

Dynamic Analyses and Seismic Behavior of Masonry Minarets with single Balcony

Ali Ural, Tulin Celik*

Aksaray University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Aksaray, 68100, Turkey

•Received Date: 26 Dec 2017

•Revised Date: 06 Apr 2018

•Accepted Date: 12 Apr 2018

•Published Online: 29 May 2018

Abstract

Minarets are built adjacent to mosques and used for calling Muslims to mosques for pray. Most of the masonry minarets in Turkey and similar Muslim countries have been damaged due to medium intensity seismic actions or at least moderate winds. One of the reasons for this is that these structures are thin and long. Another reason is that the minarets built without any engineering knowledge today. In this study, 7 masonry minarets with a single balcony, located in the city center of Aksaray (middle Anatolia), are investigated in terms of seismic behaviors. The mentioned minarets were geometrically measured using photogrammetric devices and techniques. Measured minarets were modeled using Finite Element Method with LUSAS Software, and seismic analyses were performed. Structural analyzes are compared with each other and the results obtained are interpreted.

Keywords

Minarets, Dynamic Analyses, LUSAS, Earthquake Resistance, Finite Element Analysis

*Corresponding Author: Tülin Celik, tulinsandikci@gmail.com

Tek Şerefeli Yığma Minarelerin Deprem Davranışı ve Dinamik Analizi

Ali Ural, Tülin Çelik*

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Aksaray, 68100, Türkiye

*Gönderi Tarihi: 26 Ara 2017

*Düzelme Tarihi: 06 Nis 2018

*Kabul Tarihi: 12 Nis 2018

*Çevrimiçi Yayın Tarihi: 29 May 2018

Özet

Minareler, Müslümanları namaza çağırmak için İslam dininin ibadet yeri olan camilere bitişik olarak inşa edilmiştir. Türkiye’de ve diğer Müslüman ülkelerde yığma minarelerin büyük çoğunluğu orta şiddetli bir deprem ya da hafif şiddetli bir rüzgâr etkisiyle zarar görebilmektedir. Bunun nedenlerinden biri bu yapıların ince ve uzun olmasıdır. Bir diğer sebebi ise özellikle günümüzde inşa edilen minarelerin herhangi bir mühendislik bilgisi olmadan yapılmasıdır. Bu çalışmada, Aksaray il merkezinde yer alan tek şerefeli 7 adet yığma minarenin deprem davranışları incelenmiştir. Bahsedilen minarelerin geometrik ölçümleri fotogrametrik cihazlar kullanılarak yapılmıştır. Sonlu Elemanlar Metodunu kullanan LUSAS programı ile minareler modellenerek deprem analizleri yapılmıştır. Yapısal analizler birbirleriyle karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Minareler, Dinamik Analizler, LUSAS, Depreme Dayanıklılık, Sonlu Elemanlar Analizi

*Sorumlu Yazar: Tülin Çelik, tulinsandikci@gmail.com

1. GİRİŞ

Ülkemiz dünya üzerinde aktif fay hatlarının bulunduğu bir bölgede yer almaktadır. Bu sebeple ülkemizde yaklaşık on yılda bir şiddetli depremler görülmektedir. Bu depremler sonucunda ülkemizdeki tarihi yapılar ve neredeyse bütün yığma yapılar etkilenmektedir. Yığma minareler de bu tür etkilerden dolayı hasar görüp yıkılmaktadır. Türkiye'deki minareler genellikle ince ve uzun bir yapıya sahiptir. Bu incelik ve uzunluk nedeniyle minarelerin yatay kuvvetlere karşı dayanımı oldukça düşüktür. Yığma minarelerin davranışları; kullanılan yığma birimlere, harca, düşey/yatay bağlantı elemanlarına ve yapım tekniklerine bağlı olarak değişmektedir. Türkiye'deki tarihi minarelerin büyük çoğunluğu kesme taş kullanılarak inşa edilmiş olup çok az bir kısmı tuğladan yapılmıştır. Örneğin Eğri Minare gibi Ural ve ark. [1] tarafından incelenmiştir.

Yığma minareler depremlerde büyük hasarlar almaktadır. Bu sebeple birçok araştırmacı tarafından depreme karşı dayanımları incelenmiştir. Doğangün ve ark. [2] 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde kaydedilen verileri kullanarak donatısız yığma minarelerin dinamik davranışlarını araştırmıştır. Altunışık [3] fiber takviyeli polimerin (FRP) kullanım öncesi ve sonrasındaki yığma minarelerin dinamik davranışını belirlemeyi amaçlamıştır. Örnek bir minareyi ANSYS yazılımı kullanarak modellemiş, dinamik yük altındaki davranışlarını incelemiştir. Pekgökgöz ve ark. [4], donatılı yığma minarelerindeki düşey ön germe uygulamasının depreme karşı etkisini araştırmıştır. Örnek bir minare üzerinde ön germe uygulaması yaparak bunların spektral ve zaman-tanım analizlerini gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düşey ön germe uygulamasının çok etkili bir yöntem olduğunu görmüştür. Ural ve ark. [1] Aksaray'ın merkezinde bulunan eğri minarenin rüzgâr ve depreme karşı dayanıklılığını incelemiştir. Oliveira ve ark. [5] farklı büyüklüklerdeki eski minarelere yerinde çevresel titreşim testi uygulamış ve aynı yapıların sayısal modelleri ile frekansların sonuçlarını karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, yığma minarelerinin dinamik doğrusal analiz sonuçlarında maksimum yer ivmesi 0.5 m/s^2 üzerinde olup, çok yüksek gerilmelerin meydana geldiği görmüşlerdir. Bazı araştırmacılar, yığma minareler üstünde, yapı-zemin etkileşim sistemlerinin stokastik davranışını etkileyen, mevsimlere göre donma olayına maruz kalan zeminin etkilerini incelenmiştir [6]. Hacıfendioğlu ve Birinci [7], yer hareketlerine neden olan deprem ve beklenmedik patlamalara karşı yığma minarelerin stokastik dinamik davranışını incelemiştir. Karabörk ve Koçak [8], yığma duvarların kesme dayanımını geliştirmek için yeni bağlantı elemanları üzerinde çalışmışlardır.

Doğangün ve ark. [9], Türkiye'deki minarelerin deprem davranışları hakkındaki en kapsamlı çalışmalardan birini yayınlamışlardır. Türkiye'de tarihi ve yeni yığma minareler için yapılan inşaat uygulamalarını gözden geçirmiş ve bu yapılardaki sismik hasarı tartışmışlardır. Bazı lisansüstü tezlerde de yığma minareler araştırma konusu olmuştur (Güleç [10]; Ertek [11]; Baştürk [12]).

2. AKSARAY'DAKİ TAŞ YIĞMA MİNARELERİN SPEKTRAL ANALİZİ

Farklı camilere ait yedi adet minare fotogrametri kurallarına göre geometrik olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler için TOPCON Konum Belirleme Sistemi tarafından üretilen Total Station'un GTS 250 serisi cihazı kullanılmıştır. Total Station cihazdan gönderilen lazer ışın, reflektörden yansıtılır, aletin içindeki bilgisayar ışığın gidip gelme hızından yararlanarak minarelerin mesafeleri hesaplanmıştır. Minarelerin konumu aşağıdaki haritada gösterilmiştir (Şekil 1) ve bunların enlem-boylamları aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 1). Ölçülen minarelerin her biri Aksaray şehir merkezinde bulunmaktadır. Aksaray, Türkiye'nin başkentinin yaklaşık 225 km güneyinde, Anadolu yarımadasının ortasında düz bir araziye sahiptir. Ölçülen minarelerin 3D sonlu elemanlar modeli LUSAS [13] yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Türkiye'de meydana gelen ve her biri 6.0'dan büyük olan dört deprem spektrumu, yığma minarelerin dinamik analizlerini gerçekleştirmek için kullanılmıştır. Bu depremlerin seçilmesinin sebebi, birçok yığma minarenin bu depremler karşısında ağır hasar görmesi veya tamamen çökmesidir.



Şekil 1. Ölçülen ve analiz edilen yığma minarelerin yerlerini gösteren harita

Yapılan çalışmada Zafer Cami'nin yapım tarihine ulaşılamamıştır. Ancak diğer cami ve minarelerin 20. Yüzyılda yapıldığı tespit edilmiştir. Bu cami ve minarelerin hepsi tarihi

olmamakla birlikte, mimari görünüşleri itibariyle 17. Yüzyıl Osmanlı Dönemi cami ve minarelerine benzemektedir. Klasik Osmanlı minareleri görünüş ve yapılış açısından birine benzemektedir. Minareyi oluşturan temel kısımlar; kürsü, küp, silindirik veya çokgen gövde, merdivenler, şerefe, petek, külah ve alem'dir. Minarenin bu bölümlerini Doğangün ve ark. [9] ayrıntılı olarak açıklamıştır.

Tablo 1. Minareler hakkında genel bilgiler ve coğrafi koordinatları

Minare Numarası	Ait olduğu Camiler	Yapılış tarihleri	Malzeme	Toplam yükseklik (m)	Enlem	Boylam
1	Zafer Cami	--	Kesme Taş	18	38°22'59.50"N	34° 02'0.49"E
2	Feriştah Hatun Cami	1993	Kesme Taş	18	38°22'56.28"N	34° 02'7.07"E
3	Kılıçarslan Cami	1970	Kesme Taş	25	38°22'16.49"N	34° 02'3.83"E
4	Somuncu Baba Cami	2012	Kesme Taş	25	38°22'29.63"N	34° 2'23.03"E
5	Kurşunlu Cami	1989	Kesme Taş	28	38°22'12.12"N	34° 1'37.42"E
6	Özkanlı Cami	1996	Kesme Taş	31	38°21'52.89"N	34° 1'49.12"E
7	Atasayar Cami	2001	Kesme Taş	33	38°21'22.15"N	34° 02'3.81"E

Aksaray çevresinde Hasandağı, Melendiz ve Erciyes volkanik dağları yer almaktadır. Bölgenin volkanik yapısına bağlı olarak minarelerde genellikle tuf taşları kullanılmaktadır. Benzer şekilde bu bölgedeki camiler ve minareler dışında diğer yığma yapılar da bu tür taşlarla inşa edilmiştir. Aksaray bölgesindeki tuf taşlarının malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar Ural ve Uslu [14] ve Uslu [17] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalara göre, tuf taşının ortalama basınç dayanımı 4.04 MPa, ortalama eğilmede çekme dayanımı 0.6-0.7 MPa arasındadır. Benzer şekilde Ural ve Fırat [15], rüzgâr etkisiyle yıkılmış iki minareden elde ettikleri tuf taşlarının malzeme özelliklerini belirleyebilmek için aynı şekilde testler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada tuf taşıyla yapılan duvar modellerinin malzeme özellikleri olarak, Elastisite Modülü 1200 MPa, Poisson Oranı 0.20 ve ortalama basınç dayanımı 4.04 MPa olarak bulmuşlardır.

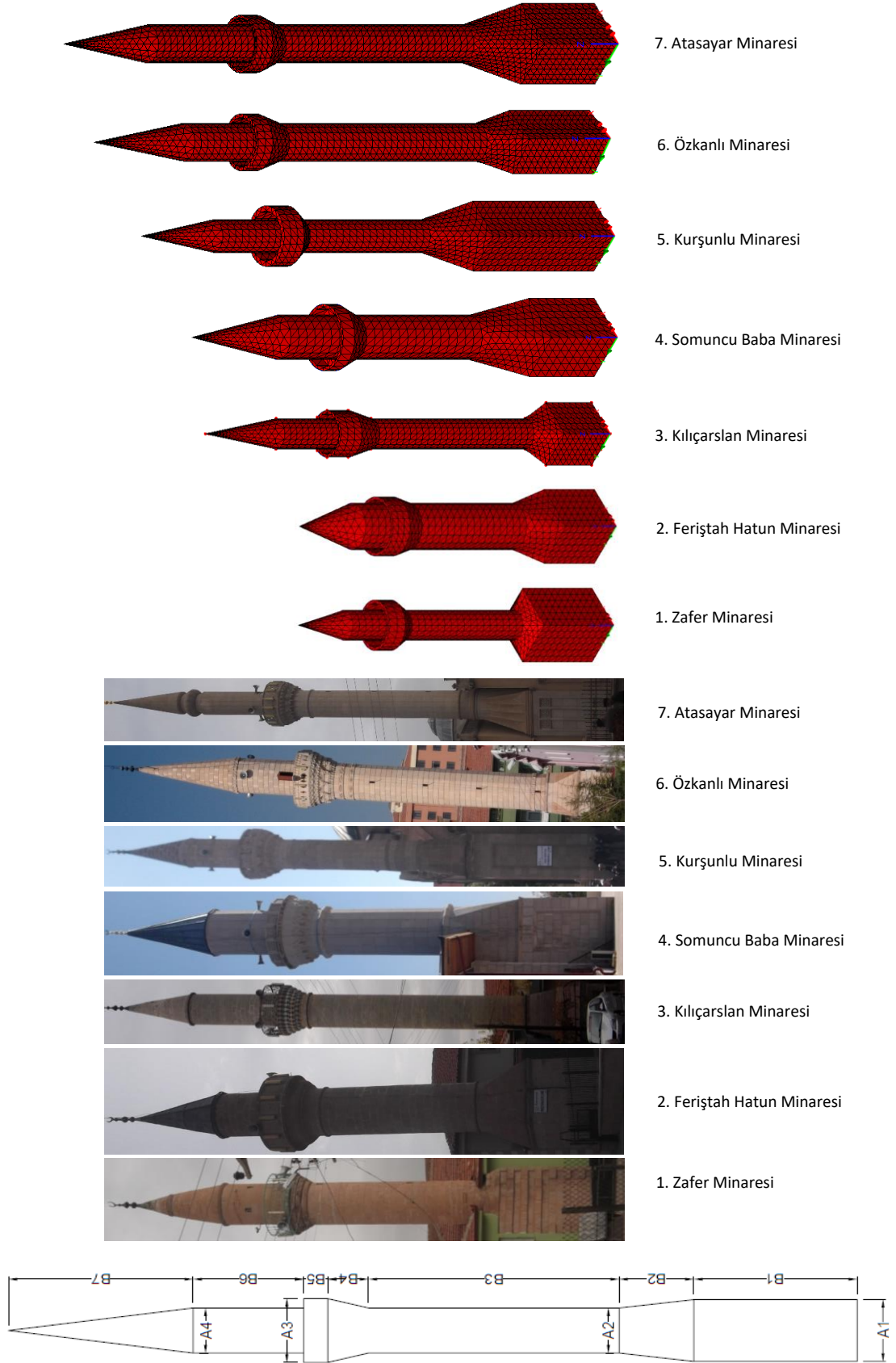
Bu çalışmada analiz sonuçlarının birbiriyle karşılaştırılabilmesi için bütün minarelerde aynı malzeme özellikleri kullanılmıştır. Bunlar; Elastisite Modül 4000 MPa, Poisson Oranı 0.2 ve yığma minarelerin birim ağırlıkları 30 kN/m³ olarak alınmıştır. Analizlerde malzeme doğrusal olarak kabul edilmiştir. Çünkü bu narinlikteki yapılar herhangi bir sünek davranış göstermeksizin yıkılabilmektedirler. Ayrıca yapılan analizlerde geometrik olarak ikinci mertebe etkileri dikkate alınmamıştır. Tüm dinamik analizler için, % 5 Rayleigh sönüm oranı kullanılmıştır.

Yığma minarelerin yüksekliği; zemin yapısı, konumu, yapımında kullanılan malzemeler gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik göstermesine rağmen tek şerefeye sahip bir minarenin yüksekliği ortalama olarak 20-25 m civarındadır [2]. Yapılan bu çalışmada, minarelerin toplam yükseklikleri 18-33 m arasında değişmektedir (Tablo 1). Minarelerin geometrik özellikleri, malzeme ve yapım teknikleri hakkında yurtiçinde ve yurtdışında herhangi bir yönetmelik bulunmamaktadır. Bu sebeple minareler herhangi bir yönetmeliğe ya da şartnameye uyulmadan inşa edilmiştir. Minarelerin geometrik ölçüleri Tablo 2'de verilmiştir. Buna göre A1 - A4 arasındaki kısımlar yatay, B1- B7 arasındaki kısımlar ise dikey boyutları vermektedir. Minarelerin boyutları ve görünüşleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki çizilen minare boyutları birbiriyle orantılıdır. 3 boyutlu matematiksel modeli oluşturmak için sonlu elemanlar yöntemini esas alan LUSAS [13] yazılımı kullanılmıştır (Şekil 2). Sonlu elemanlar modeli minarelerin kapı ve merdiven dışındaki tüm elemanları kapsamaktadır. Modellemelerde her düğüm noktasında 3 serbestliği bulunan 10 düğüm noktalı üç boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) sonlu elemanlar kullanılmıştır.

Tablo 2. Minarelerin geometrik özellikleri (m)

Minare Numarası	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	2.67	1.54	2.59	1.51	4.25	0.52	6.78	0.80	0.97	1.88	3.46
2	2.68	2.39	3.03	1.56	3.06	1.91	6.36	0.98	1.04	1.43	3.92
3	2.46	1.69	2.59	1.61	3.00	1.38	10.14	1.50	1.39	3.36	3.79
4	2.87	2.31	3.46	2.77	4.05	3.72	7.17	1.66	0.71	2.85	5.37
5	2.47	1.63	3.04	1.79	7.21	3.12	7.54	0.85	1.20	3.17	4.24
6	2.33	1.96	2.95	1.81	5.00	2.19	12.32	1.41	0.91	3.59	5.85
7	2.94	1.97	2.97	1.33	4.55	3.64	11.68	1.17	1.01	5.76	5.62

Zafer Minaresinin (1 No'lu minare) sonlu elemanlar modelini oluşturmak için 9244 eleman ve 2431 düğüm noktası kullanılmıştır. İkinci model olan Feriştah Hatun Minaresi için 8575 eleman ve 2412 düğüm noktası kullanılmıştır. Kılıçaslan Minaresinde ise 9814 eleman ve 2832 düğüm noktası kullanılarak modellenmiştir. Somuncu Baba Minaresinde, 9118 eleman ve 2510 düğüm noktası kullanılırken Kurşunlu Minaresi için 12864 eleman ve 3456 düğüm noktası kullanılmıştır. Özkanlı Minaresinin sonlu elemanlar modelini oluşturmak için 12564 eleman ve 3538 düğüm noktası kullanılmıştır. Son minare modeli olan Atasayar Minaresi için 15750 eleman ve 4249 düğüm noktası kullanılmıştır. Bütün minarelerin temeli ankastre olarak mesnetlenmiştir ve Şekil 2'de görüldüğü gibi bir ya da iki kenarı cami ile bitişik olduğundan bu kısımlar da ankastre olarak mesnetlenmiştir. Bu sebeple bütün sonlu elemanlar modelleri alt ucu sabit dikey konsol olarak düşünülmektedir.



Şekil 2. Minarelerin ölçü gösterimleri, fotoğrafları ve sonlu elemanlar modelleri

Minarelerin ilk 5 moda ait periyot değerleri öz değer analizinden hesaplanmış ve dinamik davranışının toplam kütle katkıları Tablo 3'te gösterilmiştir. Minarelerin periyodunu sadece yüksekliği değil, aynı zamanda toplam kütle ve eğilme rijitliğini de büyük ölçüde etkilemektedir. Minarelerin periyotları 0.39s ile 1.40s arasında değişmektedir.

Modların hesaplanan kütle katılımları mod etkilerinin toplam dinamik tepkiye katkısını göstermektedir. 1. ve 2. Modların hesaplanan kütle katılımları yapının toplam dinamik davranışında önemli bir orana sahiptir. Özellikle Özkanlı minaresinde ilk iki moddaki kütle katılım oranları % 86 civarındadır. Yapının tepkisine 1. Modun katkısı %24 ile %43 arasında değişmektedir. Burulma modu (5. mod) toplam davranışı neredeyse hiç etkilememiştir.

Tablo 3. İlk 5 moda ait periyot ve yüzde katılım oranları

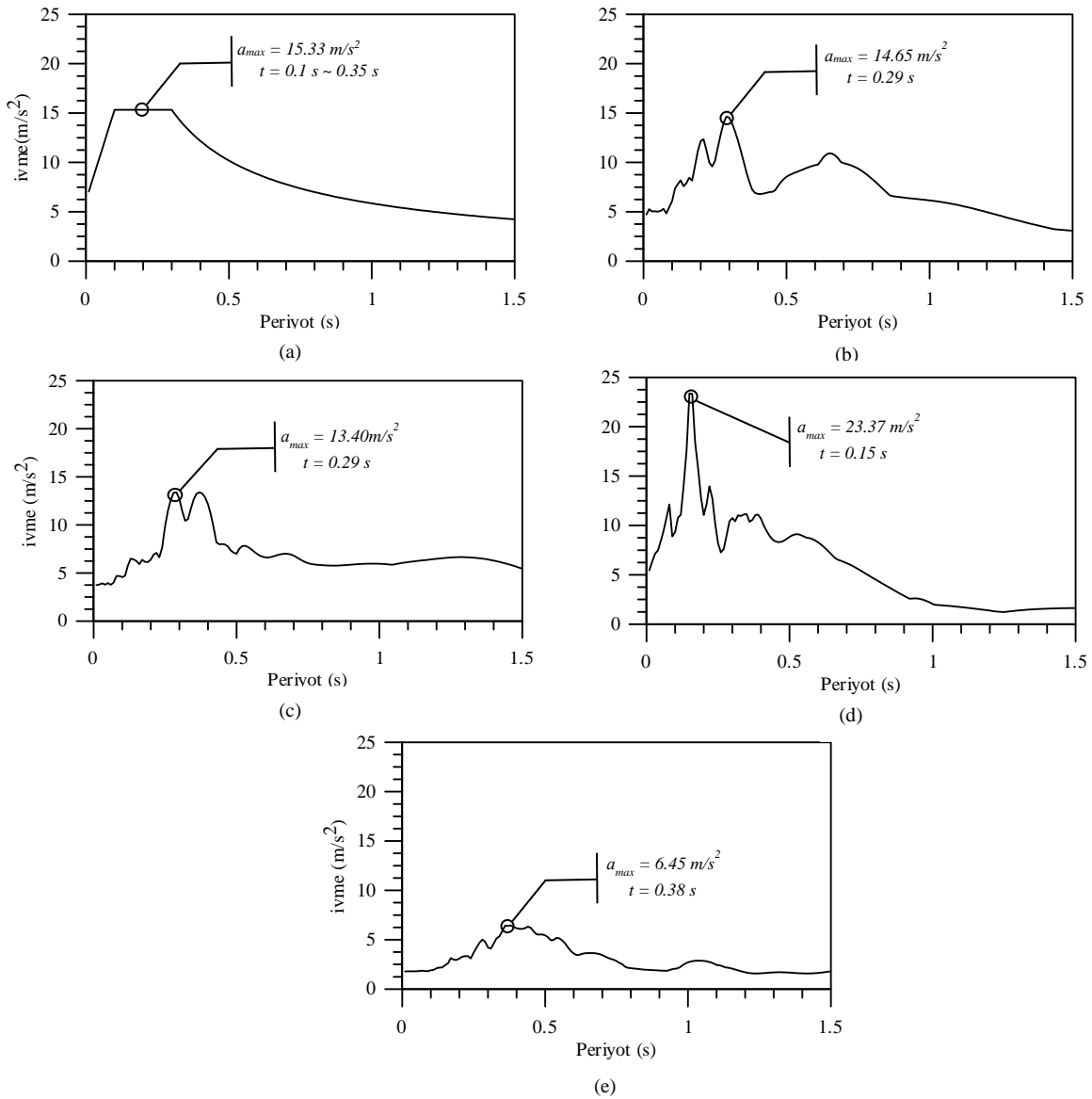
Minare Numarası	Toplam Kütle (t)	Toplam Yükseklik (m)	Mod numarası Yönü	1. x	2. y	3. x	4. y	5. Burulma
1	609	18.66	Periyot (s)	0.52	0.52	0.09	0.09	0.07
			Katılım faktörü (%)	24.64	24.66	16.46	16.51	0.00
2	895	18.70	Periyot (s)	0.39	0.39	0.08	0.08	0.07
			Katılım faktörü (%)	37.95	37.96	19.19	19.22	0.00
3	964	24.56	Periyot (s)	1.13	1.12	0.18	0.18	0.11
			Katılım faktörü (%)	38.11	38.17	11.99	12.01	0.00
4	1130	25.53	Periyot (s)	0.63	0.62	0.13	0.13	0.09
			Katılım faktörü (%)	31.12	31.19	14.26	14.20	0.00
5	832	27.33	Periyot (s)	0.93	0.92	0.21	0.21	0.10
			Katılım faktörü (%)	30.01	30.04	28.09	28.06	0.00
6	1291	31.27	Periyot (s)	1.40	1.40	0.25	0.24	0.13
			Katılım faktörü (%)	43.14	43.16	18.24	18.23	0.00
7	1453	33.43	Periyot (s)	1.40	1.39	0.25	0.25	0.12
			Katılım faktörü (%)	28.51	28.54	12.20	12.19	0.00

Türkiye'de meydana gelen dört büyük depremden kaydedilen ivme spektrum değerleri bütün minareler için kullanılarak spektral analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik'te (DBYBHY) [16] belirtilen koşullar dikkate alınarak modeller üzerinde tasarım spektrumu da uygulanmıştır. Tasarım spektrum verilerinin özellikleri Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde [16] belirtilmiştir. Analizler için seçilen depremler; Erzincan 1992 ($M_L = 6.1$), Kocaeli 1999 ($M_D = 7.4$), Bingöl 2003 ($M_D = 6.1$) ve Van 2011 ($M_L = 6.7$) depremleridir. Bu deprem hareketlerinin özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Türk Deprem Yönetmeliği'nde Aksaray şehir merkezi 5. Deprem Bölgesi olarak gösterilmektedir. 5. Derece deprem bölgesi demek büyük depremlerin olma olasılığının çok zayıf olduğu anlamına gelmektedir. Buna karşın yine aynı yönetmelikte 5. Derece deprem bölgesi için A_0 katsayısı tanımlanmamıştır. Bu yüzden A_0 katsayısı için 4. Derece deprem bölgesi verisi ($A_0 = 0.1$) kullanılmıştır. Tasarım spektrumu oluşturulmasında Z1 zemin sınıfı ve %5 sönümlenme oranı kullanılmıştır. Bunun yanında bina önem katsayısı ($I = 1.0$) ve yapının

sünekliliğine ilişkin taşıyıcı sistem davranış katsayısı ($R = 2.5$) olarak kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan depremlere ait spektrumlar ve tasarım spektrumu Şekil 3’te verilmektedir.

Tablo 4. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının özellikleri

Deprem	Tarih	İstasyon koord.	Merkez üssü koord.	Büyüklüğü	Maksimum yer ivmesi A_0^*g
Erzincan	13/03/1992	39.75200N-39.48700E	39.72000N-39.63000E	6.1 M _L	0.471-EW
Kocaeli	17/08/1999	40.84364N-31.14888E	40.70000N-29.91000E	7.4 M _D	0.373-EW
Bingöl	01/05/2003	38.89708N-40.50320E	38.94000N-40.51000E	6.1 M _D	0.545-NS
Van	23/10/2011	38.99011N-43.76302E	38.68900N-43.46570E	6.7 M _L	0.178-NS



Şekil 3. Analizler için spektral veriler, (a) DBYBHY [16] ile oluşturulan tasarım spektrumu, (b) Erzincan 1992, (c) Kocaeli 1999, (d) Bingöl 2003 ve (e) Van 2011 deprem spektrumları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yedi farklı yığma minare, dinamik davranışını belirlemek için önceki bölümde belirlenen deprem yüklerine maruz bırakılmıştır. Seçilen ivme spektrumları; tasarım spektrumu; Erzincan, 1992; Kocaeli, 1999; Bingöl, 2003; Van, 2011 depremleridir. Bu deprem kayıtlarının seçilmesinin nedeni; bunların Türkiye'de meydana gelmesi ve son on yılda çok fazla can kaybına neden olmasıdır. Minarelerin dairesel simetriye sahip olması nedeniyle deprem hareketleri sadece yatay yönde uygulanmıştır. Bu analizlerde doğrusal mod birleştirme yöntemi kullanılmıştır.

Doğrusal elastik bir model için doğrusal mod birleştirme yöntemi ve doğrudan entegrasyon metodu benzer sonuçlar vermektedir. Buna karşın mod birleştirme yönteminde sonuca daha hızlı ulaşılmaktadır [5]. Bu yüzden bu çalışmada zaman-tanım alanında analiz yapılmamıştır. Minarelerin sonlu elemanlar modelleri deprem ivme kayıtlarının farklı özelliklerine bağlı olarak farklı davranışlar sergilemektedir. Bütün analiz sonuçları aşağıda Tablo 5'te açıkça verilmektedir. Uygulanan depremlerin farklı verilere sahip olmasından dolayı minarelerin tepe deplasmanları birbirinden oldukça farklı çıkmıştır. Sonlu elemanlar metodu teorisine göre lineer analiz için gerilme ve şekil değiştirme değerleri esas olarak deplasman değerlerine bağlıdır.

Van ve Bingöl depremlerinin ivme büyüklükleri diğer deprem kayıtlarından daha düşüktür. Bu nedenle, bu iki depremden elde edilen sonuçlar diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Her bir minare modeli beş farklı spektral veri altında değerlendirilmiştir. Çünkü minare modellerinin yükseklik, genişlik, rijitlik ve toplam kütle gibi birçok farklı yapı özellikleri bulunmaktadır. Zafer Cami Minaresi Kocaeli deprem verilerine nazaran Bingöl depreminden daha çok etkilenmiştir. Bu durum Feriştah Hatun Minaresinde tam tersi olmuştur. Benzer durumlar Van ve Bingöl depremleri için Somuncu Baba minaresi ile Kılıçarslan Minaresinde görülmüştür.

Tablo 5'in 4. sütununda 1. Periyoda karşılık gelen ivme değerleri verilmektedir. Buradaki ivme değerlerinden görüldüğü gibi yapıda meydana gelen maksimum yer değiştirme ve gerilme değerlerini doğrudan etkilediği açıkça görülmektedir. Somuncu Baba Minaresi'nin birinci periyodu ($T_1 = 0.63s$), Erzincan Depremi spektral verileri ile $10.57 m/s^2$ 'de eşleştirilmiştir. Bu ivme değeri, minareye uygulanan beş spektral veri arasındaki maksimum değerdir. Sonuç olarak minarenin tepe yer değiştirmesi $189.172 mm$ 'dir ve bu değer bu model için en yüksek değerdir. Özkanlı Minaresinin ilk periyodu ($T_1 = 1.40s$), Kocaeli Deprem verileriyle $6.29 m/s^2$ 'de eşleşmiştir. Bunun sonucu olarak, Özkanlı Minaresi, Kocaeli Depremine nazaran diğer spektrum verilerinden daha çok etkilenmiştir. Özkanlı ve Atasayar Minarelerinin toplam kütle,

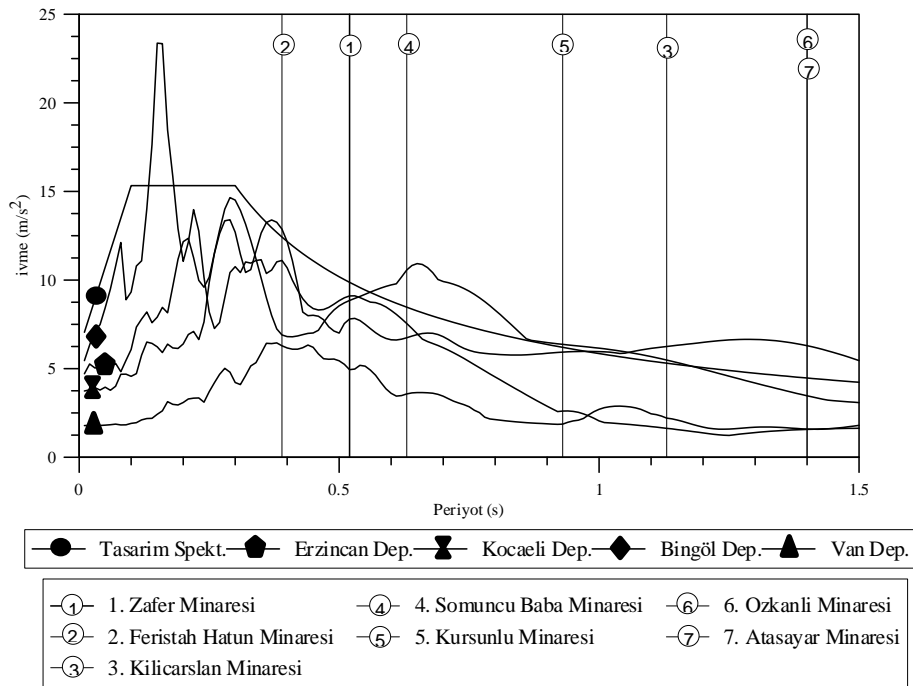
toplam yükseklik ve diğer geometrik özellikleri çok benzerdir. Bu nedenle, bu iki modelin periyot, yer değiştirme ve gerilme sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

Tablo 5. Yedi minare modeli üzerinde uygulanan tasarım spektrumu için analiz sonuçları

Minareler	Spektral veri	Tepe noktası yer değiştirme (mm)	1. periyodun ivme değeri (m/s ²)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Maksimum kayma gerilmesi (MPa)
1. Zafer M. <i>1. periyot=0.52s.</i> <i>Toplam Kütle =609t.</i>	Tasarım Spektrumu	132.304	9.87	6.701	3.237
	Erzincan Dep.	120.784	8.85	6.103	2.949
	Kocaeli Dep.	105.835	7.80	5.347	2.584
	Bingol Dep.	123.234	9.10	6.232	3.011
	Van Dep.	67.143	4.94	3.390	1.639
2. Feriştah Hatun M. <i>1. periyot=0.39s.</i> <i>Toplam Kütle =895t.</i>	Tasarım Spektrumu	80.3925	12.43	4.507	2.191
	Erzincan Dep.	44.819	6.91	2.511	1.221
	Kocaeli Dep.	81.346	12.88	4.556	2.215
	Bingol Dep.	71.055	11.10	3.983	1.936
	Van Dep.	40.67	6.29	2.277	1.108
3. Kılıçarslan M. <i>1. periyot =1.13s.</i> <i>Toplam Kütle =964t.</i>	Tasarım Spektrumu	319.393	5.31	7.723	3.774
	Erzincan Dep.	330.000	5.48	7.941	3.881
	Kocaeli Dep.	374.268	6.25	8.979	4.389
	Bingol Dep.	100.403	1.63	2.581	1.257
	Van Dep.	133.917	2.21	3.215	1.572
4. Somuncu Baba M. <i>1. periyot =0.63s.</i> <i>Toplam Kütle =1130t.</i>	Tasarım Spektrumu	152.002	8.47	5.186	2.509
	Erzincan Dep.	189.172	10.57	6.432	3.114
	Kocaeli Dep.	120.761	6.74	4.107	1.988
	Bingol Dep.	135.56	7.55	4.626	2.238
	Van Dep.	63.904	3.57	2.172	1.051
5. Kurşunlu M. <i>1. periyot =0.93s.</i> <i>Toplam Kütle =832t.</i>	Tasarım Spektrumu	289.207	6.20	7.535	3.609
	Erzincan Dep.	294.942	6.37	7.624	3.652
	Kocaeli Dep.	272.304	5.93	7.021	3.36
	Bingol Dep.	124.172	2.61	3.314	1.596
	Van Dep.	85.792	1.87	2.217	1.062
6.Özkanlı M. <i>1. periyot =1.40s.</i> <i>Toplam Kütle =1291t.</i>	Tasarım Spektrumu	429.429	4.47	7.495	3.677
	Erzincan Dep.	330.376	3.47	5.759	2.826
	Kocaeli Dep.	600.573	6.29	10.464	2.825
	Bingol Dep.	152.739	1.57	2.681	1.315
	Van Dep.	152.017	1.59	2.649	1.3
7. Atasayar M. <i>1. periyot =1.40s.</i> <i>Toplam Kütle=1453t.</i>	Tasarım Spektrumu	408.517	4.47	7.332	3.553
	Erzincan Dep.	317.046	3.47	5.669	2.748
	Kocaeli Dep.	573.104	6.29	10.189	4.941
	Bingol Dep.	143.905	1.57	2.636	1.275
	Van Dep.	144.688	1.59	2.579	1.251

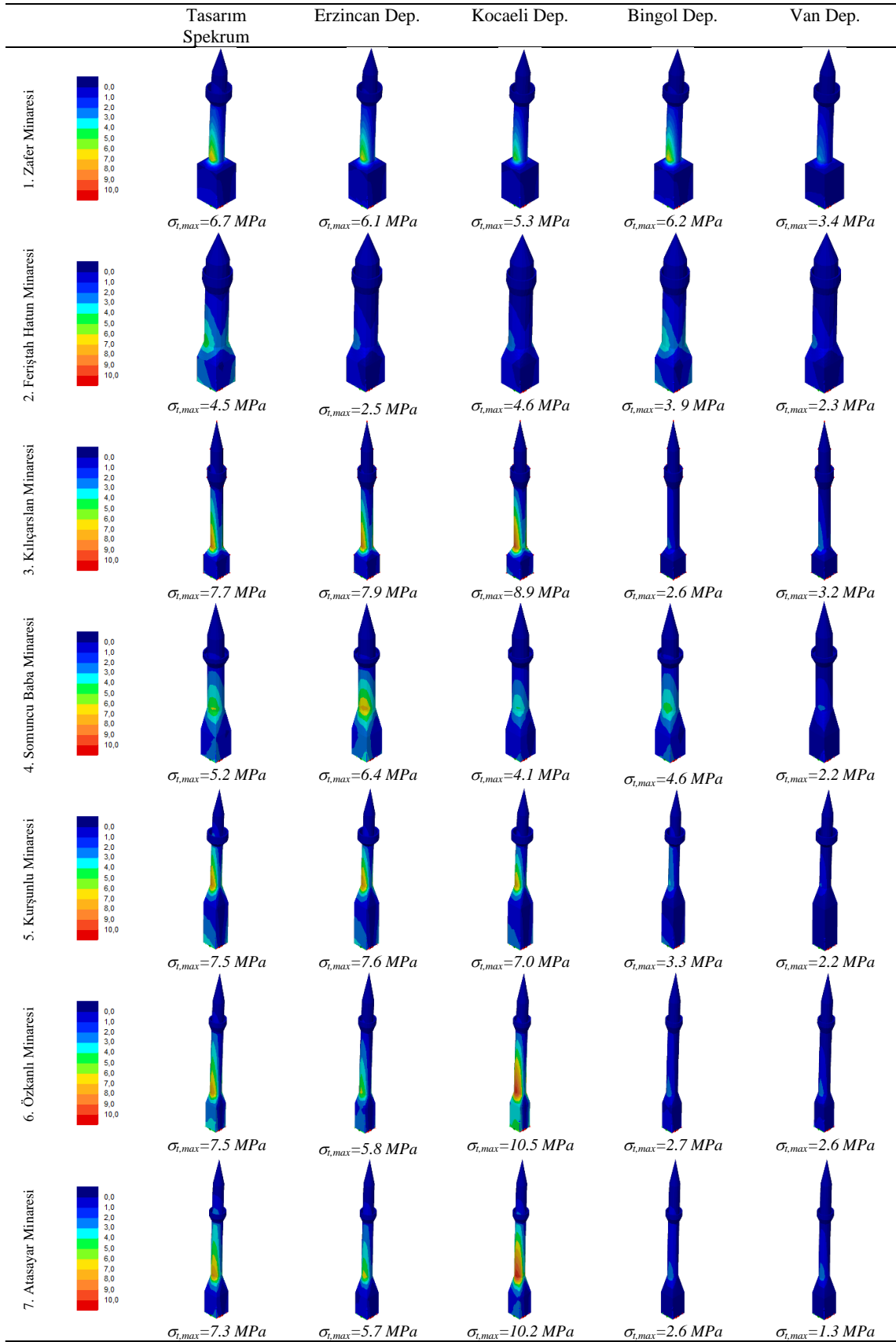
Minare modellerinin ilk periyotları ve spektral verilerin her biri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 4). Her bir spektral verinin ivme değeri 0.1s ile 0.5s periyotları arasında değişmesinin yanında çok baskın değerlere sahiptir. Bu verilere göre, eğer yapının ilk periyodu 0.1s ile 0.5s arasında ise, büyük yatay ivmelere ve bunun sonucunda da büyük deprem kuvvetlerine maruz kalmıştır denebilir. Feriştah Hatun Minaresi, sayısal modelleri arasında en düşük periyoda sahip minaredir. Bu yüzden Feriştah Hatun Minaresi diğer modellerden daha yüksek ivme değerlerine

maruz kalmıştır. Bu minare yüksek rijitliğe sahip olması nedeniyle, tepe noktasının yer değiştirmesi düşük seviyelerde kalmıştır. Diğer modeller Feriştah Hatun Minaresinden daha büyük periyotlara sahip olması sebebiyle daha az etkilenmiştir. Somuncu Baba Minaresinin periyodu 0.63s olup, Erzincan Depremi verileri için yüksek ivme değerine maruz kalmıştır. Bu durumda sözü edilen minarenin Erzincan Depremi verilerine göre ağır hasar alacağını göstermektedir. Özkanlı ve Atasayar Minarelerinin periyotlarının çok yüksek olmasına karşın aşırı çekme gerilmelerinden ve tepe noktası deplasmanlarından dolayı bu iki minare de ağır hasar alacak veya yıkılacaktır.



Şekil 4. Yedi minare modelinin 1. Periyot ivme değerleri ile tasarım ve deprem ivme spektrumları

Her bir sonlu elemanlar modeli ve her bir dinamik analiz sonucunda elde edilen çekme gerilmesi renklendirmeleri, Şekil 5’de modellerin deforme oluş şekilleri üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca, çekme gerilme değerleri de her modelin altında verilmiştir. Bütün renklendirme oranları 0 ile 10 MPa arasında değişmektedir. Bundan dolayı her bir modelin çekme gerilmeleri karşılaştırmalı olarak yorumlanabilir. Buna karşın yatay deplasman değerlerinin düşük olmasından dolayı aradaki farklılıklar ilgili şekilden tespit edilememektedir. Yatay deplasmanlar minare yüksekliği boyunca artmaktadır ve maksimum yatay deplasmanlar tepe noktasında meydana gelmektedir. Sonlu elemanlar analizlerine göre, eğilme ve aksel gerilme değerleri minarelerin geçiş bölgelerinin üst kısmında maksimum değere ulaşmaktadır. Konu ile ilgili araştırma yapan birçok araştırmacı da benzer sonuçlara ulaşmıştır ([3]; [2]; [4]). Bu araştırmacılar minarenin geçiş bölgesi ile ilgili bazı önerilerde bulunmuş ve bu kısmın güçlendirilmesi ile ilgili bazı analitik çalışmalar yapmışlardır.



Şekil 5. Modellerin her bir spektrum verileri için maksimum çekme gerilmesi renklendirmeleri

4. SONUÇLAR

Aksaray şehir merkezinde bulunan yedi farklı yığma minare yapısal olarak araştırılmış ve yatay spektral yükleme altında analizleri yapılmıştır. Bu minarelerin yapım teknikleri, kullanılan malzemeler, şerefe sayıları ve yapıldığı dönemler birbirine oldukça benzemektedir. Spektral veri olarak dört farklı deprem spektrumu ile DBYBHY [16] de öngörülen şartlar dikkate alınarak oluşturulan tasarım spektrumu kullanılmıştır. Seçilen deprem kayıtları ülkemizde meydana gelen büyük depremlere aittir ve birçok insan bu depremlerde hayatını kaybetmiştir.

Gerçekleştirilen modal analizlere göre minare modelleri farklı periyotlara sahiptir. Şunu belirtmek gerekir ki; bir yapının periyodu yapının dinamik davranışını doğrudan etkilemektedir. Bunun yanında her bir depremin kendine özgü spektral ivme değerleri olacaktır. Bu yüzden eğer bir yapı büyük bir periyoda sahip ise, depremden zarara görmez ya da yapı periyodu küçükse, depremden zarar görür gibi bir kaniya varılamaz. Her şeye rağmen eğer bir yapının periyodu büyükse, deprem esnasında diğer yapılara göre daha avantajlıdır denebilir. Bu yüzden yığma yapıların periyodunun artırılması amacıyla bazı çelik çubuklar veya kenetler ilave edilmelidir. Minareler içinde aynı durumlar söz konusudur. Eğer bir minare büyük bir periyoda sahipse gelen deprem kuvvetlerinden karşı diğer minarelere göre daha avantajlıdır.

Yapılan analizler sonucunda elde edilen çekme gerilmelerine göre neredeyse tüm minareler göçme sınırındadır. Bunun temel sebebi çekme gerilmelerinin minarenin geçiş bölgesinde yoğunlaşmasıdır. Çünkü bu bölgede kare kesitten dairesel kesite geçişte kesit alanının oldukça azalmasıdır. Maksimum çekme gerilme değerleri 2.17 MPa ile 10.46 MPa arasında değişmektedir. Minarelerin çekme dayanımlarının 0.4 MPa civarında olduğu düşünüldüğünde elde edilen çekme gerilme sonuçlarının hepsi bu değerlerin oldukça üstünde kalmıştır.

Bu çalışmada görüldüğü üzere seçilen minareler farklı geometrik özelliklere sahiptir. Çünkü günümüzde ülkemizde yapılan minarelerin yapımı konusunda herhangi bir şartname mevcut değildir. Bazıları iki veya üç şerefeli, bazıları büyük bir silindirik gövdeye sahip, bazıları da yüksek kaide kısmına sahiptir. Son yıllarda ülkemizde yapılan minareler herhangi bir teknik şartname, yönetmelik veya standarta bağlı olarak inşa edilmediğinden dolayı en küçük bir yer sarsıntısında veya rüzgâr kuvvetleriyle birlikte hasar alabilmektedir. Bu sebepten dolayı gerek tarihi yığma minareler ve gerekse günümüzde inşa edilmiş yığma minareler üzerinde akademik anlamda çalışmalar yapılmalı, bu yapıların statik ve dinamik davranışları araştırılmalıdır. Yüzyıllar boyunca depremlere ve rüzgârlara karşı dayanımını yitirmemiş olan minarelerin yapım sistemleri araştırılarak günümüzde de bu sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Ural, A. Dogangun and S. Meraki, *Response evaluation of historical crooked minaret under wind and earthquake loadings*. *Wind and Structures*, 17(3) (2013) 345–359.
- [2] A. Dogangun, R. Acar, H. Sezen and R. Livaoglu, *Investigation of dynamic response of masonry minaret structures*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3) (2008) 505–517.
- [3] A.C. Altunişik, *Dynamic response of masonry minarets strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites*. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7) (2011) 2011–2019.
- [4] R.K. Pekgökgöz, M.A. Gürel, Z. Mammadov and F. Çili, *Dynamic Analysis of Vertically Post-Tensioned Masonry Minarets*. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(4) (2013) 560–589.
- [5] C.S. Oliveira, E. Çaktı, D. Stengel, M. Branco, *Minaret behavior under earthquake loading: The case of historical Istanbul*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(1) (2012) 19–39.
- [6] K. Hacıfendioğlu, *Seasonally frozen soil's effect on stochastic response of masonry minaret–soil interaction systems to random seismic excitation*. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1) (2010) 66–74.
- [7] K. Hacıfendioğlu and F. Birinci, *Stochastic dynamic response of masonry minarets subjected to random blast and earthquake-induced ground motions*. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(6) (2011) 669–678.
- [8] T. Karabork and Y. Kocak, *New metal connectors developed to improve the shear strength of stone masonry walls*. *Structural Engineering and Mechanics*, 50(1) (2014) 121–135.
- [9] A. Doğangün, H. Sezen, Ö.İ. Tuluk, R. Livaoglu and R. Acar, *Traditional Turkish Masonry Monumental Structures and their Earthquake Response*. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(3) (2007) 251–271.
- [10] E. Güleç, *Kayseri Minareleri (Cumhuriyet Dönemine Kadar)*. Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Kayseri (2006).
- [11] E. Ertek, *Osmanlı Minarelerinin Yapısal Modellenmesi ve Deprem Analizi*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Gebze (2009).
- [12] M.H. Baştürk, *Bursa tarihi yağma minarelerinin dinamik davranışlarının modal analiz yöntemi ile incelenmesi*. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Bursa (2013).
- [13] Lusas, *Finite element analysis software products*. Finite Element System FEA Ltd, (UK 2013).
- [14] A. Ural and S. Uslu, *Shear tests on stone masonry walls with metal connectors*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(1) (2014) 66–86.
- [15] A. Ural and F.K. Firat, *Evaluation of masonry minarets collapsed by a strong wind under uncertainty*. *Natural Hazards*, 76(2) (2015) 999–1018.
- [16] DBYBHY, *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara (2007).
- [17] S. Uslu, *Tarihi yağma yapılarında kullanılan metal bağlantı elemanlarının deneysel metotlarla incelenmesi*. Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Aksaray (2013).