GÜFBED/GUSTIJ (2015) 5 (2): 87-100
Research/Araştırma

Dolgu Zeminine Ait Birim Hacim Ağırlık Değeri Değişiminin Konsol Bir İstinat Duvarının Sismik Davranışı Üzerindeki Etkileri

Tufan ÇAKIR[1*], Osman KARA[1]
[1] *Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane, Türkiye*

Geliş tarihi/*Received* 30.04.2015
Düzeltilerek geliş tarihi/*Received in revised form* 01.07.2015
Kabul tarihi/*Accepted* 10.07.2015

Özet
Bu çalışmanın temel amacı, zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak deprem etkisindeki konsol bir istinat duvarının davranışı üzerinde dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık değeri değişiminin etkilerini incelemektir. Bu amaçla üç farklı temel zemini sistemi ve dört farklı dolgu birim hacim ağırlığı değeri dikkate alınarak zemin-yapı modelinin zaman tanım alanında sonlu elemanlar yöntemiyle dinamik analizleri yapılmıştır. Oluşturulan modelde dolgu-konsol istinat duvarı etkileşimini dikkate alabilmek için ara yüzey elamanları kullanılmıştır. Zemin ortamın sonsuzluğundan kaynaklanan radyasyonel sönüm ve dalga yansıma etkileri zemin sınırlarında viskoz sönümleyiciler kullanılarak göz önüne alınmıştır. Ayrıca zeminin malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı Drucker-Prager kırılma kriteri ile dikkate alınmıştır. Zemin-yapı modelinin dinamik analizleri 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca kaydı Kuzey-Güney bileşeni kullanılarak ANSYS programı ile gerçekleştirilmiştir. Çözümlemelerde doğrudan entegrasyon yöntemlerinden Newmark yaklaşımı kullanılmıştır. Çözümleme sonuçları duvar yatay yerdeğiştirmeleri ve duvar kritik kesitlerinde meydana gelen gerilmeler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, zemin-yapı etkileşiminin konsol istinat duvarının deprem davranışı üzerinde etkin bir parametre olduğunu ve tasarım sürecinde mutlaka dikkate alınması gerektiğini, ancak dolgu zemini birim hacim ağırlığı değeri değişiminin duvar sismik davranışı üzerinde ihmal edilebilir düzeylerde bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: *Birim Hacim Ağırlık, İstinat Duvarı, Newmark Yaklaşımı, Radyasyonel Sönüm, Sismik Davranış, Zemin-Yapı Etkileşimi*

Effects of the Variation of Unit Weight of Backfill Soil on Seismic Response of A Cantilever Retaining Wall

Abstract
The main aim of this study is to investigate effects of the variation of unit weight of backfill soil on the behavior of a cantilever retaining wall under earthquake effect considering soil-structure interaction. For this purpose, taking into account three different subsoil systems and four different unit weights of the backfill soil, the dynamic analyses of soil-structure model were done in time domain through finite element method. Interface elements were used to consider backfill-cantilever retaining wall interaction in the created model. Radiational damping generated from the infinity of soil medium and wave reflection effects were taken into consideration by using viscous dampers at the soil boundaries. Furthermore, nonlinear behavior of soil material was considered by means of Drucker-Prager failure criterion. The dynamic analyses of the soil-structure model were carried

[*] Tufan ÇAKIR, cakirtufan@hotmail.com, Tel: (0456) 233 10 00-1633

DOI: http://dx.doi.org/10.17714/gufbed.2015.05.008 ISSN: 2146-538X http://dergipark.ulakbim.gov.tr/gumusfenbil

out by using North-South component of the ground motion recorded during August 17, 1999 Kocaeli Earthquake in Yarımca station. Newmark's direct integration method was used in the analyses. The analysis results were comparatively evaluated in terms of the lateral displacements of the wall and the stresses occurred in the critical sections of the wall. The obtained results showed that soil-structure interaction is an effective parameter on earthquake behavior of the cantilever retaining wall and it must be definitely considered in design process. However, the variation of the unit weight of backfill soil has a negligible effect on seismic response of the wall.

Keywords: *Unit Weight, Retaining Wall, Newmark Approach, Radiational Damping, Seismic Behavior, Soil-Structure Interaction*

1. Giriş

Ülkemiz tektonik açıdan Afrika, Arap, Anadolu ve Avrasya plakalarının üstünde yer alıp, Afrika ve Avrasya levhalarının çarpışmaları sonucu oluşan karmaşık deformasyonların meydana getirdiği yanal ve düşey atımlı fay oluşumlarını içeren Akdeniz Deprem Kuşağı içerisinde bulunmaktadır. Bu tektonik levha yapılanması çerçevesinde Türkiye'de meydana gelen sismik aktiviteler "Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)", "Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ)" ve "Batı Anadolu Gerilme Yapısı" olmak üzere üç temel oluşum tarafından kontrol edilmektedir (Akkar, 2008). Bu nedenle topraklarının hemen hemen tamamı aktif deprem kuşaklarında bulunan ülkemizde, özel mühendislik yapılarından biri olan istinat duvarlarının da depreme dayanıklı olarak tasarlanmaları gereği açıktır. Ayrıca bu duvarların bazı durumlarda çok değişik özelliklere sahip zeminler üzerine inşa edilmesi zorunluluğu, yapı ile zemin arasında dinamik karşılıklı etkileşim probleminin doğmasına neden olmakta ve zemin-yapı sisteminin dinamik özelliklerinin belirlenmesini gerekli kılmaktadır (Aydınoğlu, 1977).

Mühendislik yapılarının tasarımındaki genel amaç; belirlenen bir etkiye karşı yapıda gerekli dayanımı sağlamaktır. Geleneksel yapı tasarımı yaklaşımında etki ve dayanım genel olarak kuvvet türünden ifade edilmektedir. Bu durumda, yapısal sisteme etkiyen dış kuvvetler etkisi altında iç kuvvetler belirlenmekte ve yapı elemanları bu kuvvetleri karşılayacak dayanıma sahip olacak biçimde tasarlanmaktadır. Öte yandan yapıda meydana gelen deformasyonların izin verilebilir sınırları aşmaması da yapının servis koşullarını sağlaması bakımından gerekli olmaktadır (Sucuoğlu, 2008). Söz konusu bu durum istinat duvarları ölçeğinde değerlendirildiğinde; farklı duvar tiplerinin farklı davranışlar sergileyebileceğinden hareketle, duvarların deprem etkisiyle büyük yerdeğiştirmelerden dolayı da göçebileceği, bu nedenle yerdeğiştirme sınırlarının belirlenmesi gerektiği ve analizlerin plastik denge mekanizmasına ek olarak yerdeğiştirmeye de dayalı yapılması gerektiği söylenebilir (Çakır, 2010).

Deprem anında yer hareketinden dolayı istinat duvarlarına etkiyen sismik zemin basınçlarının, dağılım ve büyüklük bakımından statik basınçlardan farklı olduğu bilinmektedir. Depremden doğan zemin basınçları; yer hareketinin frekans bileşenleri, gömülü yapının hareketleri, zemin tabakalarının bileşimi ve yapı etrafındaki zeminin özellikleri, deprem dalgalarının tipi ve dalgaların geliş açısı gibi pek çok faktörden etkilenebilmektedir. İstinat duvarlarına etkiyen dinamik zemin basınçlarının belirlenmesine ve duvar sismik tasarımına ilişkin ilk çalışmalar Okabe (1924) ve Mononobe ve Matsuo (1929) tarafından gerçekleştirilmiştir. Mononobe-Okabe (M-O) yöntemi olarak da bilinen bu yöntem, dolgu zemininin kuru ve kohezyonsuz olması koşullarında statik Coulomb yöntemindeki aktif ya da pasif durumda dikkate alınan zemin kamasına sözde statik ivmenin eklenmesiyle oluşturulmuştur. M-O yöntemi, pratikliği yanında sonuçlarına duyulan güvenden ötürü istinat duvarlarına etkiyen kuvvetleri belirlemede halen yaygın bir

şekilde kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem, dalga yayılım etkilerini ve zemin-yapı etkileşimini dikkate alamamaktadır. Bu çalışmadan sonra bu yöntemin doğruluğunu değerlendirmek ve yöntemi geliştirmek için pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. M-O yöntemi ve türevlerini kapsayan limit durum çözümlerini, elastik dalga teorisine dayanan çözümleri, elasto-plastik ve doğrusal olmayan teoriye dayanan çözümleri ve günümüz tasarım teknolojilerini ortaya koyan çalışmalar literatürde değişik araştırmalarda sunulmaktadır (Nazarian ve Hadjian, 1979; Veletsos ve Younan, 1994, 1997; Theodorakopoulos vd., 2001; Gazetas vd., 2004; Psarropoulos vd., 2005; Madabhushi ve Zeng, 2007; Giarlelis ve Mylonakis, 2011; Kloukinas vd., 2012; Çakır, 2013, 2014; Liu vd., 2014; Wilson ve Elgamal, 2015; Xu vd., 2015; Lin vd., 2015). İstinat duvarlarının sismik tasarımına yönelik mevcut yönetmelikler incelendiğinde ise, karmaşık zemin etkileşimlerinin dikkate alınmasına yönelik özel bir yöntemin olmadığı ve sözde statik yaklaşımlarla çözüme gidildiği görülmektedir (IS-1893, 2002; Eurocode 8-Part 5, 2003; EAK-2000, 2003). Ülkemizde yürürlükte olan Türk Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) incelendiğinde ise, bu yönetmeliğin esasen bina türü yapılar için geliştirilmiş olduğu ve istinat duvarları için söz konusu karmaşık etkileşimlerin dikkate alınmasına yönelik bir öneri içermediği görülmektedir.

Yukarıdaki bilgiler ışığında istinat duvarlarının analizi üzerine teknik literatür genel olarak irdelendiğinde, bu duvarların deprem davranışlarının belirlenmesine yönelik pek çok çalışma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, bunların çoğunun depremlerden doğan yanal zemin basınçlarının belirlenmesine yönelik olduğu ve istinat duvarlarının sismik davranışı üzerinde zemin-yapı etkileşim etkileri ile ilgili araştırmaların azlığı dikkat çekmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, zemin-yapı etkileşimini dikkate alarak dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık değeri değişiminin konsol bir istinat duvarının sismik davranışı üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaçla, dolgu-istinat duvarı-temel/zemin etkileşim sistemi için önerilen üç boyutlu sonlu elemanlar modeli vasıtasıyla, üç farklı temel zemini koşulu ve dört farklı dolgu birim hacim ağırlığı değeri dikkate alınarak zaman ortamında sismik analizler gerçekleştirilmektedir.

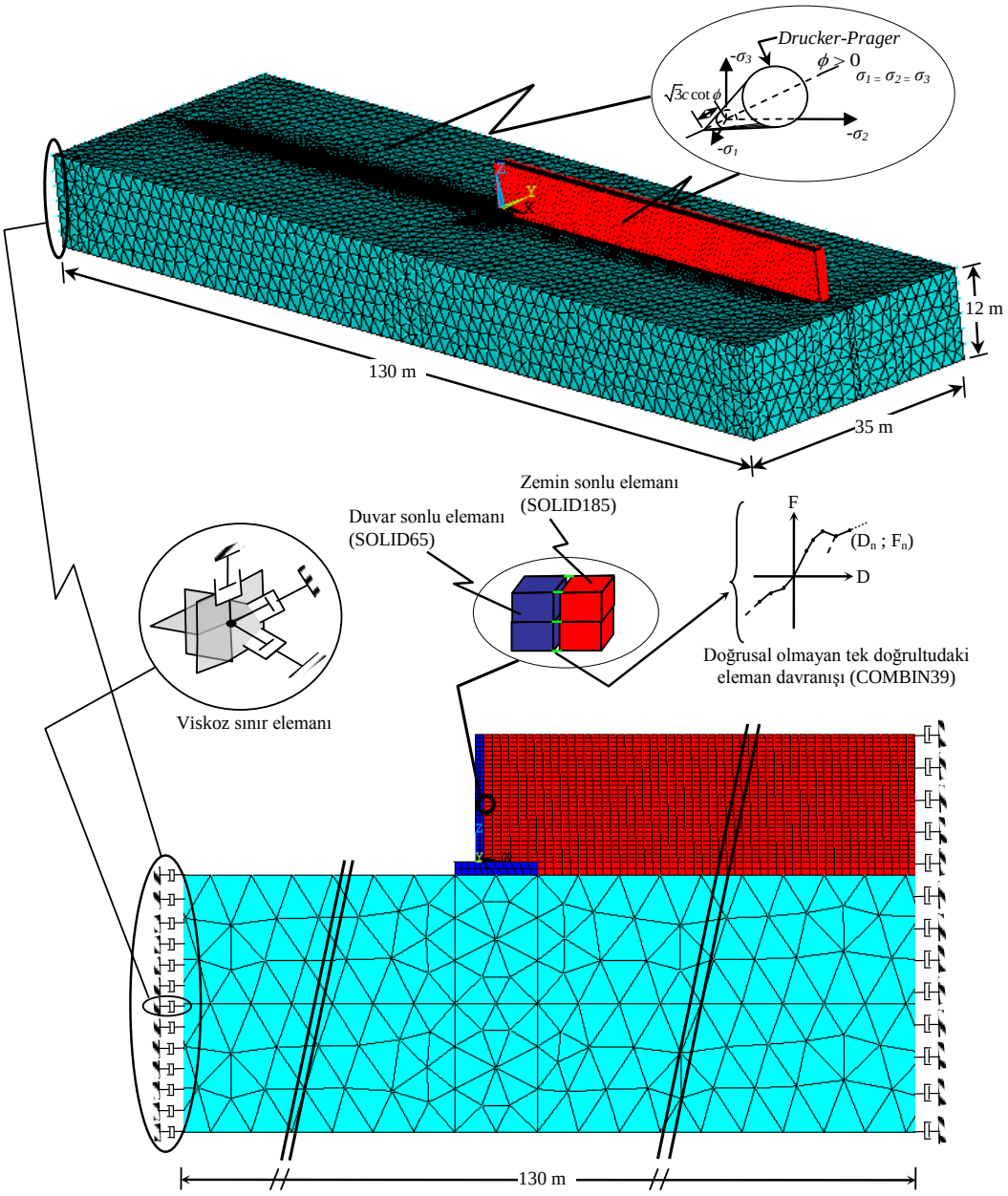
2. İstinat Duvarının Yapısal Özellikleri ve Önerilen Sayısal Model

Bu çalışmada modellenen konsol istinat duvarı; 1 m ön çıkma genişliğine, 2.6 m arka çıkma genişliğine, 0.6 m yüksekliğinde yatay taban plağına, bu plağa ankastre mesnetli 0.4 m sabit kalınlığa sahip 6 m yüksekliğinde düşey gövde plağı ile toplam 6.6 m yüksekliğe sahiptir. Önerilen sonlu elemanlar modelinde, dolgu zemini davranışını doğru bir şekilde temsil edebilmek amacıyla kritik uzaklık, duvar yüzünden itibaren duvar yüksekliğinin 10 katı olarak alınmıştır (Veletsos ve Younan, 1994; Psarropoulos vd., 2005).

Araştırmaya konu olan etkileşim sisteminin dinamik davranışının incelenebilmesi için Şekil 1'de görülen sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Söz konusu modelde; istinat duvarı ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan SOLID65 elemanlarla, dolgu ve temel zeminleri ise SOLID185 elemanlarla modellenmiştir. SOLID65 her bir noktasında üç ötelenme serbestliğine sahip sekiz düğüm noktalı üç boyutlu bir katı eleman olup, bünyesinde çekmede çatlama ve basınçta ezilme özelliklerini barındırmaktadır. SOLID185 ise yine katıların üç boyutlu modellenmesinde kullanılan, her bir noktasında üç ötelenme serbestliğine sahip sekiz düğüm noktalı üç boyutlu bir eleman olup; plastisite, hiperelastisite, büyük yer değiştirme ve şekil değiştirme kabiliyetlerine sahiptir. Ayrıca bu eleman hemen hemen sıkışmaz elastoplastik malzemelerin ve tam sıkışmaz hiperelastik malzemelerin deformasyonlarının benzeştirilebilmesi için karma bir formülasyon kapasitesine sahiptir. Dolgu-duvar etkileşimini modellemek için özel ara yüzey elemanı olarak doğrusal olmayan genelleştirilmiş kuvvet-deplasman kabiliyetine sahip tek doğrultulu yay eleman (COMBIN39) kullanılmıştır. Bu eleman

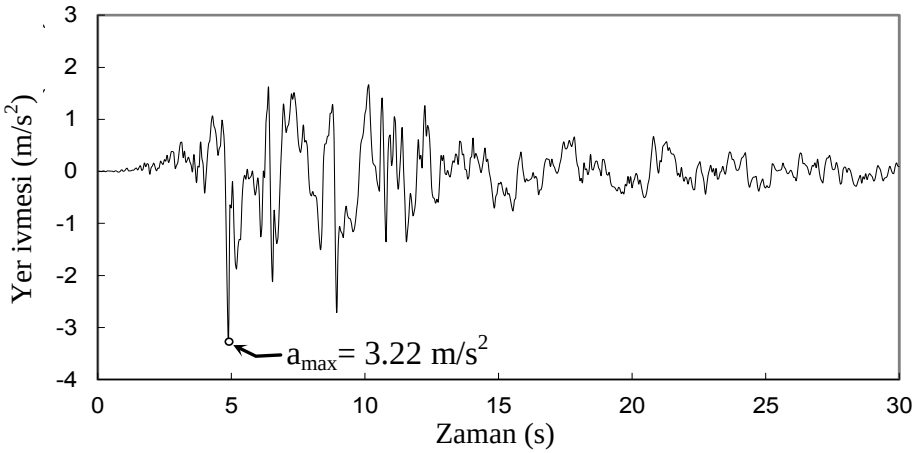
tipinde basınç ve çekme durumları için ayrı ayrı deplasman-kuvvet ilişkisi tanımlanabilmektedir.

Zemin-yapı etkileşim problemlerinde sınır şartlarının doğru ve gerçekçi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Çünkü oluşturulan modellerde, gerçekte sonsuz büyüklükteki zemin hacmi, sınırlı hacimdeki bir zemin ortamla temsil edilmeye çalışılmaktadır. Sınırsız zemin hacmini bu şekilde sonlu hacimle tanımlamak, sistem enerjisini belirli bir bölgede sınırlamak anlamına gelmektedir. Bu nedenle radyasyonel sönüm etkilerinin dikkate alınabilmesi ve yansıma etkilerinin önüne geçilebilmesi için Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) tarafından önerilen viskoz sınırlar kullanılarak, sönümleyiciler model sınırlarına kartezyen koordinat takımında her bir doğrultuda yerleştirilmiştir. Zeminin, malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışı Drucker-Prager elastoplastik malzeme yaklaşımı ile dikkate alınmıştır. Tüm bu modelleme ve çözümlemelerde ANSYS 13 (2010) programından faydalanılmıştır.



Şekil 1. Önerilen sayısal model.

Önerilen sonlu elemanlar modeli vasıtasıyla dolgu-istinat duvarı-temel/zemin sisteminin deprem davranışı, zemin-yapı etkileşimi ve dolgu birim hacim ağırlığı değişimi dikkate alınarak araştırılmıştır. Çözümlemeler zaman ortamında doğrudan entegrasyon yöntemlerinden Newmark yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çözümlemelerde sistemin sönümü Rayleigh sönümü ile temsil edilmiştir. Yer hareketi olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca kaydı Kuzey-Güney bileşeni dikkate alınmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca ivme kaydı Kuzey-Güney bileşeni.

Çözümlemelerde istinat duvarına ait elastisite modülü 30000 MPa, Poisson oranı 0.20, birim hacim ağırlık 25 kN/m^3, kohezyonsuz dolgu zeminine ait elastisite modülü 50 MPa ve Poisson oranı 0.30 olarak dikkate alınmıştır. Söz konusu sistemin deprem davranışı üzerinde dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık değişiminin etkileri, kohezyonsuz dolgu zeminine ait olabilecek dört farklı birim hacim ağırlık değeri (14 kN/m^3, 16 kN/m^3, 18 kN/m^3, 20 kN/m^3) dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca sismik davranış üzerinde zemin-yapı etkileşim etkilerini değerlendirebilmek maksadıyla dikkate alınan temel zemini özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Dikkate alınan temel zemini özellikleri.

Zemin sistemi	E (kN/m^2)	G (kN/m^2)	ν	γ (kN/m^3)	v_s (m/s)	v_p (m/s)
S1	75000	26786	0.40	18.0	121.99	298.81
S2	150000	55556	0.35	18.5	173.29	360.74
S3	500000	192308	0.30	19.0	318.14	595.19

E: Elastisite modülü, G: Kayma modülü, ν: Poisson oranı, γ: Birim hacim ağırlık, v_s : Kayma dalgası hızı, v_p : Boyuna dalga hızı

3. Bulgular ve İrdeleme

Araştırmaya konu olan etkileşim sisteminin sismik yük etkisi altında dört farklı dolgu birim hacim ağırlığı değeri dikkate alınarak çözümlenmesinden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirmeler ve gerilmeler ile bu tepkilerin gerçekleşme zamanları S1 temel zemini sistemi için Tablo 2'de, S2 temel zemini sistemi için Tablo 3'de ve S3 temel zemini sistemi için Tablo 4'de verilmektedir. Bu tablolardaki yerdeğiştirmeler, yer seviyesine göre hesaplanan rölatif yerdeğiştirmeleri ifade etmektedir. Yerdeğiştirme ve gerilme değerlerine dayalı ayrıntılı değerlendirmeler aşağıdaki alt başlıklarda grafiksel olarak sunulmaktadır.

Tablo 2. S1 zemin sistemi için dinamik analiz sonuçları.

Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	γ = 14		γ = 16		γ = 18		γ = 20	
Tepkiler	t (s)	Value	t (s)	Value	t (s)	Value	t (s)	Value
u_t (m)	4.80	0.0429	4.80	0.0426	4.80	0.0422	4.80	0.0419
S_{zb} (MPa)	5.35	8.8348	5.35	8.6749	5.35	8.5055	5.35	8.3570
S_{yb} (MPa)	5.35	1.2167	5.35	1.2061	5.35	1.1955	5.35	1.1864
S_{xb} (MPa)	5.35	3.7871	5.35	3.7590	5.35	3.7357	5.35	3.7158
S_{zf} (MPa)	5.35	-8.9355	5.35	-8.7734	5.35	-8.6007	5.35	-8.4490
S_{yf} (MPa)	5.35	-0.7188	5.35	-0.7117	5.35	-0.7046	5.35	-0.6985
S_{xf} (MPa)	5.35	-0.5737	5.30	-0.5630	5.30	-0.5527	5.30	-0.5433

γ: Birim hacim ağırlık, u_t: İstinat duvarının tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi; S_{zb}, S_{yb} ve S_{xb}: İstinat duvarının arka yüzünde (dolgu tarafı) *z*, *y* ve *x* doğrultularında hesaplanan gerilmeler; S_{zf}, S_{yf} ve S_{xf} : İstinat duvarının ön yüzünde *z*, *y* ve *x* doğrultularında hesaplanan gerilmeler.

Tablo 3. S2 zemin sistemi için dinamik analiz sonuçları.

Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	γ = 14		γ = 16		γ = 18		γ = 20	
Tepkiler	t (s)	Value	t (s)	Value	t (s)	Value	t (s)	Value
u_t (m)	4.80	0.0250	4.80	0.0251	4.80	0.0252	4.80	0.0252
S_{zb} (MPa)	9.70	7.2644	9.70	7.2846	9.70	7.2744	5.40	7.1960
S_{yb} (MPa)	5.35	0.9347	5.35	0.9430	9.65	0.9531	5.35	0.9561
S_{xb} (MPa)	9.70	2.8496	9.70	2.8857	9.70	2.9473	9.70	2.8970
S_{zf} (MPa)	9.70	-7.3548	9.70	-7.3758	9.70	-7.3664	5.40	-7.2773
S_{yf} (MPa)	5.35	-0.5655	5.35	-0.5700	5.35	-0.5717	5.35	-0.5770
S_{xf} (MPa)	5.30	-0.5084	5.30	-0.5094	5.30	-0.5083	5.30	-0.5097

γ: Birim hacim ağırlık, u_t: İstinat duvarının tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi; S_{zb}, S_{yb} ve S_{xb}: İstinat duvarının arka yüzünde (dolgu tarafı) *z*, *y* ve *x* doğrultularında hesaplanan gerilmeler; S_{zf}, S_{yf} ve S_{xf}: İstinat duvarının ön yüzünde *z*, *y* ve *x* doğrultularında hesaplanan gerilmeler.

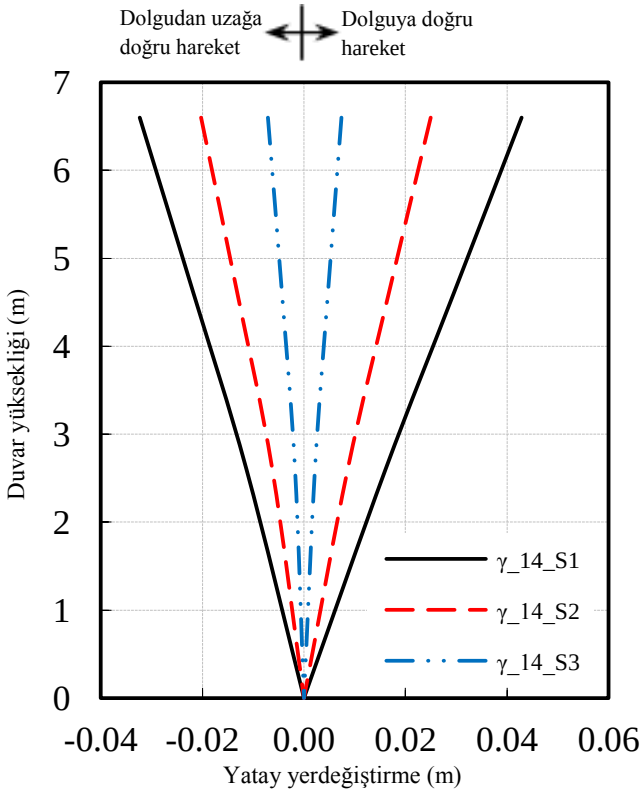
Tablo 4. S3 zemin sistemi için dinamik analiz sonuçları.

Birim hacim ağırlık (kN/m^3)	γ = 14		γ = 16		γ = 18		γ = 20	
Tepkiler	t (s)	Value	t (s)	Value	t (s)	Value	t (s)	Value
u_t (m)	4.75	0.0074	4.75	0.0075	4.75	0.0076	4.75	0.0078
S_{zb} (MPa)	9.70	3.6110	9.70	3.6413	9.70	3.6956	9.70	3.7928
S_{yb} (MPa)	9.70	0.4497	9.70	0.4563	9.70	0.4641	9.70	0.4796
S_{xb} (MPa)	9.70	1.3336	9.70	1.3567	9.70	1.3767	9.70	1.4326
S_{zf} (MPa)	9.70	-3.6598	9.70	-3.6900	9.70	-3.7445	9.70	-3.8434
S_{yf} (MPa)	9.65	-0.2720	9.70	-0.2755	9.70	-0.2809	9.65	-0.2900
S_{xf} (MPa)	6.75	-0.2745	6.75	-0.2755	6.75	-0.2843	6.75	-0.2912

γ: Birim hacim ağırlık, u_t: İstinat duvarının tepe noktasının yatay yerdeğiştirmesi; S_{zb}, S_{yb} ve S_{xb}: İstinat duvarının arka yüzünde (dolgu tarafı) *z*, *y* ve *x* doğrultularında hesaplanan gerilmeler; S_{zf}, S_{yf} ve S_{xf}: İstinat duvarının ön yüzünde *z*, *y* ve *x* doğrultularında hesaplanan gerilmeler.

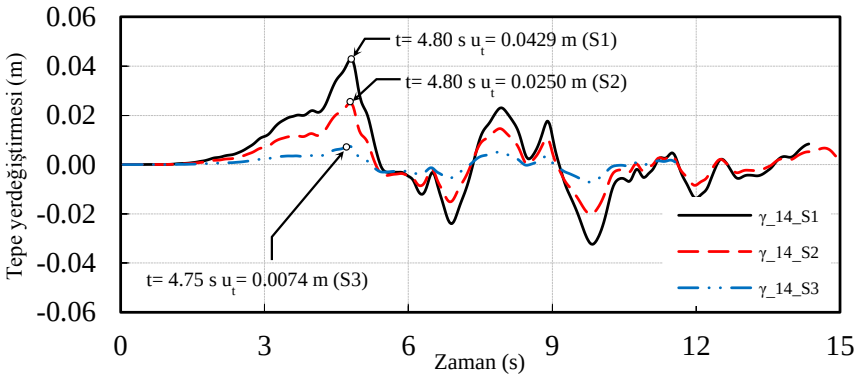
3.1. Temel Zemini Etkileşim Etkileri

Temel zemini-yapı etkileşiminin duvar deprem davranışı üzerindeki etkileri yatay yerdeğiştirmelerin istinat duvarı yüksekliği boyunca değişimleri, duvar tepe noktasının yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri ve her bir doğrultuda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimleri baz alınarak değerlendirilmektedir. İstinat duvarının üzerine oturduğu üç farklı temel zemini sistemi için duvar yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimleri, γ = 14 kN/m^3 birim hacim ağırlığa sahip dolgu zemini koşullarında, Şekil 3'de verilmektedir. Farklı birim hacim ağırlık değerine sahip diğer dolgu zemini koşullarında da tepki değişim eğiliminin aynı yönde olduğu Tablo 2-4'den görülebilir. Yerdeğiştirmelerin negatif değerleri duvarın öne doğru hareketini, pozitif değerleri ise duvarın arka dolguya doğru hareketini temsil etmektedir. Şekil 3'de yatay yerdeğiştirmelerin zemin rijitliğinin artmasıyla önemli mertebelerde azaldığı açıkça görülmektedir.



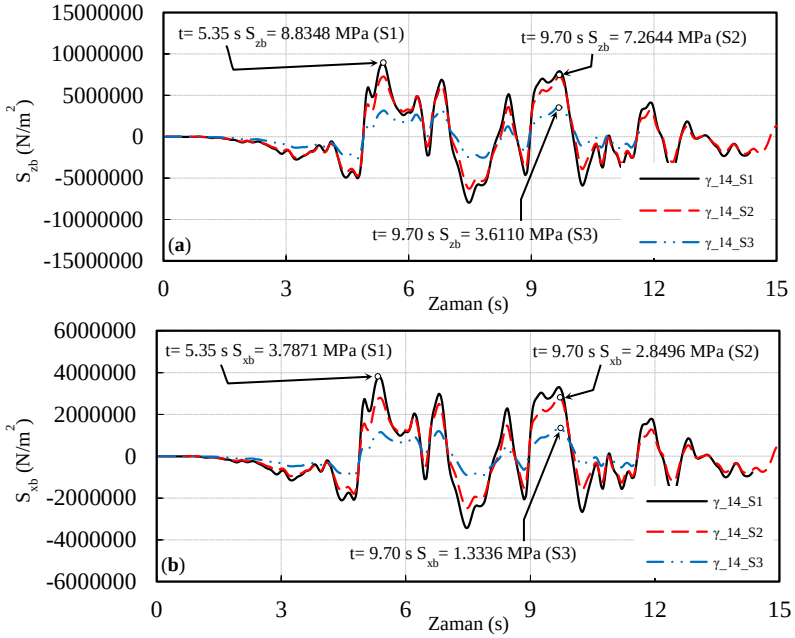
Şekil 3. S1, S2 ve S3 temel zemini sistemi koşullarında yatay yerdeğiştirmelerin duvar yüksekliği boyunca değişimleri.

S1, S2 ve S3 temel zemini sistemi koşullarında konsol istinat duvarının tepe noktasının yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri Şekil 4'de verilmektedir. Şekil 4'de temel zemini rijitliğindeki değişime bağlı olarak davranış şekli açısından kayda değer bir farklılık gözükmemekte, ancak yerdeğiştirmelerin en büyük değerlerinde önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin; en büyük yerdeğiştirme değeri S1 zemin sisteminde 0.0429 m olarak elde edilirken, bu değer zemin rijitliğindeki artışa bağlı olarak S2 zemin sisteminde yaklaşık % 42 oranında azalarak 0.0250 m, S3 zemin sisteminde ise S1 zemin sistemine göre yaklaşık % 83 oranında bir azalmayla 0.0074 m olarak elde edilmektedir. Yerdeğiştirmelerdeki bu farklılıklar zemin-yapı etkileşiminin istinat duvarı tasarımı için dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğuna bir kez daha işaret etmektedir.



Şekil 4. S1, S2 ve S3 temel zemini sistemi koşullarında yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri.

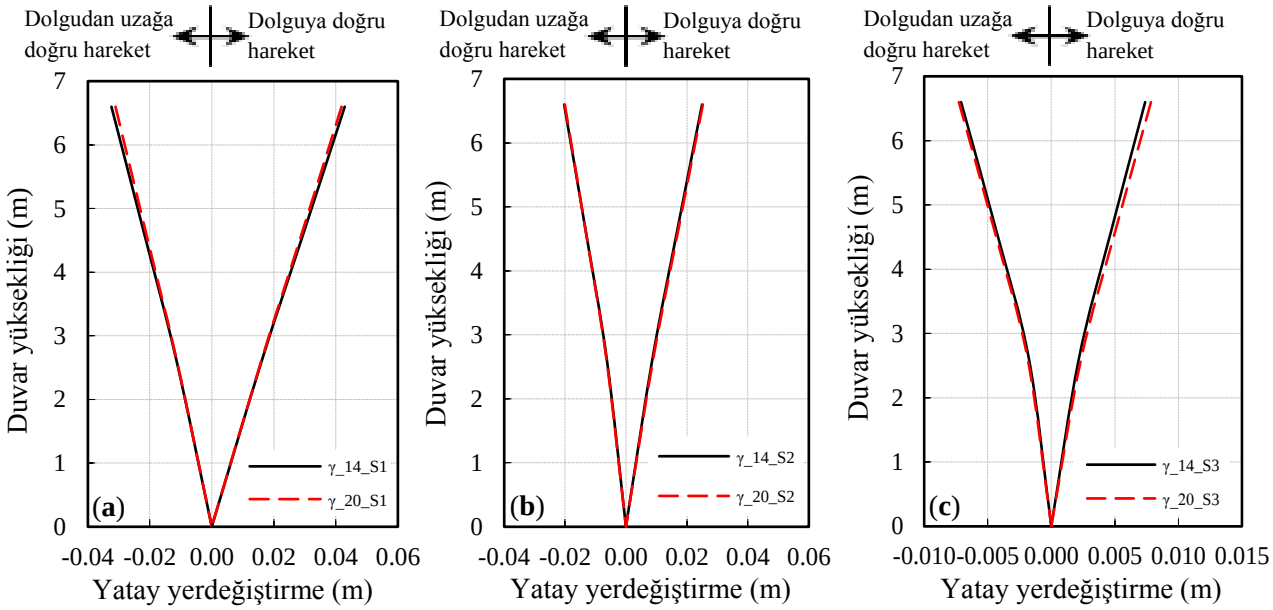
Zemin-yapı etkileşiminin duvar kritik kesitlerinde oluşan gerilmeler üzerindeki etkisini görebilmek için gerilmelerin zamanla değişimleri de incelenmiştir. Bu değerlendirmeye bir örnek olarak Şekil 5'de z (düşey) ve x (yatay) doğrultularında istinat duvarı arka yüzünde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimleri verilebilir. Söz konusu şekilden temel zemini koşullarındaki değişime bağlı olarak meydana gelen gerilmelerin eşlenik bir karakter sergilediği görülmektedir. Şekil 5a'da gerilmelerin en büyük değerleri incelendiğinde, S1 zemin sistemi için en büyük gerilmenin çekme olarak 8.8348 MPa, S2 zemin sisteminde yaklaşık % 18 oranında bir azalışla yine çekme olarak 7.2644 MPa, S3 zemin sisteminde ise S1 zemin sistemine göre yaklaşık % 59 oranında bir azalmayla yine çekme olarak 3.6110 MPa olarak gerçekleştiği görülmektedir. Benzer irdelemeler Şekil 5b'den x doğrultusundaki yatay gerilmeler üzerinden de yapılabilir. Davranış değişim eğilimi benzer olduğundan bu değerler için tekrar oransal bir karşılaştırma yapılmamaktadır. Ayrıca etkileşime bağlı olarak hem düşey hem de yatay doğrultulardaki en büyük tepkilerin gerçekleşme zamanlarındaki farklılıklar da göze çarpmaktadır. Örneğin S1 zemin sisteminde 5.35 s'de gerçekleşen en büyük tepki, S3 zemin sisteminde 9.70 s'de gerçekleşmektedir. Yapılan tüm bu irdelemeler, konsol istinat duvarının sismik davranışı üzerinde zemin-yapı etkileşim etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 5. S1, S2 ve S3 temel zemini sistemi koşullarında a) z doğrultusunda b) x doğrultusunda duvar arka yüzündeki gerilmelerin zamanla değişimleri.

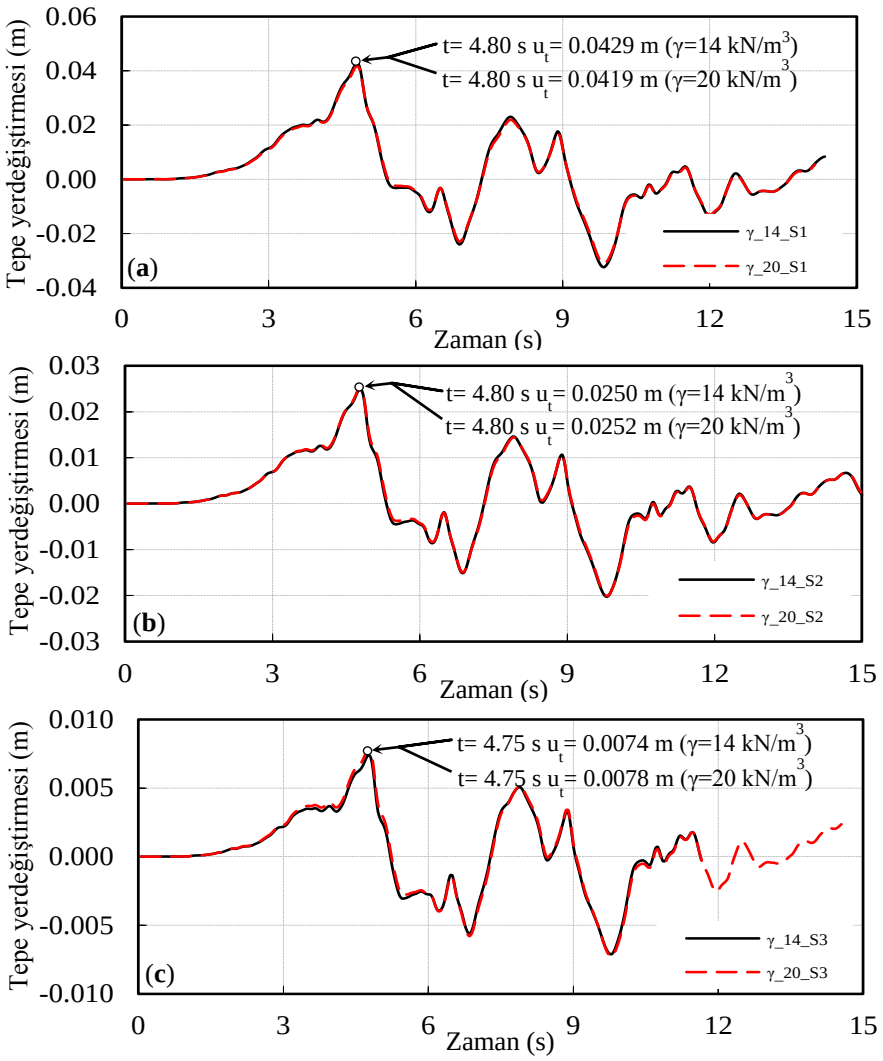
3.2. *Dolgu Zemini Birim Hacim Ağırlığı Değişiminin Etkileri*

Önerilen üç boyutlu sonlu elemanlar modeli yardımıyla üç farklı temel zemini sistemine göre gerçekleştirilen çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin istinat duvarı yüksekliği boyunca değişimleri iki farklı dolgu zemini birim hacim ağırlığı değeri için Şekil 6'da verilmektedir. Bu şekilden istinat duvarı deprem davranışının, dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık değeri değişiminden kayda değer bir şekilde etkilenmediği ve yatay yerdeğiştirmelerdeki değişimin ihmal edilebilir düzeylerde kaldığı görülmektedir.



Şekil 6. a) S1, b) S2, c) S3 zemin sistemi koşullarında yatay yerdeğiştirmelerin duvar yüksekliği boyunca değişimleri üzerinde dolgu birim hacim ağırlığı değişiminin etkileri.

Dolgu zemini birim hacim ağırlığı değişimine bağlı olarak yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri üç farklı temel zemini sistemi için Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'den gerek davranış şekli gerekse yerdeğiştirmelerin en büyük değerleri açısından önemli bir farklılık olmadığı açıkça görülmektedir. Örneğin; Şekil 7a'da görüldüğü üzere, S1 zemin sisteminde γ=14 kN/m^3 birim hacim ağırlık değeri için en büyük yerdeğiştirme değeri 0.0429 m düzeyinde gerçekleşirken, bu değer birim hacim ağırlık değerindeki yaklaşık % 43'e karşılık gelen 6 kN/m^3 artışla, γ=20 kN/m^3 değeri için sadece % 2 oranında azalarak 0.0419 m olarak meydana gelmektedir. Benzer değerlendirmeler Şekil 7b ve c'den S2 ve S3 zemin sistemleri için yapıldığında, birim hacim ağırlık değerindeki artışa bağlı olarak yerdeğiştirme tepkilerinin, S1 zemin sistemi için elde edilenin aksine, artma eğiliminde olduğu ve söz konusu artış oranlarının sırasıyla % 1 ve % 5 olarak gerçekleştiği görülmektedir. Tepkilerdeki kimi zaman azalma kimi zamansa artma eğilimi, deprem ile yerel zemin koşullarının karmaşık ve karşılıklı etkileşimini açığa çıkaran önemli bir bulgu olarak göze çarpmaktadır. Ancak elde edilen tepki değişimlerinden, burada incelenen aralık için, birim hacim ağırlık değişiminin duvar dinamik yatay yerdeğiştirmeleri üzerinde ihmal edilebilir düzeylerde bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

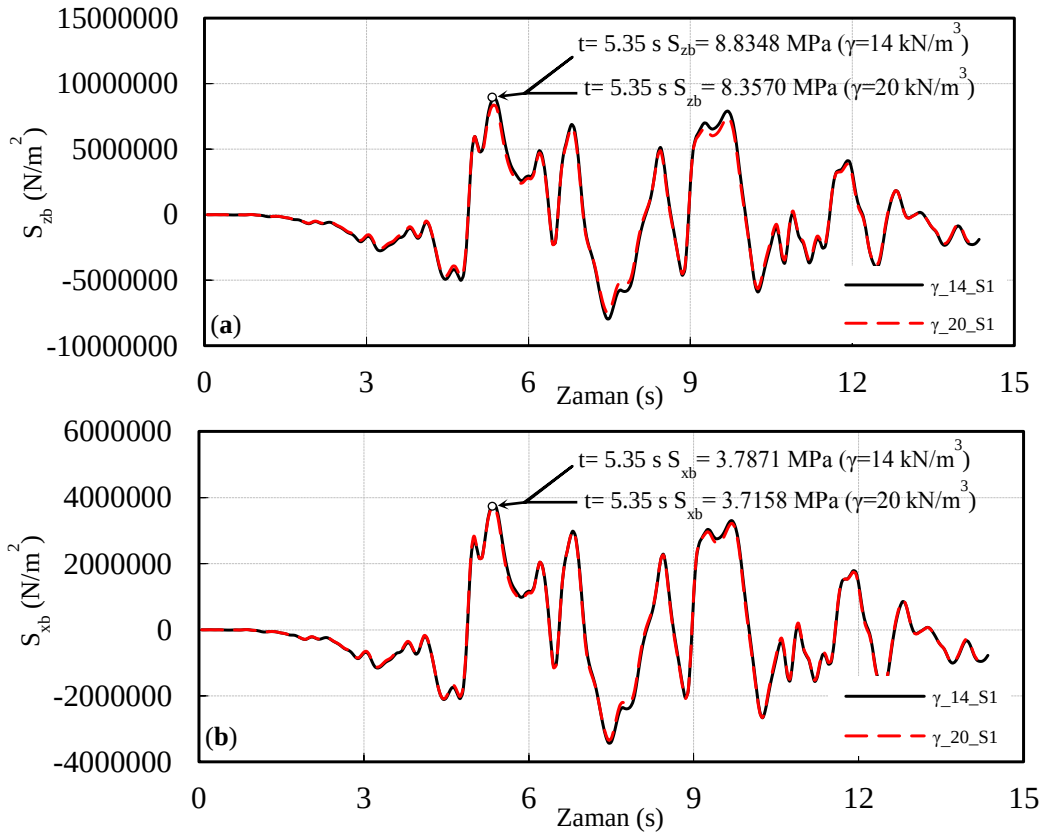


Şekil 7. a) S1, b) S2, c) S3 zemin sistemi koşullarında yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri üzerinde dolgu birim hacim ağırlığı değişiminin etkileri.

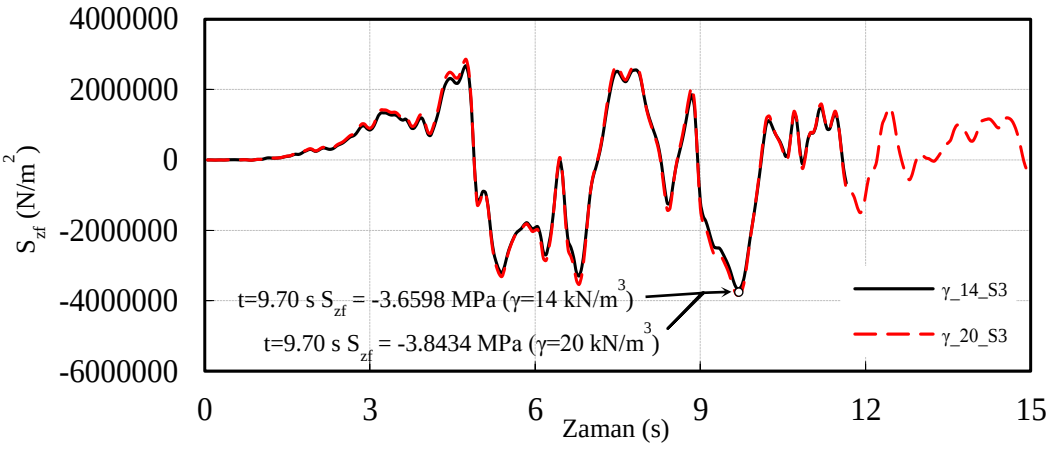
Konsol duvar sismik davranışı üzerinde dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık değeri değişiminin etkileri duvar kritik kesitlerinde her bir doğrultuda meydana gelen gerilmeler üzerinden de değerlendirilebilir. Burada tüm doğrultulardaki gerilmelerin zamanla değişimlerini grafiksel olarak vermek çalışmanın hacmini oldukça artıracağından bazı örneklemeler yapılarak genel davranışı ortaya koyabilecek değerlendirmeler sunulmaktadır. Bununla birlikte her bir doğrultudaki ilgili gerilme tepkilerinin en büyük değerleri ve gerçekleşme zamanları Tablo 2-4'de görülmektedir.

Şekil 8'de S1 zemin sistemi için z ve x doğrultularında istinat duvarı arka yüzünde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimleri verilmektedir. Söz konusu şekilden dolgu zemini birim hacim ağırlığı değişimine bağlı olarak davranış açısından hiçbir farklılığın olmadığı, en büyük değerler açısından ise küçük mertebelerde farklılıkların olduğu açıkça görülmektedir. Örneğin; Şekil 8a'da γ=14 kN/m^3 birim hacim ağırlık değeri için en büyük gerilme değeri çekme olarak 8.8348 MPa düzeyinde gerçekleşirken, aynı değer γ=20 kN/m^3 değeri için yaklaşık % 5 oranında azalarak 8.3570 MPa olarak meydana gelmektedir. Benzer değerlendirme Şekil 8b'den x doğrultusundaki gerilmeler dikkate alınarak yapıldığında aynı eğilim göze çarpmakta, ancak tepki değişiminin % 2 düzeyinde kaldığı görülmektedir.

Şekil 9'da S3 zemin sistemi için z doğrultusunda istinat duvarı ön yüzünde meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimleri verilmektedir. Şekil 9'dan birim hacim ağırlık değerindeki artışa bağlı olarak gerilme tepkilerinin, S1 zemin sistemi için elde edilenin aksine, artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Örneğin; γ=14 kN/m^3 birim hacim ağırlık değeri için en büyük gerilme değeri basınç olarak 3.6598 MPa bulunurken, aynı değer γ=20 kN/m^3 değeri için yaklaşık % 5 oranında artarak yine basınç olarak 3.8434 MPa olarak elde edilmektedir.

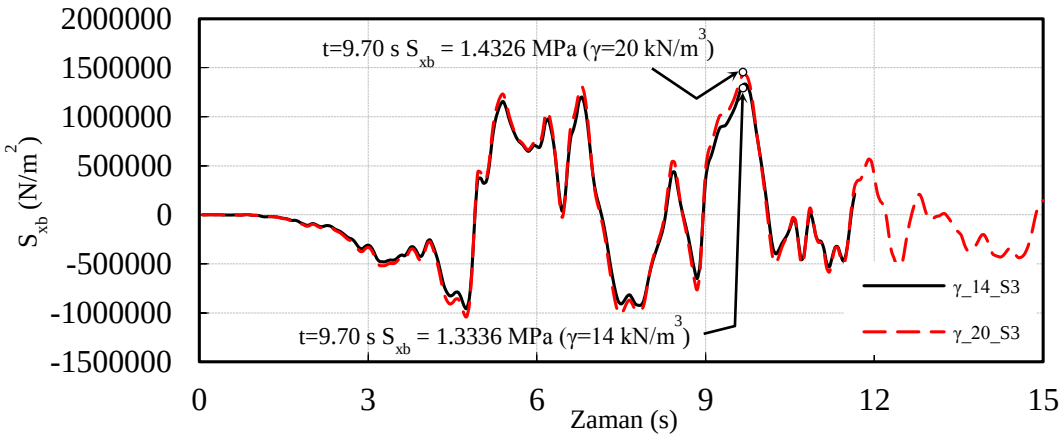


Şekil 8. S1 zemin sistemi için a) z doğrultusunda b) x doğrultusunda istinat duvarı arka yüzündeki gerilmelerin zamanla değişimleri üzerinde dolgu birim hacim ağırlığı değişiminin etkileri.



Şekil 9. S3 zemin sistemi için z doğrultusunda istinat duvarı ön yüzündeki gerilmelerin zamanla değişimleri üzerinde dolgu birim hacim ağırlığı değişiminin etkileri.

Şekil 10'da S3 zemin sistemi için x doğrultusunda istinat duvarı arka yüzünde oluşan gerilmelerin zamanla değişimleri verilmektedir. Bu şekilden de birim hacim ağırlık değerindeki artışla, gerilme tepkisinin şiddetinin arttığı ve artış oranının yaklaşık % 7 mertebesinde gerçekleştiği görülmektedir. Gerilmeler üzerine yapılan tüm irdelemelerden, burada incelenen aralık için, dolgu birim hacim ağırlığı değişiminin tepkiler üzerinde ihmal edilebilir seviyelerde bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 10. S3 zemin sistemi için x doğrultusunda istinat duvarı arka yüzündeki gerilmelerin zamanla değişimleri üzerinde dolgu birim hacim ağırlığı değişiminin etkileri.

4. Sonuçlar

İstinat yapılarının dinamik davranışının belirlenmesi ve yanal zemin basınçlarını güvenli bir şekilde karşılayabilecek yapının tasarımı, zemin-yapı etkileşimi açısından geoteknik deprem mühendisliği uygulamaları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Coğrafyasının hemen hemen tamamı aktif deprem kuşaklarında yer alan ülkemizde inşa edilecek olan istinat yapılarına gelen ek dinamik kuvvetlerin de tasarım aşamasında dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca zemin özelliklerinin ve zeminle ilgili problemlerden kaynaklanabilecek risklerin belirlenmesi yapı tasarımı için oldukça önemli bir husustur. Bu çalışmada zemin-yapı etkileşiminin ve dolgu zemini birim hacim ağırlığı değişiminin konsol bir istinat duvarının sismik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üç farklı temel zemin sistemi ve dört farklı dolgu zemini birim hacim ağırlığı değeri dikkate alınarak ANSYS genel amaçlı yapısal analiz programı aracılığıyla sonlu elemanlar yöntemine dayalı sismik çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Konsol duvarın sismik tepkisi duvar yatay yerdeğiştirmeleri ile duvar ön ve arka yüzlerinde kritik kesitlerde meydana gelen gerilmeler baz alınarak değerlendirilmiştir.

Temel zemini rijitliğindeki değişime bağlı olarak gerek yerdeğiştirmelerin gerekse gerilmelerin şiddetlerinin önemli mertebelerde değiştiği görülmüştür. Bu nedenle yerel zemin koşullarının depremlerde oluşan kuvvetli yer hareketlerini önemli ölçüde etkileyebileceği ve dolayısıyla zemin-yapı etkileşiminin konsol istinat duvarlarının sismik tasarımı için dikkate alınması gereken önemli bir parametre olduğu ifade edilebilir.

Dolgu zeminine ait birim hacim ağırlık değerinin artmasıyla yatay yerdeğiştirme ve gerilme tepkilerinin bazen artma bazen de azalma eğiliminde oldukları görülmüştür. Bu durum deprem ile yerel zemin koşullarının karmaşık ve karşılıklı etkileşimi ile ilişkilendirilebilir. Ancak tepkilerin şiddetlerindeki değişimler değerlendirildiğinde, bu çalışma kapsamında incelenen aralık için, birim hacim ağırlık değeri değişiminin duvar dinamik davranışı üzerinde ihmal edilebilir düzeylerde bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Kaynaklar

Akkar, S., 2008. Türkiye'de sismik aktivite ve tasarım spektrumları, Binalar için deprem mühendisliği temel ilkeler, Canbay, E., Ersoy, U., Özcebe, G., Sucuoğlu, H. ve Wasti, S.T. (eds.), ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, Türkiye, pp. 17-34.

ANSYS 13.0, 2010. ANSYS Inc., Canonsburg, PA.

Aydınoğlu, M.N., 1977. Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Çakır, T., 2010. Zemin-Depo Dış Duvarı-Sıvı Sistemlerinin Deprem Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Çakır, T., 2013. Evaluation of the effect of earthquake frequency content on seismic behavior of cantilever retaining wall including soil-structure interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 45, 96-111.

Çakır, T., 2014. Influence of wall flexibility on dynamic response of cantilever retaining walls, Structural Engineering and Mechanics, 49, 1, 1-22.

DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.

EAK-2000, 2003. Greek Seismic Code, Earthquake Planning and Protection Organization, Athens.

Eurocode-8, 2003. Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 5: Foundations, Retaining Structures and Geotechnical Aspects, Final draft, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Gazetas, G., Psarropoulos, P.N., Anastasopoulos, I. ve Gerolymos, N., 2004. Seismic behaviour of flexible retaining systems subjected to short-duration moderately strong excitation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 537-550.

Giarlelis, C. ve Mylonakis, G., 2011. Interpretation of dynamic retaining wall model tests in light of elastic and plastic solutions, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, 16-24.

IS-1893, 2002. Indian Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures, Part 1, General Provisions and Buildings.

Kloukinas, P., Penna, A., di Santolo, A.S., Bhattacharya, S., Dietz, M., Dihoru, L., Evangelista, A., Simonelli, A.L., Taylor, C. ve Mylonakis, G., 2012. Experimental Investigation of Dynamic Behavior of Cantilever Retaining Walls, Second International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, May 28-30, Taormina, Italy, paper no. 13.08.

Lin, Y.L., Leng, W.M., Yang, G.L., Zhao, L.H., Li, L. ve Yang, J.S., 2015. Seismic active earth pressure of cohesive-frictional soil on retaining wall based on a slice analysis method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 70, 133-147.

Liu, Q., Tian, Y. ve Deng, F., 2014. Dynamic analysis of flexible cantilever wall retaining elastic soil by a modified Vlasov–Leontiev model, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 63, 217-225.

Lysmer, J. ve Kuhlemeyer, R.L., 1969. Finite dynamic model for infinite media, ASCE Engineering Mechanics Division Journal, 95, 859-877.

Madabhushi, S.P.G. ve Zeng, X., 2007. Simulating seismic response of cantilever retaining walls, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, , 133, 539-549.

Mononobe, N. ve Matsuo, H., 1929. On the determination of earth pressures during earthquakes, Proceedings of World Engineering Congress, 9, Japan. pp.179-187.

Nazarian, H.N. ve Hadjian, A.H., 1979. Earthquake-induced lateral soil pressures on structures, ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105, 1049-1066.

Okabe, S., 1924. General theory of earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam, Journal of Japanese Society of Civil Engineering, 10, 1277-1323.

Psarropoulos, P.N., Klonaris, G. ve Gazetas, G., 2005. Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, 795-809.

Sucuoğlu, H., 2008. Türkiye'de sismik aktivite ve tasarım spektrumları, Binalar için deprem mühendisliği temel ilkeler, Canbay, E., Ersoy, U., Özcebe, G., Sucuoğlu, H. ve Wasti, S.T. (eds.), ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, Türkiye. pp. 35-56.

Theodorakopoulos, D.D., Chassiakos, A.P. ve Beskos, D.E., 2001. Dynamic pressures on rigid cantilever walls retaining poroelastic soil media. Part I: First method of solution, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 315-338.

Veletsos, A.S. ve Younan, A.H., 1994. Dynamic soil pressures on rigid vertical walls, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23, 3, 275-301.

Veletsos, A.S. ve Younan, A.H., 1997. Dynamic Response of Cantilever Walls, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 123, 2, 161-172.

Wilson, P. ve Elgamal, A., 2015. Shake table lateral earth pressure testing with dense c-ϕ backfill, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 71, 13-26.

Xu, S.Y., Shamsabadi, A. ve Taciroglu, E., 2015. Evaluation of active and passive seismic earth pressures considering internal friction and cohesion, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 70, 30-47.