

GELİŞTİRİLMİŞ LAMİNER DENEY DÜZENEGİNDEKİ ZEMİN MODELİNİN DİNAMİK YÜK ALTINDA PERFORMANS ANALİZLERİ

PERFORMANCE ANALYSIS OF THE SOIL MODEL UNDER DYNAMIC LOAD IN THE ENHANCED LAMINAR EXPERIMENT SETUP

M. Şamil GÜNDÜZ¹, E. Ece ESELLER BAYAT²

ÖZET

Bu çalışma, büyük ölçekli zemin numunelerinin ve yapı-zemin etkileşimi konulu deneylerin gerçekleştirilmesi için tasarlanan 1.6mx1.6m taban alanlı ve 1.6m yükseklikli yeni bir deney düzeneğinde hazırlanacak olan zemin numunesinin dinamik yük altındaki performans analizlerini içermektedir. Bu amaçla, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Sarsma Masasının kapasitesi göz önünde bulundurularak, prototip ve model zemin modelleri için ölçek faktörleri belirlenmiş ve zemin modelinin özelliklerine karar verilmiştir. Model ve prototip zemin numunesi arasındaki geometrik ilişki baz alınarak hesaplanmış 1/10 uzunluk ölçeğiyle ölçeklenen parametreler ile birlikte model ve prototip zemin modellerinin harmonik ve deprem yükleri altındaki davranışları bir boyutlu yer-tepki analizleri incelenmiştir. Elde edilen veriler ile model ve prototip zemin numunelerinin başarıyla ölçeklendiği görülmüştür. Orijinal ve ölçeklenmiş harmonik hareket ve deprem kayıtlarının sonuçları incelendiğinde ivme ve deplasman çıktılarının tutarlı olduğu görülmüştür. Bu sayede zemin numunelerinin bir boyutlu yer-tepki analiz sonuçlarıyla, gerçekleştirilecek yapı-zemin etkileşimi deneyleri sonuçlarının gerçek sahaya karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır. Geoteknik deprem mühendisliği açısından büyük ölçekli zemin modellerinin zemin etkileşim analizlerine ve model-prototip zemin modellerinin eşdeğer lineer analiz sonuçlarının karşılaştırılmasına bu çalışmada dikkat çekilmiş ve tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arazi zemin modeli, geoteknik deprem mühendisliği, ölçek faktörü, zemin tepkisi analizi

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul – gunduzmehm@itu.edu.tr (Sorumlu Yazar)

<https://orcid.org/0000-0002-8310-3421>

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - ebayat@itu.edu.tr

<https://orcid.org/0000-0002-5774-4911>

ABSTRACT

This study includes the performance analysis of the soil sample, which will be prepared in a new experimental setup designed for large-scale soil samples and experiments on structure-soil interaction, under dynamic load. For this purpose, the scale factors for prototype and model soil samples were determined and the characteristics of the soil model were decided, considering the capacity of the Shaking Table in the Structural and Earthquake Engineering Laboratory of the Civil Engineering Faculty of Istanbul Technical University was taken into account. The behavior of the scaled model and prototype soil models under harmonic and earthquake loads was investigated by one-dimensional ground-response analysis. In terms of geotechnical earthquake engineering, the site response analysis of large-scale soil models and the comparison of equivalent linear analysis results of model-prototype soil models are drawn attention and discussed in this study.

Keywords: *Ground soil model, geotechnical earthquake engineering, scale factor, soil response*

1. GİRİŞ

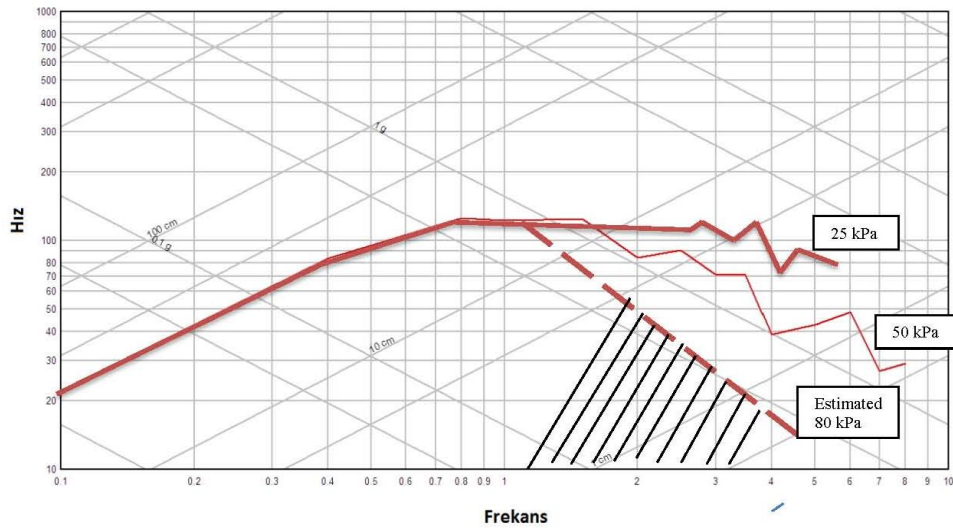
Depreme yönelik mühendislik tasarımlarında zemin davranışı ve zemin etkisi literatürde ve günümüz çalışmalarında artarak kendine yer bulmaktadır. 1989 Loma Prieta, 1994 Northridge, 1995 Kobe gibi depremlerden sonra yerel zemin şartlarının önemi mühendislik tasarımlarında önemli bir yer tutmaya başlamıştır. EuroCod8, International Building Code, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği gibi kabul görmüş yönetmelikler zemin sınıflandırması ve dizayn prosedürleri üzerine aynı prensip ve yaklaşımları benimsemektedirler. Zemin davranışı üzerine temel amaç zemin sınıfı ve sismisite tipine göre sınıflandırılmış ampirik spektrumları oluşturmaktır. (Pitilakis 2012)

Kum numunenin çevrimsel yük altında davranışını formüle etmek geoteknik mühendisliğinin en büyük zorluklarından biridir. Literatür çalışmalarını incelediğimizde çevrimsel yüklemdeki farklı frekanslarda sıkışabilirlik, kayma modülü, sekant modülü, sönümlleme oranının değişimi, kesme dayanımı ve sıvılaşma gibi olgulardan dolayı zeminin dinamik yük altındaki davranışına yönelik farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Çevrimsel yüke maruz kalan zeminlerin; rijitliği, kayma dayanımı ve boşluk oranı gibi özellikleri etkilenecektir. Kum zemin granüler bir malzeme olması sebebiyle üzerine uygulanan yükü daneden daneye iletir. Kumun çevrimsel yük altında gerilme-şekil değiştirme davranışı yüke maruz kalınan süre boyunca ve öncesinde dane temaslarının fizyokimyasal ve jeomorfolojik karakteristisine, temas kuvvetinin yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak değişecektir (Parthiban, 2016). Deprem dalgalarının genlik, frekans içeriği ve süresi gibi öne çıkan özellikleri zemin içerisinde ilerlerken yerel zemin şartlarından etkilenebilir (Kramer, 1996). Depremin yapısını incelediğimizde; kırılma mekanizması, deprem dalgalarının kat ettiği mesafe, jeoloji ve yerel zemin etkilerinin birleşimidir. Yerel zemin etkisini anlamak için yerel zemin etkisini oluşturan parametreler, anakaya üzerindeki zemin katmanının kalınlığı, zeminin alt katmanlarının değişimi ve kalınlıkları, zemin katmanlarının sahip oldukları özellikleridir. (Biringen 2000)

Depremi ve yerel zemin şartlarını oluşturan çok sayıda parametre göz önüne alındığında, mühendislik tasarımlarında kullanılabilecek yaklaşım ve bağıntılara ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu ihtiyaca yönelik tasarlanan yeni deney düzeneğinde hazırlanması planlanan zemin numunesinin dinamik yük altında performansı incelenmiştir. Kum numunesinin zemin parametreleri, prototip zemin modeline göre ölçeklenmiş ve model zemin numunesinin özellikleri bu çalışma kapsamında belirlenmiştir. Oluşturulan model zemin numunesinin harmonik ve ölçeklenmiş deprem kayıtları kullanılarak oluşturulan dinamik performans analizleri ve çıktıların prototip zemin modeliyle karşılaştırılmaları nümerik çalışmalarla sunulmuştur. Elde edilen nümerik çıktılar sayesinde deney düzeneğinde elde edilecek model zemin numunesinin deneysel verileri yorumlanabilecek ve gerçek saha koşulları altında zemin performansı tahmin edilebilecektir.

2. TASARIMA ESAS GELİŞTİRİLMİŞ LAMİNAR DENEY DÜZENEGİNİN İNCELENMESİ

Deney düzeneğinde İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ARI-1 sarsma masası kullanılacaktır. ARI-1 sarsma masasına ait bileşenler; rijit tabla, taşıyıcı kaide kirişleri, hidrolik veren tepki çerçevesi, kazıklar ve yataklardır. Dinamik deneylerimizin frekans içeriği ve genliğini göz önüne alacak olursak kısa bir süre zarfında yüksek sayıda veriyi yüksek çözünürlükte toplaması gerekmektedir. Bu gerekliliği karşılamak adına TESTBOX2000 (data logger), ControlBox (dijital servo kontrol ünitesi) donanımlarını ve TESTLAB ShakeTable (sarsma masası kontrol), TESTLAB NETWORK (dinamik veri toplama) yazılımlarını kullanmaktadır. (Mahdavi 2014) ARI-1 sarsma masası güncel olarak kullanılmakta olup yeterliliği kanıtlanmıştır.



Şekil 1 Sarsma tablası kapasite grafiği

DeepSoil programında tek boyutlu hazırlanan 1.5 metre kalınlığa sahip zemin profilinin doğal frekansı orta sıklıkta kum numunesi için 19Hz olarak hesaplanmıştır. Zemin tepkisini gerçeğe olabildiğince yakın görebilmek adına zemin numunesinin doğal frekansına yakın frekansa sahip girdi hareketi seçilmesi tasarlanmıştır. Ancak mühendislik tasarımlarının en önemli adımlarından biri de sınır koşullarının bilinmesi ve buna göre tasarım yapılmasıdır. Sarsma masasının kullanımı deney düzeneğinin dinamik performansını doğrudan

etkilemektedir. Girdi hareketi olarak seçilecek ivme-zaman kayıtlarının Şekil 1’de verilen sarsma masası kapasite sınırlarına uygun olarak seçilmesi gerekmiştir.

3. MODEL ZEMİN NUMUNELERİ İÇİN ÖLÇEK FAKTÖRLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

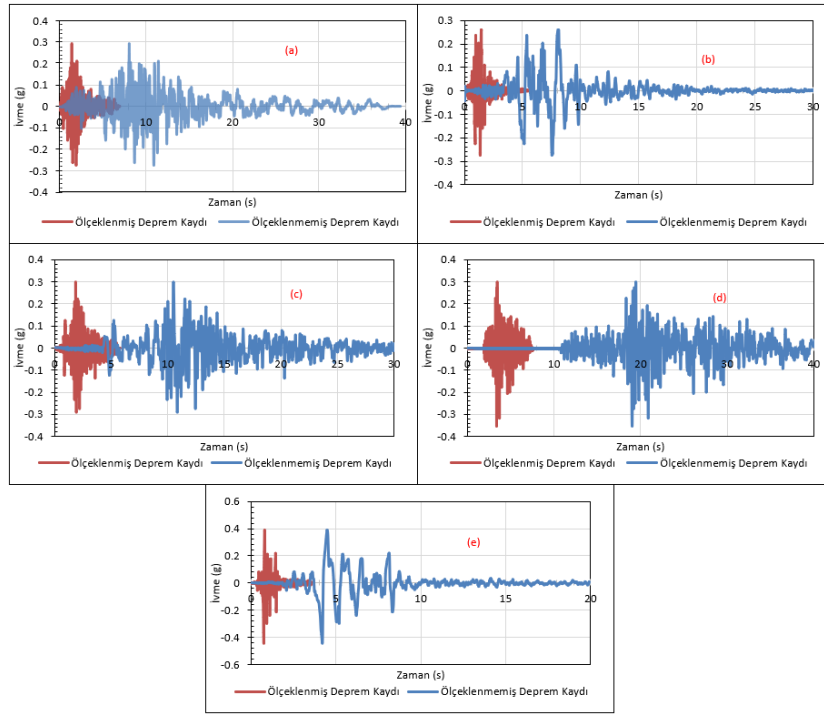
Laboratuar ortamında gerçekleştirilecek zemin deneylerinde optimum tasarımı yapmak için gerçek sahayı simüle edecek model zemin numuneleri hazırlanmaktadır. Model zemin numunesinin şartlarını belirlemek ve sonuçlarını gerçek sahayla karşılaştırabilmek için gerçek saha şartları ölçeklenmelidir. Model zemin numunesinin derinliği 1.5 metre ve prototip zemin modelimizin derinliği 15 metre olarak tasarlanmıştır.

Oluşturulan zemin modellerinin toplam tabaka kalınlıklarının farklı olmasından dolayı zeminlerin doğal frekansları, kayma dalgası hızları gibi özellikleri değişmektedir. Zemin modelleri arasındaki bu geometrik ilişkiden ölçek faktörleri belirlenmiştir. Gerçek sahayı yansıtmaya yönelik ölçek faktörleri üzerine yapılmış literatür çalışmaları incelendiğinde İai (1989), Wood (2002) ve Fiorentino (2019)’da belirtilen bağıntılar ve yaklaşımlar üzerine çalışılmıştır. Wood (2002)’un ölçek faktörü bağıntılarında n ve α değerleri üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır. Gerçek saha ve model zemin numunesi arasındaki geometrik ilişkiden $\frac{(Uzunluk)_{model}}{(Uzunluk)_{prototip}} = n_L = 0.1$ olarak hesaplanmıştır. Üst yapı modellerinde ölçek faktörü hesaplanırken sabit üs değerleri mevcuttur. Geoteknik mühendisliğinde zeminin değişken bir malzeme olması nedeniyle sabit üslü değerler kullanılamamaktadır. Bu nedenle zemin cinsine bağlı olarak değişen üslü değerler α olarak verilmiştir. Wood (2002)’de verilen bağıntılardaki α değeri kum zemin numunelerinde 0.5 olarak alınması önerilmiştir. Hesaplanan uzunluk ölçeği özelinde zemin modellerinde uygulanacak ölçek faktörleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Zemin modeline 0.1 ölçek için belirlenen ölçek faktörleri

	Ölçek Faktörü
Uzunluk	10
Sıklık	1
Rijitlik	3,13
İvme	1
Deplasman	32
Frekans	0,177
Kazık Eğilme Rijitliği	31304

Deney düzeneğinin kapasitesi ve zeminin doğal frekansı göz önüne alınarak sinüzoidal hareketin frekansı 8Hz olarak belirlenmiştir. Model zemin numunesi için seçilen hareketin frekansını gerçek saha için ölçeklediğimizde sinüzoidal girdi hareketinin frekansı 1.42 Hz olarak hesaplanmıştır. Model zemin numunesinin deney düzeneğinde maruz kalacağı dinamik yükleme sadece sinüzoidal girdi hareketi olmayacaktır. Dinamik deneyler kapsamında sarsma masasının kapasitesine uygun olarak seçilmiş 5 adet deprem kaydımızın frekans içeriği Wood (2002) ve Fiorentino (2019)’nun önerdiği faktör katsayıları ile ölçeklenmiştir. Seçilen ivme-zaman kayıtlarının zaman adımları belirlenen ölçek faktörü doğrultusunda düşürülerek deprem kayıtları ölçeklenmiştir. Belirlenen 5 adet deprem kaydının ölçeklenmiş ve orjinal ivme-zaman kayıtları Şekil 2’de verilmiştir. Ölçeklenen deprem kayıtlarının süresi azalmakla birlikte frekans içerikleri artmaktadır.



Şekil 2 Ölçeklenmiş ve orijinal ivme-zaman kaydı; (a) LOMAP_HYN_0.3g Depremi (b) Kobe Depremi (c) Tabas Depremi (d) Düzce Depremi (e) LOMAP_LEX Depremi

4. ZEMİN NUMUNESİNİN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Dinamik yük altında zemin davranışını izlediğimiz çalışma kapsamında, deney düzeneği içerisinde kullanılacak zemin numunesinin parametre ve özelliklerinin doğru belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Orta sıkılıktaki kum numunesinin parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 Kum numunesinin parametreleri	
Parametreler	
Rölatif Sıkılık (D_r)	45
Birim Hacim Ağırlığı (kPa)	17.5
Kayma Mukavemeti Açısı (ϕ)	35
Poisson Oranı	0.35
K_0	0.43
K_{2max}	44.3

Yatay olarak tabakalanmış tek boyutlu zemin modelimizde model zemin numunesi 0.3m derinliğe sahip katmanlardan, gerçek sahayı temsilen 15 metre derinliğe sahip prototip zemin modeli ise 1m derinlikli katmanlardan oluşmaktadır. Katmanların hakim periyodu derinlikle değişmektedir. Zemin numunesinin derinlikle değişen parametrelerini belirleyebilmek için Eşitlik 1'de verilen (Seed ve Idriss 1970) bağıntı kullanılarak G_{max} değeri hesaplanmıştır.

$$G_{max} = 21.7 (K_2)_{max} P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{0.5}$$

$$G_{max} = V_s 2\rho$$

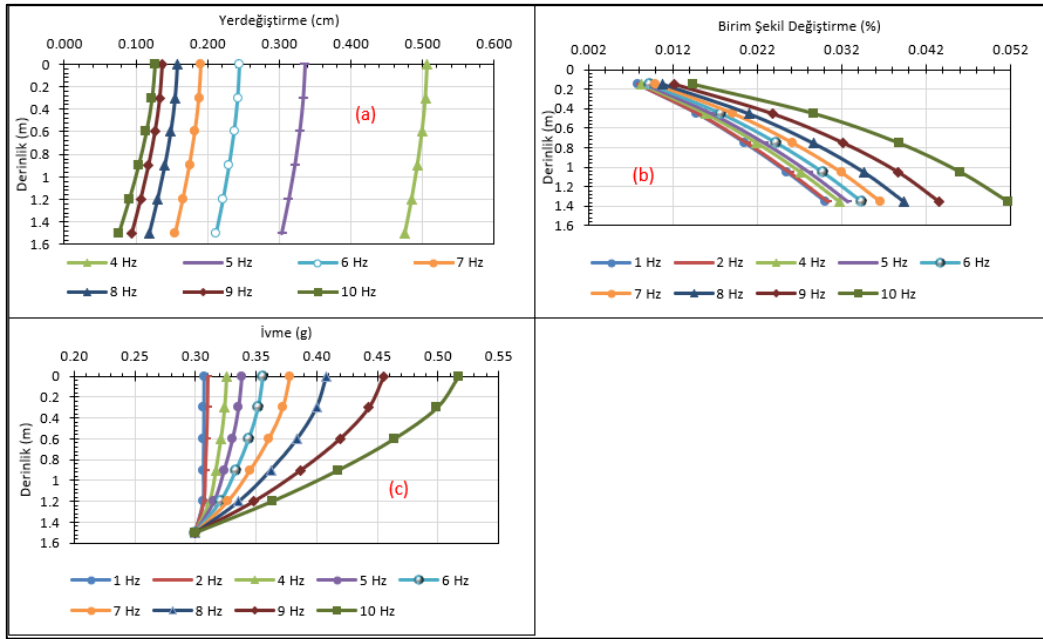
Eşitlik 1

Eşitlik 2

Eşitlik 2'de verilen G_{max} değerinin elastik teoriye göre kayma dalgası olan ilişkisinden katmanların kayma dalgası hızı değeri de hesaplanmıştır.

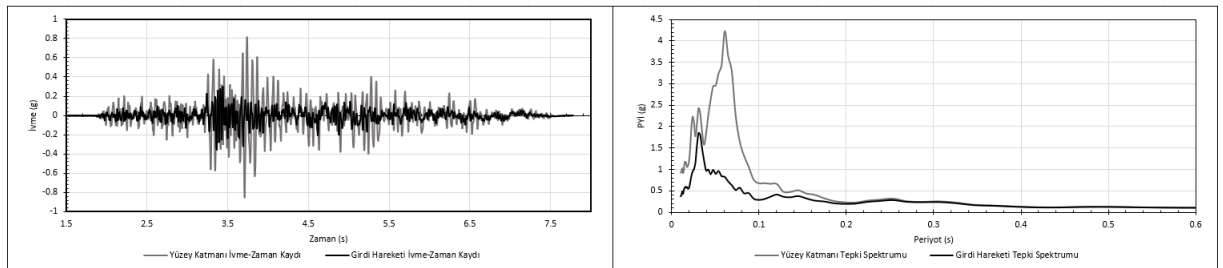
5. DENEY DÜZENEGİNDEKİ MODEL ZEMİN NUMUNELERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Deney düzeneğinde kullanılacak yatay tabakalanmış tek boyutlu zemin modelinin dinamik yük altında davranışını anlayabilmek için DeepSoil V.7 programında analizler yapılmıştır. DeepSoil programında analiz yapabilmek için 4 adımlık analiz süreci tasarım esaslarına göre tamamlanmıştır.



Şekil 3 Model zemin numunesinin farklı frekanslarda (a) yer değiştirmenin derinlikle değişimi (b) birim şekil değiştirmenin derinlikle değişimi (c) ivmenin derinlikle değişimi

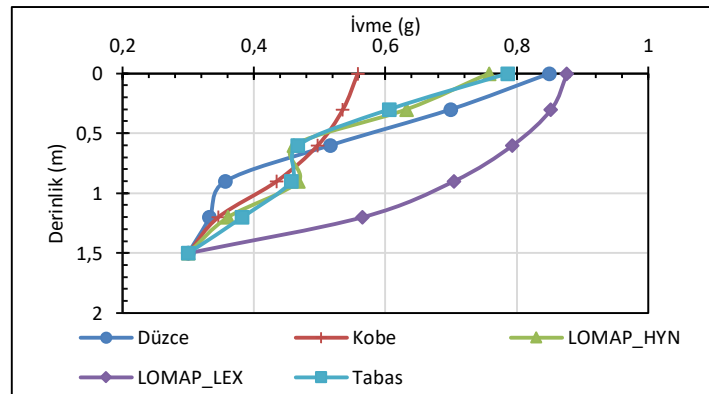
Harmonik hareketin 0.3g'lik ivmesini sabit tutarak frekansını arttırdığımızda harmonik hareketin genliği azalmaktadır. Şekil 3'te verilen grafiğe bakıldığında, frekans arttıkça yer değiştirmenin zemindeki değişim oranı artsa da genliğin azalmasından dolayı deney düzeneğinde ölçülmesi zor yer değiştirme verileri elde edilmektedir. Sarsma masasının kapasitesi, harmonik hareketin genliği, zemin etkisi değerleri göz önünde alındığında harmonik hareketin 8Hz olmasına karar verilmiştir.



Şekil 4 Model zemin numunesinin ölçeklenmiş Düzce deprem performansı; (sol) ivme-zaman sonuçları (sağ) tepki spektrumu sonuçları

Zemin numunesinin harmonik olmayan dinamik yük altındaki davranışını incelemek adına sarsma masasının kapasitesine göre belirlenmiş ve ölçeklenmiş 5 adet deprem kaydı ile performans analizleri yapılmıştır. Şekil 4'te bir örneği verilen tepki spektrum sonuçlarını incelediğimizde model zemin numunesinin hakim periyoduna denk gelen periyottaki yüzey katmanından alınan verilerin zeminin etkisiyle yükseltildiği anlaşılmaktadır. Seçilen deprem kayıtların genliğinde ve frekans içeriğinde sarsma masasının kapasitesi göz önünde bulundurularak sınırlamalar yapılmış olsa da yüzeyden alınan verilerden anlaşılabileceği üzere zeminin özellikleri ve davranışı zemin içerisinde ilerleyen dinamik hareket üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Girdi deprem hareketinin ivme değerlerinin model zemin numunesi içerisindeki değişimi incelenmiştir. Model zemin numunesine uygulanan harmonik ve deprem kayıtlarının aynı genlikte olmasına özen gösterilmiştir. Seçilen harmonik harekette tek bir frekans içeriği varken deprem kayıtları geniş bir frekans içeriği sahip olmaktadır. Deprem kayıtlarının seçilmesi aşamasında hakim periyodu birbirine yakın deprem kayıtları seçilmeye çalışılmıştır. Ancak yüzey ivme-zaman kayıtlarına, tepki spektrumlarına ve Şekil 5'te verilen ivme değerlerinin model zemin numunesi içerisindeki değişimine bakıldığında deprem kayıtlarının zemin içerisindeki davranışı farklılıklar gösterdiği anlaşılmaktadır. Deprem kayıtlarının hakim periyotları her ne kadar yakın seçilmeye çalışılsa da kayıtların frekans içerikleri birbirlerinden farklılıklar gösterdiği görülmektedir.



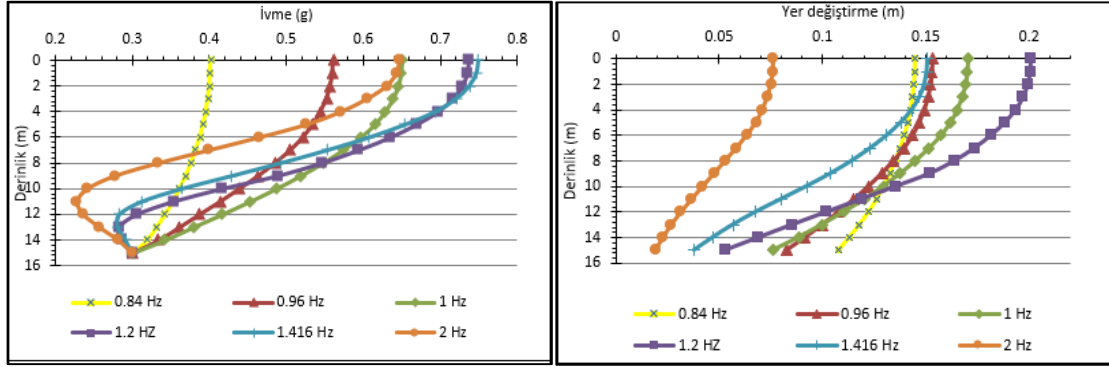
Şekil 5 Girdi hareketi olarak ölçeklenmiş deprem kayıtlarının uygulandığı model zemin numunesinde pik yer ivmesinin derinlikle değişimi

Yüzey katmanlarının ivme-zaman kayıtlarından ve tepki spektrumu sonuçlarından, zeminin dinamik yük altındaki davranışında zemin etkisinin çok önemli bir bileşen olduğu görülmüştür. Bu etkiyle birlikte girdi hareketinin parametrelerinin de zeminin dinamik yük altındaki davranışında önemli bir bileşen olduğu görülmüştür.

6. GERÇEK SAHAYI TEMSİLEN PROTOTİP ZEMİN NUMUNELERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Prototip zemin modelinin performans analizi yapılırken model zemin numunesinin analizinde takip edilen adımlarla analizler yapılmıştır. DeepSoil programında 1 metre derinlikli 15 katmandan oluşan prototip zemin modelinin doğal frekansı 3.3Hz'dür. Model zemin numunesi için seçilen harmonik hareketin frekansı olan 8Hz değerinin, belirlenen ölçek faktörleriyle ölçeklenmesiyle 1.416Hz değerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte prototip zemin modelinin daha geniş frekans aralığı için de harmonik hareket altındaki performansı

incelenmiştir. Belirlenen frekans aralığında prototip zemin modelinin dinamik performans sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

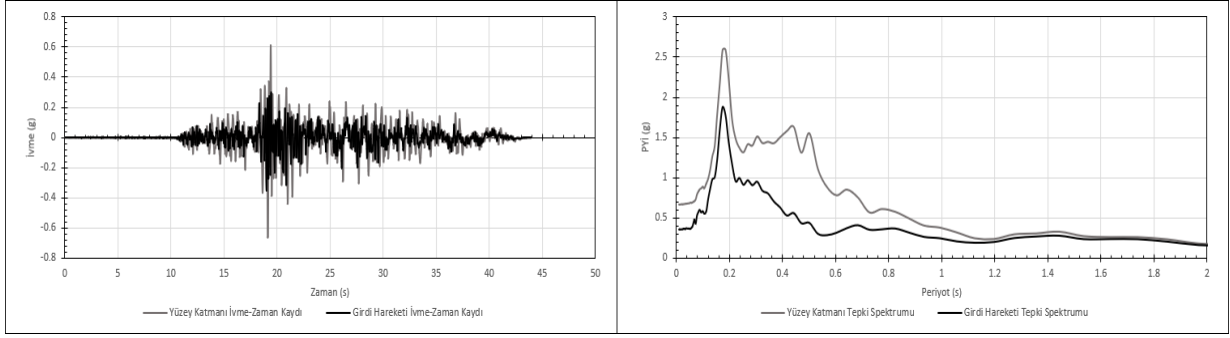


Şekil 6 Prototip zemin modelinin farklı frekanslarda ivme ve yer değiştirmenin derinlikle değişimi

Model zemin numunesine uygulanmak üzere seçilmiş ve ölçeklenmiş olan beş adet depremin orijinal ivme-zaman kayıtlarıyla prototip zemin modelinin performansı analiz edilmiştir. Performans analizlerinin yüzey katmanı sonuçlarına baktığımızda, 15 metrelik prototip zemin modelinde zemin etkisiyle ivme değerleri büyütülmüş olup bu etkinin yoğunluğu zeminin doğal frekansı, rijitliği, sıklığı ve girdi hareketinin frekans içeriği gibi etmenlere bağlıdır.

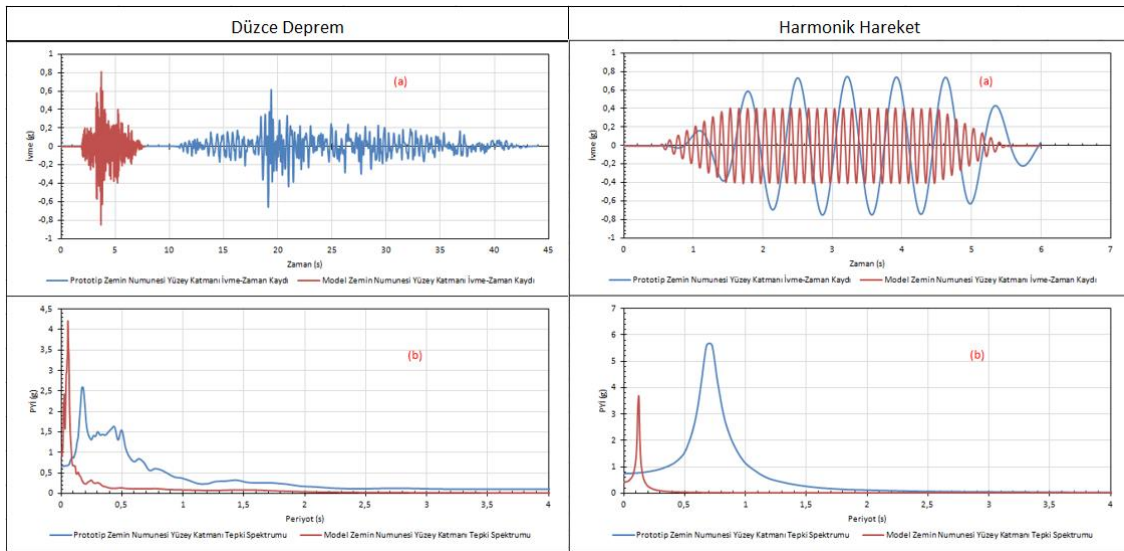
7. ZEMİN NUMUNELERİNİN PERFORMANS ANALİZLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Zeminin dinamik yük altındaki davranışı basit matematiksel denklemlerle ifade edilemediğinden dolayı nümerik modellerle performans analizleri yapılmıştır. Prototip ve model zemin numunesinin dinamik yük altında performansı analiz edilmiştir. Model ve prototip zemin modellerinin yüzey ivme kayıtları ve tepki spektrumları karşılaştırıldığında deprem yükü altında model zemin numunelerinin zemin etkisi prototip zemin modellerinden daha yüksektir. Şekil 7'de harmonik ve deprem yükü (Düzce depremi) altında zemin numunelerinin yüzey ivme kayıtları ve tepki spektrumları verilmiştir. Model zemin numunesinde zeminin doğal frekansı 19.1 Hz, prototip zemin modelinde ise 3.3 Hz'dür. Prototip zemin modellerinde, deprem kayıtlarının frekans içeriğine de bağlı olmak üzere maksimum spektral ivmenin daha yüksek periyotlarda olduğu görülmüştür. Harmonik hareket altında prototip zemin modelinin yüzey katmanı ivme ve tepki spektrumu değerleri model zemin numunesinden elde edilen verilerden daha yüksektir. Dinamik yüklerin frekans içerikleri incelendiğinde, ölçeklenmemiş harmonik hareketin frekansı prototip zemin modelinin doğal frekansına daha yakın olmakla birlikte bu durum deprem yüklerinin frekans içeriklerinde tam tersidir. Deprem yüklerinde ölçeklenmiş deprem kayıtlarının frekans içeriği model zemin numunesinin doğal frekansına daha yakındır. Bu nedenle deprem yükü altında model zemin numunelerinin zemin etkisi daha belirginken, harmonik yük altında prototip zemin modelinin zemin etkisi daha belirgin olduğu Şekil 8'de verilen deprem ve harmonik yük altındaki performans sonuçlarında görülmüştür.



Şekil 7 Prototip zemin modelinin orijinal Düzce deprem performansı; (sol) ivme-zaman sonuçları (sağ) tepki spektrumu sonuçları

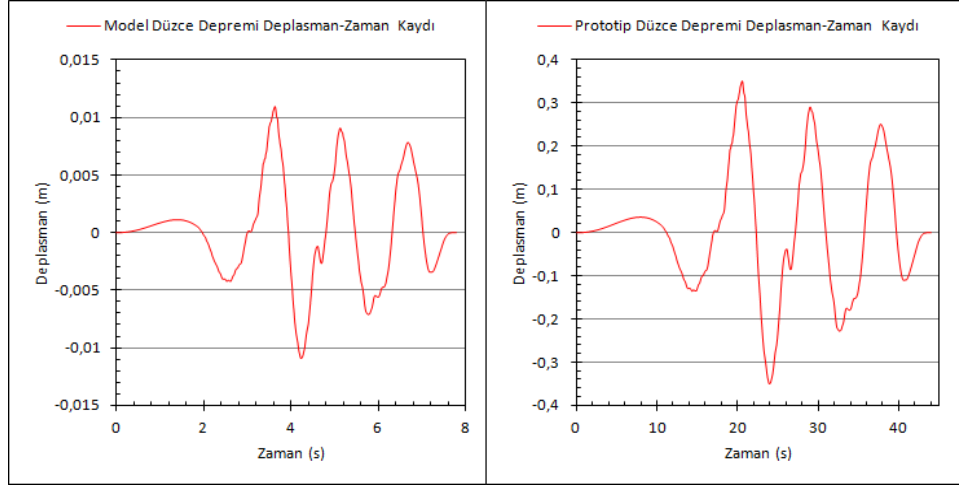
Model ve prototip zemin modellerinin performansları sayesinde deney düzeneğinden elde edilecek deney verilerinin gerçek sahada nasıl bir veri topluluğuna ve zemin davranışına karşılık geleceği anlaşılmaktadır.



Şekil 8 Prototip ve model zemin modelinin Düzce depremi ve harmonik hareket performanslarının karşılaştırılması; (a) ivme-zaman sonuçları (b) tepki spektrumu sonuçları

Ölçeklenen parametrelerin ölçek faktörlerine ne kadar uyumlu olduğuna bakmak için, Düzce depreminin ölçeklenmiş ve orijinal deprem kayıtlarının yer değiştirme-zaman kayıtları incelenmiştir. Şekil 9'da verilen yer değiştirme-zaman kayıtlarına göre orijinal deprem kaydının yer değiştirme değeri ölçeklenmiş deprem kaydının yer değiştirme değerlerinin 32 katıdır. Tablo 1'de verilen ölçek değerlerine dönüp bakıldığında yer değiştirme için verilen ölçek faktörü değerinin elde edilen yer değiştirme oranıyla aynı olduğu görülmüştür. Diğer orijinal ve ölçeklenmiş veriler arasındaki oranlar da ölçek faktörlerinde belirtilen değerlerle aynı olduğu görülmüş olup bu çıktılar sayesinde ölçek faktörlerinin başarılı seçildiği anlaşılmaktadır.

Geliştirilmiş Laminer Deney Düzenegindeki Zemin Modelinin Dinamik Yük Altında Performans Analizleri



Şekil 9 Ölçeklenmiş ve ölçeklenmemiş Düzce depreminin yerdeğiştirme-zaman kayıtları

Zemin modellerinde girdi verilerinin ölçek faktörleriyle başarılı bir şekilde ölçeklendiği görülmüş olmakla birlikte zeminin dinamik yüke maruz kalması sonrasında elde edilen çıktıların değişiklik gösterdiği Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmektedir. Tablolarda verilen model ve prototip zemin numunelerinde yüzey katmanı çıktıları ve oranları incelendiğinde, girdi hareketlerinin genlikleri aynı olsa bile frekans içerikleri, süreleri ve zeminle olan etkileşimleri nedeniyle elde edilecek çıktıların girdi parametrelerine ve zeminin dinamik yük altındaki davranışına özel olarak değiştiği görülmüştür.

Tablo 3 Dinamik yük altında zemin modellerinin yüzey katmanlarından alınan ivme ve tepki spektrumu verilerinin karşılaştırılması

Deprem Kaydı		İvme-Zaman Kaydı İvme Değeri (g)	/	PYİ	/
Düzce	Model	0,81	2,61	4,22	1,63
	Prototip	0,31		2,59	
LOMAP_HYN	Model	0,758	1,78	2,91	1,41
	Prototip	0,425		2,06	
Kobe	Model	0,55	1,25	2,65	1,66
	Prototip	0,44		1,60	
LOMAP_LEX	Model	0,87	1,21	3,36	1,12
	Prototip	0,72		3,01	
Tabas	Model	0,78	1,70	2,58	1,43
	Prototip	0,46		1,80	
Harmonik	Model	0,4	0,53	3,67	0,66
	Prototip	0,75		5,60	

Tablo 4 Dinamik yük altında zemin modellerinin yüzey katmanlarından alınan verilerin karşılaştırılması

Deprem Kaydı		Yer değiştirme _{Maks} (cm)	/
Düzce	Model	1.16	32
	Prototip	37.4	
LOMAP_HYN	Model	0.691	34
	Prototip	23.3	
Kobe	Model	1.16	19
	Prototip	21.6	
LOMAP_LEX	Model	0.48	71
	Prototip	34	
Tabas	Model	0.474	33
	Prototip	15.58	
Harmonik	Model	0.157	96
	Prototip	15.07	

8. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında yeni tasarlanan deney düzeneğinde kullanılacak olan model zemin numunesinin ve gerçek sahayı yansıtacak prototip zemin modelinin nümerik olarak modellenmesi ve dinamik yük altında performanslarının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda orta sıklıktaki kum numunesinin parametreleri belirlenmiş ve belirlenen parametreler ışığında ölçek faktörleri elde edilmiştir. Eşdeğer lineer analiz sonuçlarının karşılaştırılabilir olması adına model ve prototip zemin numuneleri, harmonik ve deprem girdi hareketleri belirlenen ölçek faktörleriyle ölçeklenmiştir. Ölçeklenen veriler doğrultusunda model ve prototip zemin numunelerinin dinamik yük altındaki davranışları incelenmiş ve eşdeğer lineer analiz sonuçları karşılaştırılarak elde edilen sonuçlara dikkat çekilmiştir. Elde edilen sonuçlar sayesinde yeni tasarlanan deney düzeneğinde elde edilecek model zemin numunesi çıktılarının gerçek sahada karşılığı olabilecek veriler ve bağıntılar elde edilmiş olup deney çıktılarının anlamlı yorumlanabilmesi sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR

Dr. Öğr. Üyesi Ece BAYAT, Araş. Gör. Ozan ALVER ve Omid BAGHERİ, geoteknik deprem mühendisliğinde yapı-zemin etkileşimi konusunda yenilikçi çalışmaların içerisinde olabilmemi sağladıkları ve sahip oldukları bilgi ve birikimleri benden esirgemedikleri için teşekkür etmek istiyorum. TÜBİTAK kurumunun sağladığı bütçe ve destek olmasaydı bu proje başlatılamazdı. Son olarak değerli eşim ve aileme bana verdikleri destek ve rehberlik için şükranlarımı sunarım.

KAYNAKLAR

- Biringer E., (2000), "Soil Amplification and Case Studies for Clayey Soils", (Yüksek Lisans Tezi), Bogazici University, İstanbul.
- Fiorentino G., Cengiz C., Luca F., vd., (2019), Shaking Table Tests on an Integral Abutment Bridge Model: Preliminary Results, 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, National Technical University of Athens, Athens.
- İai S., (1989), "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model 1g Gravitational Field", Soils and Foundations, Vol 29, 105-118.
- Kramer, S.L. (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall.
- Parthiban S., Stelmokaitis G., Doroševs V., (2017), "Investigation of Sand Behaviour under Cyclic Loading", Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, Vol 2, 57-64.
- Pitilakis K., Riga E., Anastasiadis A., (2012), "Design spectra and amplification factors for Eurocode 8", Bull Earthquake Eng, Vol 10, 1377–1400.
- Wood D., Crewe A., Taylor C., (2002), "Shaking Table Testing of Geotechnical Models", International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol 2:1, 01-13.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
D_r	Rölatif Sıkılık	K_0	Sükunetteki Toprak Basıncı Katsayısı
G_{max}	Kayma Modülü	$(K_2)_{max}$	Kayma Modülü Katsayısı
V_s	Kayma Dalgası Hızı	ϕ	Kayma Mukavemeti Açısı
σ_m	Ortalama Gerilme	ρ	Yoğunluk