



Maximum inelastic displacement ratio for systems with soil-structure interaction

Yaşar Avcı¹, Ufuk Yazgan^{2*}

Institute of Earthquake Engineering and Disaster Management, Istanbul Technical University, Istanbul, 34469, Turkey

Highlights:

- Soil-structure interaction in performance-based earthquake engineering
- Assessment of nonlinear seismic displacement demand
- Influence of soil-structure interaction on the displacement demands for systems on sites with cohesionless soils

Keywords:

- Maximum inelastic displacement ratio
- Soil-structure interaction
- Seismic performance

Article Info:

Research Article
Received: 29.09.2017
Accepted: 27.04.2018

DOI:

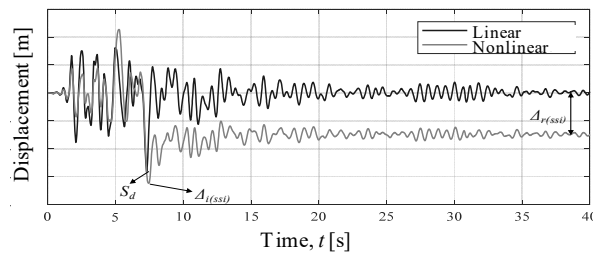
10.17341/gazimmfd.460502

Correspondence:

Author: Ufuk Yazgan
e-mail:
ufukyazgan@itu.edu.tr
phone: +90-212 285 7526

Graphical/Tabular Abstract

In the assessment of earthquake performance of structures, maximum displacement demand is considered as the main parameter. Inelastic displacement ratio is used in earthquake engineering for obtaining estimates of maximum displacement demand. Inelastic displacement ratio, C_{RSSI} is defined as the ratio of peak inelastic displacement to the peak displacement of the equivalent linear elastic system. Displacement ratios for equivalent nonlinear single-degree-of-freedom systems located at sites with sandy soil conditions are investigated in this study.



$$C_{RSSI} = \frac{A_{I(RSSI)}}{S_d}$$

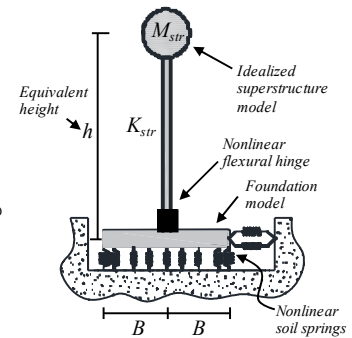


Figure A. Maximum elastic and inelastic displacements and the equivalent single-degree-of-freedom system

Purpose: Aim of this work is to assess the level of sensitivity of the displacement ratio to soil-structure interaction effects to the fundamental period of vibration of the superstructure, strength of soil and the strength reduction coefficient of the system.

Theory and Methods: The "Beam-on Nonlinear-Winkler-Foundation" (BNWF) model is utilized to represent the effects of soil-structure interaction on the dynamic response. Seismic response of a range of systems that represent various super-structure and soil conditions, were computed by means of nonlinear time history analysis. In total, 10'800 analyzes were carried out using 54 records for capturing the ground motion record variability.

Results:

For the systems with short vibration periods ($T < 0.6s$) and high strength reduction coefficients ($R > 3$), it is observed that the displacement ratio is sensitive to the bearing capacity of the soil. It was observed that the displacement ratios are greater for the systems built on soils with low bearing capacity, compared to those on soils with high bearing capacity. Resulting displacement ratios are compared against those that are obtained using the existing methods.

Conclusion:

Results of the time history analyzes indicate that the mean inelastic displacement ratios are inversely correlated with the strength of the soil. In the case when the soil strength is low ($q_{ult} = 180 \text{ kPa}$), a significant portion of the total displacement is due to deformation of the soil. On the otherhand, in the case of high soil strength ($q_{ult} = 1080 \text{ kPa}$), the largest contribution to the total displacement of the system is due to deformations within the superstructure.



Zemin-yapı etkileşimli sistemlerde en büyük doğrusal olmayan yer değiştirme oranı

Yaşar Avcı^{ID}, Ufuk Yazgan^{*ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Maslak, İstanbul, 34467, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Performansa dayalı deprem mühendisliğinde zemin-yapı etkileşimi
- Doğrusal olmayan sismik yer değiştirme talebinin değerlendirilmesi
- Kohezyonsuz zeminlerde zemin-yapı etkileşiminin sistem yer değiştirme talebine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 29.09.2017

Kabul: 27.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460502

Anahtar Kelimeler:

En büyük yer değiştirme oranı,
zemin-yapı etkileşimi,
deprem performansı

ÖZET

Yapıların deprem performansının değerlendirilmesinde temel parametre olarak en büyük yer değiştirme talepleri göz önüne alınmaktadır. En büyük yer değiştirme talebinin mühendislik uygulamalarında pratik şekilde elde edilebilmesi için doğrusal olmayan yer değiştirme oranları kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan yer değiştirme oranı, doğrusal olmayan sistem için deprem etkisi altında elde edilen en büyük yer değiştirmenin eşdeğer doğrusal sistem kullanılarak hesaplanan yer değiştirmeye oranı olarak tanımlanır. Çalışmanın amacı, yer değiştirme oranının zemin-yapı etkileşiminden ne derece etkilendiğinin değerlendirilmesidir. Çalışma kapsamında, kumlu zeminler üzerinde bulunan doğrusal olmayan eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemlerde meydana gelen yer değiştirme oranları incelenmiştir. Analizlerde, zemin-yapı etkileşimi "Beam-on-Nonlinear-Winkler-Foundation (BNWF)" modeli ile temsil edilmiştir. Bir dizi farklı zemin-yapı etkileşimli yapıları temsil eden sistemlerin dinamik davranışı zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Kuvvetli yer hareketi kayıtları arasındaki değişkenliğin temsil edilebilmesi amacıyla 54 kayıt kullanılarak toplam 10'800 analiz gerçekleştirilmiştir. Kısa titreşim periyoduna ($T < 0,6s$) ve yüksek dayanım azaltma katsayısına ($R > 3$) sahip sistemler için elde edilen yer değiştirme oranlarının zemin dayanıma bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Düşük zemin dayanıma sahip sistemler için yer değiştirme oranının yüksek dayanımlı zeminlerdeki sistemlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen yer değiştirme oranları literatürdeki mevcut yöntemlerden elde edilen oranlarla kıyaslanmıştır.

Maximum inelastic displacement ratio for systems with soil-structure interaction

H I G H L I G H T S

- Soil-structure interaction in performance-based earthquake engineering
- Assessment of nonlinear seismic displacement demand
- Influence of soil-structure interaction on the displacement demands for systems on sites with cohesionless soils

Article Info

Research Article

Received: 29.09.2017

Accepted: 27.04.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460502

Keywords:

Maximum inelastic displacement ratio,
soil-structure interaction,
seismic performance

ABSTRACT

In the assessment of earthquake performance of structures, maximum displacement demand is considered as the main parameter. Inelastic displacement ratio is used in earthquake engineering for obtaining estimates of maximum displacement demand. Inelastic displacement ratio is defined as the ratio of peak inelastic displacement to the peak displacement of the equivalent linear elastic system. Aim of this work is to assess the level of sensitivity of the displacement ratio to soil-structure interaction effects. Displacement ratios for equivalent nonlinear single-degree-of-freedom systems located at sites with sandy soil conditions are investigated in this study. The "Beam-on Nonlinear-Winkler-Foundation" (BNWF) model is utilized to represent the effects of soil-structure interaction on the dynamic response. Seismic response of a range of systems that represent various super-structure and soil conditions, were computed by means of nonlinear time history analysis. In total, 10'800 analyzes were carried out using 54 records for capturing the ground motion record variability. For the systems with short vibration periods ($T < 0,6s$) and high strength reduction coefficients ($R > 3$), it is observed that the displacement ratio is sensitive to the bearing capacity of the soil. It was observed that the displacement ratios are greater for the systems built on soils with low bearing capacity, compared to those on soils with high bearing capacity. Resulting displacement ratios are compared against those that are obtained using the existing methods.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: yasaravci@itu.edu.tr, ufukyazgan@itu.edu.tr / Tel: +90 212 285 7526
1528

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Performansa dayalı deprem mühendisliği, yapıların farklı yer hareketi seviyelerine maruz kalmaları durumunda meydana gelmesi beklenen hasarların değerlendirilmesi esasına dayanır. Yapılarda meydana gelen hasarların, taşıyıcı sistem elemanlarında deprem sırasında meydana en büyük yer değiştirmelerle doğrudan bağıntılı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, farklı deprem seviyelerinde yapıda meydana gelmesi muhtemel yer değiştirmelerin doğru tahmin edilmesi kritik önem taşır.

Yapısal yer değiştirmelerin tahmin edilmesi için sıklıkla kullanılan bir yöntem, doğrusal olmayan yer değiştirme katsayısı yöntemidir [1, 2]. Bu yöntemde, eşdeğer doğrusal tek serbestlik dereceli sistemler için pratik analizlerle elde edilen yer değiştirmeler belirli katsayılarla çarpılarak doğrusal olmayan yer değiştirmeler tahmin edilir. Bu yöntem, FEMA 440 [1] ve ASCE 41-06 [2]'da "Yer Değiştirme Katsayısı Yöntemi (*Displacement Coefficient Method*)" olarak yer almaktadır. FEMA 440 [1]'ta önerilen yöntemde beklenen en büyük yer değiştirme aşağıdaki ifade Eş. 1 ile tahmin edilmektedir:

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

Yukarıdaki ifade, δ_i en büyük yer değiştirme talebini, T_e eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin periyodunu, S_a hesap depremi spektral ivmesini ve g yer çekimi ivmesini ifade etmektedir. C_0 katsayısı, eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin yer değiştirmesi ile çok serbestlik dereceli sistemin yer değiştirmesi arasındaki bağlantıyı temsil eden parametredir. C_1 katsayısı, beklenen en büyük doğrusal olmayan yer değiştirmenin en büyük doğrusal yer değiştirmeye oranını ifade etmektedir. C_2 katsayısı, çevrimsel davranışın en büyük yer değiştirmeye etkisinin göz önüne alınması ile ilgili katsayıdır. C_3 katsayısı, ikinci mertebe etkileriyle en büyük yer değiştirme arasındaki ilişkiyi temsil eden katsayıdır. Yukarıda sunulan ve bu çalışma kapsamında incelenen C_1 katsayısı FEMA 440 [1]'da aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Eş. 2).

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T_e^2} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemdeki (Eş. 2) α zemin sınıfı ile alakalı katsayı göstermektedir. Tavsiye edilen α parametresi değerleri, en sert zemin sınıfı için 130 ve en yumuşak zemin sınıfı için 60 arasında değişmektedir. R değeri ise dayanım azaltma katsayısı olarak tanımlanmaktadır. R parametresi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Eş. 3).

$$R = \frac{S_a}{V_y / W} C_m \quad (3)$$

Yukarıdaki denklemdeki (Eş. 3) V_y sistemin akma kuvveti olup statik itme analizi sonuçları ile oluşturulan eşdeğer çift-

doğrusal idealize sistem davranışına göre bulunmaktadır. Denklemde, W yapı ağırlığına, C_m ise efektif kütle katılım faktörüne eşittir. Bu çalışmada göz önüne alınan tek serbestlik dereceli sistemler için C_m değeri 1'e eşittir. Zemin-yapı etkileşimi sonucu artan sönüm oranını dikkate alabilmek için FEMA 440'da hesap spektrumunun azaltılması tavsiye edilir. İlgili azaltma faktörleri, β aşağıdaki denklem (Eş. 4) ile hesaplanır.

$$\beta = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_0 (\%)} \quad (4)$$

Yukarıdaki ifade, β_0 zemin-yapı etkileşimini dikkate alınmasıyla elde edilen efektif sönüm oranıdır.

Doğrusal olmayan yer değiştirme üzerine yapılan çalışmalardan, Miranda [3] farklı zemin sınıflarından elde edilen kayıtlar için tek serbestlik dereceli sistemlerin yer değiştirme oranlarını incelemiştir. Yer değiştirme oranlarının, zemin şartlarına, yapının titreşim periyoduna ve sönümlilik seviyesine bağlı olduğu gözlenmiştir. Mevcut yapılar için yer değiştirme oranlarının istatistiksel incelemesi, Ruiz-Garcia ve Miranda [4] tarafından farklı zemin sınıfları da dikkate alınarak yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda, zemin şartlarının uzun periyotlu sistemlere göre kısa periyotlu sistemlerin yer değiştirme oranları üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Buna ek olarak, sahanın deprem kaynağına uzaklığın yer değiştirme oranı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı Ruiz-Garcia ve Miranda [4] tarafından tespit edilmiştir. Çalışmanın sonuçları üzerinde yapılan regresyon analiziyle, farklı zemin sınıfları için yer değiştirme oranının tahmininde kullanılabilir bir denklem geliştirilmiştir. Chopra ve Chintanapakdee [5] tarafından modal pushover yöntemi kapsamında yapılan çalışmada yer değiştirme oranının depremin moment büyüklüğüne ve saha ile deprem kaynağı arasındaki mesafeye bağlı olmadığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, elastik olmayan yer değiştirme oranının tahmini için bir denklem geliştirilmiştir. Ruiz-Garcia ve Miranda [6] yumuşak zeminlerde kaydedilmiş ivme kayıtlarını kullanarak, bu tür zeminlerde inşa edilen sistemlerin yer değiştirme oranlarının ortalama değerlerini incelemiştir. Sonuçlar, sistemin periyodunun zeminin hakim periyoduna oranı 0,75'den küçük olduğu durumlarda yer değiştirme oranının birden büyük olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, sistem periyodunun zemin hakim periyoduna yakın olduğu durumda ise yer değiştirme oranının birden küçük olduğu gözlenmiştir.

Yukarıda sunulan çalışmalarda, sistem yer değiştirme oranı ve zemin sınıfı arasındaki ilişki, yalnızca farklı sınıflardaki sahalarda kaydedilmiş ivme kayıtları için elde edilen sonuçların kıyaslanması yoluyla incelenmiştir. Aviles ve Perez-Rocha [7] tek serbestlik dereceli sistemleri kullanarak zemin-yapı etkileşimli sistemlerde R faktörü ve en büyük yer değiştirme arasındaki ilişki üzerine çalışmıştır. Zemin-yapı etkileşimli sistemlerde yer değiştirme oranının zemin-yapı etkileşimli sistemin periyodu ile etkileşimsiz sistemin periyoduna oranı ile doğru orantılı olduğunu göstermiştir.

Ghannad ve Jahankhah [8] farklı zeminleri dikkate alarak yaptıkları çalışmada, dayanım azaltma katsayısının zemin-yapı etkileşimi ile azaldığını göstermiştir. Khoshnoudian vd. [9] zemin-yapı etkileşimli sistemleri dikkate alarak yer değiştirme oranı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, yapının zemine göre rijitlik oranının artması durumunda doğrusal olmayan yer değiştirme oranının da arttığı belirlenmiştir. Yapı yüksekliğinin temel yarıçapına oranı zemin-yapı etkileşimli sistemlerde narinlik-bodurluk ölçüsünü tanımlamakta kullanılır. Narinlik ile yer değiştirme oranı arasındaki ilişki Khoshnoudian vd. [9] tarafından incelenmiştir. Bu incelemede, narin yapılar için kısa periyotlu sistemlerin yer değiştirme oranının benzer periyotlu bodur sistemlere göre daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu karşılık, uzun periyotlu narin sistemlerin yer değiştirme oranlarının benzer periyotlu bodur sistemlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı sistemlerde doğrusal olmayan yer değiştirme oranı için bir tahmin denklemi geliştirilmiştir. Ghannad ve Jafarieh [10], temelden kalkmaların göz önüne alındığı zemin-yapı etkileşimli sistemlerin yer değiştirme oranını incelemiştir. Sonuç olarak, süneklik talebinin zemin-yapı etkileşimli sistemlerde, etkileşimsiz (ankastre) sistemlere göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca doğrusal olmayan yer değiştirme oranının ankastre mesnetli olan duruma göre daha büyük olduğu gözlenmiştir. Analizler sonucunda, zemin-yapı etkileşimli sistemlerin doğrusal olmayan yer değiştirme oranını tahmin etmek için bir denklem önermişlerdir. Faydaki kırılmanın yönelimi sonucu meydana gelen hız atımı etkisini içeren ivme kayıtları için yer değiştirme oranının zemin-yapı etkileşiminden ne şekilde etkilendiği Khoshnoudian ve Ahmadi [11] tarafından incelenmiştir. Yapı periyodunun zeminin hakim periyoduna yakın olduğu durumda, yer değiştirme oranının diğer periyodlara göre daha küçük değer aldığı gözlenmiştir. Analizler sonucunda, zemin-yapı etkileşimli ve etkileşimsiz sistemlerin yer değiştirme oranları arasında dönüşüm yapmak için kullanılabilir bir denklem elde edilmiştir. Çok serbestlik dereceli bina türü zemin yapı etkileşimli sistemlerin en büyük yer değiştirme oranı Nik ve Khoshnoudian [12] tarafından incelenmiştir. Zemin-yapı etkileşimi dikkate alınan çok serbestlik dereceli sistemlerin doğrusal olmayan yer değiştirme oranlarının ankastre mesnetli duruma göre daha büyük olduğunun gözlenmiştir. Ayrıca, doğrusal olmayan yer değiştirme oranının tahmini için bir denklem geliştirilmiştir.

Yukarıda sunulan çalışmalarda zeminin deprem sırasındaki doğrusal olmayan davranışı eşdeğer rijitlik yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu yaklaşımda zemin kayma dalgası hızı, öngörülen birim şekil değiştirmeye karşılık gelen eşdeğer doğrusal rijitliğe bağlı olarak azaltılır. Yalnızca Ghannad ve Jafarieh [10] tarafından yapılan çalışmada bu rijitlik azaltılmasına ek olarak üst-yapının temelden kalkması (*uplift*) durumu da modelde göz önüne alınmıştır. Eşdeğer zemin rijitliği yaklaşımı zeminin doğrusal elastik bir yarı sonsuz ortama benzer şekilde modellenmesine olanak vermektedir. Ancak bu yaklaşımda, zemin rijitliğinin

deprem süresince sabit kaldığı ve en büyük birim şekil değiştirmeye karşılık gelen rijitlik değerine eşit olduğu varsayılır. Bu durumda, deprem sırasında zemin rijitliğinde meydana gelen çevrimsel davranış analizde göz önüne alınmamaktadır. Bu nedenle yukarıdaki çalışmaların hiçbirinde, deprem sırasında zeminde meydana gelen şekil değiştirmeler nedeniyle oluşan doğrusal olmayan çevrimsel davranış analizlerde dikkate alınmamıştır.

Temellerin statik ve dinamik analizinde “Doğrusal Olmayan Winkler Zeminine Oturan Temel (*Beam on Nonlinear Winkler Foundation, BNWF*)” modeli sıklıkla kullanılmaktadır[13]. Kazıklı temellerin dinamik yükler altındaki analizinde zemin çevrimsel davranışını temsil için Boulanger vd. [14] tarafından bir model geliştirilmiştir. Bu modeli Boulanger [15] , OpenSees [16] programına *QzSimple1*, *PySimple1* ve *TzSimple1* malzeme modelleri olarak tanımlamıştır. Daha sonra bu zemin modelleri Harden vd. [17], Gajan vd. [18] ve Raychowdhury ve Hutchinson [19] tarafından yüzeysel temellerin dinamik analizinde kullanılmak üzere revize edilmiştir. Revize edilen model Gajan vd.[20] tarafından yapılan deney sonuçları ile kalibre edilmiştir. Geliştirilen bu model ile zeminin doğrusal olmayan çevrimsel davranışı zaman tanım alanı hesabında doğrudan göz önüne alınabilmektedir. Ayrıca, zemin-yapı etkileşiminin bir parçası olan radyasyon sönümü de bu modelde yaklaşık yöntemlerle dikkate alınabilmektedir. Zemin-yapı etkileşimli sistemlerin bu şekilde modellenmesi, hem zeminin hem de üst yapının doğrusal olmayan çevrimsel davranışının dinamik analizlerde temsil edilebilmesine olanak sağlamaktadır.

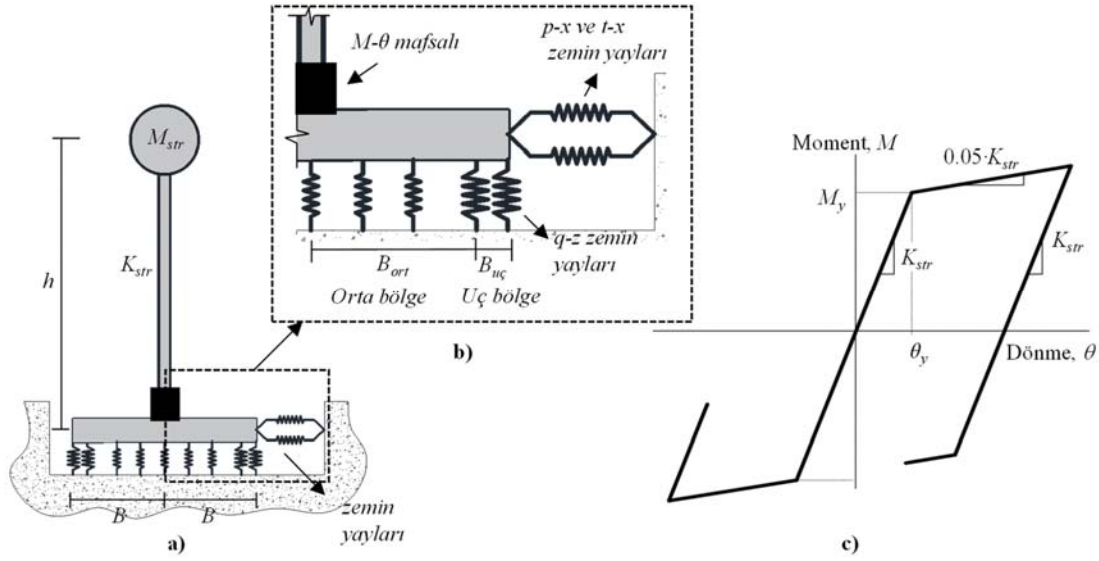
Bu çalışmada, yukarıda sunulan Raychowdhury ve Hutchinson [19] tarafından revize edilmiş model kullanılmıştır. Üst yapı ise çift doğrusal davranış modeli kullanılarak modellenmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen tüm analizler OpenSees [16] platformu kullanılarak yapılmıştır. Aşağıda detayları sunulan zemin-yapı etkileşimi modeli kullanılarak en büyük doğrusal olmayan yer değiştirme oranı ile zemin dayanımı arasındaki ilişki incelenmiştir.

2. ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ ANALİZ MODELİ (SOIL-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS MODEL)

Çalışma kapsamında farklı doğal titreşim periyodlarına sahip tek serbestlik dereceli sistemler göz önüne alınmıştır. Zemin-yapı etkileşiminde meydana gelen temelden dönmelerin analizlerde gerçekçi şekilde dikkate alınabilmesi için oluşturulan eşdeğer sistemlerin yüksekliklerinin, h belirlenmesi gereklidir (Şekil 1a). Sistemlerin titreşim periyodları, ilgili yapı yükseklikleri dikkate alınarak ASCE7-16 [21] da sunulan aşağıdaki denklem (Eş. 5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T = C_r H^x \quad (5)$$

Burada, H yapı yüksekliği, C_r ve x taşıyıcı sistem türüne göre belirlenen katsayılardır. ASCE7-16 da betonarme moment



Şekil 1. a) Zemin-yapı etkileşimi analiz modeli b) temel uç bölgesi c) üst yapı çevrimsel mafsal modeli
(a) Soil-structure interaction analysis model b) foundation end zone c) superstructure hysteretic model

çerçeve taşıyıcı sisteme sahip bina türü yapılar için C_t katsayısı 0,0466 ve x katsayısı 0,9 olarak verilmektedir. ASCE7-16'da sunulan denklemin (Eş. 5) kat adedi 12'den fazla olan yapılarda kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir. Bu durum da dikkate alınarak bu çalışma kapsamında, 10 kata kadar olan bina türü yapılar göz önüne alınmıştır. ASCE7-16'daki öneriler doğrultusunda, eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemin yüksekliği, h (Şekil 1b) ise yukarıdaki H yüksekliğinin %70'ine eşittir.

Çalışma kapsamında incelenen zemin-yapı etkileşim modeli, Raychowdhury ve Hutchinson [19] tarafından önerilen yüzeysel temel çevrimsel davranış modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Bu modelde, düşey yük yer değiştirme etkilerini modellemek için ($q-z$) zemin yayları, pasif zemin direnci ve yatay yer değiştirme etkilerini temsil etmek için s ($p-x$) zemin yayı ve temel altındaki sürtünme ve yatay yer değiştirme etkilerini temsil etmek içinse ($t-x$) zemin yayı kullanılmaktadır (Şekil 1a). Oluşturulan zemin-yapı sisteminde, M_{str} üst yapının kütleini, K_{str} rijitliğini, H yapı yüksekliğini, h eşdeğer üst yapı tek serbestlik dereceli sisteminin yüksekliğini, B analiz doğrultusundaki uzunluğunun yarısını, B_{ort} temel orta bölgesinin yarısını ve $B_{uç}$ temel uç bölgesini temsil etmektedir (Şekil 1). Kullanılan modelde, temel uç bölgeleri Harden vd. [17] tarafından önerilen yaklaşıma göre modellenmiştir (Şekil 1Şekil 1b). Üst yapının doğrusal olmayan çevrimsel davranışı, temel üst-yapı bağlantı noktasında yer alan eşdeğer çift doğrusal moment-dönme mafsalı ile modellenmiştir (Şekil 1c).

Yüzeysel temeller derinliği fazla olmayan temeller olsalar da belirli bir donma derinliğine sahip olacak şekilde tasarlanırlar. Bu nedenle, oluşturulan modellerde 0,5 m donma derinliği göz önüne alınmıştır. Zemin-yapı etkileşimli modellerde temel-zemin sistemi elastik rijitliği Mylonakis vd. tarafından geliştirilmiş NIST [13]'te sunulan denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Temel derinliği faktörü NIST

[13] raporunda yer alan Pais ve Kausel tarafından geliştirilmiş denklemler ile belirlenmiştir. Dinamik rijitlik faktörü ve radyasyon sönümü değerleri ise NIST [13]'te sunulan denklemler ile elde edilmiştir. Dönme rijitliği düşey yayların yatay ekseninde Şekil 1c'de sunulan düzene göre dağıtılmasıyla istenilen seviyeye getirilmektedir [17].

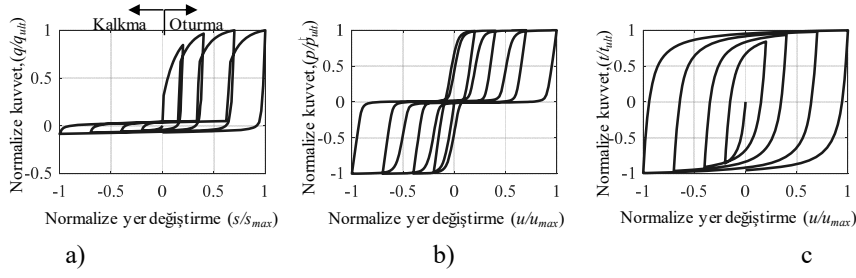
Çalışmada kullanılan zemin yayları doğrusal olmayan yaylar ile boşluk elemanlarının seri bağlanması ile modellenmektedir. Modeldeki yayların kuvvet yer değiştirme ilişkisi akma sınırının, q_0 altındaki zorlamalarda doğrusal olarak davranmakta bu sınırı aşan zorlamalar altında rijitlik azalmaktadır (Şekil 2). Bu yayların kuvvet, q ile yer değiştirme, z ilişkisinin doğrusal kısmı ($q \leq q_0$) için davranış Eş. 6-7 ile hesaplanırken doğrusal olmayan kısım ($q > q_0$) için ise Eş. 8 ile hesaplanmaktadır [14]:

$$q = k_m \cdot z \quad (6)$$

$$q_0 = C_r \cdot q_{ult} \quad (7)$$

$$q = q_{ult} - (q_{ult} - q_0) \left[\frac{c \cdot z_{50}}{c \cdot z_{50} + |z^p - z_0^p|} \right]^n \quad (8)$$

Yukarıda k_m akma öncesi rijitliği, z yer değiştirmeyi, q_0 akma sınır dayanımını, q_{ult} zemin dayanımını, z_{50} zemin dayanımının %50'sine karşı gelen yer değiştirme sınırını, z^p doğrusal sınırın ötesinde toplam yer değiştirmeyi, z_0^p akma sınırı yer değiştirmesi, C_r akma ile toplam dayanım oranını, c ve n ise omurga şeklini tanımlayan katsayılarıdır. Zemin özellikleri ile model parametreleri arasındaki ilişkiler NIST [13]'te sunulan bağıntılar kullanılarak elde edilmiştir. Temelden kalkma ve yanal hareketteki zeminden ayrılma etkisini dikkate almak için sürüklenme kuvveti ve yer değiştirme arasındaki ilişki aşağıda verilen denklem (Eş. 9) ile hesaplanmaktadır [14]:



Şekil 2. Zemin yayları çevrimsel modelleri a) q - z zemin yayı b) p - x zemin yayı c) t - x zemin yayı
(Soil spring hysteresis model a) q - z soil spring b) p - x soil spring c) t - x soil spring)

$$q_d = C_d \cdot q_{ult} - (C_d q_{ult} - q_0^d) \left[\frac{z_{50}}{z_{50} + 2 \cdot |z^g - z_0^g|} \right]^n \quad (9)$$

Yukarıda, q_d sürüklenme kuvvetini, C_d en büyük sürüklenme kuvveti oranını, q_0^d ilgili çevrim için başlangıç sürüklenme kuvvetini, z^g sürüklenme yer değiştirmesini ve z_0^g ilgili çevrim için başlangıç sürüklenme yer değiştirmesini ifade etmektedir. İlgili parametrelerin zemin ve temel sistemi özelliklerine göre hesabında NIST [13] tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Kullanılan modelde zemin davranışını temsil eden düşey ve yatay yaylarının çevrimsel normalize davranışları **Şekil** 'de sunulmaktadır. Modelde, temelden kalkmaları dikkate alabilmek amacıyla q - z düşey yaylarının çekmeye çalışmadığı varsayılmaktadır (Şekil 2a). Ancak analizlerde sayısal yakınsama hatalarının önüne geçebilmek için göz ardı edilebilecek mertebede küçük bir çekme kuvveti tanımlanmaktadır. Temelin her iki tarafında da pasif toprak direnci olduğu göz önüne alınmaktadır. Bu durum, p - x yayları için elde edilen çevrimsel davranışta da görülebilmektedir (Şekil 2b). Temel tabanındaki sürtünme etkisini temsil eden t - x zemin yayları çevrimsel yük altında her iki yönde de direnç oluşturmaktadır (Şekil 2c). Şekillerde sunulan çevrimsel davranışlardan da görülebildiği gibi ilgili yaylar zeminin rijitliğinin deprem sırasındaki değişiminin göz önüne alabilmektedir.

3. KULLANILAN PARAMETRELER (USED PARAMETERS)

3.1. Üst yapı parametreleri (Superstructure Parameters)

Çalışma kapsamında, göz önüne alınan bina türü yapıları temsil eden eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemler oluşturulmuştur. Her bir sistemin periyodu ASCE 7-16'da sunulan denklem (Eş. 5) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplarda kat yüksekliği 3 m olarak varsayılmıştır. Sonuç olarak, yapı-zemin etkileşimsiz periyodları 0,067 ila 0,995s arasında değişen 20 farklı periyoda sahip eşdeğer tek serbestlik dereceli sistemler oluşturulmuştur. Her bir kat üzerindeki düşey yüklerin 10 kN/m² olduğu ve her bir katın 30 m² olduğu varsayılmıştır. Sistemlerin ağırlığı ve kütlesi bu değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2. Zemin Parametreleri (Soil Parameters)

Bu çalışmada kullanılan yer hareketi kayıtları ASCE7-16 D [21] sınıfı zeminlerden elde edilmiş kayıtlardır. Kuvvetli yer

hareketi bilgileri PEER [22] internet sunucusundan alınmıştır (Tablo 1). Çalışmada, kumlu zeminler göz önüne alınmıştır. Bu tür zeminlerde dayanımı belirlemede kullanılan standart penetrasyon testi (SPT) değerlerinin 5 ila 30 arasında değiştiği varsayılmıştır. Bu SPT değeri aralığı için Bowles [23]'da verilen direkt yöntem kullanılarak zemin emniyet gerilmesi hesaplanmıştır. Zemin taşıma kapasitesi, elde edilen zemin emniyet gerilmesinin ilgili güvenlik katsayısı ile çarpılmasıyla belirlenmiştir. Sonuç olarak, göz önüne alınan zeminler için elde edilen taşıma kapasitelerinin, q_{ult} 180 ila 1080 kPa arasında değiştiği göz önüne alınmıştır. ASCE7-16 [21]'da D sınıfı zeminlerin kayma dalgası hızının (V_s) 180 m/s ila 365 m/s arasında değiştiği belirtilmektedir. Zemin yaylarının rijitliğinin hesaplanmasında bu kayma dalgası hızı aralığı göz önüne alınmıştır.

Temel boyutlarının belirlenmesinde zemin-yapı etkileşimli sistem periyodunun etkileşimsiz sistem periyoduna oranı dikkate alınmıştır. Bu oranın sıradan bina türü yapılarda 1 ila 2 arasında olduğu gözlenmiştir [13]. Bu nedenle, sistemlerin temel boyutları hesaplanırken kayma dalgası hızının 180 m/s olması durumunda periyod uzama oranının en fazla 2'ye eşit olmasını sağlayan boyutlar hesaplanmıştır.

4. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Oluşturulan zemin-yapı etkileşimli sistemlerin statik yanal artımsal itme kuvveti altındaki davranışları statik itme analizi ile hesaplanmıştır. Elde edilen toplam taban kesme kuvveti ile yer değiştirme eğrisi eşit enerji göz önüne alınacak şekilde çift doğrusal model ile idealleştirilmiştir (Şekil 3a). Sistemin çift doğrusal davranışından elde edilen akma kuvveti, V_y kullanılarak $R = 2, 3, 4, 5$ ve 6 değerlerine karşılık gelen spektral ivmeler, S_a aşağıdaki bağıntı (Eş. 10) kullanılarak hesaplanmıştır:

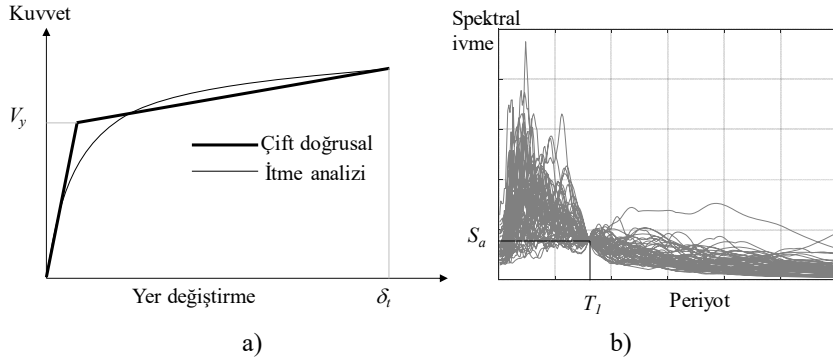
$$S_a = \frac{R \cdot V_y}{m} \quad (10)$$

Her bir R değeri için, kuvvetli yer hareketi kayıtları ilgili S_a değerine karşılık gelecek şekilde ölçeklendirilmiştir (Şekil 3b).

Ölçeklendirilmiş bu kayıtlar kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Bütün analizler OpenSees [16] programı kullanarak

Tablo 1. Kuvvetli yer hareketi kayıtlarının özellikleri (Properties of the strong ground motion records)

No	Deprem	Yıl	İstasyon	M_w	V_{s30} (m/s)	RSN No
1	San Fernando	1971	LA - Hollywood Stor	6,61	316,5	RSN68
2	Imperial Valley-06	1979	Delta	6,53	242,1	RSN169
3	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #11	6,53	196,3	RSN174
4	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #13	6,53	249,9	RSN176
5	Superstition Hills-02	1987	El Centro Imp, Co, Cent	6,54	192,1	RSN721
6	Superstition Hills-02	1987	Poe Road (temp)	6,54	316,6	RSN725
7	Loma Prieta	1989	Capitola	6,93	288,6	RSN752
8	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6,93	349,9	RSN767
9	Landers	1992	Amboy	7,28	382,9	RSN832
10	Landers	1992	Coolwater	7,28	353	RSN848
11	Landers	1992	North Palm Springs	7,28	344,7	RSN882
12	Landers	1992	Yermo Fire Station	7,28	353,6	RSN900
13	Northridge-01	1994	Beverly Hills - 14145 Mulhol	6,69	355,8	RSN953
14	Northridge-01	1994	Canyon Country – W Lost Cany	6,69	325,6	RSN960
15	Kobe_Japan	1995	Shin-Osaka	6,9	256	RSN1116
16	Kobe_Japan	1995	Tadoka	6,9	312	RSN1118
17	Kocaeli_Turkey	1999	Duzce	7,51	281,9	RSN1158
18	Chi-Chi_Taiwan	1999	CHY101	7,62	258,9	RSN1244
19	Duzce_Turkey	1999	Bolu	7,14	293,6	RSN1602
20	Manjil_Iran	1990	Abhar	7,37	302,6	RSN1634
21	Hector Mine	1999	Joshua Tree	7,13	379,3	RSN1794
22	Hector Mine	1999	San Bernardino -Mont, Mem Pk	7,13	358,9	RSN1829
23	Landers	1992	Indio - Jackson Road	7,28	292,1	RSN3754
24	Landers	1992	Morongo Valley Hall	7,28	368,2	RSN3756
25	El Mayor	2010	Brawley Airport	7,2	208,7	RSN5972
26	El Mayor	2010	Holtville Post Office	7,2	202,9	RSN6005
27	Darfield	2010	RKAC	7,0	295,7	RSN6961

**Şekil 3.** a) Çift doğrusal idealleştirme b) Kayıtların ölçeklendirmesi (a) Bilinear idealization b) Scaling of ground motion records)

yapılmıştır. Her bir ivme kaydı ve tek serbestlik dereceli sistem için en büyük doğrusal olmayan yer değiştirme oranı, analizden elde edilen doğrusal olmayan yer değiştirmenin, $\Delta_{m(ssi)}$ ilgili spektral yer değiştirmeye, S_d bölünmesiyle elde edilir (Eş. 11).

$$C_{RSSI} = \frac{\Delta_{m(ssi)}}{S_d} \quad (11)$$

Daha sonra bütün ivme kayıtları için elde edilen C_{RSSI} değerlerinin ortalaması, $E[C_{RSSI}]$ belirlenir. Bu parametre FEMA 440’da sunulan C_1 parametresine karşılık gelmektedir.

5. ANALİZ SONUÇLARI (ANALYSIS RESULTS)

Zemin-yapı etkileşimsiz titreşim periyodu 0,286s ve dayanım azaltma katsayısı, $R=4$ olan tek serbestlik dereceli sistem için San Fernando (1971) depremi “LA - Hollywood Stor” istasyonu ivme kaydı kullanılarak elde edilen zaman tanım alanı analizi sonuçları Şekil 4’de sunulmaktadır. İlgili şekilde, iki farklı zemin dayanımı: (1) 180 kPa ve (2) 1080 kPa için sonuçlar gösterilmektedir. Zemin dayanımının, q_{ult} 180 kPa olduğu durumda toplam yer değiştirmenin önemli bir bölümü (%81) zeminde meydana gelen dönmelerden meydana gelmektedir (Şekil 4a). Buna karşılık, zemin dayanımının daha yüksek olduğu ($q_{ult}=1080$ kPa) durumda

toplam yer değiştirmenin büyük bölümü (%79) yapıda meydana gelen yer değiştirmelerden kaynaklanmaktadır (Şekil 4b).

Bütün zemin-yapı etkileşimli periyot (T_{ssi}) değerleri için 54 adet deprem kaydı kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen C_{RSSI} değerleri ve bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Zemin dayanımının 180 kPa ve 1080 kPa olduğu durumlar için yer değiştirme oranı ve periyot arasındaki ilişki Şekil 5’de sunulmaktadır. Her iki zemin durumu için de kısa periyotlarda ($T_{ssi} < 0,6s$), $E[C_{RSSI}]$ birden büyük değerler alırken, daha uzun periyotlarda ($T_{ssi} > 0,6s$) $E[C_{RSSI}]$ değeri bire doğru yaklaşmaktadır.

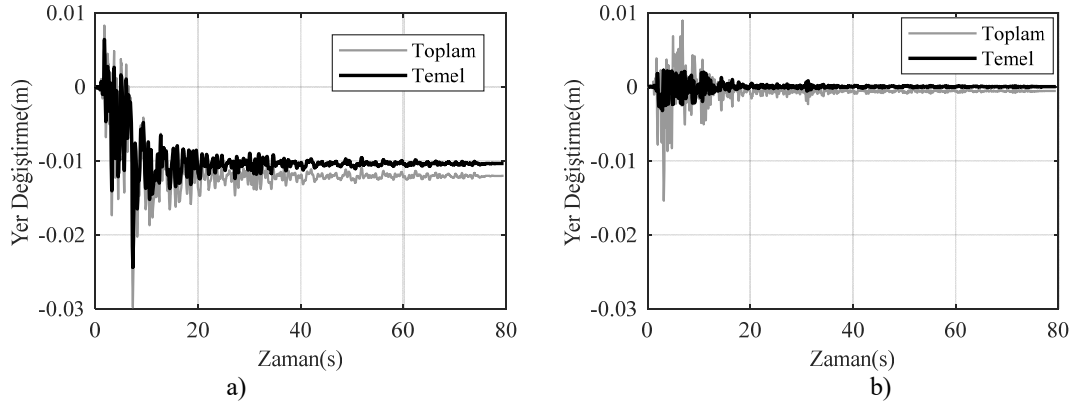
Farklı R katsayıları için $E[C_{RSSI}]$ değerinin periyotla değişimine bakıldığında, her iki zemin durumu için de artan R değerlerine karşılık olarak $E[C_{RSSI}]$ değerinin de arttığı gözlenmiştir (Şekil 6). Dayanımı 180 kPa olan zemin için elde edilen yer değiştirme oranları, dayanımı 1080 kPa olan zemin için elde edilen oranlardan daha yüksektir (Şekil 6).

Elde edilen sonuçlar, zemin-yapı etkileşimli titreşim periyodu, $T_{ssi}=0,4s$ ve yük azaltma katsayısı, $R=4$ olan sistem için ortalama yer değiştirme oranının, zemin dayanımının 180 kPa olması durumunda 1,6 civarında

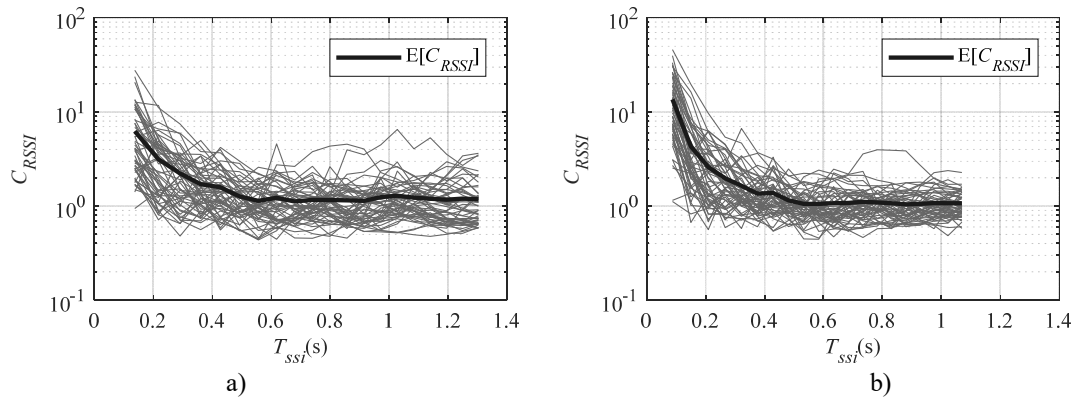
olduğunu göstermektedir (Şekil 7a). Aynı periyoda sahip ($T_{ssi}=0,4s$) sistemin 1080 kPa dayanıma sahip kumlu bir zemin üzerine yer alması durumunda, yer değiştirme oranının ortalama değeri 1,4 olarak elde edilmektedir. Benzer şekilde dayanım azaltma katsayısı, $R=6$ olduğunda 180 kPa dayanıma sahip zemine oturan $T_{ssi}=0,4s$ periyotlu sistem için yer değiştirme oranı 2,0 civarındadır. Buna karşılık, dayanımı 1080 kPa olan zemindeki sistem için bu değer 1,6 civarındadır (Şekil 7b).

Bu çalışmada göz önüne alınan sistemler için elde edilen ortalama yer değiştirme oranları, FEMA 440 yöntemi kullanılarak elde edilen oranlarla kıyaslanmıştır (Şekil 8). Özellikle titreşim periyodu 0,6s’den kısa olan sistemler için iki yöntemden elde edilen sonuçlarda farklılıklar gözlenmektedir. Kısa periyotlu sistemler için ($T_{ssi} < 0,6s$), FEMA 440 yöntemi bu çalışmaya kıyasla daha küçük yer değiştirme oranları vermektedir. Zemin dayanımı azaldıkça aradaki fark büyümektedir.

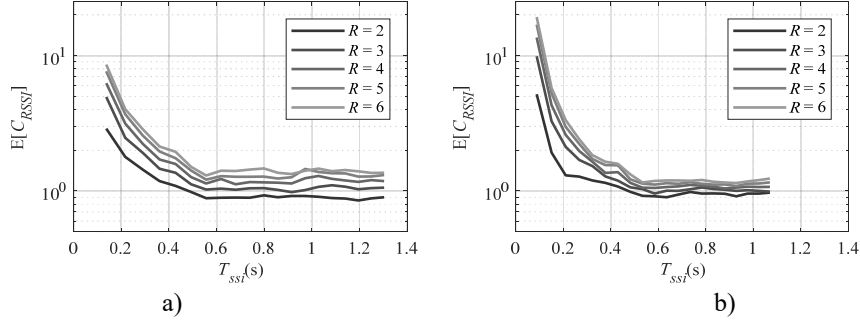
Bu çalışma kapsamında elde edilen yer değiştirme oranlarının FEMA 440 değerleri ile farklarının bu çalışmanın sonucuna bölünmesiyle normalize fark hesaplanmıştır. Şekil 9’deki dayanım azaltma katsayısı $R=4$ için elde edilen normalize farklara bakıldığında, zemin dayanımının 180 kPa



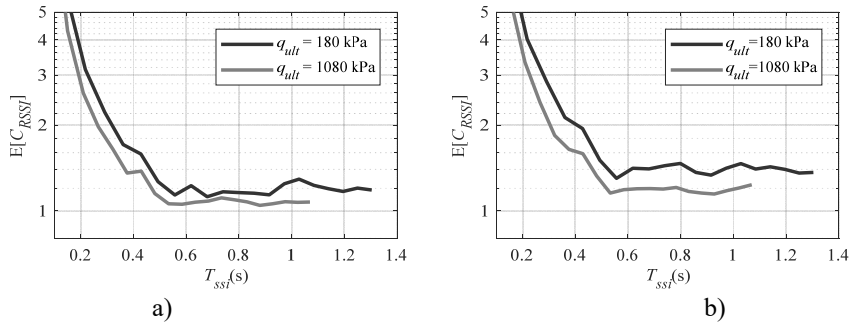
Şekil 4. Yer değiştirmenin zamana göre değişimi a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa
(Displacement time history a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa)



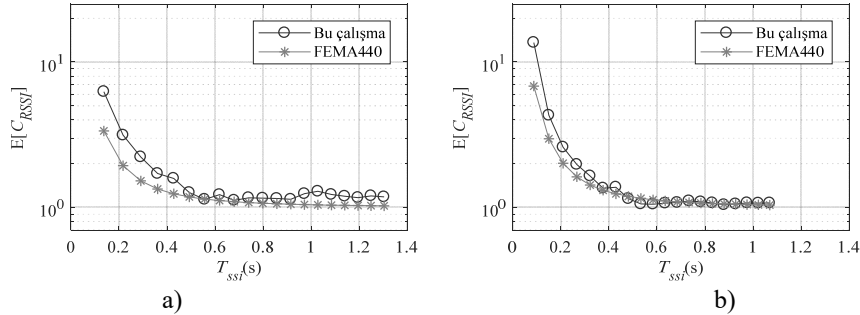
Şekil 5. En büyük yer değiştirme oranının periyoda göre değişimi a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa
(Variation of the maximum displacement ratio with period a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa)



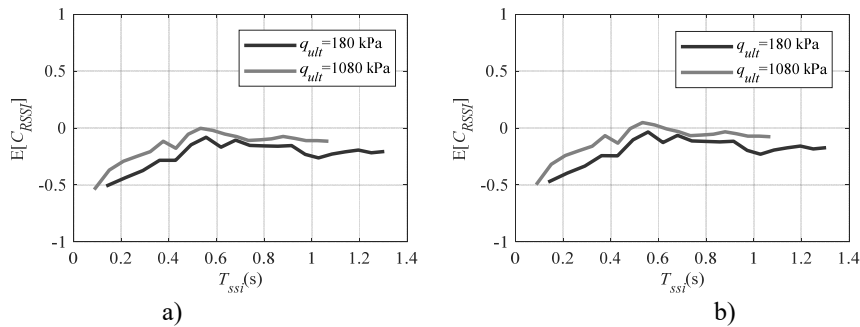
Şekil 6. Göz önüne alınan R değerleri için $E[C_{RSSI}]$ 'nin T_{ssi} ile değişimi: a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa
(Variation of $E[C_{RSSI}]$ by T_{ssi} for the considered set of R values: a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa)



Şekil 7. Farklı zemin dayanımları için $E[C_{RSSI}]$ - T_{ssi} değişimi a) $R=4$ b) $R=6$
(Variation of $E[C_{RSSI}]$ by T_{ssi} for the different soil bearing capacities: a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa)



Şekil 8. FEMA440 ve bu çalışmadan elde edilen yer değiştirme oranlarının kıyaslanması a) 180 kPa b) 1080 kPa
(Comparison of the displacement ratios obtained using FEMA440 method and the results of this study a) $q_{ult}=180$ kPa b) $q_{ult}=1080$ kPa)



Şekil 9. FEMA440 ve bu çalışmadaki yer değiştirme oranları arasındaki normalize fark a) $R=4$ b) $R=6$
(Normalized difference between the displacement ratios from FEMA440 and this study, a) $R=4$ b) $R=6$)

ve periyodun 0,5s'den kısa olduğu durumda farkın %10-52 arasında olduğu görülmektedir. Periyodu 0,5s'den uzun olan

sistemler içinse FEMA 440 yaklaşık %10-25 arasında daha düşük yer değiştirme oranları vermektedir. Benzer şekilde,

zemin dayanımının 1080 kPa olduğu ve periyodun 0,5s'den kısa olduğu durumda, FEMA 440 ile elde edilen sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçlardan %0-50 mertebesinde daha küçüktür. Periyodun 0,5s'den uzun olduğu durumda ise fark %0-10 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, $R=6$ için analizler sonucu elde edilen $E[C_{RSSI}]$ değerleri FEMA 440'dan elde edilen sonuçlar ile %0-50 arasında farklılık göstermektedir.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

c	: Omurga şeklini tanımlayan yer değiştirme kat sayısı
C_d	: En büyük sürüklenme kuvveti oranı
C_m	: Kütle katılım faktörü
C_r	: Zeminin akma ile toplam dayanım oranını
C_{RSSI}	: Zemin yapı etkileşimli sistemin doğrusal olmayan yer değiştirme oranı
C_t	: Sistem tütüne göre periyot katsayıları
C_0	: Sistem serbestlik derecesi yer değiştirme düzeltme katsayısı
C_1	: En büyük doğrusal olmayan yer değiştirme oranı
C_2	: Çevrimsel davranış katsayısı
C_3	: İkinci mertebe etkisi katsayısı
$E[C_{RSSI}]$: Zemin yapı etkileşimli sistemin ortalama doğrusal olmayan yer değiştirme oranı
E_s	: Zemin elastisite modülü
G_0	: Zemin kayma modülü
H	: Yapı yüksekliği
h	: Eşdeğer yapı yüksekliği ($0,7H$)
k_{in}	: Zeminin akma öncesi rijitliği
K_{str}	: Yapı rijitliği
m	: Toplam kütle
M_{str}	: Yapı kütlesi
n	: Omurga şeklini tanımlayan katsayı
p	: Pasif yatay kuvvet
p_{ult}	: En büyük pasif zemin itkisi
q_{ult}	: Zemin dayanımı
q_d	: Sürüklenme kuvveti
q_0	: Akma sınır dayanımı
q_0^d	: İlgili çevrim için başlangıç sürüklenme kuvvetini,
R	: Dayanım azaltma katsayısı
s	: Temeldeki düşey oturma
s_{max}	: Temeldeki en büyük düşey oturması
S_a	: Spektral ivme
S_d	: Spektral yer değiştirme
t	: Sürtünme kuvveti
t_{ult}	: En büyük sürtünme kuvveti
T	: Yapı periyodu
T_e	: Efektif periyod
T_{ssi}	: Zemin-yapı etkileşimli sistemin periyodu
u	: Temeldeki yatay yer değiştirme
u_{max}	: Temeldeki en büyük yatay yer değiştirme
V_s	: Kayma dalgası hızı
V_y	: Akma dayanımı
W	: Yapı ağırlığı
x	: Periyot yükseklik katsayısı
z^g	: sürüklenme yer değiştirme
z_0^g	: İlgili çevrim için başlangıç sürüklenme yer değiştirme

z	: Zeminin şekil değiştirme
z_{50}	: Zemin dayanımının %50'sine karşı gelen yer değiştirme sınırı
z^p	: Doğrusal sınırın ötesinde toplam yer değiştirme
z^p	: Zeminin akma sınırı yer değiştirmesi
α	: Zemin tipi katsayısı
β	: Sönüm indirgeme katsayısı
β_0	: Eşdeğer sönüm
ρ	: Zemin kütle yoğunluğu
$\Delta_{in(ssi)}$: Zemin-yapı etkileşimli sistemin en büyük doğrusal olmayan yer değiştirmesi
δ_t	: En büyük doğrusal olmayan yer değiştirme

7. SONUÇLAR(CONCLUSION)

Bu çalışmada performans dayalı deprem hesabında sıkça kullanılan doğrusal olmayan yer değiştirme oranının farklı zemin dayanımları için zemin-yapı etkileşiminden ne şekilde etkilendiği incelenmiştir. Zemin ve üst yapının etkileşim içerisindeki deprem davranışı doğrusal olmayan analitik modeller kullanarak zaman tanımlı analizi yöntemiyle hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, FEMA 440'ta verilen yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Yapılan inceleme sonucunda şunlar gözlenmiştir:

Zemin-yapı etkileşimi modelinde göz önüne alınan zemin dayanımı ile analizden elde edilen yer değiştirme oranlarının ortalaması arasında ters orantı olduğu tespit edilmiştir.

Düşük dayanımlı zeminlerde ($q_{ult}=180$ kPa), toplam yer değiştirmenin önemli bölümü zeminden dönmeler nedeniyle meydana gelmektedir. Buna karşılık, yüksek dayanımlı ($q_{ult}=1080$ kPa) zeminlerde ise toplam yer değiştirmenin önemli kısmı üst yapıda meydana gelen yer değiştirmeden kaynaklanmaktadır.

Ankastre mesnetli sistemlere benzer şekilde, bu çalışmada incelenmiş zemin-yapı etkileşimli sistemler için de doğrusal olmayan yer değiştirme oranı titreşim periyodu ve dayanım azaltma katsayısına, R bağlı olarak değişmektedir. Sabit mesnetli sistemlerde olduğu gibi, kısa titreşim periyoduna ($T_{ssi} < 0,6s$) sahip sistemlerin yer değiştirme oranları uzun titreşim periyoduna ($T_{ssi} > 0,8$) sahip sistemlere kıyasla daha yüksektir. Benzer şekilde, dayanım azaltma katsayısı, R ile ortalama yer değiştirme oranının doğru orantılı olduğu gözlenmiştir.

Doğrusal olmayan çevrimsel zemin ve üst yapı modellerinin dinamik analizi ile elde edilen yer değiştirme oranlarının FEMA 440'ta sunulan statik itme analizi esaslı yöntemle edilen sonuçlara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, çevrimsel davranışın göz önüne alındığı durumda doğrusal olmayan yer değiştirmelerin artabildiğini göstermektedir. Çevrimsel davranış nedeniyle oluşan fark, kısa titreşim periyoduna ($T_{ssi} < 0,5s$) sahip sistemler için uzun periyotlu sistemlere kıyasla daha belirgindir.

Bu çalışmada sunulan ortalama yer değiştirme oranları, yapıların deprem hesabında zemin-yapı etkileşiminin tahmin edilen yer değiştirmeler üzerindeki etkisini değerlendirmek

amacıyla kullanılabilir. Ancak, zeminde çok büyük deformasyonların meydana geldiği sıvılaşma ve benzeri durumlarda bu çalışmadan elde edilen sonuçların kullanılması uygun değildir. Analiz modelleri sıvılaşmanın meydana gelmediği durumu temsil etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Federal Emergency Management Agency ,(FEMA), Recommended provisions for improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA-440, Washington, D.C., 2005.
2. American Society of Civil Engineers ,(ASCE), Standard for seismic rehabilitation of existing buildings, ASCE-41-06, Virginia, 2007.
3. Miranda E., Evaluation of site-dependent inelastic seismic design spectra, Journal of Structural Engineering, ASCE, 119 (5):1319–1338, 1993.
4. Ruiz-Garcia J., Miranda E., Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 1237–1258, 2003.
5. Chopra, A.K., and Chintanapakdee, C., Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures single-degree-of-freedom bilinear systems, Journal of Structural Engineering, ASCE, 130 (9), 1309-1319, 2004.
6. Ruiz-Garcia J., Miranda E., Inelastic displacement ratios for the evaluation of structures built in soft soil sites, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35 (6), 675–694, 2006.
7. Aviles J., Perez-Rocha L.E., Influence of foundation flexibility on R_{μ} and C_{μ} factors, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131 (2), 221–231, 2005.
8. Ghannad M.A., Jahankhah H., Site-dependent strength reduction factors for soil–structure systems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 27, 99–110, 2007.
9. Khoshnoudian F., Ahmadi E., Nik F.A., Inelastic displacement ratios for soil-structure systems, Engineering Structures, 57, 453–464, 2013.
10. Ghannad M.A., Jafarieh A.H., Inelastic displacement ratios for soil–structure systems allowed to uplift, Earthquake Engng Structural Dynamics, 43, 1401–1421, 2014.
11. Khoshnoudian F., Ahmadi E., Effects of inertial soil–structure interaction on inelastic displacement ratios of SDOF oscillators subjected to pulse-like ground motions, Bull Earthquake Eng, ineering, 13, 1809–1833, 2015.
12. Nik F.A., Khoshnoudian F., Deflection modification factors of multistory buildings considering soil-structure interaction, Earthquake Engineering & Engineering Vibrations., 14, 561-570, 2015.
13. NIST GCR 12-917-21., Tentative Framework for Development of Advanced Seismic Design Criteria for New Buildings, Gaithersburg, Maryland, 2012.
14. Boulanger R.W., Curras C.J., Kutter B.L., Wilson D.W., Abghari A., Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses, ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (9), 750–759, 1999.
15. Boulanger R.W., The pysimple1, qzsimple1 and tzsimple1 material documentation, Documentation for the OpenSees platform, <http://opensees.berkeley.edu/>, 2000, Erişim tarihi Ağustos 08, 2017.
16. OpenSees. Open system for earthquake engineering simulation development platform by peer. <http://opensees.berkeley.edu/>, Erişim tarihi Ağustos 08, 2017.
17. Harden C.W., Hutchinson T., Martin G.R., Kutter B.L., Numerical Modeling of the Nonlinear Cyclic Response of Shallow Foundations, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, PEER, 2005/04, 2005.
18. Gajan S., Hutchinson T., Kutter B.L., Raychowdhury P., Ugalde J.A., Stewart J.P., Numerical Models for Analysis and Performance-Based Design of Shallow Foundations Subjected to Seismic Loading, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, PEER, 2007/04, 2008.
19. Raychowdhury P., Hutchinson T., Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 38, 679–698, 2009.
20. Gajan S., Phalen J., Kutter B., Soil–foundation–structure interaction: shallow foundations, Centrifuge Data Report for SSG03: Report Number UCD/CGMDR-03/02, Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis, CA, 2003.
21. American Society of Civil Engineers, (ASCE), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-16, Reston, Virginia, 2016.
22. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). PEER Ground Motion Database. http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/site, Erişim tarihi Haziran 12, 2017.
23. Bowles J.E., Foundation Analysis and Design.5. Basım, The McGraw-Hill Companies Inc. New York, 1997.

