

# EDİRNEKAPİ MİHRİMAH SULTAN CAMİİ MİNARESİNİN

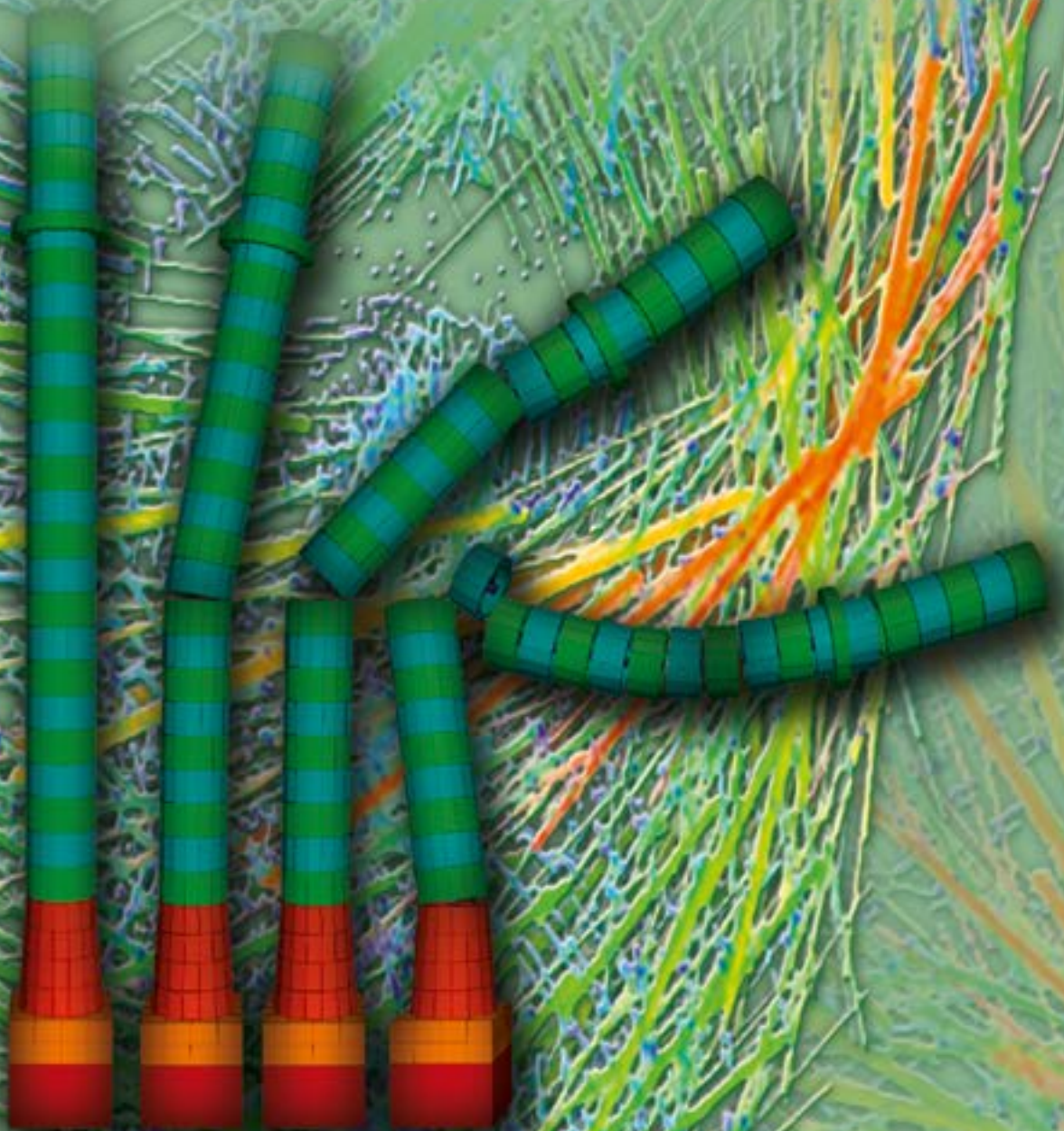
## DEPREM DAVRANIŞI

*Earthquake Behavior of the Minaret of the Mihrimah Sultan Mosque in the  
Edirnekapı, İstanbul*

---

Prof. Dr. Eser aktı | B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Arş. Enst., Deprem Müh. Anabilim Dalı  
Özden Saygılı | İnş. Yük. Müh., B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Arş. Enst., Deprem Müh. Anabilim Dalı  
Serkan Görk | Arş. Gör., B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Arş. Enst., Deprem Müh. Anabilim Dalı  
Esra Zengin | Arş. Gör. İnş. Yük. Müh., B.Ü. Kandilli Rasathanesi ve Deprem Arş. Enst., Deprem Müh. Anabilim Dalı  
Prof. Dr. Carlos S. Oliveira | Instituto Superior Técnico, Lizbon, Portekiz  
Dr. Jose V. Lemos | Laboratório Nacional de Engenharia Civil Lizbon, Portekiz

---



*Minareler narin yapılardır. Tarihi minareler ağırlıklı olarak kesme taş kullanılarak, zaman zaman da tuğla yığma olarak inşa edilmektedir. Yeni minareler ise çoğunlukla betonarmedir. Ülkemizde yaşanan pek çok geçmiş depremde minareler hasar görmüştür. Minare hasarının en son görüldüğü deprem 23 Ekim 2011 Van depremidir. Bu makalede: (1) 2011 Van depreminde minarelerde oluşan hasarlardan bahsedilmiş; (2) İstanbul'da 41 adet tarihi ve yeni minarede gerçekleştirilen çalışmanın sonuçları irdelenmiş; (3) Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii minaresinin deprem davranışının belirlenmesine yönelik olarak yaptığımız çalışmalar sunulmuş, (4) Aya Sofya ve Maltepe Camii minarelerinde kurmakta olduğumuz deprem izleme ve kayıt sistemleri anlatılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Minareler, dinamik analiz, doğrusal olmayan modelleme, İstanbul, deprem davranışı

*Abstract. Minarets are slender structures. Old ones are mostly made of cut-stone-block masonry and occasionally of brick masonry, while the new ones are generally of reinforced concrete. They have suffered significant damage during past earthquakes, the most recent event being the 23 October 2011 Van, Turkey earthquake. Istanbul is home to many historical and contemporary minarets. Evaluation of their dynamic behavior is significant due to the expectation of a large event in the near future. This paper summarizes our on-going studies on the minarets, which are: (1) The minaret damage that took place during the 2011 Van earthquake; (2) The minaret campaign in Istanbul carried out in 30 historical and modern day minarets; (3) Earthquake damage assessment of the minaret of 16th century Mihrimah Sultan mosque based on discrete element modeling, and simulated and real earthquakes; (4) Permanent strong motion instrumentation of the Hagia Sophia Museum and Maltepe Mosque minarets.*

**Keywords:** Minarets, Dynamic Analysis, Non-linear Modeling, Istanbul, Earthquake Response.

## GİRİŞ

Klasik Osmanlı minareleri esas olarak yığma bir tüp içinde yer alan bir çekirdek yapısı ve bu iki yapısal elemanı bağlayan helezonik merdiven sisteminden oluşur. Bazı durumlarda, örneğin Aya Sofya minarelerinde, bir minare yapısı içinde iki merdiven hattı bulunabilir. Bir minareyi oluşturan elemanlar temel, kaide, küp, gövde, merdiven, şerefe, petek, külah ve alemdir (Şekil 1). Külah ve alem dışındaki elemanlar kesme taş, tuğla yığma ya da karma olarak inşa edilir. Günümüz minareleri ağırlıklı olarak betonarme olarak inşa edilmektedir. Külah, tarihi minarelerde kurşun levhalarla kaplanan ahşap bir iskeletten oluşsa da, taştan yapılmış külahlar da bulunmaktadır. Kesme taş minarelerde, taş elemanlar demir bağlantı çubuklarıyla birbirlerine bağlanmaktadır. Merdiven ve çekirdek en üst şerefeye kadar devam etmekte, bu seviyeden sonra, aleme kadar olan bağlantı, genellikle daha küçük çapa sahip olan ahşap bir çekirdek ile çekirdeği saran ahşap bir merdiven ile sağlanmaktadır [2].

İstanbul minareleri geçmiş depremlerin birçoğunda hasar görmüşlerdir. Örneğin Aya Sofya minareleri 1509 depreminde [3], Mihrimah Sultan Camii minaresi ise 1766 ve 1894 depremlerinde yıkılmış ve yeniden yapılmışlardır [4]. Minare hasarına tanık olduğumuz en son deprem 23 Ekim 2011 Van depremidir. Depremde hasar gören 76 minarenden 50 tanesi ya devrilmiş olmaları nedeniyle ya da onarılamayacak seviyede hasar gördüklerinden yıkılmıştır. 26 minare ise onarılmıştır. Van depreminde ağır hasar gören minareler incelendiğinde yapısal sorunların küp-gövde geçişi yakınlarında veya minarenin ana camii yapısına bitişik olduğu durumlarda gövdenin ana yapıdan ayrıldığı bölgelerde olduğu gözlenmiştir. Buralarda oluşan yatay çatlaklar nedeniyle kimi durumlarda gövdenin üst bölümü ile alt bölüm birbirinden ayrılmıştır. Yıkılmaların büyük çoğunluğu şerefenin hemen üst seviyesinde meydana gelen hasar sonucu minarenin bu seviyenin üstünde kalan bölümünün devrilmesi şeklinde oluşmuştur. Kaidede ya da gövde üzerinde çeşitli yüksekliklerde oluşan çatlaklarda gözlenen bir



Şekil 1. Klasik Osmanlı minaresini oluşturan ana elemanlar [1].

başka hasar türüdür. Şekil 2'de Van depreminde hasar gören minarelerden örnekler sunulmuştur.

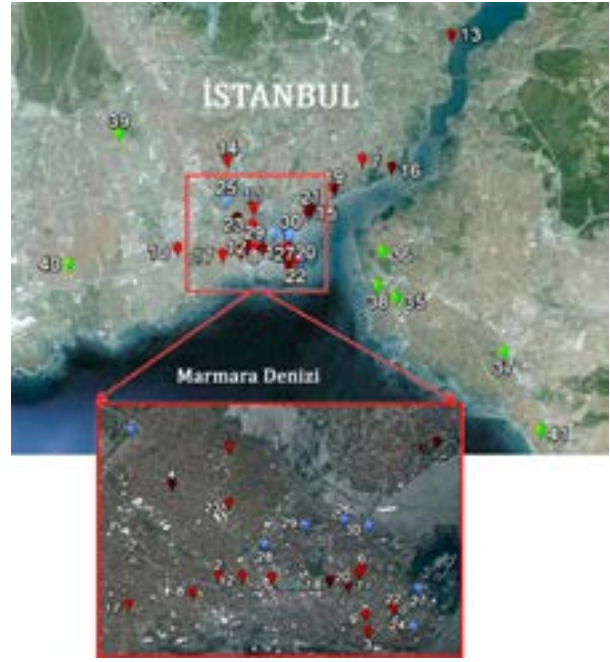
İstanbul'da sayısız tarihi ve yeni minare bulunmaktadır. İstanbul'daki yüksek deprem beklentisi [5], bu önemli yapıların deprem davranışlarının daha iyi anlaşılmasını gerekli kılmaktadır. Deprem davranışının anlaşılması bu yapıların onarımı veya güçlendirilmesi ile ilgili karar ve tercihler için en önemli bilgidir.

## İSTANBULMİNARELERİNDE YAPILAN ÖLÇÜMLER

Oliveira ve diğerleri [1] tarafından, tarihi yarımada bulunan 11 minarede çevrel titreşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2012 yılının yaz ve sonbahar aylarında İstanbul'da, 30 minarede daha benzer deneyler yapılarak, test edilen minare sayısı 41'e çıkarılmıştır. 30 minareden 23 tanesi tarihi olup, yığma sistemle yapılmışlardır. 7 minare ise son 50 yılda betonarme olarak inşa edilmiştir. Şekil 3'te çevrel titreşim deneylerinin gerçekleştirildiği minareler gösterilmektedir. Testlerde iki adet, üç bileşenli Güralp 6TD tipi sismometreden yararlanılmıştır. Sismometrelerden biri zemin seviyesine, diğeri de şerefe seviyesine yerleştirilerek, 200 Hz örnekleme hızı ile 10-15 dakika süreyle kayıt alınmıştır. Her minarede titreşimlere ek olarak, gövde çapı, duvar kalınlığı, basamak yüksekliği, basamak sayısı ve çekirdek çapı da ölçülmüştür. Tarihi binalara ait röleve çizimleri, genel olarak zorlukla temin edilmektedir. Bu tip bilgiler bazı binalar için var olmamakta, var olsa da ulaşılmasında güçlükler ortaya çıkmakta, ya da var olan bilgiler ihtiyaç duyulan ayrıntıyı ya da bilgiyi içermemektedir. O nedenle çalışılan tüm minare-



Şekil 2. 23 Ekim 2011 Van depreminde oluşan minare hasarı örnekleri

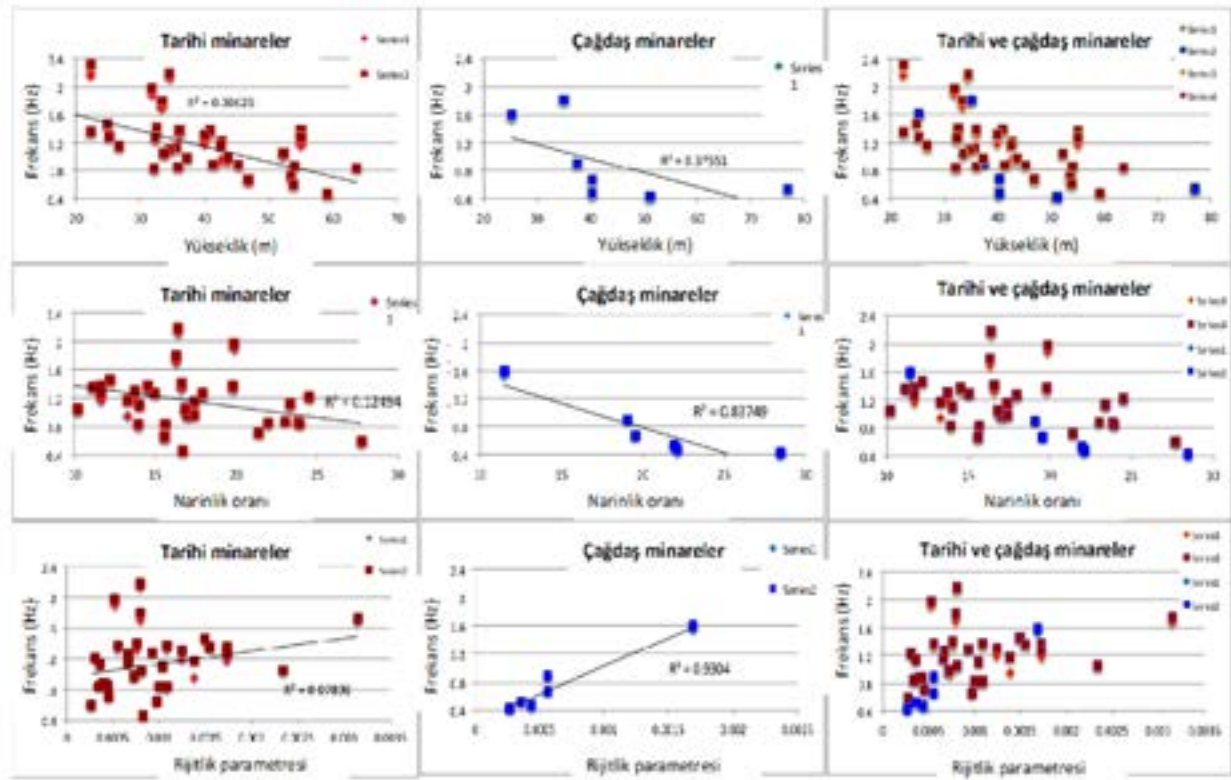


Şekil 3. Çalışma kapsamında çevrel titreşim deneylerinin gerçekleştirildiği minareler. Bu çalışma kapsamındaki tarihi minareler kırmızı, betonarme olarak inşa edilenler yeşil, Oliveira ve diğerleri [1] tarafından çevrel titreşim deneylerinin gerçekleştirildiği minareler ise mavi ile gösterilmiştir.

lerde minare geometrisine ilişkin ölçümler alınmıştır. Alınan ölçümler gövde çapı ve yüksekliğinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Çalıştığımız minarelerden 14 tanesi için, ölçümler Kuşüzümü [6] ve Sav [7] tarafından verilen ölçülerle karşılaştırılmış ve alınan ölçümlerin gerçek boyutların %8'i içinde kaldığı görülmüştür. Minareler ağırlıklı olarak NEHRP C ya da D tipi zeminlerde bulunmaktadır.

Çevrel titreşim verileri analiz edilerek, minarelerin birbirine dik iki yatay yöndeki doğal titreşim frekansları hesaplanmıştır. İki yöndeki hakim frekansların, minareler gibi simetrik yapılarda beklendiği üzere, birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Büyük frekansın küçük frekansa olan ortalama oranı 1.03 olarak bulunmuştur.

Minarelerin geometrik özellikleri ve hakim titreşim frekansları arasındaki ilişkinin anlaşılması faydalıdır. Bu ilişki minarelerin dinamik davranış özelliklerinin etkileyen geometrik parametreleri deneysel olarak ortaya koyar. Aynı



Şekil 4. Hakim titreşim frekanslarının gövde çapı (üst sıra), narinlik oranı (orta sıra) ve rijitlik parametresi ile (alt sıra) değişimi. Tarihi minareler (sol kolon), çağdaş minareler (orta kolon) ve ikisinin birleşimi (sağ kolon).



Şekil 5. Mihrimah Sultan Camii (solda), sökülmeden önce Mihrimah Sultan Camii minaresi (ortada), minare kesiti (sağda).

zamanda hakkında yeterli bilgiye sahip olunmayan minarelerin genel doğal titreşim frekanslarının tahmininde kullanılabilir. Şekil 4'te minarelerin ölçülen hakim frekansları, gövde yüksekliği ve narinlik katsayısı (gövde yüksekliği / gövde çapı) ile rijitlik parametresi ile birlikte gösterilmiştir. Tarihi ve yeni minareler aralarındaki farkların anlaşılabilmesi için, bu minareler ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Minare yapımında betonarmenin kullanılması, giderek daha narin minarelerin tasarımı ve inşasını mümkün kılmıştır. Bu tip minarelerin hakim frekansları yığma sistemle inşa edilen minarelere göre düşüktür. Bu durum Şekil 4'ün sağ kolonunda yer alan üç şekilde net olarak görülebilir. Şekil 4 orta kolonda yer alan çağdaş minareleri incelediğimizde, bu yapılar için rijitlik parametresi ve narinlik oranının gövde yüksekliğine göre çok daha iyi bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. Tarihi minarelerde ise gövde yüksekliğinin hakim frekansın tahmininde daha güvenli sonuç verdiği görülmektedir (Şekil

4, sol kolon). Her ne kadar ölçüm aldığımız çağdaş minare sayısı çok sınırlıysa da, davranışlarının daha dengeli olduğu söylenebilir. Bu durum muhtemelen çağdaş minarelerin betonarme olmalarından kaynaklanmaktadır. Yığma minarelerin davranış özellikleri ise daha yüksek bir saçılım göstermekle birlikte, yine de belli eğilimler çerçevesindedir.

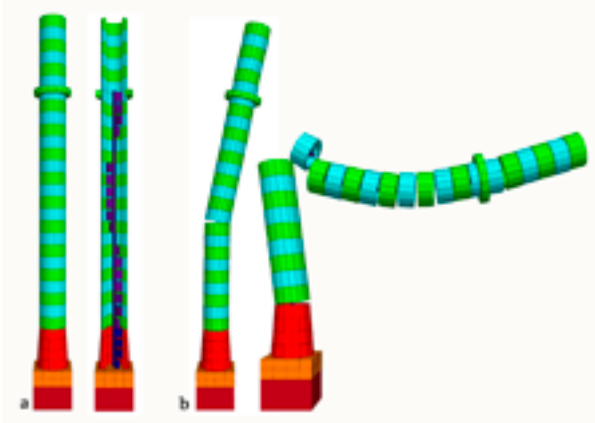
## MİHRİMAH SULTAN CAMİİ VE MİNARESİ

Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii Mimar Sinan tarafından yapılmıştır. Yapım tarihi kimi kaynaklara göre 1556-1560 [4], kimi kaynaklara göre ise 1562-1565'dir [9]. Ana bina, minare ve yardımcı yapılar depremlerden sürekli olarak etkilenmiş; 1719, 1766 ve 1894 depremlerinde kısmi göçmeler meydana gelmiştir [4]. Camii en son 1999 Kocaeli depreminde hasar görmüştür. Meydana gelen hasar nedeniyle, camii ibadete kapatılarak kapsamlı bir restorasyondan geçmiştir [9].

Minare kesme taştan inşa edilmiştir. 1719 depreminde hasar gören minarenin, üstten 18 basamaklık bölümü onarılmıştır. Minare 1766 ve 1894 depremlerinde yıkılmıştır. 1894 depreminde oluşan hasar, 1907'deki onarımdan önce alınmış olması gereken Şekil 6'daki fotoğrafta görülebilir. [9]. Son restorasyon çalışmaları kapsamında Mihrimah Sultan Camii minaresinin yukarıdan küpe kadar olan bölümü sökülerek yeni taşlarla ve orijinal geometriye sadık kalınarak baştan yapılmıştır [9].



Şekil 6. Mihrimah Sultan Camii ve minaresi. 1894 depreminden sonra. Fotoğraf 1894-1907 yılları arasında çekilmiştir [10].



Şekil 7. a) Mihrimah Sultan Camii minaresinin 3DEC modeli. Genel görünüm ve kesit. b) Sentetik bir deprem altında yıkılma mekanizması; 24.saniye (sol), 28.saniye (sağ).

### Mihrimah Sultan Camii Minaresinde Gerçekleştirilen Ultrasonik Testler

Mihrimah Sultan Camii minaresinde 2013 yılı Ocak ayında, minarenin restorasyonunun tamamlanmasından sonraki dönemde, bir seri ultrasonik test gerçekleştirilmiştir. Testlerde PunditLab+ Ultrasonik Test Cihazı ve 54 kHz'lik ultrasonik atım hızı (UPV) ve 250kHz'lik kayma dalgası transdüktörleri kullanılmıştır. Kaide, küp ve gövde olmak üzere üç ana bölgede alınan ölçümler sırasında, kaide-de 37, küpte 20 ve gövdede 58 ultrasonik atım hızı okuması alınmıştır. Kesme dalgası transdüktörleri kullanılarak alınan ölçüm adedi ise kaide-de 97, küpte 32 ve gövdede 113'tür.

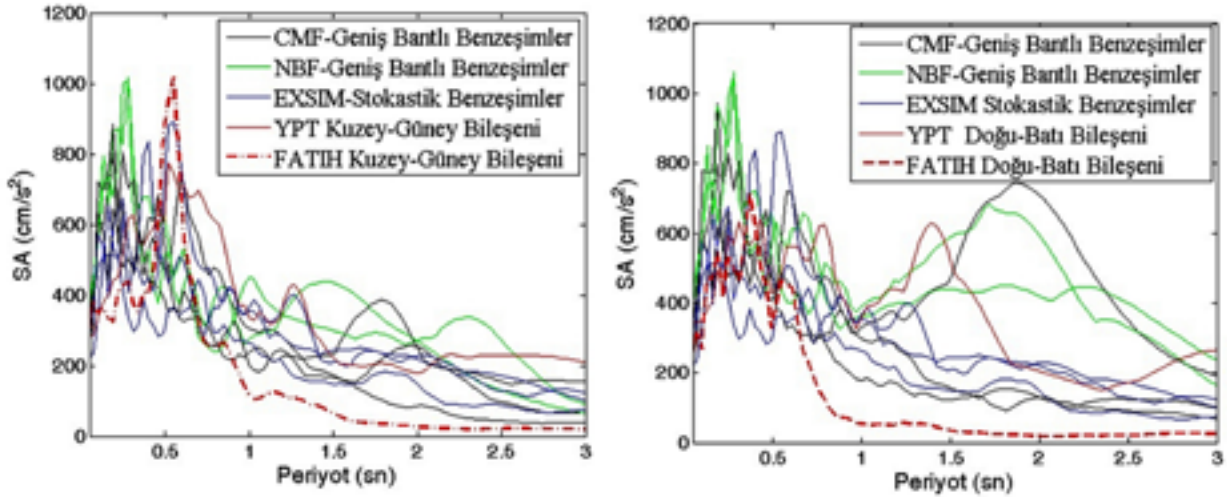
Elde edilen sonuçlar kullanılan yapı malzemesi özelliklerinin ölçüm alınan üç bölgede birbirinden farklı ol-

duğunu işaret etmektedir. Son restorasyonda, kaide ve küp korunmuş, minare gövdesi ise yeniden yapılmıştır. Kaide ve küpün ise aynı dönemde mi, yoksa farklı dönemlerde mi yapıldığı konusunda bir bilginiz bulunmamaktadır. Eldeki sonuçlarda, kaide ve küpte görülen farklılaşma, bu iki elemanın farklı dönemlerden kalma olduğu ihtimalini işaret etmektedir. Küpte ve gövdede kullanılan taşın özellikleri birbirlerine benzemekte, kaide ve gövdede ise net olarak birbirinden ayrılmaktadır.

## MİHRİMAH SULTAN CAMİİ MİNARESİNİN AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

### Ayrık Elemanlar Yöntemi

Yığma yapıların modellenmesinde kullanılan sayısal yöntemin ve analizin gerektirdiği parametrelerin seçimi önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Sayısal yöntem, karşı karşıya bulunulan sorunun ölçeği, yapı malzemesinin mekanik özelliklerine dair var olan bilgi ve veriler ile yapılması gereken ya da planlanan analizlerin kapsamına bağlı olarak seçilmektedir. Plastik analizde kullanılan makro modeller yığma yapı malzemesini homojen kabul ederek mekanik malzeme özelliklerini bu kabul üzerinden tanımlamaktadır. Ayrık elemanlar yöntemi ise taş ya da tuğla yığma malzemeyi, rijit ya da deforme olabilen elemanlar ve bu elemanları birleştiren ve harcı temsil eden bağlantı elemanları ile tanımlar. Yığma yapıların doğrusal olmayan davranışı bağlantı yüzeylerinde



Şekil 8. Doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılan yapay ve gerçek yer hareketlerine ait tepki spektrumları. (solda: kuzey-güney bileşenleri, sağda: doğu-batı bileşenleri).

kullanılan malzemenin, yani harcın davranışına bağlıdır. Bunun nedeni yığma yapılarda oluşan yapısal hasarın (çatlaklar, deformasyonlar, göçmeler) taş ya da tuğlada değil, harçta meydana gelen hasar tarafından kontrol edilmesidir.

Ayrık elemanlar yaklaşımında taş ya da tuğla bloklar rijit ya da deforme olabilen elemanlar, harç ise düzlemsel ara yüzler ya da bağlantı elemanları olarak modellenirler. Deforme olabilen blokların modellenmesi yoğun hesaplama ve analizleri gerektirmektedir. Bunun nedeni modellemenin, her deforme olabilen bloğun bir seri sonlu elemandan oluştuğu kabulüyle yapılmasıdır. Bununla beraber elde edilen sonuçlar elastik davranış özelliklerinin ve çatlak oluşumundan sonra meydana gelen progresif hasarların modellenmesinde çok faydalıdır.

### Mihrimah Sultan Camii Minaresinin Modellenmesi

Mihrimah Sultan Camii minaresinin sayısal modelinin yaratılmasında ve deprem davranışının modellenmesinde 3DEC yazılımı kullanılmıştır. 3DEC, sürekli olmayan sistemlerin 3 boyutlu modellenmesinde kullanılan, ayrık elemanlar yöntemi üzerine kurulu bir yazılımdır.

Minarenin modellenmesinde taş bloklar rijit kabul edilmiştir. Bu tercih analiz sürelerinde bu kabulde elde edilen azalma nedeniyle yapılmıştır. Doğrusal olmayan davranış beklenen harç yüzeylerde Mohr-Coulombakma yüzey kabulu yapılmıştır. Sistemin deformasyon özellikleri düğüm noktalarındaki normal ve kesme rijitliği parametreleri ile karakterize edilmiştir. Bu parametreler, deneylerden alınan bilgilerden elde edilmiş ve ölçülen doğal frekanslar ile kalibre edilmiştir. Doğrusal olmayan davranış; çekme mukavemeti, kohezyon ve sürtünme parametreleri kullanılarak karakterize edilmektedir.

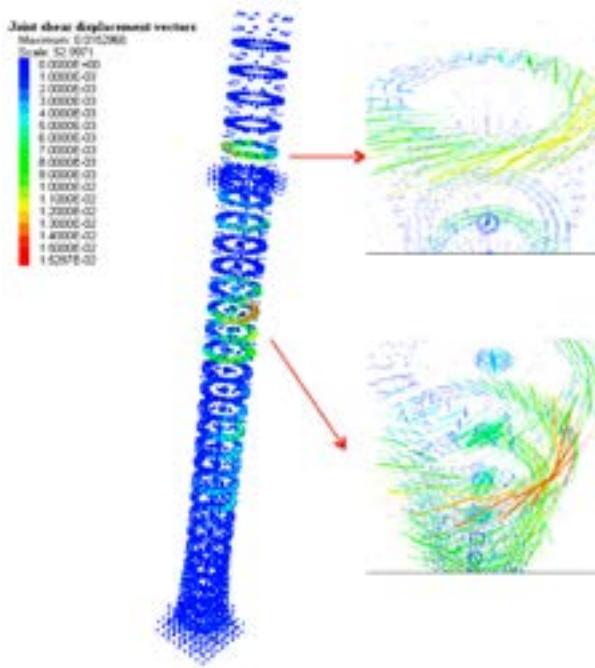
Statik analizde dinamik relaksasyon algoritması, dinamik analizde ise kütle oranlı Rayleigh sönümü ve zaman

tanım aralığında entegrasyon algoritması kullanılmıştır. Deprem hareketi, hız cinsinden olmak üzere, temeli oluşturan blokların merkezlerine üç yönlü olarak etki ettirilmiştir. Her analiz sırasında hız, deplasman, kesme gerilmesi, normal gerilme, kesme deplasmanları, kesme deplasmanları, zaman tanım aralığında kaydedilmektedir. Bunun yanı sıra bir kayıt süresince oluşmuş en büyük değerlerin kayıtlarında hasar oluşumlarının izlenmesi amacıyla kayıt edilmektedir.

Mihrimah Sultan Camii minaresinin modeli ilk olarak SAP2000 yazılımı kullanılarak yaratılmış ve çevrel titreşim deneyleri ile belirlenen doğal titreşim mod ve periyotlarına göre kalibre edilmiştir [1]. Bu model 3DEC ortamına adapte edilmiştir. Sönüm katsayısı 0.04, yoğunluk 2 ton/m<sup>3</sup> olarak kabul edilmiştir. 3DEC ortamında yapılan modellemede taş blokları bağlayan demir bağlantı çubukları da temsil edilmiştir.

### DEPREM YER HAREKETİNİN BELİRLENMESİ

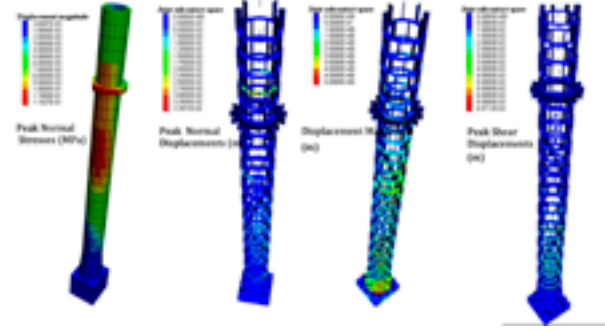
Doğrusal olmayan dinamik analizlerde 10 farklı deprem hareketi kullanılmıştır. Kullanılan kayıtların tümü, İstanbul yakınlarında meydana gelebilecek bir deprem sırasında, Mihrimah Sultan Camii'ni etkileyebilecek deprem tehlikesi seviyeleri ve şartları ile uyumludur. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde, 1999 Kocaeli depreminde alınmış, Yarımca ve Fatih kayıtları; Kuzey Anadolu Fayı'nın Marmara Denizi içinde kalan parçalarından iki tanesi üzerinde oluşabilecek beş adet depreme ait geniş bantlı deprem simülasyonları ve stokastik yöntem yardımıyla üretilmiş üç adet deprem simülasyonu sonucunda kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan yer hareketlerine ait tepki spektrumları Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 9. Düğüm noktalarındaki kesmeye bağlı yer değiştirme vektörleri, Marmara denizi içinde meydana gelen bir deprem için üretilen sentetik deprem yer hareketi altında.

## DOĞRUSAL OLMAYAN DİNAMİK ANALİZ

Minare modeli, 10 farklı deprem yer hareketi altında analiz edilerek, davranışı, oluşan deplasmanların ve gerilmelerin dağılımı yardımıyla incelenmiştir. Deformasyonların ve gerilmelerin minare boyunca üç ana bölgede yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu bölgeler, gövde ve küp arasındaki geçiş bölgesi, şerefenin hemen üstü ya da altı ve gövdenin şerefe altında kalan bölümünün yaklaşık olarak ortalarıdır. Yıkılma, yer hareketinin özelliklerine bağlı olarak bu üç bölgeden herhangi birinde meydana gelebilmektedir. Yıkılma mekanizması ve yer hareketi özellikleri arasındaki ilişki üzerine çalışmalarımız devam etmektedir. Şekil 7b'de sunulan göçme mekanizması ile Şekil 6'da sunulan, minarenin 1894 depreminden sonraki durumu arasındaki uyum dikkat çekicidir. Deprem hareketi altında minare gövdesini oluşturan bloklarda önemli miktarda dönme oluşabilmektedir (Şekil 9, deplasman vektörleri). Yarımca depremi altındaki analizler minarede en büyük deplasmanları ve gerilmeleri meydana getirmiştir. Yerden yaklaşık 13m yükseklikteki düğüm noktalarında normal deplasmanlar 6.5cm'e ulaşmıştır (Şekil 10). Şerefenin hemen üstünde kalan kısımda ise 3.2 cm'e ulaşan kesme deplasmanları hesaplanmıştır (Şekil 10). Elde edilen sonuçlar, göçmelerin, gövdenin alt yarısında normal deplasmanlara bağlı olarak, şerefe üstünde ise kesme sonucu oluştuğunu işaret etmektedir. Yapılan analizler, bloklar arasındaki bağlantı yüzey elemanlarında çekmeye bağlı olarak yaygın hasar oluştuğunu göstermiştir. Bu normal deplasmanlardan da rahatlıkla gözlemlenmiştir. Basınç gerilmeleri 5 MPa seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Modelin Yarımca kaydı (Kocaeli depremi) altındaki davranışı. Yerdeğiştirmeler, düğüm noktalarında kesmeye bağlı oluşan maksimum deplasmanlar, düğüm noktalarında oluşan maksimum normal gerilmeler ve maksimum normal yerdeğiştirme değerleri.



Şekil 11: Aya Sofya Müzesi (üst sıradaki fotoğraflar) ve Maltepe Camii (alt sıradaki fotoğraflar) minarelerine yerleştirilmekte olan deprem izleme ve kayıt sistemlerinin cihaz dağılımı. Maltepe Minaresi'nin fotoğrafları <http://wowturkey.com>'dan alınmıştır

Blokların birbirinden ayrılması ve buna bağlı olarak bağımsız/yarı bağımsız olarak hareket etmeleri, deplasmanlardan ve kesme deplasmanlarından rahatlıkla anlaşılabilir. Minareler gibi yüksek ve narin yapıların analizinde gerçek deprem kayıtlarının ve geniş-bantlı sentetik depremlerin kullanımı önemlidir. Model stokastik yöntemle üretilen deprem hareketleri altında neredeyse tümüyle elastik davranış sergilemiş, gerçek ve geniş-bantlı sentetik depremler altında ise ara yüzeylerde ise yaygın olarak hasar oluşmuştur.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu makalede Mihrimah Sultan Camii minaresinin modellenmesi ve deprem davranışının analizi konusunda yaptığımız çalışmalar özet olarak sunulmuştur. Deprem yer hareketinin ve yapısal özelliklerin, minarelerin deprem davranışı üzerindeki etkilerinin anlaşılması konusundaki araştırmalarımız sürmektedir.

İstanbul ve Türkiye'nin deprem tehlikesine maruz birçok bölgesinde, çok narin betonarme minareler inşa edilmiştir. Bu minarelerin tasarım ve inşa süreçleri çoğunlukla kontrolsüz bir şekilde gelişmekte ve sonuçlanmaktadır. Minareler özel yapılar olup, tasarımlarının, ülkemizde geçerli şartnameler kapsamında yapılması yeterli değildir. Bu yapıların deprem davranışlarının anlaşılmasına yönelik daha çok araştırmaya gereksinim vardır. Özellikle deprem bölgelerinde bulunan tarihi minarelerin korunması ve riskleri ile yeni minarelerin tasarım ve inşa esaslarının belirlenmesine yönelik ilke ve yönergelerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Minarelerin deprem davranışının anlaşılmasına yönelik araştırmalarımız kapsamında İstanbul'da iki minareye deprem izleme ve kayıt sistemleri yerleştirilmektedir. Bu minarelerden ilki Aya Sofya'nın Mimar Sinan tarafından yapılan minarelerinden birisi, diğeri de Maltepe Camii minarelerinden biridir. Maltepe Camii minareleri, incelediğimiz minareler içinde en yüksek ve narin olanıdır. Kurulmakta olan sistemlerin cihaz dağılımı Şekil 11'de sunulmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Ambraseys N., C. Finkel, (1989) The Marmara Sea Earthquake of 1509. *Terra Nova*, 2i.
- Clough R., J.Penzien, (1975) Dynamics of Structures. McGraw-Hill: U.S.A.
- Gurlitt C., (1999) İstanbul'un Mimari Sanatı, Translation: R. Kızıltan, Ankara.
- Kuşüzümü K.H., (2010) Yapım Teknikleri Açısından İstanbul Minareleri. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*. 1, 56-64.
- Müller-Wiener W., (1977) Bildlexikon Zur Topographie Istanbul, Deutsches Archäologisches Institute, Verlag Ernst Wasmuth Tübingen.
- Oliveira C.S., E. Çaktı, D. Stengel, M. (2012) Branco, Minaret Behaviour under Earthquake Loading: the Case of Historical Istanbul. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 41, 19-39.
- Parsons T., (2004) Recalculated probability of  $M \geq 7$  earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, B05304, doi:10.1029/2003JB002667.
- Sav M., (2013) Personal Communication.
- Sav M., K.H. Kuşüzümü, (2010) Restorasyon Çalışmaları Çerçevesinde Mihrimah Sultan Camii. *Vakıf Restorasyon Yıllığı*. 1, 45-55.
- Uluengin F., B. Uluengin, M B, Uluengin, (2001) Classical structural details in Ottoman monument architecture [in Turkish]. Istanbul, Turkey: Yem Publication.
- 3DEC Version 4.10: User's guide. Itasca Consulting Group; 2007.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarımız sırasında desteklerini esirgemeyen aşağıda kurum ve kişilere teşekkür ederiz:

- İstanbul Vakıflar 1. Bölge Müdürlüğü ve İstanbul Diyanet İşleri Müdürlüğü. Verdikleri onayla, minarelerde yapılan çalışmalarını mümkün kıldıkları için.
- ITASCA. Analizlerde kullanılan 3DEC yazılımı için sağladıkları destek nedeniyle.
- Murat Sav, İstanbul Vakıflar 1. Bölge Müdürlüğü. Mihrimah Sultan Camii'nde yaptığımız çalışmalar sırasındaki yardımları nedeniyle.
- Ahmet Korkmaz, Nafiz Kafadar ve Emre Özdemir. Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı. Minarelerde gerçekleştirilen çevrel titreşim deneylerindeki katkıları nedeniyle.
- Oktay Çırağ, Emrah Zorbacı ve Mehmet Vefa Bektaş. Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı. Mihrimah Sultan Camii minaresinde gerçekleştirilen ultrasonik testlerdeki katkıları nedeniyle.
- Devlet Planlama Teşkilatı. Çalışmalarımız sırasında kullandığımız enstrümanlara yaptıkları katkılar nedeniyle.
- Boğaziçi University, Instituto Superior Tecnico ve Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Çalışma süresince kurumlar arasında gerçekleştirilen çalışma ziyaretlerine yaptıkları katkılar nedeniyle.