Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 32:1 (2017) 265-282

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Ayarlı kütle sönümleyici yerleştirilmiş betonarme yüksek minarelerin dinamik analizi

Recep Kadir Pekgökgöz*, Gökçe Taş
Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 63300, Şanlıurfa, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Betonarme yüksek minarelerin rüzgâr yüklerine karşı dinamik davranışlarının iyileştirilmesi
- Ayarlı kütle sönümleyicilerin tasarımı
- Yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle zaman tanım alanında dinamik analizi

Makale Bilgileri
Geliş: 26.01.2016
Kabul: 10.09.2016

DOI:
10.17341/gazimmfd.300618

Anahtar Kelimeler:
Betonarme yüksek minareler,
kasırga,
deprem,
ayarlı kütle sönümleyici

ÖZET

Dünyanın farklı bölgelerinde şiddetli rüzgârlar ve depremler nedeniyle minareler yıkılmakta, buna bağlı olarak can ve mal kayıpları oluşmaktadır. Bu çalışmada betonarme yüksek bir minare ile bu minarenin Ayarlı Kütle Sönümleyici (AKS) yerleştirilmiş halinin Rita kasırgasından elde edilen rüzgâr kuvvetleri, harmonik yer hareketi ve seçilen deprem hareketleri etkisi altında dinamik davranışları araştırılmıştır. Zaman tanım alanında çözümlemeler yapılarak, bulgulara göre minarelerin yapısal davranışları karşılaştırılmıştır. AKS yerleştirilmiş minarenin kasırga etkisi altında sönüm değerinin normal minareye göre yaklaşık olarak 2,4 kat büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum doğal olarak sönümleyici yerleştirilmiş minarenin yatay yer değiştirmeler gibi yapısal tepkilerinin daha düşük düzeyde kalmasını netice vermiştir. Çözümleme sonuçları ayrıca AKS'lerin minarelerin harmonik yer hareketleri altındaki yatay yer değiştirme genliklerini azaltmada ve titreşimin daha çabuk sönümlenmesinde oldukça etkili olduklarını ortaya koymuştur. Bulgular betonarme yüksek minareler için AKS'lerin deprem hareketlerine karşı genelleştirilebilecek bir olumlu katkılarından söz edilemeyeceğini göstermiştir.

Dynamic analysis of RC high minarets with tuned mass damper

H I G H L I G H T S

- Improvement of dynamic behaviour of reinforced concrete high minarets against wind loads
- Design of tuned mass dampers
- Dynamic time history analysis of structures with the finite element method

Article Info
Received: 26.01.2016
Accepted: 10.09.2016

DOI:
10.17341/gazimmfd.300618

Keywords:
Reinforced concrete high minarets,
hurricane,
earthquake,
tuned mass damper

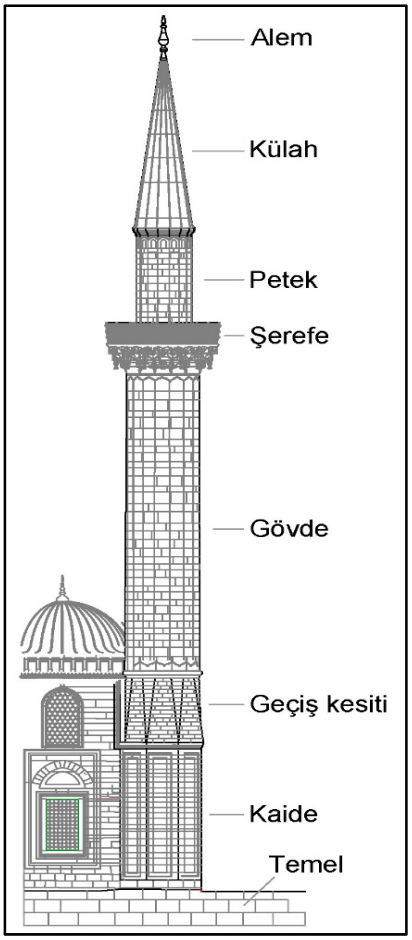
ABSTRACT

Minarets are collapsing at different locations of the world due to strong winds and earthquakes, and, thus, deaths and losses of property are occurring. In this study, the dynamic behavior of a reinforced concrete high minaret and a form of this minaret with Tuned Mass Damper (TMD) placed were investigated under the effect of wind forces obtained from the Rita Hurricane, harmonic ground motion and selected earthquake motions. Analyses depending the time definition area were made on the minaret models and according to the results obtained from analysis, the structural behaviours of minarets were compared. It was found that the damping ratio of the minaret with TMD is greater 2.4 times than that of the normal minaret. This condition resulted naturally with the smaller structural response values such as lateral displacements for minaret with TMD compared to the normal minaret. The analysis results have also shown that the TMD is very effective to decrease the amplitude of lateral displacements and dissipate the vibrations quickly of the minarets under effect of harmonic ground motion. The results have revealed that there is no general positive effect of the TMS's on the response of minarets againts earthquake motions.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: recepkadir@harran.edu.tr / Tel: +90 414 318 3476-3784

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel yapılara göre düşük sönüm özelliklerine sahip esnek ve narin yapıların (kule, baca ve gökdelenler gibi) inşasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum mühendisleri bu tür yapıların dış etkilerin oluşturduğu titreşimlere karşı davranışlarını kontrol etmek için etkili ve ekonomik metotlar araştırmaya sevk etmiştir [1]. Koruma yönteminin verimi dış titreşimlere karşı korunan yapıda, korunmayan özdeş olanına göre katlarda oluşturduğu mutlak ivmelerin yapı elemanlarında ve yapı içerisinde bulunan cihazlarda sebep olduğu hasar seviyeleri olarak tanımlanır [2]. Oluşan bu hasar ne kadar küçük oranlarda kalırsa koruma yönteminin başarılı olduğu ifade edilir. AKS esas itibariyle, ana yapıya yay ve sönümleyici vasıtasıyla birleştirilen ilave bir kütledir. Yapıya yerleştirilen bu ilave kütlenin doğal frekansı, yaklaşık olarak yapının doğal frekansına yakındır. Dolayısıyla, yapı ve ilave kütle arasında rezonans anında, aralarında faz farkı bulunan büyük göreceli yer değiştirmeler meydana gelir. Bu zıt yönlü yer değiştirmeler sonucunda oluşan sönüm etkisiyle yapının titreşimleri azalır. Frahm'ın 1909 yılında *dinamik titreşim sönümleyici* olarak adlandırdığı titreşim kontrol aletini keşfetmesiyle, ilave kütleden yararlanarak titreşimin kontrol edilmesi kavramı ortaya çıkmıştır. Günümüzde birçok yüksek yapıya rüzgâr ve orta büyüklükteki depremlere karşı AKS'lerin çeşitli türleri yerleştirilmiştir. AKS'ler konusunda kayda değer ilk çalışmalardan biri Vickery ve Davenport tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar Sydney Kulesi (Avustralya) üzerinde kütle sönümleyicili ve kütle sönümleyicisiz model deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Ana yapı ve sönümleyici ilave kütleden oluşan sistemi iki serbestlik dereceli bir sistem olarak modelleyip, *beyaz gürültü* etkisi altında inceleyerek, ilave kütle için optimum parametreleri belirlemeye yönelik bir yöntem geliştirmişlerdir [3]. Tanaka ve Mak [4] rastgele değişen dinamik bir etkinin özelliklerinin sönümleyici kütlenin performansına etkisini fark etmiş ve *sınırlandırılmış beyaz gürültü* hareketini rüzgâr hareketine uyarlayarak AKS için optimum tasarım parametrelerini belirlemişlerdir. Maurizio vd. [5] daha iyi bir kontrol performansı sağlamak amacıyla, geleneksel AKS'lere göre AKS'nin kütlesini ana yapının kütlesine göre oranını (kütle oranı) daha büyük olmasının kontrol edilmek istenilen yapının üzerindeki etkilerini araştırmıştır. AKS'lerin performansını artırmak amacıyla AKS'nin optimum parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar günümüze kadar devem etmektedir. Sladek ve Klinger [6] El Centro depremi etkisi altında çok serbestlik dereceli bir sistemin davranışına AKS'nin etkisini incelemiş ve dış etki sinüzoidal (harmonik) olmaktan uzaklaştıkça AKS'nin davranışa olan olumlu etkisinin de (sönüm etkisinin) azaldığını belirlemişlerdir. Villaverde ve Koyama [7] AKS yerleştirilmiş yapıyı rezonansa getiren yer hareketlerinde AKS etkisi ile tepkinin büyük ölçüde azaldığını, yer hareketinin hakim frekansının yapının doğal frekansından uzak olması durumunda ise AKS'nin etkisinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Sadek ve arkadaşları [8] çok serbestlik dereceli bir sistemin özel bir modunu (çoğunlukla birinci modunu) kontrol etmek için yapının tek serbestlik dereceli bir sistem gibi ele alınabileceğini ve AKS'nin optimum parametrelerinin bu sisteme göre belirlenebileceğini önermişlerdir. Brownjohn ve arkadaşları [9] AKS yerleştirilmiş 183 m yüksekliğinde bir betonarme bacanın rüzgar etkileri altında davranışının gözlemlenmesi konusunda bir çalışma yapmışlardır. Şiddetli rüzgarlar esnasında kütle sönümleyici sayesinde yapının sönümünde hemen devreye giren artışlar gözlemleyip, böylece yerleştirilmiş olan AKS'nin kendisinden beklenen işlevi başarıyla yerine getirdiğini görmüşlerdir. Minareler dünyanın değişik bölgelerinde farklı yüksekliklerde ve farklı malzemelerle (betonarme, yığma ve ahşap) inşa edilmektedir. Minareler eskiden beri camilerin ayrılmaz bir parçası olarak inşa edilen ve müezzin tarafından ezan vasıtasıyla insanları ibadete çağırmak için kullanılan kule tipi narin yapılardır [10]. Günümüzde ses sistemlerinin kullanılması sayesinde minareler artık müezzinler tarafından kullanılmamakta, ancak camilerin vazgeçilmez bir öğesi olarak yapılmaya devam edilmektedir [11]. Tipik bir Osmanlı minaresinin bölümleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Minarelerin içerisinde genellikle spiral şeklinde yükselen bir merdiven de bulunur.



Şekil 1. Tipik bir Osmanlı minaresinin bölümleri (The sections of the typical Ottoman minaret)

Minareler inşa edildikleri bölgelere ve onları inşa eden ulusların kültürlerine bağlı olarak farklı geometrik biçimlere sahiptirler. Ulusların birbirleriyle olan ilişkileri minarelerin mimari özelliklerini de etkilemiştir. Genel olarak Türk, Arap, İran, Hint ve Mısır minare mimarilerinden bahsedilebilir. Türk minareleri Selçuklu ve Osmanlı minareleri olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Selçuklu minareleri genellikle kalın gövdeli, kısa boylu, petek kısmı gövde kısmına göre daha kısadır. Bunlar çoğunlukla caminin giriş bölümündeki taç kapının her iki yanında tuğladan ikiz olarak yapılmıştır. Osmanlı minarelerinde petek ve külah kısmı diğer minare örneklerine göre uzundur. Bu sebepten dolayı daha uzun ve zarif görünüme sahiptirler. Osmanlı camilerinde minarelerin sayısı altı adede kadar çıkabilmektedir. Tek minareler caminin sağ tarafında inşa edilirler. Arap minareleri dört köşeli taban üzerine inşa edilmiş, köşeli kule tipi yapılardır. İran minareleri çoğunlukla silindirik bir gövdeye sahiptir. Bu minarelerin silindirik gövdeleri ile Türk minarelerinin silindirik gövdeleri arasında biçim ve düzenleme açısından farklılıklar vardır. Mısır minareleri ise çoğunlukla altta kare bölüm, ortada sekizgen kısım ve üstte kubbe kısmından oluşur. Bölümlerin geçiş kısımları genellikle süslüdür. Minarelerin temelleri her tür yapıda olduğu gibi zemin içerisinde kaldığından dışarıdan gözükmezler. Temel derinliği minarelerin ağırlığına ve zeminin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Tarihi minarelerde temel büyük taş bloklardan kademeli olarak yapılmıştır. Bu kademelerin sayısı iki veya daha fazla olabilir. Örneğin Selimiye camisinin minaresi külah ve alem dahil 85 m yüksekliğinde iken, temeli 22,73 m derinliğindedir [12]. Betonarme olarak inşa edilen minarelerin temelleri de tarihi minarelere benzer şekilde derin olarak yapılırlar. Yapısı ve dinamik davranışları yüksek minarelere benzeyen yüksek betonarme baca ve kulelerin temel sistemlerinde plak radye temelle birlikte kazık temellerin kullanıldığı bilinmektedir [13]. Günümüzde yüksek minarelerin temellerinin de baca ve kulelerde olduğu gibi betonarme kazık temelle desteklenmiş radye temel şekilde inşa edilmesi gerektiğini vurgulayan çalışmalar bulunmaktadır [14]. Günümüzde dünyanın çeşitli ülkelerinde, özellikle görkemli camilerle birlikte betonarme yüksek minareler de inşa edilmektedir. Şu anda dünyanın en yüksek minaresi 210 m yüksekliği ile Fas'ın Casablanca şehrinde bulunan II. Hasan Camisine ait minaredir. Yüksek bacalar ve kuleler gibi narin yapılar olan minareler, deprem ve şiddetli rüzgâr gibi yatay yüklere karşı genel olarak zayıf bir dayanım göstermektedirler. Dünyada ve Türkiye'de birçok minarenin depremlerde ve şiddetli rüzgarlarda yıkıldığı ve bu nedenle can ve mal kayıpları yaşandığı bilinmektedir [15]. Minarelerin kaide ve gövde kısımları arasında ters külah şeklinde bir geçiş bölümü mevcuttur. Minarelerin gövde kısımlarının içerisinde yukarıda da belirtilmiş olduğu gibi spiral merdiven bulunur. Bu yüzden gövde kısımlarının kesiti, petek kısmının kesitine göre daha büyüktür. Petek kısmının içerisinde merdiven yoktur ve ayrıca peteğin şerefe ile birleştiği bölümde kapı mevcuttur. Yukarıda belirtilenlerden dolayı, bir minarenin geçiş bölümünün hemen üst kesiti ve petek bölümü mukavemet açısından minarenin diğer kısımlarına göre zayıf kalmaktadır. Şekil 2'de şiddetli rüzgârlar etkisiyle yıkılmış bazı minareler görülmektedir. Hasar resimlerinin incelenmesinden, minarelerin kısmen veya tamamen yıkıldığı ve kullanılamaz hale geldiği anlaşılmaktadır. Toptan göçmeler yanında, geçiş kısmının hemen üstünde veya petek bölümünde oluşan göçmeler dikkat çekmektedir. Ayarlı Kütle Sönümleyicilerin yerleştirildikleri yapılarda sönümü artırarak, rüzgâr gibi yatay yüklerden oluşan yer değiştirmeleri azalttığı bilinmektedir [16].

Bu durum dinamik davranışları yüksek yapılara benzeyen yüksek minarelerin rüzgâr ve depreme karşı daha dayanıklı yapılabileceği fikrini ortaya koymuştur. Yapılan literatür incelemesi sonucu, minarelere AKS yerleştirilmesiyle ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır. Sunulan çalışmada betonarme yüksek minarelere AKS yerleştirmenin bu yapıların şiddetli rüzgar ve deprem yükleri etkisi altında dinamik davranışlarını nasıl etkilediğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda öncelikle yüksek minareleri temsil edecek bir minare seçilmiş ve bu minarenin geometrik ve malzeme özellikleri verilmiştir. Normal minare (NM) ve aynı minarenin AKS yerleştirilmiş olanının sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu modeller için modal analizler yapılarak, minarelerin doğal periyotları ve bunlara karşı gelen mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonra her iki modelin dinamik davranışları, harmonik (rezonans şartlarında) yer hareketi, üç farklı deprem hareketi ve bir kasırgaya ait hız verileri kullanılıp, zaman tanım alanında lineer dinamik çözümleme yapılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek sunulmuştur.



Şekil 2. Fırtınalar nedeniyle yıkılmış bazı minareler (a)13 Mart 2013 Aksaray (b) 21 Ekim 2012 Alanya (c) 18 Aralık 2010 Samsun (Bafra) (d) 20 Şubat 2010 Fas
(Destroyed some minarets due to the hurricanes)

2. İNCELENEN MİNARE VE ONUN AKS YERLEŞTİRİLMİŞ HALİ (MODELS OF MINARETS)

2.1. Minarelerin Geometrik ve Malzeme Özellikleri
(Geometric and Material Properties of the Minarets)

Minarelerin yükseklikleri (h) bağlı bulundukları camilerin büyüklüklerine göre mescit minareleri (0<h<20 m), orta büyüklükteki camilerin minareleri (20<h<40 m) ve büyük camilerin minareleri (h>40 m) olarak sınıflandırılabilir [17]. Bu çalışmada yüksek minareleri temsil edecek üç şerefeli, yüksekliği 80 m olan bir betonarme minare seçilmiştir. Bu noktadan sonra bu minare Normal Minare (NM) olarak adlandırılacaktır. Şekil 3'de NM'nin boy kesiti ve bazı en kesit görünüşleri verilmiştir. Minarenin temelden geçiş kesitine kadar olan bölümü kare plana sahiptir ve üst gövdesi 16 kenarlı düzgün poligon şeklindedir. Geçiş kesiti, ana gövdeyle üst gövde arasında yer almaktadır. Minare, ortasında yer alan çekirdek kesit etrafında dönerek yükselen bir merdivene sahiptir. Ayarlı Kütle Sönümleyicili Minare (AKSM) ise özellikleri yukarıda belirtilmiş olan minarenin külah kısmının izolatörler ile minare ana gövdesine birleştirilmiş halidir. Dolayısıyla, AKSM'de NM'ye göre bir kütle artışı olmamakta, külahın kütlesi ilave kütle yerine geçmektedir. Çalışmanın ana amacı AKS yerleştirilmesinin yüksek minarelerin dinamik davranışına olan etkisini incelemek olduğundan, minare modellerinin dinamik hesaplarını basitleştirmek ve doğrusal zaman tanım alanında çözümleme yapabilmek için betonarme malzeme hem çekmede, hem de basınçta doğrusal-elastik davranış gösteren bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Betonarme minarelerle ilgili diğer bazı çalışmalarda da malzeme için benzer bir kabulün yapıldığı görülmüştür [18]. Betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı 30 MPa, elastisite modülü $32x10^3$ MPa, Poisson oranı 0,2 ve birim hacim ağırlığı 24 kN/m^3 olarak alınmıştır.

3. ÇOK SERBESTLİK DERECELİ SİSTEMLER İÇİN AKS TEORİSİ (TMD THEORY FOR MDOFS)

Daha önce belirtilmiş olduğu gibi AKS; yapının şiddetli rüzgar ve deprem gibi etkiler altında titreşimlerini azaltmak amacıyla yapıya yerleştirilen ilave kütle, yay ve sönümleyiciden oluşan bir mekanizmadır. Connor [19] kitabının 4. bölümünde AKS'nin teorisini ve tasarımını Tek Serbestlik Dereceli bir Sistemi (TSDS) harmonik kuvvet ve harmonik yer hareketi altında inceleyerek anlatmaya başlamıştır. Dördüncü bölümün son kısmında ise zaman alanında çözümleme yaparak TSDS'e optimum uyumlu AKS'nin parametrelerini belirleyip, harmonik ve sismik hareket etkisinde sistemin davranışını incelenmiştir. Daha sonra bu teori Çok Serbestlik Dereceli Sistemlere (ÇSDS) uyarlanmıştır. Bu çalışmada Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Minarenin (AKSM) optimum parametrelerinin belirlenmesinde bu kaynak eserin [19] ilgili bölümlerinden yararlanılmıştır.

3.1. Sönümlü Yapı ve Sönümlü AKS
(Damped Structure and Damped TMD)

Ana yapıya yerleştirilecek AKS'nin tasarımında önemli olan *optimum uyum* parametrelerinin belirlenmesidir. Optimum uyum; ana yapı ile AKS arasında amaca uygun (aşırı titreşimleri azaltma amacı) en iyi birlikte davranışı ifade etmektedir. Bu ise ana yapının özellikleri belirli olduğuna göre, AKS için optimum kütle, rijitlik ve sönüm değerlerinin belirlenmesi ile sağlanacaktır.

Şekil 4 bir ana yapı ve ona birleştirilmiş AKS'den oluşan bir sistemi göstermektedir. Ana yapı, m kütlesi, k rijitlikli doğrusal yay ve c katsayılı viskoz sönümleyiciden oluşmaktadır. AKS ise m_d kütlesi, k_d rijitlikli yay ve c_d katsayılı viskoz sönümleyiciden ibarettir. Sisteme dışarıdan periyodik değişen dış kuvvet (p) ve periyodik değişen yer hareketi (u_g) etki etmektedir. Aşağıdaki ifadelerde yer alan a_g yer hareketinin ivmesini göstermektedir ($a_g=\ddot{u}_g$). Bu şartlar altında sistemin hareket denklemleri Eş. 1 ve Eş. 2'deki gibi yazılır.

$$m_d\ddot{u}_d + c_d\dot{u}_d + k_d u_d + m_d\ddot{u} = -m_d a_g \tag{1}$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku - c_d\dot{u}_d - k_d u_d = -ma_g + p \tag{2}$$

Çözüm için kompleks sayılarla çalışmak uygundur. Dolayısıyla dinamik dış etkiler Eş. 3 ve Eş. 4'deki şekilde verilebilir.

$$p=\hat{p}e^{i\Omega t} \tag{3}$$

$$a_g=\hat{a}_g e^{i\Omega t} \tag{4}$$

Burada $\hat{a}_g$ ve $\hat{p}$ gerçek sayılardır. Eş. 1 ve Eş. 2'nin çözümleri Eş. 5 ve Eş. 6'daki formlarda ifade edilebilir:

$$u = \overline{u}e^{i\Omega t} \tag{5}$$

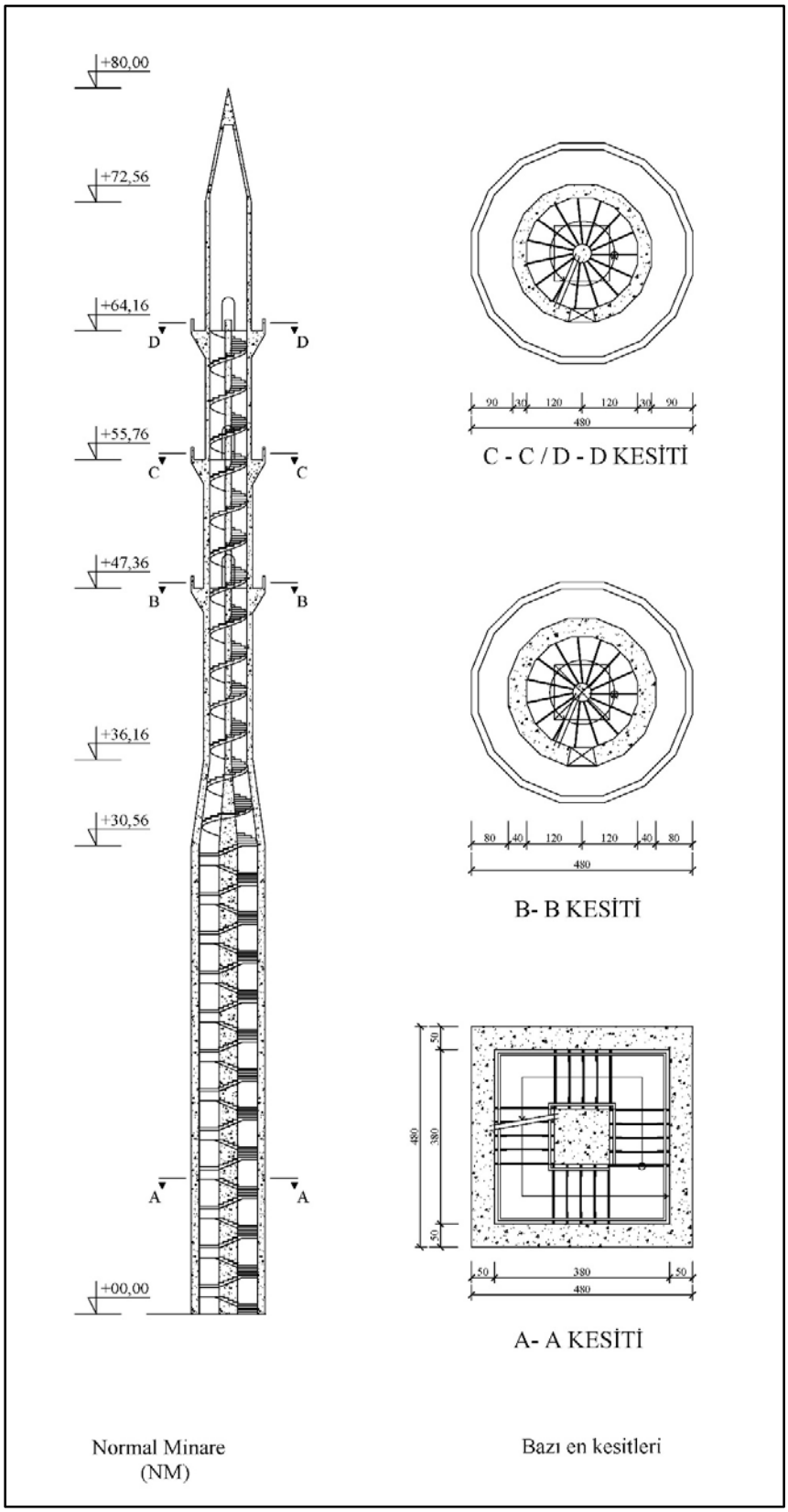
$$u_d=\overline{u}_d e^{i\Omega t} \tag{6}$$

Bu çözümler Eş. 1 ve Eş. 2'ye yerleştirilip, türev ve kompleks çözümden polar forma dönüştürme işlemleri yapıldığında sistemdeki kütlelerin genlikleri Eş. 7 ve Eş. 8'deki verilen şekilde ortaya çıkmaktadır.

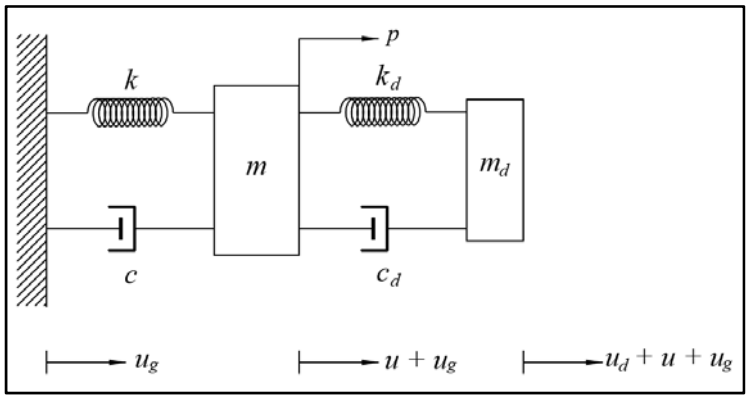
$$\overline{u}=\frac{\hat{p}}{k}H_5 e^{i\delta_5} - \frac{\hat{a}_g m}{k}H_6 e^{i\delta_6} \tag{7}$$

$$\overline{u}_d=\frac{\hat{p}}{k}H_7 e^{-i\delta_7} - \frac{\hat{a}_g m}{k}H_8 e^{i\delta_8} \tag{8}$$

$\rho=\Omega/\omega$ dinamik dış yükün açısal frekansının ana yapının açısal frekansına oranı, $f=\omega_d/\omega$ ilave kütlenin (ilerdeki incelemelerde minarenin külah kısmının kütlesi) açısal frekansının ana yapının açısal frekansına oranı ve $\overline{m}=m_d/m$ ilave kütlenin ana yapının kütlesine oranı olmak üzere Eş. 7 ve Eş. 8'de yer alan H ve δ büyüklükleri ve onlarla ilgili çeşitli parametreler Eş. 9-Eş. 20'deki gibi elde edilmektedir [19].



Şekil 3. Normal minare (NM) boy ve bazı en kesitleri (The longitudinal and some cross sectionsof normal minaret)
(boyutlar boy kesitte m, en kesitlerde ise cm cinsindendir)



Şekil 4. TSD sistemle (ana yapı ile) birleştirilmiş ayarlı kütle sönümleyici (Tuned mass damper connected to SDF system)

$$H_5=\frac{\sqrt{\left[f^2-\rho^2\right]^2+\left[2\xi_d\rho f\right]^2}}{|D_3|} \tag{9}$$

$$H_6=\frac{\sqrt{\left[(1+\bar{m})f^2-\rho^2\right]^2+\left[2\xi_d\rho f(1+\bar{m})\right]^2}}{|D_3|} \tag{10}$$

$$H_7=\frac{\rho^2}{|D_3|} \tag{11}$$

$$H_8=\frac{\sqrt{1+(2\xi\rho)^2}}{|D_3|} \tag{12}$$

$$|D_3|=\left\{\left[-f^2\rho^2\bar{m}+(1-\rho^2)(f^2-\rho^2)-4\xi\xi_d f\rho^2\right]^2 +4\left[\xi\rho(f^2-\rho^2)+\xi_d f\rho\left(1-\rho^2(1+\bar{m})\right)^2\right]\right\} \tag{13}$$

$$\delta_5=\alpha_1-\delta_7 \tag{14}$$

$$\delta_6=\alpha_2-\delta_7 \tag{15}$$

$$\delta_8=\alpha_3-\delta_7 \tag{16}$$

$$\tan\delta_7=2\frac{\xi\rho(f^2-\rho^2)+\xi_d f\rho\left(1-\rho^2(1+\bar{m})\right)}{-f^2\rho^2\bar{m}+(1-\rho^2)(f^2-\rho^2)-4\xi\xi_d f\rho^2} \tag{17}$$

$$\tan\alpha_1=\frac{2\xi_d\rho f}{f^2-\rho^2} \tag{18}$$

$$\tan\alpha_2=\frac{2\xi_d\rho f(1+\bar{m})}{(1+\bar{m})f^2-\rho^2} \tag{19}$$

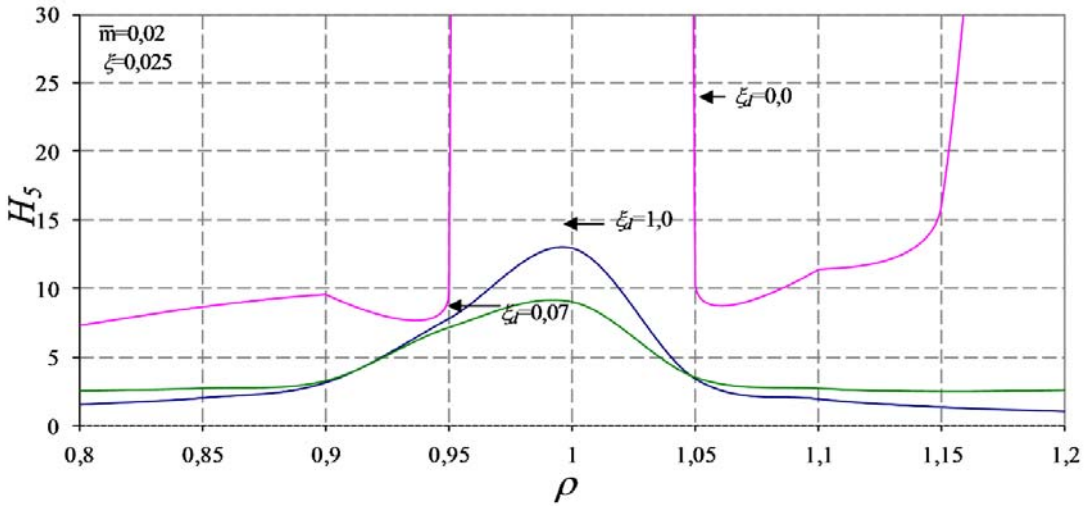
$$\tan\alpha_3=2\xi\rho \tag{20}$$

Ana kütleye dışarıdan bir kuvvet uygulandığını kabul edelim. Eş. 13'deki $|D_3|$ ifadesi ξ terimini içerdiğinden, optimum frekans oranı (f) ve ilave kütlenin optimum sönüm oranı (ξ_d) için kütle oranı ($\bar{m}$) cinsinden analitik ifadeler oluşturulamaz. Çünkü, f ve ξ_d parametreleri de ξ ' ye bağlıdır. Bu durumda ρ'nun belirli değerlerini kullanarak (ρ = 0,8, 0,85, 0,9, 0,95, 1, 1,05, 1,1, 1,15, 1,2) belirli olan $\bar{m}$, ξ, f ve ξ_d değerli için sayısal çözümleme yapılarak Eş. 9'daki H_5 ve Eş. 11'deki H_7' belirlenebilir. Şekil 5'de görüldüğü gibi $\bar{m}$ ve ξ'nin özel değerleri için f ve ξ_d bir aralıkta değiştirilerek, H_5 düşey eksende ve ρ yatay eksende olmak üzere bir grafik çizilebilir. Çizilen her bir H_5-ρ grafiğinde bir tepe değeri vardır. H_5 için en küçük tepe noktasını veren f ve ξ_d değerleri optimum durumu gösterir. Böylece f_{opt}, ξ_{dopt} ve ρ optimum değerleri belirlenmiş olur.

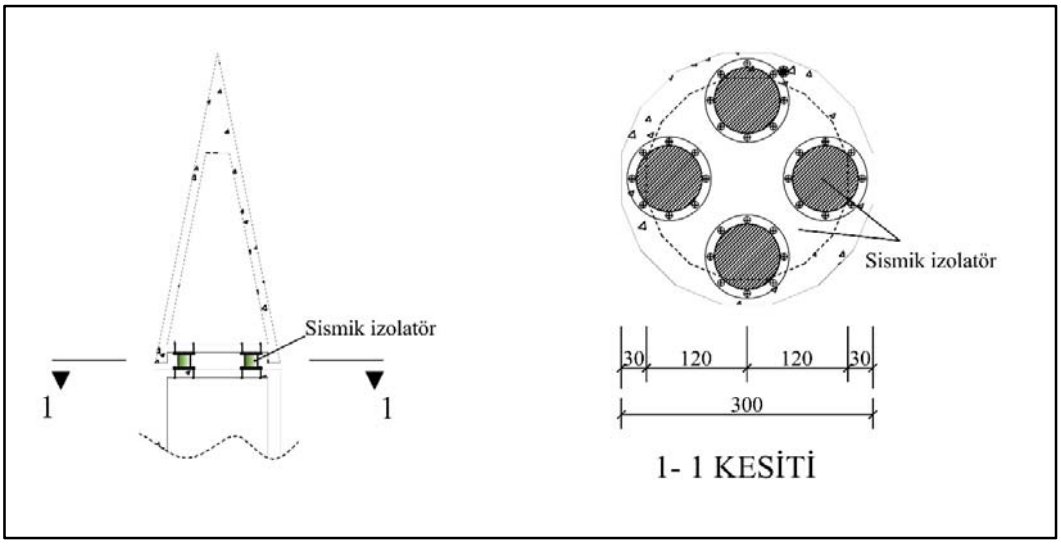
Yapısal ve dinamik davranışları betonarme yüksek minarelere benzeyen betonarme yüksek bacalar için sönüm oranı oldukça düşüktür ve tipik olarak %2~5 aralığında değişir [20]. Başka bir örnek verilmek istenirse, yüksekliği 43 m olan betonarme bir su deposu üzerinde yapılan deneysel bir çalışmada sönüm oranı %2,65 olarak belirlenmiştir [21]. Ayrıca, tarihi Büyük Gülbahar Camisinin yığma minaresinde çevresel titreşim yöntemi ile sönüm oranının % 1,4 olduğu belirlenmiştir [22]. Bu bilgilere dayanarak, bu çalışmada seçilen betonarme minare için sönüm oranı %2,5 olarak alınmıştır. Şekil 5'de gösterilen grafikten yararlanılarak AKS'nin optimum değerleri ($\bar{m}_{opt}$, f_{opt}, ξ_{dopt} , ρ) sırasıyla 0,02, 0,97, 0,07 ve 0,913 olarak belirlenmiştir.

4. AKS'NİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE MİNAREYE UYGULANMASI
(DETERMINATION OF THE PROPERTIES OF TMD AND APPLICATION TO THE MINARET)

Bu çalışmada, Normal Minare (NM) ve Ayarlı Kütle Sönümleyicili Minare (AKSM) sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak SAP2000 programıyla modellenmiştir. NM modelinde, 4323 kabuk, 9024 solid eleman ve AKSM modelinde ise 4339 kabuk, 9024 solid, 4 adet link eleman kullanılmıştır.



Şekil 5. AKS'nin optimum parametrelerinin belirlenmesi (Determination of optimum parameters of TMD)



Şekil 6. Külah kısmının AKSM'de ilave kütle olarak alınması (Evaluation of the cone sections in TMDM as additional mass)

Tablo 1. AKSM'de kullanılan kauçuk izolatörlerin özellikleri (The properties of rubber isolators used in TMDM)

Yatay doğ. efektif rijitlik (N/mm)	Düşey doğ. rijitlik (kN/mm)	İzolatör çapı (mm)	İzolatör Yüksekliği (mm)	Yatay yerdeğ. Kapasitesi (mm)
7,5	1464	800	384	700

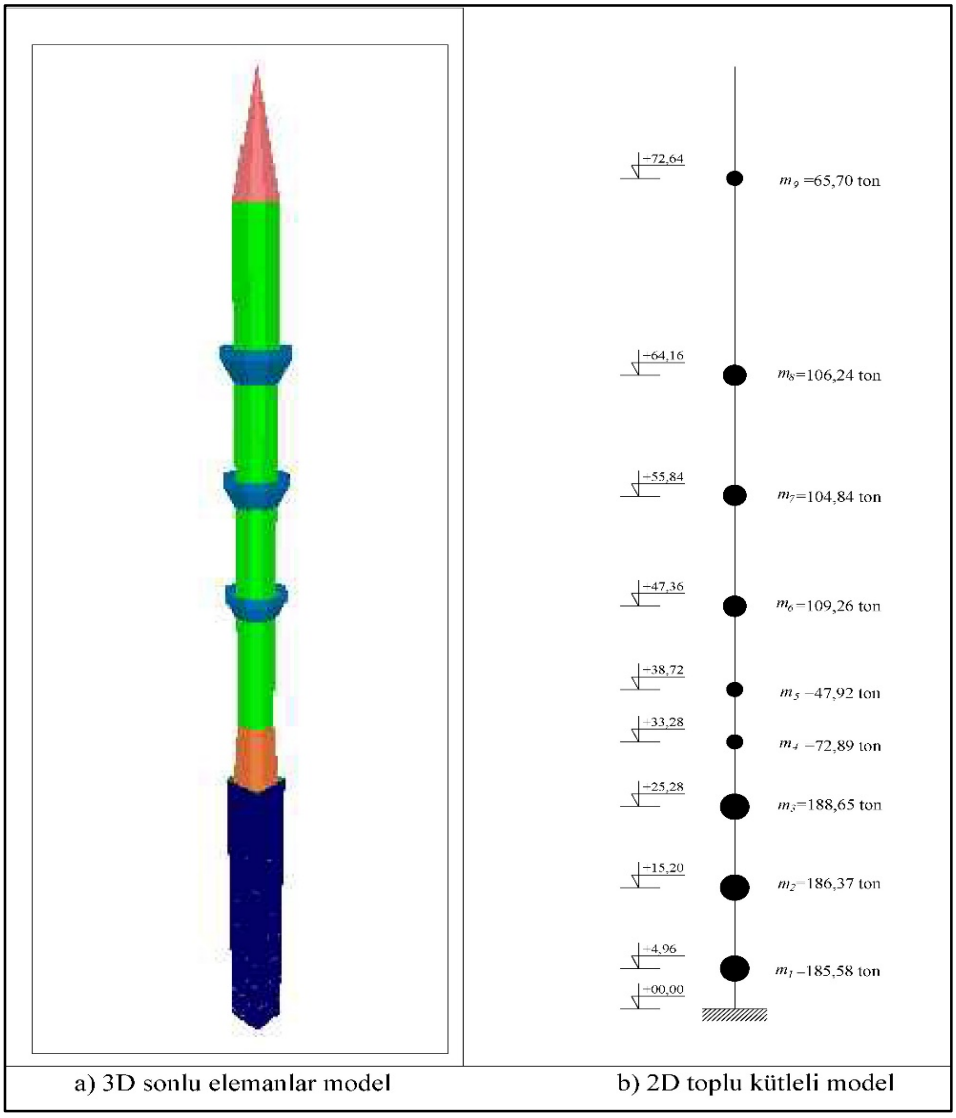
AKSM modelinde, Şekil 6'da görüldüğü gibi AKS, minarenin en üst bölümü olan konik onaltıgen şeklindeki külah kısmı dört adet link (izolatör) elemanı üzerinde taşıtılarak ilave kütle meydana getirilmiştir. Külah kısmı ikincil kütle olarak kullanıldığından, ilave bir kütlenin yerleştirilmesine gerek kalmamıştır. Kullanılan izolatörlerin yapısal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

4.1. NM Modelinin Modal Analizi (Modal Analysis of NM Model)

AKS'nin optimum parametrelerini belirleyebilmek için öncelikle NM'nin SAP2000'de oluşturulan 3 Boyutlu sonlu elemanlar modelinin, 2 Boyutlu toplu kütleli modele indirgenmesi gerekmektedir (Şekil 7a, Şekil 7b). Bu indirgenme yapılırken aşağıda maddeler halinde verilen kabuller yapılmıştır.

- NM uygun yerlerden 9 parçaya bölünmüş ve her bir parçanın kütlesi hesaplanmıştır. Böylece her bir minare parçası onu temsil edecek tek bir kütleye dönüştürülmüştür.

- Her bir kütlenin bulunduğu yerde, sadece yatay yer değiştirme yaptığı, dönme ve düşey yer değiştirme yapmadığı kabul edilmiştir.



Şekil 7. Normal minarenin a) 3B, b) 2B modeli (Normal minaret; a)3D,b) 2D models)

Tablo 2. 3B ve 2B modellerinin ilk üç moduna ait periyot ve kütle katılım değerleri (The period and mass participation values of 3D and 2D models belonging to first three mods)

Model	Mod	1.	2.	3.
	Yönü	x	x	x
3B	Periyot (s)	2,262	1,060	0,515
	Kütle katılım fak. (%)	46,6	1,86	20
2B	Periyot (s)	2,259	0,497	0,196
	Kütle katılım fak. (%)	48,5	23,8	8,6

Bu kabuller altında toplu kütleli modelin (2B modeli) dinamik serbestlik derecesi n NM'nin bölünmüş parça sayısına eşit olacaktır. Toplu kütleli sistemin M kütle matrisi diyagonal bir matristir. Toplu kütleli modelin $n \times n$ boyutlu K rijitlik matrisi NM'nin 3B sonlu elemanlar modelinden aşağıdaki adımlar uygulanarak elde edilmiştir.

1. Sırayla her bir kütlenin bulunduğu düğüm noktasına (i) 1 birimlik kuvvet uygulanmıştır. 2. Bu yüklemelerden sırayla her bir j. inci katın yer değiştirmesi belirlenmiştir. Bu değer j. düğüm noktasına ait δ_{ji} $(i, j=1,2....,n)$ esneklik katsayısıdır. 3. Böylece esneklik matrisi ψ $n \times n$ boyutlu olarak elde edilmiştir. 4. Rijitlik matrisi K esneklik matrisinin tersi alınarak belirlenmiştir. 2B modelin hareket denklemi dış kuvvet (buradaki incelemede rüzgar etkisi) ve yer hareketi etkisi altında Eş. 21'deki şekilde ifade edilir.

$$M\ddot{u}+C\dot{u}+Ku=P-Ma_g \quad (21)$$

Burada $u=[u_1, u_2, \ldots,u_n]^T$, kütlelerin yatay yer değiştirmelerini içeren yer değiştirme vektörünü, $\acute{u}$ ve $\ddot{u}$ sırasıyla yapının hız ve ivme vektörlerini göstermektedir. 2B modellerin sönüm matrisi C genellikle Rayleigh sönümü kullanılarak oluşturulur. p, n boyutlu rüzgâr yükü vektörünü ve a_g yer hareketinden oluşan yer ivmesini ifade etmektedir. Modal analiz gerçekleştirilerek NM'ye ait 3B ve 2B modellerinin Tablo 2'de verilen modal periyot ve kütle katılım değerleri elde edilmiştir. Her iki model için verilen değerler incelendiğinde 2B toplu kütleli modelin 3B modeli 1. Mod için oldukça iyi temsil ettiği görülmektedir. AKS'nin özelliklerini belirlemede 2B modelin 1. Moda ait özellikleri kullanılacağından, 2B modelin, 3B modeli temsil etmede yeterli olduğu kabul edilmiştir. ϕ_i mod şekli vektörü olmak üzere, ilk iki moda ait vektörler Eş. 22-Eş. 24'de verilmiştir.

$$\varphi_i=\left[\varphi_{i1},\varphi_{i2},\ldots,\varphi_{in}\right]^T \tag{22}$$

$$\phi_1 = \left[0{,}006\ \ 0{,}049\ \ 0{,}124\ \ 0{,}207\ \ 0{,}283\ \ 0{,}438\ \ 0{,}615\ \ 0{,}804\ \ 1{,}0\right]^T \tag{23}$$

$$\phi_2 = \left[-0{,}041\ -0{,}275\ -0{,}57\ -0{,}789\ -0{,}84\ -0{,}72\ -0{,}288\ \ 0{,}311\ \ 1{,}0\right]^T \tag{24}$$

Çok serbestlik dereceli sistemde hareketin özel bir modu için $\tilde{m}_i$ modal kütle, $\tilde{k}_i$ modal rijitlik ve $\tilde{c}_i$ modal sönüm hesaplanarak, TSD bir sistem gibi göz önüne alınabilir. Sistemin 1. modu için, modal kütlenin değeri Eş. 25 ve modal rijitliğin değeri Eş. 26 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tilde{m}_1=\varphi_1^T M\varphi_1=205{,}26\ \ ton \tag{25}$$

$$\tilde{k}_1=\varphi_1^T K\varphi_1=1587\ \ kN/m \tag{26}$$

İncelenen betonarme minare için 1. moda ait sönüm oranı ξ_1 yaklaşık olarak %2,5 alınmıştır. Buna göre Rayleigh sönümü için α orantı katsayısı Eş. 27'deki gibi hesaplanabilir.

$$\alpha=\frac{2\xi_1}{\omega_1}=\frac{0{,}05}{2{,}781}=0{,}018 \tag{27}$$

Sönümün rijitlikle orantılı olduğu kabul edilerek Eş. 28 yazılır.

$$C=\alpha K \tag{28}$$

Modal sönüm ise Eş. 29'dan yararlanılarak aşağıdaki şekilde belirlenmiştir.

$$\tilde{c}_1=\varphi_1^T C\varphi_1=28{,}58\ \ kNs/m \tag{29}$$

Bölüm 3.1 de AKS'nin belirlenen $\bar{m}_{opt}$, f_{opt}, ξ_{dopt} optimum değerleri ve $\tilde{m}_1$, $\tilde{k}_1$, $\tilde{c}_1$ değerleri dikkate alınarak, AKS'nin modellenmesinde kullanılan yapısal özellikleri olan kütle değeri Eş. 30, açısal frekans değeri Eş. 31, rijitlik değeri Eş. 32 ve sönüm değeri Eş. 33'de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$m_d=\tilde{m}\,\bar{m}=205{,}26\times0{,}02=4{,}12\ \ ton \tag{30}$$

$$\omega_d=f_{opt}\omega_1=0{,}967\times2{,}781=2{,}70\ \ rad/s \tag{31}$$

$$k_d=\omega_d^2 m_d=2{,}70^2\times4{,}12=30\ \ kN/m \tag{32}$$

$$c_d=2\xi_{dopt}\,\omega_d m_d=2\times0{,}07\times2{,}7\times4{,}12=1{,}557\ \ kNs/m \tag{33}$$

Belirtmek gerekir ki tek serbestlik dereceli bir sistem olarak modellenen ana yapının (minarenin) ω□ açısal frekansı belirlenirken ilave kütlenin (külahın) parametreleri dahil edilmemiştir.

5. RÜZGAR YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ
(DETERMINATION OF THE WIND LOAD)

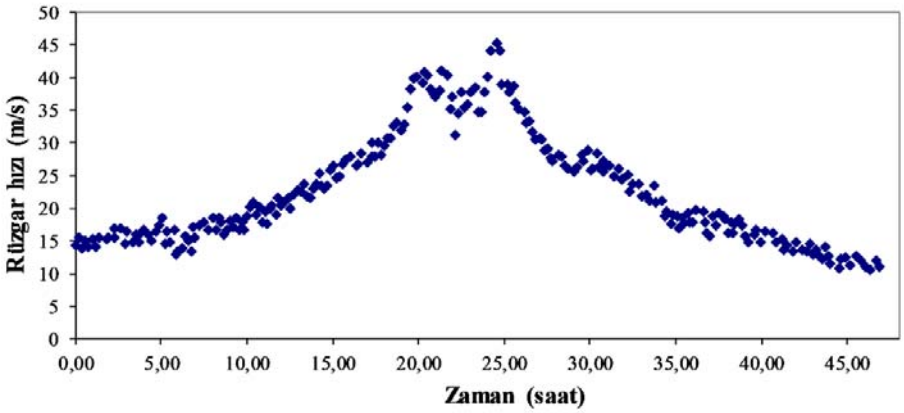
5.1. Rita Kasırgasına Ait Temel Hız Değerlerinin Belirlenmesi
(Determination of Basic Velocity Values of Rita Hurricane)

Ülkemizde geçmişte çok şiddetli rüzgarlar meydana gelmiştir. Örneğin 1 Ocak 1978 tarihinde Tokat ilimizde hızı saatte 176 km'ye ulaşan çok şiddetli bir rüzgar meydana gelmiştir. 22 Ocak 2004 tarihinde ise Bozcaada'da 162 km/h hıza ulaşan bir rüzgar oluşmuştur [23]. Ancak ülkemizde meydana gelmiş olan bu tür şiddetli rüzgarlara ait açık (ulaşılabilen) bir hız-zaman kaydına rastlanmamıştır.

Bu yüzden bu çalışmada ABD'nin Meksika körfezi kıyılarını 18-24 Eylül 2005 tarihleri arasında etkilemiş olan Rita kasırgası göz önüne alınmıştır. Rita kasırgasının Safir-Simpson ölçeğine göre 5. kategoride olduğu ve rüzgâr hızının yaklaşık olarak 220 km/h'e ulaştığı belirtilmiştir. Safir-Simpson kasırga ölçeği rüzgar hızına bağlı olarak 1-5 arasında ölçeklendirilmiştir. Can kaybı ve hasar oluşturma potansiyelindeki kasırgalar üç (3) ve üzerindeki kasırgalar olarak değerlendirilmektedir. Rita kasırgasının 42001 numaralı ölçüm istasyonunda kaydedilen zamanla rüzgâr hızının değişimini gösteren kayıt Şekil 8'de verilmiştir [24]. Bu kayıt 10 *m* yüksekliğindeki Anemometer cihazından 10 dakikalık zaman aralığındaki rüzgâr hızlarının ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

5.2. Rüzgar Hızının Zamana ve Yüksekliğe Bağlı Olarak Belirlenmesi (Determination of Wind Velocity)

Rüzgar atmosferdeki gazların yer değiştirmesiyle oluşan ve zamana bağlı olarak yönü ve şiddeti değişen bir olaydır. Herhangi bir rüzgarın belirli bir zaman aralığı için ortalama rüzgar hızı ve dalgalanma bölümlerinden oluştuğu düşünülebilir. Ortalama rüzgar hızı belirli bir zaman dilimi içerisindeki rüzgar hızlarının ortalaması alınarak belirlenir.



Şekil 8. Rita kasırgasına ait hız-zaman grafiği (Speed-time diagram of Rita hurricane)

Rüzgarın önemli bir özelliği de hızının yüksekliğe bağlı olarak değişmesidir. Yüzey sürtünme etkisi yere yakın hava akış hareketini geciktirdiği için kademeli bir rüzgâr hızı değişimi oluşur. Rüzgar hızını arazi topografyası da etkiler. Rüzgar yükünün belirlenmesi için hazırlanan yönetmeliklerde bir ana rüzgar hızı tanımlanmaktadır. Toplam rüzgar hızı $\overline{V}(\bar{z},t)$ yerden yükseklik olan $\bar{z}$'ye ve zamana bağlı olarak Eş. 34'de verilen bağıntıyla hesaplanabilir, ASCE 7-05 [25].

$$\overline{V}(\bar{z},t)=\overline{V}_{\bar{z}}+\hat{V}(\bar{z},t) \tag{34}$$

Burada $\overline{V}_{\bar{z}}$ rüzgarın statik bileşeni olarak adlandırılır ve zemin yüzeyinden ölçülen yüksekliğe bağlı olarak rüzgâr hızlarının belirlenen bir zaman dilimindeki ortalamasına karşı gelir. $\overline{V}(\bar{z},t)$ İse rüzgâr hızındaki dalgalanmayı göstermektedir. Bu çalışmada rüzgâr hızı ve rüzgar yükünün belirlenmesinde ASCE 7-05 [25] yönetmeliği esas alınmıştır. Bu yönetmeliğe göre rüzgarın statik bileşeni $\overline{V}_{\bar{z}}$ Eş. 35'deki bağıntıyla verilmektedir.

$$\overline{V}_{\bar{z}}=\overline{b}\left(\frac{\bar{z}}{10}\right)^{\overline{\alpha}}V \tag{35}$$

Burada $\overline{b}$ ve $\bar{\alpha}$ yapının konum sınıflandırmasına bağlı olarak değişen sabitlerdir, V ise ana rüzgar hızını (m/s) göstermektedir. İstenilen $\bar{z}$ yüksekliğindeki rüzgar hızı Eş. 35 bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir. Minarenin yerden toplam yüksekliği 80 *m* dir. Bu yükseklik 16 parçaya bölünerek, yaklaşık olarak eşit aralıkta, fakat farklı kotlarda, rüzgar yüklerinin minareye uygulanacağı 16 nokta elde edilmiştir. Bu noktalar ve yerden yükseklikleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu 16 noktanın yerden yükseklikleri $\bar{z}$ değeri olarak alınmış ve her bir nokta için ayrı ayrı $\overline{V}_{\bar{z}}$ değerleri hesaplanmıştır. Ana rüzgâr hızı V ise yukarıda özellikleri ve hız-zaman grafiği verilen (Şekil 8) Rita kasırgasının hız değerleri olarak alınmıştır. Bu çalışmada minarenin; etrafı açık olan, dolayısıyla *C* grubu konum sınıfına giren bir yerde olduğu kabul edilerek $\bar{\alpha}$ ve $\overline{b}$ katsayıları sırasıyla ilgili yönetmelikten 1/6,5 ve 0,65 olarak alınmıştır. Rüzgar hızındaki dalgalanma $\overline{V}(\bar{z},t)$ ise statik değerin (ortalama değer) etrafındaki hız değişimlerini ifade eden dinamik rüzgar hızını göstermektedir. Birçok mühendislik uygulamalarında rüzgar hızındaki dalgalanmanın yapıya gelen toplam rüzgar kuvvetine katkısı, rüzgarın statik bileşeninden oluşan kuvvetin, dinamik etki faktörü (G_f) olarak adlandırılan bir katsayı ile çarpılarak artırılmasıyla hesaba katılır. ASCE 7-05'de [25] dinamik etki faktörünün, hâkim frekansı 1 Hz'den büyük olan yapılar (rijit yapılar) için yaklaşık olarak 0,85 alınabileceği belirtilmektedir. Hâkim frekansı 1 Hz'den küçük olan, yani narin yapılar için ise aynı yönetmelik faktörün hesabı için bağıntılar vermektedir. Dinamik etki faktörü ana rüzgar hızı V ile yerden yükseklik olan $\bar{z}$'ye bağlı olarak değişmektedir. Rita kasırgasına ait her bir V ve minarenin her bir $\bar{z}$ değeri için dinamik etki faktörü G_f ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ancak hesaplar oldukça uzun olduğundan buraya aktarılmamıştır.

5.3. Rüzgar Basıncının Belirlenmesi
(Determination of Wind Velocity Pressure)

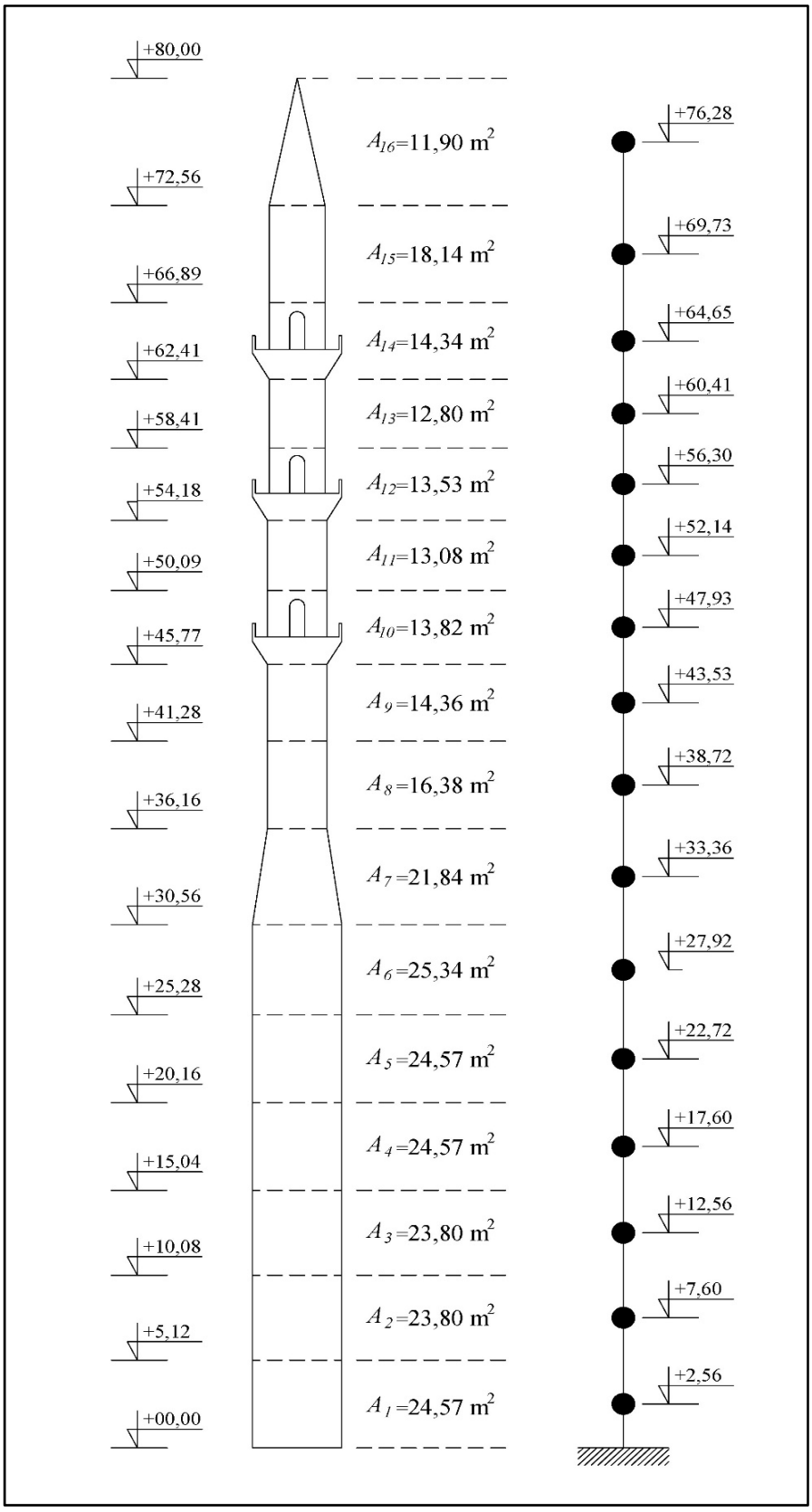
Esas alınan yönetmeliğine göre rüzgar basıncı q_z yüksekliğe bağlı olarak Eş. 36'da verilen ifadeyle hesaplanır:

$$q_z=0{,}613K_zK_{zt}K_d\overline{V}_{\bar{z}}^2I \quad (N/m^2) \tag{36}$$

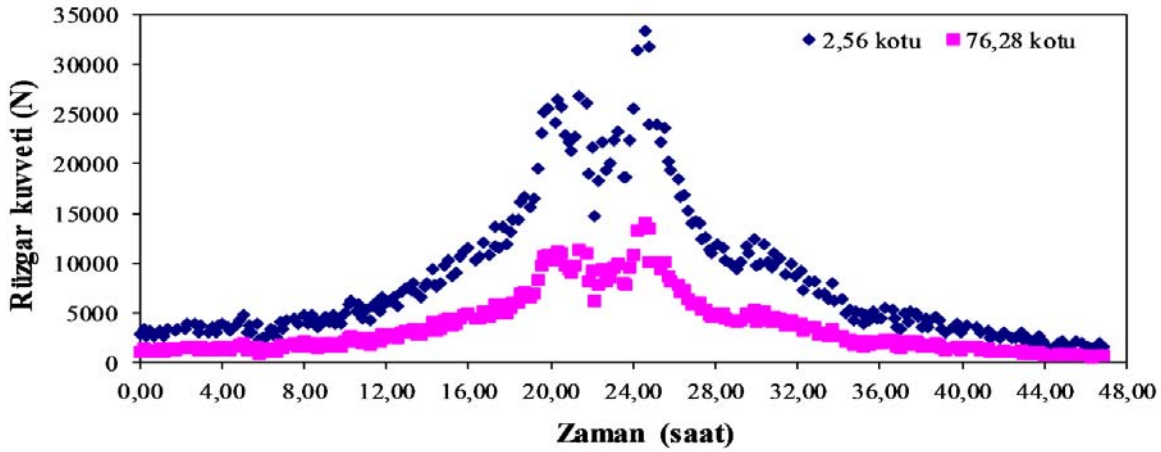
Burada K_z konum basınç katsayısı, K_{zt} topografik katsayı, K_d rüzgar yönü katsayısı, $\overline{V}_{\bar{z}}$ statik (ortalama) rüzgâr hızı (*m/s*) ve I önem faktörüdür. *C* konum kategorisinde, topografik katsayı K_{zt} düz bir arazi yüzeyi kabulü ile 1,0 rüzgar yönü katsayısı K_d dairesel yapılar için 0,95 ve önem katsayısı I ise II.tip yapılar için 1,0 olarak alınmıştır. Buna göre rüzgar basıncı ifadesi Eş. 37'deki duruma gelir:

$$q_z=0{,}613\times K_z\times 1{,}0\times 0{,}95\times\overline{V}_{\bar{z}}^{\,2}\times 1{,}0=0{,}582K_z\overline{V}_{\bar{z}}^{\,2} \tag{37}$$

Hesap için 16 elemana bölünmüş olan minarede $\bar{z}$'ye bağlı olarak konum basınç katsayısı K_z ve statik rüzgar hızı $\overline{V}_{\bar{z}}$ değerleri hesaplanmış ve bu değerlere bağlı olarak Eş. 37 bağıntısı kullanılıp, her bir $\bar{z}$ değeri için q_z belirlenmiştir.



Şekil 9. Örnek minarenin 16 parçaya bölünmüş durumu (The condition of sample minaret divided sixteen parts)



Şekil 10. 1. (2,56 m kotu) ve 16. (76,28 m kotu) düğüm noktalarına etki eden tasarım rüzgar kuvvetinin zamanla değişimi (Changing the design wind force at 1. (on 2,56 m) and 16. (76,28 m) node points depending on time)

5.4. Tasarım Rüzgar Kuvvetinin Belirlenmesi
(Determination of Design Wind Force)

Tasarım rüzgar kuvveti ASCE 7-05 yönetmeliğinin 6.5.15. Bölümünde tanımlanmış "diğer yapılar" için Eş. 38'da verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F=q_z G_f C_f A_f \quad (N) \tag{38}$$

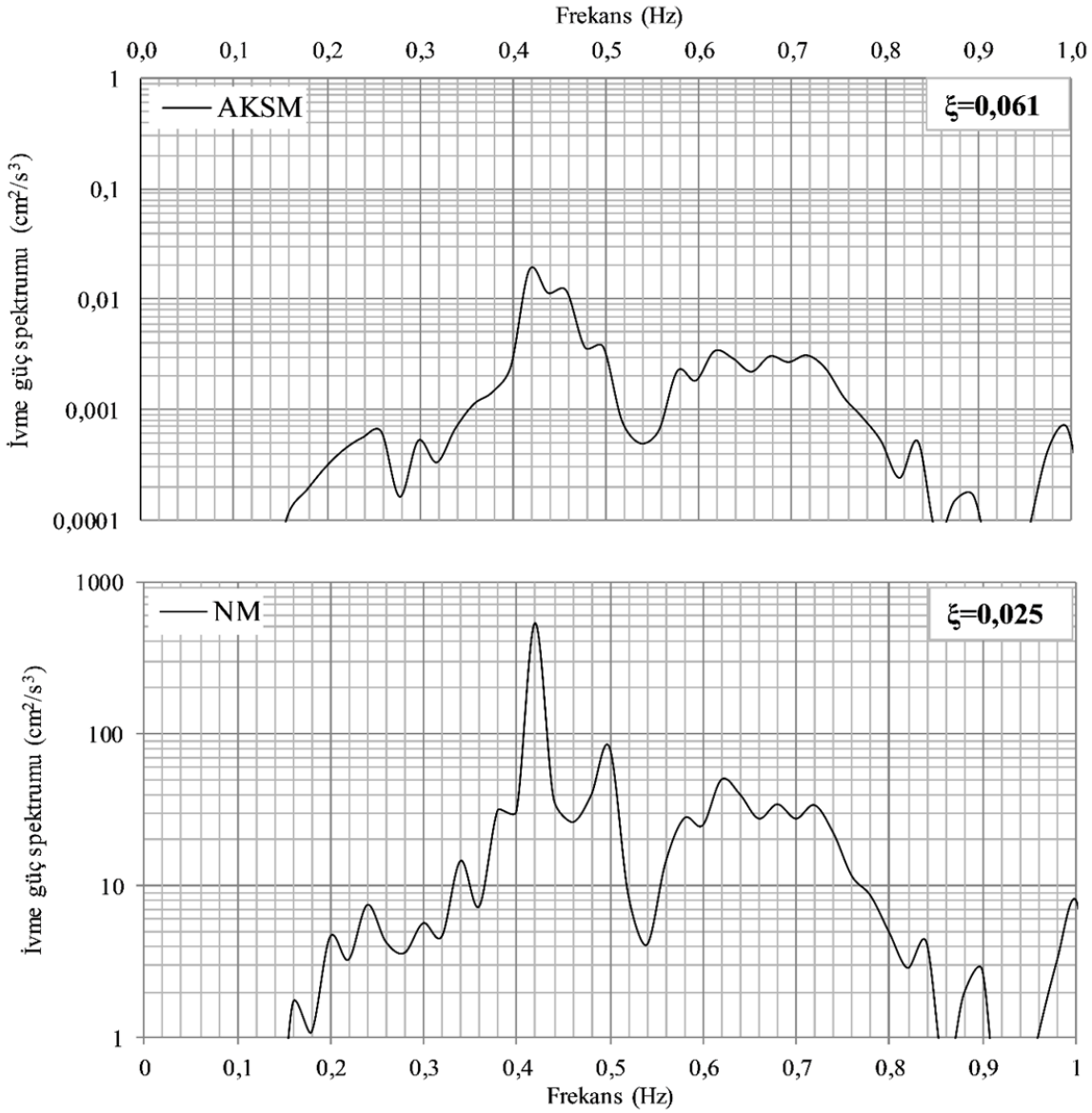
Burada q_z rüzgar basıncını, G_f dinamik etki faktörünü, C_f bahsedilen yönetmelikte verilmiş olan kuvvet katsayısını ve A_f rüzgarın etkime yönüne dik alanı göstermektedir. Hesap için 16 parçaya bölünmüş olan minarenin (Şekil 9) her bir bölümüne ait kütle hizasına etki eden rüzgar kuvvetleri; rüzgar basıncı q_z Bölüm 5.3'den elde edilerek, G_f dinamik etki faktörü Bölüm 5.2'de yapılmış olan hesaplardan alınarak, C_f kuvvet katsayısı yönetmelikten silindirik yapılar için 0,7 olarak alınıp ve A_f rüzgarın etkime yönüne dik alan değeri de Şekil 9'dan hesaplanarak belirlenmiştir. Rita kasırgasından alınan ana rüzgâr hızları (V) zamana bağlı olarak değiştiğinden, rüzgarın minareye etki ettiği doğrultudaki tasarım rüzgar kuvveti F de zamana bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak 1 ve 16 nolu düğüm noktalarına etki eden tasarım rüzgâr kuvvetlerinin zamanla değişimine ait grafikler Şekil 10'da gösterilmiştir.

5.5. NM ve AKSM Modellerinin Rüzgâr Yüklemesi Altında Dinamik Davranışlarının İncelenmesi
(Dynamic Behaviors of NM and TMDM Models)

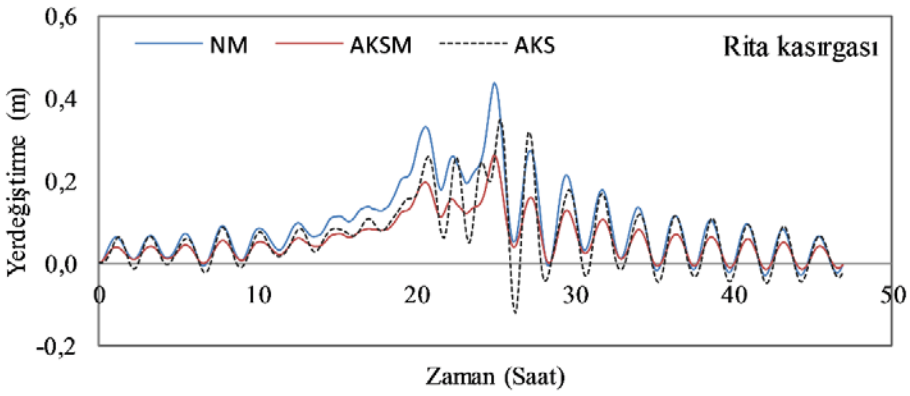
Minare yüksekliği boyunca 16 kütle hizasında, Rita kasırgasından elde edilen rüzgâr kuvveti fonksiyonları NM ve AKSM'nin üç boyutlu sonlu eleman modellerinde kütleler hizasında uygulanarak, doğrusal zaman tanım alanının da dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde minarelerin gövde kısımlarının en üst kesitlerinin orta noktası esas alınarak (kıyaslama noktası) ivme değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak her iki minare modeli için Şekil 11'de gösterilen ivme güç spektrum eğrileri çizilmiştir. İvme güç spektrum eğrilerindeki en büyük değer ve bu değerin yarısı kullanılarak titreşim yapan bir sistemin sönüm oranı belirlenebilir. Bu değerlerle sönüm oranını belirleme yöntemi yarım güç spektrumunun bant *genişliği yöntemi* olarak adlandırılmaktadır. Yöntemin temel bağıntısı Eş. 39'da verilmiştir.

$$\beta=(f_2-f_1)=2\xi f_n \tag{39}$$

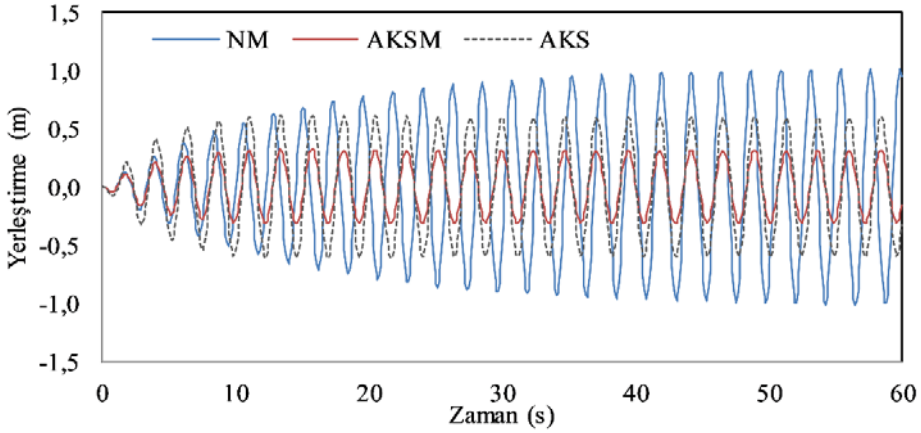
Burada f_n ivme güç spektrum eğrisindeki en büyük değere karşı gelen frekans olup, bu değer aynı zamanda yapının doğal frekansıdır. En büyük değerin yarısı alınarak frekans eksenine paralel çizilen doğrunun eğriyi kestiği noktalara karşı gelen frekans değerleri ise bağıntıdaki f_1 ve f_2 değerleridir. Minarelerin ξ sönüm oranı değerleri Eş. 39 bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. NM ve AKSM modelleri için sönüm oranı değerleri sırasıyla %2,55 ve % 6,1 olarak belirlenmiştir. Sönüm oranının AKSM modelinde, NM modeline göre yaklaşık 2,4 kat büyük olduğu görülmektedir. Rüzgar kuvvetlerinden oluşan yer değiştirmelerin genliği sönüm oranının artmasıyla birlikte azalmaktadır. Her iki minare modelinin kıyaslama noktalarından elde edilmiş yer değiştirme değerleri Şekil 12'de karşılaştırılmıştır. Minareye AKS yerleştirilmesinin yapının tepkisini göz önüne alınmış olan Rita kasırgası altında yaklaşık %40 kadar azalttığı görülmektedir. Ayrıca, AKS'nin yaptığı en büyük yer değiştirmenin izolatörlerin yatay yer değiştirme kapasitesini aşmadığı da görülmüştür. Görüldüğü üzere yüksek minarelerde AKS kullanımı rüzgârdan oluşan yer değiştirmelerin büyük oranda azalmasını ve çabuk sönümlemesini netice vermektedir. Bu durum yapıda meydana gelebilecek hasarların ve malzemedeki yorulmanın azalmasını sağlayarak minarenin kullanım ömrünü artıracaktır. Rüzgar hızının küçük olduğu durumlarda AKS'nin başlangıç rijitliğinden dolayı sistem harekete geçmeyecektir. Bu durumda AKSM normal bir minare gibi davranacaktır. Rüzgar hızı belirli bir değeri aştığında ise sistem çalışacak ve rüzgarın dinamik özelliklerine bağlı olarak minarenin sönümleme özelliğine katkı sağlayacaktır.



Şekil 11. NM ve AKSM modelleri için ivme güç spektrum eğrileri (Acceleration power spectral curves for NM and TMDM models)



Şekil 12. Rita kasırgası etkisinde NM ve AKSM'de yer değiştirme miktarlarının karşılaştırılması
(Comparison of the displacement values in NM and TMDM models under the Rita hurricane effect)



Şekil 13. Harmonik yer hareketi etkisinde NM ve AKSM'nin davranışlarının karşılaştırılması
(Comparison of NM and TMDM behaviours under the harmonic ground motion effect)

6. HARMONİK YER HAREKETİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ
(EXAMINATION OF THE EFFECT OF HARMONIC GROUND MOTION)

Harmonik yer hareketinin NM ve AKSM üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla her iki modeli rezonans şartlarına getirecek frekanslarda kosinüs fonksiyonu şeklindeki harmonik hareket modellere temelden etki ettirilmiştir. Titreşimlerin her iki modelde oluşturdukları etkileri karşılaştırabilmek için NM modelinde önceden belirlenmiş kıyaslama noktasında oluşan yer değiştirmenin genliği bir birim olacak şekilde kosinüs fonksiyonunun genliği belirlenmiştir.

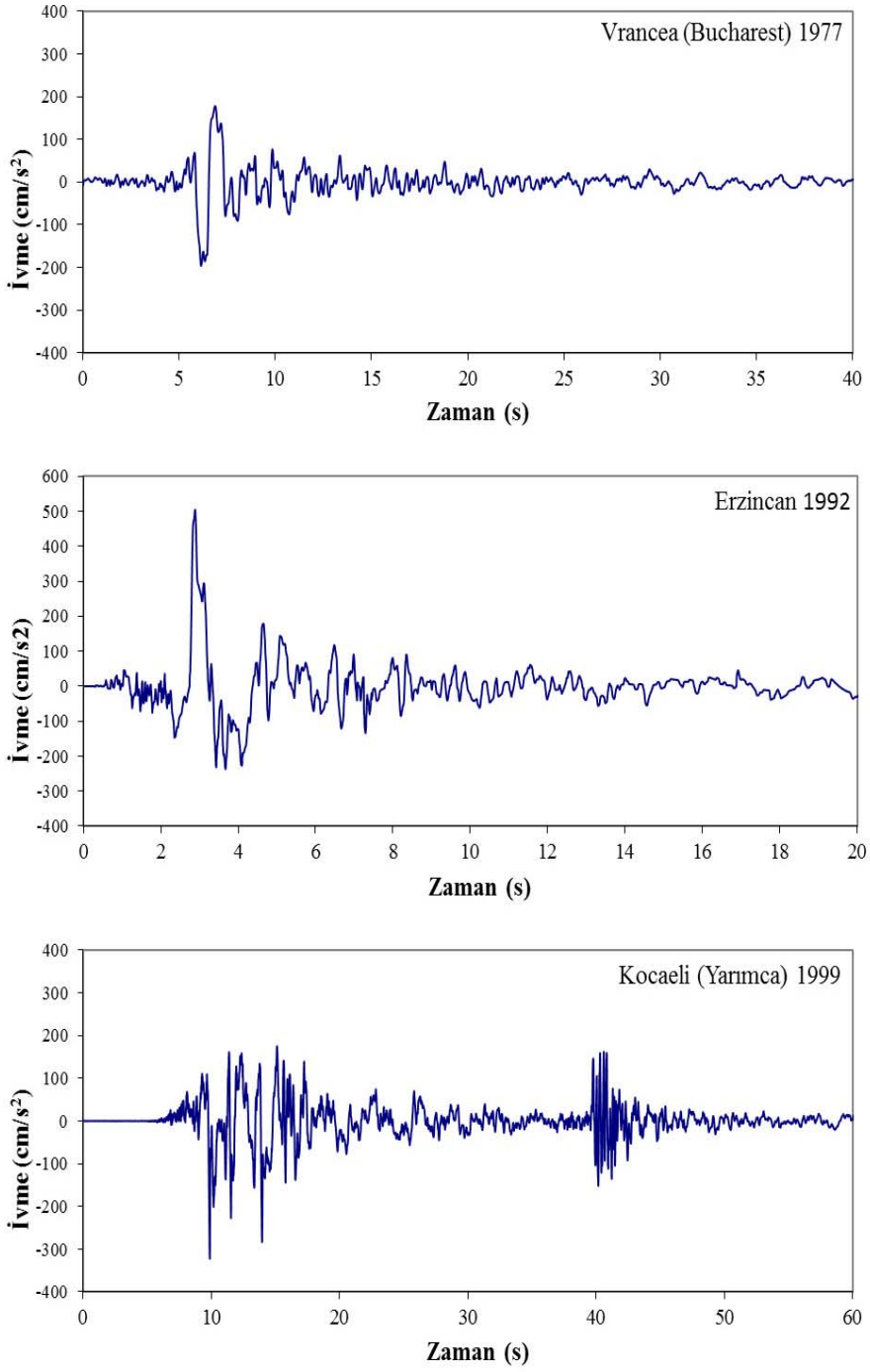
Modeller için elde edilen yer değiştirmenin zamanla değişimini gösteren grafik Şekil 13'de gösterilmiştir. Grafiğin incelenmesinden AKS'nin yerleştirildiği minare modelinde (AKSM) rezonans şartlarındaki yer değiştirmede %58 gibi önemli bir azalma oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum rezonans şartlarındaki harmonik hareketlerde AKS'nin çok iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. AKS'nin bu olumlu etkisinin rezonans şartlarından uzaklaştıkça azaldığı belirlenmiştir.

7. DEPREM ETKSİNİN İNCELENMESİ
(EXAMINATION OF THE EARTHQUAKE EFFECT)

Yapılar kullanım süreleri boyunca farklı yük etkileri tesirinde kalırlar. Bu yüklerden deprem yükleri analizi en karmaşık olan yükleme çeşididir. Deprem nedeni ile oluşacak yapısal hasarları en aza indirmek, mimar ve mühendislerin tasarım ve uygulamaya yönelik başlıca konulardan biridir [26]. Deprem etkisinin NM ve AKSM modellerindeki etkisini inceleyebilmek için farklı özellikte üç depreme ait ivme kaydı seçilmiştir. Bu kayıtlar, 1977 yılında Romanya'da meydana gelmiş olan Vrancea (Bucharest) depremine [27], 1992 Erzincan depremine ve 1999 Kocaeli depremine aittir [28]. Şekil 14' bu depremlere ait ivme kayıtları verilmiştir. Kocaeli depremine ait kayıt Yarımca istasyonunda kaydedilmiş olan kayıttır. Seçilen kayıtların özellikleri şu şekilde özetlenebilir: Vrancea ve Erzincan depremleri uzun periyotlu harmonik titreşimler içeren darbe tipi depremlerdir. Kocaeli (Yarımca) depremi ise yakın fay etkisi özelliği gösteren büyük genlikli zemin hızlarının oluştuğu bir depremi temsil etmektedir. Depremlere ait bazı bilgiler Tablo 3'de özetlenmiştir. Zeminler deprem esnasında ana kayadan gelen sismik dalgaların genliklerini büyütebilir veya sönümleyebilirler [29]. Analizler sonucunda bulunan büyüklükler minarelerin bulunduğu arazilerin özelliklerine bağlı olarak olumlu veya olumsuz etkilenebilir.

NM ve AKSM modelleri için yukarıda özellikleri anlatılan üç deprem kaydı altında doğrusal zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Minare modelleri için rüzgar etkisi altında analiz bölümünde (Bölüm 5.5) belirtilmiş olan kıyaslama noktalarının yapılan deprem analizleri altında elde edilen yer değiştirme grafikleri Şekil 15'de gösterilmiştir.

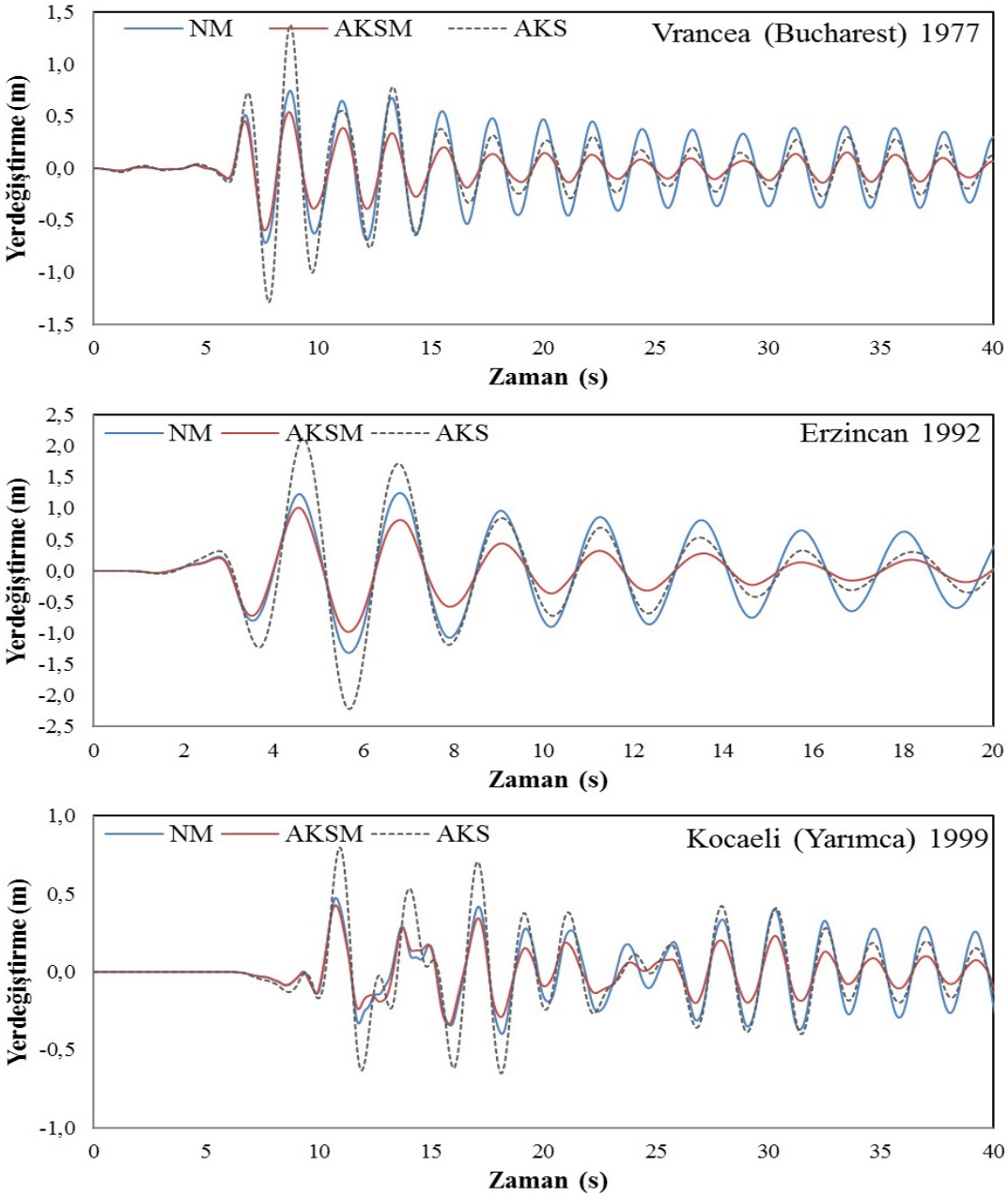
Grafiğin incelenmesinden, Vrancea depreminin uzun periyotlu ve harmonik harekete benzeyen titreşimler içermesi nedeniyle, AKS'nin bu titreşimleri sönümlendirme bakımından oldukça etkili olduğu görülmektedir. AKS sayesinde AKSM'nin yer değiştirme genliklerinde NM'ye göre %26 civarında bir azalma meydana gelmiştir. Erzincan depremiyle ilgili grafiğe bakıldığında (Şekil 15, ortadaki grafik) AKS'nin minare üzerinde (AKSM'de) Vrancea depremindekine çok benzer bir davranış sergilediği görülebilmektedir. İki depremin yukarıda belirtilmiş olan özelliklerinden dolayı bu sonucun ortaya çıktığı söylenebilir. Erzincan depremi kaydı altında AKSM'nin en büyük yer değiştirme değeri NM'ninkine göre %30 civarında az olmuştur. Yakın fay etkisi özelliği gösteren Kocaeli depreminde ise AKS'nin yapıda oluşan yer değiştirme genliklerindeki azalma üzerinde etkisi fazla olmamasına rağmen, bu depremde de AKSM'deki titreşim hareketinin NM modeline göre daha çabuk sönümlendiği görülmüştür. Anlaşıldığı gibi AKS'nin yerleştirildiği yapıya etkisi o yapıyı etkileyen dinamik dış kuvvetlerin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 14. Analizlerde kullanılan depremlere ait ivme kayıtları (Accelaration records of the earthquakes used in the analysis)

Tablo 3. Analizlerde kullanılan deprem kayıtlarının özellikleri (The properties of the earthquake records used in the analysis)

Deprem	İstasyon	Tarih	Bileşke	Büyüklük M_s	En büyük zemin ivmesi/(g)	En büyük zemin hızı (cm/s)	En büyük zemin yer degiştirmesi (cm)
Vrancea	Bucharest	04.03.1977	KG	7,5	0,198	71,9	163,1
Kocaeli	Yarımca	17.08.1999	KG	7,8	0,328	88,7	15,5
Erzincan	Erzincan	13.03.1992	KG	6,8	0,515	83,9	27,35



Şekil 15. NM ve AKSM'nin seçilen deprem kayıtları altında yer değiştirme grafikleri
(The displacement diagrams of NM and TMDM under the selected earthquake records)

Deprem hareketi sırasında yapıda oluşan yer değiştirmelerin küçük kalması ve hareketin çabuk sönümlenmesi yapının depremden daha az etkileneceği, diğer bir deyişle daha az zorlanacağı anlamına geldiğinden, AKS yerleştirilmesinin minarelerin deprem dayanımını bütün depremler için değil, bazı deprem etkileri altında iyileştirdiği söylenebilir. Dolayısıyla, birbirinden çok farklı dinamik özellikler sergileyebilen depremler gibi etkiler için AKS'nin yapı davranışı üzerindeki etkileri konusunda genel bir sonuç vermek doğru olmaz. Son olarak belirtmek gerekir ki, deprem etkileri altında AKS'lerde oluşan yer değiştirmeler bu sistemlerde kullanılmış olan izolatörlerin yer değiştirme kapasitelerini aşabilmektedir. Bu durum minareler üzerinde yapılmış olan bu çalışmada da görülmüştür (Şekil 15). Buna karşılık, izolatörlerin hasar görmemesi için yer değiştirmeleri istenilen sınırda tutacak basit bir mekanizmanın, izolatör yerleştirilmiş bina, köprü ve yüksek sanayi bacası gibi çeşitli yapılar üzerinde kolayca oluşturulabildiği de bilinmektedir.

8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Geçmişte Türkiye ve başka ülkelerde yaşanılan şiddetli rüzgarlar ve depremler nedeniyle birçok minare yıkılmış,

can ve mal kayıpları oluşmuştur. Bu durum yüksek minarelere AKS yerleştirilmesinin etkisinin ne olabileceğini belirlemeye yönelik olan bu çalışmanın yapılması fikrini ortaya çıkarmıştır. Çalışmada bir yüksek betonarme minare (NM) bir de onun AKS yerleştirilmiş olanı (AKSM) göz önüne alınıp, bunlar Rita kasırgası etkisi altında ve ayrıca üç deprem etkisi için çözümlenmiştir. Yerleştirilmiş olan AKS sayesinde AKSM'nin sönümü Rita kasırgası etkisi için NM'ye göre yaklaşık 2,4 kat artmıştır. Sönümün artması AKSM'de oluşan en büyük yer değiştirmenin NM'deki en büyük yer değiştirmeden yaklaşık % 40 kadar azalması olumlu sonucunu doğurmuştur. Ayrıca, AKS yerleştirilmiş minarenin rezonans frekansına yakın frekanslardaki harmonik yer hareketleri için tepkisinde NM'ye göre önemli ölçüde iyileşme olduğu gözlenmiştir. Deprem hareketi etkisinde ise özellikle hareketin harmonik titreşimler içerdiği durumlarda AKSM'deki yer değiştirmelerin NM'ye göre azımsanamayacak derecede azaldığı ve ayrıca yapıdaki titreşimlerin AKS sayesinde daha çabuk sönümlediği görülmüştür. AKS'nin yapının sönümüne katkısı dinamik dış etkinin özelliklerine bağlı olduğundan bütün dinamik etkiler için AKS'nin olumlu katkısı konusunda genel bir sonuç vermek yanlış olur. Ancak elde edilen bulgulara göre, yapıya AKS yerleştirilmiş olması çözümlemelerde göz önüne alınmış olan Rita kasırgası gibi şiddetli rüzgarlar ve ayrıca harmonik yer hareketleri gibi etkiler altında yapı davranışını önemli düzeyde iyileştirdiği ve oluşan yer değiştirmeleri daha çabuk sönümlediği açıkça söylenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sarkhabi A.A., Malekghasemi H., Ghaemmaghami A., Mercan O., Experimental investigations of tuned liquid damper-structure interactions in resonance considering multiple parameters, J. Sound Vib, 388, 141-153, 2017.
2. Greco R., Marano G., Fiore A., Performance-cost optimization of tuned mass damper under low moderete seismic actions, Struct. Des. Tall Special Build., 25 (18), 1103-1122, 2016.
3. Vickery B.J., Davenport A.G., An Investigation of the Behaviour in Wind of the Proposed Centropoint Tower in Sydney, Australia. Engrg. Sci. Rep. No. BLWT-1-70, University of Western Ontario, Canada, 1970.
4. Tanaka H., Mak C.Y., Effect of tuned mass dampers on wind-induced response of tall buildings, J. Wind Engrg. Ind. Aerodyn, 18, 191-195, 1983.
5. Maurizio D.A., Salvatore P. and Anna R., Dynamic response and optimal design of structures with large mass ratio TMD, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 41, 41-60, 2012.
6. Sladek J.R., Klinger R.E., Effect of tuned-mass dampers on seismic response, J. Struct. Eng., 109 (8), 2004-2009, 1983.
7. Villaverde R., Koyama L.A., Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 22, 491-507, 1993.
8. Sadek F., Mohraz B., Taylor L.W., Chung R.M., A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 26, 617-635, 1997.
9. Brownjohn J.M.W., Carden E.P., Goddard C.R., Oudin G., "Real-time performance monitoring of tuned mass damper system for a 183 m reinforced concrete chimney, J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn, 98, 169-179, 2010.
10. Dogangun A., Tuluk O.I., Livaoglu R., Acar R., Traditional Turkish Minarets on the Basis of Architectural and Engineering Concepts, 1st International Conference on Restoration of Heritage Masonry Structures, Cairo, Egypt, 1-10, 24-27 April, 2006.
11. Pekgökgöz R.K., Gürel M.A., Mammadov Z., Çili F., Dynamic analysis of vertically post-tensioned masonry minarets, J. Earthquake Eng., 17 (4), 560-589, 2013.
12. http://www.edirnetarihi.com/selimiye-camii-minareleri-yapisi-ozellikleri-ve-soylenceleri.html
13. Tabeshpour M.R., Nonlinear dynamic analysis of chimney-like towers, Asian Journal of Civil Engineering, 13 (1), 97-112, 2012.
14. Abdel-Motoal M.A., Effect of piles on the seismic response of mosques minarets, Ain Shams Eng. J., 5 (1), 29-40, 2014.
15. Güney D., Oguzmert M., The Investigation of the Dynamic Behavior of Historical Masonry Minarets, Studies on Historical Heritage (SHH07), Antalya, Turkey, 519-526, 17-22 September, 2007.
16. Bakre S.V., Jangid R.S., Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system, Struct. Control Health Monit., 14, 448-470, 2007.
17. http://istanbulavrupa.vgm.gov.tr/editor/file/Vak%C4%B1f%20Restorasyon%20Y%C4%B1ll%C4%B1%C4%9F%C4%B1/SAYI%201/1006-istanbul%20minareleri.pdf
18. Türkeli E., Livaoğlu R., Doğangün A., Dynamic response of traditional and buttressed reinforced concrete minarets, Eng. Fail. Anal, 49, 31-48, 2015.
19. Connor JJ., Introduction to Structural Motion Control, Prentice Hall Pearson Education, Inc., Michigan University, 2003.
20. Huang W., Gould P.L., 3D Pushover analysis of a collapsed reinforced concrete chimney, Finite Elem. Anal. Des., 43 (11-12), 879-887, 2007.
21. Sabuncu Ö., Kaçın S., Gürsoy S., Geneş M.C., Mevcut Bir Su Deposunun Dinamik Özelliklerinin Titreşim Kayıtları ile Belirlenmesi, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay, Türkiye, 25-27, Eylül, 2013.
22. Çalık İ., Bayraktar A., Türker T., Tarihi Yığma Yapıların Dinamik Karakteristiklerine Restorasyon Etkisinin Çevresel Titreşim Yöntemiyle Belirlenmesi: Rize Merkez Büyük Gülbahar Camisi Örneği, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Hatay, Türkiye, 25-27, Eylül, 2013.
23. http://www.ozelliklerinedir.com/ulkemiz-en-yuksek-ve-en-dusuk-sicakliklar-ile-en-yuksek-ve-en-dusuk-ruzgar-hizlari/
24. http://www.ndbc.noaa.gov/hurricane /2005/rita

25. ASCE 7-05, Minumum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2006.
26. Gerek E., Soyluk A., Investigation of earthquake resistance at primary school buildings in Turkey, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 485-490, 2016.
27. National Seismic Network for Buildings (RNSC), Accelerograms Recorded in RNSC, Retrieved from http://www.incerc20004.ro/seismic-network.htm.
28. Pasific Earthquake Engineering Research Center (PEER), Retrieved from http://peer.berkeley.edu
29. Sönmezer Y.B., Akbaş S.O., Işık NS., Assesment of the peak accelaration amplification ratio and fundamental period properties for the Kırıkkale province settlement area, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (4), 711-721, 2015.