



Effectiveness of near-fault pulse models in determining behavior of isolated buildings based on lead core heating

Zafer Kanbir^{ID}, Hatice Gazi^{ID}, Seda Öncü-Davas^{ID}, Cenk Alhan*^{ID}

Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 34320, Avcılar, Istanbul, Turkey

Highlights:

- Modeling of LRBs considering the strength degradation due to lead core heating
- Considering different synthetic pulse modes
- Conducting time history analyses under historical earthquake records and their synthetic pulse counterpart

Keywords:

- Seismic isolation
- Near-fault earthquake
- Synthetic pulse model
- Lead rubber bearing
- Lead core heating

Article Info:

Research Article

Received: 02.01.2022

Accepted: 03.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1052294

Correspondence:

Author: Cenk Alhan

e-mail: cenk.alhan@iuc.edu.tr

phone: +90 212 473 7070 / 17920

Graphical/Tabular Abstract

In this study, nonlinear time history analyses of a four-story seismically isolated building are performed under the effect of historical near-fault earthquake records and their artificially produced pulse counterparts. Comparing the structural responses obtained, the effectiveness of pulse models in predicting the seismic behavior of isolated buildings exhibiting lead core heating under the effect of near-fault earthquakes is examined. Figure A illustrates the methodology of the study.

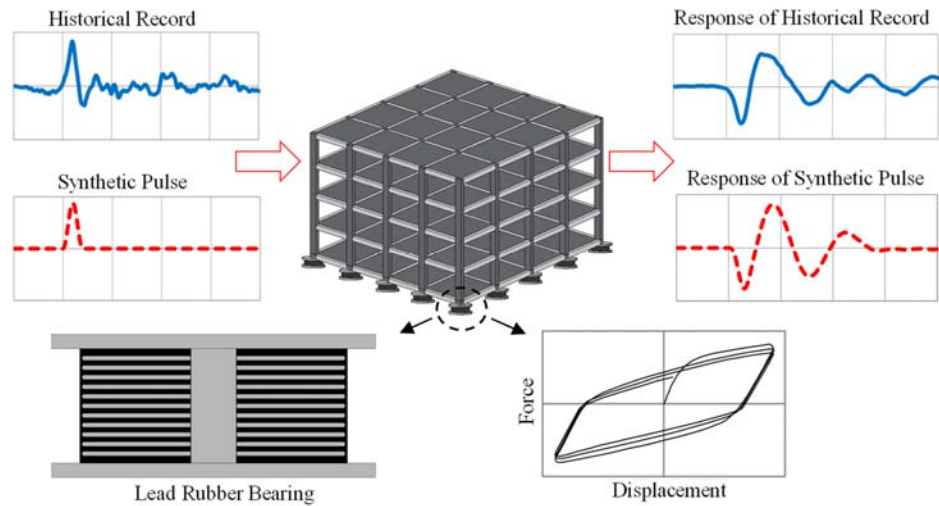


Figure A. Graphical Illustration of the Methodology of the Study

Purpose: The aim of this study is to investigate the success of pulse models in determining the seismic response of isolated buildings exhibiting lead core heating under the effect of near-fault earthquakes.

Theory and Methods:

A four-story benchmark building seismically isolated with lead rubber bearings (LRBs) is modelled in OpenSees program. LRBs are represented by a deteriorating force-displacement curve to consider the strength degradation due to lead core heating. Nonlinear time history analyses are performed under historical near-fault earthquakes and their pulse counterparts synthetically generated by He and Agrawal (2008), Makris Type-A and Makris Type-B (1997) pulse models. The structural responses such as bearing displacement, floor acceleration, characteristic strength and temperature rise are comparatively evaluated.

Results:

General structural behavior can be determined with synthetic pulse models but there are remarkable differences in structural response values depending on lead core heating. If lead core heating is neglected, the percentages of differences between the responses obtained with the original records and their synthetic counterparts are generally underestimated.

Conclusion:

Since the pulse models cannot fully capture the peak responses and do not consider the earthquake motion outside the main pulse, it is determined that using historical earthquake records would be appropriate in the analyses of seismically isolated structures that have strategic importance and contain vibration sensitive equipment, especially in cases where lead core heating is important.



Yakın-fay puls modellerinin yalıtımlı binaların kurşun çekirdek ısınmasına bağlı davranışlarının belirlenmesindeki etkinliği

Zafer Kanbir^{ID}, Hatice Gazi^{ID}, Seda Öncü-Davas^{ID}, Cenk Alhan*^{ID}

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320 Avcılar, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- KÇE yalıtım birimlerinin kurşun çekirdek ısınmasına bağlı dayanım kaybı dikkate alınarak modellenmesi
- Farklı sentetik puls modellerinin dikkate alınması
- Tarihi deprem kayıtları ve bunların sentetik eşdeğerleri etkisinde zaman tanım alanında analizlerin yapılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.01.2022

Kabul: 03.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1052294

Anahtar Kelimeler:

Sismik izolasyon,
yakın-fay depremi,
sentetik puls modeli,
kurşun çekirdekli elastomer
yalıtım birimi,
kurşun çekirdek ısınması

ÖZ

Yüksek genlikli, uzun periyotlu pulsler içeren yakın-fay depremleri, sismik yalıtımlı binalar için yıkıcı bir potansiyele sahiptir. Tarihi yakın-fay deprem kayıtlarının sayısı kapsamlı çalışmalar için yeterli olmadığından; bu kayıtları simüle etmek için sentetik puls modelleri kullanılabilir. Geliştirilen farklı puls modellerinin etkinliği, sismik yalıtımlı yapılar için araştırılmış; ancak bu çalışmalarda, yakın-fay depremlerindeki etkilerinin önemli düzeylere çıkabildiği bilinen kurşun çekirdek ısınması göz önüne alınmamıştır. Bu çalışmada, puls modellerinin taban yalıtımlı binaların yakın-fay depremleri etkisinde kurşun çekirdek ısınmasına bağlı sismik tepkisini belirlemedeki başarısını araştırmak amacıyla, tarihi yakın-fay depremleri ve sentetik olarak üretilmiş eşdeğer yer hareketi kayıtları etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, puls modelleri ile genel davranışın belirlenebilmesine karşın kurşun çekirdek ısınmasına bağlı olarak farkların ortaya çıkabileceğini göstermiştir.

Effectiveness of near-fault pulse models in determining behavior of isolated buildings based on lead core heating

H I G H L I G H T S

- Modeling of LRBs considering the strength degradation due to lead core heating
- Considering different synthetic pulse models
- Conducting time history analyses under historical earthquake records and their synthetic counterparts

Article Info

Research Article

Received: 02.01.2022

Accepted: 03.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1052294

Keywords:

Seismic isolation,
near-fault earthquake,
synthetic pulse model,
lead rubber bearing,
lead core heating

ABSTRACT

Near-fault earthquakes with high amplitude, long-period pulses have a destruction potential for seismically isolated buildings. Since the number of historical near-fault earthquake records is not sufficient for comprehensive studies, synthetic pulse models can be used to simulate these records. The effectiveness of different pulse models has been investigated for seismically isolated structures; however, in these studies lead core heating, which is known to have significant effects in near-fault earthquakes, was not taken into account. In this study, in order to investigate the success of pulse models in determining the seismic response of isolated buildings exhibiting lead core heating under the effect of near-fault earthquakes, nonlinear time history analyses were performed under historical near-fault earthquakes and synthetically produced counterpart ground motion records. The results showed that although general behavior can be determined with pulse models, differences can arise due to lead core heating.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : zaferkanbir@istanbul.edu.tr, hgazi@iuc.edu.tr, seda.oncu@iuc.edu.tr, *cenkalhan@iuc.edu.tr / Tel: +90 212 473 7070 / 17920

1. Giriş (Introduction)

Sismik yalıtım sistemleri, yapıların serbest titreşim periyotlarını uzatarak yapılara etki eden sismik enerjiyi azaltırken; bir yandan da yalıtım sistemindeki ilave sönüm seviyesinde tüketilen sismik enerji miktarını artırır. Böylece hem kat ivmeleri hem de göreceli kat öteleme oranları istenilen sınırların altına düşürülebilir. Bununla birlikte, bu tür sistemlerin karşılaştığı temel zorluk, büyük genlikli ve uzun periyotlu hız pulsuları içeren yakın-fay yer hareketleri etkisinde pratik ve ekonomik sınırları aşabilecek büyük yalıtım sistemi yer değiştirmeleridir [1]. Öte yandan, kurşun çekirdekli elastomer (KÇE) yalıtım birimlerinde kurşun çekirdek ısınması nedeniyle karakteristik dayanımda meydana gelen azalma, yalıtım sistemi yer değiştirmelerinde daha fazla artışa neden olabilmektedir [2]. Böylece, yalıtım sistemindeki aşırı yer değiştirmeler sismik boşluğu aşabilmekte ve doğrudan yapısal bütünlükle ilişkili olan yalıtım birimlerinin kopması veya burkulması gibi ciddi riskler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, uzun periyotlu hız pulsunu içeren yakın-fay depremleri altında KÇE yalıtım birimlerinin kullanıldığı sismik yalıtımlı binaların performansının değerlendirilmesine duyulan ilgi son yıllarda artmıştır [3, 4]. Yapılan bazı çalışmalarda KÇE yalıtım birimlerinde kurşun çekirdek ısınmasının etkisinin yakın-fay depremlerinde daha belirgin olduğu ortaya koyulmuştur [5, 6]. Her ne kadar pratik mühendislik uygulamalarında yönetmelikler uyarınca kurşun çekirdek ısınması alt limit ve üst limit analizleri ile dolaylı olarak dikkate alınabilse de, yapılan bazı çalışmalar kurşun çekirdek ısınmasına bağlı dayanım kaybının analizlerde doğrudan dikkate alınması durumunda elde edilen yapısal tepkilerin alt ve üst limit katsayıları kullanılarak elde edilen yapısal tepkileri aşabileceğini göstermiştir [5, 7]. Özellikle yapıların maruz kaldığı deprem seviyesine bağlı olarak karakteristik dayanımdaki azalım miktarı değişmekte ve yönetmeliklerde verilen sabit alt limit ve üst limit katsayıları yapısal tepkiler için yeterli bir zarf oluşturmak açısından bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, KÇE yalıtım birimleriyle teşkil edilmiş yalıtım sistemlerine sahip yapıların yakın-fay etkisindeki davranışları incelenirken kurşun çekirdek ısınmasının doğrudan dikkate alınması önemlidir. Gerçek mühendislik uygulamalarındaki tasarımların da gerek kurşun çekirdek ısınması gerekse yakın-fay depremlerinin etkisi bakımından ayrıca kontrol edilmeleri faydalı olacaktır. Bunun için, tasarımda kullanılan alt ve üst limit katsayıları yanında kurşun çekirdek ısınması doğrudan dikkate alınarak yapılacak analizlerle tasarım değerleri kontrol edilebilir. Farklı yakın-fay etkilerinin dikkate alınması için ise, çeşitli özellikteki puls modelleri ile yapılacak analizlerle tasarım deprem düzeyleri etkisinde yapılan tasarımların etkinliğinin kontrol edilmesi önerilebilir.

Fay kırığına yakın bölgelerde kaydedilen kuvvetli yer hareketleri, genellikle yüksek genliklere sahip olan ve zeminde kalıcı yer değiştirmeler ortaya çıkarabilen uzun periyotlu hız pulsuları içerir [8]. Yakın-fay depremi olarak adlandırılan bu tür yer hareketlerinde görülen yüksek genlikli hız pulsuları, temel olarak yönelim (ya da doğrultu) etkisi ve sıçrama adımı olarak tanımlanan iki farklı etkiden kaynaklanır [9, 10]. Büyük genlikli ve uzun periyotlu hız pulsuları içeren yakın-fay yer hareketlerinin, yüksek sismik enerjiye sahip olmaları nedeniyle sismik yalıtımlı binalar, yüksek binalar, asma köprüler gibi uzun periyotlu yapısal sistemler üzerinde yıkıcı etkileri olabilmektedir. Bu nedenle yakın-fay depremlerinin bu tür yapılara etkilerinin incelenmesi önem arz etmekte olup son yıllarda yapılan çeşitli çalışmalarda bu etkilerin dikkate alındığı görülmektedir [11, 12]. Belirli sayıdaki tarihsel yakın-fay yer hareketi kayıtları kullanılarak, bu tür kuvvetli yer hareketlerinin sismik yalıtım sistemleri üzerindeki etkilerini araştırılan çalışmalar olmakla birlikte, sistematik çalışmalar farklı moment büyüklükleri, fay mesafeleri, puls hızı ve puls periyodu gibi özelliklere sahip çok daha fazla sayıda yer

hareketi kaydına ihtiyaç duymaktadır [13]. Yakın-fay depremlerinde kaydedilen puls benzeri kuvvetli yer hareketlerinin basit geometrik yapıda olması ve böylece zaman tanım alanındaki eşlenik puls modelleriyle simüle edilebilir olmaları sayesinde [14], bu ihtiyacın karşılanmasında sentetik puls modellerinin kullanılması mümkün olmaktadır. Ayrıca uygulamada, ön tasarım aşamasında hızlı çözümler üretmek açısından puls modelleri ile üretilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bununla birlikte, yakın-fay yer hareketlerinin karakterize eden birçok parametre olması nedeniyle, analitik yapıları bakımından aynı derecede karmaşık olmayan puls modellerinin tüm durumlar için yakın-fay kaydının tamamını bire bir temsil etmesinin beklenemeyeceğini vurgulamak gerekir. Bu nedenle, sentetik puls modellerinin amacı, yakın-fay yer hareketini bire bir modellemek değil, makul bir şekilde simüle ederek yapısal tepkinin temel özelliklerini etkin bir şekilde değerlendirmektir [15, 16]. Bu doğrultuda, çeşitli araştırmacılar tarafından tarihi yakın-fay yer hareketlerinin özelliklerini simüle edecek ve kapsamlı çalışmalarda tarihi deprem kayıtlarını temsilen kullanılacak analitik puls modelleri önerilmiştir [17-20]. Bu puls modelleri arasında yer alan He ve Agrawal [19], Makris Tip-A ve Makris Tip-B [16] puls modelleri, basit fakat etkin analitik yapıları nedeniyle özellikle parametrik çalışmalarda kullanım için oldukça uygundur [21] ve bu nedenle en çok kullanılan puls modelleri arasında yer almaktadır. KÇE yalıtım birimlerinin yakın fay depremi etkisindeki davranışlarının ele alındığı bazı çalışmalarda da puls modellerinin kullanıldığı görülmektedir [6, 22]. Söz konusu puls modellerinin yapılacak çalışmalarda yakın-fay depremlerini temsilen kullanılabilmesi ve elde edilecek sonuçların güvenilirliği, bu modellerin gerçek yakın-fay depremlerinin yapılar üzerindeki etkilerini ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır. Bu konu daha önce sismik yalıtımlı binalar [23, 24] ve sismik yalıtımlı sıvı depolama tanklarında [21, 25] araştırılmıştır; ancak bu çalışmaların hiçbirisi kurşun çekirdekteki ısınma etkilerini dikkate almamıştır. Dolayısıyla, kurşun çekirdek ısınmasının dikkate alındığı durumda analitik puls modellerinin, yakın-fay deprem kayıtları etkisinde elde edilecek yapısal tepkilerin belirlenmesindeki başarısının incelenmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, KÇE yalıtım birimlerinde kurşun çekirdek ısınmasına bağlı olarak karakteristik dayanımda meydana gelen azalma dikkate alındığında, He ve Agrawal [19], Makris Tip-A ve Makris Tip-B [16] puls modellerinin sismik yalıtımlı binaların yapısal tepkileri açısından gerçek yakın-fay deprem kayıtlarını temsil etme kabiliyeti araştırılmıştır. Bu amaçla, 4 katlı sismik yalıtımlı bir binanın zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri tarihi yakın-fay deprem kayıtları ve bunların sentetik olarak üretilmiş eşdeğeri olan He ve Agrawal, Makris Tip-A ve Makris Tip-B puls modelleri etkisinde OpenSees [26] programında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen yalıtım sistemi yer değiştirmeleri, en üst kat ivmeleri, sıcaklık artışları ve karakteristik dayanımın zamanla değişimlerinin yanı sıra; tüm kat ivmeleri ve yalıtım sistemi yer değiştirmesi sonuçlarının pik ve karekök ortalama (root mean square, RMS) değerleri ile yalıtım birimi kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. Matematiksel Model (Mathematical Model)

2.1. Yapısal Model (Structural Model)

Çalışmada kullanılan üst yapı, kolon ve kirişlerle teşkil edilmiş çerçeve taşıyıcı sisteme sahip bir betonarme bina [27]. Her iki yönde beş metrelik dörder açıklığa sahip olan binanın plan boyutları 20 m × 20 m'dir. Bina yalıtım düzleminin üzerinde toplam dört kata sahiptir ve kat yüksekliği her katta 3 m olmak üzere, toplam bina yüksekliği 12 m'dir. Dikdörtgen kesitli kolonlar ve kirişlerin boyutları sırasıyla 45 cm × 45 cm ve 30 cm × 50 cm'dir. Yalıtım katıyla birlikte

binanın toplam kütlesi 2000 ton'dur ve her katın kütlesinin ağırlık merkezinde toplandığı kabul edilmiştir. Beton elastisite modülü, $E_C = 32000$ MPa'dır. Ağırlık merkeziyle rijitlik merkezinin çakışması nedeniyle burulma düzensizliği olmayan binanın taban ankastre durumda her iki yöndeki hâkim doğal titreşim periyodu 0,5 s'dir.

Ele alınan sismik taban yalıtımlı binanın yalıtım sistemi, her bir kolonun altında birer tane olmak üzere, toplam 25 adet KÇE yalıtım biriminden oluşmaktadır. Tüm yalıtım birimlerinin üzerindeki düşey yüklerin eşit olduğu varsayılmıştır. Yalıtım birimleri ile zemin kat kolonları arasında tüm yalıtım birimlerini birbirine bağlayan rijit bir döşeme mevcuttur. Binanın üç boyutlu görünüşü ve yalıtım sisteminde kullanılan KÇE yalıtım birimlerinin şematik en kesit görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.

Kalpakidis ve Constantinou [2] tarafından önerilen teoriyi esas alarak, kurşun çekirdekli yalıtım birimlerinde ısınma etkilerini doğrudan dikkate alabilen OpenSees modelinde, yalıtım birimlerinin gerçek geometrik boyutları ve malzeme özellikleri açıkça tanımlanmalıdır. Bu nedenle, yalıtım birimlerinin detaylı tasarımı Constantinou vd. [28] tarafından sunulan iterasyona dayalı tasarım yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, tasarım aşamasında, kurşun çekirdek ısınmasını ortaya çıkarabilecek yüksek depremselliğe sahip bir tasarım deprem düzeyi tercih edilmiştir [29].

Yalıtım birimlerinin doğrusal olmayan histeretik özellikleri, yani karakteristik dayanım Q , akma sonrası rijitlik K_D , başlangıç rijitliği K_I , akma yerdeğiştirmesi D_y ve akma kuvveti F_y , Eş. 1-Eş. 5 ile hesaplanmıştır.

$$Q = \sigma_{yL0} A_L \quad (1)$$

$$K_D = \frac{GA_r}{T_r} \quad (2)$$

$$K_I = \frac{K_D}{r} \quad (3)$$

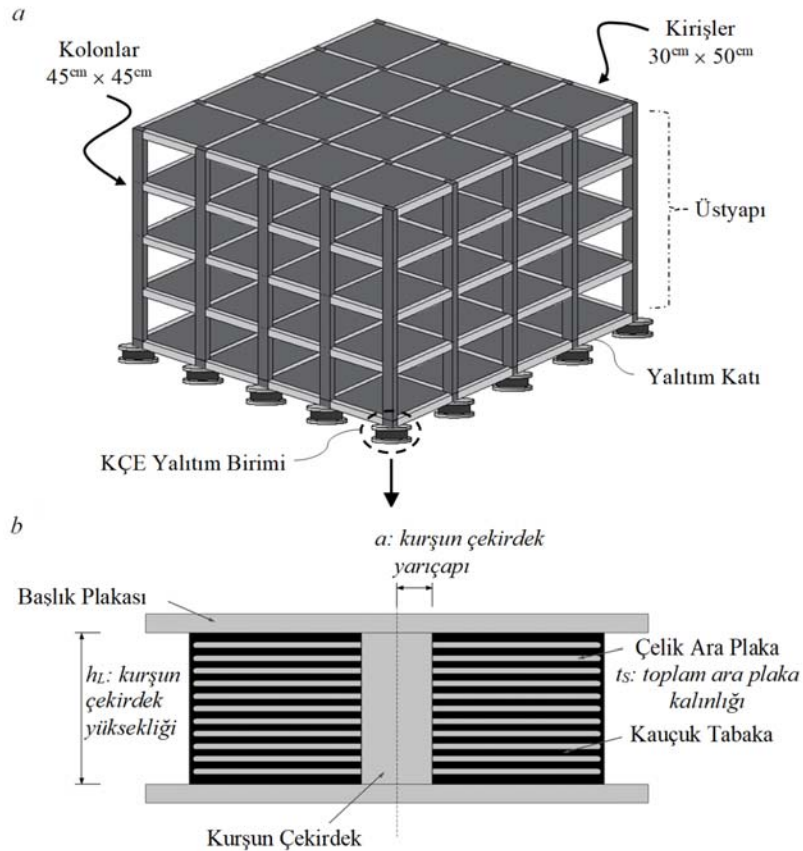
$$Q = (K_I - K_D) D_y \quad (4)$$

$$F_y = K_I \times D_y \quad (5)$$

Burada A_L ve A_r sırasıyla kurşun ve kauçuğun en kesit alanlarıdır. Diğer değişkenler, tasarlanan yalıtım birimlerinin geometrik ve mekanik özelliklerinin gösterildiği Tablo 1'de açıklanmıştır.

Tablo 1. Tasarlanan KÇE yalıtım biriminin geometrik ve mekanik özellikleri (Geometrical and mechanical properties of the designed LRB)

Yalıtım birimi çapı, D_B	520 mm
Kurşun çekirdek çapı, D_L	75 mm
Toplam kauçuk kalınlığı, T_r	260 mm
Kauçuk tabaka sayısı, n	18
Kauçuk tabaka kalınlığı, t_r	14,4 mm
Çelik plaka kalınlığı, t_{st}	2,0 mm
Kurşunun başlangıç akma gerilmesi, σ_{yL0}	10 MPa
Kauçuğun kayma modülü, G	0,5 MPa
Karakteristik dayanım, Q	44,18 kN
Akma sonrası rijitlik, K_D	399,91 kN/m
Akma sonrası rijitliğin başlangıç rijitliğine oranı, r	0,1
Yalıtım sistemi periyodu, T_D	2,8 s



Şekil 1. (a) Analizlerde kullanılan üç boyutlu bina modeli (b) KÇE yalıtım biriminin şematik en kesit görünüşü
(a) The three-dimensional building model used in the analyses (b) Schematic cross-section view of the LRB)

2.2. Kurşun Çekirdekli Yalıtım Birimlerinin Doğrusal Olmayan Davranış Modeli (Nonlinear Behavior Model of Lead Rubber Bearings)

KÇE yalıtım birimlerinin kuvvet-deformasyon davranışını karakterize etmek için, Park vd. [30] tarafından önerilmiş olan modele dayanan ikili doğrusal bir histeretik model [2] kullanılmıştır. Parametreleri Bölüm 2.1'de tanımlanmış olan model Şekil 2a'da şematik olarak gösterilmiştir. Yalıtım birimlerinin yatay hareketini dikkate alan bu modele göre yalıtım birimlerinde oluşan yeniden merkezleme kuvveti Eş. 6 ile verilmektedir.

$$F_b = K_D U + (\sigma_{YL} A_L) Z \quad (6)$$

Burada, U yalıtım biriminin yerdeğiştirmesi ve σ_{YL} kurşunun efektif akma gerilmesidir. Merkezleme kuvvetinin histeretik bileşenini temsil eden boyutsuz değişken Z , Eş. 7'de verilen diferansiyel denklemle belirlenmektedir.

$$Y \cdot \dot{Z} = \left(A - |Z|^2 B (1 + \text{sgn}(\dot{U} \cdot Z)) \right) \dot{U} \quad (7)$$

Eş. 7'de, sgn işaret fonksiyonunu ve üst nokta zamana göre türevi temsil etmektedir. Boyutsuz büyüklükler A ve B , KÇE yalıtım birimlerinin histeretik kuvvet-yerdeğiştirme döngüsünün boyutunu ve şeklini kontrol eder. A/B oranı 2,0'a eşit olmalıdır [31]. Burada A ve B sırasıyla 1,0 ve 0,5 olarak seçilmiştir.

2.3. Kurşun Çekirdek Isınmasının Modellenmesi (Modeling of Lead Core Heating)

Kalpakidis ve Constantinou [2] KÇE yalıtım birimlerinde, kurşun çekirdeğin ısınmasına bağlı olarak, karakteristik dayanımda ve çevrim başına sönmüllenen enerji miktarında gözlenen azalmayı hesaplayan bir teori geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın hemen ardından yaptıkları deneysel çalışmadan [32] elde ettikleri sonuçları, geliştirdikleri teoriden [2] elde ettikleri nümerik sonuçlarla karşılaştırmış ve teorinin ısınmaya bağlı gerçek davranışı tespit etmede başarılı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu teoriye göre; bir KÇE yalıtım birimi yatay çevrimsel bir harekete maruz kaldığında ısı önce kurşun çekirdekte oluşur ve çelik ara plakalar ile başlık plakalarında yayılır. Kauçukta da az bir miktar ısı oluşsa da, bu ihmal edilir düzeydedir. Teori, temelde kurşun çekirdeğin anlık sıcaklığını tahmin etme ve sıcaklığa bağlı olarak karakteristik dayanımı (Q) belirleme esasına dayanmaktadır. Kalpakidis ve Constantinou [2] tarafından, KÇE yalıtım birimlerinde kurşunun anlık sıcaklığına bağlı olarak akma gerilmesi, σ_{YL} Eş. 8 ile verilmiştir.

$$\frac{\sigma_{YL}}{\sigma_{YL0}} = \exp[-E_2 \times (T_L - T_{L0})] = \exp(-E_2 \times T_L) \quad (8)$$

Eş. 8'de, σ_{YL} ; herhangi bir t anında T_L sıcaklığındaki kurşunun akma gerilmesi, σ_{YL0} ise T_{L0} başlangıç sıcaklığındaki kurşunun akma gerilmesidir. E_2 nihai mukavemet ve sıcaklık eğrileri ile ilgili sabit bir katsayı olup, değeri Kalpakidis ve Constantinou [2] tarafından 0,0069 olarak önerilmiştir. Eş. 8'de tek bilinmeyen anlık sıcaklık artışı değeri T_L 'dir. Yalıtım biriminin maruz kaldığı yer hareketi altında T_L , Eş. 9 ile hesaplanmaktadır.

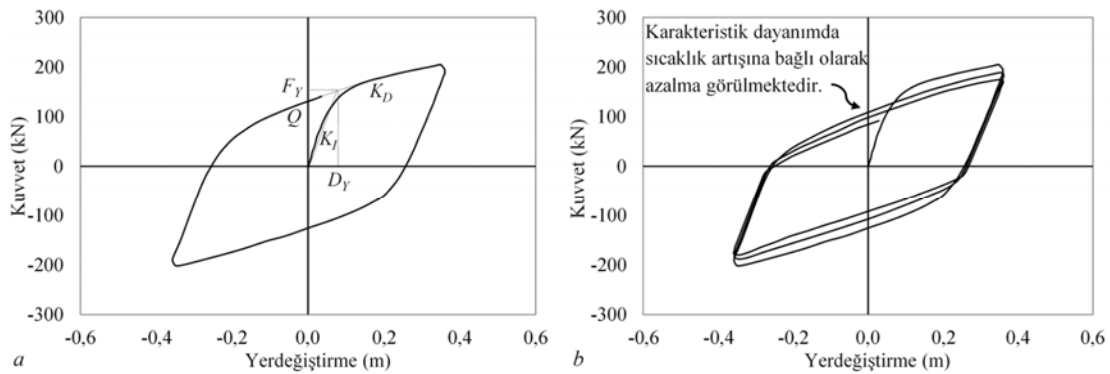
$$\frac{dT_L}{dt} = \frac{\sigma_{YL}(T_L) \times v(t)}{\rho_L c_L h_L} - \frac{k_s \times T_L}{a \times \rho_L c_L h_L} \times \left(\frac{1}{F} + 1.274 \times \left(\frac{t_s}{a} \right) \times (t^+)^{-1/3} \right), \quad (9)$$

$$F = \begin{cases} 2 \times \left(\frac{t^+}{\pi} \right)^{1/2} - \frac{t^+}{\pi} \times \left[2 - \left(\frac{t^+}{4} \right) - \left(\frac{t^+}{4} \right)^2 - \frac{15}{4} \left(\frac{t^+}{4} \right)^3 \right], & t^+ < 0.6 \\ \frac{8}{3\pi} - \frac{1}{2(\pi \times t^+)^{1/2}} \times \left[1 - \frac{1}{3 \times (4t^+)} + \frac{1}{6 \times (4t^+)^2} - \frac{1}{12 \times (4t^+)^3} \right], & t^+ \geq 0.6 \end{cases}$$

Eş. 9, girdisi $v(t) = du/dt$ olan adi bir diferansiyel denklemdir. $u(t)$ ve $v(t)$; sırasıyla yalıtım biriminin yaptığı hareketin yerdeğiştirme ve hız serileri, t ; hareketin başlangıcından itibaren geçen zaman, t^+ ise boyutsuz zamandır. Bu diferansiyel denklem, sıcaklık artışı T_L için bir başlangıç değeri problemi olarak sayısal yöntemlerle çözülebilir. Ardından, Eş. 8 kullanılarak kurşunun efektif akma gerilmesi bulunabilir ve kurşun çekirdeğin alanıyla çarpılarak karakteristik dayanım hesaplanabilir. Eş. 9'da yer alan malzeme özellikleri Kalpakidis ve Constantinou [32] tarafından şu şekilde verilmiştir: kurşunun yoğunluğu $\rho_L = 11200 \text{ kg/m}^3$, kurşunun özgül ısısı $c_L = 130 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$, çeliğin termal iletkenlik (conductivity) katsayısı $k_s = 50 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$, çeliğin termal yayınma (diffusivity) katsayısı $\alpha_s = 1,41 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Diğer parametrelerin açıklaması Şekil 1b'de, KÇE yalıtım birimlerinin azalım gösteren tipik bir kuvvet-yer değiştirme eğrisi ise Şekil 2b'de sunulmuştur [33].

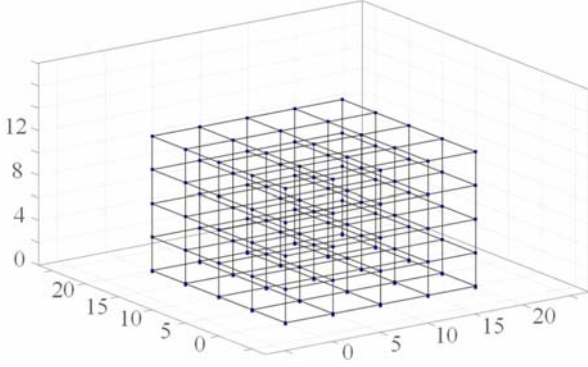
2.4. Dinamik Analizler (Dynamic Analyses)

Çalışmada, kurşun çekirdek ısınmasının etkilerini doğrudan dikkate alabilmesi nedeniyle OpenSees programı [26] kullanılmış ve sonlu elemanlar modeli OpenSees Navigator görsel arayüzü [34] yardımıyla oluşturulmuştur [35] (Şekil 3). OpenSees programı, deprem etkisi altında yapısal ve geoteknik sistemlerin performansının simülasyonu için uygulamalar geliştirmek üzere tasarlanmış açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Program; malzeme modelleri, yapı elemanları ve çözüm



Şekil 2. KÇE yalıtım birimlerinin tipik (a) azalmayan ve (b) azalan kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri.
(Typical (a) non-deteriorating and (b) deteriorating force-displacement curves of LRBs.)

algoritmaları için çok çeşitli seçeneklerle yapıların doğrusal olmayan davranışlarının modellenmesi ve analizi için gelişmiş olanaklar sunmaktadır.



Şekil 3. Binanın OpenSees Navigator [34] programındaki üç boyutlu modeli. (Three-dimensional model of the building in OpenSees Navigator.)

Kolon ve kirişler elastik kiriş-kolon elemanları kullanılarak modellenmiştir. Yalıtım birimleri ve zemin kat kolonları arasında yer alan rijit bir yalıtım katı vasıtasıyla tüm yalıtım birimleri birbirine bağlanmıştır. KÇE yalıtım birimleri, Bölüm 2.2’de aktarılan doğrusal olmayan histeretik model ile Kalpakidis ve Constantinou [2] tarafından önerilen kurşun çekirdek ısınmasına bağlı dayanım kaybını dikkate alan modeli birleştirilebilen LeadRubberX elemanı [36] kullanılarak modellenmiştir. Üstyapının tüm katları ve yalıtım katına rijit diyaframlar atanmıştır. Yapısal analizlerde yer hareketleri sisteme tek yönde etki ettirilmiş olup üstyapı ve yalıtım sistemi için sırasıyla Eş. 10 ve Eş. 11’de verilen hareket denklemleri [37], Newmark yöntemi [38] kullanılarak sayısal olarak çözülmüş, ivme ve yerdeğiştirme tepkileri elde edilmiştir. Tarihi deprem kayıtları ve puls modelleri kullanılarak oluşturulan eşdeğer yer hareketi kayıtlarının etkisinde elde edilen söz konusu tepkilerin zamana bağlı değişimlerinin yanı sıra pik (mutlak en büyük) ve karekök ortalama (RMS) değerleri belirlenerek karşılaştırma yapılmıştır.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{1\}(\ddot{u}_g + \ddot{u}_b) \quad (10)$$

$$m_b \ddot{u}_b + c_b \dot{u}_b + F_b - c_1 \dot{u}_1 - k_1 u_1 = -m_b \ddot{u}_g \quad (11)$$

Eş. 10 ve Eş. 11’de yer alan $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ üstyapının kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. \ddot{u}_g ve \ddot{u}_b sırasıyla yer hareketinin ve yalıtım katının ivmesini, $\{u\}$ üstyapının yer değiştirme vektörünü, m_b yalıtım katının kütlelerini, c_b kauçuktan kaynaklanan viskoz sönümlemeyi ve F_b ise Eş. 6’da verilen, KÇE yalıtım birimlerinin merkezleme kuvvetini göstermektedir. c_1 , k_1 ve u_1 , binanın ilk katının sönümü, rijitliği ve yanal yer değiştirmesidir.

3. Yakın-Fay Depremleri (Near-Fault Earthquakes)

Yakın-fay yer hareketleri olarak kabul edilen, fay kırığına yaklaşık 20 km mesafe içinde gerçekleşen kuvvetli yer hareketleri, hız-zaman geçmişlerinde yüksek genlikli, uzun periyotlu pulsler içermeleri bakımından olağan (yani uzak-fay) yer hareketlerinden farklılık göstermektedir. Yakın-fay yer hareketlerinin bu özellikleri öncelikle Housner ve Trifunac [39] tarafından 1966 Parkfield depreminin Cholame kaydında gözlemlenmiştir [10]. Bertero vd. [40] tarafından yapılan ve 1971 San Fernando-Kaliforniya depreminde Olive View Hastanesi’nin maruz kaldığı hasarı faya yakın yer hareketlerinin esnek yapılar üzerindeki etkisine dayandıran çalışma, deprem mühendislerinin bir depremin neden olduğu yapısal hasarı yakın-fay

yer hareketlerinin puls içeren karakterine bağladıkları ilk çalışmadır. Bununla birlikte, ancak 1994 Northridge-Kaliforniya ve 1995 Kobe-Japonya depremlerinden sonra mühendislerin çoğu, metropollerin çok yakınındaki faylarda meydana gelen depremler neticesinde oluşan yakın-fay yer hareketi pulslarının kentsel altyapıya ve özellikle uzun periyotlu yapılara olan ciddi etkilerini ve yıkıcı potansiyelini tanıması ve yakın-fay etkilerini mühendislik tasarımına dâhil etmek için yöntemler araştırmaya başlamışlardır [41, 42]. Bu tür yakın-fay özelliği gösteren yer hareketlerinin yıkıcı etkileri dünya çapında birçok depremde görülmüş olup; bunlar arasında yer alan 1992 Erzincan, 1999 Kocaeli ve 1999 Düzce depremleri, Kuzey Anadolu Fayının yakın-fay yer hareketleri üretme potansiyelini göstermesi bakımından özellikle ülkemiz için büyük önem taşımaktadır.

Yakın fay depremleri, sıçrama adımı (fling-step) ve doğrultu etkisi (directivity) olarak iki tipe sınıflandırılabilir. Sıçrama adımı, genellikle tek yönlü büyük genlikli bir hız pulsü ve yer değiştirme zaman geçmişinde monotonik bir sıçrama ile karakterize edilir. Doğrultu atımlı (strike-slip) faylarda faya paralel doğrultuda veya eğim atımlı (dip-slip) faylarda faya normal doğrultuda ortaya çıkar [9]. Yakın-fay deprem kayıtlarının özelliklerinden bir diğeri olan doğrultu etkisi ise ileri doğrultu ve geri doğrultu etkisi olmak üzere iki farklı şekilde meydana gelmektedir. İleri doğrultu etkisi, fay kırığıyla aynı yönde ilerleyen gerilme dalgaları nedeniyle ortaya çıkmaktadır [16]. Özellikle fay kırığının zeminin kayma dalgası hızına yakın bir hızda ilerlediği durumlarda oluşan bu etki, depremin neden olduğu sismik enerjinin çoğunun, genellikle kayımdan başında görülen tek bir büyük genlikli puls ile sahaya ulaşmasına neden olur. İleri doğrultu etkisinde görülen puls hareketi, doğrultu atımlı faylar için faya normal yönde ortaya çıkar. Faya yakın bölgelerde her zaman ileri doğrultu etkileri görülmez; fay kırığı alandan uzaklaştığında ortaya çıkan geri doğrultu etkileri de bazen görülebilir ancak bunlar tipik olarak daha az şiddetlidir [43]. Çeşitli araştırmacılar [10, 20] yakın-fay depremlerindeki doğrultu etkisi ve sıçrama adımı pulslarını birbirinden ayırmış ve bu iki puls türünden birini temsil edebilecek sentetik puls modelleri önermişlerdir. Ancak, bu makalede kullanılan puls modelleri yakın-fay deprem kayıtlarındaki sıçrama adımı ve doğrultu etkilerini özel olarak dikkate almak üzere geliştirilmemiş olup bu etkiler bu makale kapsamında ayrıntılı olarak incelenmemiştir. Ayrıca, yakın fay deprem kayıtlarında görülen söz konusu etkilerin hasar potansiyeli tüm yönlerde aynı olmadığından, bir yapının maksimum tepkisini üreten deprem etkiye açısının belirlenmesi de önem arz etmektedir. Yön etkisi (directionality) olarak tanımlanan bu etki daha önce yapılan birçok çalışmada incelenmiştir [11, 44-46]. Bu çalışmalardan biri [11] kurşun çekirdek ısınmasının dikkate alındığı durumlarda ve yakın-fay deprem kayıtları kullanılarak yapılmış olup bu etkinin incelenmesi de çalışmamızın kapsamına dâhil edilmemiştir.

3.1. Sentetik Puls Modelleri (Synthetic Pulse Models)

Günümüze kadar meydana gelen depremlerde kaydedilmiş, büyük genlikli hız pulsü içeren ve tipik yakın-fay deprem kaydı özellikleri taşıyan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının sayısı kapsamlı sayısal çalışmalar yapmak için yetersiz kalabilmektedir. Özellikle, yakın-fay deprem karakteristiklerinin parametrik olarak ele alınacağı çalışmalarda belirli deprem büyüklükleri ve fay mesafeleri açısından sınıflandırmak için çok sayıda yakın-fay deprem kaydına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, çeşitli araştırmacılar tarafından tarihi yakın-fay yer hareketlerinin özelliklerini simüle edecek ve kapsamlı çalışmalarda tarihi deprem kayıtlarını temsilen kullanılacak analitik puls modelleri önerilmiştir [17-20].

Bu araştırma çalışmasında, yukarıda örnekleri verilen puls modellerinden, literatürde sıklıkla kullanılan ve üretilmesi görece pratik olan He ve Agrawal [19], Makris Tip-A ve Makris Tip-B [16]

puls modelleri ele alınmıştır. Makris [16], ileri yönlü hız pulslarını temsil eden Tip-A ve ileri-geri yönlü hız pulslarını temsil eden Tip-B puls modelleri önermiştir. Kapalı formda trigonometrik fonksiyonlarla oluşturulan bu puls modellerinden Tip-A yarım çevrimden, Tip-B ise tam çevrimden oluşmaktadır (Şekil 5). Agrawal ve He [13] tarafından yapılan çalışmada, yakın-fay yer hareketlerinde görülen uzun periyotlu hız pulslarının modellenmesi için, sönümlenen sinüzoidler kullanılarak kapalı formulu bir yaklaşım önerilmiştir. Bu puls modelinin, yakın-fay yer hareketlerinin sismik yalıtım sistemlerinin tepkileri üzerindeki etkilerini temsil etme kabiliyeti daha önce değerlendirilmiş ve tarihi yakın-fay yer hareketlerini temsilen kullanılabileceği belirlenmiştir [19, 23, 24, 47].

He ve Agrawal [19], daha önceki çalışmalarında (Agrawal ve He, [13]) önerdikleri puls modelini geliştirerek esasen genlik modülayonlu bir sinüzoid olan bir puls modeli önermişler ve tarihi yakın-fay deprem kayıtları ile önerdikleri puls modelini kullanarak yaptıkları analizlerin neticesine dayanarak, önerilen puls modelinin puls benzeri davranışa sahip kaydedilmiş yer hareketlerinin yerine kullanılabileceğini savunmuşlardır. Kaydedilen yer hareketlerini modellemek için pulse periyodu, sönüm faktörü ve puls modeli zarf eğrisinin şekil parametrelerini kullanan He ve Agrawal [19] puls modeli parametrik çalışmalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

3.2. Çalışmada Kullanılan Tarihi Yakın-fay Deprem Kayıtları ve Eşlenik Puls Modelleri (Historical Near-fault Earthquake Records and Their Approximate Counterpart Pulse Models Used in the Study)

Bu çalışmanın odak noktası kurşun çekirdek ısınmasının etkin olduğu durumlarda, yakın-fay puls modellerinin sismik yalıtımlı binaların davranışının belirlenmesindeki etkinliğinin incelenmesi olduğundan, özellikle kurşun çekirdek ısınmasını tetikleyecek nitelikteki uzun periyotlu ve büyük genlikli hız pulsunu içeren ve daha önce yapılan bir çalışmada da [33] kurşun çekirdek ısınmasını tetiklediği belirlenmiş olan dört adet tarihsel yakın-fay deprem kaydı kullanılmıştır. Bu doğrultuda, herhangi bir ölçeklendirme yapılmamış ve deprem karakteristikleri değiştirilmeden orijinal kayıtlar kullanılmıştır. Söz konusu kayıtların yüksek sıcaklık artışına (40 ile 155°C) ve yalıtım

birimlerinde karakteristik dayanım azalmasına (%23 ile %55) yol açtığı Bölüm 4'de sunulan analizlerle de ortaya koyulmuştur. He ve Agrawal [19] tarafından, önerdikleri puls modelinin yer hareketi kayıtlarıyla olan uyumunu incelemek için de kullanılmış olan bu kayıtların ivme-zaman verileri, PEER Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı [48] ve COSMOS Sanal Veri Merkezi'nden [49] elde edilmiştir. Seçilen kayıtların, istasyon, kayıt, moment magnitud (M_w), pik yer ivmesi (PGA), pik yer hızı (PGV) ve fay kırılma düzlemine en yakın mesafe (R_{rup}) bilgileri Tablo 2'de, %10 sönümlü ivme ve yerdeğiştirme spektrumları ise Şekil 4'de sunulmuştur.

Bölüm 3.1'de belirtildiği gibi, çeşitli araştırmacılar tarafından puls içeren yakın-fay yer hareketlerini simüle etmek için çeşitli sentetik puls modelleri önerilmiştir. Bu puls modelleri arasında yer alan He ve Agrawal [19], Makris Tip-A ve Makris Tip-B [16] puls modelleri basit fakat etkin analitik yapıları sayesinde geniş bir kullanım alanına sahip olmaları nedeniyle bu çalışmada tarihi yakın-fay deprem kayıtlarına eşdeğer sentetik puls modelleri oluşturmak için kullanılmıştır. He ve Agrawal [19], yakın-fay yer hareketlerinde uzun periyotlu hız pulslarının modellenmesi için sönümlenen sinüzoidleri kullanarak kapalı formulu bir yaklaşım önermişlerdir. Bu puls modeli için üretilen hız fonksiyonu Eş. 12'de, hız fonksiyonunun türevinin alınmasıyla elde edilen ivme fonksiyonu Eş. 13'de, integralinin alınmasıyla elde edilen yerdeğiştirme fonksiyonu da Eş. 14'de verilmiştir.

$$\dot{u}_p(t) = Ct^n e^{-at} \sin(\omega_p t + v), \quad t \geq t_0 \quad (12)$$

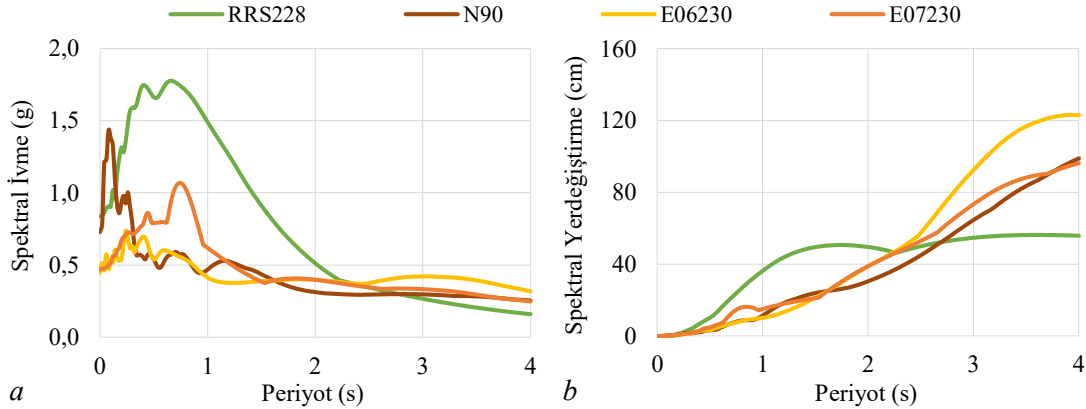
$$\ddot{u}_p(t) = Ct^n e^{-at} \left[\left(\frac{n}{t} - a \right) \sin(\omega_p t + v) + \omega_p \cos(\omega_p t + v) \right], \quad t \geq t_0 \quad (13)$$

$$u_p(t) = C e^{-at} \sum_{r=0}^n \frac{(-1)^r n! t^{n-r}}{\rho^{r+1} (n-r)!} \sin[\omega_p t + v - (r+1)\alpha] + C \frac{(-1)^n n!}{\rho^{n+1}} \sin[(n+1)\alpha - v] \quad (14)$$

Tablo 2. Tarihi deprem kayıtları ve özellikleri (Historical earthquake records and their properties)

Deprem	İstasyon	Kayıt	M_w	PGA (g)	PGV (cm/s)	R_{rup} (km)
1994 Northridge	Rinaldi Receiving Station	RRS228	6,7	0,84	166,04	6,5
1992 Landers	Lucerne Valley Station	N90*	7,3	0,73	145,12	2,0
1979 Imperial Valley	El Centro Array #6	E06230	6,5	0,45	113,55	1,4
1979 Imperial Valley	El Centro Array #7	E07230	6,5	0,47	113,14	0,6

*İlgili kayıt COSMOS veri tabanında N90, PEER veri tabanının farklı versiyonlarında LCN260 veya LCN275 isimleriyle yer almaktadır.



Şekil 4. Yer hareketi kayıtlarının %10 sönümlü (a) ivme, (b) yerdeğiştirme spektrumları (10% damped (a) acceleration, (b) displacement spectra of ground motion records)

Eş. 12-Eş. 14'de yer alan, C genlik ölçeklendirme faktörü, n puls modelinin zarf eğrisi şekil parametresi, a sönüm faktörü, V sinüzoidal bileşenin faz açısı, t_0 puls hareketinin başladığı zaman ve T_p puls periyodu olmak üzere $\omega_p=2\pi/T_p$ pulsun açısal frekansdır. Kullanılan bir diğer puls modeli Makris [16] tarafından geliştirilen Tip-A olarak tanımlanan yarım çevrime sahip, ileri yönlü puls modelidir. Bu puls modelinin ivme, hız ve yerdeğiştirme fonksiyonları sırasıyla Eş. 15-Eş. 17'de gösterilmiştir.

$$\ddot{u}_g(t) = \omega_p \frac{V_p}{2} \sin(\omega_p t), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (15)$$

$$\dot{u}_g(t) = \frac{V_p}{2} - \frac{V_p}{2} \cos(\omega_p t), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (16)$$

$$u_g(t) = \frac{V_p}{2} t - \frac{V_p}{2\omega_p} \sin(\omega_p t), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (17)$$

Yine Makris [16] tarafından geliştirilen ve tam çevrime sahip ileri-yönlü puls modeli Tip-B'nin ivme, hız ve yerdeğiştirme fonksiyonları sırasıyla Eş. 18-Eş. 20'de gösterilmiştir.

$$\ddot{u}_g(t) = \omega_p V_p \sin(\omega_p t + \frac{\pi}{2}), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (18)$$

$$\dot{u}_g(t) = -V_p \cos(\omega_p t + \frac{\pi}{2}), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (19)$$

$$u_g(t) = \frac{V_p}{\omega_p} - \frac{V_p}{\omega_p} \sin(\omega_p t + \frac{\pi}{2}), \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (20)$$

Eş. 15-Eş. 20'de yer alan, V_p hız pulsunun genliğini, $T_p=2\pi/\omega_p$ puls periyodunu, ω_p ise pulsun açısal frekansını göstermektedir.

RRS228, N90, E06230 ve E07230 kayıtlarının hız-zaman grafikleri, sırasıyla He ve Agrawal, Makris Tip-A ve Tip-B puls modelleri ile üretilen sentetik muadilleri ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi, ele alınan deprem kayıtlarının pik yer hızları (PGV) sırasıyla 166,10, 145,45, 113,55 ve 113,14 cm/s'dir. He ve Agrawal [19] tarafından RRS228, N90, E06230 ve E07230 kayıtları için üretilen sentetik pulsuların parametreleri Tablo 3'de, bu parametreler ile birlikte He ve Agrawal puls modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer sentetik yer hareketi kayıtları ise Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi, eşlenik yer hareketi kayıtları, tarihi deprem kayıtlarının ana puls civarındaki genel trendini başarılı şekilde yakalamakta ancak ana puls dışında bazı tutarsızlıklar görülmektedir.

RRS228 kaydının Makris Tip-A ve Tip-B puls modelleri ile üretilen eşlenik kayıtları için gerekli puls genliği V_p değerleri sırasıyla 1,75 m/s ve 1,3 m/s, puls periyodu T_p değerleri ise sırasıyla 0,8 s ve 1,3 s olarak verilmiştir [50]. Kullanılan diğer tarihi deprem kaydı olan N90 kaydının Makris Tip-A ve Tip-B puls modelleri ile üretilen eşlenik kayıtları için gerekli parametreler Makris [16] tarafından; V_p için her iki puls modelinde de 1,153 m/s, T_p için ise Tip-A ve Tip-B puls modellerinde sırasıyla 3,1 s ve 4,87 s olarak verilmiştir. Bu çalışmada E06230 ve E07230 kayıtlarının Makris Tip-A ve Tip-B puls modelleri ile üretilen sentetik muadilleri için kullanılan parametreler de Tablo 3'de gösterilmiştir. Yakın-fay depremlerinin puls periyotları ile yalıtım sistemi periyotlarının çakışması veya birbirlerine yakın olmaları durumunda büyük yapısal tepkiler ortaya çıkabilmektedir. Bu durum çeşitli araştırmacılar tarafından daha önce incelenmiş olup

[51-53] çalışmamızda özel olarak incelenmemekle birlikte ele alınan yapının yalıtım sistemi periyodunun kullanılan kayıtlardaki puls periyodu aralığında olmasına özen gösterilmiştir. Farklı depremleri temsilen oluşturulan puls modellerindeki puls periyotları 0,80 s ile 4,87 s arasında değişmekte olup (Bkz. Tablo 3) ele alınan yapının yalıtım sistemi periyodu 2,80 saniyedir. Böylece yalıtım sistemi periyodundan daha az, yakın ve daha yüksek olan puls periyoduna sahip yer hareketi kayıtları çalışmada kullanılmıştır.

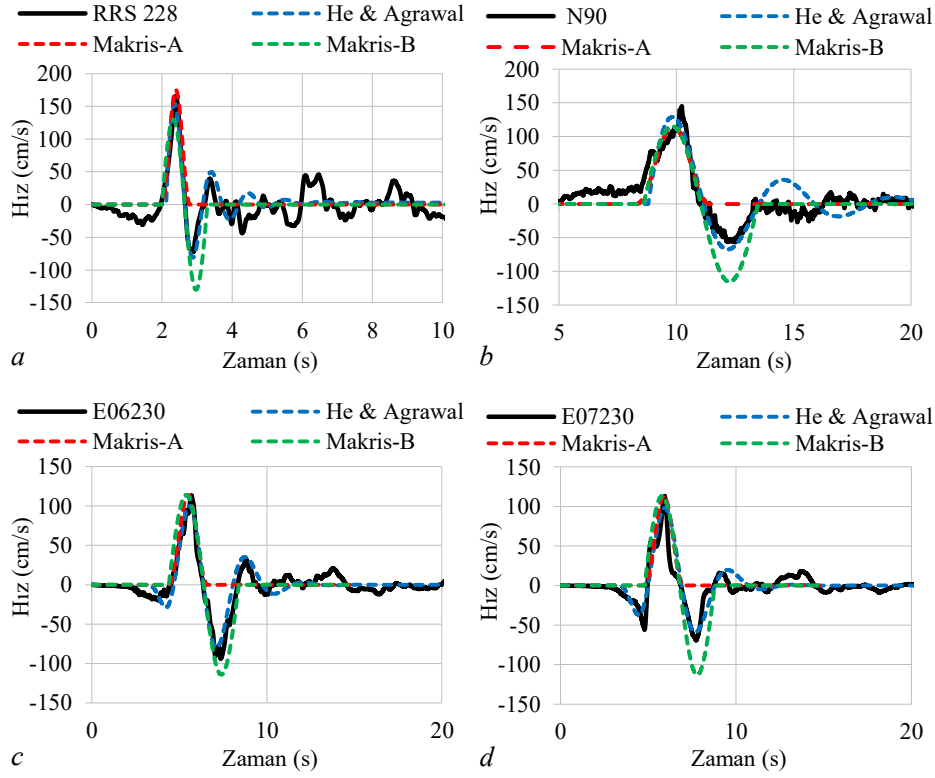
Tablo 3. Eşdeğer sentetik yer hareketi kayıtları için kullanılan puls modeli parametreleri (Pulse model parameters used for counterpart synthetic ground motion records)

	RRS228	N90	E06230	E07230
T_p (s)	1,05	4,55	3,38	3,81
C	-3200	25,75	-80,40	-85,20
Agrawal ve He				
n	2,80	4,20	3,50	3,40
a	3,50	1,10	1,20	1,20
t_0 (s)	1,60	7,80	3,00	3,10
Makris Tip-A				
T_p (s)	0,80	3,10	2,20	2,20
V_p (m/s)	1,75	1,153	1,14	1,13
Makris Tip-B				
T_p (s)	1,30	4,87	4,00	4,00
V_p (m/s)	1,30	1,153	1,14	1,13

Tablo 3'de verilen parametreler ile birlikte Tip-A ve Tip-B puls modelleri kullanılarak elde edilen eşdeğer sentetik yer hareketi kayıtları da yine Şekil 5'de, tarihi deprem kayıtları ile karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Bu grafiklere göre, ana puls dışında görülen tutarsızlıkların yanı sıra Tip-A puls modeli yarım döngüden oluşan yapısı nedeniyle, ana pulsun ikinci kısmında hareketi yakalayamadığı; Tip-B puls modelinin ise tam çevrime sahip olmasına rağmen, ana pulsun ilk ve ikinci kısımlarının genliklerinin eşit olduğu ve ikinci kısımda orijinal kayıtlardan daha büyük hız değeri ürettiği görülmektedir. Bu puls modellerinin *yer hareketini* temsil etmedeki başarısı, puls modellerini öneren araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiştir. He ve Agrawal [19], önerdikleri puls modeli için gerekli puls parametrelerini elde ettikleri birçok yakın fay deprem kaydı ile eşdeğer pulsuların korelasyonunu incelemiş ve bu puls modelinin kaydedilmiş yer hareketlerini makul ölçüde iyi bir şekilde simüle edebildiğini ortaya koymuşlardır. Makris ve Chang [17], yaptıkları çalışmada tarihsel yakın fay deprem kayıtları ve Makris puls modelleri [16] kullanılarak oluşturulan eşdeğer yer hareketi kayıtları ile elde edilen yapısal tepkileri karşılaştırmışlardır. Periyodu 2 saniyenin altında olan yani görece düşük yalıtım periyoduna sahip yapıların tepkilerinin yakın fay kayıtlarındaki yüksek frekanslı içerikten daha çok etkilendiklerini ancak yalıtım periyodu görece uzun olan sistemlerde eşdeğer Makris pulsuları ile elde edilen yapısal tepkilerin tarihi kayıtlarla elde edilen tepkilere benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Her ne kadar söz konusu çalışmalarda bu puls modellerinin yer hareketini temsil etmedeki başarısı ortaya koyulmuş olsa da söz konusu puls modellerinin *sismik yalıtımlı binaların kurşun çekirdek ısınmasına bağlı davranışlarının* belirlenmesindeki etkinliği incelenmemiştir. Bu çalışmada bu hususun incelenmesi amaçlanmıştır.

4. Analiz Sonuçları (Analysis Results)

Bölüm 2.1'de tarif edilen sismik taban yalıtımlı betonarme bina, KÇE yalıtım birimlerinin sıcaklığa bağlı davranışları göz önünde bulundurularak OpenSees [26] programında modellenmiş ve dört adet tarihsel yakın-fay deprem kaydı ve bunların He ve Agrawal [19], Makris Tip-A ve Makris Tip-B [16] puls modelleri ile üretilen eşlenik sentetik yer hareketi kayıtları etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu puls modelleri depremin yatay bileşenlerini temsil etmek üzere üretilmiş modeller olup yakın fay depremlerinin düşey bileşenleri için bu tür sentetik



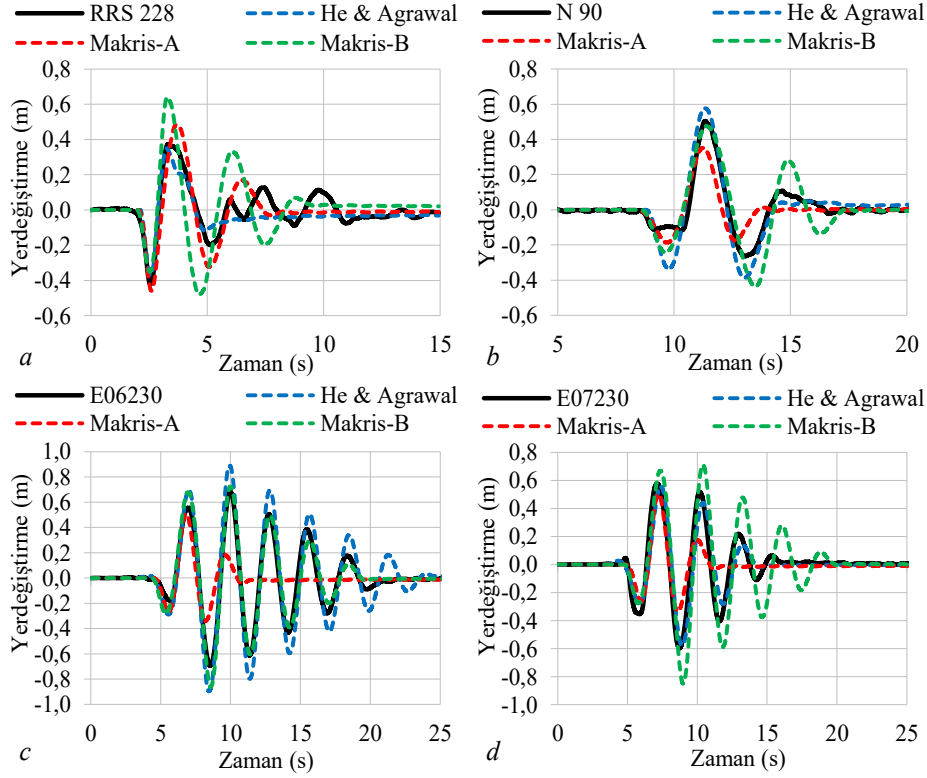
Şekil 5. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarının hız-zaman grafikleri a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı (Velocity-time histories of historical earthquake records and their synthetic counterparts)

modeller kullanılmamaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında depremin düşey hareketi dikkate alınmamıştır. Bu sentetik puls modellerinin, KÇE yalıtım birimlerinde kurşun çekirdek ısınması göz önüne alındığında, taban yalıtımlı binaların yakın-fay yer hareketi kayıtları altındaki sismik tepkisini değerlendirebilme yeteneğini araştırmak için yalıtım sistemi yerdeğiştirmeleri, en üst kat ivmeleri, sıcaklık artışları ve karakteristik dayanımın zamanla değişiminin yanı sıra, tüm kat ivmeleri ve yalıtım sistemi yerdeğiştirmesi sonuçlarının pik ve karekök ortalama değerleri ile yalıtım birimi kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 6'da sunulan yalıtım sistemi yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimini gösteren grafiklerde görüldüğü gibi, sentetik puls modelleri, genel sismik davranışı ana puls civarında daha iyi yakalarken, ana puls dışında uyumsuzluklar bulunmaktadır. RRS228 kaydı için, özellikle beşinci saniyeden sonra, N90 kaydı için, ana pulsun başladığı onuncu saniye civarında ve ana pulsun bittiği on üçüncü saniyeden sonra tarihi deprem kaydı ve puls modelleriyle elde edilen sonuçlar arasında uyumsuzluklar gözlenmiştir. E06230 ve E07230 kayıtlarında ise ana pulsun bittiği 6 ile 8. saniyeden sonra uyumsuzluklar dikkati çekmektedir. Ana puls civarında ise He ve Agrawal puls modeliyle elde edilen sonuçların, orijinal deprem kayıtlarıyla elde edilen sonuçlara, Makris Tip-A ve Tip-B puls modellerine göre daha yakın olduğu görülmektedir. Özellikle Makris Tip-B puls modeli ile RRS228 kaydında üçüncü saniyeden, N90 kaydında on üçüncü saniyeden, E07230 kaydında ise sekizinci saniyeden sonra yalıtım sistemi yerdeğiştirmelerinin olması gerekenden büyük elde edildiği anlaşılmaktadır. Makris Tip-A puls modelinin ise özellikle E06230 ve E07230 kayıtlarında ana pulsun ikinci kısımdan itibaren oldukça düşük yerdeğiştirmeler elde edilmesine neden olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar Şekil 5'de gösterilen yer hareketlerinin hız-zaman grafikleriyle de uyumludur. Bu grafiklere göre, her üç modelin hız zaman serisi ile orijinal deprem

kayıtlarının hız zaman serisi arasında ana puls dışında farklılıklar olduğu, ana puls civarında ise He ve Agrawal [19] puls modelinin daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır. Makris [16] tarafından önerilen puls modellerinden Tip-A puls modelinin yarım döngüden oluştuğu ve bu nedenle dört deprem kaydında da ana pulsun ikinci kısmında orijinal kayıtla puls modeli arasındaki farkın büyük olduğu görülmektedir. Tip-A puls modelinin aksine, tam çevrime sahip olan Tip-B puls modeli ise ana pulsun ikinci kısmında orijinal kayıtlardan daha büyük hız değeri üretmektedir.

Şekil 7'de, RRS228, N90, E06230 ve E07230 kayıtları ve bunların eşleniği puls modelleriyle elde edilen yalıtım birimi yerdeğiştirmelerinin pik ve karekök ortalama değerleri gösterilmiştir. Yapısal tepkilerin karekök ortalama değerleri, belirli bir noktada değil tüm zaman serisi boyunca eşleşmenin başarısını gösterdiği için burada karekök ortalama değerler de karşılaştırılmıştır. Yalıtım sistemi yerdeğiştirmelerinin pik değerleri açısından incelendiğinde (Şekil 7a), RRS228 kaydı ile elde edilen pik yerdeğiştirmenin 0,42 m olduğu, bu sonuçla eşdeğer yer hareketlerinin sonuçları arasındaki mutlak farkların ise He ve Agrawal, Makris Tip-A ve Makris Tip-B puls modelleri için sırasıyla %11, %15 ve %52 olduğu belirlenmiştir. N90 kaydında pik yalıtım sistemi yerdeğiştirmesinin 0,50 m olduğu ve mutlak farkların He ve Agrawal, Makris Tip-A ve Makris Tip-B puls modelleri için sırasıyla %14, %30 ve %6 olduğu görülmektedir. E06230 kaydı kullanılarak 0,69 m olarak elde edilen pik yalıtım sistemi yerdeğiştirmesi ile eşdeğer puls modelleri sonuçları arasındaki mutlak farklar sırasıyla, %30, %26 ve %24'dür. E07230 kaydında ise pik yerdeğiştirmenin 0,60 m olduğu ve He ve Agrawal, Makris Tip-A ve Makris Tip-B puls modelleri için mutlak farkların sırasıyla %3, %16 ve %42 olarak elde edildiği görülmektedir. Daha önce de değinildiği gibi burada kullanılan tarihi yakın-fay deprem kayıtlarının kurşun çekirdek ısınmasını tetikleyecek kayıtlar olması amaçlanmış ve bu bağlamda deprem kayıtları tasarım spektrumuna göre



Şekil 6. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen yalıtım birimi yerdeğiştirmesinin zamana bağlı değişimi
a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı
(Bearing displacement time histories obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts.)

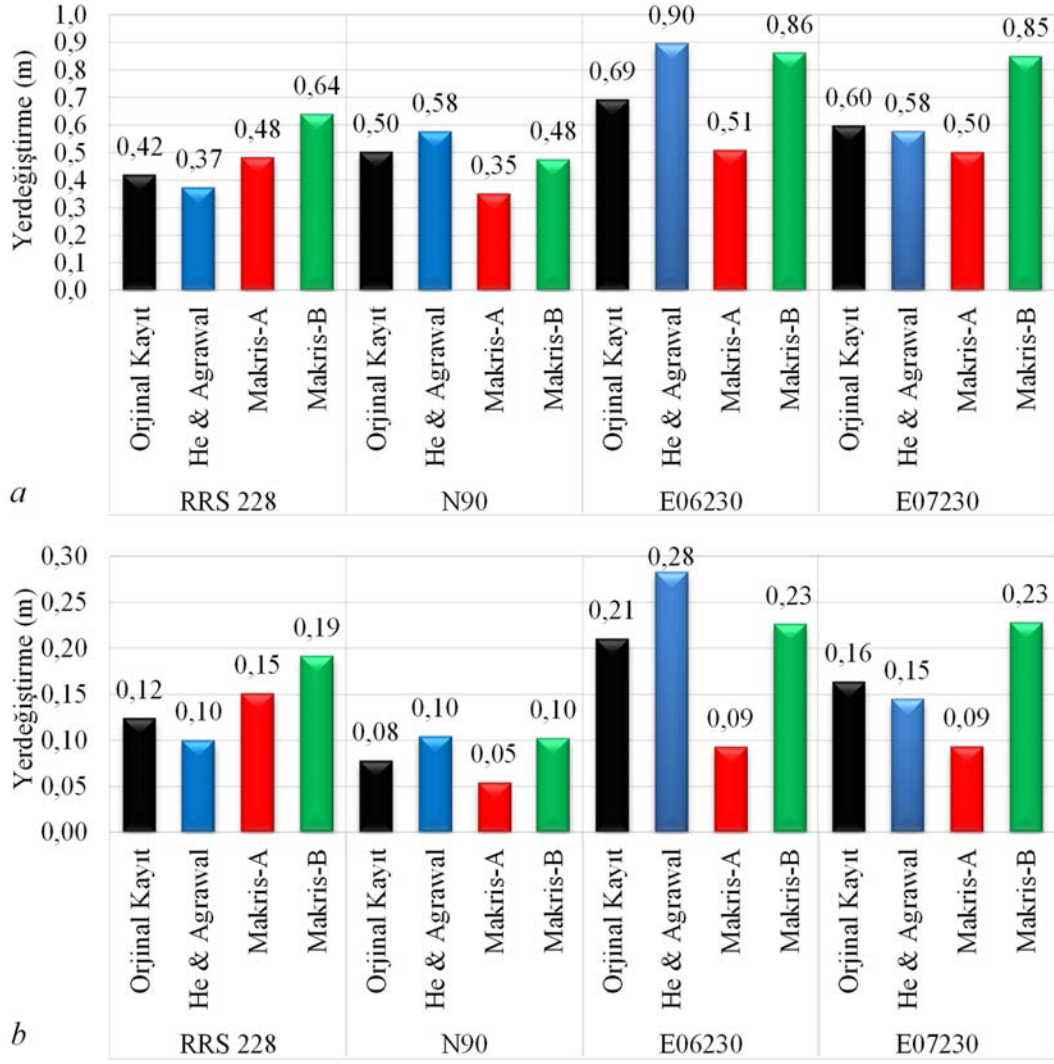
ölçeklenmemiştir. RRS228, N90, E06230 ve E07230 kayıtları ile elde edilen pik yerdeğiştirmelerin sırasıyla 0,42 m, 0,50m, 0,69 m ve 0,60 m olduğu ve 0,39 m olarak elde edilmiş olan tasarım yerdeğiştirmesine [29] yakın ve bundan büyük değerlerin elde edildiği görülmüştür. Şekil 7b'de gösterilen karekök ortalama değerlere göre ise, söz konusu farklar RRS228 kaydı için sırasıyla %19, %22 ve %54; N90 kaydı için %34, %30 ve %32; E06230 kaydı için %35, %56 ve %8 ve E07230 kaydı için ise %11, %43 ve %43'tür. Bu sonuçlar birlikte incelendiğinde; Makris Tip-B puls modeli ve orijinal kayıtlar ile elde edilen yer değiştirmeler arasındaki farkların diğer iki puls modeline göre daha fazla olduğu görülmektedir. Özellikle RRS228 ve E07230 kayıtlarında bu farkların daha belirgin olduğu, pik ve karekök ortalama değerlerin her ikisinde de %40'ı aştığı anlaşılmaktadır. He ve Agrawal puls modeli ile Makris Tip-A puls modeli sonuçlarının orijinal kayıtlarla elde edilen sonuçlarla olan mutlak farkları birbirine nispeten daha yakın olmakla birlikte, He ve Agrawal puls modelinin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Şekil 8'de gösterilen tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen en üst kat ivmesinin zamana bağlı değişimlerine göre, yalıtım sistemi yerdeğiştirmelerine benzer şekilde, sentetik puls modelleri, her iki deprem kaydı için de genel davranışı ana puls civarında nispeten daha iyi yakalamakta iken, ana puls dışında uyumsuzluklar görülmektedir.

Şekil 9'da ise tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen pik kat ivmelerinin bina yüksekliği boyunca değişimleri gösterilmiştir. Burada 0 ile tanımlanan kat seviyesi yalıtım katını göstermektedir. Bu grafiklere göre, Makris Tip-A puls modelinin N90 ve E06230 kayıtları için belirgin derecede düşük kat ivmesi sonuçları verdiği görülmektedir. N90 kaydı etkisinde, farkın en büyük olduğu yalıtım katında elde edilen pik kat ivmesi 3,81 m/s²

iken Makris Tip-A puls modeli etkisinde elde edilen pik kat ivmesi 2,43 m/s²'dir ve aradaki fark yaklaşık %36'dır (Şekil 9b). E06230 kaydı etkisinde ise, farkın en büyük olduğu 2. katta elde edilen pik kat ivmesi 3,91 m/s² iken Makris Tip-A puls modeli etkisinde elde edilen pik kat ivmesi 3,04 m/s²'dir ve aradaki fark yaklaşık %22'dir (Şekil 9c). Makris Tip-B puls modelinin ise RRS228 ve E07230 kayıtlarına göre belirgin şekilde büyük sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. RRS228 kaydı etkisinde farkın en büyük olduğu 2. katta elde edilen pik kat ivmesi 2,67 m/s² iken, Makris Tip-B puls modeli etkisinde aynı katta pik kat ivmesi yaklaşık %40 farkla 3,75 m/s² olarak elde edilmektedir (Şekil 9a). E07230 kaydı etkisinde ise farkın en büyük olduğu 2. katta elde edilen pik kat ivmesi 3,41 m/s² iken, Makris Tip-B puls modeli etkisinde aynı katta pik kat ivmesi yaklaşık %37 farkla 4,68 m/s² olarak elde edilmektedir (Şekil 9d). Dört deprem kaydının üçünde (RRS228, N90 ve E07230), He ve Agrawal puls modeli ile elde edilen pik kat ivmelerinin orijinal kayıtlarla elde edilen sonuçlara çok daha yakın olduğu, E06230 kaydında ise farkın nispeten fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da gösterilen kat ivmelerinin karekök ortalama değerlerine göre, Makris Tip-B modelinin her dört deprem kaydı için de orijinal kayıtlara göre daha büyük sonuç verdiği, RRS228 kaydında (Şekil 10a) ise farkın daha belirgin olduğu ve yaklaşık %36 ya kadar çıktığı anlaşılmaktadır. Makris Tip-A puls modeli, dört deprem kaydının üçüne göre (N90, E06230 ve E07230) daha düşük kat ivmesi sonuçları vermesine rağmen (Şekil 10b, Şekil 10c ve Şekil 10d), RRS228 kaydında orijinal kayıt sonuçlarına en yakın sonuç veren puls modeli olmuştur (Şekil 10a). He ve Agrawal puls modeli ise kat ivmelerinin karekök ortalama değerleri açısından, N90 ve E07230 kayıtları etkisinde elde edilen sonuçlara (Şekil 10b ve Şekil 10d), diğer puls modellerine göre daha yakın sonuç vermektedir. Yapısal tepkilerde elde edilen bu sonuçların kurşun çekirdek ısınmasıyla olan ilişkisini

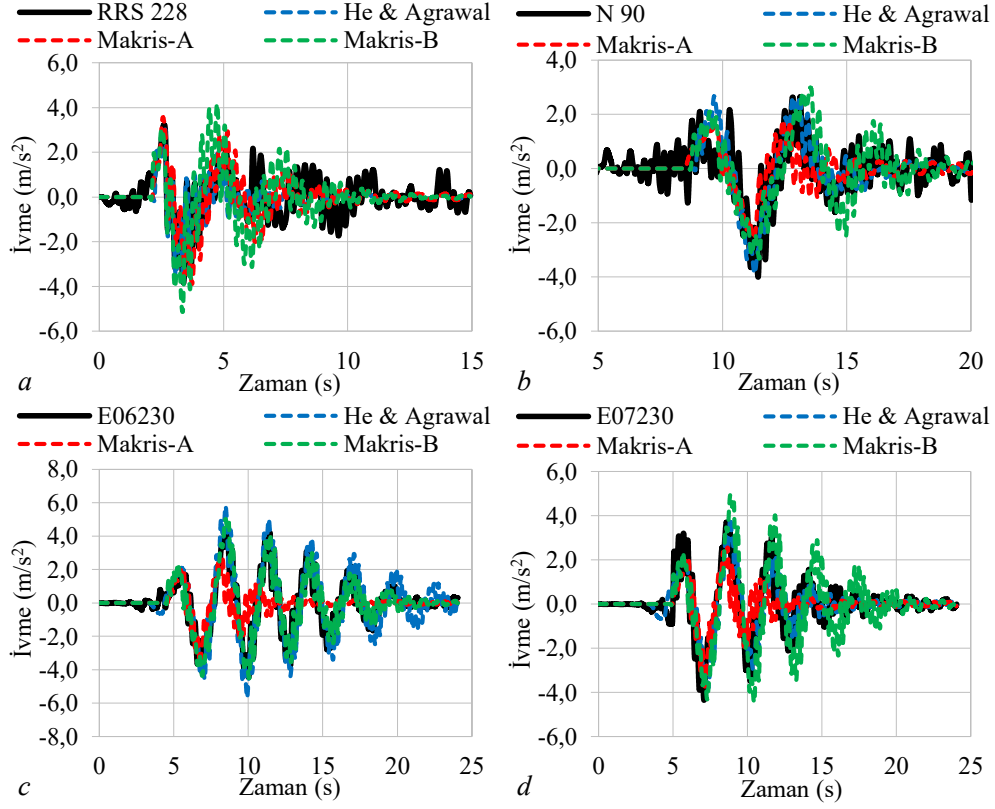


Şekil 7. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen yalıtım birimi yerdeğiştirmelerinin (a) pik, (b) karekök ortalama değerleri

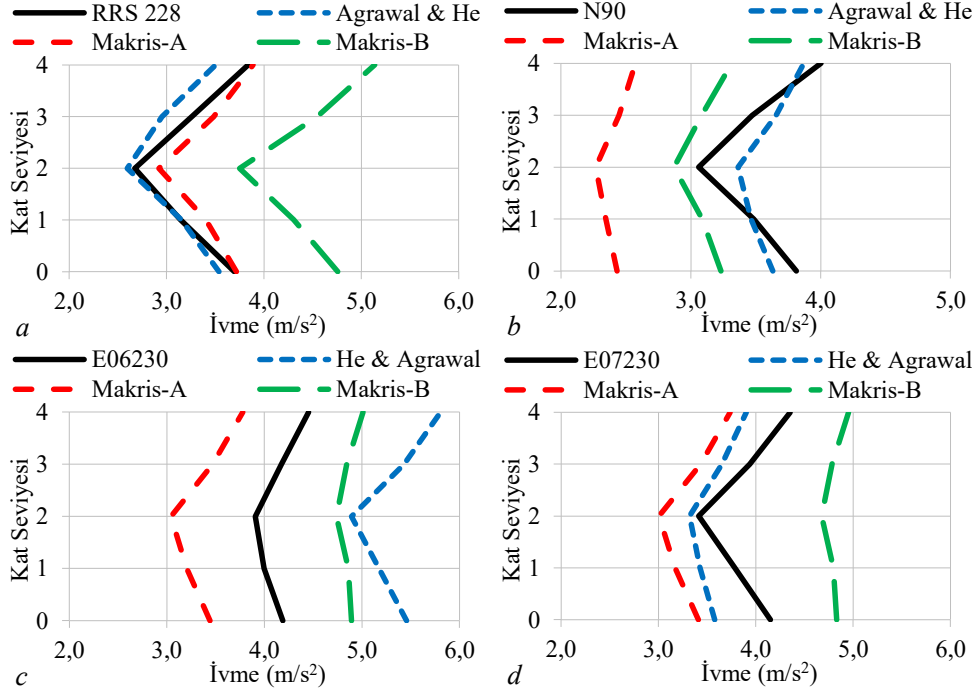
(a) peak (b) root mean square values of bearing displacements obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)

incelemek için orijinal kayıtlar ve eşdeğer yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen sıcaklık artışları ve karakteristik dayanımların zamanla değişimleri sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de, yalıtım birimlerinin kuvvet-yerdeğiştirme çevrimsel grafikleri ise Şekil 13'de gösterilmiştir. Şekil 11'e göre, RRS228, N90 ve E07230 kayıtları için, Makris Tip-B puls modeli ile elde edilen en büyük sıcaklık artışlarının orijinal kayıtların oldukça üstünde olduğu; orijinal kayıtlarla elde edilen sonuçlara göre farkın RRS228 kaydında %34 (Şekil 11a), N90 kaydında %42 (Şekil 11b) ve E07230 kaydında ise %35 (Şekil 11d) olduğu anlaşılmaktadır. Karakteristik dayanımdaki azalmanın kurşun çekirdekdeki sıcaklık artışına bağlı olması nedeniyle, karakteristik dayanımda en büyük düşüşler de yine bu deprem kayıtlarında (RRS228, N90 ve E07230) Makris Tip-B puls modeli ile elde edilmektedir (Şekil 12a, Şekil 12b ve Şekil 12d). Bu kayıtların aksine, E06230 kaydında ise, orijinal kayıtlarla elde edilen sıcaklık artışı ve buna bağlı olarak karakteristik dayanım azalmasına en yakın sonuç veren puls modelinin Makris Tip-B olduğu görülmektedir (Şekil 11c ve Şekil 12c). Öte yandan, Makris Tip-A puls modelinin RRS228 kaydında (Şekil 11a ve Şekil 12a), He ve Agrawal puls modelinin ise E07230 kaydında (Şekil 11d ve Şekil 12d) oldukça başarılı sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık artışlarında elde edilen bu

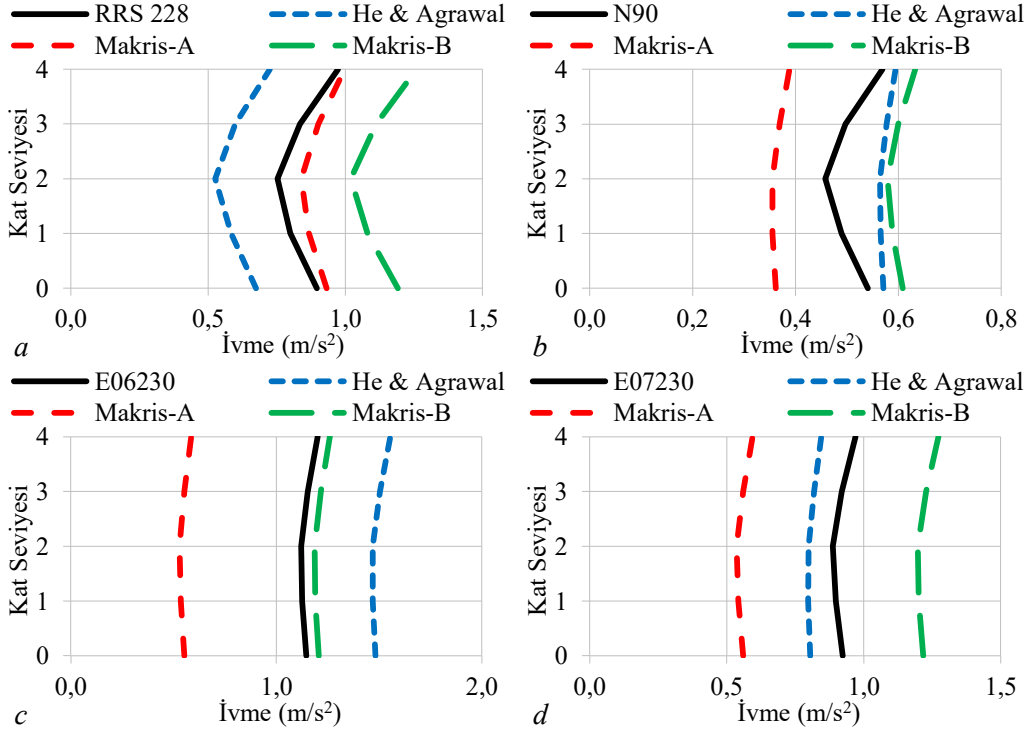
sonuçların ivme ve yerdeğiştirme tepkileriyle, özellikle de bu tepkilerin karekök ortalama değerleriyle uyumlu olduğu gözlenmekte ve puls modellerinin orijinal kayıtlarla elde edilen sonuçları yakalamadaki başarısının deprem kaydı bazında değiştiği anlaşılmaktadır. Her ne kadar bu çalışmanın asıl amacı kurşun çekirdek ısınmasının doğrudan dikkate alındığı durumlarda, ele alınan puls modellerinin sismik yalıtımlı binaların davranışının belirlenmesindeki etkinliğinin ısınmanın ihmal edildiği durumlarda karşılaştırılabilir olarak incelenmesi değilse de, okuyucuya fikir vermesi amacıyla orijinal kayıt ve eşdeğer puls modelleri ile elde edilen taban deplasmanı ile kat ivmelerinin ortalaması (tüm katlarda elde edilen ivmelerin ortalaması) arasındaki fark yüzdeleri ısınmalı ve ısınmasız durumlar için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tüm zaman serisi boyunca eşleşmenin başarısını gösterdiği için karekök ortalama (RMS) değerler açısından yapılan bu karşılaştırmalar Tablo 4' de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, çok büyük bir oranda, kurşun çekirdek ısınmasının doğrudan dikkate alındığı durumlarda fark yüzdelерinin daha büyük olduğu görülmüştür. Kurşun çekirdek ısınmasının ihmal edilmesi durumunda, orijinal kayıt ve eşdeğer puls modelleri ile elde edilen tepkiler arasındaki fark yüzdeleri olması gerekenden daha düşük elde edilmektedir.



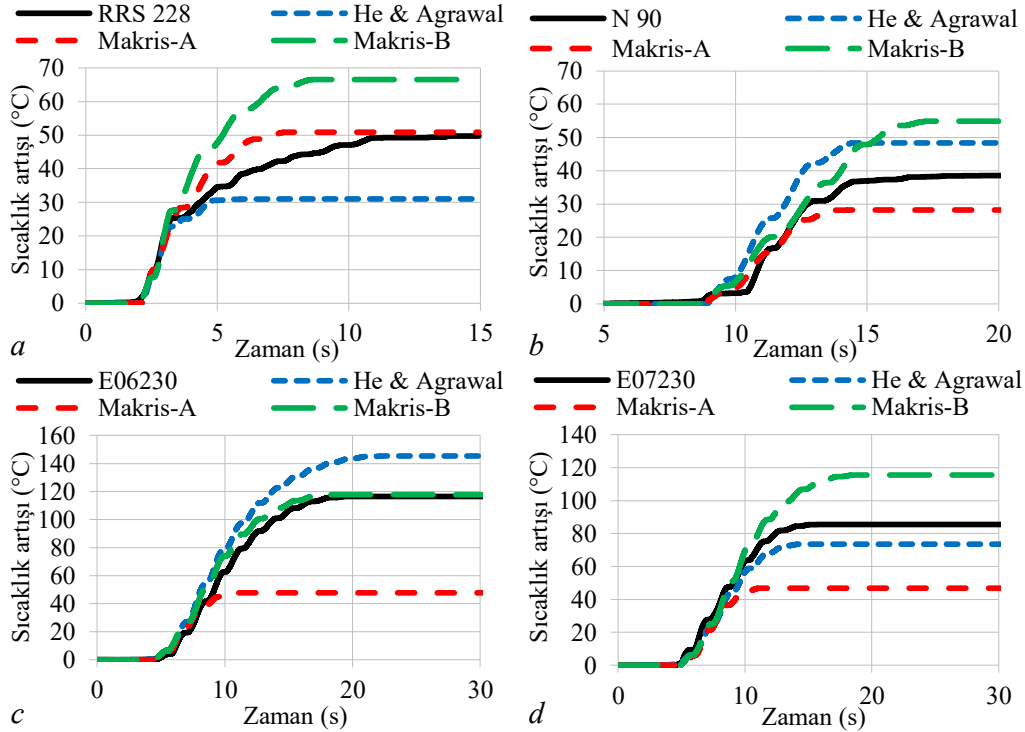
Şekil 8. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen en üst kat ivmesinin zamana bağlı değişimi a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı
(Top floor acceleration time histories obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)



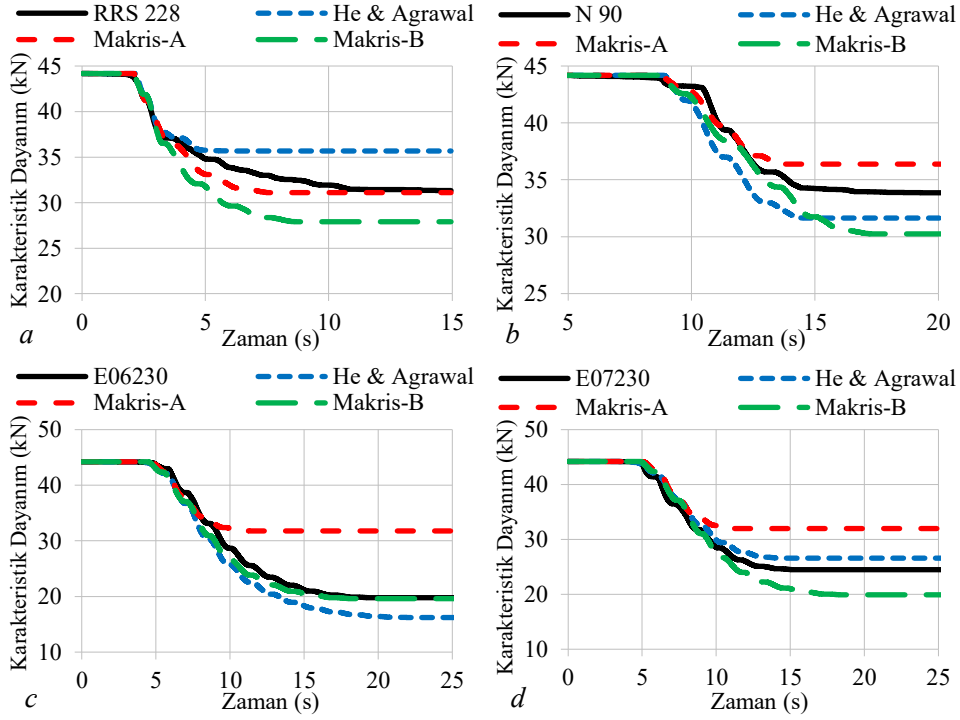
Şekil 9. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen pik kat ivmeleri a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı
(Peak floor accelerations obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)



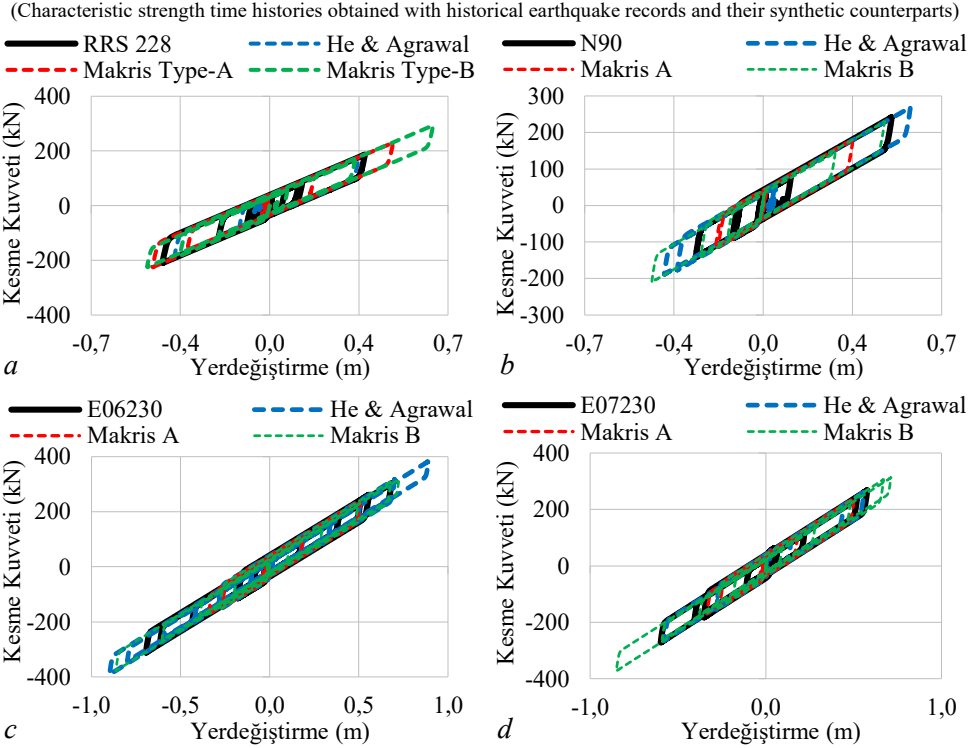
Şekil 10. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen kat ivmelerinin karekök ortalama değerleri a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı
(Root mean square values of floor accelerations obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)



Şekil 11. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen sıcaklık artışının zamana bağlı değişimi a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı (Temperature rise time histories obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)



Şekil 12. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen karakteristik dayanımın (Q) zamana bağlı değişimi a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı



Şekil 13. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen yalıtım birimi kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri a) RRS228, b) N90, c) E06230, d) E07230 kaydı
(Bearing force-displacement hysteresis loops obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)

Tablo 4. Tarihi deprem kayıtları ve eşlenik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen tepkiler arasındaki farklar (Differences between the responses obtained with historical earthquake records and their synthetic counterparts)

		Orijinal Kayda Göre Fark (%)			
		Yalıtım Sistemi Deplasmanı		Kat İvmelerinin Ortalaması	
		Isınmasız	Isınmalı	Isınmasız	Isınmalı
RRS228	He & Agrawal	-18,8%	-19,3%	-28,2%	-27,1%
	Makris-A	18,0%	21,5%	-2,0%	6,9%
	Makris-B	45,1%	54,3%	20,3%	33,2%
N90	He & Agrawal	33,0%	34,2%	4,8%	13,0%
	Makris-A	-24,5%	-30,1%	-32,8%	-28,1%
	Makris-B	26,2%	31,5%	7,5%	18,2%
E06230	He & Agrawal	30,2%	34,6%	21,7%	30,1%
	Makris-A	-44,0%	-55,8%	43,8%	-52,1%
	Makris-B	13,2%	7,6%	6,6%	5,5%
E07230	He & Agrawal	-8,3%	-11,3%	-11,3%	-11,6%
	Makris-A	-34,9%	-42,9%	-34,5%	-39,2%
	Makris-B	32,3%	39,2%	23,7%	33,1%

5. Sonuçlar (Conclusions)

KÇE yalıtım birimlerinde kurşun çekirdek ısınması nedeniyle görülen dayanım kaybının yakın-fay depremleri etkisinde daha belirgin hale gelmesi nedeniyle, bu tür yalıtım birimlerine sahip sismik yalıtımlı binaların yakın-fay depremleri etkisindeki davranışlarının incelenmesi önem taşımaktadır. Öte yandan, tarihi yakın-fay deprem kayıtlarının sayısının kapsamlı çalışmalar için yeterli olmaması, sentetik puls modellerinin kullanılmasını gerekli kılabilmektedir. Bu amaçla geliştirilen puls modelleri arasında yer alan He ve Agrawal [19], Makris Tip-A ve Makris Tip-B [16] puls modelleri, sade fakat etkin analitik yapıları sayesinde en çok kullanılan puls modelleri arasında yer almaktadır.

Önceki bazı çalışmalarda, söz konusu bu puls modellerinin etkinliği sismik yalıtımlı yapılar için araştırılmış; ancak yakın-fay depremlerindeki etkilerinin önemli düzeylere çıkabildiği bilinen kurşun çekirdek ısınması dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada, He ve Agrawal, Makris Tip-A ve Makris Tip-B puls modellerinin, taban yalıtımlı binaların yakın-fay depremleri etkisindeki kurşun çekirdek ısınmasına bağlı sismik tepkisini belirlemedeki başarısı araştırılmıştır. Bu amaçla, tarihi yakın fay depremleri ve bunların sentetik temsili karşılıkları olan yer hareketi kayıtları etkisinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen yalıtım sistemi yerdeğiştirmeleri, en üst kat ivmeleri, sıcaklık artışları ve karakteristik dayanımın zamanla değişiminin yanı sıra; tüm kat ivmeleri ve yalıtım sistemi yerdeğiştirmesi sonuçlarının pik ve karekök ortalama değerleri karşılaştırılmış ve yapılan değerlendirme sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- He ve Agrawal ve Makris Tip-A puls modellerinin genel sismik davranışı ana puls civarında yakalamada nispeten başarılı olduğu görülmüştür. Makris Tip-B puls modeli diğer iki puls modeline göre daha az başarılıdır.
- Makris Tip-B puls modelinin, yalıtım sisteminde orijinal deprem kayıtlarına göre daha fazla deplasman çevrimine yol açması kurşun çekirdek ısınmasında daha fazla artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, orijinal deprem kaydı ve Makris Tip-B puls modeli ile elde edilen yapısal tepkiler arasındaki farklar diğer iki puls modeline göre daha fazladır.
- Ana puls dışında, yer hareketlerinin hız-zaman serilerine benzer şekilde, tarihi kayıtlar ve eşlenik sentetik yer hareketi kayıtlarıyla elde edilen yapısal tepkiler arasında farklılıklar olduğu görülmektedir.
- Orijinal kayıtlarla elde edilen tepkileri yakalamada daha az başarılı olan Makris Tip-B puls modeli değerlendirme dışında tutulup,

nispeten daha başarılı olan He ve Agrawal ve Makris Tip-A puls modelleri dikkate alındığında elde edilen farklar, tarihi deprem kaydına bağlı olarak değişmekle birlikte, yalıtım sistemi yerdeğiştirmelerinde %56'ya, kat ivmelerinde %36'ya ve sıcaklık artışında % 59'a kadar çıkabilmektedir. Dolayısıyla, söz konusu eşdeğer puls modellerinin genel yapısal davranışın mertebesini belirlemede yararlı olabileceği ancak, yapısal tepki değerlerinde, kurşun çekirdek ısınmasına bağlı olarak dikkate değer farklılıkların ortaya çıkabileceğinin unutulmaması gerektiği ortaya koyulmuştur.

- Puls modellerinin ana puls dışındaki deprem hareketini dikkate almaması nedeniyle, özellikle kurşun çekirdek ısınmasının önemli olduğu durumlarda, stratejik öneme sahip ve titreşime duyarlı cihazları barındıran yalıtımlı yapıların analizinde sentetik puls modellerinin tarihi deprem kayıtlarına alternatif olarak kullanılması yerine tarihi kayıtlarla yapılan analizlerin kontrol ve değerlendirmesinde kullanılmasının yerinde olacağı belirlenmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan sentetik puls modellerinin orijinal kayıtlarla elde edilen sonuçları yakalamadaki başarısının deprem kaydı bazında değiştiği görülmüştür. Bir başka deyişle, farklı tarihi deprem kayıtları, farklı puls modelleri tarafından başarıyla temsil edilebilmektedir.
- Deprem yönetmelikleri uyarınca, mühendislik uygulamalarında tasarım deprem düzeyiyle uyumlu olan tarihi deprem kayıtlarının yeterli sayı ve nitelikte olmaması durumunda benzeştirilmiş yer hareketi kayıtları kullanılabilir. Bu gibi durumlarda, özellikle yakın-fay koşullarındaki tasarımların puls modelleri kullanılarak oluşturulan yer hareketi kayıtları ile de kontrol edilmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmadaki bulgulara dayanarak, puls modelleri ile elde edilen kayıtların kullanılması durumunda tek bir puls modeline bağlı kalınmaması, birden çok puls modeli kullanılarak elde edilecek analiz sonuçlarının ortalama değerlerinin dikkate alınmasının uygun olabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Heaton T.H., Hall J.F., Wald D.J., Halling M.W., Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, *Science*, 267, 206-211, 1995.
2. Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. I: Theory, *J. Struct. Eng. (ASCE)*, 135 (12), 1440-1449, 2009.
3. Başaran E., Bal İ.E., Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlü Yapılarda Yakın Fay Etkisinin İncelenmesi, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Eskişehir, 2017.
4. Rong Qiang., Optimum parameters of a five-story building supported by lead-rubber bearings under near-fault ground motions, *J. Low Freq. Noise Vibr. Act. Control*, 39 (1), 98-113, 2020.

5. Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Whittaker A.S., Modeling strength degradation in lead-rubber bearings under earthquake shaking, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 39 (13), 1533-1549, 2010.
6. Özdemir G., Dicleli M., Effect of lead core heating on the seismic performance of bridges isolated with LRB in near-fault zones, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 41 (14), 1989-2007, 2012.
7. Özdemir G., Bayhan B., Gülkan P., Variations in the hysteretic behavior of LRBs as a function of applied loading, *Structural Engineering and Mechanics*, 67 (1), 69-78, 2018.
8. Somerville P.G., Characterizing near-fault ground motion for the design and evaluation of bridges, Third national conference and workshop on bridges and highways, Portland, Oregon, 2002.
9. Kalkan E., Kunnath S.K., Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings., *Earthquake Spectra*, 22 (2), 367-390, 2006.
10. Yadav K.K., Gupta V.K., Near-fault fling-step ground motions: characteristics and simulation, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 101, 90-104, 2017.
11. Çavdar E., Özdemir G., Change in maximum isolator displacements due to change in orientation of scaled near field ground motion records, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 585-598, 2018.
12. Soyuluk K., Karaca H., Asynchronous dynamic analyses of cable-supported bridges under near-fault ground motions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 727-742, 2021.
13. Agrawal A.K., He W.L., A closed form approximation of near fault ground motion pulses for flexible structures, 15th ASCE Proceeding of Engineering Mechanics Conference, New York, USA, 2002.
14. Somerville P., Engineering characterization of near fault ground motions, *Planning and Engineering for Performance in Earthquakes (2005 NZSEE)*, Taupo, New Zealand, 2005.
15. Tirca L.D., Foti D., Diaferio M., Response of middle-rise steel frames with and without passive dampers to near-field ground motions, *Eng. Struct.*, 25 (2), 169-179, 2003.
16. Makris N., Rigidity, plasticity, viscosity: can electrorheological dampers protect base isolated structures from near source ground motions, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26, 571-591, 1997.
17. Makris N., Chang S.P., Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures (Report No. PEER-1998-06), *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 1998.
18. Burks L.S., Baker J.W., A predictive model for fling-step in near-fault ground motions based on recordings and simulations, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 80, 119-126, 2016.
19. He W.L., Agrawal A.K., An analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of smart protective systems, *J. Struct. Eng. (ASCE)*, 134 (7), 1177-1188, 2008.
20. Mukhopadhyay S., Gupta V.K., Directivity pulses in near-fault ground motions—II: Estimation of pulse parameters, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 50, 38-52, 2013.
21. Öncü-Davas S., Gazi H., Güler E., Alhan C., Comparison of Ground Motion Pulse Models for the Seismic Response of Seismically Isolated Liquid Storage Tanks, In: Rupakhety R., Olafsson S. Eds. *Earthquake Eng. Struct. Dyn. in Memory of Ragnar Sigbjörnsson*, Springer, 143-157, 2018.
22. Dicleli M., Buddaram S., Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect, *Eng. Struct.*, 29 (1), 21-32, 2007.
23. Gazi H., Öncü-Davas S., Alhan C., Comparison of Ground Motion Pulse Models for the Drift Response of Seismically Isolated Buildings, In: Sisiopiku VP, Ramadan O.E, Eds., *Urban Planning and Civil Engineering*, Athens Institute for Education and Research, 321-332, 2015.
24. Öncü-Davas S, Gazi H, Alhan C. Comparison of Ground Motion Pulse Models for the Acceleration Response of Seismically Isolated Buildings. In: Khatip, JM, Eds. *Architecture Anthology I: Architectural Construction, Materials and Building Technologies*. Athens Institute for Education and Research, 229-240, 2015.
25. Uckan E., Umut Ö., Sisman F.N., Karimzadeh S., Askan A., Seismic response of base isolated liquid storage tanks to real and simulated near fault pulse type ground motions, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 112, 58-68, 2018.
26. McKenna F., Fenves G., Scott M., *OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, (<http://opensees.berkeley.edu>), 2016.
27. Alhan C., Sürmeli M., Shear building representations of seismically isolated buildings, *Bull. Earthquake Eng.*, 9 (5), 1643-1671, 2011.
28. Constantinou M.C., Whittaker A.S., Fenz D.M., Apostolakis G., *Seismic Isolation of Bridges*, Report Submitted to the State of California Department of Transportation, University at Buffalo, New York, Version 2, 2007.
29. Kanbir Z., Alhan C. ve Özdemir G., Üstyapı sönüm oranının deprem etkisindeki kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimli binalardaki etkilerinin araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 25 (2), 655-665, 2022.
30. Park YJ, Wen YK, Ang AHS., Random vibration of hysteretic systems under bi-directional ground motions. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 14 (4), 543-557, 1986.
31. Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM., Verification of friction model of teflon bearings under triaxial load, *J. Struct. Eng.*, 119(1), 240-261, 1993.
32. Kalpakidis I.V., Constantinou M.C., Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. II: Verification of theory, *J. Struct. Eng. (ASCE)*, 135(12), 1450-1461, 2009.
33. Kanbir Z., Alhan C., Özdemir G., Influence of Superstructure Modeling Approach on the Response Prediction of Buildings with LRBs Considering Heating Effects, *Structures*, 28, 1756-1773, 2020.
34. Schellenberg A., Yang T., Kohama E., *OpenSees Navigator: MATLAB based graphical user interface*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA, 2016, (<http://openseesnavigators.berkeley.edu>)
35. Kanbir, Z., Kurşun Çekirdek Isınmasının Sismik İzolasyonlu Yapıların Davranışına Etkisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2022.
36. Kumar M., Computer Program ElastomericX, LeadRubberX, and HDR: User elements in OpenSees for analysis of elastomeric seismic isolation bearings under extreme loading, *OpenSees*, Buffalo, NY, (<http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/LeadRubberX>), 2018.
37. Jangid R.S., Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions, *Eng. Struct.*, 29 (10), 2503-2513, 2007.
38. Newmark N.M., A method of computation for structural dynamics, *Journal of the engineering mechanics division*, 85 (3), 67-94, 1959.
39. Housner G.W., Trifunac M.D., Analysis of accelerograms — Parkfield earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 57 (6), 1193-220, 1967.
40. Bertero V.V., Mahin S.A., Herrera R.A., Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 6, 31-42, 1978.
41. Mavroeidis G.P., Papageorgiou A.S., A mathematical representation of near-fault ground motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93 (3), 1099-1131, 2003.
42. Mavroeidis G.P., Dong G., Papageorgiou A.S., Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 33 (9), 1023-49, 2004.
43. Somerville P.G., Smith N.F., Graves R.W., Abrahamson N.A., Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity, *Seismol. Res. Lett.*, 68 (1), 199-222, 1997.
44. Erişgen G., Deprem Geliş Açısının Sismik İzolasyonlu Binalara Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
45. Güneş N., Ulucan Z.Ç., Erdoğan A.S., Yakın Fay Yer Hareketlerinin Yön Etkisi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2, 21-33, 2016.
46. Pinzon L.A., Diaz S.A., Pujades L.G., Vargas Y.F., An efficient method for considering the directionality effect of earthquakes on structures, *J. Earthquake Eng.*, 25 (9), 1679-1708, 2021.
47. Wang Y., McFarland D.M., Vakakis A.F., Bergman L.A., Efficacy of a nonlinear base isolation system subjected to near-field earthquake motions, *Proc., Int. Conf. on Advances and New Challenges in Earthquake Engineering Research*, Harbin, People's Republic of China, 2002.

48. PEER, Pacific earthquake engineering resource center: NGA database, Berkeley, University of California, (<http://peer.berkeley.edu/nga/>), 2020.
49. COSMOS, Strong-Motion Virtual Data Center, (<http://www.cosmos-eq.org/>), 2013
50. Makris N., Chang S., Effect of Viscous, Viscoplastic and Friction Damping on the Response of Seismic Isolated Structures, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 29, 85-107, 2000.
51. Alhan C., Öncü-Davas S., Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes, Eng. Struct., 116, 83-94, 2016.
52. Lu L.Y., Lin C.C., Lin G.L., Experimental evaluation of supplemental viscous damping for a sliding isolation system under pulse-like base excitations, J. Sound Vib., 332 (8), 1982-1999, 2013.
53. Mazza F., Vulcano A., Nonlinear response of RC framed buildings with isolation and supplemental damping at the base subjected to near-fault earthquakes, J. Earthquake Eng., 13 (5), 690-715, 2009.

