

Doğal Arazi Koşullarında Yapı-Zemin Dinamik Etkileşim Deneyi

Fatih GÖKTEPE^{1*}, Erkan ÇELEBİ², Hüseyin Serdar KÜYÜK²

¹ Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya

(Geliş/Received : 01.06.2016 ; Kabul/Accepted : 27.09.2016)

ÖZ

Günümüzde yapıların depreme karşı tasarımında kullanılan geleneksel yöntemlerde, yapının oturduğu zemin ortamının şekil değiştirmedeği varsayımı ile yapının temelinden zemine ankastre bağlı olduğu kabul edilir. Depremden dolayı oluşan kuvvetli yer hareketi de yapı varlığından etkilenmeyen yatay bir ötelenme hareketi olarak kabul edilir. Buna karşın, yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin sismik analizi ise üstyapı, yapı temeli ve temel çevresini saran zemin olmak üzere ayrı karakterdeki üç sistemin ortak titreşimine bağlı olarak, yapının gerçek tepkisini inceler. Bu çalışmada bina varlığının titreşim dalgasının yayılımına, dolayısıyla yer hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin etkileşimi açısından deneysel olarak incelenmiştir. Yapay dinamik yük kaynağı ile titreşime zorlanan iki katlı betonarme çerçeveli bir binanın temelinde yerleştirilen ivmeölçerden alınan titreşim kayıtları, söz konusu binaya yakın serbest zemin yüzeyi titreşim kayıtları ile karşılaştırılarak, yapı-zemin ortak davranışında kinematik etkileşimin, temel titreşim hareketindeki etkin rolü gösterilmiştir. Bu özel saha çalışması ile seçilmiş ölçüm noktalarından elde edilen titreşim verilerinden yararlanarak ivme, yer değiştirme zaman geçmişi ve Fourier spektrumlarındaki farklılıklar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Yapı-Zemin Etkileşimi, Serbest Zemin Hareketi, Bina Titreşimleri, Dalga Yayılımı, Kompaktör.

In-situ Experiment on Dynamic Soil-Structure Interaction

ABSTRACT

The traditional methods utilized in today's seismic design of structures involve structure's foundation as a fixed base by assuming soil does not deforms. Earthquake input motion is also considered as a horizontal movement that is not being affected by the structure. On the other hand, the seismic analysis of dynamic soil-structure interaction which considers superstructure, foundation and surrounding soil of building, aims to evaluate structural response based on the interaction of these three components. In this study, presence of building, which is effecting on wave propagation, is experimentally investigated including soil-structure interaction. Acceleration record from the foundation of a two-story reinforced concrete, that is forced to vibrate by artificial dynamic load, is compared with the free ground surface vibration record around the building to indicate the effect of soil-structure kinematic interaction on foundation vibration. With this specific field study, differences in acceleration, displacements time histories and Fourier spectrums are comparatively presented using recorded vibrations from selected locations of interest

Keywords: Soil-Structure Interaction, Free Field Motion, Building Vibration, Wave Propagation, Compactor.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nükleer güç santralleri, viyadükler, rijit köprü ayakları, barajlar, çok katlı masif ve rijit binalar gibi yapı sistemlerinin günümüzde zorunlu olarak büyük depremler üreten aktif faylara yakın bölgelerde, özellikle taşıma kapasitesi zayıf zemin koşullarında inşa edilmek zorunda kalınması, problemin sağlam temellendirilmiş varsayımlar altında ayrıntılı çözüm teknikleriyle ele alınmasını gerektirir. Bu tür önemli mühendislik yapılarının sismik yükler altında tam güvenliğini sağlayabilmek için dinamik davranışının gerçeğe daha yakın olarak izlenmesi ancak yapı-zemin etkileşim problemini çözüm sürecine dahil eden matematik modelin doğruluk düzeyi ve sayısal analizde kullanılacak yöntemin niteliği karar verecektir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: fgoktepe@bartin.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.2 303-311

Günümüzde deprem hesabında kullanılan geleneksel çözüm yöntemlerinde, yapı temelini oturduğu zemin ortamının şekil değiştirmedeği kabul edilir. Sonsuz rijit zemin varsayımı altında yapı temelinden zemine ankastre mesnetlenmiş bir sistem olarak hesaba katılır. Deprem verisi yer hareketi de yapının varlığından etkilenmeyen zemin yüzeyinde ölçülmüş ve temel seviyesinde etki eden yatay doğrultuda rijit bir ötelenme titreşimi olarak dikkate alınır. Kinematik etkileşim sonucunda, sismik analizde yapı temelinde tanımlanacak olan yer hareketi, serbest zemin deprem verisine göre farklılık göstermektedir. Zeminin serbest yüzeyinde meydana gelecek titreşim hareketi, yapısal titreşimlerin, temel ve temel çevresindeki dalga saçılmalarının etkisini göz ardı eden bir yaklaşımdır.

Dinamik dış yüklere maruz kalan yapıların dinamik davranışı birbirine bağlı üç ortak sistemin etkileşimi

altındadır. Bunlar üstyapı, yapı temeli ile temelin altını ve çevresini saran jeolojik zemin ortamıdır. Bir bölgedeki yapı davranışının ayrıntılı değerlendirilmesinde, yapı-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşiminin çözüme dâhil edilmesi gerekmektedir. Özellikle yumuşak zemin koşullarında inşa edilen yapıların tasarımında kuramsal hesaplama altyapısı hazırlanırken zemin ortamının şekil değiştiren ve yapının davranışına eylemsizlik yönünden etkide bulunan dinamik bir sistem olarak ele alınması gerekmektedir [1-5].

Sismik yükler altında yapı-zemin etkileşiminin zayıf zemin koşulları açısından önemsendiği bir problemde ise, yumuşak veya gevşek zemin ortamına ait geoteknik özelliklerinin taban kayasından gelen deprem dalgalarını değişikliğe uğratması sonucunda üstyapıya aktarılan titreşim davranışı incelenmektedir. Günümüzde yapı-zemin dinamik etkileşim probleminin sayısal yöntemlerle analizinde doğrudan çözüm yöntemi [6-8] ve alt sistem yaklaşımı [9-12] kullanılarak, üstyapı davranışının etkileri yapısal ve geoteknik parametrelere bağlı incelenmektedir. Ayrıca bu tür sismik etkileşim problemleri laboratuvarlarda sarsma tablalarında ölçekli model deneyleri ile de gözlemlenmektedir [13-17].

Temel ortamının dinamik rijitliğini tespit edebilmek için doğal saha koşullarında titreşim deneyleri model rijit plaklar kullanılarak yapılmıştır [18-23]. Bununla birlikte, depremselliği yüksek bölgelerde inşa edilecek önemli yapıların dinamik analizinde yerel zemin koşullarının hesap yöntemine katılması konusunda tavsiye niteliğinde önemli raporlar yayınlanmıştır [24, 25].

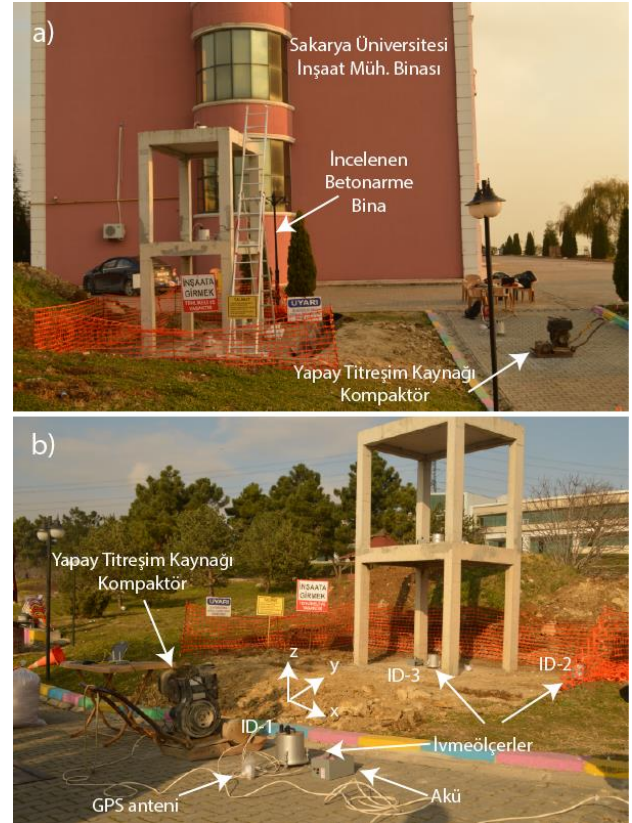
Bu çalışmanın amacı, titreşime zorlanan yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini deneysel araçlarla ölçmek, değerlendirmek ve sonuçlarını tartışmak şeklinde özetlenebilir. Bu amaçla sahada gerçekleştirilen deneylerde, yapay yük kaynağı ile üretilen titreşim hareketi serbest zemin yüzeyinde ve bina temelinde kayıt altına alınarak, kinematik etkileşimin yer hareketi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Serbest zemin yüzey kayıtları ile bina zemin titreşimleri karşılaştırılarak yapı varlığının temel hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin etkileşimi açısından incelenmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. İncelenen Arazi Özellikleri (Characteristic of the Investigated Area)

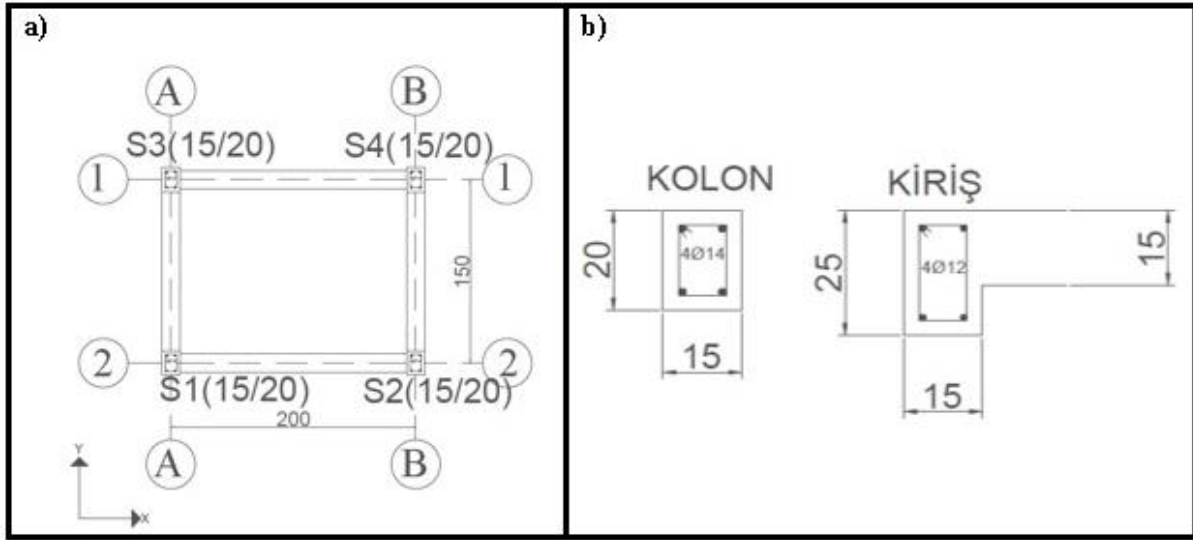
Bu çalışmanın yapıldığı arazi Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsünde bulunmaktadır. Arazide yapılan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi sonucu zeminin iki tabakadan oluştuğu ve 2007 Deprem Yönetmeliği'ne [26] göre Z2 zemin sınıfı olduğu tespit edilmiştir. Deneysel saha çalışmalarının yapıldığı araziye ait zeminin dinamik özellikleri, balyoz ya da ağırlık düşürme gibi yapay bir mekanik etki oluşturularak çeşitli tepkilerin alıcılar tarafından ölçüldüğü bir yüzey dalgası analiz yöntemi olan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi deneyi ile belirlenmiştir. Yapılan deneyde mevcut yapının kuzey yönüne offset aralığı 10 m olacak şekilde çelik levha yerleştirilmiş ve ilk jeofon levhadan 10 m ileriye

konulmuştur. Daha sonra ikişer metre aralıklarla 11 jeofon düz bir hat boyunca triger tetikleyici kablosuna bağlanmıştır. Jeofonlar 12 kanallı, örnekleme aralığı 0,5 ms olan yüksek-orta-alçak geçişli filtreye sahip olup frekans içeriği 4,5 Hz'dir. 2.4 metreye inen birinci tabakanın kayma dalgası hızı yaklaşık 310 m/s ve 11.10 metreye kadar olan ikinci tabakanın ise yaklaşık 530 m/s olarak bulunmuştur. Birim hacim ağırlığın iki tabakada da ortalama olarak 16 kN/m³ olduğu tespit edilmiştir. Deneysel saha çalışmalarının yapıldığı alan ve zorlanmış titreşim koşulları altında yapı-zemin dinamik özellikleri araştırılan yapı Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma sahasının genel yapısı (Layout of the experimental site)

Zorlanmış titreşim koşulları altında dinamik özellikleri araştırılan üstyapı 0.50 m derinlikteki radye temele sahip olup iki katlı tek açıklıklı betonarme bir çerçevedir. Binanın yüksekliği 4 m ve x, y gibi her iki doğrultudaki genişlikleri sırasıyla 2 m ve 1.5 m'dir. Titreşim özellikleri belirlenmeye çalışılan betonarme yapının döşeme kalınlığı 0,15m, beton sınıfı C30 ve çelik sınıfı S 420 olup, bina planı Şekil 2a' de verilmiştir. İncelenen yapının kolonları 0.15x0.20 m ve kirişleri 0.15x0.25 m boyutlarına sahiptir. Kolon ve kiriş elemanlarının geometri ve donatı detayları Şekil 2b' de verilmiştir. Betonarme yapının çevre düzenlenmesi dozer yardımıyla yapılarak ölçüm yapılacak arazinin zemin kotu binanın zemin döşeme kotu seviyesine indirilmiştir.



Şekil 2. a) Bina planı b) Kolon ve kiriş donatı detayı [boyutlar cm cinsindedir] (a) Building plan b) Detail of reinforcement for column and beam) [Dimensions are in cm]

2.2 Deneyselde kullanılan dinamik yük kaynağının özellikleri (The Properties of Dynamic Load Source used in Experimental Study)

Bina varlığının zeminin dinamik özelliklerine göre etkisi, binanın kompaktör tipi bir yük kaynağının oluşturduğu titreşim hareketine tepkisi incelenerek araştırılmıştır. Deneysel arazi çalışmalarında kullanılacak yapay yük kaynağı temini, çeşitli dinamik parametreleri dikkate alındığında çok zor bulunabilen bir teçhizatır. Yapay dinamik yük kaynağı seçimi açısından, tekrarlı olarak mümkün olduğu kadar aynı konum, frekans ve kuvvette titreşim verebilen, kolay temin edilebilir ve ekonomik olma kriterlerine bağlı olarak bir tercih yapılmıştır. Bu nedenle dinamik yük kaynağı olarak 73-75 Hz frekans aralığında çalışan 46 kN düşey yük kapasiteli kompaktör kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Dinamik yük kaynağı (Dynamic load source)

Genellikle toprak, sıcak asfalt gibi, küçük çaplı zemin ve yol kaplama malzemelerini sıkıştırma işlemlerinde kullanılan makinanın özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir. Dizel motora sahip yapay yük kaynağı 46 kN'luk bir santrifüj kuvveti üretebilmektedir.

Çizelge 1. Dinamik yük kaynağının özellikleri (Properties of dynamic load source)

Özellikler	Büyüklik
Motor Gücü	12 HP Dizel
Santrifüj Kuvveti	46 kN
Ebad	0.65 m x 0.8 m
Ağırlık	225 kg
Frekans	73-75 Hz

2.3 Deneyselde Kullanılan İvmeölçerlerin Özellikleri (The Properties of Accelerometers used in Experimental Study)

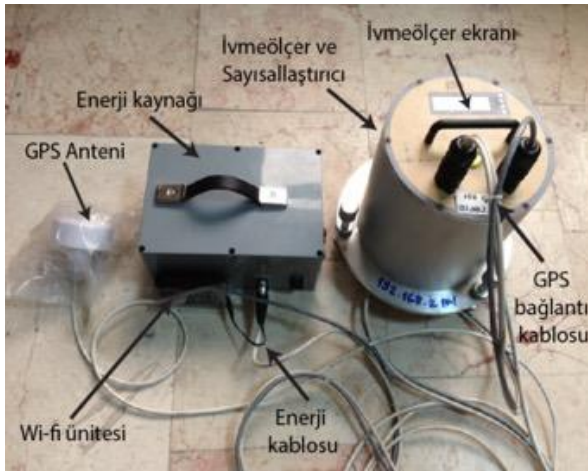
Araştırma sahasında ölçülen titreşimler üç eksenli ivmeölçerler yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Kullanılan ivmeölçerler çok düşük gürültü seviyelerine sahip zayıf titreşim hareketlerini 24 bit yüksek çözünürlüklü analog dijital çeviriciler vasıtası ile ölçüm yapan

ivme kaydedicilerdir. Deneysel arazi çalışmasında kullanılan ivmeölçerler ve diğer ekipmanlara ait teknik ve donatım özellikleri Çizelge 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Teknik ve donatımsal özellikler (Technical and Equipment Features)

Donanım	Özellikleri
İvmeölçer	3 Eksen a-) <u>Kapasitif Kuvvet ile Mikroışlenmiş Sensör</u> b-) <u>300ng/√Hz. Gürültü</u> c-) <u>±2g Tam Kalibrasyon</u> d-) <u>±5 V Aralıklal Çıktı</u> e-) <u>Bant Genişliği 200 Hz üzerinde Çözünürlük</u> f-) <u>Kendi Kendini Test Edebilme Girişi</u>
Güç Kaynağı	12 VDC
Çalışma Sıcaklığı	-20 +80
Haberleşme Portu	1 Ethernet / TCP-IP
GPS	<u>50 Kanal Süper Eğilim Dahili</u>
Çalışma Frekansı	50/100/200 Hz. (5mS)
Hafıza Kartı	2 Gb Dahili, (140 saat kayıt alabilme yeteneği.) Kutu
ADC	24 Bit
Filtre	2 Kanal FIR/Antialiasing

Yapılan deneylerde üç ayrı cihaz kullanılmıştır (ID-1, ID-2 ve ID-3). İvmeölçerler birbirlerinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Her ünite de GPS anteni ve enerji kabloları ivmeölçerlere iki kablo yardımı ile bağlanmıştır. Her cihazda, MEMS sensörü, ADC sayısallaştırıcı ve ivmelerin kayıt altına alındığı bellek bir kutunun içerisinde yer almaktadır (Şekil 4). Dijital kayıtlar çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılan bilgisayar yazılımları ile senkronize edilerek değerlendirilmiştir.

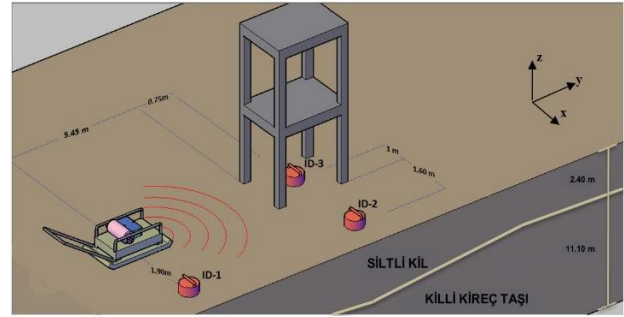


Şekil 4. DAC-3HDG GPS senkronizasyonlu sayısallaştırıcı ve veri kaydedici ivmeölçer (DAC-3HDG GPS synchronized digitizer and data recorder accelerometer)

2.4. Deneyin Yapılması (Performing the Experiment)

Yapay dinamik yük kaynağı ile titreşime zorlanan yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı etkileşimini deneysel olarak ölçmek amacıyla kullanılan cihazlar binanın zemin katı ve etrafına belirli mesafelerde yerleştirilerek serbest zemin yüzeyindeki titreşimler ölçülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan üç eksenli ölçüm yapma kapasitesine sahip ivmeölçerlerin biri dinamik yük kaynağının yakınında, diğeri serbest

zemin yüzeyinde olup bir diğeri ivmeölçer ise binanın zemin katına yerleştirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Çalışma sahasının genel şematik yapısı (Schematic structure of investigated area)

ID-1 olarak tanımlanan ivmeölçer, yapay dinamik yük kaynağına çok yakın konumlandırılmıştır. Kaynağa uzaklığı 1.90 m'dir. Mevcut yapının zemin ile dinamik etkileşimi açısından daha iyi değerlendirilebilmesi amacıyla ID-2 olarak tanımlanan ivmeölçer ise bina köşe noktasından 1.60 m uzaklığa serbest zemin yüzeyine yani yapısız alana yerleştirilmiştir. ID-3 olarak tanımlanan ivmeölçer kaynaktan 5.45 m uzaklıkta, binanın zemin katına ve binanın ağırlık merkezine yerleştirilmiştir (Şekil 5).

2.5. Verilerin İşlenmesi (Data Processing)

Araziden alınan veriler kablosuz olarak dizüstü bir bilgisayara kaydedilmiştir. Fakat veri kayıplarına rastlandığı için manuel olarak kayıtlar tekrar SQL veri tabanı kullanılarak bilgisayarda işlenmiştir. Kayıtlar saniyede 200 veri olacak şekilde kaydedilmiştir. Kayıtların içindeki veriler LabView yazılımı ile ASCII formatına dönüştürülmüştür. Daha sonra MATLAB yazılımı kullanılarak yazarlar tarafından geliştirilen bir program ile bir seri sinyal işlemlerden geçirilmişlerdir.

Öncelikli olarak dijital veriler temel sıfırlama düzeltilmesine tabi tutulmuştur. Daha sonra Butter worth

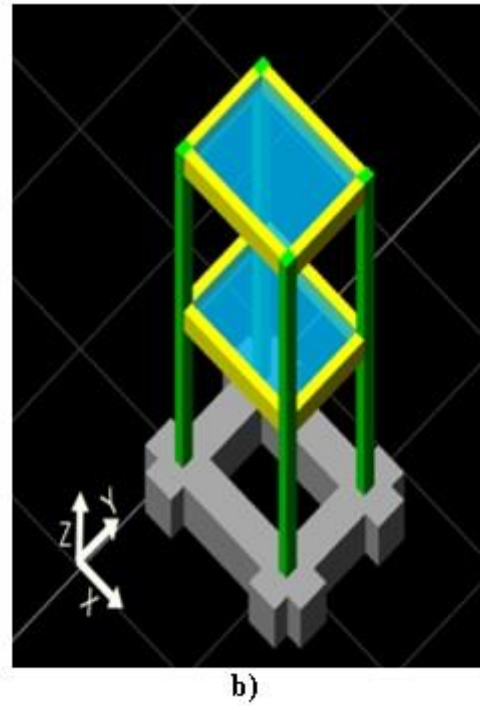
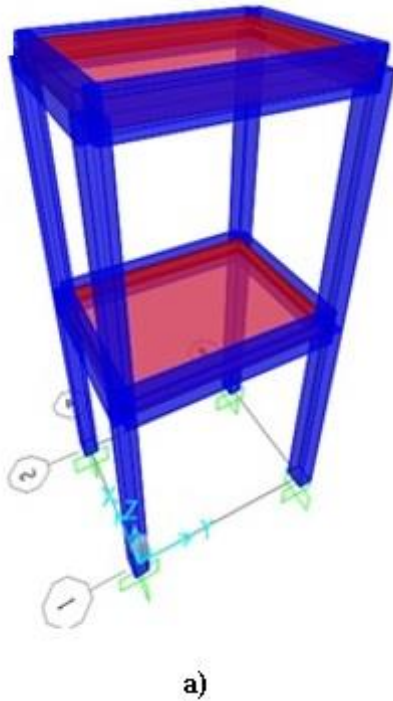
5 Hz - 90 Hz Bandpass filtrelemeden geçirilmiştir. İstenmeyen gürültüler ayıklandıktan sonra çift integrasyon ile ivme kayıtları hız ve yerdeğiştirme verilerine dönüştürülmüştür. Son olarak Hızlı Fourier Dönüşümü yapılarak, ivme kayıtların frekans tanım aralığındaki enerji içerikleri incelenmiştir. Tüm bu işlemler kayıtlardaki üç bileşen için tekrarlanmıştır.

2.6 Titreşim Kaydı Alınan Binanın Dinamik Özelliklerinin Deneysel, Teorik ve Bilgisayar Destekli Yazılımlarla Belirlenmesi

(Determination of the Dynamic Properties of the Building with Experimental, Theoretical and Computer-aided Software)

Titreşim kaydı alınan 2 katlı betonarme tek açıklıklı çerçeve sistemin dinamik davranışının daha gerçekçi bir biçimde elde edilebilmesi amacıyla yapıya ait serbest

Titreşim özellikleri araştırılan binanın etkili bileşeni olan x doğrultusundaki hakim moduna ait elde edilen periyot değerlerine göre, deneysel ve sayısal model sonuçları ile sayısal model ve nümerik çözüm sonuçlarının benzer şekilde % 98 yakın olduğu gözlenmiştir. Bu değer, deneysel ve teorik çözüm için % 96 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, yapının x doğrultusundaki 2. moduna ait periyot değerlerine göre, deneysel ve matematik model sonuçlarının % 99,5 yakın olduğu tespit edilmiştir. Bina dinamik parametrelerini belirlemek amacıyla yapılan teorik çözümlerle hem deneysel hemde sayısal model sonuçlarının yaklaşık % 97,2 civarında yakın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6. Titreşim kaydı alınan binanın üç boyutlu a) Sap 2000 modeli b) ideCAD modeli (Three-dimensional a) Sap 2000 model b) ideCAD model of the building that the vibration is recorded)

titreşim parametreleri ilk aşamada deneysel çalışmalarla elde edilmiştir. Sonraki aşamada yapının 1. ve 2. moduna ait serbest titreşim periyotları analitik çözüm ile belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapı sonlu elemanlar yöntemine dayanan Sap 2000 ve ideCAD paket programları yardımıyla üç boyutlu (3D) modellenerek modal dinamik analizleri yapılmıştır (Şekil 6).

Çizelge 3. Yapıya ait modal periyot değerlerinin karşılaştırılması [x doğrultusu] (Comparison of the modal period values of the structure) [x direction]

	Deneysel (sn)	Teorik (sn)	Sayısal Model (sn)	
			ideCAD	Sap 2000
1.Mod	0.171	0.131	0.157	0.157
2.Mod	0.133	0.0979	0.123	0.128

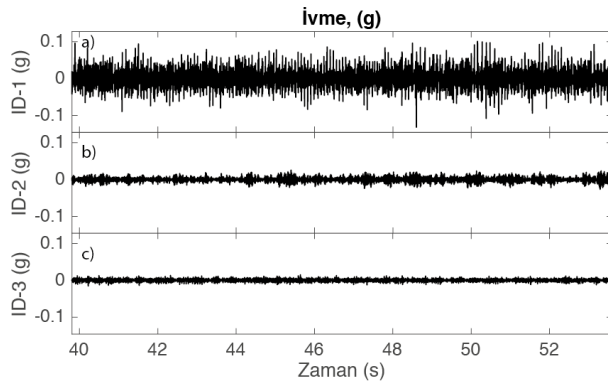
3. BİNA VE SERBEST ZEMİN TİTREŞİM KAYITLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF BUILDING AND FREE FIELD VIBRATIONS RECORDS)

Yapı-temel-zemin ortak sisteminin karşılıklı dinamik etkileşiminin araştırıldığı bu çalışmada ivmeölçerlerden elde edilen zaman tanım aralığındaki genlikler, üç bileşen (x, y, z) doğrultuları için sırasıyla Şekil 7, 8 ve 9'da gösterilmiştir.

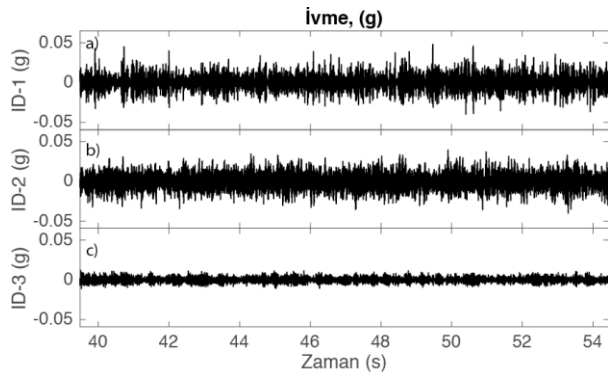
İncelenen doğrultuya bağlı olarak elde edilen kayıtlar birbirinden farklılık göstermektedir. x doğrultusu için ID-1'de ölçülen genlikler, diğer iki kayıta göre daha yüksektir. Mesafeye bağlı olarak genliklerin yani dinamik yük kaynağından yayılan titreşim enerjisinin azaldığı Şekil 7'de görülmektedir. Yapı temelinde ise

genlik değerleri en küçüktür (Şekil 7c). Benzer durum y doğrultusu için söylenememektedir. Dinamik kaynağa yakın (ID-1) ve serbest zemin ölçümleri (ID-2) birbirine benzemekte olup, yapı zemininden alınan ölçümlere (ID-3) göre çok daha büyük enerjiye sahiptirler (Şekil 8).

Diğer yandan yukarı-aşağı bileşen olan z doğrultusu x bileşenindeki davranışa benzer bir eğilim göstermiştir. Titreşim kaynağının z doğrultusunda ürettiği enerji diğer iki bileşene göre daha fazladır. Tüm bileşenler incelendiğinde, bina zemin katında ölçülen ivme değerleri (ID-3) ile serbest zemin yüzeyine ait ivme değerleri (ID-2) kıyaslandığında, genliklerin serbest zeminde daha fazla olduğu gözlenmiştir (Şekil 7-9).

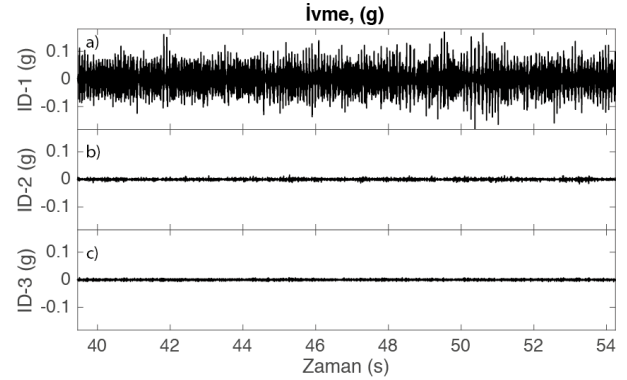


Şekil 7. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerleri [x doğrultusu] (The acceleration values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [x direction]



Şekil 8. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerleri [y doğrultusu] (The acceleration values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [y direction]

Saha çalışmalarında elde edilen ivme kayıtlarına ait verilerin üç bileşen için frekans içerikleri (x, y, z) Şekil 10, 11 ve 12'de gösterilmiştir. Grafiklerde kırmızı renkteki çizgiler filtrelenmemiş, ham veriyi ifade ederken siyahlar çizgiler, 5 Hz – 90 Hz arasındaki enerjiye sahip kayıtların frekans içeriğini belirtmektedir. Üç doğrultu içinde dinamik yük kaynağının hakim

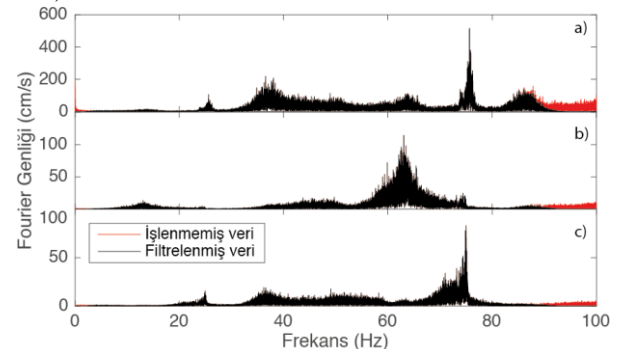


Şekil 9. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerleri [z doğrultusu] (The acceleration values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [z direction]

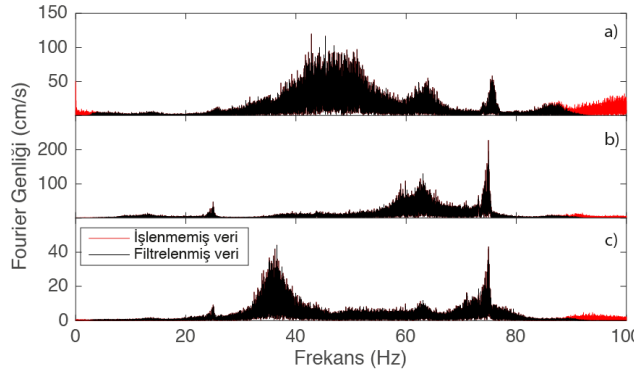
frekansı yaklaşık olarak 73 Hz – 75 Hz bandında olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 10-12).

Serbest zemine ait x doğrultusu incelendiğinde hakim enerjinin 65 Hz olduğu gözlenmiştir (Şekil 10b). Ayrıca yaklaşık 13-15 Hz bandında, diğer iki kayıta gözükmeyen enerji görülmektedir. Bina zemin katı ile dinamik yük kaynağına yakın kayıtların frekans içeriği (Şekil 10a ve 10c) yaklaşık olarak aynıdır. Fakat frekans genlikleri yapay yük kaynağının yakınında yaklaşık olarak on kat daha fazla çıkmaktadır. Bununla birlikte, dinamik kaynağı yakınında 85 Hz'de görülen enerjinin, serbest zemin ve bina zemin katına gelmeden tamamen sönmüldüğü tespit edilmiştir.

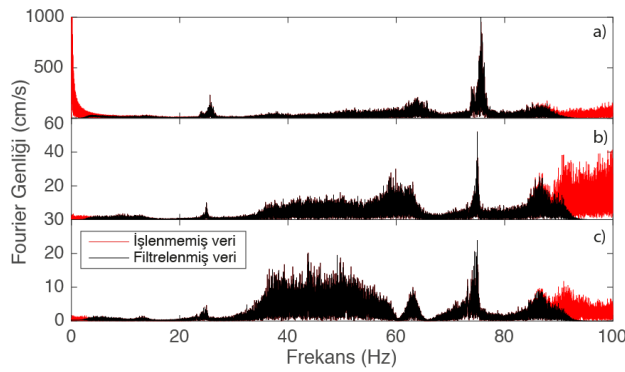
Genel olarak y bileşenine ait tüm ivmeölçerlere bakıldığında, dinamik yük kaynağının genliği gözlemlenmektedir. Fakat uzakta olmasına rağmen serbest zemin kaydındaki genlik değeri, yapay yük kaynağına yakın ivmeölçerdeki genlikten daha yüksek çıkmıştır (Şekil 11a ve 11b). Bunun sebebi olarak, yapay yük kaynağının x doğrultusuna göre, y doğrultusunda daha güçlü titreşim üretmesi ve titreşimlerin basınç dalgası şeklinde aktarılmasından dolayı olabileceği düşünülmektedir (Şekil 11c).



Şekil 10. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerlerine ait Fourier genlik spektrumu [x doğrultusu] (The fourier amplitude values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [x direction]



Şekil 11. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerlerine ait Fourier genlik spektrumu [y doğrultusu] (The fourier amplitude values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [y direction]

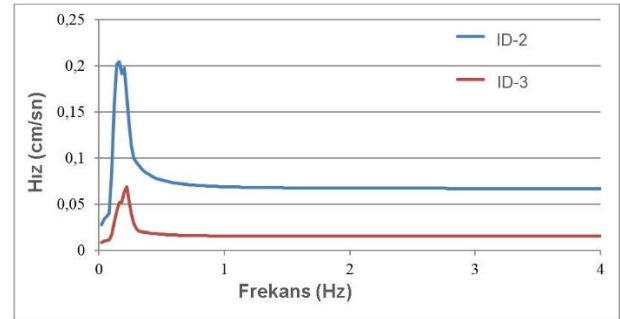


Şekil 12. a) Dinamik yük kaynağı yakınında b) yapısız alandaki serbest zeminde c) bina zemin katında elde edilen ivme değerlerine ait Fourier genlik spektrumu [z doğrultusu] (The fourier amplitude values obtained at the a) near dynamic load source b) free field in non-building c) ground floor of the building) [z direction]

Titreşim kaynağının yakınındaki ivmeölçerlerin üç bileşeni incelendiğinde (ID-1) z doğrultusundaki genliklerin en büyük olduğu görülmektedir (Şekil 12a). Genel olarak z doğrultusundaki veriler incelendiğinde, kaynaktan uzaklaştıkça frekans genliklerinin, diğer bileşenlere göre çok daha fazla azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 12b ve 12c). Özellikle yapı temelinde 85 Hz mertebelerinde görülen frekans genliklerinin, yapının düşey doğrultusundaki davranışı olduğu ve bunun diğer ivmeölçerlere etkisinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Bununla birlikte, tüm ivmeölçer ve doğrultularda görülen 25 Hz civarındaki frekans içeriği ise, iki tabakalı zeminin hakim frekansı olduğu düşünülmüştür. Deneysel saha çalışmalarının yapıldığı zemin ortamına ait tahmin edilen bu değer, literatürde tabakalı zeminler için tanımlanmış ve pratik uygulamalarda yaygın biçimde kullanılan teorik formülasyon yardımıyla hesaplanarak karşılaştırılmış ve doğruluğu yaklaşık olarak teyit edilmiştir. Teorik olarak zemin hakim frekansının hesaplanmasında kullanılan zemine ait tabaka kalınlıkları ve kayma dalgası hızı gibi

dinamik parametreler, bir yüzey dalgası analiz yöntemi olan Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analizi deneyi ile arazide belirlenmiştir.

Titreşime zorlanan iki katlı betonarme çerçevesi bina üzerinde gerçekleştirilen özel saha çalışması ile seçilmiş ölçüm noktalarından elde edilen titreşim verilerinin hız spektrumlarındaki farklılıklar etkili bileşen olan x doğrultusu için elde edilmiştir. Söz konusu binanın köşe noktasından 1.60 m uzaklığa serbest zemin yüzeyine konumlandırılan ivmeölçerden (ID-2) alınan titreşim kayıtları ile binanın zemin katına ve ağırlık merkezine yerleştirilen ivmeölçerden (ID-3) elde edilen titreşim kayıtları hız spektrumları cinsinden karşılaştırılmalı biçimde Şekil 13’de verilmiştir. İncelenen etkili doğrultuya (x doğrultusu) bağlı olarak elde edilen grafikten, kinematik etkileşimin 0.5 Hz civarındaki küçük frekans değerlerinde hız spektrum eğrilerini önemli biçimde değiştirdiği gözlenmiştir.



Şekil 13.Yapısız alandaki serbest zeminde (ID-2) ve bina zemin katında (ID-3) elde edilen hız spektrum eğrileri [x doğrultusu] (The velocity response spectra at the free field in non-building (ID-2) and ground floor of the building (ID-3)) [x direction]

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bina varlığının titreşim dalgasının yayılımına, dolayısıyla yer hareketi üzerindeki etkisi yapı-zemin etkileşimi açısından deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel arazi çalışması ile seçilen ölçüm noktalarından elde edilen ivme, yerdeğiştirme zaman geçmişi ve Fourier spektrumlarındaki farklılıklar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Yapay dinamik yük kaynağı ile titreşime zorlanan iki katlı betonarme çerçevesi bir binanın temelinde yerleştirilen ivmeölçerlerden alınan titreşim kayıtları, söz konusu bina yapısına yakın serbest zemin yüzeyi titreşim kayıtları ile karşılaştırarak, yapı-zemin ortak davranışında kinematik etkileşimin temel titreşim hareketindeki etkin rolü gösterilmeğe çalışılmıştır. Genel anlamda dinamik yük kaynağından yayılan titreşim enerjisinin mesafeye bağlı olarak azaldığı ve yapının varlığının, serbest zemin hareketini kinematik etkileşimden dolayı önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yapı temelinde ortaya çıkan 35 Hz – 40 Hz arasındaki genliklerin y doğrultusundaki ikinci hakim modun olabileceği düşünülmektedir. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan tüm ivmeölçerlere ait kayıtların her üç doğrultusunda görülen 25 Hz

civarındaki frekans içeriği ise, iki tabakalı zemin ortamının hakim frekansı şeklinde yorumlanmıştır.

Sahada gerçekleştirilen bu deneysel çalışma ile dinamik yapay yük kaynağının serbest zemin yüzeyinde ve bina temelinde meydana getirdiği titreşim kayıtlarından elde edilen hız spektrum eğrisi, kinematik etkileşimin yer hareketini önemli biçimde etkilemiş olup yapının varlığının serbest zemin hareketini değiştirdiği anlaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada kullanılan ivmeölçerlerin alımı, Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından Merkezi Araştırma Laboratuvarı kapsamındaki DPT 2011K120350 proje no ile desteklenmiştir. Yazarlar bu destekten dolayı teşekkürlerini sunarlar. Ayrıca saha çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Dr. Eray Yıldırım ve öğrencilerimiz Lütfü İhsan Akpunar, Engin Pullu, Serhat Tatlı, Beyzanur Ceylan, Mustafa Esin, Aziz Ahmad Noor Ahmad, Halil Kılıçaslan, Emrah Balıkcı'ya teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Viladkar, M.N., Godbole, P.N. and Noorzaie, J., "Soil-structure interaction in plane frames using coupled finite-infinite elements", *Computers and Structures*, 39: 535-546, (1991).
- Choi, J.S., Yun, C.B. and Kim, J.M., "Earthquake response analysis of the Hualien soil-structure interaction system based on updated soil properties using forced vibration test data", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30: 1-26, (2001).
- Halabian, A.M. and Naggar, M.H.E., "Effect of non-linear soil-structure interaction on seismic response of tall slender structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 639-658, (2002).
- Gouasma, A. and Djeghaba, K., "Non-linear dynamic soil-structure interaction analysis of buildings", *Technological and Economic Development of Economy*, XIII: 266-271, (2007).
- Gouasma, A. and Djeghaba, K., "Direct approach to seismic soil-structure-interaction analysis-building group case", *Engineering Structures and Technologies*, 2: 22-30, (2010).
- Wolf, J.P. and Song, Ch., "Finite-Element Modelling of Unbounded Media", John Wiley & Sons, Chichester, (1996).
- Celebi, E., Goktepe, F. and Karahan, N., "Non-Linear Finite Element Analysis for Prediction of Seismic Response of Buildings Considering Soil-Structure Interaction", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 3495-3505, (2012).
- Galvín, P. and Romero, A., "A 3D time domain numerical model based on half-space Green's function for soilstructure interaction analysis", *Computational Mechanics*, 53: 1073-1085, (2014).
- Pais, A. and Kausel, E., "Approximate Formulas for Dynamic Stiffnesses of Rigid Foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7: 213-227, (1988).
- Mylonakis, G. and Gazetas, G., "Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental", *Journal of Earthquake Engineering*, 4: 377-401, (2000).
- Çelebi, E. and Gündüz, A.N., "An efficient seismic analysis procedure for torsionally coupled multistory buildings including soil-structure interaction", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 29: 143-157, (2005).
- Mylonakis, G., Nikolaou, S. and Gazetas, G., "Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26: 824-85, (2006).
- Hosseinzadeh, N.A. and Nateghi, F., "Shake Table Study of Soil Structure Interaction Effects on Seismic Response of Single and Adjacent Buildings" *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver*, Vancouver, B.C., Canada, (2004).
- Choi, I-K., Kim Min, KYU., Choun, Y-S. and Seo, J-M., "Shaking Table Test of Steel Frame Structures Subjected to Scenario Earthquakes", *Nuclear Engineering and Technology*, 37: 191-200, (2005).
- Haibo, W. and Deyu, L.L., "Experimental Study of Dynamic Damage of an Arch dam", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36: 347-366, (2006).
- Tain, C., Xiao C., Zhang H. and Cao J., "Shaking Table Model Test and Seismic Performance Evaluation of Shanghai Tower", *International Journal of High-Rise Buildings*, 1: 221- 228, (2012).
- Tabatabaiefar, S.H.R., Fatahi B. and Samali, B., "Numerical and Experimental Investigations on Seismic Response of building Frames under Influence of Soil-Structure Interaction", *Advances in structural Engineering*, 17: 109-130, (2014).
- Lin, A.N. and Jennings, P.C., "Effect of embedment on foundation-soil impedances", *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 110: 1060-1075, (1984).
- Luco, J.E., Trifunac, M.D. and Wong, H.L., "Isolation of soil-structure interaction effects by full-scale forced vibration tests", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 16: 1-21, (1988).
- Wong, H.L., Trifunac, M.D. and Luco, J.E., "A comparison of soil-structure interaction calculations with results of full-scale forced vibration tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7: 22-31, (1988).
- Crouse, C.B., Hushmand, B., Luco, J.E. and Wong, H.L., "Foundation impedance functions: Theory versus Experiment", *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 116: 432-449, (1990).
- De Barros, F.C.P. and Luco, J.E., "Identification of foundation impedance functions and soil properties from vibration tests of the Hualien containment model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14: 229-248, (1995).
- Tileylioglu, S., Stewart, J. P. and Nigbor, R.L., "Dynamic Stiffness and Damping of Shallow Foundation from Forced Vibration of a Field Test Structure", *Journal of*

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137: 344-353, (2011).
24. FEMA, “Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures”, prepared by the Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences for the Federal Emergency Management Agency, Washington, The United States, (2009).
25. NIST GCR 12-917-21, “Consultants Joint Venture; Soil-Structure Interaction for Building Structures”, U.S. Department of Commerce National Institute of Standards and Technology, (2012).
26. DBYBHY, “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (2007).