

Dört Ayaklı Minare'nin modellenmesi ve yapısal analizi

Murat Arda UĞURLU¹, Sultan ERDEMLİ GÜNASLAN¹, Abdulhalim KARAŞİN^{*,1}

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

Makale Gönderme Tarihi: 17.03.2017

Makale Kabul Tarihi: 02.04.2017

Öz

Pek çok medeniyet Türkiye coğrafyasına çok sayıda anıtsal nitelikli kültürel ve mimari eserler olarak önemli yapılar bırakmışlardır. Diyarbakır şehir merkezinin Sur ilçesinde yer alan 16. yüzyılda inşa edilmiş Şeyh Mutahhar camii'nin Dört Ayaklı Minaresi de bunlardan biridir. Şüphesiz dört ayaklı minarenin alt bölümünü oluşturan birbirinden bağımsız dört narin ayağı ve üstlerindeki kare en kesitli rijit gövdesi yapının eşsiz olmasını sağlamaktadır. Sismik direnci zayıf narin bir tarihi yapının, yıllar içinde gelişen birkaç çatlak dışında, belirgin yapısal hasarların ortaya çıkmamış olmaması, Diyarbakır şehir merkezinde son 500 yılda önemli bir depremin meydana gelmemiş olduğunun işareti olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmanın amacı minarede bulunan sebebi henüz bilinmeyen yapısal çatlakların nedenini araştırmak ve paket programlar yardımıyla sütunlar ve zemin arasındaki ilişkiyi de göz önünde bulundurarak minarenin makro modeli oluşturulmuştur. Öte yandan zemin hareketleri ve malzeme özellikleri de hesaba katılmış minarenin analitik modeline üç boyutta ektilip olası etkiler de tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dört Ayaklı Minare; Tarihsel miras, Analitik model.

Giriş

Minareler camilerin yanlarındaki uzun, silindirik yapılardır ve genellikle cami ile fiziksel bir bağlantıları vardır. Minarelerin asıl amaçları müezzinlere ezan okumaları için yüksek bir platform sağlamaktır. Bu yüzden genellikle camiden yüksek oldukları kolaylıkla gözlenebilir. Aynı zamanda cami ile fiziksel bağlantısı olduğunda camide bir havalandırma etkisi olduğu da söylenebilir (Najmul Imam,

2003). Minareler, yapılış zamanlarına ve yapıldıkları bölgelere göre farklı mimari tarzlara sahip Şekil 1’de yer alan örnekleri gözlemlemek mümkündür. Günümüzdeki, havalandırma ve ses teknolojilerindeki gelişimler minarelerin bu temel amaçlı kullanımlarını azaltmış olsa da insanlar genel olarak minareleri camilerin vazgeçilmez, geleneksel bir parçası olarak görmektedirler.



Şekil 1. Farklı zaman ve bölgelerde yapılmış minare örnekleri; A) Sultan Ahmet Cami, 1616, İstanbul, Türkiye, B) Huisheng Cami Minaresi, 8. yy., Guangzhou, Çin, C) Taj Mahal minaresi, 1648, Agra, Hindistan, D) Kaiouran Ulu Cami minaresi, 670 (ayakta kalmış en eski minare), Kaiouran, Tunus, E) Muhtar Cami minaresi, 1914, Tarım, Yemen.

Seyh Mutahhar cami’ye ait olan Şekil 2’de görülen Dört Ayaklı minarenin yazıtlarından okunduğu üzere Akkoyunlu hükümdarı Sultan Kasım tarafından hicri 906 (miladi 1500 yılında inşa ettirilmiştir. Cami adını inşası sırasında yapılacağı arazi üzerinde mezarı bulunan Şeyh Mutahhar’dan almıştır. Nebii cami ve Seman Köşkü (Gazi Köşkü) Diyarbakır il sınırları içinde Akkoyunlu mimarisine örnek verilebilecek diğer yapılardır. Bu yapı Diyarbakır Ulu Camii, On gözlü köprü ve 52 Burcu olan Diyarbakır surları ile birlikte bu kentin en önemli sembollerinden birisidir. Gerek anıtsal nitelikteki diğer tarihi yapılar gerekse söz konusu semboller ile ilgili çok sayıda akademik çalışma yapılmıştır (Parla, 2005; Kavak vd., 2011; Halifeoğlu vd., 2011; Aykal vd., 2011; Karasin ve Işık, 2016). Ancak bu yapı ile ilgili çok az sayıda yayın mevcuttur.

Dört Ayaklı Minare’ye ismini veren ünlü ayakları, yapının alt kısmında narin silindirik bazalt taşlardır. Yerel halk bu sütunların İslam’ın dört ana mezhebini simgelediğine inanır. Minare camiden ayrı bir yapıdır ve yıllar

içinde doğan şehirleşme kaynaklı geniş yol ihtiyacı avlunun küçülmesine sebep olmuş ve minareyi dışarıda bırakmıştır. Minarenin hemen yanından geçen yolda oluşan ciddi trafik yükünün titreşimlere sebep olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 2. Dört Ayaklı Minare

Minarenin sütunlarının üzerindeki lentoların ikisinde oluşan çatlaklar dışında önemli bir yapısal hasar oluşmamıştır (Şekil 3). Yıllar boyunca oluşan depremlerden sonra ayakta kalan tarihi yapılar doğal sismograf görevi görmektedirler ve Dört Ayaklı minare bunun en

önemli örneklerinden biridir (Gülkan ve Wasti, 2009). Daha önce de minareyi yer hareketleriyle ve devrilme davranışını inceleyen çalışmalar yapılmıştır (Kazaz vd., 2009; Bedirhanoglu ve İrfanoğlu, 2009).



Şekil 3. Dört Ayaklı Minarede görülen hasarlar

Literatürde tarihi yığma yapılar hakkında (Mele, 2003; Betti ve Vignoli, 2008) analitik modeller önerilmiş, kule tipi tarihi yığma yapıların mekanik davranışları da incelenmiştir (Okuyucu ve Aydın, 2010). Tarihi yapıların geometrik zorlukları, iç yapılarındaki malzeme ve yığma yapıların çekme kuvvetleri taşımamalarına bağlı olarak ölü yük aktarım mekanizmalarını belirlemek oldukça güçtür (Keypour vd., 2007). Bununla beraber tarihi minareler hakkında (Doğangün vd., 2006; Bayraktar vd., 2007) gibi çalışmalarda konu aldıkları minarelerin analitik modelleri tasarlanmış ve sismik analizleri yapılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Minarenin Geometrisi ve Yapısal Özellikleri
Minare 3m'ye, 2.5m kenarlarla kareye yakın bir plana sahiptir ve üç bölümden oluşmaktadır: sütunlar, gövde ve balkon. Minarenin konumu dolayısıyla temel için kazı, sondaj gibi çalışmalar yapılamamakta ve temel yapısı bilinmemektedir. Yapının alt kısmında bulunan dört narin bazalt sütunun 0.48m ile 0.58m

arasında çapları vardır. Sütunların boyları 2m civarındadır. Kuzey yönündeki sütunda sütun en kesitinde bir çatlak vardır ancak çatlağın yapısal bir sebeple oluştuğuna dair bir emare yoktur. Gövde bölümü genel olarak bazalt taşlardan inşa edilmiş olup sütunların üzerine yerleşmiş balkona kadar uzanan 13m'lik kısımdan oluşmaktadır. Bu bölüm minarenin giriş kapısının, merdivenlerin ve pencerelerin bulunduğu kısımdır. Gövdedeki duvar kalınlığı 0.53m civarındadır. Sütunların hemen üzerindeki iki sıra lento üstteki gövdeden en kesit olarak daha büyüktür. Sütunların temiz açıklıklarında, iki sıra lento arasında fiziksel bir bağlantı bulunmamaktadır. Bu boşluğun amacı gövdedeki ölü yükleri sütunlara aksel olarak etkitebilmektir. Güneydoğu ve kuzeydoğu cephelerindeki ilk sıra lentolarda, lento merkezine yakın dikey yönde 2~3mm'lik çatlaklar vardır. Bu çatlakların yapısal davranış kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Balkon bölgesinin enkesiti ise gövde enkesitinden daha küçük ve silindirik bir yapıda olup 5m uzunluğundadır. Balkon gövdenin üstünde ise 4m uzunluğunda konik, kurşun kaplama bir külâh bulunmaktadır.

Analitik Model

Yığılma malzeme modelinin nonlineer davranışını belirlemek kolay olmadığı için tarihi yapıların sismik davranışlarının ve yapı zemin etkileşimlerinin analizlerini yapmak oldukça zor bir iştir. Dört ayaklı minare modellenirken iki farklı sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Diyarbakır’da bulunan tarihi yapıların büyük çoğunluğunun ana malzemesi olarak bazaltın kullanıldığı bilinen bir gerçektir (Yıldız vd., 2011). Bununla birlikte malzemelerin temel fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemede tarihi yapılardan numune almak oldukça zordur. Karakuş ve Akatay (2013), Çizelge 1’de verilen,

P-dalgası hızı ölçümleri yapılarak bazaltın özkütlesinin, gözenekliliğinin, Brezilya çekme dayanımının, elastisite modülünün ve Poisson oranının saptanmasına yardımcı olan bir model sunmuşlardır. Ercin Kahveci ve Kadayıfçı (2013), bazaltın tek eksenli basıç dayanımını 86.21 MPa olarak ölçmüşlerdir. Bu değer Çizelge 1’deki diğer parametreleri bulmak için regresyon denklemlerinde kullanılmıştır. Yığılma yapıların malzeme modelleri yapının analitik modelini oluşturmada kritik bir rol oynamaktadır. Kullanılan malzeme modeli için Uğurlu ve Karasin (2016)’in, seçtiği malzeme modeli örnek alınmıştır.

Tablo 1. P-dalgası hızına bağlı olarak bazaltın fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki ($\sigma_c=86.2114\text{MPa}$ için)

Parametreler	Regressyon Denklemleri	$\sigma_c=86.2114\text{MPa}$ için
Özkütle (g/cm^3)	$\rho=0.0003098V_p+1.0058$	2.5379
Gözeneklilik (%)	$n=17.911-0.002933V_p$	3.4062
Brezilya Çekme Dayanımı (MPa)	$\sigma_{tb}=0.003078V_p-7.873$	7.3490
Tek Eksenli Basınc Dayanımı (MPa)	$\sigma_c=0.03467V_p-85.246$	86.2114
Elastisite Modülü (GPa)	$E_t=0.01286V_p-32.8773$	30.7207
Poisson Oranı	$\nu_s=0.4802-0.00006814 V_p$	0.1432

SAP 2000 Analitik Modeli

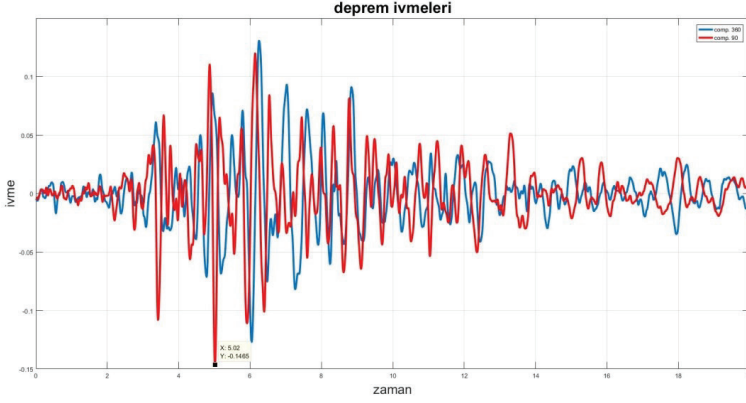
Dört Ayaklı minarenin doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri sonlu eleman programı SAP 2000’de gerçekleştirilmiştir. SAP 2000’de kullanılan zaman tanım alanı analizleri İbrahimregovic ve Wilson (1989) tarafından geliştirilen hızlı doğrusal olmayan analiz (FNA) metodunun bir uzantısıdır. Metot özellikle sınırlı sayıda önceden tanımlanmış doğrusal olmayan elemanları olan lineer elastik yapı sistemleri için oldukça etkilidir. Metodun kısa bir tanımından bahsetmek gerekirse, rastgele yüklere maruz kalan daha önceden tanımlanmış doğrusal olmayan bağlantı/destek elemanlı

doğrusal elastik yapıların dinamik denge denklemleri şöyle yazılabilir.

$$\mathbf{K}_L \mathbf{u}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{r} \quad (1)$$

burada \mathbf{K}_L doğrusal elastik elemanların rijitlik matrisidir; \mathbf{C} nisbi sönümlenme matrisidir; \mathbf{M} diyagonal kütle matrisidir; \mathbf{r}_N is bağlantı/destek elemanlarındaki doğrusal olmayan serbestlik derecelerinden gelen yüklerin vektörüdür; \mathbf{u} , $\dot{\mathbf{u}}$, ve $\ddot{\mathbf{u}}$ sırasıyla yapının yer değiştirmeleri, hızları ve ivmeleridir; ve \mathbf{r} uygulanan yüklerdir. Dört ayaklı minarenin analitik modeli, sütunlar ve lentolar hariç olmak üzere, yapının aslından daha basit bir geometriye sahiptir.

Dört Ayaklı Minare'nin modellenmesi ve yapısal analizi



Şekil 4. 90 ve 360 derece doğrultularındaki deprem ivmeleri

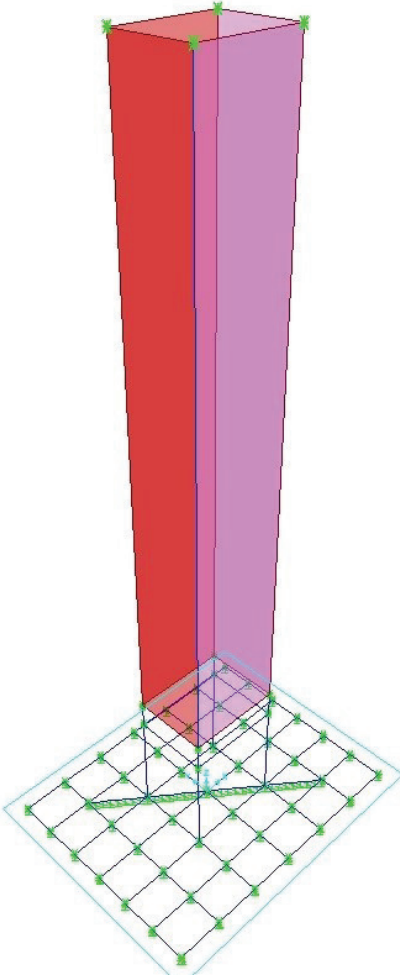
Dört ayaklı minarenin analitik modelinin analizi için kullanılan deprem kaydı Kazaz vd. (2009)'nin çalışmalarında seçtiği 2 Mayıs 1983'de Coalinga depreminde kaydedilmiştir. Deprem richter ölçeğinde 6.3 büyüklüğündedir. Fay mekanizması terstir. Depremi iki yatay bir düşey yöndeki ivme bileşenleri Parkfield, CA – Cholame 5W istasyonunda kaydedilmiştir. Analizlerde depremin iki yatay bileşeni x- ve z-yönlerinde etkilmiş, yer çekimi negatif y-yönünde kabul edilmiştir. Yapı sonlu elemanlar yöntemi ile SAP 2000 paket programı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu tip uygulamalarda, sistem sonlu elemana bölünerek elemanların birleşim noktaları düşey yaylarla tutulmuştur. Temelleri, yükleri aktarmak için yapısal elemanlara bağlı düşey ve/veya dönen yaylar olarak tanımlanması ile daha gerçekçi yapı zemin modellemesi sağlanmıştır. Bu paket programda Şekil 4'de 90 ve 360 derece doğrultularındaki deprem ivmeleri uygulanmıştır.

Seismostruct Analitik Modeli

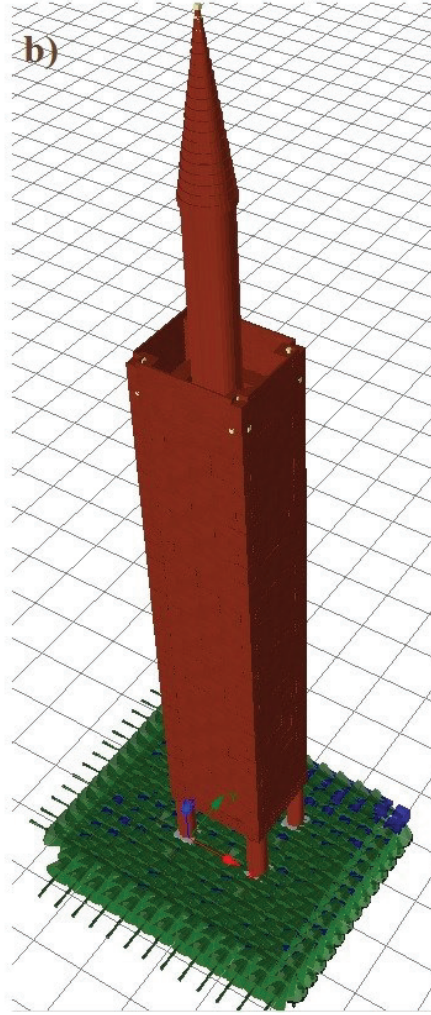
Statik ve dinamik yükler altında geometrik nonlineerliklerini ve de malzeme inelastisitesini hesaba katarak sonlu elemanlar analizi yapan bu paket program uzay çerçevelerin davranışını belirleme kapasitesine sahiptir.

Sap2000 ve Seismostruct programları ile Şekil 5'te gösterilen Dört Ayaklı minarenin analitik modeli oluşturulmuş, dinamik ve statik yükler altındaki davranışı analiz edilmiştir. Malzeme modeli olarak SAP 2000 modelinde de kullanılan malzeme modeli kullanılmıştır. Lentolarda meydana gelen kuvvetleri değerlendirebilmek için bu kirişler sonlu elemanlara ayrılmıştır. Sütunların hemen üzerindeki ilk iki sıra lento arasında temiz açıklıklarında, fiziksel bağlantıları bulunmadığı için ilk sıra lentolarda neredeyse kesme kuvveti oluşmamıştır.

a)



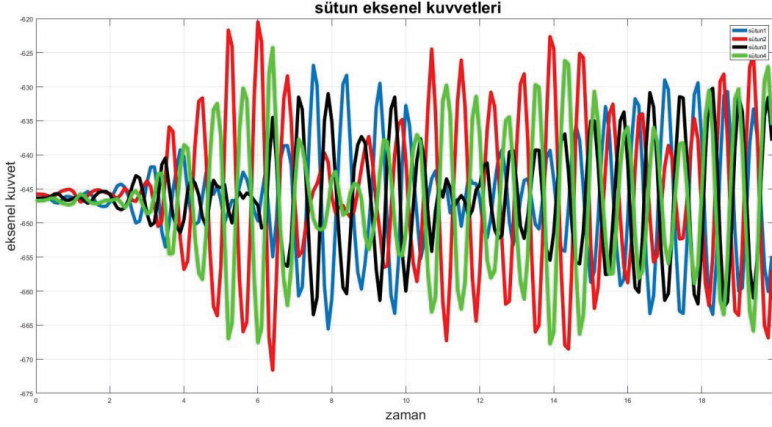
b)



Şekil 5. Dört Ayaklı minare sonlu eleman modelleri a) Sap2000, b) Seismostruct

Şekil 6 de sismik yüklemde her dört sütunun farklı aksenal yüklerle maruz kalması bu yapının oturduğu zeminde farklı oturmalara meydana gelme ihtimalini artırmaktadır. Bununla birlikte

motorlu taşıtların meydana getirdiği ek trafik yüklerin sebep olduğu titreşimler de farklı oturmalardan kaynaklı yapısal hasarlara sebep olma potansiyeli mevcuttur.



Şekil 6. Sütun kesitlerine göre meydana gelen eksenel kuvvetler

Sonuçlar ve Tartışma

Yapılan sonlu eleman analizlerinde sütunların hemen üstünde yer alan lentoların açıklık bölgesinde eksenel çekme kuvvetlerinin yüksek, kesme kuvvetlerinin ise çok düşük değerler ile ortaya çıkmasından bu elemanların eksenel çekme amacı ile tasarlandığı anlaşılmaktadır. Bu lentoların çalışma mekanizması yapının konstrüktif olarak açılmasına karşı mukavemet göstermesi nedeni ile yapı stabilitesine önemli katkı sunmaktadır. Bununla birlikte, planda simetrik olan bu yapıda sütunların farklı kesit alanlarına sahip olmaları ve tasarım sırasında hesaba katılmayan motorlu araçların sebep olduğu titreşimler ile çok katlı yapılaşmaların günümüz kent koşulları ile kısmi oturmalar gibi yapı stabilitesini olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir.

Sismik direnci düşük olan bu tip yapıların en önemli örneklerden biri olan Dört Ayaklı minarenin yaklaşık 500 yıl ayakta kalabilmiş olması bir mühendislik harikası ünvanını hak etmektedir. Diyarbakır'ın tarihi dokusunun nadide örneklerinden biri olan bu tarihi miras niteliğindeki yapının geleceğe güvenle taşınması büyük önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Dicle Üniversitesi DÜBAP MÜHENDİSLİK.15.009 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Aykal, D., Gümüş, B., Ünver, R., Murt, Ö., (2011). An Approach to the Evaluation of Re-Functioned Historical Buildings in View of Natural Lighting: A Case Study in Diyarbakir Turkey. *Light and Engineering*, 19(2), 64.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A. C., Türker, T. (2007). Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Güvenliklerinin Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi. *Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu 1*, pp. 415-428, Ankara, Türkiye.
- Bedirhanoğlu, İ., İrfanoğlu, A., (2009). Diyarbakır Şeyh Mutaahhar Camii dört ayaklı minaresinin deprem yer hareketine karşı davranışı. *Uluslararası Katılımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2*, October 15-17, pp. 223-234, Diyarbakır, Turkey.
- Betti, M., Vignoli, A., (2008). Assessment of seismic resistance of a basilica-type church under earthquake loading: Modelling and analysis. *Advances in Engineering Software*, 39(4), 258-283.

- Doğangün, A., Tuluk, Ö. İ., Livaoğlu, R., Acar, R. (2006). Traditional Turkish minarets on the basis of architectural and engineering concepts. In *Proceedings of the first international conference on restoration of heritage masonry structures* (pp. 34-1).
- Erçin Kahveci, A., Kadayıfçı, A., (2013). Diyarbakır yöresi bazalt taşının yapısal özelliklerinin incelenmesi, *SDU International Journal of Technological Science*, 5(3), 56-69.
- Gülkan, P., ve Wasti, S. T., (2009). Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic structures. *Structural Longevity*, 1(2), 111-134.
- Halifeoğlu, F. M., Toprak, Z. F., Kavak, O., (2011) Tarihi Diyarbakır köprülerinin mimari, hidrolojik ve jeolojik açıdan değerlendirilmesi. *II. Su Yapıları Sempozyumu* - 16-18 Eylül 2011, Diyarbakır
- Ibrahimbegovic, A., Wilson, E. L. (1989). Simple numerical algorithms for the mode superposition analysis of linear structural systems with non-proportional damping. *Computers & Structures*, Vol. 33(2), pp. 523-531.
- Karakuş, A., Akatay, M. (2013). Determination of basic physical and mechanical properties of basaltic rocks from P-wave velocity. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 28(4), 342-353.
- Karasin, I. B., Isik, E. (2016). Protection of Ten-Eyed Bridge in Diyarbakır. *Budownictwo i Architektura*, 15(1), 87-94.
- Kavak, O., Dalkılıç, N., Toprak, V., (2011). Geological and Architectural Investigation of Reused Rock Columns in the Great Mosque in Diyarbakir Old City (Turkey). *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 11(2), 9-22.
- Kazaz, İ., Akansel, V., Gülkan, P., (2009) Deprem Dayanırılığı İçin Eşsiz Bir Örnek: Diyarbakır Şeyh Mutahhar Camisinin Dört Ayaklı Minaresi, *Uluslararası Katımlı Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu-2*: 15-17 Ekim 2009 Diyarbakır (s. 495-506).
- Keypour, H., Fahjan, Y. M., Bayraktar, A., (2007). Analysis and strengthening methods for historical masonry structures. In *5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, Tahrán, Iran.
- Mele, E., De Luca, A., Giordano, A., (2003). Modelling and analysis of a basilica under earthquake loading. *Journal of cultural Heritage*, Vol. 4(4), 355-367.
- Najmul Imam, S. M. (2003). Ventilation in a Mosque- An Additional Purpose the Minarets May Serve. *The 7th International Conference – Healthy Buildings*, Singapore.
- Okuyucu, D., Aydın, A. C., (2010). An Evaluation On Erzurum Double Minaret Madrasah By Structural Engineering Perspective. *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. 13(1), pp. 28-44.
- Parla, C., (2005). Diyarbakir surlari ve kent tarihi. *Metu Journal of the Faculty of Architecture*, 22(1), 57-84.
- Uğurlu, M.A., Karasin, A., (2016). Evaluation of the Structural Damages of the Four-Legged Minaret. *12th International Congress on Advances in Civil Engineering*, İstanbul, Türkiye.
- Yıldız, S., Işık, N., Keleştemur, O., (2008). Diyarbakır-Karacadağ Bazalt Taşlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Science and Eng. J of Fırat Univ.* 20 (4), 617-626.

Modelling and structural analysis of the Four-legged minaret

Extended abstract

Plenty of civilizations legated large number of architectural and culturally significant structures in territory of Turkey. The Seikh Mutahhar Mosque which places the four-legged minaret was built by an unknown architecture during the Akkoyunlu period in AD 1500. The main function of minarets, usually built cylindrically to increase the acoustic performance with structural physiology, is to provide a platform for muezzin to call out adhan.

The lower part of the minaret is constituted by four slender basaltic pillars and pillar caps with different radiuses from 0.48 m to 0.58 m. The height of the pillars is about 2.0 m. The body section of the minaret settled to pillars with a height of 13 m to the balcony level, is made of basalt stone in general. Nevertheless, without question the fourindependent basaltic cylindrical slender pillar on the lower section of the structure is the main reason of uniqueness of the four-legged minaret. Local people believe that pillars symbolize four main denominations of Sunni-Islam.

Minaret is a separate, different structure and is not connected to the body of the mosque. Nowadays because of necessity of broad roads due to urbanization, mosque courtyard was shrunk and minaret stayed outside of the courtyard. There is significant traffic load on the road which pass next to minaret.

The strong earthquakes in the East Anatolian Fault zone such as Lice earthquake with Magnitude of 6.6 which epicenter located 75 km northeast of Diyarbakar city center in 1975 have damage effects on such structures. Unfortunately, because of there is no seismic data is available for Lice earthquake, Kazaz et al. point out that a large-scale earthquake which has ability to damage the minaret without causing its collapse was executed for determining the seismic characteristics of the minaret using finite element package. On the other hand, Gülkan and Wasti stated that historic buildings which survived earthquakes are crude seismographs and four legged minaret is a vital example for that. Extreme possibilities about fixation of bottom ends of pillars of the minaret was considered. Two types of dynamic motion of the minaret as the bottom ends of the pillars fixed perfectly or not. Also, it has been stated that long period pulses are more dangerous for such historical structure.

The purpose of this study is to determine reasons of existing idiopathic structural damages of minaret which stands nearly 500 years, using software suites to build a macro model includes soil structure interaction between ground and pillars. Ground motions applied to three-dimensional analytical model of the minaret which takes into account material properties.

Keywords: *The four-legged minaret, Historical structures, Analytical model.*