma kapsamında TBDY-2018'e göre ZD zemin sınıfı üzerinde inşa edildiği düşünülen 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 katlı betonarme binaların derz mesafeleri incelenmek istenmektedir. Bu amaçla TBDY-2018 ile uyumlu 11 deprem kayıt takımından (11x2=22) oluşan deprem seti, Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) ile elde edilmiştir. Seçilen ölçeksiz ivme spektrumları ve ortalamaları Şekil 3'te verilmiştir.

TBDY-2018 ile uyumlu deprem kaydı seçimi yapılırken, her bir ivme kaydının iki yatay bileşenine ait spektrumların (H1 ve H2 yönü) kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke kayıt (SRSS) elde edilmiştir. 11 ivme kayıt takımına ait bileşke spektrumlar, bileşke spektrumların ortalaması $E(T)$ ve ZD zemin sınıfı için 1.3 katsayısı ile büyütülen yatay tasarım spektrum eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Buna ilave olarak; ölçeklendirilmiş 22 ivme kaydına ait ivme spektrumu ve ortalama spektrumu Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Seçilen ivme kayıt takımlarının (SRSS) spektrum grafikleri.

Figure 4. The SRSS spectra of scaled acceleration records.



Şekil 5. Seçilen ivme kayıtlarının ölçekli spektrum grafikleri.

Figure 5. The spectrums of scaled acceleration records.

Algoritmada yer alan F (ölçekleme katsayısı) ve CR (çaprazlama parametresi) parametreleri sırasıyla 0.4 ve 0.2 olarak seçilmiştir. Algoritmadaki iterasyon sayısı ise 1000 olarak alınmıştır. Seçilen kayıtlara ait özellikler Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4. İvme kayıtlarına ait özellikler ve ölçek katsayıları.

Table 4. The properties of the selected earthquake records and scaling coefficients.

Kayıt No.	Deprem	Büyüklik M_w	Ölçek
RSN-3935	Tottori, Japan	6.61	1.7786
RSN-165	Imperial Valley-06	6.53	1.8544
RSN-5805	Iwate, Japan	6.9	1.8600
RSN-8606	El Mayor-Cucapah, Mexico	7.2	1.4823
RSN-1615	Duzce, Turkey	7.14	1.7878
RSN-5829	El Mayor-Cucapah, Mexico	7.2	1.9498
RSN-5825	El Mayor-Cucapah, Mexico	7.2	1.8929
RSN-5619	Iwate, Japan	6.9	1.9229
RSN-1082	Northridge-01	6.69	1.5847
RSN-4889	Chuetsu-oki, Japan	6.8	1.8487
RSN-6893	Darfield, New Zealand	7.0	1.8912

4 Analiz sonuçları

4.1 Analizlerden elde edilen minimum derz mesafeleri

Çalışmada, kuvvetli yer hareketi ile çarpışma olasılığı bulunan düşük ve orta yükseklikteki komşu binalarda, çekiçlemenin önlenmesi için gerekli olan derz mesafeleri araştırılmıştır. Bu bağlamda, 3 ile 10 kat arasında değişen betonarme binalar kullanılarak 28 farklı ikili model oluşturulmuştur. 11 ivme kayıt takımından (her iki yön için 11x2=22) oluşan deprem seti kullanılarak, toplamda 616 adet 3B doğrusal olmayan dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. 22 adet ivme kaydının doğrusal olmayan dinamik analizleri sonucu her bir ikili modele ait derz mesafeleri elde edilmiştir. Her ikili model için elde edilen 22'şer adet deprem derzinin ortalamaları (d_{ort}) hesaplanarak Tablo 5'te verilmiştir. Bu ortalama derz mesafeleri, ikili modellerde çarpışmanın görülmeyeceği minimum mesafeyi belirtmektedir.

Tablo 5. İkili modeller için elde edilen ortalama derz mesafeleri.

Table 5. The mean seismic gap distances obtained for the building pairs.

Model	d_{ort} (mm)	Model	d_{ort} (mm)
4-3	71.8	8-7	69.8
5-3	95.2	9-3	79.6
5-4	78.5	9-4	109.6
6-3	84.2	9-5	122.5
6-4	88.6	9-6	124.9
6-5	52.3	9-7	110.5
7-3	81.2	9-8	82.2
7-4	101.3	10-3	85.2
7-5	88.1	10-4	115.0
7-6	68.8	10-5	145.7
8-3	79.6	10-6	158.0
8-4	108.7	10-7	158.3
8-5	107.9	10-8	152.9
8-6	102.8	10-9	99.2

4.2 TBDY-2018'de yer alan deprem derzlerinin incelenmesi

TBDY-2018'de, binalar arasındaki derz mesafesi aşağıda maddeler halinde tanımlanmıştır. Bu maddelerden elde edilen derz mesafeleri için en olumsuz durum dikkate alınmalıdır.

- Her bir kat için komşu binalarda elde edilen elastik yer değiştirmelerin (azaltılmış) karelerinin toplamının karekökü (SRSS) ile α katsayısının çarpımından az olmayacaktır. α katsayısının değeri kat seviyeleri eşit ise $0.25R/I$, değilse $0.5R/I$ alınacaktır (R: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı; I: Bina önem katsayısı),
- Mevcut eski bina için hesap yapılmasının mümkün olmaması durumunda, eski binanın yer değiştirmeleri, yeni bina için aynı katlarda hesaplanan değerlerden daha küçük alınmayacaktır,
- Bırakılacak minimum derz boşluğu, 6 m yüksekliğe kadar en az 3 cm olacak ve bu değere 6 m'den sonraki her 3 m'lik yükseklik için en az 1 cm eklenecektir.

$$d_a = \alpha \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (7)$$

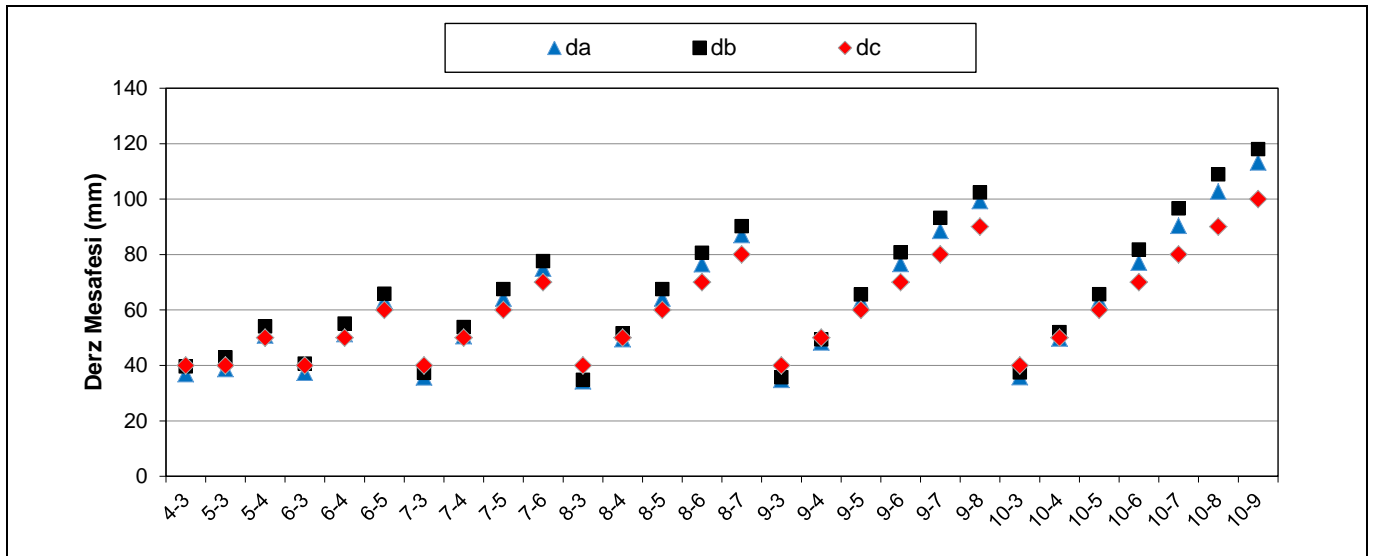
Denklem (7)'de yer alan u_1, u_2 komşu binalara ait azaltılmış elastik yer değiştirmeleri ifade etmektedir. Yönetmelik bazında gerekli olan deprem derz mesafeleri Tablo 6'da verilmektedir. $d_a, d_b,$ ve d_c ; yukarıda verilen a, b ve c maddeleri için hesaplanan derz mesafeleridir. d ise üç farklı durum için hesaplanan mesafelerin en yüksek değeridir. Bu durumlar ile hesaplanan derz mesafeleri Şekil 6' da verilmektedir.

Komşu binaların elastik deplasman değerlerinin karelerinin toplamının karekökünün alındığı a ve b maddeleri ile bina yüksekliğine bağlı olan c maddesi ile hesaplanan derz mesafeleri arasında ciddi bir değişim görülmediği göze çarpmaktadır. Ayrıca Şekil 6'da açıkça görüldüğü üzere komşu binalar arasındaki kat adetlerinin artması ile birlikte gerekli derz mesafesi tüm maddeler için artmaktadır.

Tablo 6. TBDY-2018 deprem yönetmeliğine göre hesaplanan derz mesafeleri.

Table 6. The seismic gap distances calculated according to TBEC-2018.

Model	d_a (mm)	d_b (mm)	d_c (mm)	d (mm)
4-3	36.9	39.6	40.0	40.0
5-3	38.7	42.9	40.0	42.9
5-4	50.8	54.1	50.0	54.1
6-3	37.4	40.6	40.0	50.0
6-4	51.3	55.1	50.0	60.0
6-5	63.3	65.8	60.0	70.0
7-3	35.7	37.3	40.0	40.0
7-4	50.6	53.8	50.0	53.8
7-5	64.2	67.5	60.0	67.5
7-6	74.9	77.6	70.0	77.6
8-3	34.3	34.8	40.0	40.0
8-4	49.5	51.6	50.0	51.6
8-5	64.2	67.5	60.0	67.5
8-6	76.5	80.6	70.0	80.6
8-7	87.0	90.2	80.0	90.2
9-3	34.8	35.7	40.0	40.0
9-4	48.3	49.4	50.0	50.0
9-5	63.2	65.6	60.0	65.6
9-6	76.6	80.8	70.0	80.8
9-7	88.5	93.2	80.0	93.2
9-8	99.3	102.4	90.0	102.4
10-3	35.8	37.5	40.0	40.0
10-4	49.7	52.0	50.0	52.0
10-5	63.3	65.7	60.0	65.7
10-6	77.1	81.8	70.0	81.8
10-7	90.4	96.6	80.0	96.6
10-8	102.7	108.9	90.0	108.9
10-9	113.2	118.0	100.0	118.0



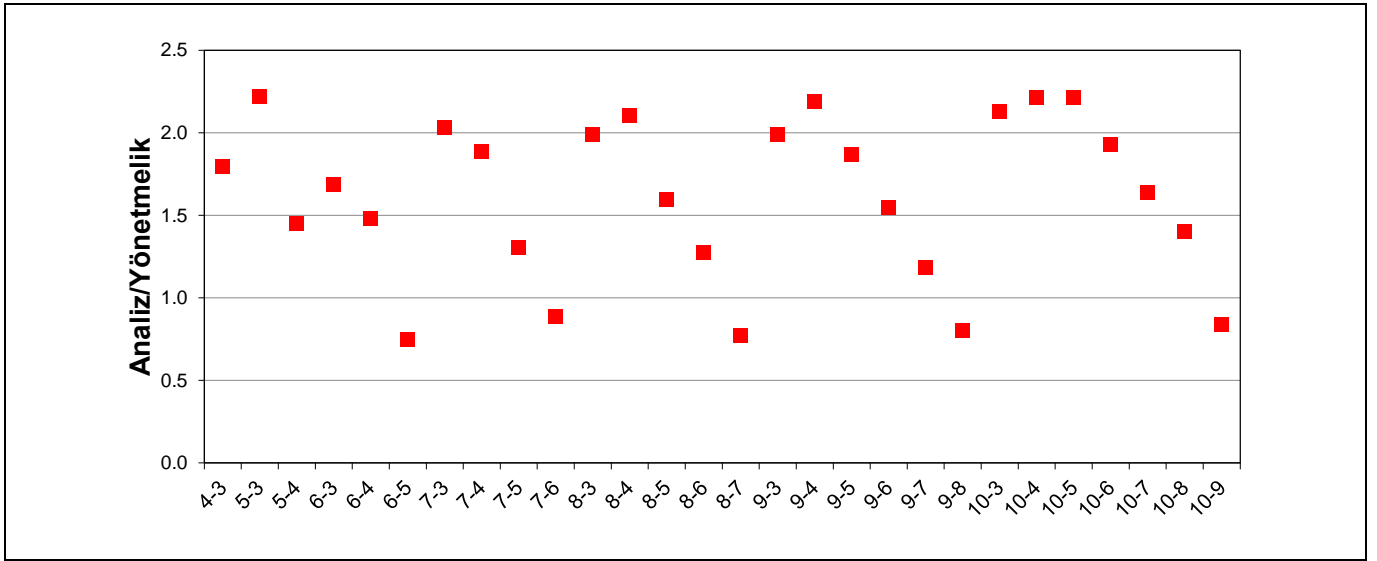
Şekil 6. Deprem yönetmeliğindeki üç farklı duruma göre hesaplanan derz mesafeleri.

Figure 6. The seismic gap distances calculated according to three different situations in the earthquake code.

4.3 Analiz sonuçları ile yönetmelikte verilen deprem derzlerinin kıyaslanması

Doğrusal elastik olmayan analizlerden elde edilen ortalama boşluk mesafeleri (d_{ort}), yönetmelik ile hesaplanan sınıra (d) oranlanarak Şekil 7'de verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde; analiz sonuçları yönetmelik koşullarını

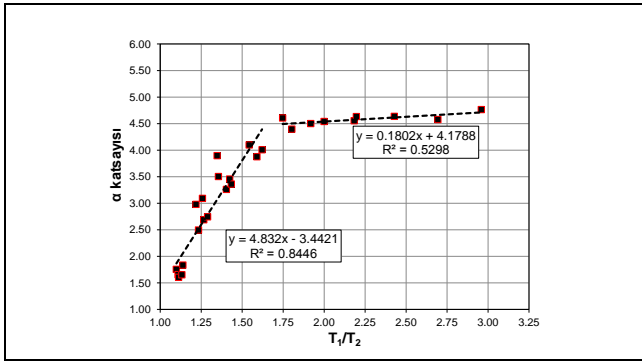
aşarak derz mesafelerinin yetersiz olduğu görülmektedir. Buna karşılık 6-5, 7-6, 8-7, 9-8 ve 10-9 ikili modelleri için yönetmelikte önerilen derz mesafeleri güvenli tarafta kalmaktadır. Kat sayılarının ve periyot değerlerinin birbirine yakın olduğu ikili binalardaki derz mesafelerinin azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Analizlerden elde edilen derz mesafelerinin yönetmelikteki derz mesafelerine oranı

Figure 7. The ratio of seismic gap distances obtained from the analysis to distances in the code.

Şekil 7 incelendiğinde; deprem yönetmeliği ile hesaplanan gerekli derz mesafeleri doğru bir tahmin verememektedir. Daha iyi bir tahmin için doğrusal elastik olmayan analizlerden elde edilen ortalama derz mesafeleri, komşu binaların elastik yer değiştirmelerinin (azaltılmış) karelerinin toplamının kareköküne (SRSS) oranlanmıştır. Bu oran aynı zamanda 4. Bölümün a maddesinde yer alan α katsayısını vermektedir. İkili modellerdeki binaların periyot oranlarına bağlı olarak bu katsayının değişimi Şekil 8'de gösterilmektedir. T_1 , periyot değeri yüksek olan binayı temsil ederken; T_2 , periyot değeri küçük olan binayı ifade etmektedir.



Şekil 8. Bina periyot oranı ile α katsayısı ilişkisi

Figure 8. The relationship between building period ratio and α coefficient.

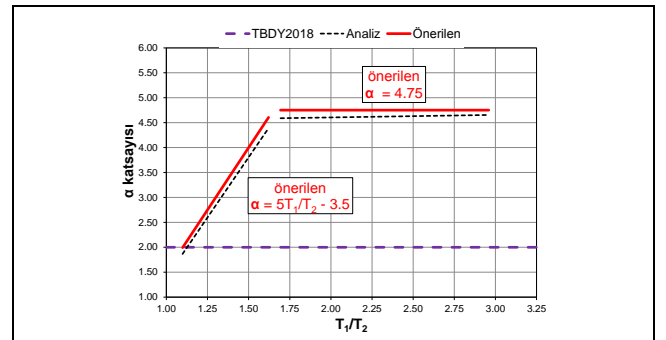
Şekil 8'de görüldüğü üzere; iki doğrusal (bilinear) eğri göze çarpmaktadır. Komşu bina periyotlarının birbirine yaklaşması ($T_1/T_2 = 1$) ile α katsayısının değeri 2'den küçük olmaktadır. Periyot oranı, 1.60'tan küçük olması durumunda bir doğrusal ilişki görülerek α katsayısı artmaktadır. Bu doğruya ait R^2 değeri yaklaşık 0.84 olarak hesaplanmıştır. Bu orandan daha büyük ikili modeller için α katsayısında pek değişim görülmekte ve yaklaşık 4.5 civarında bir değerde seyrettiği görülmektedir. Deprem yönetmeliğinde verilen ve Denklem (7)'de ifade edilen derz mesafesi hesabındaki α katsayısı çerçeve elemanlardan oluşan ve yüksek süneklik düzeyine

sahip konut binaları için sabit bir değer olmakla birlikte 2 değerine eşittir.

Bu çalışmada α katsayısı üzerinde bir değerlendirme yapılarak, bu katsayının komşu binaların periyotları ile nasıl değiştiği incelenmiştir. Şekil 8'de elde edilen ve denklemleri verilen iki doğrusal ilişki basitleştirilerek Denklem (8)'de verilmiştir.

$$\alpha = \begin{cases} 5 \frac{T_1}{T_2} - 3.5 & \frac{T_1}{T_2} \leq 1.6 \\ 4.75 & \frac{T_1}{T_2} > 1.6 \end{cases} \quad (8)$$

Periyot oranının 1.6'dan küçük olması durumunda artan doğrusal denklem, 1.6'dan büyük olması durumunda ise 4.5-5 arasında 4.75 katsayı önerilmiştir. Önerilen denklem ile elde edilen α katsayılarına ait grafik, Şekil 9'da gösterilmiştir. Periyot oranının 1.6'dan büyük olduğu durum için α katsayısı 4.75 alınarak çizdirilmiştir.



Şekil 9. Bina periyot oranlarına bağlı önerilen α katsayısı.

Figure 9. The proposed α coefficient based on building period ratios.

Çalışma kapsamında periyot oranı 1'e yakın olan komşu binalar dikkate alınmamıştır. Teorik olarak bu oranın 1'e eşit olması durumunda herhangi bir derz mesafesine gerek

duyulmamaktadır. Fakat güvenli tarafta kalmak adına, bu tür komşu yapılar için α katsayısının Denklem (8)'de görüldüğü gibi 1.5 olarak dikkate alınması önerilmiştir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, güçlü depremler karşısında çarpışma olasılığı bulunan betonarme yapıların minimum çarpışma mesafeleri belirlenmiş ve mevcut deprem yönetmeliğinde yer alan deprem derzleri irdelenmiştir. 8 farklı 3B modellenen binalar kullanılarak, çarpışmanın görülmediği 28 farklı ikili model oluşturulmuştur. Minimum çarpışma mesafesinin belirlenebilmesi için TBDY-2018 ile uyumlu 22 adet ölçeklendirilmiş ivme kaydı seçilmiştir. 616 adet 3B zaman tanım alanında elastik olmayan dinamik analizler sonucunda elde edilen çarpışma mesafeleri, TBDY-2018'de yer alan derz mesafeleri ile kıyaslanmıştır.

Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- TBDY-2018' de 3 farklı madde için hesaplanan derz mesafeleri birbirlerine oldukça yakın değerler almaktadır,
- Deprem yönetmeliği ile hesaplanan gerekli derz mesafeleri, dinamik analizler sonucu elde edilen derz mesafelerine oranla oldukça yetersiz görülmektedir,
- Daha iyi bir tahmin için doğrusal elastik olmayan analizlerden elde edilen ortalama derz mesafeleri, komşu binaların elastik yer değiştirmelerinin (azaltılmış) karelerinin toplamının kareköküne (SRSS) oranlanmıştır. Bu oranlar komşu binaların periyot oranlarına bağlı olarak iki doğrulu bir ilişki göstermektedir,
- Bina periyot oranlarının birbirine yakın olması durumunda ($T_1/T_2 = 1$), deprem yönetmeliğinin derz mesafesi için önerdiği katsayı ($\alpha = 2$) yeterli olabilmektedir,
- Komşu binalara ait periyotların oranı $T_1/T_2 = 1.6'$ dan büyük ise $\alpha = 4.5 - 5$ arasında bir değer alınarak kullanılabilir.
- Periyot oranları $T_1/T_2 = 1.6'$ dan küçük ise α katsayısında doğrusal bir değişim görülmektedir. Bu doğruya ait R^2 değeri yaklaşık 0.84 olarak elde edilmiştir,
- Analizler sonucu elde edilen bulgular dikkate alınarak komşu binaların periyot oranlarına bağlı basitleştirilmiş α katsayısı Denklem 8'de önerilmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde; ülkemizde yer alan deprem yönetmeliğinin düşük ve orta katlı yeni komşu binalar arasında bırakılması gereken derz tahmininde yetersiz olabileceği görülmektedir. Farklı kat sayılarına sahip birçok komşu bina üzerinde yapılan bu çalışma ile yönetmelikte yer alan "her bir kat için komşu binalarda elde edilen elastik yer değiştirmelerin (azaltılmış) karelerinin toplamının karekökü (SRSS) ile α katsayısının çarpımından az olmayacaktır" ifadesinde yer alan α katsayısının iyileştirilmesi için yeni bir denklem önerilmiştir.

6 Conclusions

In this study, the minimum separation distances of reinforced concrete structures that have the possibility of collision during strong earthquakes were determined and compared to the seismic gap distances recommended in the seismic code. By using 8 different 3D modeled buildings, 28 different building pairs were created without collision. In order to determine the minimum gap distance, 22 scaled acceleration records

compatible with TBEC-2018 were selected. The gap distances obtained as a result of 616 3D nonlinear time history analyses were compared with the gap distances in TBEC-2018.

The findings are summarized as below:

- The seismic gap distances calculated for 3 different situations in TBEC-2018 are very close to each other,
- The required gap distances calculated by the earthquake code are quite insufficient compared to the gap distances obtained as a result of dynamic analyses,
- The average gap distances obtained from nonlinear analyses were divided by the square root of the sum of squares (SRSS) of the reduced elastic displacements of neighboring buildings for a better estimation. These ratios show a bilinear relation with the period ratios of neighboring buildings,
- If the building period ratios are close to each other ($T_1/T_2 = 1$), the coefficient ($\alpha = 2$) proposed by the earthquake code for the gap distance may be sufficient.
- If the ratio of the periods of neighboring buildings is higher than $T_1/T_2 = 1.6$, a coefficient value between $\alpha = 4.5 - 5$ can be used,
- If the period ratios are less than $T_1/T_2 = 1.6$, a linear change in the coefficient α is observed. The R^2 value was obtained as approximately 0.84,
- Considering the findings obtained as a result of the analyses, the simplified α coefficient depending on the period ratios of neighboring buildings is proposed in Equation 8.

When the results are evaluated; it is seen that the Turkish earthquake code may be insufficient in the estimation of the required seismic gap distances in low and mid-rise neighboring buildings. Based on the findings for many neighboring buildings with different floor numbers, a new equation is proposed to improve the α coefficient in the expression: "Sizes of gaps shall not be less than the value found as result of multiplication of α coefficient with square root of sum of squares of reduced elastic displacements obtained in adjacent buildings for each floor".

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] Rosenblueth E, Meli R. "The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico City". *Concrete International*, 8(5), 23-34, 1986.

- [3] Kasai K, Maison BF. "Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake". *Engineering Structures*, 19, 195-207, 1997.
- [4] Northridge Reconnaissance Team. "Northridge Earthquake of January 17, 1994". Oakland, California, Reconnaissance Report, EERI 25-47, 1996.
- [5] Youd TL, Bardet JP, Bray JD. "Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999". Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, Reconnaissance Report, 2000.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Otsuka H, Unjoh S, Terayama T, Hoshikuma J, Kosa K. "Damage to highway bridges by the 1995 Hyogoken Nanbu earthquake and the retrofit of highway bridges in Japan". In: *Third US.-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges*, Osaka, Japan, 10-11 December 1996.
- [10] Chouh N, H Hao. "Pounding damage to buildings and bridges in the 22 February 2011 Christchurch earthquake". *International Journal of Protective Structures* 3(2), 123-140, 2012.
- [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] Jeng V, Kasai K, Maison BF. "A spectral difference method to estimate building separations to avoid pounding". *Earthquake Spectra*, 8(2), 201-223, 1992.
- [14] Barbato M, Tubaldi E. "A probabilistic performance-based approach for mitigating the seismic pounding risk between adjacent buildings". *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 42(8), 1203-1219, 2013.
- [15] Favvata MJ. "Minimum required separation gap for adjacent RC frames with potential inter-story seismic pounding". *Engineering Structures*, 15, 643-659, 2017.
- [16] Abdel Raheem SE. "Mitigation measures for earthquake induced pounding effects on seismic performance of adjacent buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(4), 1705-1724, 2014.
- [17] Türk Standartları Enstitüsü. "Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri". Ankara, Türkiye, TSE 498, 1997.
- [18] Afet ve Acil Durum Başkanlığı. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 30364, 2018.
- [19] Computers and Structures. "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual". New York, USA, 2019.
- [20] 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.
- [21] Jankowski R. "Non linear viscoelastic modelling of earthquake induced structural pounding". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(6), 595-611, 2005.
- [22] Shakya K, Wijeyewickrema A. "Mid-Column Pounding of MultiStory Reinforced Concrete Buildings Considering Soil Effects". *Advances in Structural Engineering*, 12(1), 71-85, 2009.
- [23] Kamal M, Çaycı BT, İnel M. "Effects of pounding in low and mid-rise buildings". *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B-Theoretical Sciences*, 6, 141-151, 2018.
- [24] Demirtas B, Bayraktar A, Dumanoglu A. "Model updating effects on the seismic behavior of tall buildings under far and near-fault ground motions". *Research on Engineering Structures & Materials*; 3(2), 99-112, 2017.
- [25] Abrahamson NA. "Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH". Washington, USA, 1993.
- [26] Boore DM. "Simulation of ground-motion using the stochastic method". *Pure and Applied Geophysics*, 160, 635-676, 2003.
- [27] Bommer JJ, Acevedo AB. "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis". *Journal of Earthquake Engineering, Special Issue*, 8(1), 43-91, 2004.
- [28] Fahjan YM. "Selection and scaling of real earthquake accelerograms to fit the Turkish design spectra". *Teknik Dergi*, 19(3), 4423-4444, 2008.
- [29] European Committee for Standardization. "Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures". Brussels, Belgium, EC-8, 2004.
- [30] American Society of Civil Engineers. "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures". USA, 2010.
- [31] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik". Ankara, Türkiye, 26454, 2007.
- [32] Kayhan AH, Korkmaz KA, İrfanoğlu A. "Selecting and scaling real ground motion records using harmony search algorithm". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 941-953, 2011.
- [33] Storn R, Price K. "Differential Evolution a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces". Technical Report, TR-95-012, 1995.
- [34] University of California, Berkeley. "PEER Database". <http://nisee.berkeley.edu/spl/> (05.12.2011).
- [35] Ozmen HB, Yilmaz H, Yıldız H. "An acceleration record set for different frequency content, amplitude and site classes" *Research on Engineering Structures & Materials*, 5(3), 321-333, 2019.