

Küçük Ölçekli Sarsma Tablası Test Modelleri için Uygun Ölçeklendirme Katsayısının Araştırılması

Özge Şahin *Naci Çağlar and Erkan Çelebi
Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Türkiye

Özet

Deprem mühendisliğinde, sarsma tablası deneyleri yapıların sismik kapasitesini belirlemek için uygulanan etkin yöntemlerdendir. Mevcut sarsma tablalarının boyutu ve kapasitesi sınırlı olduğu için, deneylerde ölçekli yapısal modellerin kullanılması gerekli görünmektedir. Bu çalışmada, 6 katlı gerçek bir betonarme yapı uygun bir ölçekleme katsayısı ile küçültülmüş ve ölçekli yapısal model oluşturulmuştur. Ölçekli model yapıya ait sarsma tablası deneyleri, ölçeklendirilmiş deprem ivme kayıtlarının etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Gerçek ve model yapıya ait tepe noktası maksimum yatay yer değiştirmelerin teorik ve deneysel değerleri karşılaştırılmış, sayısal sonuçlarla laboratuvar ölçümlerinin iyi bir uyum gösterdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sarsma tablası deneyi, ölçeklendirme, dinamik analiz

Investigation of Appropriate Scaling Factor for Small Scaled Shake Table Test Models

Abstract

In earthquake engineering, shaking table tests are powerful methods used to determine the seismic capacity of structures. It is necessary to use scale structural models in experiments because of the size and capacity of existing shake tables are limited. In this study, 6-story reinforced concrete structure was scaled down with an appropriate scaling factor and a structural prototype model has been established. The shaking table tests of the scale model structure were performed using dynamic analyzes in the time domain under the influence of scaled earthquake acceleration records. The theoretical and experimental values of the maximum horizontal displacements of the real and model structures were compared and it was seen that the laboratory measurements showed good agreement with the numerical results.

Key words: Shaking table tests, scaling, dynamic analysis

1. Giriş

Deprem etkisi altındaki yapıların deprem davranışını gerçekçi bir şekilde belirleyebilen yaklaşımlardan biri de sarsma tablası deneyleridir. Sarsma tablası deneylerinde deney numunesi, rijit bir plaka üzerine yerleştirilir ve istenen ölçümler için uygun sınır şartları belirlenir. Elektrikli veya hidrolik bir motor yardımıyla simüle edilen gerçek veya yapay deprem kayıtları ya da dinamik zorlayıcı kuvvetler ile plaka sarsılmak suretiyle deneyler gerçekleştirilir. Böylece, yapının dinamik

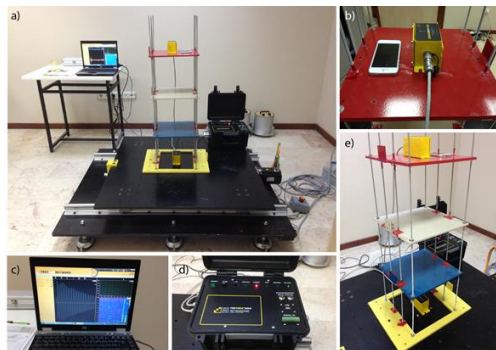
karakteristikleri ve dinamik yükler etkisi altındaki davranışı belirlenmeye çalışılır [1]. Tam ölçekli sarsma tablası deneylerini gerçekleştirecek sistemlerin olmadığı durumlarda gerçek yapıları temsil edebilecek ölçekli yapısal modellerin kullanılması kaçınılmazdır. Ölçekli modellerin dinamik davranışlarını belirlemek için sarsma tablası testleri kullanılarak çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Ancak, yapılan deneysel çalışmalarda ölçekli fiziksel model oluşturmak için uygulanabilecek bir yöntemden bahsedilmemiştir [2]. Gerçek yapıları ölçekleme/benzerlik yasalarını kullanarak ölçekli fiziksel modellere dönüştürmek mümkündür. Bu yasaların kullanıldığı modellerde geometrik, dinamik, kinematik ve malzeme açısından benzerlikler kullanılabilir. Ölçekli deneysel modellerden elde edilen sonuçlar, genellikle analitik yöntemler için kalibrasyon kriteri olarak ya da gerçek yapıya ait dinamik tepkinin sayısal tahminlerini yapmak için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, 6 katlı gerçek bir betonarme yapının sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve yapının dinamik karakteristikleri (frekans, periyod) belirlenmiştir. Öncelikle yapı dinamik özelliklerini koruyacak şekilde tek açıklıklı olarak tekrar modellenmiş ve sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise gerçek yapının boyutları uygun bir ölçekleme katsayısı ile küçültülerek sarsma tablası deneysel modeline ait geometrik ve dinamik parametreler belirlenmiştir. Ölçekli model yapı üretilip sarsma tablasında dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar gerçek yapı nümerik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ölçekli yapısal modelin, gerçek yapı davranışını kabul edilebilir bir doğrulukla temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Deneysel Ölçüm Düzenegi

Ölçekli yapısal model dinamik deneylerinde Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü bünyesinde yer alan sarsma tablası ve çevre birimleri deney düzenegi olarak kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Sarsma tablası ve çevresel birimler

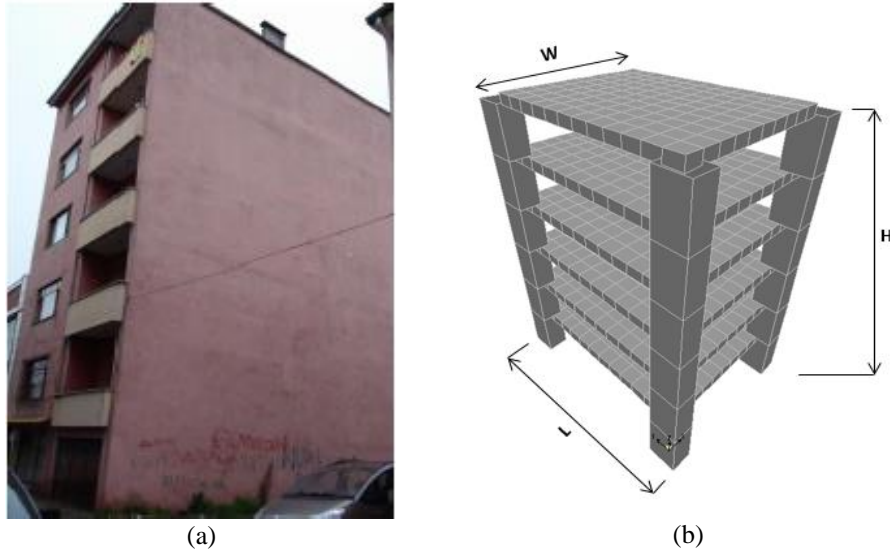
Sarsma tablası 1x1 m boyutunda, 125 kg'lık yük kapasitesine sahiptir. Toplam hareket boyu ± 100 mm, maksimum yatay kuvvet kapasitesi 2500 N, maksimum ivme kapasitesi $\pm 2g$ ve maksimum doğrusal hızı 500 mm/s'dir. Üretici firma tarafından sağlanan yük kontrol yazılımı vasıtasıyla sarsma tablası ile 1 Hz-10 Hz arasında sinüzoidal yük uygulanabileceği gibi, Sakarya ve El-Centro

gibi gerçek deprem kayıtları da uygulanabilmektedir. Sarsma tablası, sensörler ve dinamik veri toplayıcı cihazı ile verileri işleyen masaüstü bilgisayar gibi çevre birimleri deney düzeneğini kapasitesine ve 0-1200 Hz frekans aralığına sahip ivmeölçerler kullanılmıştır. Sensörlerden gelen kayıtlar dinamik veri toplayıcısı tarafından sayısallaştırılarak sinyal işleme yazılımına aktarılmıştır.

Yapı titreşimlerini ölçmek için ivmeölçerler (Sensebox 7021/7022/7023+ ve 7031/7032/7033) kullanılmıştır. Bu ivmeölçerler, kuvvet/elektro-dinamik geri beslemeli, ultra düşük gürültülü sensörlerdir. Referans olarak kullanılan ivmeölçer mikro elektromekanik sistem (MEMS) mikroçip tabanlı bir sensöre sahip olup mikro-mekanik ölçekte kuvvet geri besleme teknolojisine sahiptir. 5 mikro-g/Hz gürültü performansındaki ivmeölçerler ± 3 g ölçüm kapasitesine sahiptir. Ölçülebilir frekans aralığı 0-400 Hz'dir. Yüksek çözünürlüklü ve düşük gürültülü olması sebebi ile yapı sağlığı takibi, modal analiz ve sismik araştırmalara yönelik olarak kullanılabilir. Bu ivmeölçerlerden alınan kayıtlar dinamik veri toplama cihazı ile kayıt altına alınmıştır. Dinamik sayısallaştırıcı 24 Bit yüksek çözünürlük, 140 dB'e varan yüksek dinamik aralık ve hızlı, eş zamanlı örnekleme yeteneğine sahiptir.

2.2. Gerçek Yapı Modeli

Sarsma tablası deneyleri için referans alınan gerçek yapı altı katlı betonarme bir yapıdır (Şekil 2a). Gerçek yapının (Şekil 2a) ve dinamik karakteristikleri korunarak oluşturulan benzeştirilmiş tek açıklıklı model yapının (Şekil 2b) sonlu eleman modelleri SAP2000 sonlu elemanlar programıyla oluşturulmuştur [3]. Gerçek ve benzeştirilmiş yapıların doğal titreşim frekansları 1.784 Hz olarak belirlenmiştir. Gerçek yapıya ait geometrik ve dinamik özellikler Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 4. Betonarme yapı (a) gerçek yapı (b) sonlu eleman modeli

2.3. Geometrik Ölçekleme Faktörü

Gerçek yapıların sarsma tablasında ölçekli modellemesinde en önemli adım uygun bir geometrik ölçekleme faktörü (λ) belirlemektir. Küçük ölçekli modeller maliyetten tasarruf sağlarken sonuçların güvenilirliğini önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, mümkün olan en doğru sonuçları temsil eden en büyük ölçekli yapı modelini seçmek gerekir. Geometrik ölçeklendirme faktörü (λ) seçilirken deneylerin gerçekleştirileceği sarsma tablasına ait aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmuştur.

- Tabla ölçüsü: 1m \times 1 m,
- Azami yük: 125 kg

Kinematik ve dinamik parametrelere yapısal sistemlerde uygulanması gereken geometrik ölçeklendirme katsayıları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sistem dinamik ve kinematik parametrelerine göre geometrik ölçeklendirme katsayısı (λ)

Kütle Yoğunluğu	1	İvme	1	Uzunluk	λ
Kuvvet	λ^3	Kesme Dalgası Hızı	$\lambda^{1/2}$	Gerilme	λ
Rijitlik	λ^2	Zaman	$\lambda^{1/2}$	Şekil Değiştirme	1
Modül	λ	Frekans	$\lambda^{-1/2}$	EI	λ^5

Tablo 2. Farklı geometrik ölçekleme faktörlerine göre deneysel model boyutları

Geometrik Ölçekleme Faktörü	H	W	L	Hacim	Ağırlık
$\lambda=30$	(m)	(m)	(m)	(m ³)	(t)
1:1	16.8	8.8	11.8	525	1260
1:5	3.36	1.76	2.36	4.2	10.08
1:10	1.68	0.88	1.18	0.525	1.26
1:15	1.12	0.59	0.79	0.155	0.372
1:20	0.84	0.44	0.59	0.066	0.157
1:30	0.56	0.30	0.40	0.02	0.048
1:40	0.42	0.22	0.30	0.0082	0.02
1:50	0.34	0.18	0.24	0.007	0.016

Şekil 2'de gösterilen gerçek yapının farklı ölçekleme katsayıları için tasarım kriterleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Tablo 1 ve 2'de belirtildiği üzere geometrik boyutlar, hacim ve ağırlık gibi tasarım kriterlerine göre gerçek yapının ölçeklendirme faktörü 1:30 seçildiğinde, sarsma tablası boyutlarına uygun elde edilebilir en büyük ölçekli modele ulaşılmıştır. Böylece, sarsma tablası deneyleri için kullanılacak modelin geometrik ölçek faktörü (λ) 1: 30 seçilmiştir [3].

Dinamik benzerliği elde etmek için, geometrik boyutlara ek olarak, modelin doğal frekansı ve yoğunluğunun da uygun bir ölçekleme katsayısı kullanarak gerçek yapıya eşitlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemle, gerçek yapı sarsma tablası deneyleri için daha doğru bir şekilde modellenabilir. Geometrik ve dinamik benzerlik parametreleri, ölçeklendirme sürecinde anahtar rol oynar ve yeterli sayılır [4].

Tablo 1'e göre, modelin doğal frekansı (f_m) ile gerçek yapının doğal frekansı (f_p) arasındaki ilişki Denklem (1)'de gösterilmiştir.

$$\frac{f_m}{f_p} = \lambda^{-1/2} = 5.48 \quad (1)$$

Gerçek yapının doğal frekansı $f_p=1.784$ Hz'dir. Buna göre, ölçekli yapısal modelin (f_m) frekansı Denklem (2)'ye göre hesaplanmıştır.

$$f_m = 5.480 \times f_p = 5.48 \times 1.784 = 9.776 \text{ Hz} \quad (2)$$

Modelin yoğunluğu (ρ_m) ve gerçek yapının yoğunluğu (ρ_p) arasındaki ölçeklendirme ilişkisi Tablo 1 ve Denklem (3)'te gösterilmiştir.

$$\frac{\rho_m}{\rho_p} = 1$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{1260000}{525} = 2400 \text{ kg/m}^3 \quad (3)$$

Denklem (3)'te, (m_p) gerçek yapı kütesini ve (V_p) gerçek yapının hacmini göstermektedir. Yapısal modelin kütlesi (m_m) ise Denklem (4)'te gösterilmiştir.

$$m_m = \rho_m \times V_m = 2400 \text{ kg/m}^3 \times (0.56 \times 0.30 \times 0.40) = 48 \text{ kg} \quad (4)$$

Burada (V_m) yapısal modelin hacmidir. Yukarıda belirtilen denklemler kullanılarak yapısal modele ait geometrik ve dinamik özellikler belirlenmiş ve Tablo 3'te gösterilmiştir.

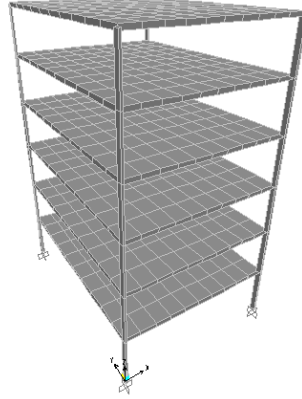
Tablo 3. Deneysel modele ait tasarım parametreleri

Toplam Yükseklik (m)	Toplam Uzunluk (m)	Toplam Genişlik (m)	Toplam Kütle (kg)	Doğal Frekans (Hz)
0.56	0.40	0.30	48	9.78

2.4. Ölçekli Yapısal Modelin Tasarımı

Ölçekli yapısal modelin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP2000 yazılımında oluşturulmuştur (Şekil 3). Sonlu eleman modelinde döşemeler 6 adet yatay çelik levha ile modellenmiştir. Kolonlar ise 4 mm, 10 mm ebatlarında dikey çelik levhalarla temsil edilmiştir. Yapısal modelde kullanılan çelik sınıfı St37 çeliğidir. Çelik kolonların, döşeme plakalarının ve taban plakasının kesitleri Tablo 3'te belirtilen frekans ve kütle değerlerini sağlamak amacıyla tasarım için birkaç denemeden sonra belirlenmiştir. Sayısal modelleme ve tasarımdan sonra detay çizimleri yapısal modelin tasarım gereksinimlerini yansıtabilecek şekilde hazırlanmıştır. Tasarlanan model yapı doğal frekansı $f_m = 9.80$ Hz'dir. Modelin kütlesi (m_m), taban plakasız 46 kg olarak ölçülmüş ve hedeflenen parametreye uygun olduğu görülmüştür (Tablo 3). Yapısal modelin toplam kütlesi taban plakası ile birlikte 52

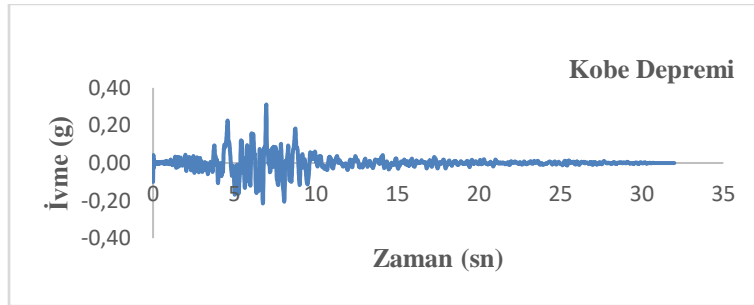
kg olarak ölçülmüştür. Modal analiz sonucu elde edilen sayısal verilerin, Tablo 3'te özetlenen gerekliliklerle iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



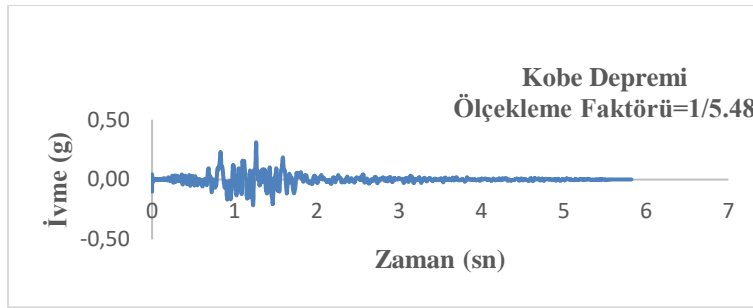
Şekil 3. Ölçekli yapısal modelin nümerik modellemesi

2.5. Kullanılan Deprem Kayıtlarının Ölçeklendirilmesi

Sarsma tablası deneyleri için Kobe, 1995 (Şekil 4 (a)), El Centro, 1940 (Şekil 5 (a)), Kocaeli, 1999 (Şekil 6 (a)) olmak üzere üç deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Tablo 1'e göre, ölçeklendirilen modelin doğal frekansı (f_m) ile gerçek yapı doğal frekansı arasındaki ilişki (f_p) 5.48, model ve gerçek yapı ivme ölçeklendirme ilişkisi ise 1.0'dır. Bu değerlerin Tablo 1'de belirtildiği üzere eşit olmasının nedeni, deprem büyüklüğünün "dinamik benzerlik" ilkesine göre aynı kalmasının bir sonucudur [4]. Bu nedenle, deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi için orijinal kayıtların zaman adımlarının geometrik ölçekleme faktörü olan 5.48 değeriyle azaltılması gerekmektedir. Bu durumda, Kobe ve El Centro depremlerinin zaman adımları 0.01 saniyeden 0.00182 saniyeye, Kocaeli depreminin zaman adımları ise 0.05 saniyeden 0.00091 saniye değerine kaymıştır. Zaman adımları geometrik ölçekleme faktörüyle azaltılan üç deprem kaydı, Şekiller 4 (b) -6 (b)'de gösterilmiştir.

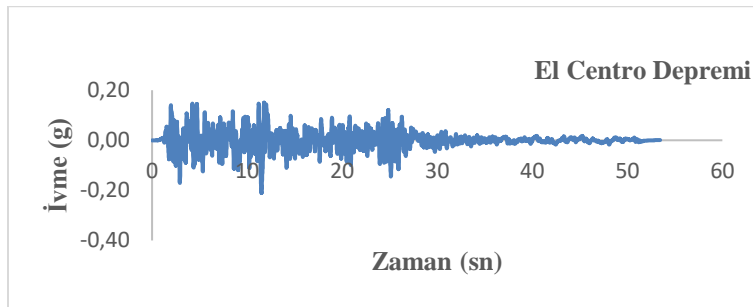


(a)

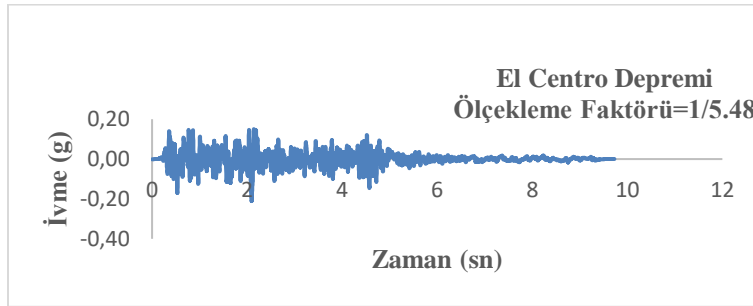


(b)

Şekil 4. Kobe depremi (1995). (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt

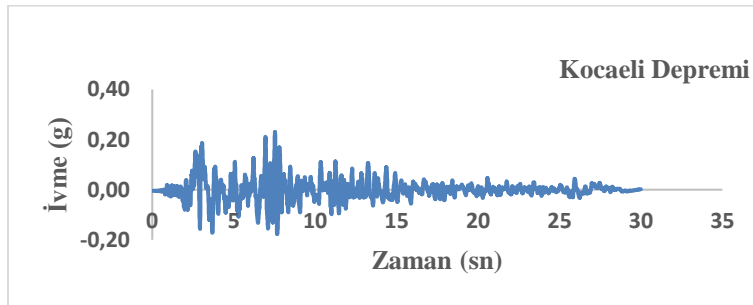


(a)

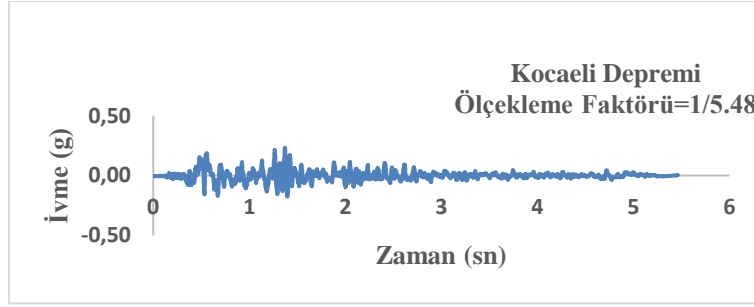


(b)

Şekil 5. El Centro depremi (1995). (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt



(a)



(b)

Şekil 6. Kocaeli depremi (1995). (a) orijinal kayıt, (b) ölçekli kayıt

2.6. Ölçekli Yapısal Model Sarsma Tablası Deneyleri

Ölçekli yapısal model, sarsma tablası deneyleri için doğrudan tabla üzerine sabitlenmiş ve yapıya ankastre mesnet özelliği kazandırılmaya çalışılmıştır (Şekil 7). Ölçekli yapısal modelin sismik tepkileri elde edilmeden önce hedeflenen doğal frekansa sahip olup olmadığı incelenmiştir. Yapının üç farklı noktasına ivme ölçerler yerleştirilmiş ve çevrel titreşimler verilerek Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile ivme ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 7. Ölçekli yapısal model deney düzeneği

İvmeölçerlerden elde edilen ivme verileri Artemis Modal 4.0 paket programına yüklenerek modele ait frekans değeri belirlenmiştir (Tablo 4). Böylece yapısal modelin istenen doğal frekans ile uyum sağladığı görülmüştür [5]. Ölçekli yapısal modelin Tablo 3'te belirtilen dinamik benzerlik kriterlerini sağlayan özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Ölçekli yapısal modele ait teorik ve deneysel frekans değerleri

	SAP2000 v14 (Teorik)	Artemis Modal 4.0 (Deneysel)
Model Frekans Değeri	9.77 Hz	9.12 Hz

Ölçekli yapısal model tasarım parametrelerinin yeterliliği sağlandıktan sonra, Kobe, 1995 (Şekil 4 (b)), El Centro, 1940 (Şekil 5 (b)) ve Kocaeli, 1999 (Şekil 6 (b)) ölçekli deprem ivme kayıtları kullanılarak sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üç adet ölçekli deprem ivmesinin etkisi altında gerçekleştirilen sarsma tablası deneylerinden yapı tepe noktası maksimum yatay yer değiştirmeler elde edilmiştir.

2.7. Gerçek Yapının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Analizi

Bu çalışmada referans alınan gerçek betonarme yapı 6 katlı betonarme düzlem bir çerçevedir. Yapının yüksekliği 16.8 m, genişliği ise 8.8 m'dir. Gerçek yapıya ait dinamik analizlerde SAP2000 sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır. Dinamik analizlerde Kobe, 1995 (Şekil 4 (a)), El Centro, 1940 (Şekil 5 (a)), Kocaeli, 1999 (Şekil 6 (a)) olmak üzere üç deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Gerçek yapı, zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemiyle incelenmiş tepe noktası maksimum yatay deplasmanlar elde edilmiştir.

3. Sonuç ve Öneriler

Gerçek yapı ve ölçekli model yapıya ait tepe noktası maksimum yatay yer değiştirme değerleri Tablo 5'te sunulmuş ve karşılaştırılmıştır. İvmeölçerlerden elde edilen verilen veriler çift integrasyon yöntemiyle yerdeğiştirme-zaman grafiklerine dönüştürülmüştür. Maksimum yanal deplasmanların tahmin edilen ve gözlemlenen değerlerinin karşılaştırılmasıyla deneysel sarsma tablası test sonuçlarının doğruluğu incelenmiştir. Buna göre, deneysel sarsma tablası test sonuçlarının sayısal tahminlerle uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. Nümerik tahminler ile laboratuvar sonuçları arasındaki farkın, fiziksel laboratuvar modelinde kaynaklı birleşimlerin enerji absorbe etmesi nedeniyle olduğu düşünülebilir. Yapılan testler sırasında ve sonrasında plastik mafsallara dair bir kanıt bulunmamıştır. Bu nedenle, yapısal modelin sarsma tablası deneyleri sonucunda elastik sınırlar içinde kaldığı anlaşılmıştır.

Tablo 5. Tepe noktası yer değiştirme değerleri ve ölçeklendirme katsayısının doğruluk düzeyi

	Gerçek yapıya ait tepe noktası maksimum yer değiştirme (m)	Model yapıya ait tepe noktası maksimum yer değiştirme (m)	Kullanılan geometrik ölçek ($\lambda = 1/30$)	Hata Payı
Kobe depremi	0.04222	0.00140	30.15	0.5
El Centro depremi	0.06007	0.00218	27.55	8
Kocaeli depremi	0.04027	0.00146	27.58	8

4. Değerlendirme

Bu çalışmada, gerçek betonarme yapısal modele uygun ölçekli bir model geliştirilmiş ve sarsma tablasında dinamik analizleri için tasarımı yapılmıştır. Ölçekli yapısal model üzerinde, üç ölçekli

deprem ivme kaydının etkisi altında sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, gerçek yapısal modelin sonlu eleman modeli oluşturulmuş, kullanılan üç deprem ivme kaydı altında zaman zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Tepe noktası maksimum yatay yer değiştirmeleri belirlenmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan geometrik ölçeklendirme faktörü yüzde 0-10 arasında hata payına sahiptir. Böylece, ölçekli yapısal modelin, gerçek yapı sisteminin davranışını kabul edilebilir doğrulukta temsil ettiği söylenebilir. Ölçekli yapısal modelin, sarsma tablası deneysel çalışmalarında kullanılabilecek yeterli doğrulukta, geçerli ve nitelikli bir model olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- [1] Baran, T. Yapıların dinamik davranışının deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Doktora Tezi, 2008.
- [2] Tabatabaiefar, H. R., & Mansoury, B. (2016). Detail design, building and commissioning of tall building structural models for experimental shaking table tests. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 25(8), 357-374.
- [3] Özmen, G., Orakdöğen, E., Darılmaz, K., Örneklerle SAP2000 v17, Birsen Yayınevi, 2015.
- [4] Omid, A. J. Yapı-zemin etkileşimi altındaki binaların sismik davranışının deneysel ve sayısal çözüm yöntemleri ile incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
- [5] Meymand, P. J. (1998). Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay (Vol. 1). University of California, Berkeley.
- [6] Boru, E. Yapı tanı teknikleri ile sonlu eleman modelleri güncellenmiş binaların deprem performans analizi Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, 2015.
- [7] Dal, D., Matlab ile Programlama, Ekin Yayınevi, 2015.