Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32(2), ss. 23-35, Haziran 2017
Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 32(2), pp. 23-35, June 2017

Yapıların Dinamik Analizinde Kullanılan Sönüm Modellerinin İncelenmesi

Sedat KARAAHMETLİ[*1], Cengiz DÜNDAR[1]

[1]*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana*

Geliş tarihi: 07.03.2017 Kabul tarihi: 31.05.2017

Öz

Bu çalışmada, yapıların dinamik analizinde kullanılan sönüm modelleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla deneylerde, sarsma tablasına sabitlenmiş çok serbestlik dereceli yapı modeli kullanılmıştır. Çalışmanın teorik kısmında, sonlu elemanlar yöntemine dayanan SAP2000 bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Sayısal analizler, deneyler sonucunda elde edilen verilerden faydalanılarak, SAP2000 yazılımında oluşturulan modeller üzerinde farklı deprem verileriyle gerçekleştirilmiştir. Farklı sönüm modelleriyle gerçekleştirilen analizler ile deneyler sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Karşılaştırma neticesinde elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüş ve sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sönüm modeli, Dinamik parametre, Deprem mühendisliği, Yapı dinamiği

Investigation of Damping Models Used in Dynamic Analysis of Structures

Abstract

In this study, the damping models used the dynamic analysis of the structures have been investigated experimentally and theoretically. For this purpose, structure model having multi degree of freedom have been clamped to the shake table and experimentally tested. Then, by using SAP2000 computer software based on the finite element method, numerical models have been formed by taking advantage of the result obtained in the experimental study and numerical analyses which have been performed on different earthquake data. Besides, the analyses carried out different damping models have been compared with the experimental tests results. It has been observed that the results obtained from both theoretical and experimental studies are quite compatible and the results have been presented in the paper.

Keywords: Damping models, Dynamic parameter, Earthquake engineering, Structural dynamic

[*]Sorumlu yazar (Corresponding author): Sedat KARAAHMETLİ, *skaraahmetli@cu.edu.tr*

1. GİRİŞ

Sönümsüz modeller üzerinde yapılan hesaplar her ne kadar yapıların titreşimi hakkında önemli niteliksel bilgiler verse de bulunan sayısal büyüklükler genellikle önemli hatalar içerir. Bu nedenle sayısal sonuçları gerçeğe biraz daha yaklaştırmak için yapı modeline bir sönüm mekanizması eklemek gerekir. Gözlemler, serbestçe titreşen yapılardaki hareketlerin kısa süre içinde sönümlenerek durma noktasına geldiğini göstermektedir. Ancak sönüm mekanizmasını gerçekçi ve güvenilir bir biçimde modelleyebilmek oldukça zordur. Yapılarda sönümü oluşturan çatlama, kırılma, doğrusal olmayan malzeme davranışı ve sürtünme gibi enerji yutan mekanizmalar ve bunların titreşim moduna etkileri yapı davranışında büyük belirsizlikler oluşturur [1].

Bu konuda literatürde önerilen birçok sönüm modelleri bulunmaktadır. Bu modeller yapısal olarak,

- Viskoz Sönüm
- Rijitlikle Orantılı Viskoz Sönüm
- Kütleyle Orantılı Viskoz Sönüm
- Kütle ve Rijitlikle Orantılı (Rayleigh) Viskoz Sönüm
- Coulomb Sönümü
- Çevrimsel Sönüm
- Enerji Yayılma Sönümü

tanımlanmaktadır.

Bu sönüm türlerinden viskoz sönüm dış ve iç sönüm olarak ikiye ayrılmaktadır. Dış viskoz sönüm yapının içinde bulunduğu ortamdan dolayı oluşan ve ihmal edilebilen sönümdür. İç viskoz sönüm ise yapı malzemesinin sönümüdür. Bu sönüm doğrusal davranış sınırları içerisinde küçük kalırken, doğrusal olmayan sınırda büyümektedir. Coulomb sönümü taşıyıcı sistemin mesnet ve birleşim bölgelerinde meydana gelir. Deprem esnasında dolgu duvarlardan dolayı meydana gelen enerji kaybı bu sönüme örnek olarak verilmiştir. Çevrimsel sönüm ise yapı malzemesinin doğrusal ötesi davranışından ve etki eden yükün yönünü değiştirmesinden dolayı oluşmaktadır. Enerji yayılma sönümünde ise zeminden gelen deprem etkisinden oluşan enerjinin yapı içerisinde yayılarak kaybolması ile oluşur [1].

Bu çalışmada, laboratuvar ortamında çelik malzemeden oluşturulan 2 katlı bir yapı modelinin dinamik deneyleri yapılmıştır. Model deneyler, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarı'nda mevcut olan tek eksenli sarsma tablası üzerinde gerçekleştirilmiş ve deneyler esnasında yapıdan ivme ölçümleri alınmıştır. Veriler Yapı Laboratuvarı'nda bulunan veri kayıt etme cihazı (data logger) yardımıyla toplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen verilerden faydalanılarak, yapı modelinin sayısal modeli oluşturulmuş ve farklı sönüm modelleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapının deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırılarak, analizlerde kullanılan sönüm modelleri hakkında öneriler sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Adhıkarı ve Woodhouse [2] çalışmalarında titreşen bir yapıda oluşan ve farklı etmenlerden kaynaklanan gerçek sönüm modelini viskoz sönüm olarak tanımlamaktadır. Çalışmada sunulan bir metot ile karmaşık modlar ve doğal frekanslardan oluşan viskoz sönüm matrisi elde edilebilmektedir. Önerilen metot literatürde kabul görmüş yöntemlere dayanan sayısal örnekler kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, önerilen metodun son derece doğru bir sönüm mekanizması verdiği ifade edilmiştir.

Chang ve arkadaşları [3] zamana bağlı sönüm modelinin gelişiminde kullanılan yöntemler hakkındaki bir çalışmasında, zamana bağlı viskoz sönüm modelini oluşturmak için, ilk olarak belirli titreşim etkisindeki yapının frekansa bağlı sönüm oranları hesaplanmaktadır. Problemin doğası gereği bu oranlar teorik yöntemler ve deneysel gözlemlerden faydalanılarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan sönüm spektrumu ile zamana bağlı sönüm katsayıları Fourier transform tekniği ile elde edilebilmektedir. Bu yöntemde ise sönüm,

değişen yükler ile integrasyon yapılarak modellenmektedir. Sonuç olarak, çalışmada sunulan örnekler önerilen yöntemin oldukça kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Filiatrault ve arkadaşları [4] ahşap binalar için kullanılabilecek bir sönüm modeli geliştirdikleri çalışmada, elde ettikleri sayısal sonuçları sarsma tablası testlerinin sonuçları ile doğrulamışlardır.

Huang ve arkadaşları [5] çalışmalarında bir yapının serbest titreşim davranışından elde edilen modal sönüm oranlarının belirlenmesi için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Çalışmada önerilen yöntemin geleneksel logaritmik azalım yöntemine göre çok serbestlik dereceli bir sistemin sönüm oranlarının belirlenmesinde daha etkili ve pratik olduğu saha deneylerinden elde edilen sonuçlar ile gösterilmiştir.

Rodriguez ve arkadaşları [6] küçük bir yapı modeli oluşturarak, yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik davranışını belirlemek amacıyla bir analitik yöntem geliştirmişlerdir. Analitik yöntemi doğrulamak ve kalibre etmek amacıyla yapı modelinin sarsma tablası deney sonuçlarını kullanmışlardır. Çalışmada, kirişlerin sismik davranışı gibi konulara değinmişler ve sönümün dinamik hareket süresince sabit kalmayıp değiştiğini belirlemişlerdir. Analitik modelde, modlar için sarsma tablası deneylerinden elde ettikleri viskoz sönüm oranlarını kullanmışlardır.

Baran [7] çalışmasında yapıların dinamik davranışlarının deneysel olarak incelenebilmesi için bir sarsma tablası veri toplama sistemiyle birlikte kurulmuş ve kurulan tablanın performans testleri gerçekleştirmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, yapı analiz programları kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve tablanın istenen yer hareketlerini iyi bir hassasiyetle uyguladığı görülmüştür. Çalışma kapsamında model yapı üretim teknikleri incelenerek, bu tekniklere ve benzerlik/ölçekleme yasaları olarak bilinen yasalara uygun bir yapı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapı tabla üzerinde test edilmiş, elde edilen deneysel sonuçlarla, aynı yapının sayısal çözümleme sonuçları karşılaştırılarak dinamik davranışı etkileyen unsurlar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yapısal analiz programlarında, sınır şartlarının doğru modellenmesinin ve kullanılan sönüm modellerinin önem kazandığı gösterilmiştir.

Gülenç [8] yapıların dinamik davranışını doğrudan etkileyen kütle, sönüm ve deprem yüklemesi parametrelerinin alternatif modellerini kapsayan bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma kapsamında, dinamik parametrelerin temsilleri için farklı yaklaşımlar kullanılmış ve yapıların sismik tepkisine olan etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Rayleigh sönüm modelinin, pratik kullanımda çok verimli bir yöntem olduğu ve ilişkili frekanslar doğru seçildiğinde güvenilir sonuçlar verdiğini vurgulamıştır.

Gündoğan [9] yüksek lisans tez çalışmasında, çelik model bir köprünün yapı sağlığının gözlenmesi süreci içerisinde yer alan sistem tanımlama ve köprünün şu anki davranışını tespit etme işlemi yapmıştır. Bu çalışma sonucunda, modal parametreler (doğal frekanslar, mod şekilleri, sönüm oranı) elde edilmiş ve SAP2000 programı kullanılarak köprünün sayısal bir modeli oluşturulmuştur. Daha sonra modal analizi yapılan çelik köprünün, modal parametreleri bulunmuştur. NExT-ERA ve ERA analizinden elde edilen deney sonuçlarından çıkan mod şekilleri ve SAP2000 programından elde edilen mod şekilleri arasındaki karşılaştırma, modal güvenlik kriteri (MAC) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Bir diğer modal parametre olan sönüm oranı ise, NExT-ERA, ERA, yarım güç bant genişliği yöntemi ve logaritmik azalma yöntemi ile hesaplanmış fakat sönüm oranı sonuçlarının çeşitli etkenler sebebiyle birbirinden farklılık gösterdiği görülmüştür.

Ortiz ve arkadaşları [10] çalışmalarında, düşük titreşim ve farklı tip sarsma etkisindeki köprülerin sönümünün belirlenmesi için hassas bir analiz sunmuştur. Farklı kaynaklardan toplanan veriler kullanılarak incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Farklı frekans ve zaman-tanım alanı yöntemi kullanarak sönüm oranı tahmini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda sarsma şiddeti arttıkça sönüm oranının arttığını gözlemlemişlerdir.

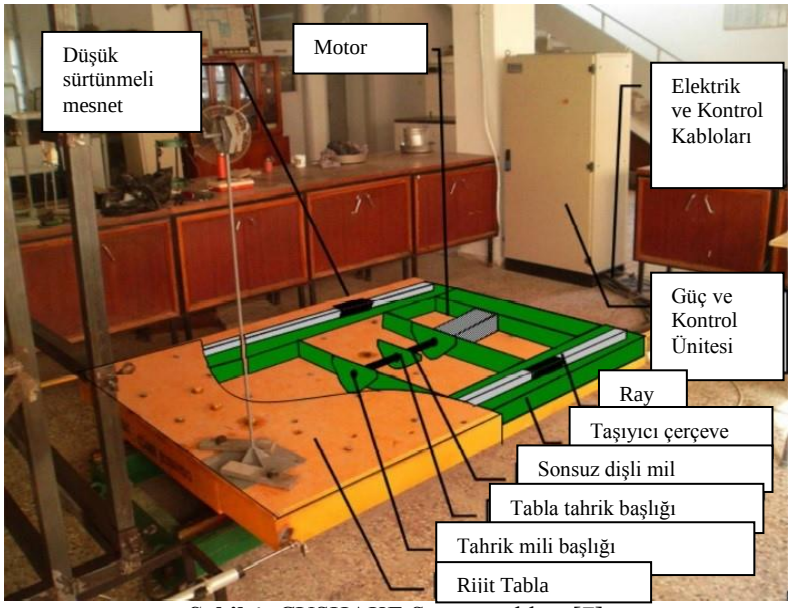
Aktaş ve arkadaşları [11] çelik köprülerin sönüm oranının belirlenmesi üzerine yaptıkları deneysel bir çalışmada, çelik malzemesinden oluşan bir yaya köprüsünün sönüm oranını, köprüye farklı ön deplasmanlar vererek gerçekleştirdikleri serbest titreşim deneyleri ile belirlemişlerdir. Yapının sönüm oranını köprü modelinden alınan deplasman ve ivme kayıtlarından faydalanarak, logaritmik azalım yöntemiyle hesaplamışlardır. Çalışmada 2mm ile 12mm ön deplasman koşulları altında gerçekleştirilen serbest titreşim deneylerinde, sönüm oranının %1 ile %7 arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Li ve arkadaşları [12] yaptıkları çalışmada, farklı özelliklere sahip 3 adet mevcut farklı özelliklerdeki köprünün sönüm oranlarını araştırmıştır. Köprülerin sönüm oranlarını, köprü tipi, hesaplama yöntemi ve sarsma şiddeti gibi parametreler etkisinde incelemişlerdir. Araştırmaları sonucunda sarsma şiddeti arttıkça köprülerin sönüm oranının önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deneysel çalışmalar; Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarı'nda, Şekil 1'de gösterilen CUSHAKE isimli sarsma tablasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. CUSHAKE Sarsma tablası [7]

CUSHAKE sarsma tablası tek eksende istenilen ivme kaydını uygulayabilmektedir. Tabla taşıyıcı bir sistem üzerinde, çelik malzemesinden rijit bir plakadan ve bu plakaya tek eksenli hareket veren bir elektrik motorundan oluşmaktadır. Tablanın taşıyıcı sistemi laboratuvar zeminine ankrajı sağlanmıştır. Elektrik motoruna hareket bir servo sürücü ile verilmektedir. Bilgisayara bağlı kontrol ünitesinden 5 veya 10 milisaniye aralıklı kayıtlar sisteme girilebilmektedir [7].

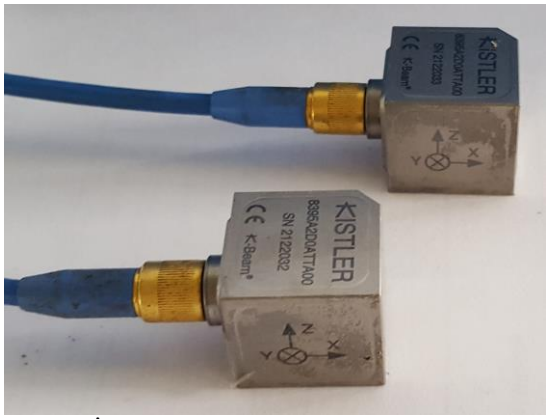
Sarsma tablası deneylerinde tablanın özellikleri kadar kullanılan ölçüm sistemi de önemli bir etkendir. Bu nedenle kullanılacak ölçüm sistemi yeterli hassasiyet ve kapasiteye sahip olmalıdır. Çünkü dinamik deneylerde çok kısa zaman

aralığında ve yüksek kalitede veri elde edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda sarsma tablası deneylerinde dinamik deneylere uygun olarak tasarlanmış ve çok küçük zaman adımlarında verileri kaydedebilen veri toplama (data logger) sistemleri ve sensörler (transducer) kullanılmaktadır. Bu anlamda CUSHAKE sarsma tablasında veri toplama sistemi Şekil 2'de gösterilen bir kutu içerisinde bulunan 4 kanallı ve kanal başına saniyede 100000 veri alabilen National Instrument 9215A ve 32 kanallı 250000 veri alabilen National Instrument 9205, 8 kanallı NI 9235 strain gauge modülünden oluşmaktadır [13].



Şekil 2. CUSHAKE sarsma tablası veri toplama sistemi [15]

Deney sistemi içerisinde kullanılan ve Şekil 3'de gösterilen ivmeölçerler ±2 g kapasitesinde üç eksende ölçüm yapabilme özelliğine sahiptir.

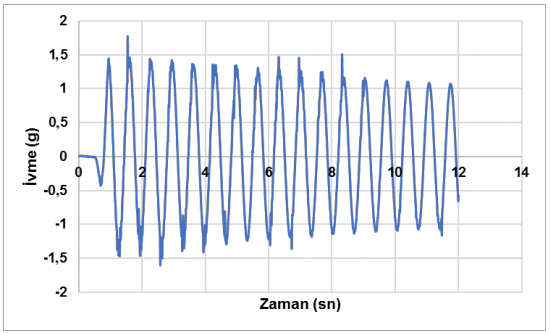


Şekil 3. İvmeölçerler [15]

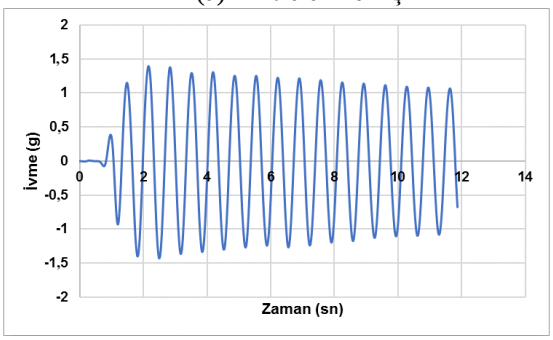
3.2. Metot

3.2.1. Veri Filtreleme

Sarsma tablası ölçüm sistemi içerisinde bulunan veri toplama kartları, içerisinde mevcut bir veri filtreleme prosedürünü bulundurmamaktadır. Bu nedenle deneysel veriler değerlendirmeye tabi tutulmadan önce gürültü adı verilen bu sinyal bozukluklarının filtrelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda "SeismoSignal Version 2016" veri filtrelemeye olanak sağlayan bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil 4'te, yapının serbest titreşim deneyi sonucunda elde edilen ivme-zaman grafiği filtrelenmemiş ve gürültüden filtrelenmiş olarak sunulmaktadır.



(a) Filtrelenmemiş



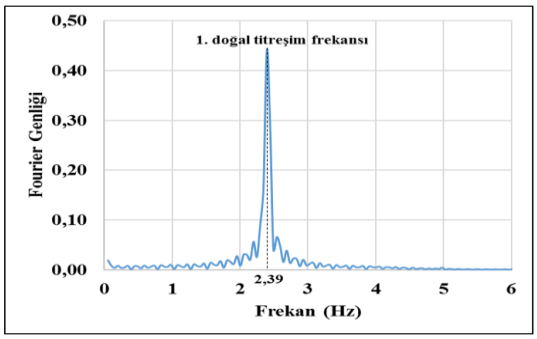
(b) Filtrelenmiş

Şekil 4. İvme-zaman grafiği [15]

3.2.2. Doğal Titreşim Frekansının Belirlenmesi

Deneylerden elde edilen ivme-zaman grafikleri kullanılarak her bir yapıya ait doğal titreşim frekansı elde edilebilmektedir. Doğal titreşim frekansının elde edilmesinde, ivme-zaman

grafiğinin Fourier dönüşümlerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntem ile doğal titreşim frekansının belirlenmesi için ilk olarak yapı sistemine bir deplasman verilmiştir ve böylece sistemin serbest titreşim yapması sağlanmıştır. Serbest titreşim deneyinden elde edilen zamana bağlı ivme değişimi Fourier dönüşümü ile frekansa bağlı fonksiyona dönüştürülerek, oluşturulan grafikteki maksimum değerden sistemin doğal titreşim frekansı belirlenebilmektedir. Fourier dönüşümü için literatürde çok farklı programlar bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında "SeismoSignal Version 2016" programı kullanılmıştır. Örnek olarak, Şekil 4'teki ivme-zaman grafiğinin fourier dönüşümü elde edilmiştir (Şekil 5). Fourier genliğinin maksimum olduğu frekans değeri, yapının doğal titreşim frekansını ifade etmektedir.



Şekil 5. Fourier dönüşümü kullanılarak yapının doğal titreşim frekansının belirlenmesi

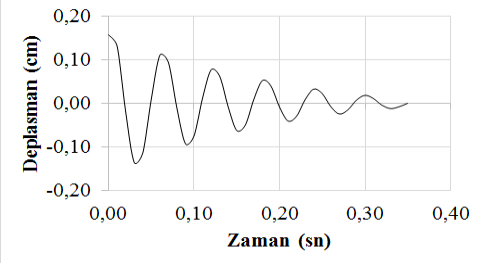
3.2.3. Sönüm Oranının Belirlenmesi

Çok serbestlik dereceli (ÇSD) sistemlerde sönümlü sistemin serbest titreşim etkisinde hareket denklemi aşağıda ifade edilmektedir.

$$u(t)=\Sigma\phi_n\left[e^{-\zeta_n\omega_n t}\left[u_n(0)\cos\omega_D t+\frac{\dot{u}_n(0)+\zeta_n\omega_n u_n(0)}{\omega_D}\sin\omega_D t\right]\right] \quad (1)$$

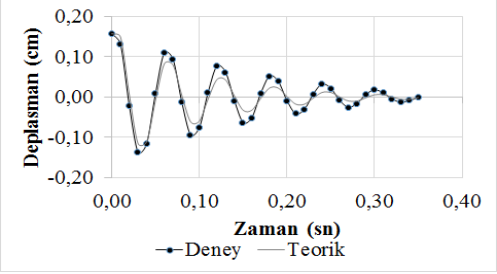
$u_n(t)$: Zamana bağlı yer değişimi
ϕ_n : n. mod şekil vektörü
ζ_n : n. mod sönüm oranı
ω_n : n. mod doğal frekans
t : Zaman
$u_n(0)$: Başlangıçtaki yer değişimi
ω_D : Sönümlü doğal frekans
$\dot{u}_n(0)$: Başlangıçtaki hız

Denklemdeki sönüm oranı dışındaki tüm parametreler deneysel olarak elde edilebilmektedir. Buradan yola çıkarak, ÇSD sistemlerin sönüm oranlarını serbest titreşim deneyleri ile belirlenebilir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken en önemli husus yapıyı yalnızca tek bir modda titreşecek biçimde çekip bırakmayı ayarlayabilmektir [14]. Örneğin çalışma kapsamında kullanılan 2 katlı çelik modele ait serbest titreşim deneylerinden birisine ait sonuç Şekil 6'da görülmektedir.



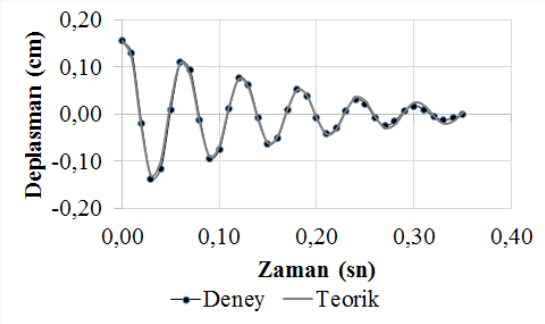
Şekil 6. 2 katlı çelik yapıya ait serbest titreşim deneyi

Deney sonuçlarına göre yapının 1. doğal titreşim frekansı 16,47 Hz olarak hesaplanmıştır. Başlangıç deplasman koşulu 0,157 cm, hız koşulu 0 cm/sn olarak ölçülmüştür. Hareket denklemi deneysel olarak elde edilen veriler kullanılarak, 0,1 sönüm oranı için 0,01sn artımlarla Excel programında hesaplanarak deney sonucu ile karşılaştırılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Teorik olarak 0.1 sönüm oranına göre hesaplanmış deplasman grafiği

Farklı sönüm oranları için yapılan hesaplamalar neticesinde bu model için en uygun sönüm oranı, 0,0595 olarak belirlenmiştir. Deney ve teorik olarak elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Teorik olarak 0,0595 sönüm oranına göre hesaplanmış deplasman grafiği [15]

3.2.4. Sönüm Modelleri

Sabit viskoz sönüm, Kütle orantılı sönüm modeli, Rijitlik orantılı sönüm modeli ve Rayleigh sönüm modeli olmak üzere analizlerde 4 farklı sönüm modeli kullanılmıştır.

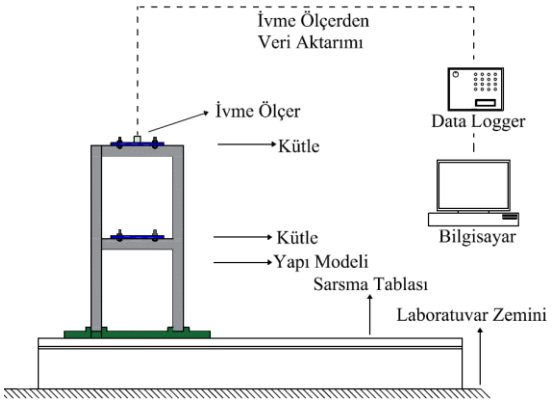
4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma kapsamında çelik malzemeden oluşturulmuş 2 katlı, kolon-kiriş kesit boyutları 20 mm x 20 mm olan Şekil 9'daki yapı modeli kullanılmıştır.



Şekil 9. Yapı modeli [15]

Şekil 10'da gösterilen sistem bileşenleri ve deney düzeneğinde, her biri 2469 gr olan kütlelerden yapının her katına sırasıyla 1, 2 ve 3'er adet kütle yerleştirilmiştir. İlk olarak her yükleme aşamasında yapının dinamik karakteristiklerini belirlemek amacıyla serbest titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak ise deneysel sonuçları sayısal analizlerle karşılaştırmak üzere yapıya 3 farklı deprem kaydı uygulanmıştır.



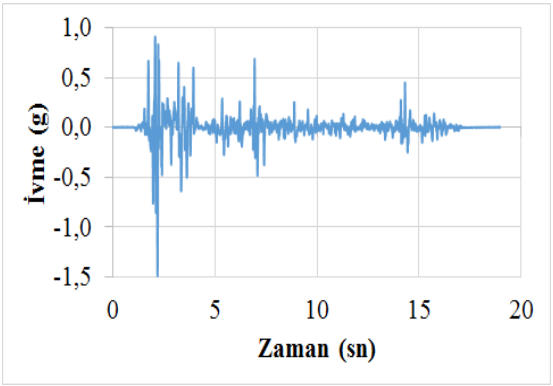
Şekil 10. Deney düzeneği [15]

Yapılan serbest titreşim deneyleri sonucunda sönüm modellerinin oluşturulmasında kullanılacak olan sönüm oranı ve doğal titreşim frekansı hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

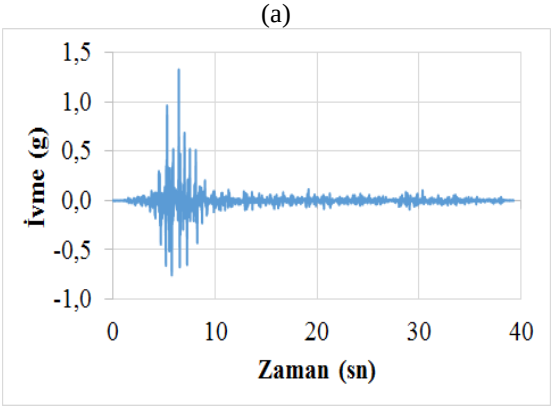
Çizelge 1. Yapı modeline dinamik parametreler

Model Yapı	Katlardaki Kütle Miktarı (kg)	Doğal Titreşim Frekansı (Hz)	Sönüm oranı (%)
Ç-1	0	37,083	0,0590
Ç-2	2,4	24,860	0,0562
Ç-3	4,8	19,608	0,0551
Ç-4	7,2	16,473	0,0510

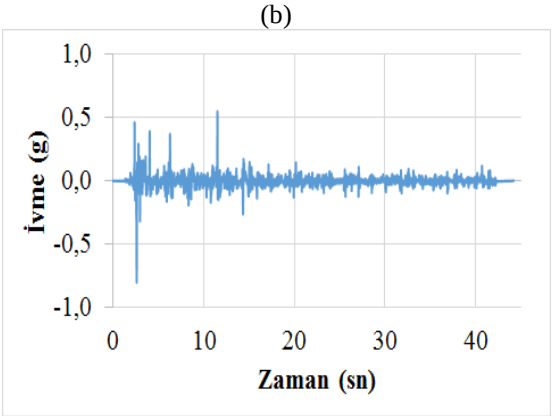
Zorlanmış titreşim deneyleri için kullanılan deprem kayıtları Şekil 11'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

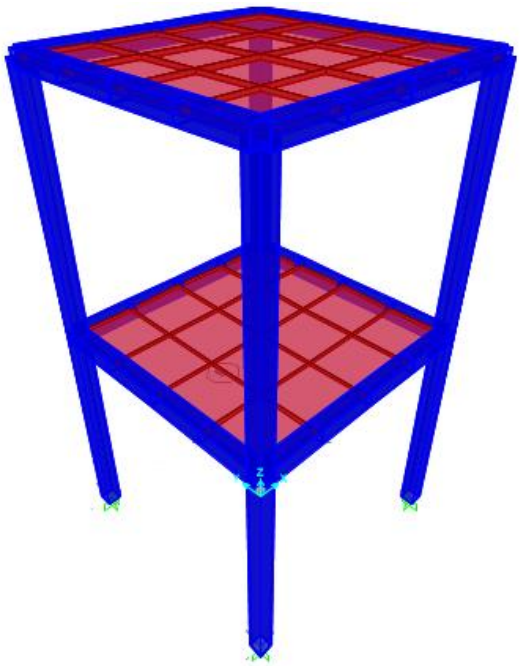
Şekil 11. Deprem kayıtları (a) El Centro (b) Friuli (c) Hollister [15]

Yapı modeline her yükleme aşamasında 3 deprem kaydı uygulanmıştır. Deneyler sırasında yapının tepe noktasından ivme kaydı alınmış ve kayıt filtrelenerek sayısal çalışmada elde edilecek sonuçlarda kullanıma hazır hale getirilmiştir.

5. SAYISAL ÇALIŞMA

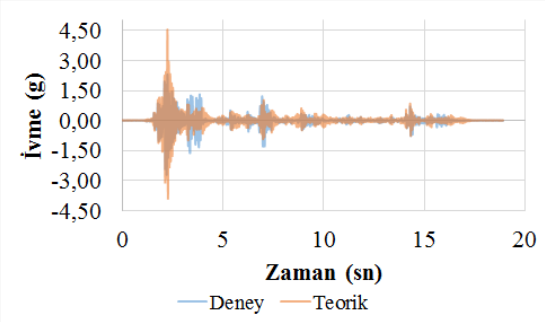
SAP2000 yazılımı kullanılarak farklı deprem kaydı altında model yapının analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sabit sönüm oranı, kütle orantılı sönüm modeli, rijitlik orantılı sönüm modeli ve Rayleigh sönüm modeli ile gerçekleştirilmiştir. Farklı sönüm modelleri ile gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen veriler deney sonuçları ile kıyaslanarak en uygun sönüm modeli araştırılmıştır.

Model yapının dinamik karakteristikleri deneysel sonuçlar kullanılarak belirlendikten sonra yapının analitik modeli oluşturulmuştur (Şekil 12). Yapı modeli, gerçek boyutlarda bilgisayarda tasarlanmış her iki yönde bir açıklığa sahip, iki katlı bir yapıdır. Yapı modeli her iki yönde de 35 cm açıklığa sahiptir. Zemin kat 31 cm, birinci kat ise 35 cm kat yüksekliğine sahiptir.



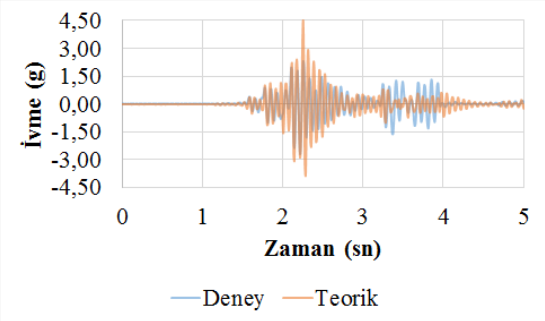
Şekil 12. Yapı modeline ait analitik model [15]

Gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen ikinci kat ivme verileri deney sonucu elde edilen ikinci kat ivme verileriyle karşılaştırılmıştır. Örnek olarak El Centro deprem kaydı ile yapı modelinin her katında 7,2 kg kütle bulunurken (Ç-4) yapılan zorlanmış titreşim deneyi ile sabit sönüm oranıyla elde edilmiş sayısal analiz sonuçları Şekil 13'te karşılaştırılmıştır.



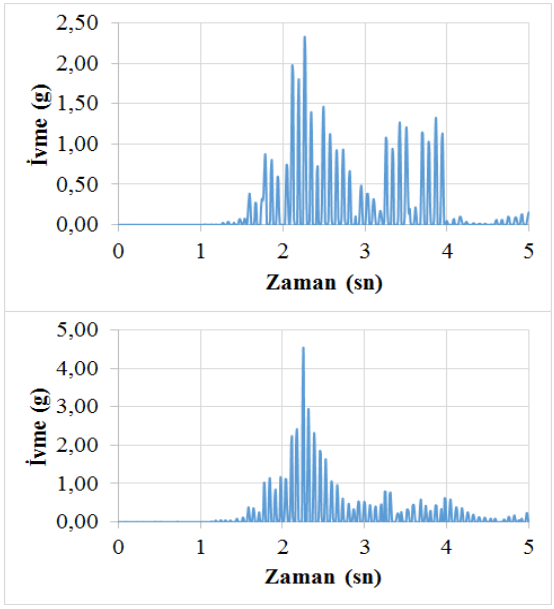
Şekil 13. Ç-4 modelinin El Centro deprem verisiyle gerçekleştirilen deney ve analiz (sabit sönüm) sonuçları [15]

Karşılaştırmanın daha detaylı incelenebilmesi için ise sonuçların ilk 5 saniyesi ele alınmış ve grafik Şekil 14'te verilmiştir.

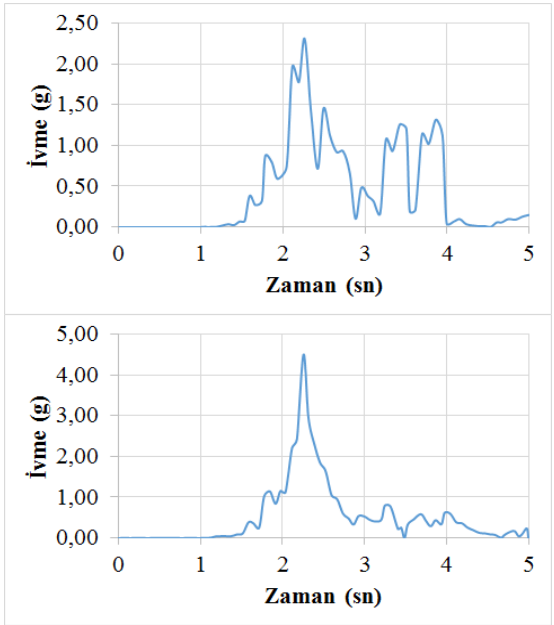


Şekil 14. Ç-4 modelinin El Centro deprem verisiyle gerçekleştirilen deney ve analiz (sabit sönüm) sonuçlarının ilk 5 saniyesi [15]

Deney ve analiz sonuçlarının ilk 5 saniyesinin sadece pozitif kısımları alınarak Şekil 15'teki grafik elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerin maksimum ivme değerleri birleştirilerek Şekil 16'daki zarf eğrisi oluşturulmuştur.



Şekil 15. Ç-4 modelinin El Centro deprem verisiyle gerçekleştirilen deney ve analiz (sabit sönüm) sonuçlarının pozitif bölgede kalan kısmı [15]



Şekil 16. Ç-4 nolu modelin El Centro deprem verisiyle gerçekleştirilen deney ve analiz (sabit sönüm) sonuçlarına ait zarf eğrileri [15]

Şekil 16'daki zarf eğrisi ile zaman ekseni arasında kalan alan integrasyon yöntemlerinden biri olan "Yamuk Kuralı" ile hesaplanmıştır ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar deney sonucuna göre oranlanmıştır.

Çizelge 2. El Centro deprem verisi ve sabit sönüm ile Ç-4 nolu yapı analizi [15]

	Zarf Eğrisi Altında Kalan Alan (g.sn)	Oran
Deney	2,24	1,00
SAP 2000	2,626	1,17

Benzer işlemler her yükleme aşamasında, El Centro, Friuli ve Hollister deprem kayıtları altında, sabit sönüm oranı, kütle orantılı sönüm modeli, rijitlik orantılı sönüm modeli ve rayleigh sönüm modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Deneysel ve analitik çalışmalar sonucunda elde edilen veriler El Centro deprem kaydı için Çizelge 3, Friuli deprem kaydı için Çizelge 4 ve Hollister deprem kaydı için Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 3. El Centro deprem verisi ile gerçekleştirilen analiz sonuçları [15]

Model No	Deney	Sabit Sönüm Oranı	Kütle Orantılı Sönüm Modeli	Rijitlik Orantılı Sönüm Modeli	Rayleigh Sönüm Modeli
Ç-1	1,00	0,50	1,49	0,21	0,32
Ç-2	1,00	0,98	2,83	0,26	0,43
Ç-3	1,00	1,08	2,87	0,28	0,49
Ç-4	1,00	1,17	4,11	0,30	0,52

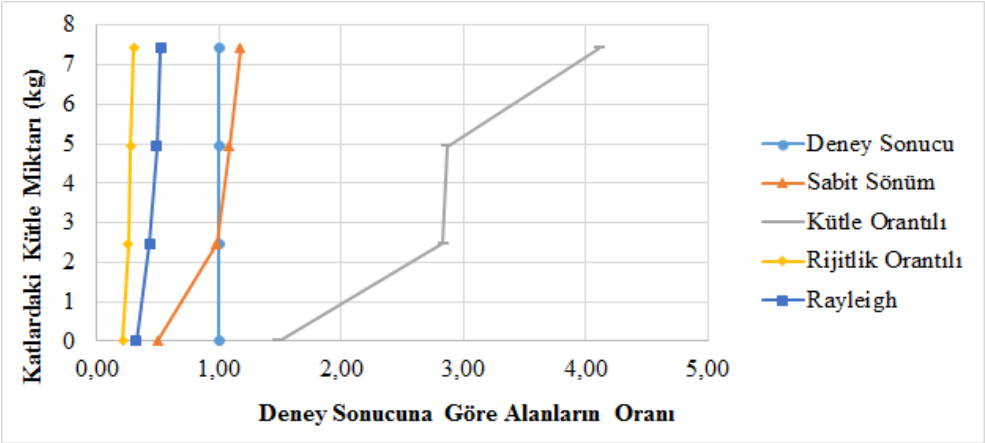
Çizelge 4. Friuli deprem verisi ile gerçekleştirilen analiz sonuçları [15]

Model No	Deney	Sabit Sönüm Oranı	Kütle Orantılı Sönüm Modeli	Rijitlik Orantılı Sönüm Modeli	Rayleigh Sönüm Modeli
Ç-1	1,00	0,69	2,03	0,24	0,38
Ç-2	1,00	0,88	2,74	0,26	0,42
Ç-3	1,00	0,87	2,12	0,26	0,42
Ç-4	1,00	0,69	2,20	0,21	0,32

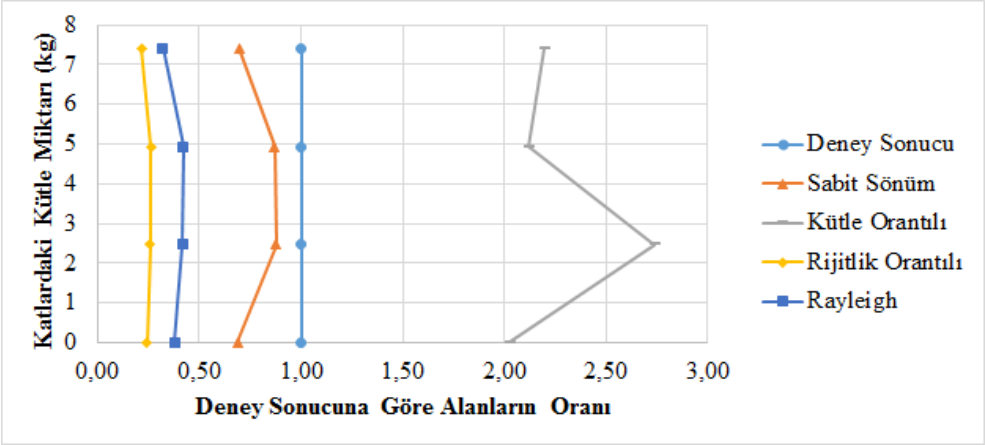
Çizelge 5. Hollister deprem verisi ile gerçekleştirilen analiz sonuçlar [15]

Model No	Deney	Sabit Sönüm Oranı	Kütle Orantılı Sönüm Modeli	Rijitlik Orantılı Sönüm Modeli	Rayleigh Sönüm Modeli
Ç-1	1,00	0,97	2,70	0,35	0,52
Ç-2	1,00	1,48	3,17	0,43	0,73
Ç-3	1,00	1,18	3,22	0,40	0,62
Ç-4	1,00	1,06	3,27	0,32	0,51

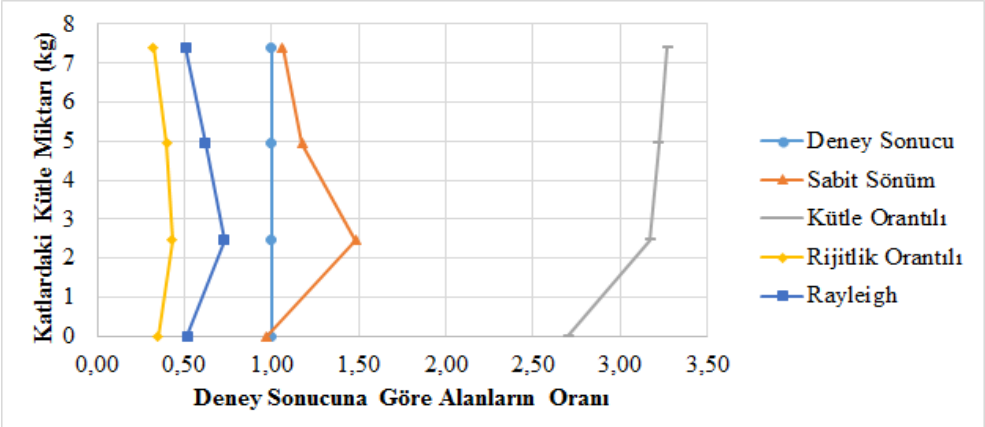
El Centro, Friuli ve Hollister deprem verileri ile elde edilen sonuçlar bir grafik üzerinde incelecek olursa sonuçlar sırasıyla Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'da sunulmuştur.



Şekil 17. El Centro deprem verisi ile gerçekleştirilen analiz sonuçları [15]



Şekil 18. Friuli deprem verisi ile gerçekleştirilen analiz sonuçları [15]



Şekil 19. Hollister deprem verisi ile gerçekleştirilen analiz sonuçları [15]

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yapıların sayısal analizlerinde kullanılan sönüm modelleri incelenmiştir. Çalışmanın deneysel kısmı Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Teorik incelemeler ise SAP2000 yazılım programı ile yapılmıştır.

Model yapı üzerinde gerçekleştirilen serbest titreşim deneylerinde, yapıdaki kütle miktarındaki artışın yapı sönüm oranını nasıl etkilediği incelenmiştir. Yapıda meydana gelen kütle miktarındaki artışın sönüm oranında azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen sönüm oranları ve frekans değerlerinden faydalanılarak SAP2000 yazılımında oluşturulan modeller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Üç farklı deprem kaydıyla gerçekleştirilen analizler sonucunda, sabit sönüm oranı ile gerçekleştirilen analizler diğer sönüm modellerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Sabit sönüm oranı ile gerçekleştirilen analizleri sırasıyla Rayleigh, Rijitlik Orantılı ve Kütle Orantılı sönüm modelleri izlemektedir.

Sabit sönüm oranı, Rayleigh ve Rijitlik Orantılı sönüm modelleriyle gerçekleştirilen analizler sonucunda, birbirlerine benzer davranışlar gözlemlenirken Kütle Orantılı sönüm modeliyle gerçekleştirilen analizler sonucunda düzenli bir davranış gözlemlenememiştir.

Bulunan sonuçlara göre yapı modelinin hazırlanması aşmasında analizde kullanılacak sönüm modelinin yapının gerçek dinamik davranışının elde edilmesinde önemli rol taşıdığı belirlenmiştir.

7. TEŞEKKÜR

Yazarlar, FYL-2015-5328 proje numarası ve "Yapıların Dinamik Analizinde Kullanılan Sönüm Modellerinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi" isimli bilimsel araştırma projesini destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkürlerini sunarlar.

8. KAYNAKLAR

1. Celep, Z., 2011. Yapı Dinamiği, Dördüncü Baskı, Beta Basım Yayım, İstanbul.
2. Adhikari, S., Woodhouse J., 2000. Identification of Damping: Part 1. Viscous Dampıng, Journal of Sound and Vibration 243(1), 43-61p.
3. Chang, D., Roesset, J.M., Wen. C., 2000. A Time-domain Viscous Damping Model Based on Frequency-dependent Damping Ratios. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 551-558p.
4. Filiatrault, A., Isoda, H., Folz, B., 2003. Hysteretic Damping of Wood Framed Buildings. Engineering Structures, (25): 461–471p.
5. Huang, F., Wang, X., Chen, Z., He, X., Ni, Y., 2006. A New Approach to Identification of Structural Damping Ratios. Journal of Sound and Vibration 303, 144–153p.
6. Rodríguez, M. E., Restrepo, J. I., Blandón, J. J., 2006. Shaking Table Tests of a Four-Story Miniature Steel Building—Model Validation. Earthquake Spectra, 22, (3):755–780p.
7. Baran, T., 2008. Yapıların Dinamik Davranışının Deneysel ve Teorik Olarak Incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
8. Gülenç, C., 2014. Alternate Representations of Dynamic Properties and Loading. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
9. Gündoğan, M., 2012. Çelik Model Köprünün Yapı Sağlığının Gözlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
10. Ortiz, A.R., Ventura, C.E., Catacoli, S.S., 2013. Sensitivity Analysis of the Lateral Damping of Bridges for Low Levels of Vibration. Topics in Dynamics of Bridges, Volume 3, Chapter 11, Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics.
11. Aktaş, M., Kuyuk, S., Yılmaz, C., Ağcakoça, E., Çelebi, E., 2014. Experimental Study on Determining Damping Ratio of Steel Bridges. Second European Conference on Earthquake Engineering ans Siesmology, İstanbul 1-9p.

12. Li, Z., Li, P.F., Jiang, Z.Y., Wei, H., 2016. Difference of Bridge Damping Ratio under Different Excitations. Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock, Volume 35, Issue 3, 15 February 2016 62-67p.
13. Birdal, F., 2015. Betonarme Yapıların Sismik Davranışlarının Sarsma Tablasında Deneysel Olarak İncelenmesi ve Analitik Olarak Modellenmesi. Doktora Tezi Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
14. Chopra, A. K., 2015. Yapı Dinamiği Teorileri ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları, Dördüncü Baskıdan Çeviri, Palme Yayıncılık, Ankara.
15. Karaahmetli, S., 2017. Yapıların Dinamik Analizlerinde Kullanılan Sönüm Modellerinin Teorik ve Deneysel Olarak İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
16. Structural Analysis Program (SAP2000), Computers and Structures Inc, Berkeley, CA