

AYASOFYA ÖRNEĞİNDE TARİHİ MİNARE YAPILARININ SİSMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

A.İşıl ÇARHOĞLU*, Pınar USTA, K. Armağan KORKMAZ

Özet

Türkiye'deki tarihi yapılar göz önüne alındığında minareler, yapı formları itibariyle kültürel miras içinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır ve tarihi kültürü yansıtan önemli belirgin yapılarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Büyük kentler içinde belirgin olan Osmanlı minareleri ülke genelinde oldukça yaygındır. Türk İslam kültürü sentezinin bir ürünü olan bu yapılar, diğer minare yapılarından tip olarak farklılık göstermektedir. Osmanlı'larda ise 6 adede kadar minare vardır. Minarelerin taş veya tuğla gövdesi genellikle çokgendir, bazen karedir. Gövde burmalı ve yivlidir. Yapısal sistemin sağlamlığının en iyi göstergesi yüzyıllar öncesinde yapılan bir çok minarenin karşılaştığı doğal afetlere rağmen hala varlığını korumasıdır. Bir deprem ülkesi olan Türkiye'de, mevcut minarelerin deprem sırasındaki davranışlarının belirlenmesi, onların gelecek kuşaklara aktarılması açısından önemlidir. Bu konuda yapılmış olan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar temel alınarak, gerçekleştirilen çalışmada; Ayasofya minareleri ele alınarak zaman tanım alanında dinamik analiz yapılmıştır. Analizlerde 3 adet deprem ivme kaydı kullanılarak yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi yapılar, minare yapıları, kültürel miras, zaman tanım alanında dinamik analiz

SEISMIC BEHAVIOR INVESTIGATION OF HISTORICAL MINARET STRUCTURES: HAGIA SOPHIA CASE

Abstract: Considering all types of historical buildings in Turkey, minaret structures are one of the most critical ones in all over the country. The minaret buildings are representing the cultural and historical change in time. In larger cities of Turkey, Ottoman type minarets are commonly built. With its cultural synthesis of the history, Ottoman type differce from the others with their technical capacity and structural ability. Minaret structures are constructed by using natural material from the region. Minaret structures may have multi faces or rectangular. A good sign from the historical buildings, they stay standing up the earthquakes and disasters through the history. In Turkey which is a earthquake prone country, it is very important to have earthquake behavior of the existing minaret structures. There are numerous research studies are available in this topic. From this stand point, Hagia Sophia Minaret Buildings were investigated through linear time history analysis by using 3 different earthquake data. As a result of the analyses, displacements and stress values are determined.

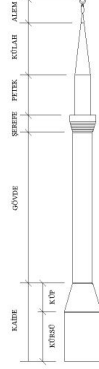
Keywords: Historical Buildings, Minaret structures, cultural heritage, Linear Time History Analysis

1. Giriş

Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde inşa edilmiş olan birçok tarihi minare mevcuttur. Minareler içi boş dairesel kesitli narin yapılar olup sismik kuvvetler ve rüzgâr gibi dinamik kuvvetlerin etkisinde olan bu dış kuvvetlerin etkisiyle hasar görebilen yapılardır. Tarihi yapıların korunması ve gelecek nesillere aktarılması açısından sismik analizlerinin yapılması oldukça önemlidir. Tarihi minarelerin inşasında taş, tuğla ve horasan harcı kullanılmıştır. Horasan harcı ögütülmüş tuğla parçacıkları, kireç ve kumun su ile

* SDÜ Müh. Mim. Fak. İnşaat Müh. Böl. Yapı Anabilim Dalı, Çünür, Isparta
E-posta: pinarusta@sdu.edu.tr

karışımından elde edilmektedir. (Erdoğan, 2007). Minarelerin yüksekliği, çapı, narinliği önem taşımaktadır. Minare yapıları farklı bölümlerden meydana gelmektedir. Minarenin kısımlarını oluşturan âlem hilal şeklindeki elemanı taşıyan kısımdır. Kûlah, âlemin üzerinde durduğu koni şeklindeki kısımdır. Şerefe müezzinlerin ezan okuduğu kısımdır. Gövde, duvar ve helezonik şeklindeki merdivenden oluşmaktadır. Kûp, yuvarlak şekilli kısmın dikdörtgen şekilli kûp bölümüne aktarılmasını sağlayan kısımdır. Kürsü ise yuvarlak şekilli gövdedeki etkileri temele aktaran kısımdır. Şekil 1’de minarenin kısımları görülmektedir (Ertek, 2009).



Şekil 1. Minarenin kısımları (Ertek,2009)

Minare türündeki yapıların çok katlı yapılardan farkı minarelerin kütlelerinin ve rijitliklerinin yükseklik boyunca yayılı olmasıdır. Bu tür yapıların sismik davranışları incelenirken modal analiz yöntemi kullanılabilir (Chopra, 1995). Ertek (2009), çalışmasında Osmanlı döneminde inşa edilen minareleri ele alarak yapı teknolojilerini ve malzemelerini araştırmışlardır. Minareleri sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek ele alınan minareleri karşılaştırmışlardır. Farklı malzemelerin minareler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kuşüzümü (2010), İstanbul minarelerini ele alarak minareleri çeşitleri, malzeme, sayı ve plandaki konumlarına göre sınıflandırmışlardır. Günümüzdeki restorasyon yöntemlerini ve tekniklerini İstanbul minarelerini ele alarak açıklamışlardır. Oliveira vd. (2012), çalışmalarında büyük kültürel değerler olan Ayasofya, Süleymaniye, Akbıyık, Mihrimah, Rüstem Paşa, Şehzade Cami minarelerini incelemişlerdir. Bu yapılar sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir ve mod birleştirme yöntemi kullanılarak frekans ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada, tarihi minare yapılarını incelemek amacıyla, Ayasofya minareleri ele alınarak zaman tanım alanında dinamik analizler yapılmıştır. Analizlerde 3 adet deprem ivme kaydı kullanılarak yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir.

2. Ayasofya Minare Yapılarının Davranışı

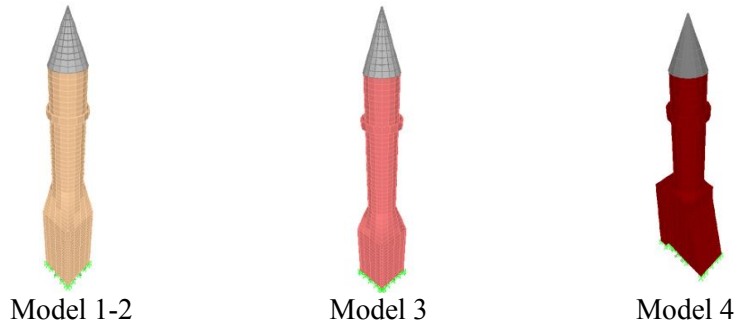
İstanbul’daki en eski anıtlar arasında bulunan Ayasofya, İmparator Justinianus tarafından 532-537 yılları arasında Miletos’lu Mimar İodoros ile Aydınli (Tralles) Matematikçi Antemios’a yaptırılmıştır. Bu yapı depremlerde kısmen zarar görmüş tekrar onarılmıştır (Aydın, 2005). Şekil 2’de Ayasofya’nın görünümü bulunmaktadır. Osmanlı döneminde Ayasofya defalarca onarılmıştır. Sultan II. Selim zamanında 1566-1574 yıllarında Ayasofya yıkılma tehlikesi ile karşı karşıya kalmıştır. Sultan’ın emri ile yapının kuzeyine iki paye inşa edilmiştir. Aynı zamanda yapının kuzey-batı ve güneybatı kesimine payanda görevi yapacak iki minare ilave edilmiştir. Bu önemli onarımın ardından 1703-1730 yıllarında Sultan Ahmet

yeniden onarım yaptırmıştır. O zamandan günümüze kadar bu yapı defalarca onarılmıştır (Aydın, 2005).

Ayasofya’da 4 adet farklı yükseklikte minare mevcuttur. Bu minareler birkaç yüzyıl içinde zamanla inşa edilmiş olup yüksekliği, duvar kalınlığı ve çapı birbirinden farklıdır. Minarelerden üçü taş malzemeden inşa edilmiş olup bunlardan güneydoğu köşesindeki en incisi, batı cephesindeki iki minare ise aynı geometrik özellikte, bir tanesi ise tuğla malzemeden yapılmış olup kuzeydoğu köşesindedir. Şekil 3’de Ayasofya minare modelleri mevcuttur. Tablo 1’de de boyutları hakkında bilgi verilmektedir (Oliveira, 2011). Model 1,2 ve 3’te taş malzeme model 4’te ise tuğla malzeme kullanılmıştır. Tablo 2’de malzeme özellikleri mevcuttur.



Şekil 2. Ayasofya'nın görünümü



Şekil 3. Ayasofya minareleri modelleri

Tablo 1. Ayasofya cami minarelerinin boyutları

	Aya Sofya 1-2	Aya Sofya 3	Aya Sofya 4
Minarenin toplam yüksekliği	66.55	63.20	44.96
Balkon sayısı	1	1	1
Gövde yüksekliği	37.90	39.70	33.60
Duvar kalınlığı (m)	1.00	0.55	0.85
Gövde Çapı	4.70	3.10	3.30

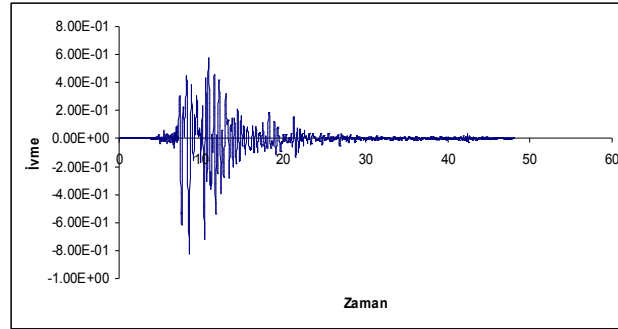
Tablo 2. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme Türü	Elastisitemodülü (Mpa)	Poisson oranı	Birim hacim ağırlığı kg/m ³
Tuğla	3000	0.2	2000
Taşduvar(Kireçtaşı)	26000	0.2	2500
Örtü malzemesi	13000	0.16	220

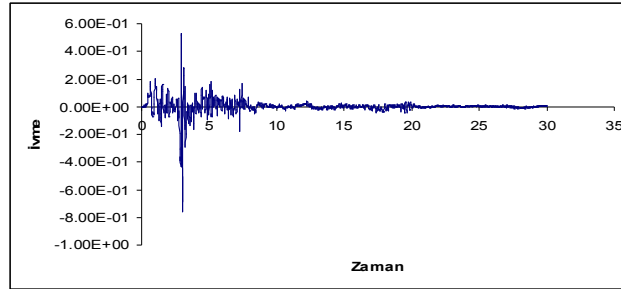
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerde zaman tanım alanı yöntemi kullanılarak minare yapılarına 3 adet deprem ivme kaydı uygulanmıştır. Tablo 3’de yapılara uygulanan depremlere ait özellikler mevcuttur. Ele alınan yapılarda X ve Y yönündeki değerler sistemlerin simetrik olmasından dolayı aynı elde edilmektedir. Şekil 4’de analizlerde kullanılan depremlere ait ivme zaman grafikleri mevcuttur.

Tablo 3. Analizlerde kullanılan depremlerin özellikleri

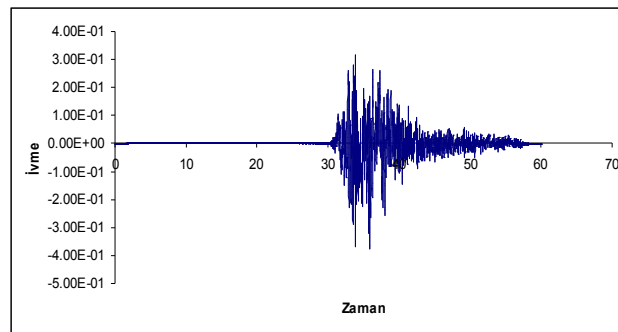
Deprem	Tarih	Moment Büyük­lük (Mw)	Kayıt	Yer Hızı (cm/s)	Yer ivmesi (g)	Odak Uzaklığı(km)	Tip
Kobe	16/01/1995	6.9	KJM000	79.3	0.8213	6.9	Yanal Atımlı
Cape Mendocino	25/4/1992	7.1	CPM- UP	63	0.754	8.5	Ters Eğik Atımlı
Kocaeli	17/08/1999	7.4	SKR090	79.5	0.376	3.1	



a. Kobe 1995 depremi



b. Cape Mendocino 1992 depremi



c. Kocaeli 1999 depremi

Şekil 4. Analizlerde kullanılan depremlere ait zamana bağlı ivme grafikleri

3. Araştırma ve bulgular

Analiz sonucunda her minare modeli için 3 adet zamana bağlı ivme değerleri kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda periyot değerleri, mod şekilleri, yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilerek 4 adet Ayasofya minaresi 3 adet deprem ivme kaydı için karşılaştırılmıştır. Minareler simetrik olduğundan dolayı x ve y yönünde analiz sonuçlarında ki değerler aynı elde edilmiştir. Tablo 4’de ve Şekil 5’de analiz sonuçlarında elde edilen periyot değerleri ve mod şekilleri görülmektedir.

Şekil 6 ve 7’de elde edilen gerilme ve yer değiştirme değerleri görülmektedir. Şekil 6 ve 7 incelendiğinde en büyük yer değiştirme ve gerilmenin Kobe depreminde elde edildiği en küçük değerlerinde Kocaeli depreminde elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte en büyük yer değiştirme ve gerilme değerinin 3 nolu minarede elde edildiği görülmüştür. Şekil 8’de en büyük zararın olduğu Kobe depremine ait gerilme şekilleri görülmektedir.

4. Sonuçlar












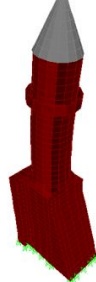
Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda, farklı boyutlara sahip minareler incelenerek farklı periyot, mod şekilleri, yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edildiği görülmektedir.

En büyük yer değiştirme 3 nolu minarede meydana gelmektedir. Bu 3 minarenin malzeme özellikleri aynıdır. 3 ve 1 nolu minarelerin yükseklikleri oldukça yakın olup 3 nolu minarenin duvar kalınlığı 0.55 m iken 1 nolu minarenin duvar kalınlığı ise 1.0 m’dir. Aynı zamanda 1 ve 2 nolu minarenin gövde çapı 4.7 m., 3 nolu minarenin ki ise 3.10 m olup 3 nolu minare 1 ve 2 nolu minarelere göre daha incedir. Yer değiştirme ve gerilmedeki farklılık bu boyutların farklılığından kaynaklanabilir. 4 nolu minarenin yüksekliği 1 ve 2 nolu minarelerden daha az olmasına rağmen duvar kalınlığı ve gövde çapı daha küçük olduğundan daha büyük yer değiştirme yapmakta, daha az gerilme oluşturmaktadır. Minarelerin yüksekliğinin yer değiştirme ve gerilme değerlerini etkilemesinin yanı sıra gövde çapının da oldukça etkili olduğu görülmektedir. Aynı yükseklikte çapı geniş duvar kalınlığı daha fazla olan yapı daha dayanıklıdır denebilir.

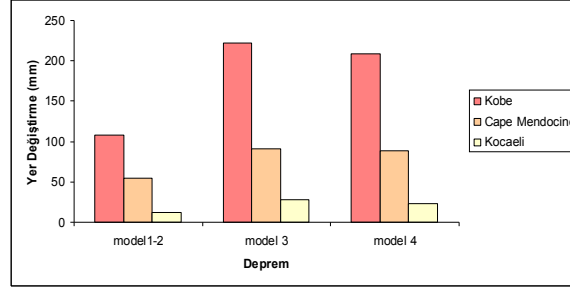
En büyük yer değiştirme Kobe depreminde elde edilmekte bunu Cape Mendocino ve Kocaeli depremleri izlemektedir. Kobe depreminde 3 nolu minarede 221 mm yer değiştirme meydana gelirken, Kocaeli depreminde ise 28mm yer değiştirme elde edilmiştir. Aynı zamanda Kocaeli depreminde 2 MPA gerilme oluşurken Kocaeli depreminde 20 MPA değerinde gerilme meydana gelmektedir. Büyüklüğü 7.4 etkin yer ivmesi 0.376 yer hızı 79.5 ve odak derinliği 3.1 olan Kocaeli depremi yerine büyüklüğü 3.1 etkin yer ivmesi 0.8213, yer hızı 79.3 ve odak derinliği 6.9 olan Kobe depremi gibi bir deprem ülkemizde yer alan Ayasofya minarelerinin yer aldığı İstanbul’da meydana gelmiş olması durumunda Kocaeli depreminin vermiş olduğu zararın yaklaşık 10 katı zarar vereceği görülmektedir.

Tablo 4. Analiz sonuçlarından elde edilen periyot değerleri

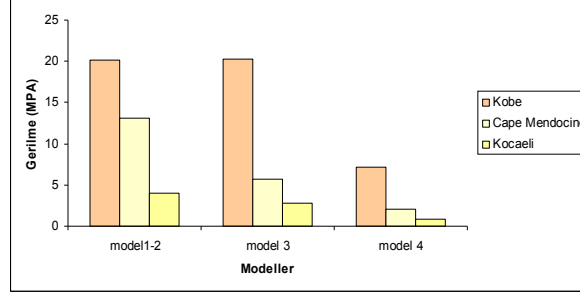
Periyot Değerleri	Model 1-2	Model 3	Model 4
T_1	0.42522	0.55703	0.68892
T_2	0.42522	0.55703	0.58054
T_3	0.18597	0.13892	0.18268
T_4	0.14522	0.13892	0.16213

Mod şekilleri	Model 1-2	Model 3	Model 4
Mod 1			
Mod 2			
Mod 3			
Mod 4			

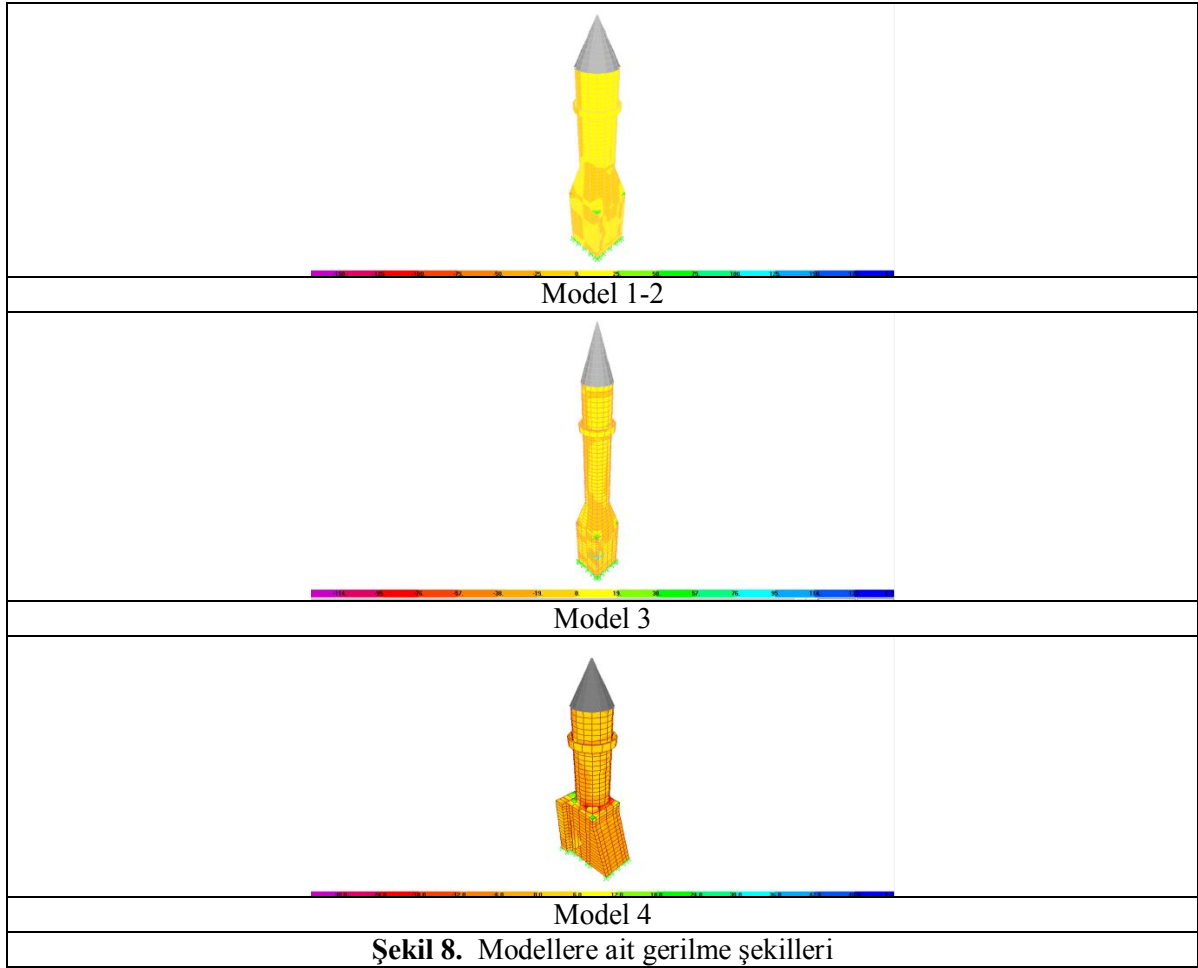
Şekil 5. Analiz sonuçlarından elde edilen mod şekilleri



Şekil 6. Analiz sonuçlarında elde edilen yer değiştirme değerleri



Şekil 7. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme değerleri



Şekil 8. Modellere ait gerilme şekilleri

KAYNAKLAR

Aydingün Ş.G.,2005, Tarih Boyunca Yaşanan Depremler Sonrası Ayasofya Onarımları, Kocaeli Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

Bathe K. The finite element method Publisher, Journal of the University of Cape Town Engineering Society, 57-61, 1967.

Chopra, A.K., 1995, Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering, Prentice, Inc., New Jersey.

Cook, R., Malkus D., Plesha M., Concepts and applications of finite element analysis Publisher, John Wiley & Sons ,Canada,, 1989.

Erdoğan Sinan T., Erdoğan Turhan Y (2007) Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, ODTÜ Yayıncılık, Ankara.

Ertek E. (2009), Osmanlı minarelerinin yapısal modellenmesi ve deprem analizi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Kuşüzümü H.K.,2010, İstanbul Minarelerinin Geleneksel Yapım Teknikleri ve Günümüzdeki Restorasyonu, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi.

<http://www.belgenet.com/deprem/depremitu.html>

<http://www.deprem.gov.tr/sarbis/shared/DepremHaritalari.aspx>