



Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi

Emin HÖKELEKLİ

Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Bartın

ehokelekli@bartin.edu.tr

ORCID: 0000-0003-0548-5214, Tel: (378) 294 91 79

Geliş: 30.09.2019, Revizyon: 04.01.2020, Kabul Tarihi: 10.03.2020

Öz

Yapı zemin etkileşimi yapıların deprem etkileri altındaki davranışlarının doğru olarak belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Geleneksel tasarım çalışmalarında yapının tabandan ankastre olduğu kabulü sıklıkla kullanılmakta ve yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte, özellikle esnek zemin ortamlarında bulunan tarihi yığma yapılarda deprem yer hareketleri yapı davranışını önemli derecede etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, tarihi yığma bir minarenin esnek ve ankastre mesnetlenme durumları için deprem davranışları, yatay ve yatay+düşey yer hareket bileşenleri için araştırılmaktadır. Çalışmada, kayma dalgası hızları sırasıyla 1000, 270 ve 90 m/s olan üç farklı zemin türü kullanılmıştır. Üç boyutlu sonlu eleman modelinin oluşturulmasında minarede tetrahedral, zemin ortamında hexahedral sonlu ve sonsuz elemanlar kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli, Operasyonel Modal Analiz Yöntemi deneysel sonuçlarına göre kalibre edilmiştir. Kalibre edilen sonlu eleman modeli kullanılarak minare-zemin etkileşim sisteminin yatay, yatay+düşey yer hareketleri altında lineer deprem davranışları, farklı zemin ve ankastre mesnetlenme durumları için elde edilerek karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı-zemin etkileşimi; Tarihi yığma minare; Sonlu elemanlar analizi; Yatay yer hareketi; Deprem davranış

Giriş

Cami, kilise, han, hamam, köprü gibi tarihi yapılar içerisinde yığma minare ve kuleler, ince ve uzun geometrileri nedeniyle deprem ve rüzgâr gibi doğal afetlere karşı daha savunmasızdırlar. Büyük depremlere maruz kalan bu yapıların bir kısmı tamamen yıkılmış, bir kısmı ise ciddi hasar görmüştür. Örnek olarak 2011 Van depreminde 76 minare hasar görmüş ve bu minarelerden 50 tanesi yıkılmıştır [1]. Minare, kule türü yığma yapıların statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi konusunda hem deneysel hem de teorik yöntemler kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Yığma minare ve kule türü yapılar ile ilgili son yıllarda yapılmış çalışmalar aşağıda sunulmaktadır. Rainieri ve Fabbrocino [2], Shakya vd. [3], Bartoli vd. [4] yığma türü kule, minare ve bacalar için temel frekanslarının belirlenmesine yönelik ampirik formüller önermişlerdir. Gentile ve Saisi vd. [5], Bayraktar vd. [6], Foti vd. [7], Nohutçu vd. [8], Hacıfendioğlu ve Maraş [9], Diaferio vd. [10] Livaoğlu vd. [11] kule ve minare türü yapıların frekans, mod şekli ve sönüm oranlarını Operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Sevim vd. [12] çevresel titreşim deneylerini kullanarak minarelerin deprem davranışlarını incelemişlerdir. Oliveira vd. [13] farklı boyutlarda 11 adet minarenin deneysel, teorik frekanslarını karşılaştırmış, minarelerden 7'sinin deprem risk seviyelerini belirlemişlerdir. Mortezaei vd. [14] yığma bir cami ve minaresinin deprem davranışını lineer ve lineer olmayan analiz yöntemlerini kullanarak araştırmıştır. D'Ambrisi vd. [15] yığma bir kulenin çevresel titreşim deneyleri ile dinamik karakteristiklerini belirlemiş ve yapının sonlu elemanlar modelini deneysel sonuçlara göre kalibre etmiştir. Kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak kulenin sismik performansı değerlendirmiştir. Milani vd. [16], Preciado [17], Valenta vd. [18, 19], Bartoli vd. [4] yığma kulelerin doğrusal olmayan deprem davranışını statik ve dinamik yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Minghini vd. [20] Emilia

depreminde hasar gören tarihi bir bakanın sismik davranışını araştırmışlardır. Pintucchi vd. [21] yığma kulelerin deprem davranışını statik ve zaman tanım alanında yöntemleri ile incelemişlerdir. Nohutçu vd. [22] tarihi bir minarenin lineer ve lineer olmayan deprem davranışlarını zaman tanım alanında kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanarak araştırmıştır. Hejazi vd. [23] tarihi bir minarenin yapısal davranışını sıcaklık, rüzgâr ve deprem yükleri altında incelemiştir. Kocatürk ve Erdoğan [24] kuvvetli deprem hareketlerinin minarelerin enerji yutma kapasitesine düşey metal birleşim elemanlarının etkisini araştırmışlardır. Erdoğan vd. [25] 1999 yılında meydana gelen Düzce depremine maruz kalan altı farklı minarenin deprem davranışını araştırmışlardır. Ubertini vd. [26] kule türü yapıların doğal frekansındaki değişime nem ve sıcaklığın etkisini çevresel titreşim deneylerini kullanarak araştırmışlardır. Hacıfendioğlu vd. [27] tarihi minarenin dinamik karakteristiklerini sonlu eleman metodu ve deneysel yöntemlerle belirlemişler ve model kalibrasyonunun yapısal davranışı etkilediğini ifade etmiştir. Diaferio vd. [28] tarihi çan kulesinin davranışlarını İtalyan Yönetmeliğini kullanarak dinamik, lineer/lineer olmayan statik yöntemler ile araştırmışlardır. Bayraktar vd. [29] restorasyonun yığma minarelerin dinamik davranışı üzerine etkisini Operasyonel modal analiz yöntemini kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Erdil vd. [30] yapısal parametrelerin minarelerin sismik davranışına etkilerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır.

Yukarıda sunulan çalışmaların büyük bir kısmında yapı-zemin etkileşimini göz ardı edilmiştir. Bu çalışmalarda yapının sert zemine oturduğu düşünülerek zemine ankastre olarak mesnetlenmiştir. Eğer yapının oturduğu zemin elastik özelliklere sahip derin sert bir kaya ise bu yaklaşım doğru kabul edilebilir. Aksi durumda ikinci doğal frekans ile düşey ivme bileşeni arasındaki ilişki nedeniyle yapıda meydana gelecek hasarlar doğru tahmin edilmeyebilir [31].

Literatürde yapı-zemin etkileşimini dikkate alarak minare ve kule türü yığma yapıların sismik davranışının belirlenmesi konusunda çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar; Casolo vd. [32] tarihi yığma bir çan kulesinin farklı zemin koşulları altında sismik davranışını lineer/nonlineer analiz yöntemlerini kullanarak incelemiştir. Casolo ve Uva [33], Pitilakis ve Karatzetzou [34], Ceroni vd. [35] yığma yapıların oturduğu zemin ortamını yaylar ile modellemişlerdir.

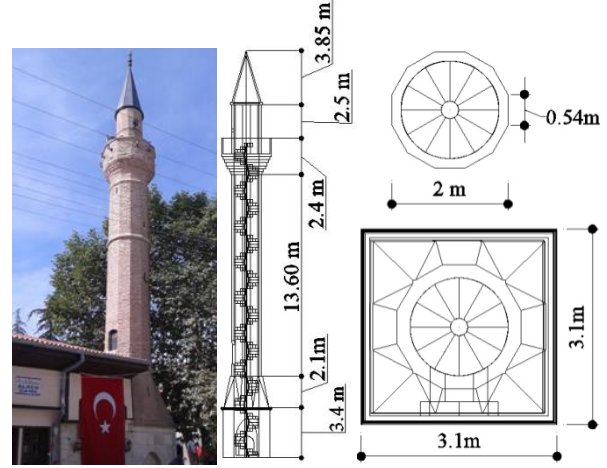
Bu çalışma kapsamında, öncelikle minarenin çevresel titreşim deneyleri ile deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra Abaqus V10 [36] programı kullanılarak teorik dinamik karakteristikleri elde edilmiştir. Teorik dinamik karakteristikler deneysel sonuçlara yaklaştırılarak yapının sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Minarenin kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılarak lineer deprem analizleri yapılmıştır. Yapının ankastre ve üç farklı zemine (sert, orta, yumuşak) mesnetlenmesi durumları göz önüne alınarak her bir model için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Analizlerde ilk olarak zemin yapı etkileşimli ve etkileşimsiz durumlar için modal analiz yapılmış ve dinamik karakteristikler (mod şekilleri, doğal frekansları) belirlenmiştir. Son olarak zaman tanım alanında lineer deprem analizleri yapılarak yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirmeleri, maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmeleri belirlenmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırılarak yapı-zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi araştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Tarihi Alaca Camii Minaresi

Bu çalışmada uygulama alanı Afyon ili Bolvadin ilçesinde yer alan 1271 yılında inşaa edilen tarihi Alaca Camii minaresi seçilmiştir. Minare tek şerefeli ve camiinin Kuzey-Doğu köşesinde bulunmaktadır. Farklı geometrik özelliklere sahip minarenin kürsü kısmı kare, geçiş bölgesi prizmatik, gövde kısmı ise çokgen kesitlidir. Minarenin toplam yüksekliği 27m'dir.

Minareyi oluşturan geçiş bölgesi, gövde, balkon, alem kısımlarının yüksekliği ve duvar kalınlıkları Şekil 1'de sunulmuştur. Minarenin taşıyıcı sisteminde tuğla, andezit taşı ve horasan harcı kullanılmıştır.



Şekil 1. Tarihi Alaca Camii minaresi ve boyutları

Yapı-Zemin Etkileşimi

Yapı-zemin etkileşimde en önemli problem sonlu boyuta sahip olan yapı ve sonsuz boyuta sahip olan zeminin modellenmesidir. Sonlu elemanlar yöntemi zemin yapı etkileşim analizlerinde ve modellemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı-zemin etkileşiminde sonlu eleman modelin gerçeği yansıtabilmesi için sonsuz boyuta sahip zeminin doğru olarak modellenmesi gerekmektedir. Sonsuz boyuta sahip olan bir zeminin sonlu bir bölge olarak modellenmesi durumunda, zemin içerisinde yayılan sismik dalgaların sonlu bölgenin sınırlarına çarparak geri dönmesine ve sürekli olarak zemin içerisinde hareket etmelerine sebep olmaktadır. Bu davranış dalga yayılım hareketini doğru idealize etmediği için, yapı-zemin etkileşiminde gerçekçi olmayan sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle zemin içinde hareket eden dalgaların sonlu elemanlar zemin bölgesinin sınırından geçmesini sağlayacak matematiksel modelin kurulması gerekmektedir.

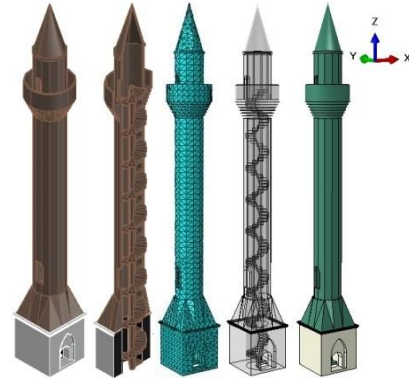
Yapı-zemin etkileşiminde dalganın sonlu eleman sınırından geçmesini sağlayan farklı modelleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisi sonlu zemin bölgesinin

sınırları modellenirken sıklıkla geçirgen yapay sınırlar kullanılmaktadır. İkinci modelleme yönteminde ise dalga yayılımının etkili olduğu, yakın zemin bölgesi için sonlu elemanlar yöntemi, uzak zemin bölgesi içinse sonsuz elemanlar yönteminin kullanılmasıdır. Uzak bölge olarak ifade edilen yerin başlangıç sınırı, sonlu eleman ağının bittiği sınırlardır. Uzak zemin bölgesi için tanımlanan sonsuz elemanlar, ortamda yayılan ve sonsuza giden dalgaları idealize edecek şekilde seçilmektedir. Bu tür modellemede sonsuz elemanlar için rijitlik ve kütle matrisleri şekil fonksiyonları kullanılarak oluşturulmakta ve sonlu elemanlarla birlikte uygulanabilmektedir. Uzak zemin bölgesinin modellenmesinde sonsuz eleman kullanılması karmaşık geometriye sahip üç boyutlu yapıların zemin etkileşim problem analizleri için geçen süreyi kısaltmaktadır.

Bu çalışmada; minare ve zeminin sonlu eleman modelleri ayrı ayrı oluşturulmuş ve daha sonra bir araya getirilerek tek bir sonlu eleman modeli elde edilmiştir. Zemin ortamının yakın zemin bölgesi lineer sonlu elemanlar (C3D8), uzak zemin bölgesi ise sonsuz (infinite) elemanlar (CIN3D8) kullanılarak modellenmiştir.

Minare Sonlu Elemanlar Modeli

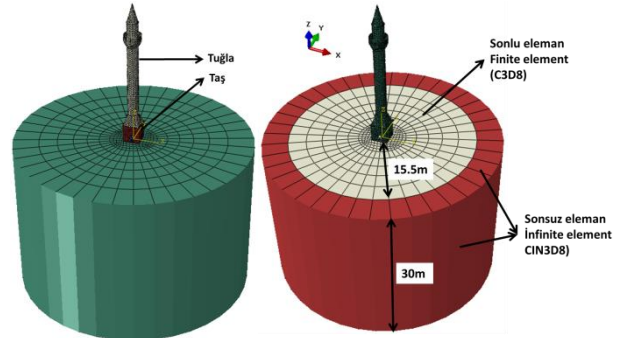
Minarenin yerinde ölçümler yapılarak Abaqus programında 3D katı modeli ve sonlu elemanlar modelinin oluşturulmuştur (Şekil 2a-2b). Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında 61107 adet dört düğüm noktasına sahip lineer tetrahedral eleman (C3D4) ve 19809 düğüm noktası kullanılmıştır. Zemin ortamının, sonlu zemin bölgesinin modellenmesinde 4852 adet lineer hexahedral eleman (C3D8), sonsuz zemin bölgesinde ise 450 adet hexahedral sonsuz (infinite) eleman (CIN3D8) kullanılmıştır (Şekil 2).



a) Katı model b) Sonlu Eleman Modeli
Şekil 2. Minarenin üç boyutlu katı ve sonlu eleman modeli

Zeminin Sonlu ve Sonsuz Eleman Modeli

Sonlu ve sonsuz zemin ortamı arasındaki yatay mesafe yapı genişliğinin yaklaşık beş katı, ana kayaya kadar olan zemin derinliği ise 30m alınmıştır [37]. Minare-temel yüzeyi arasındaki etkileşimin modellenmesinde bağ (tie) kontak kullanılmıştır. Temel-zemin yüzeyleri arasında ayrılmanın olmadığı hard etkileşim ile kayma yönünde ise sürtünmeli etkileşim tanımlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Minare-zemin sonlu ve sonsuz eleman modeli

Malzeme mekanik özellikleri

Minarenin taşıyıcı sistemini oluşturan gövde duvarlarında tuğla, gövde altında yer alan geçiş bölgesi ve kürsü kısmında taş malzeme, bağlayıcı olarak ise horasan harcı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Nohutçu vd. [8] tarafından yapılan çalışmadan alınmış (Tablo 1).

Sonlu eleman modellemesinde makro malzeme modelleme tekniği kullanılmıştır. Yığma birimi oluşturan taş, tuğla ve harç birimi için ortak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Yığma duvar basınç dayanımı Denklem (1) kullanılarak elde

edilmiştir [38].

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (1)$$

Yığma sistemin morfolojik yapısına göre K, α ve β sabit değerler almaktadır. Burada K, α ve β için sırası ile 0.5, 0.65 ve 0.25 değerleri alınmıştır. f_b (MPa), taş veya tuğlanın basınç dayanımı, f_m (MPa) harcın basınç dayanımını ifade etmektedir. Yığma duvar elastisite modülü Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır [39].

$$E = \frac{t_m + t_u}{\frac{t_m}{E_m} + \frac{t_u}{E_u}} \rho \quad (2)$$

Denklem (2)'de verilen ρ harç ve yığma birimler arasındaki kenetlenmeye göre

değişmektedir. t_m , harcın ortalama kalınlığını, t_u , taş veya tuğlanın ortalama yüksekliğini, E_m , harç elastisite modülünü, E_u , taş veya tuğlanın elastisite modülünü ifade eder. Yığma taş duvar ve yığma tuğla duvar için başlangıç elastisite modülü Denklem (2) kullanılarak sırası ile 4404 MPa ve 1362MPa, basınç dayanımları ise Denklem (1) kullanılarak sırası ile 5.7MPa ve 3.4MPa olarak hesaplanmıştır. Yığma taş ve tuğla duvar çekme dayanımları basınç dayanımlarının %10'u alınarak hesaplanmıştır.

Yapı-zemin etkileşimi için sert, orta ve yumuşak olmak üzere üç farklı zemin tipi seçilmiştir. Zeminlere ait lineer malzeme özellikleri ve Rayleigh sönüm katsayıları Kramer [40] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır (Tablo 2).

Tablo 1. Minarede kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri [8].

Malzeme	Basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson oranı
Tuğla	8.2	2985	2100	0.25
Andezit Taşı	30	12240	2200	0.3
Harç	6.25	1100	1340	-

Tablo 2. Zemin malzeme özellikleri [40].

Zemin özellikleri	Birim hacim ağırlık (kg/m ³)	Elastisite modülü (N/m ²)	Poisson oranı ν	Kayma modülü (N/m ²)	P dalgası hızı V_p (m/s)	Kayma dalgası hızı V_s (m/s)	Rayleigh sönüm katsayıları	
							α_r	β_r
Sert	2064	5.68E+09	0.3	2.10E+09	2082	1000	3.920	0.00047
Orta	1864	3.61E+08	0.35	1.38E+08	505.5	270	1.059	0.00176
Yumuşak	1667	3.45E+07	0.4	1.38E+07	156	90	0.353	0.00530

Modal Analiz ve Model Kalibrasyonu

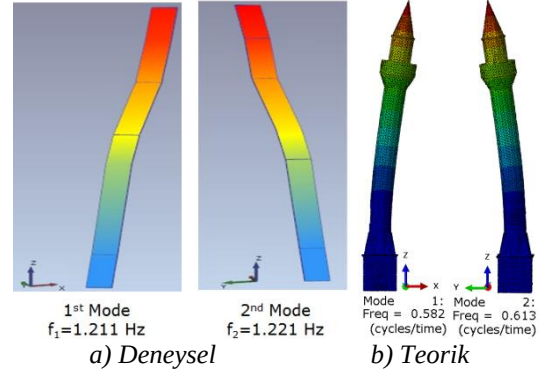
Alaca Camii minaresinin deneysel olarak dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz (OMA) yöntemi kullanılmıştır. Çevresel titreşim etkilerinin yapıda oluşturduğu titreşimlerin ölçülmesinde hassas ivmeölçerler kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. İvmeölçer yerleşim yerleri

İvmeölçerlerden alınan sinyaller veri toplama cihazında toplanmıştır. Toplanan veriler ARTEMIS Modal Pro [41] yazılımına aktarılarak minarenin deneysel dinamik karakteristikleri elde edilmiştir (Şekil 6a). Yığma birimlerin başlangıç malzeme parametreleri kullanılarak minare tabanının ankastre kabulü ile elde edilen teorik frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 6b’de sunulmuştur. Deneysel ve teorik frekanslar arasında farklar olduğu ve farkın analizde kullanılan malzeme parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Teorik frekanslar deneysel sonuçlara yaklaştırılarak minarenin sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Minarenin sonlu eleman model kalibrasyonunda malzeme parametrelerinden faydalanılmıştır.

Kalibrasyon öncesi yığma tuğla duvarın elastisite modülü 1362MPa, kalibrasyondan sonrası 4400MPa, yığma taş duvar elastisite modülü 4404MPa, kalibrasyondan sonra ise 9500MPa olarak belirlenmiştir.



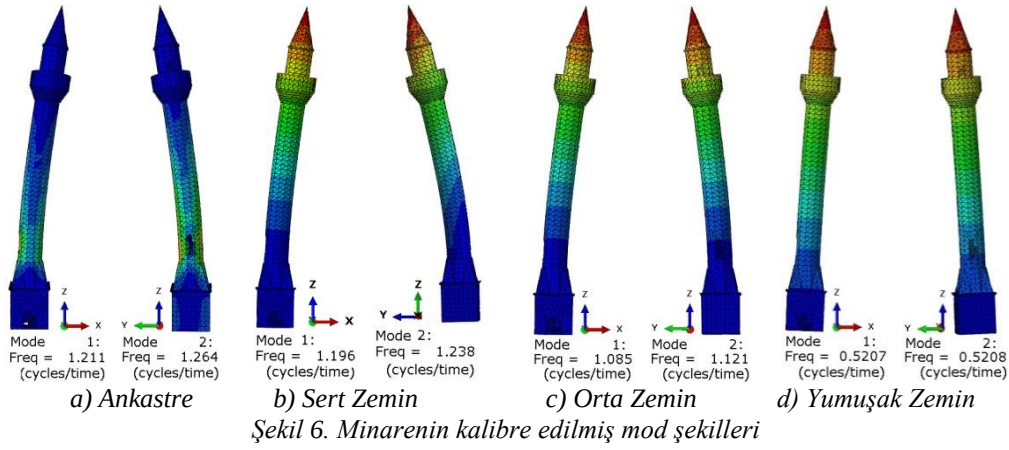
Şekil 5. Alaca Camii minaresi deneysel ve teorik mod şekilleri

Minarenin kalibre edilmiş sonlu eleman modelinin ankastre ve üç farklı zemin ortamına mesnetlendiği düşünülerek modal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen ilk beş teorik frekans değerleri Tablo 3’te, mod şekilleri ise Şekil 6’da sunulmuştur. Şekil 6’ dan teorik mod şekillerinin birbirlerine benzer olduğu, frekans değerlerinin ise ankastre ve sert zemin durumunda deneysel ölçümlere yakın olduğu görülmektedir.

Bu sonuçlara göre minarenin üzerinde bulunduğu ortamın sert zemin özelliklerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Zemin yapı etkileşimli ve zeminsiz durumları dikkate alınarak zaman tanım alanında lineer deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında deprem analizlerde kalibre edilmiş sonlu eleman modeli kullanılmıştır.

Tablo 3. Minarenin kalibre edilmiş SE model teorik ve deneysel frekansları

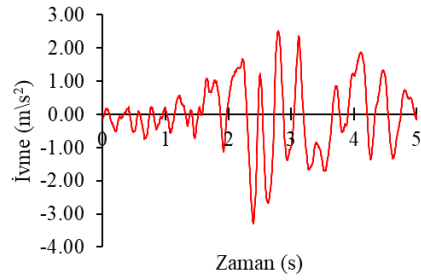
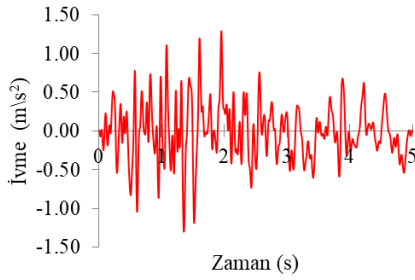
Mod	Teorik Frekanslar (Hz)								Deneysel frekanslar
	Sonlu eleman modeli kalibrasyon öncesi frekanslar				Sonlu eleman modeli kalibrasyon sonrası frekanslar				
	Ankastre	Sert	Orta	Yumuşak	Ankastre	Sert	Orta	Yumuşak	
1	0.582	0.624	0.617	0.516	1.211	1.196	1.085	0.520	1.211
2	0.613	0.651	0.643	0.517	1.264	1.238	1.121	0.520	1.271
3	3.897	3.932	1.597	0.575	7.942	5.967	1.599	0.708	7.856
4	3.941	3.968	1.597	0.593	8.016	6.972	1.600	0.896	8.021
5	4.962	5.549	2.207	0.708	10.614	7.338	2.207	0.912	9.980



Yapı-Zemin Etkileşimi Deprem Analizleri

Minarenin lineer deprem analizlerde 10 Ekim 1995, Afyon, Dinar depremi ($M_w=6.1$) ivme kayıtları kullanılmıştır. İvme kayıtlarının doğu-batı (E-W), düşey (V) bileşenlerinin etkili olduğu beş saniyelik kısmı analizlerde kullanılmıştır (Şekil 7).

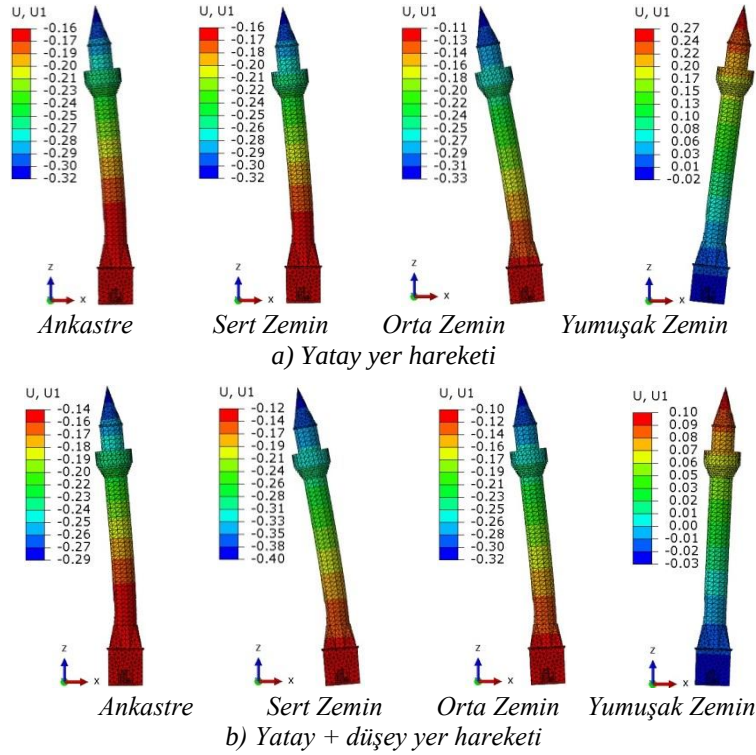
Deprem bileşenlerinin yatay ve düşey maksimum ivme değerleri sırası ile 3.23 m/s^2 ve 1.28 m/s^2 'dir. Analizlerde doğu-batı (E-W) bileşeni yatay (x) doğrultuda, düşey bileşen (z) doğrultusunda minareye etkilmiştir.



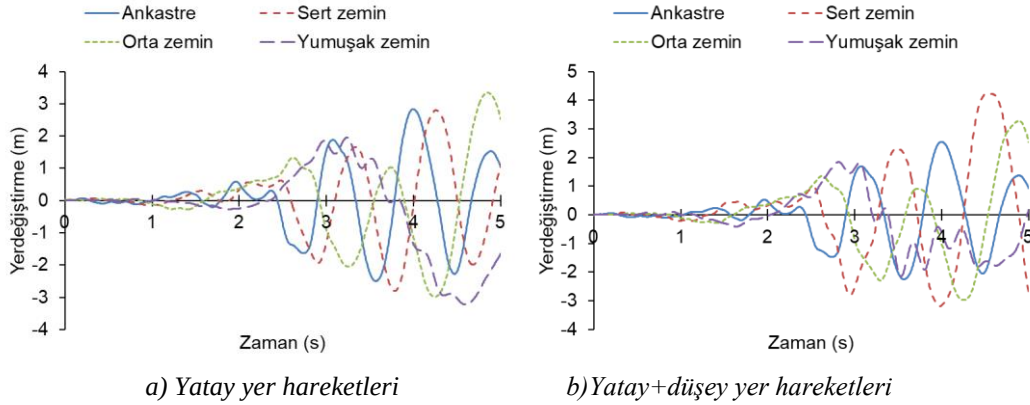
Şekil 7. 10 Ekim 1995, Afyon, Dinar depremi ($M_w=6.1$) yatay ve düşey ivme bileşenleri

Farklı zemin özelliklerinin minarenin sismik davranışı üzerine etkilerini görmek amacı ile lineer deprem analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yatay ve yatay+düşey yer hareketi yükleme durumları ayrı ayrı kullanılmıştır. Tüm analizlerde minarenin kendi ağırlığı dahil edilmiştir. Yatay (x) doğrultuda etkitilen deprem ivme bileşeni kullanılarak yapılan lineer deprem analizi sonucu, minarede meydana gelen maksimum yer değiştirmenin yumuşak zemine durumunda meydana geldiği görülmüştür. Minare tepe noktasında

meydana gelen maksimum yer değiştirmenin yatay (x) yönde 0.29m düşey z doğrultusunda ise 0.033m olduğu görülmüştür (Şekil 8a). Yatay ve düşey ivme bileşenlerinin aynı anda uygulanması durumunda minare tepe noktasında meydana gelen maksimum yer değiştirme 0,28m yatay (x) ve 0,045m düşey (z) doğrultuda ve sert zemin durumunda meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8b). Maksimum yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri Şekil 9'da verilmektedir.



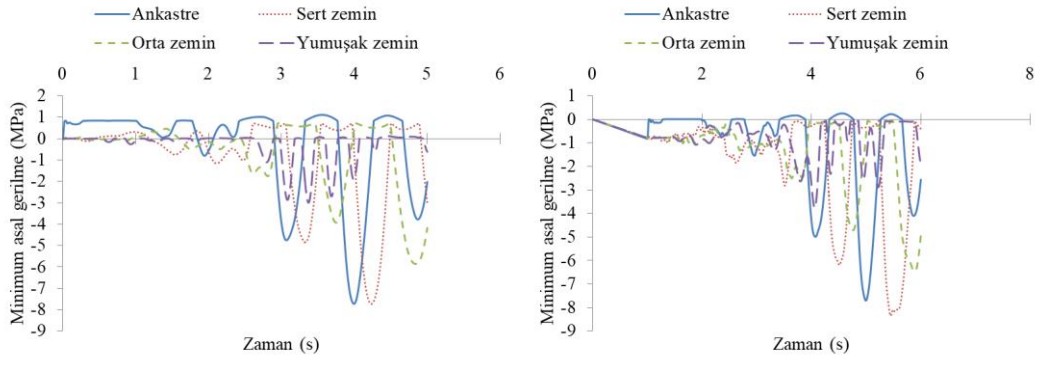
Şekil 8. Minarede meydana gelen deformasyon şekilleri



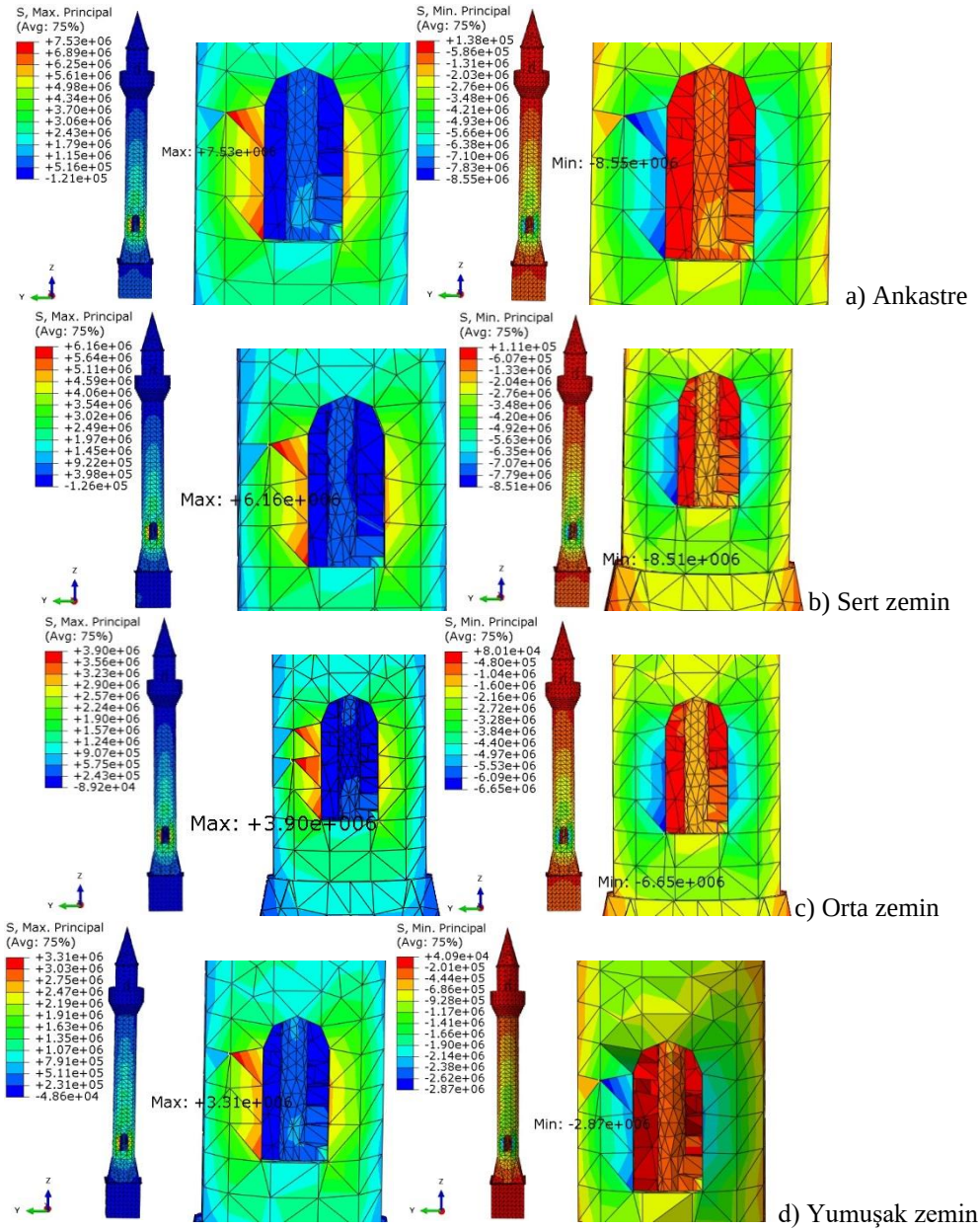
Şekil 9. Minare tepe noktasında meydana maksimum değişirme zaman grafiği

Şekil 9a'dan yapıya yatay deprem kuvvetlerinin etkimesi durumunda sert zeminden yumuşak zemine doğru minare tepe noktasındaki maksimum yerdeğiştirmenin arttığı ve yumuşak zemin durumunda maksimum değeri aldığı görülmüştür. Şekil 9b'den yatay ve düşey deprem bileşeninin birlikte etkimesi durumunda sert zeminden yumuşak zemine doğru minare tepe noktasında meydana gelen maksimum yerdeğiştirmenin azaldığı ve yumuşak zemin durumunda en küçük değeri aldığı

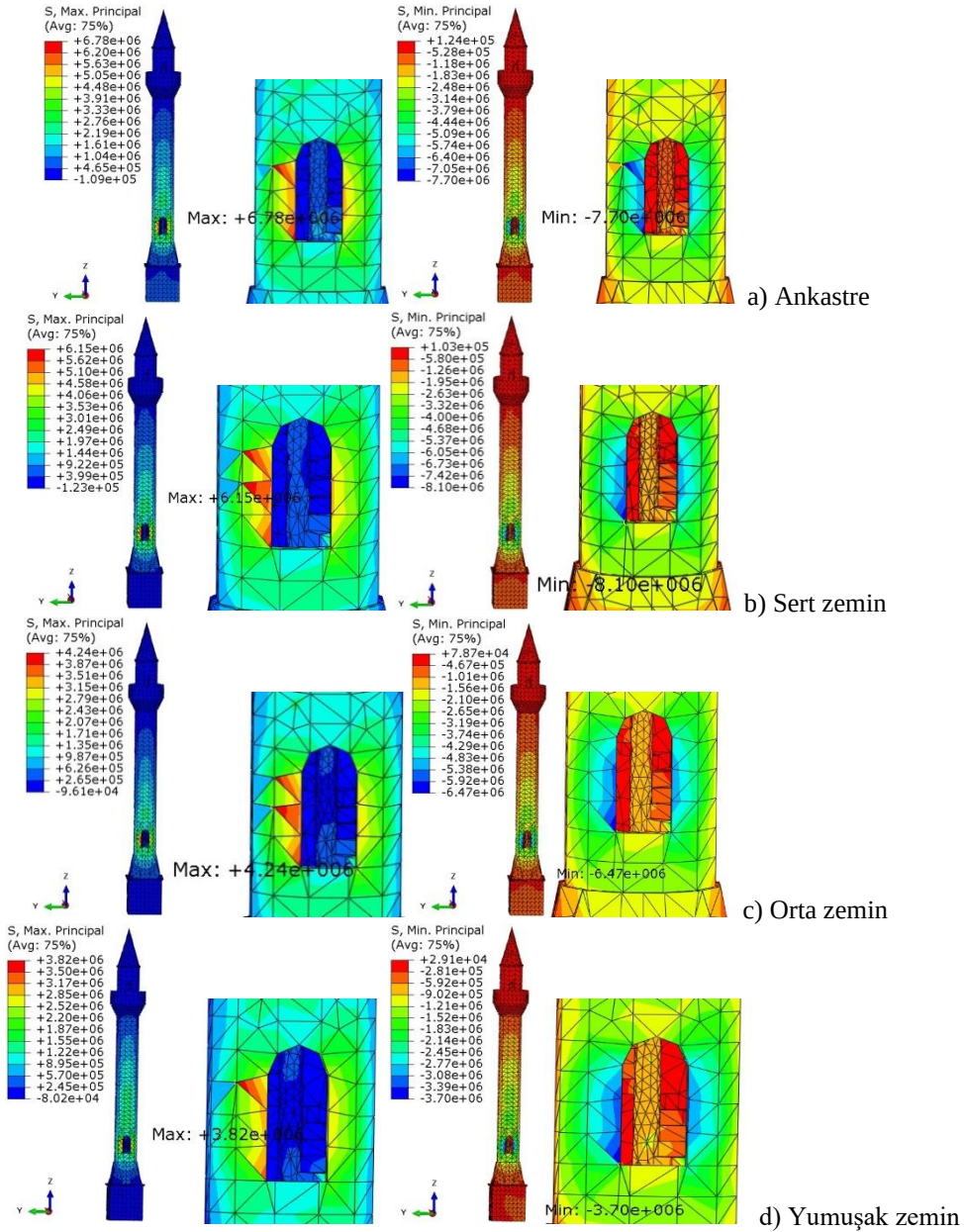
görülmüştür. Yapı-zemin etkileşimi göz önüne alındığında, düşey yer hareketinin yerdeğiştirme davranışını önemli derecede etkilediği görülmüştür. Yatay ve yatay+düşey yer hareketleri altında maksimum (çekme) gerilmelerinin zamana bağlı değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin minare üzerinde yoğunlaştığı bölgeler Şekil 11-12'de sunulmuştur.



a) Yatay yer hareketi için b) Yatay+düşey yer hareketleri için
Şekil 10. Minarede meydana gelen maksimum (çekme) gerilmelerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 11. Yatay yer hareketi altında maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin farklı zaman adımlarında minare üzerinde dağılımları.



Şekil 12. Yatay+düşey yer hareketi altında maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin farklı zaman adımlarında minare üzerinde dağılımları.

Yatay yer hareketi için maksimum (çekme) ve minimum (basınç) asal gerilmeleri minarenin alt kısmındaki kapı çevresinde ve sırasıyla ankastre mesnetlenme durumunda 7.53MPa ve 8.56MPa civarında meydana gelmektedir. Yapı-zemin etkileşimi durumunda gerilme değerlerinin sert zeminden yumuşak zemine doğru azaldığı görülmektedir. Yatay+düşey yer hareketi için ise maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmeleri minarenin alt kısımlarında sırasıyla ankastre mesnetlenme durumunda 6.78MPa ve 7.7MPa civarında

meydana gelmektedir. Sadece yatay yer hareketi ile yatay+düşey yer hareketinin birlikte etkimesi durumları gerilme sonuçları karşılaştırıldığında, yatay+düşey yer hareketi durumunda gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, tarihi yığma minarelerin yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak yatay ve yatay+düşey yer hareketleri için sert, orta

ve yumuşak zemin türleri için zaman tanım alanında lineer deprem analizleri yapılmıştır. Lineer deprem analizlerden elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir;

- Sadece yatay yer hareketinin etkiltilmesi durumunda maksimum yerdeğiştirme yumuşak zemin durumunda oluşurken, düşey yer hareketinin dikkate alınması durumunda maksimum yerdeğiştirme sert zeminde meydana gelmektedir.
- Düşey yer hareketinin minarenin yer değiştirme dağılımını önemli derecede etkilediği görülmüştür.
- Maksimum (çekme) ve minimum (basınç) gerilmelerinin dağılımı yatay, yatay+düşey yer hareketi etkisinde aynı bölgelerde oluşmaktadır.
- Sadece yatay yer hareketi durumunda sert ve yumuşak zemin durumunda oluşan maksimum (çekme) gerilmeleri arasındaki fark 4.23MPa,
- Düşey yer hareketinin dikkate alınması durumunda bu fark 2.96MPa olmaktadır.
- Sadece yatay yer hareketi durumunda sert ve yumuşak zemin durumlarında oluşan minimum (basınç) gerilmeleri arasındaki fark 5.69MPa, yatay ve düşey yer hareketi durumunda ise bu fark 4MPa olmaktadır.
- Yatay yer hareketi etkisinde minarede meydana gelen maksimum (çekme) gerilemelerinin yığma tuğla duvar limit çekme gerilmesi 0,34MPa değerini 22 kat, yumuşak zemin durumunda ise 9.7 kat daha büyük çıktığı görülmüştür.
- Düşey yer hareketinin göz önüne alınması durumunda meydana gelen maksimum (çekme) gerilemelerinin yığma tuğla duvar limit çekme gerilmesi değerini 19 kat, yumuşak zemin durumunda ise 9.4 kat daha büyük çıktığı görülmüştür.

düşey yer hareketinin göz önüne alınması önem arz etmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçların yüksek çıkması malzeme davranışının lineer kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçların genelleştirilmesi için birçok tarihi yığma yapının yapı-zemin etkileşim sisteminin farklı deprem kayıtları ve farklı zemin özellikleri göz önüne alınarak doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılması gerekmektedir. Bu tür yapıların yapı zemin etkileşiminde daha doğru sonuçların elde edilebilmesi için doğrusal olmayan analizlerinde yapılması önerilmektedir.

Yığma minarelerin deprem davranışlarının belirlenmesinde yapı-zemin etkileşimi ve

Kaynaklar

- [1] Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Muvafik, M. "Damages of minarets during Erciş and Edremit earthquakes, 2011 in Turkey". *Smart Structures and Systems*, 14(3), pp. 479–499. 2014. DOI:10.12989/sss.2014.14.3.479
- [2] Rainieri, C., Fabbrocino, G. "Estimating the elastic period of masonry towers". In R. Allemang, J. De Clerck, C. Niezrecki, & J. R. Blough (Eds.), *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series* (Vol. 5, pp. 243–248). New York, NY: Springer New York. 2012. DOI:10.1007/978-1-4614-2425-3_22
- [3] Shakya, M., Varum, H., Vicente, R., Costa, A. "Empirical Formulation for Estimating the Fundamental Frequency of Slender Masonry Structures". *International Journal of Architectural Heritage*, 10(1), pp. 55–66. 2016. DOI:10.1080/15583058.2014.951796
- [4] Bartoli, G., Betti, M., Facchini, L., Marra, A. M., Monchetti, S. "Bayesian model updating of historic masonry towers through dynamic experimental data". *Procedia Engineering*, 199, pp. 1258–1263. 2017. DOI:10.1016/j.proeng.2017.09.267
- [5] Gentile, C., Saisi, A. "Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment". *Constr Build Mater*, 21, pp. 1311–1321. 2007. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007
- [6] Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunişik, A. C., Yildirim, F. "Modal parameter identification of Hagia Sophia bell-tower via ambient vibration test". *Journal of Nondestructive Evaluation*, 28(1), pp. 37–47. 2009. DOI:10.1007/s10921-009-0045-9
- [7] Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. I., Ivorra, S. *Structural identification and numerical models for slender historical structures. Civil and Environmental Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (Vol. 1). 2016. DOI:10.4018/978-1-4666-9619-8.ch007
- [8] Nohutcu, H., Demir, A., Ercan, E., Hokelekli, E., Altintas, G. "Investigation of a historic masonry structure by numerical and operational modal analyses". *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(13). 2015. DOI:10.1002/tal.1213
- [9] Hacıfendioğlu, K., Maraş, E. E. "Photogrammetry in Documentation and Ambient Vibration Test of Historical Masonry Minarets". *Experimental Techniques*, 40(6), pp. 1527–1537. 2016. DOI:10.1007/s40799-016-0137-2
- [10] Diaferio, M., Foti, D., Gentile, C., Giannoccaro, N. I., Saisi, A. "Dynamic testing of a historical slender building using accelerometers and radar". In *6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2015*. 2015.
- [11] Livaoğlu, R., Baştürk, M. H., Doğançın, A., Serhatoğlu, C. "Effect of geometric properties on dynamic behavior of historic masonry minaret". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(6), pp. 2392–2402. 2016. DOI:10.1007/s12205-016-0622-2
- [12] Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Atamtürkür, S., Birinci, F. "Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges". *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(7), pp. 621–634. 2011. DOI:10.1016/j.finel.2010.12.011
- [13] Oliveira, C., Cakti, E., Stengel, D., Branco, M. "Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41, pp. 19–39. 2012. DOI:10.1002/eqe.1115
- [14] Mortezaei, A., Kheyroddin, A., Ronagh, H. R. "Finite element analysis and seismic rehabilitation of a 1000-year-old heritage listed tall masonry mosque". *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(5), pp. 334–353. 2012. DOI:10.1002/tal.599
- [15] D'Ambrisi, A., Mariani, V., Mezzi, M. "Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests". *Engineering Structures*, 36, pp. 210–219. 2012. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.12.009
- [16] Milani, G., Casolo, S., Naliato, A., Tralli, A. "Seismic assessment of a medieval masonry tower in Northern Italy by limit, nonlinear static, and full dynamic analyses". *International Journal of Architectural Heritage*, 6(5), pp. 489–524. 2012. DOI:10.1080/15583058.2011.588987
- [17] Preciado, A. "Seismic vulnerability and failure modes simulation of ancient masonry towers by validated virtual finite element models". *Engineering Failure Analysis*, 57, pp. 72–87. 2015. DOI:10.1016/j.engfailanal.2015.07.030p
- [18] Valente, M., Milani, G. "Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy". *Engineering Structures*, 114, pp. 241–270. 2016. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.02.004
- [19] Valente, M., Barbieri, G., Biolzi, L. "Seismic assessment of two masonry Baroque churches damaged by the 2012 Emilia earthquake". *Engineering Failure Analysis*, 79(September 2016), pp. 773–802. 2017. DOI:10.1016/j.engfailanal.2017.05.026
- [20] Minghini, F., Milani, G., Tralli, A. "Seismic risk assessment of a 50m high masonry

- chimney using advanced analysis techniques". *Engineering Structures*, 69, pp. 255–270. 2014. DOI:10.1016/j.engstruct.2014.03.028
- [21] Pintucchi, B., Zani, N. "Effectiveness of nonlinear static procedures for slender masonry towers". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(6), pp. 2531–2556. 2014. DOI:10.1007/s10518-014-9595-z
- [22] Nohutcu, H., Hokelekli, E., Ercan, E., Demir, A., Altintas, G. "Collapse mechanism estimation of a historical slender minaret". *Structural Engineering and Mechanics*, 64(5), pp. 653–660. 2017. DOI:10.12989/sem.2017.64.5.653
- [23] Hejazi, M., Moayedian, S. M., Daei, M. "Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets". *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), pp. 4015009. 2016. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000746
- [24] Kocatürk, T., Erdoğan, Y. S. "Earthquake behavior of M1 minaret of historical Sultan Ahmed Mosque (Blue Mosque)". *Structural Engineering and Mechanics*, 59(3), pp. 539–558. 2016. DOI:10.12989/sem.2016.59.3.539
- [25] Erdogan, Y. S., Kocatürk, T., Demir, C. "Investigation of the Seismic Behavior of a Historical Masonry Minaret Considering the Interaction with Surrounding Structures". *Journal of Earthquake Engineering*. 2017. DOI:10.1080/13632469.2017.1309725
- [26] Ubertini, F., Comanducci, G., Cavalagli, N., Laura Pisello, A., Luigi Materazzi, A., Cotana, F. "Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82, pp. 307–322. 2017. DOI:10.1016/j.ymsp.2016.05.025
- [27] Hacıfendioğlu, K., Maraş, E. E. "Photogrammetry in Documentation and Ambient Vibration Test of Historical Masonry Minarets". *Experimental Techniques*, 40(6), pp. 1527–1537. 2016. DOI:10.1007/s40799-016-0137-2
- [28] Diaferio, M., Foti, D., Giannoccaro, N. I. "Modal parameters identification on environmental tests of an ancient tower and validation of its FE model". *International Journal of Mechanics*, 10, pp. 80–89. 2016.
- [29] Bayraktar, A., Çalik, İ., Türker, T., Ashour, A. "Restoration effects on experimental dynamic characteristics of masonry stone minarets". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 51(6). 2018. DOI:10.1617/s11527-018-1272-2
- [30] Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., Korkut, F. "Effects of structural parameters on seismic behaviour of historical masonry minaret". *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2018. DOI:10.3311/PPci.10687
- [31] Casolo, S., Uva, G. "Non-linear dynamic analysis of masonry towers under natural accelerograms accounting for soil-structure interaction". *ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference*, (January), pp. 4488–4506. 2013. DOI:10.7712/120113.4826.c1342
- [32] Casolo, S., Diana, V., Uva, G. "Influence of soil deformability on the seismic response of a masonry tower". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(5), pp. 1991–2014. 2017. DOI:10.1007/s10518-016-0061-y
- [33] Casolo, S., Uva, G. "Non-Linear Dynamic Analysis of Masonry Towers Under Natural Accelerograms Accounting for Soil-Structure Interaction". *ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings - An IACM Special Interest Conference*, (May 2017), pp. 4488–4506. 2013. DOI:10.7712/120113.4826.c1342
- [34] Pitilakis, D., Karatzetou, A. "Dynamic stiffness of monumental flexible masonry foundations". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), pp. 67–82. 2015. DOI:10.1007/s10518-014-9611-3
- [35] Ceroni, F., Sica, S., Rosaria Pecce, M., Garofano, A. "Evaluation of the natural vibration frequencies of a historical masonry building accounting for SSI". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64, pp. 95–101. 2014. DOI:10.1016/j.soildyn.2014.05.003
- [36] "Abaqus v10, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA.". 2010.
- [37] Rayhani, M. H., El Naggar, M. H. "Numerical Modeling of Seismic Response of Rigid Foundation on Soft Soil". *International Journal of Geomechanics*, 8(6), pp. 336–346. 2008. DOI:10.1061/(asce)1532-3641(2008)8:6(336)
- [38] European Committee for Standardization, Eurocode 6, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1996.
- [39] P.B. Lourenço, G. Vasconcelos, L. R. "Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister", (January), pp. 669–678. 2001.
- [40] Kramer, S.L. (1999). Geotechnical earthquake engineering (university of Washington).
- [41] ARTeMIS Modal Pro 3.0, 2014, <http://www.svibs.com>.

The Effect of Soil-Structure Interaction on Earthquake Behavior of Historical Masonry Minarets

Extended abstract

Historical buildings are our cultural heritage that contributes to the economy of its region and serves as a bridge between past and present. Some of the historical buildings, which were exposed to natural disasters such as earthquakes, floods, winds during their lifetime, were destroyed and some of them were severely damaged. For this reason, historical buildings should be protected in order to hand them safely to future generations. Among these historical buildings, minarets are may be the most vulnerable ones under dynamic effects such as earthquakes and winds due to their long and fragile structures. There are many studies concerning determination of seismic behavior of minaret and tower type structures in the literature. However, ground motions in earthquake can have a significant impact on the structure behavior, especially in masonry structures built on flexible ground. Structure-ground interaction plays an important role in determining the behavior of the structures under earthquake effects. In this study, the seismic behavior of a historical masonry minaret under clastic and fixed support conditions was investigated for horizontal, horizontal+vertical ground motion components. Operational modal analysis method, which has been commonly used in literature, was used in order to determine experimental dynamic characteristics of the minaret. Vibrations created by the environmental effects such as vehicles and people were recorded by precision accelerometers, and the dynamic characteristics (mode shapes, frequency values) of the minaret were obtained by ArteMIS software. Theoretical mode forms and frequency values of the structure were obtained using ABAQUS V10. There was a difference between theoretical and experimental frequency values. The finite element model of the structure was calibrated by approximating theoretical frequencies to experimental results. Calibrated finite element model of the structure was used in the linear earthquake analysis in time history. East-west (E-W) and vertical (V) components of the acceleration records of Afyon Dinar earthquake which took place on 10.10.1995 ($M_w = 6.1$), were used in the earthquake analyzes. The effect of soil-structure interaction on the structure behavior was investigated separately for applying conditions of horizontal and horizontal+vertical acceleration records., Effect of the ground on the seismic behavior of the structure was evaluated by comparing the results obtained from the analyzes. The examination of the modal analysis results shows that the frequency values decreased from hard ground to soft ground, and ground significantly

affected the dynamic characteristics of the structure. Additionally, it was found that the frequency values in fixed support and hard ground environments are close to each other, and concluded that the floor where the minaret was located had hard floor properties. It was determined that the maximum displacement in the minaret under the horizontal seismic forces increased from the hard ground to the soft ground and the maximum value was obtained with soft ground. It was also determined that the maximum displacement in the minaret was reduced from the hard ground to the soft ground, when the horizontal and vertical earthquake components were applied together and the minimum value was obtained with soft ground. It was found in the case of fixed support that the maximum (tensile) and minimum (pressure) principle stresses due to horizontal ground motion were concentrated around the door at the bottom of the minaret. In ground models, it was observed the stress values decreased from hard ground to soft ground. For horizontal+vertical ground motion, it was determined in the case of fixed support that maximum and minimum principal stresses were around 6.78MPa and 7.7MPa, respectively. It was found for horizontal ground motion that the difference between the maximum (tensile) stresses occurring with hard and soft ground was 4.23MPa, and this difference decreased to 2.96MPa for horizontal+vertical ground motion. In the case of horizontal ground motion, the difference between the minimum stresses in hard and soft ground conditions was 5.69MPa, and the same difference for horizontal+vertical ground motion was 4MPa. Considering the structure-ground interaction, it was found that vertical ground motion significantly affected the displacement behavior of the minaret. When the effects of horizontal and horizontal+vertical ground motions on the stresses were compared, it was found that the stress values were decreased in the case of horizontal+vertical ground motion. Consequently, it can be indicated that it was important to take structure-ground interaction and the vertical ground motion component into consideration in determination of earthquake behavior of minarets. Moreover, it is recommended to perform linear and nonlinear dynamic analysis of structure-ground interaction system of many historical masonry minarets under different earthquake records and with different soil characteristics in order to generalize the results.

Keywords: Soil-structure interaction, Historic masonry minaret, Finite element analysis, Horizontal ground motion, Earthquake behavior.