

TARİHİ YAPILARIN DEPREM GÜVENLİĞİNİN SAPTANMASI İÇİN GELİŞTİRİLEN DOĞRUSAL OLMAYAN İKİ YÖNTEM VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Dr. İnsan Engin BAL

Araştırmacı, EUCENTRE, Pavia, İtalya

Prof. Dr. F. Gülten GÜLAY

İstanbul Teknik Üniversitesi

1. Giriş

Günümüzde tarihi yapıların korunması ve deprem yükü altındaki davranışı özellikle ülkemiz gibi deprem tehlikesi altındaki bölgelerde büyük önem taşımaktadır. Ancak gerek akademik alanda ve gerekse pratik mühendislik uygulamalarında bu tür yapıların karmaşık deprem davranışlarının tahmini için genel ve kolay uygulanabilir bir yöntem geliştirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle bu tür yapıların değerlendirmesi çoğunlukla doğrusal analiz yaklaşımları ile yapılmaktadır. Doğrusal analiz yöntemi şüphesiz yapının davranışı konusunda önemli bir bilgi kaynağı oluşturmaktadır ancak daha gerçekçi bir yaklaşım olan doğrusal olmayan çözümlere alternatif olmaktan uzaktır.

Bu çalışmada tarihi yapıların analizi için basit ancak güvenilir, doğrusal olmayan iki yöntem sunulmuş, bunlardan özellikle ikincisinin yığma tarihi yapılar için kullanımı önerilmiştir. Önerilen doğrusal olmayan yaklaşımda her adımda elde edilen doğrusal analiz sonuçları birleştirilerek yapının genel davranışına ulaşılmaktadır. Yöntemin tarihi yapılara uygulanması ile sağlanan kazanç mühendisin ya da araştırmacının bilgisayar hesaplamaları ile ilgili harcadığı çabayı en aza indirmesi, ancak aynı zamanda yapıda beklenen davranışın ve

mekanizmaların daha doğru elde edilmesi şeklinde özetlenebilir.

Önerilen doğrusal olmayan yöntemlerin uygulanması için İstanbul'da tarihi yarımada bulunan Beyazıt ve Atik Ali Paşa Camileri olmak üzere iki örnek yapı ele alınmıştır. Bu yapıların malzeme özellikleri ile dinamik karakteristikleri daha önce Yıldız Teknik Üniversitesi tarafından yapılan çalışmalardan elde edilmiştir (Arun ve diğerleri, 2007; Thaskov ve Krstevska, 2006). Önce bu yapılarda kullanılan eleman ve malzemeler için limit durumlar tarif edilmiş, matematik modellerin doğrulanması için doğrusal dinamik analizlerin nasıl kullanıldığı açıklanmıştır. Çalışmada her iki caminin daha önceki depremlerde hasar görüp onarılan ve güçlendirilen ana aksları bilgisayar ortamında modellenerek önerilen doğrusal olmayan yöntemler bu akslar üzerinde uygulanmıştır (Gülay ve Bal, 2009).

2. Doğrusal Analizler

Doğrusal (elastik) analiz tarihi yığma yapılar için oldukça yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntemde tarihi yapı elastik ve çoğu zaman izotropik malzeme özellikleri kullanılarak modellenir ve sabit yükler ile deprem yüklerinin kombinasyonları altında yapı elemanlarında daha önceden saptanan limit durumların aşılıp aşılmadığı kontrol edilir. Ancak burada en büyük problemlerden

biri kullanılacak yapı davranış veya yatay yük azaltma katsayısı R'nin saptanmasıdır. Elde edilen tüm gerilmelerin ve hasar tespitlerinin, tarihi yapılar için herhangi bir geçerliliği bulunmayan bu katsayı kabulüne doğrudan olarak bağlı oldukları bilinmektedir. Yani tarihi bir yapı için R katsayısının seçimi neredeyse sübjektif olmakta, dolayısı ile elde edilen sonuçlar da tartışmalı olmaktadır. Bunun yanısıra, uygun bir R seçilse bile, doğrusal analizlerle yapının deprem gibi tasarım yüklerinden daha büyük ve belirsiz düzeyde etkin olabilecek yükler altındaki davranışı (sünekliliği, muhtemel deplasmanları ve dayanım kaybı) hakkında net bilgiler elde edilemez.

Çalışma kapsamında önce malzeme modellerinin kalibre edilmesi amacıyla iki adet örnek cami seçilmiş (Beyazıt ve Atik Ali Paşa Camileri) ve bu yapıların bilgisayar ortamında sonlu eleman tekniği kullanılarak üç boyutlu modelleri kurulmuştur. Bu modellerin kurulması için malzeme deney sonuçları ve modellerin doğrulanması için de serbest titreşim deney sonuçları kullanılmıştır (Arun ve diğerleri, 2007; Thaskov ve Krstevska, 2006). Bu üç boyutlu doğrusal modellerden yapının genel durumu ve dinamik karakteristikleri ile mod şekilleri hakkında bir fikir edinmek mümkün olmuştur (bkz. Beyazıt ve Atik Ali Paşa Camileri için sırasıyla **Şekil 1**, **Şekil 2** ve **Şekil 3**).

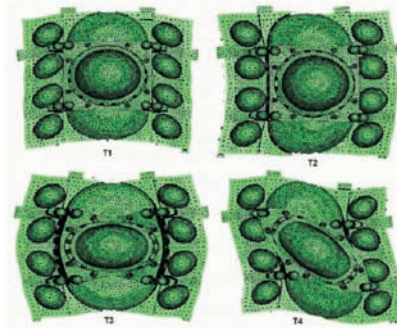


Şekil 1. Beyazıt Camii 3 boyutlu modeli (solda) ile birinci (ortada) ve ikinci (sağda) modlara ait kesit görüntüleri

Yapılan analizlerde elde edilen periyot değerleri, deneysel olarak bulunan periyot değerleri ile karşılaştırılmıştır (bkz. **Tablo 1** ve **Tablo 2**). Analizlerden bulunan periyotların deneysel olarak bulunan periyotlardan daha kısa oldukları gözlenmiştir. Bu durum, bu iki yapıda zamanla meydana gelen aşınmalar, malzeme dayanım kayıpları, çatlaklar gibi sebepler ile yapı-zemin etkileşimine bağlanmıştır. Ancak yapılan dinamik analizler ve bu karşılaştırmalar sonucunda gerek malzeme özelliklerinin ve gerekse oluşturulan matematik modellerin, doğrusal olmayan analizlere devam edilebilmesi için yeter düzeyde doğru oldukları kabul edilmiştir.

3. Doğrusal Olmayan Analizler

Çalışmada iki ayrı doğrusal olmayan yaklaşım açıklanmış, basitleştirilmiş yöntem olarak isimlendirilen ilki Beyazıt Camii üzerinde uygulanmış, ikincisi ise Atik Ali Paşa Camii üzerinde uygulanarak uygulamada kullanılmak üzere önerilmiştir.

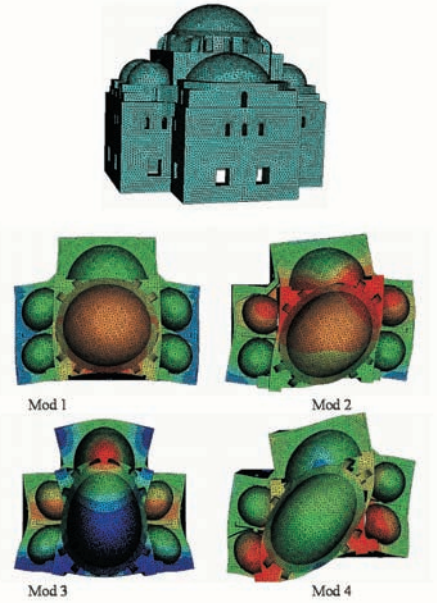


Şekil 2. Beyazıt Camii'ne ait ilk dört mod şekli

3.1. Birinci Yaklaşım (Basitleştirilmiş Yöntem)

Çalışma kapsamında geliştirilen ve Beyazıt Camii'ne uygulanan ilk yaklaşım diğerine göre daha basit ve elle uygulanabilecek bir yöntemdir. Ancak hata payı ileride açıklanan ikinci yöntemle göre daha yüksektir. Buna benzer bir analiz daha önce Şahin ve Mungan tarafından (2005) Ayasofya için yapılmış ve oldukça değerli sonuçlar elde edilmiştir.

Analiz önce zati yüklerin %80'inin uygulanması ve olası çatlakların



Şekil 3. Atik Ali Paşa Camii 3 boyutlu modeli (en üstte) ile ilk dört mod şekli (diğerleri)

kontrolü ile başlar. Bir sonraki adımda zati yükün tamamı yüklerin ve analize devam edilir. İlerleyen her adımda zati yük etkileri sabit tutularak, yatay yükleme 0.05 g şeklinde artan ivme aralıkları ile bir miktar artırılır. Modal birleştirme analizi yapıldığı için yatay yükler her bir elemanın ağırlığı ve mod şekilleri ile mod katılım oranları nispetinde yapıya dağılır. Burada önemli olan yapı elemanlarının her adımı takiben tek tek kontrol edilmesi ve eleman rijitliklerinde gerekli değişikliklerin -eğer varsa- yapılmasıdır. Her adım sonunda her bir eleman limit durumlara göre

Mod	Deneysel periyot (sn)	Analizlerden bulunan periyot (sn)	Deneysel ve analiz sonuçları arasındaki % hata
1	0.384	0.337	12
2	0.384	0.318	17
3	0.250	0.205	18

Tablo 1. Beyazıt Camii dinamik karakteristikleri

Mod	Deneysel Periyot (sn)	Analizlerden bulunan periyot (sn)	Deneysel ve Analiz sonuçları arasındaki % hata
1	0.333	0.284	15
2	0.294	0.244	17
3	0.200	0.170	15

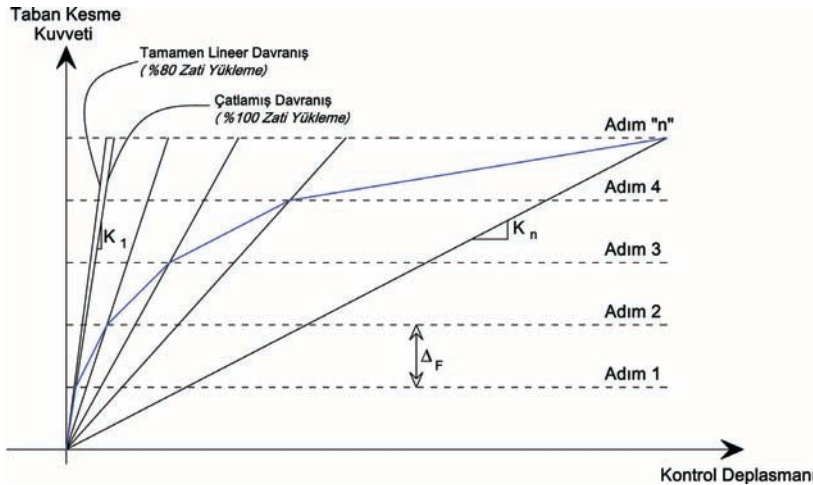
Tablo 2. Atik Ali Paşa Camii dinamik karakteristikleri

	Açıklama	Küfeki Yığılma	Tuğla Yığılma	Gergi Çubukları
f_{my}	Yatay derzlere paralel basınç dayanımı	22.8 MPa	5.0 MPa	-
f_{mx}	Yatay derzlere dik basınç dayanımı	22.8 MPa	2 MPa	-
f_{ty}	Yatay derzlere paralel çekme dayanımı	1.8 MPa	1 MPa	-
f_{tx}	Yatay derzlere dikçekme dayanımı	0 MPa	1 MPa	-
μ	Sürtünme katsayısı	0.70	0.50	-
c / f_{mx}	Kohezyonun f_{mx} 'e oranı	0.25	0.25	-
E	Elastisite modülü	14 830 MPa	3 500 MPa	180 000 MPa
T_{cr}	Kritik çekme kuvveti	-	-	390.0 kN
P_{cr}	Kritik basınç kuvveti	-	-	509.8 kN

Tablo 3. Beyazıt Camii'nin doğrusal olmayan hesaplarında kullanılan malzeme limit durumları

kontrol edilir ve eğer eleman limit durumu aşmış ise ya gerekli elemanlarda rijitlik bir miktar azaltılır veya eleman tamamen modelden silinir. Bu analiz Beyazıt Camii'ne uygulanmış ve kullanılan limit durumlar **Tablo 3**'de verilmiştir. Analiz adımlarından elde edilen

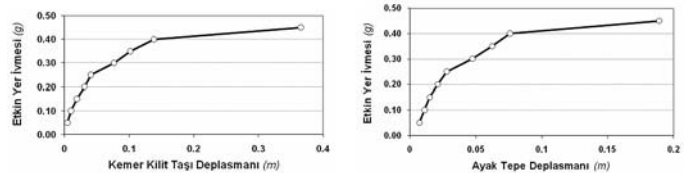
taban kesme kuvveti - kontrol deplasmanı grafiğinin şematik olarak gösterimi **Şekil 4**'de görülmektedir. Beyazıt Camii'nin ana çerçevesine (bu çerçeve **Şekil 5**'de verilmiştir) ait kapasite diyagramı da **Şekil 6**'da verilmiştir. Yöntemi özetleyen bir akış



Şekil 4. Doğrusal olmayan basitleştirilmiş 1'inci yaklaşıma ait şematik kapasite eğrisi



Şekil 5. Beyazıt Camii'nde doğrusal olmayan analizi yapılan çerçeve



Şekil 6. Beyazıt Camii için Etkin Yer İvmesi - Kemer Kilit Taşı Yatay Deplasmanı (solda) ile Etkin Yer İvmesi - Ayak Tepe Yatay Deplasmanı (sağda) grafikleri

diyagramı ise **Şekil 7**'de sunulmuştur. Analizlerde SAP2000 (CSI, 2008) yapı analizi paketi kullanılmıştır.

Önerilen bu yöntemin dezavantajları şöyledir:

- Tek eksenli malzeme gerilme-şekil değiştirme bağıntıları kullanılmıştır.
- Ara adımlarda elemanların gerilme durumları korunmayıp, her adımda elemanlar yeniden yüklenmektedir.
- Analizin her adımının elle kontrol edilmesi analizin daha yavaş ilerlemesine neden olmaktadır.

Yöntemin avantajları ise şöyledir:

- Birden fazla mod katkısı dikkate alınabilmektedir.
- Modun yükleme ile değişimine hassastır (Adaptive Pushover)
- Güvence saptaması olarak değil ancak karşılaştırma tipi analizlerde daha az hataya sebebiyet verecektir.

3.2. İkinci Yaklaşım (Önerilen Yöntem)

Önerilen ikinci yöntemde analizi yapılan tüm adımlar yeteri kadar küçük elastik adımlar şeklindedir. Her bir adımda OpenSees yapı analiz programı (2008) ile elde edilen model, yine elastik olarak koşular. Ancak her bir adım koşulmadan önce, her elemanın daha önceden belirlenen limit durumu aşıp aşmadığı kontrol edilir. Bunun yapılabilmesi için tuğla ve

	Açıklama	Küfeki Yığıma	Tuğla Yığıma	Gergi Çubukları
f_{my}	Yatay derzlere paralel basınç dayanımı	28.3 MPa	5.0 MPa	-
f_{mx}	Yatay derzlere dik basınç dayanımı	28.3 MPa	2 MPa	-
f_{ty}	Yatay derzlere paralel çekme dayanımı	1.8 MPa	1 MPa	-
f_{tx}	Yatay derzlere dik çekme dayanımı	0 MPa	1 MPa	-
μ	Sürtünme katsayısı	0.70	0.50	-
c / f_{mx}	Koehazyonun f_{mx} 'e oranı	0.25	0.25	-
E	Elastisite modülü	15 530 MPa	2 500 MPa	180 000 MPa
T_{cr}	Kritik çekme kuvveti	-	-	227.7 kN
P_{cr}	Kritik basınç kuvveti	-	-	616.9 kN

Tablo 4. Atik Ali Paşa Camii'nin doğrusal olmayan hesaplarında kullanılan malzeme limit durumları

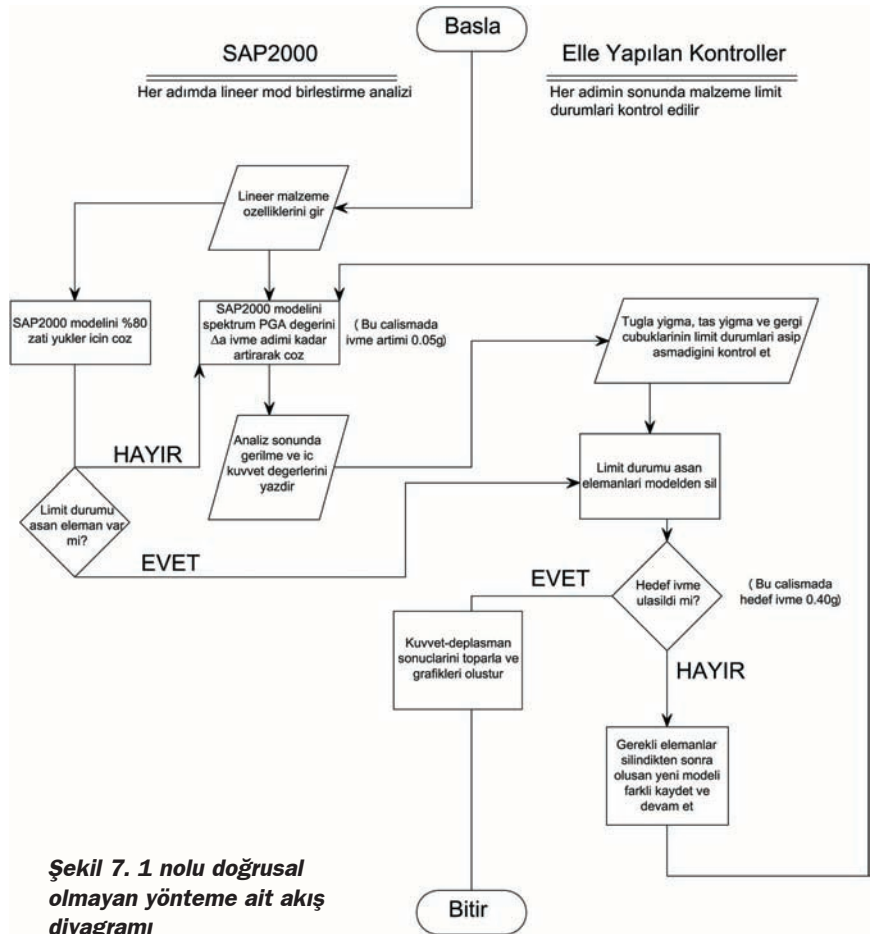
küfeki ile inşa edilen yığıma malzemeye ait akma yüzeyleri oluşturulmakta ve her bir elemanın ortalama gerilme durumu (8 düğüm noktasındaki gerilmelerin ortalaması) bu akma yüzeyi ile karşılaştırılmaktadır. Akma yüzeyine ve hasarın belirlenmesine ait detaylar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir. Bir önceki yöntemden farklı olarak, bir sonraki adımda bir önceki adımda elde edilen deplasman durumu başlangıç değeri olarak alınır ve işleme öyle devam edilir.

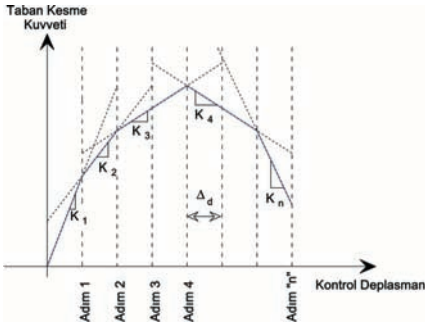
Bu çalışma kapsamında yapılan modellerde 8 düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen yöntem, üç boyutlu yapıda birbirine dik iki planda (X-Z ve Y-Z planları) birbirinden bağımsız iki akma hipotezi kullanılmasıdır. Akma hipotezleri genelde asal gerilmelere bağlı olarak tarif edilmişlerdir. Yığıma malzemedeki asal gerilmelerin harç düzlemi ile yaptığı açıya bağlı olarak akma yüzeyi değişmektedir. Ancak çalışma kapsamında kullanılan akma yüzeyi (Ganz ve Thürlimann tarafından 1982'de geliştirilen ve Lu ve Heuer tarafından 2007'de güncellenen akma yüzeyi) normal gerilmeler ve kayma gerilmesine bağlı olarak tarif

edildiği için, bu problem ortadan kalkmaktadır (σ_1 , σ_2 ve θ açısı yerine σ_x , σ_z ve τ_{xz}). Burada kullanımı önerilen akma hipotezi Şekil 9'da görülebilir.

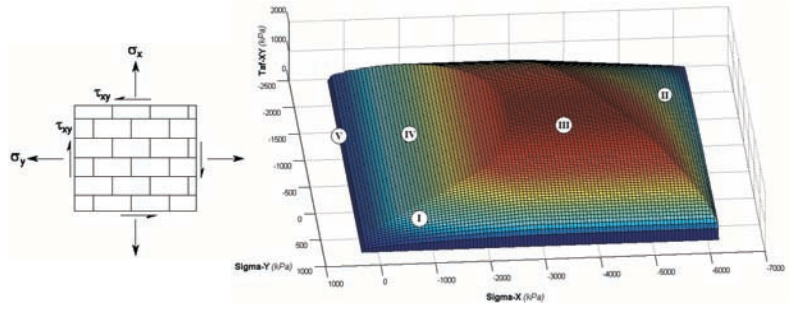
Kullanımı önerilen bu ikinci yöntem Atik Ali Paşa Camii'nin onarım ve güçlendirme gördüğü tahmin edilen (Yüksel, 1983) aksında uygulanmış ve kullanılan limit durumlar Tablo 4'de verilmiştir. Yöntemden elde edilecek şematik kapasite diyagramı Şekil 8'de görülmektedir. Yapının OpenSees programında oluşturulan modeli Şekil 10'da görülebilir.

Burada ayrıca doğrusal analizlerle elde edilmesi mümkün olmayan mevcut gergi çubuklarının bu yapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için analizler bir kez kemerler arası gergi çubuklarının olduğu ve birkez de olmadığı durumlar için tekrarlanarak taban kesme kuvveti ile kemer taç deplasman eğrileri elde edilmiştir (Şekil 11). Her iki durum için elde edilen taban kesme





Şekil 8. Doğrusal olmayan ikinci yaklaşıma ait şematik kapasite eğrisi



Şekil 9. Yığma üzerinde kabul edilen yön tayini (sol) ve akma yüzeyinin 3 boyutlu hali (sağ)

kuveti tepe deplasmanı eğrileri ise **Şekil 11**'de verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi gergi çubuklarının varlığı dayanıma çok fazla katkı yapmasa da yapı sünekliğini 2 kattan fazla artırmıştır. Bu yöntemin çalışmasını açıklayan bir akış diyagramı **Şekil 12**'de verilmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntemin en büyük avantajı hızlı ve her adımda muhakkak yakınsayan bir analiz tipi olmasıdır. Kuşkusuz yöntemin birtakım dezavantajları da vardır. Bunlardan en önemli iki tanesi şöyledir:

- Yapının birden çok modda meydana gelen salınımı değil sadece tek bir yükleme profiline göre meydana gelecek salınımı (genelde 1. mod) dikkate alınmaktadır (bu problem yöntemin ve ilgili bilgisayar programının gelecekte daha ilerletilmesi ile aşılabilir).

- Birbirine dik düzlemlerde birbirleri ile bağımsız akma davranışları kullanılmıştır.

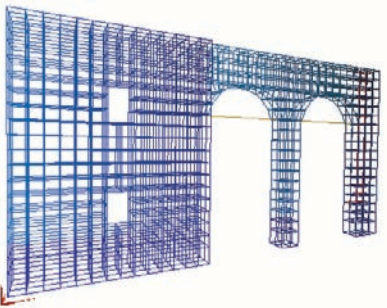
4. Sonuçlar

Sunulan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

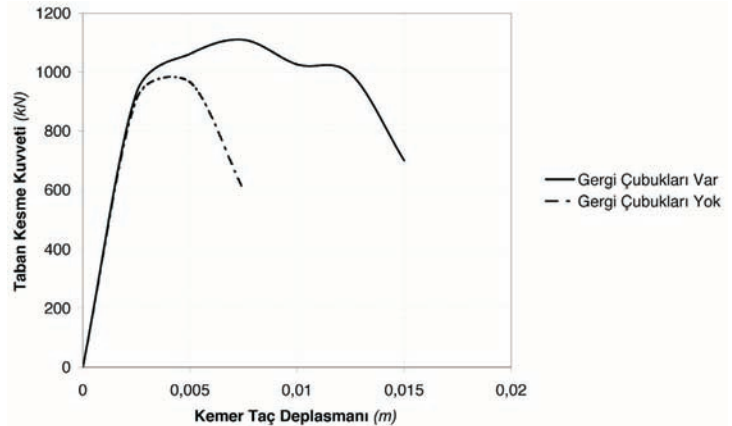
- Tarihi yığma yapıların deprem güvenliğinin değerlendirilmesi için uygulanabilecek iki ayrı doğrusal olmayan yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen 1. basitleştirilmiş doğrusal olmayan yöntem Beyazıt Camii'nin ana aksını oluşturan çerçeveye uygulanmış ve artan yatay yükler altında yapının davranışı konusunda bilgi edinilmiştir. Geliştirilen ve önerilen ikinci doğrusal olmayan yöntem de Atik Ali Paşa Camii'nin ana akslarından birine bir kez gergi çubukları ile, bir kez de gergi çubukları olmadan uygulanmıştır

(bkz. **Şekil 10** ve **Şekil 11**).

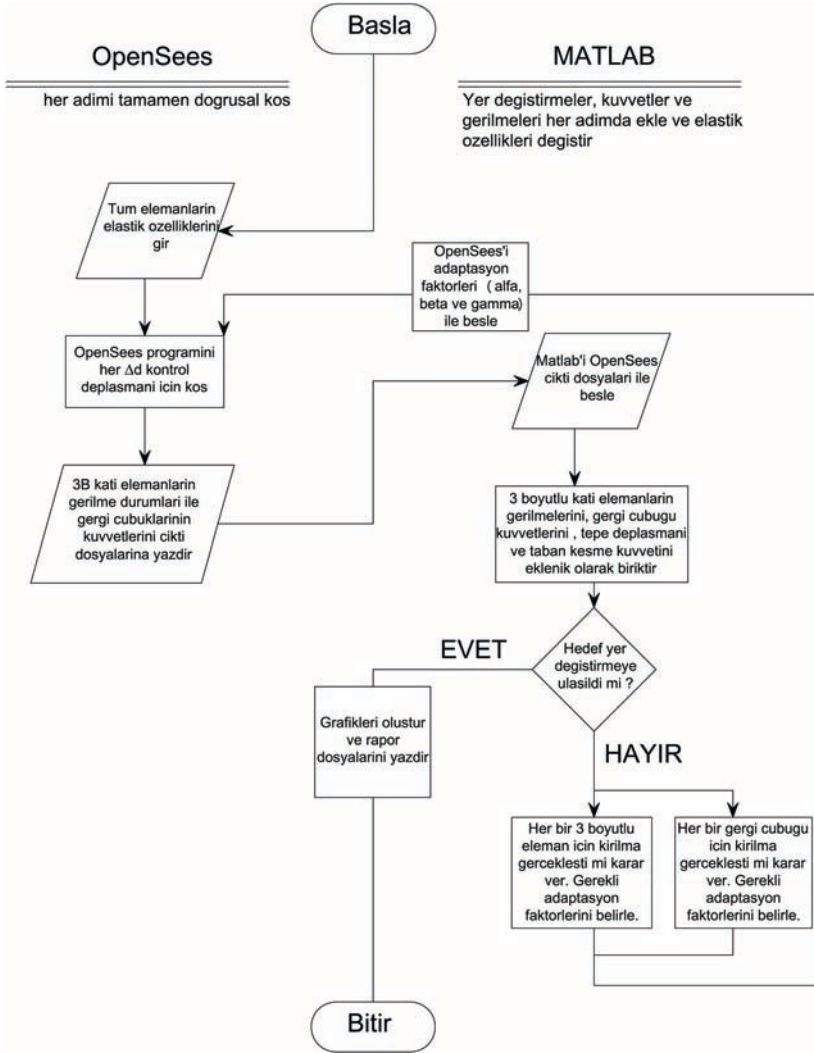
- Geliştirilen ikinci yaklaşımın malzeme davranışını daha gerçekçi yansıtması, ayrıca daha kolay ve hızlı uygulanabilir olması nedeniyle, bu tür yığma yapılar için kullanılabileceği belirlenmiştir. Ancak yöntem ve bunun için hazırlanan bilgisayar programı daha da geliştirilebilir ve yöntemin geriye kalan zayıflıklarından bir kısmı giderilebilir.
- Dolayısıyla çalışma öncesi başlangıç girdilerinin (malzeme ve zemin parametreleri) gerçekçi olarak tespit edilmesi koşulu ile, benzer tarihi Bizans ve Osmanlı yapıları için kullanılabilecek genel bir doğrusal olmayan hesap yöntemi ve algoritması geliştirilerek önerilmiştir. Benzer yöntem, kendine özgü limit durumları ve malzeme değerleri belirlendiği



Şekil 10. Atik Ali Paşa Camii'nin ana taşıyıcı aksının OpenSees ile kurulan modeli



Şekil 11. Önerilen doğrusal olmayan analiz yöntemiyle elde edilen Atik Ali Paşa Camii'nin kapasite eğrisi



Şekil 12. Önerilen ikinci doğrusal olmayan yöntemle ait akış diyagramı

sürece, diğer tarihi yapılarda da kullanılabilir.

5. Teşekkür

Bu çalışmada verilen sonuçlar daha önce yazarlar tarafından tamamlanmış olan ve Proje İstanbul kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nce desteklenen bir araştırma projesinden alınmıştır, bu katkılarından ötürü teşekkür ederiz. Ayrıca, örnek yapılarla ilgili malzeme deney sonuçları ile serbest titreşim deney sonuçları Yıldız Teknik Üniversitesi'nden **Prof. Dr. Fevziye AKÖZ** ile **Prof. Dr. Görün ARUN** tarafından sağlanmıştır. Çalışmaya

bu değerli katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Son olarak, Beyazıt Camii'nin 3 boyutlu modellemelerinde yer alan **Dr. Oğuz Bahadır ŞADAN** ile Atina Teknik Üniversitesi'nden **Dr. Eleni SMYROU**'ya da teşekkürü bir borç biliriz.

6. Referanslar

CSI (2008) SAP 2000 Advanced v 9.0.1. Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc. (www.csiberkeley.com).

Ganz HR, Thürlimann B. 'Versuche über die Festigkeit von zweiachsigen beanspruchtem Mauerwerk'.

Report No. 7502-3, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zurich, 1982.

Gülay, F.G. ve Bal, İ.E. (2009) "Mimar Sinan Öğretisi Işığında İstanbul'daki Tarihi Camilerin Deprem Güvenliğinin Saptanması İçin Lineer Olmayan Bir Böntem Önerisi ve Örnek Uygulama", İstanbul Büyükşehir Belediyesi Proje İstanbul proje sonuç raporu (ayrıca internette: www.enginbal.net/Gulay_Bal_2009_Projem_Istanbul.pdf).

Lu, S., and Heuer, R. (2007) "Seismic assessment of lifeline masonry structures using an advanced material model", Structural Control and Health Monitoring, (14), 321-332.

OpenSees (2008) Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, US (opensees.berkeley.edu).

Şahin, M. and Mungan, I. (2005) "Dynamic Performance of the Roof of Hagia Sophia Considering Cracking", International Journal of Space Structures, 20, 3, pp 135-141.

Arun, G., Aköz, F. (2007) "Technical Report for the TÜBİTAK Project by Yıldız Technical University and University of Ss. Cyril & Methodius", No: İÇTAG-I586/MAK 1021055.

Thaskov L and Krstevska L (2006) "Ambient vibration testing of historical monuments", Proceedings of the 1st ECEES, Geneva, Switzerland, pp 543.

Yüksel, A. (1983) "2. Beyazıt ve Yavuz Selim Devri Osmanlı Mimarisi", İstanbul Fetih Vakfı Yayınları, Çemberlitaş, İstanbul.