

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN LİNEER OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Öznur AKDENİZ
(07115102)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Mekanik

Danışman: Prof. Dr. Yusuf CALAYIR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Ocak 2011

OCAK-2011

**TARİHİ YAPILARIN LİNEER OLMAYAN
DİNAMİK ANALİZİ**

Müh. Öznur AKDENİZ

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf CALAYIR

OCAK-2011

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN LİNEER OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Öznur AKDENİZ
(07115102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Ocak 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Mart 2011

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yusuf CALAYIR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ali Sayıl ERDOĞAN (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Orhan ÇAKAR (F.Ü)

ÖNSÖZ

Bu çalışmaya başlamamda ve çalışma esnasında benden her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen değerli hocam Sayın **Prof. Dr. Yusuf CALAYIR'a** ve **Yrd. Doç. Muhammed KARATON 'a**, **Dr. Erkut SAYIN'a**, **Arş. Gör. Burak YÖN'e**, **Arş. GÖR. Mesut GÖR'e** ve her şeyimi onlara borçlu olduğum çok değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Öznur AKDENİZ

Elazığ, 2011

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLOLAR LİSTESİ.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Önemi.....	1
1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmaları.....	1
1.3. Tezin Kapsamı.....	4
2. TARİHİ YAPILARDA TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI VE KULLANILAN MALZEMELER.....	5
2.1. Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları.....	5
2.1.1. Temeller.....	5
2.1.1.1. Müttemadi Temeller.....	5
2.1.1.2. Tekil Temeller.....	5
2.1.1.3. Radye Temeller.....	6
2.1.2. Taşıyıcı Duvar.....	6
2.1.2.1. Kaba Yonu Taş Duvar.....	6
2.1.2.2. Sıfır Derz Taş Duvar.....	7
2.1.2.3. Tuğla Duvar.....	7
2.1.2.4. Kenet Demiri.....	7
2.1.2.5. Zıvana Demiri.....	7
2.1.3. Kemerler.....	8
2.1.4. Kubbeler.....	9
2.1.5. Tonoz Bingi (Tromp).....	9
2.1.6. Küresel Bingi (Pandatif).....	9
2.1.7. Türk Üçgeni.....	10
2.1.8. Payanda.....	10

2.1.9. Minareler.....	10
2.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler.....	11
2.2.1. Doğal Taşlar.....	11
2.2.2. Harman Tuğlası (Horasan Tuğlası).....	12
2.2.3. Kireç.....	12
2.2.4. Su.....	13
2.2.5. Agrega.....	13
2.2.6. Katkı Malzemeleri.....	14
2.2.7. Harç.....	14
2.2.8. Kireç Harcı.....	15
2.2.9. Horasan Harcı.....	15
2.2.10. Sıva.....	15
3. TARİHİ YAPILARDA OLUŞAN HASARLAR, ONARIM ve GÜÇLENDİRME.....	17
3.1. Tarihi Yapılarda Oluşan Hasarların Nedenleri.....	17
3.2. Tarihi Yapılarda Onarım ve Güçlendirme.....	18
3.2.1. Temellerin Onarım ve Güçlendirilmesi.....	18
3.2.1.1. Temel Zemininin Güçlendirilmesi.....	18
3.2.1.2. Drenaj Tekniği.....	19
3.2.2. Taşıyıcı Duvar Güçlendirilmesi.....	19
3.2.3. Kemerlerin Onarılması.....	20
3.2.4. Tonozların Güçlendirilmesi.....	21
3.2.5. Kubbelerin Onarılması.....	21
3.2.6. Minarelerin Güçlendirilmesi.....	22
3.2.7. Fil Ayaklarının Güçlendirilmesi.....	22
4. YIĞMA YAPILARDA KULLANILAN MODELLEME YÖNTEMLERİ.....	23
4.1. Yığma Yapı Modelleme Teknikleri.....	23
4.1.1. Detaylı Mikro Modelleme.....	24
4.1.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme.....	24
4.1.3. Makro Modelleme.....	25
5. MALATYA ULU CAMİ TARİHÇESİ VE YAPI ÖZELLİKLERİ.....	26
5.1. Malatya Ulu Caminin Tarihçesi.....	26

5.2. Malatya Ulu Caminin Yapısal Özellikleri	26
5.3. Yapı Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	32
6. MALATYA ULU CAMİSİNİN DEPREM DAVRANIŞI.....	33
6.1. Malatya Ulu Caminin Sonlu Elemanlar Modeli ve Analizi.....	33
7. SONUÇLAR.....	70
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	74

ÖZET

Tarihi yapılar kültürel miras özelliğine sahip korunması gereken yapılardır. Bu mirasın gelecek kuşaklara özellikleri bozulmadan aktarılabilmesi için söz konusu yapıların geometrik ve malzeme özelliklerinin ayrıntılı olarak bilinmesinin yanında, uygun modelleme teknikleri kullanılarak yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi ve analiz sonuçlarına bağlı olarak gerekli görülen yapıların onarım ve güçlendirmelerinin yapılması gerekir.

Bu çalışmada; tarihi yapılarda taşıyıcı sistem elemanları ve kullanılan malzemeler hakkında bilgi verildikten sonra, tarihi yapılarda oluşan hasarlar, onarım ve güçlendirme ile yığma yapılarda kullanılan modelleme yöntemleri kısaca anlatılmıştır. Sayısal uygulama için 1224 yılında yığma bir yapı olarak inşa edilen Malatya Ulu Cami seçilerek, bu yapının lineer ve lineer olmayan analizleri 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi ivme kayıtları kullanılarak yapılmıştır. Cami, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makro modelleme yaklaşımı ile modellenmiş ve ANSYS paket programı yardımıyla çözümleri elde edilmiştir. Sonuçlar grafikler halinde sunularak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tarihi Yapılar, Makro Modelleme, Lineer Olmayan Dinamik Analiz

ABSTRACT

Nonlinear Dynamic Analysis of Historical Structures

Historical structures are in need of protection, which have cultural heritage. It is needed to know geometrical and material characteristics of these structures. Besides this knowledge, structural analysis must be performed using appropriate modeling techniques. Necessary repair and strengthening must be made depending on the results of the analysis of structures in order to transfer historical structures to future generations without any deformation.

In this study, damages occurred at the historical structures, repair and strengthening of these structures and modeling methods used in masonry structures are briefly explained after structural components and materials used in historic buildings are given. Great Mosque of Malatya, which is a masonry building and built in 1224, has been selected for numerical application. This building's linear and non-linear analyses are carried out by using the acceleration records of Bingöl earthquake, which has occurred on 01 May 2003. The mosque is modelled with finite element method using the macro-modeling approach. Solutions are obtained using ANSYS software package. The results presented in graphs are evaluated.

Key words: Historical Buildings, Macro Modeling, Nonlinear Dynamic Analysis

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Tahfif Kemerİ.....	8
Şekil 4.1. Yığma Yapıların Modelleme Teknikleri.....	24
Şekil 5.1. Malatya Ulu Cami Dış Görünüşü.....	27
Şekil 5.2. Malatya Ulu Cami İç Görünüşü.....	28
Şekil 5.3. Malatya Ulu Cami Avlu Kemerİ Görünüşü.....	28
Şekil 5.4. Malatya Ulu Cami Minare Görünüşü.....	29
Şekil 5.5. Malatya Ulu Cami Avlu Görünüşü.....	29
Şekil 5.6. Malatya Ulu Cami TonoZ Görünüşü.....	30
Şekil 5.7. Malatya Ulu Cami Çini Motİfleri.....	30
Şekil 5.8. Malatya Ulu Cami Kapatılan Güney Kapısının Görünüşü.....	31
Şekil 5.9. Malatya Ulu Cami Kubbe Görünüşü.....	31
Şekil 6.1. Malatya Ulu Cami Sonlu Elemanlar Modeli.....	34
Şekil 6.2. Bingöl Depremi İvme Kayıtları	35
Şekil 6.3. Malatya Ulu Cami 4. ve 14. mod Şekİlleri.....	37
Şekil 6.4. Yer Değİştİrmelerin Zamanla Değİşİmlerİnİn İncelendiğİ Düğüm Noktaları.....	38
Şekil 6.5. Asal Gerİlmelerin Zamanla Değİşİmlerİnİn İncelendiğİ Düğüm Noktaları...	38
Şekil 6.6. 115958 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğİştİrmesİnİn Zamanla Değİşİmİ.....	39
Şekil 6.7. 115958 nolu Düğüm Noktasının y Doğrultusundaki Yerdeğİştİrmesİnİn Zamanla Değİşİmİ.....	40
Şekil 6.8. 115958 nolu Düğüm Noktasının z Doğrultusundaki Yerdeğİştİrmesİnİn Zamanla Değİşİmİ	40
Şekil 6.9. 126913 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğİştİrmesİnİn Zamanla Değİşİmİ	41
Şekil 6.10. 126913 nolu Düğüm Noktasının y Doğrultusundaki Yerdeğİştİrmesİnİn Zamanla Değİşİmİ	42
Şekil 6.11. 126913 nolu Düğüm Noktasının z Doğrultusundaki Yerdeğİştİrmesİnİn Zamanla Değİşİmİ	42

Şekil 6.12. 115590 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	43
Şekil 6.13. 115590 nolu Düğüm Noktasının y Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	44
Şekil 6.14. 115590 nolu Düğüm Noktasının z Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	44
Şekil 6.15. 115620 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	45
Şekil 6.16. 115620 nolu Düğüm Noktasının y Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	46
Şekil 6.17. 115620 nolu Düğüm Noktasının z Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	46
Şekil 6.18. 118006 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	47
Şekil 6.19. 118006 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	48
Şekil 6.20. 118006 nolu Düğüm Noktasının x Doğrultusundaki Yerdeğiştirmesinin Zamanla Değişimi	48
Şekil 6.21. t=8 s anında x Doğultusunda Yapıda Oluşan Yer Değiştirmeler (Lineer Analizde)	50
Şekil 6.22. t=8 s anında y Doğultusunda Yapıda Oluşan Yer Değiştirmeler (Lineer Analizde).....	50
Şekil 6.23. t=8 s anında z Doğultusunda Yapıda Oluşan Yer Değiştirmeler (Lineer Analizde).....	51
Şekil 6.24. t=8 s anında x Doğultusunda Yapıda Oluşan Yer Değiştirmeler (Lineer Olmayan Analizde).....	51
Şekil 6.25. t=8 s anında y Doğultusunda Yapıda Oluşan Yer Değiştirmeler (Lineer Olmayan Analizde).....	52
Şekil 6.26. t=8 s anında z Doğultusunda Yapıda Oluşan Yer Değiştirmeler (Lineer Olmayan Analizde).....	52

Şekil 6.27. 120042 nolu Düğüm Noktasının Maksimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	53
Şekil 6.28. 120042 nolu Düğüm Noktasının Minimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi	54
Şekil 6.29. 119018 nolu Düğüm Noktasının Maksimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi	55
Şekil 6.30. 119018 nolu Düğüm Noktasının Minimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	55
Şekil 6.31. 116030 nolu Düğüm Noktasının Maksimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi	56
Şekil 6.32. 116030 nolu Düğüm Noktasının Minimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	57
Şekil 6.33. 122853 nolu Düğüm Noktasının Maksimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi	58
Şekil 6.34. 122853 nolu Düğüm Noktasının Minimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi	58
Şekil 6.35. 119499 nolu Düğüm Noktasının Maksimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	59
Şekil 6.36. 119499 nolu Düğüm Noktasının Minimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	60
Şekil 6.37. 122720 nolu Düğüm Noktasının Maksimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	61
Şekil 6.38. 122720 nolu Düğüm Noktasının Minimum Asal Gerilmesinin Zamanla Değişimi.....	61
Şekil 6.39. t=8 s anında Yapıda Oluşan Maksimum Asal Gerilmeler (Lineer Analizde)	63
Şekil 6.40. t=8 s anında Yapıda Oluşan Minimum Asal Gerilmeler (Lineer Analizde).....	63
Şekil 6.41 t=8 s anında Yapıda Oluşan Maksimum Asal Gerilmeler (Lineer Olmayan Analizde)	64

Şekil 6.42 t=8 s anında Yapıda Oluşan Minimum Asal Gerilmeler (Lineer Olmayan Analizde)	64
Şekil 6.43. t=8 s anında Yapının Tümünde Oluşan Çatlaklar.....	65
Şekil 6.44. t=8 s anında Minare ve Minareye Yakın Kemerlerde Oluşan Çatlaklar....	66
Şekil 6.45. t=8 s anında Dış Duvarda Oluşan Çatlaklar.....	66
Şekil 6.46. t=8 s anında Kubbe Tarafındaki Kemer ve Duvarlarda Oluşan Çatlaklar..	67
Şekil 6.47. t=8 s anında Tonoza Oluşan Çatlaklar.....	68
Şekil 6.48. t=8 s anında Kubbede Oluşan Çatlaklar.....	68
Şekil 6.49. t=8 s anında Avlu Tarafındaki Kemer ve Duvarda Oluşan Çatlaklar.....	69

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Doğal Yapı Taşlarının Ortalama Fiziksel Özellikleri.....	11
Tablo 2.2. Tuğlaların Ortalama Fiziksel Özellikleri.....	12
Tablo 5.1. Analizde Kullanılan Malzeme Parametreleri	32
Tablo 6.1. Malatya Ulu Cami modal Analiz Sonuçları.....	36
Tablo 6.2. Lineer ve Lineer Olmayan Analizlerde Elde Edilen Düğüm Noktalarının Mutlak Maksimum Yer Değiştirmelerinin Karşılaştırılması.....	49
Tablo 6.3. Lineer ve Lineer Olmayan Analizlerde Elde Edilen Düğüm Noktalarının Maksimum ve Minimum Asal Gerilmelerinin Karşılaştırılması.....	62

1. GİRİŞ

1.1 Konun Önemi

Geçmişle günümüz arasında bir köprü görevi gören tarihi eserler, toplumların sosyal ve kültürel yansımalarıdır. Bu özelliklerinden dolayı tarihi eserleri eşsiz ve değerli kılmak ancak onların iyi korunmalarına ve saklanmalarına bağlıdır. İnsanlığın ortak mirası olan tarihi eserlerin korunması ve saklanması günümüzde bir uygarlık ölçüsü haline gelmiştir. Bu yüzden tarihi eserlerin korunması ve restorasyonu hem geçmişimizi kaybetmemek, hem de kültürel gelişimimizi ortaya çıkarmak için önemlidir [1, 2].

Tarihi ve kültürel birçok zenginliği içinde barındıran ülkemizde tarihi eserlerin korunması açısından en önemli problemlerden biri depremlerdir. Ayrıca tarihi eserlere uygun olmayan şekillerde güçlendirme ve restorasyon çalışmalarının yapılması, bakım-onarım sırasında meydana gelen işçilik, malzeme ve uygulama hataları bu yapıların korunmasına yönelik çalışmalar sırasında sıklıkla karşımıza çıkan sorunlardır. Meydana gelebilecek problemlerin yapıya vereceği zararı en aza indirmek ve tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılmasını sağlamak amacıyla yapıya uygun modelleme ve analiz çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler her ne kadar modelleme ve analiz çalışmalarında kolaylık sağlamış olsa da, tarihi yapıların strüktürel özelliklerinin tam olarak bilinmemesi ve kullanılan malzemelerin homojen olmaması gibi sebeplerden dolayı yapı davranışları hakkında yüzde yüz doğru bilgi elde edilememektedir [3].

1.2. Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Tarihi eserlerin yapısal davranışlarının deneysel incelenmesi, dinamik etkiler altındaki davranışlarının belirlenmesi, doğrusal olmayan davranış yöntemlerinin tespit edilmesi, yapı-zemin ilişkisinin araştırılması, depremlerden hasar görmüş yapıların mevcut durumunun anlaşılmasına yönelik günümüze kadar çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu bölümde daha önce yapılmış olan bazı çalışmalara yer verilmiştir.

İstanbul Ayasofya Caminin kubbe yapısal davranışlarını incelemek üzere Çakmak, Taylor ve Durukal [4] tarafından sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modelleme ve analiz çalışmaları yapılmıştır.

Bizans döneminde inşa edilen Ayasofya Camisinin (532-537) Durukal ve Erdik [5] tarafından deprem performansının belirlenmesi amacıyla, yapının sonlu elemanlar modeli oluşturularak, lineer statik ve dinamik analizi yapılmıştır. Ayasofya Camisinin doğal titreşim şekilleri ve frekansları çevresel titreşim deneyleri yardımıyla bulunmuş, deneysel olarak elde edilen ilk 8 titreşim modu belirlenmiştir. Gerçek dinamik davranışı belirlemek için Ayasofya’da bulunan ivmeölçerler kullanılarak meydana gelen depremlerden deprem ivme kayıdı yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda Ayasofya’nın zemin, malzeme ve yapısal özellikleri ile ilgili bilgiler elde edilmiştir.

Yaklaşık 800 yıldır dünyanın en büyük kubbeli yapısı olarak bilinen Ayasofya Camisi Özkul ve Kuribayashi [6] tarafından incelenmiştir. İstanbul da bulunan Ayasofya Camisinin, statik yükler altında yapısal davranışlarının belirlenmesi, kubbe kalınlığının kaymaya olan etkisinin incelenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modelleme yapılmıştır.

XVII. yüzyılda İtalya da yapılmış Monza Katedrali, Gentile ve Saisi [7] tarafından sonlu elemanlar metoduyla modellenmiştir. Yapının ortam titreşim tepkilerinin incelenmesi ve yapısal parametrelerinin belirlenmesi için bu çalışma yapılmıştır.

Çakmak, Moropoulou ve Mullen [8] Ayasofya müzesinin deprem davranışını incelemiştir. Ayasofya’nın dinamik davranışı, yapısal analizi, geoteknik ve malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmada, yapıda kullanılan harç, taş ve tuğla özelliklerinin belirlenerek, bu malzemelerin mekanik ve kimyasal yapıları ile mineral özellikleri ayrıntılı şekilde araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma Ayasofya’nın deprem davranışının belirlenebilmesi, kontrol edilebilmesi ve güçlendirmede yapılması gerekenlerin bilinebilmesi için önemlidir.

Selahiye, Aydınoglu ve Erdik [9] 1549-1557 yılları arasında Mimar Sinan tarafından yapılmış Süleymaniye Camisini incelenmiştir. Caminin taşıyıcı sistemi sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş ve serbest titreşim analizi yapılmıştır. Camiye ivmeölçerler yerleştirilerek gerçek deprem kayıtlarından doğal titreşim frekansları elde edilmiştir. Analiz sonucu bulunan değerlerle gerçek deprem kayıtlarından elde edilen

değerler karşılaştırılmıştır. Doğal titreşim frekanslarının, çevresel titreşim deneylerinden elde edilen verilerle hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

Mogadouro saat kulesi ve Lizbon Jeronimos manastır kilisesi Portekiz'in anıtsal iki tarihi eseridir. Ramous, Marques, Lourenço ve vd. [10] tarafından bu yapıların çevresel titreşim etkilerinin değerlendirilmesi için modal analiz yapılmıştır. Çalışmanın amacı tarihsel yapıların korunması için sağlıklı bir izleme ve değerlendirme yaparak, titreşimler sırasında erken aşamada oluşabilecek hasarların tespit edilmesini sağlamaktır. Sonlu elemanlar yöntemiyle modellenen yapının dinamik analizi yapılmış ve çevresel titreşimlerin etkisi araştırılmıştır.

Yüzügüllü ve Durukal [11] tarafından Küçük Ayasofya Camisi incelenmiştir. Yapının duvar dayanımları tespit edildikten sonra sonlu elemanlar modellemesi yapılmıştır. Sonuç olarak yer değiştirmelerin bir kısmına mesnet hareketi, bir kısmına da önceki yıllarda meydana gelen deprem kuvvetlerinin sebep olduğu tespit edilmiştir.

Betti ve Vignoli [12] tarafından, yapısal davranışının belirlenmesi ve sismik güvenliğinin değerlendirilmesi için İtalya'da bulunan Romanesque kilisesi incelenmiştir. Deprem yükleri için yarı-statik yaklaşım kullanılan bu çalışmada, tarihi yapıların yapısal davranışları, güçlendirme yöntemleri ve restorasyon çalışmaları hakkında bilgiler verilmektedir.

Russo, Bergamo ve vd. [13] tarafından Saint Andrea kulesinin analiz çalışmaları yapılmıştır. Yapının mevcut durumunu belirlemek amacıyla sonlu eleman yöntemiyle modelleme yapılmış, dinamik davranışları ve titreşim frekansları incelenmiştir.

1562 -1565 yılları arasında yapılan Edirnekapı Mihrimah Sultan Camisi Timur [14] tarafından incelenmiştir. Yapının serbest titreşim modları belirlenerek, sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Hasar meydana gelen yerlerin belirlenmesinden sonra, 1999 Marmara depremine ait iki ayrı ivme kaydı kullanılarak analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Teomete ve Aktas [15] Urla Kamanlı Camisinin yapısal davranışının belirlenmesi için çalışmalar yapmışlardır. Deneyler ve gözlemler sonucu elde edilen geometrik ve malzeme verileri sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır. Elastik lineer analiz çalışmalarından sonra yapıdaki sorunlu bölgeler incelenmiştir.

1421 yılında Çelebi Sultan Mehmet tarafından yaptırılan Bursa Yeşil Türbe, Akan ve Özen [16] tarafından incelenmiştir. Yapının geçmişi araştırıldığında dış cephesinin 1855 yılında meydana gelen depremde hasar gördüğü tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapılarak deprem analiz çalışmalarında mod biçimi belirlenmiş ve uygulanacak deprem yükü tespit edilmiştir. Yapının, analiz sonucunda basınç gerilmelerine karşı beklenen dayanımı gösterdiği ve çekme gerilmelerinin kapı-pencere boşluklarının köşelerinde ve yatay yük cephesinde olduğu gözlenmiştir.

1.3. Tezin Kapsamı

Tarihi yığma yapılar, yapıldıkları dönemin sosyal, kültürel, ekonomik, politik, mimari ve teknik özelliklerini yansıtan önemli kültürel varlıklardır. Yapıldıkları zamandan günümüze kadar çeşitli deformasyonlara uğrayan bu yapıların bir kısmı yıkılırken bir kısmı bir şekilde ayakta kalmayı başarmışlardır. Ayakta kalabilen yapıların korunması ve varlıklarının devam ettirilmesi için güçlendirilme çalışmaları yapılmaktadır. Restorasyon ve güçlendirme çalışmalarının yapının orijinal dokusuna zarar vermeden yapılması oldukça önemlidir.

Bu çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş ve literatür çalışmaları hakkında bilgiler verilmiş, ikinci bölümde ise cami mekân yapısını oluşturan taşıyıcı sistem elemanları ile yığma yapılarda kullanılan malzemeler ve özellikleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde tarihi yapılarda oluşan hasarlar ve nedenleri, yapılan onarım ve güçlendirme yöntemleri ele alınmış, yığma yapılarda uygulanan modelleme yöntemleri ise dördüncü bölümde anlatılmıştır. Beşinci bölümde Malatya Ulu Caminin tarihçesi ve yapısal özellikleri örnek çalışma olarak ele alınmış, altıncı bölümde ise caminin deprem davranışlarının belirlenmesi amacıyla lineer ve lineer olmayan analizler yapılmıştır. Yedinci bölümde analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

2. TARİHİ YAPILARDA TAŞIYICI SİSTEM ELEMANLARI VE KULLANILAN MALZEMELER

2.1 Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Elemanları

2.1.1. Temeller

Osmanlı yapı tasarımlarında yapının en önemli elemanını temeller oluşturmaktadır. Temeller, tabanındaki boşluk suyunun zeminden çıkarılması sağlandıktan sonra yontulmuş büyük kaya blokların yerleştirilmesi ve alt tabanın üzerine duvar tarzı elemanların yapılması ile oluşturulmaktadır. Boşluk hacimlerine gelen alan, genelde büyük boyutlu taşlarla yapılan blokajlarla kapatılmakta ve bu kısmın yüksekliği yapının büyüklüğüne göre değişmektedir [17, 18, 19].

Temeller yapım şekline göre tekil, mütemadi ve radye olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

2.1.1.1. Mütemadi Temel

Yapının toprak altında kalan kısmının kademeli olarak genişletilmesi ve temelin aynı kesit ve şeklinin tüm duvar boyunca korunması, en alt katmanındaki harcın içine enine ve boyuna ahşaptan kalaslar yerleştirilmesi ile oluşturulur.

2.1.1.2. Tekil Temel

Sütunlar ve kolonlar altına, yapının toprakta kalan kısmının kademeli olarak kare şeklinde genişletilmesi ile yapılmaktadırlar. Tekil temellerin asgari 20 cm yüksekliğinde, en alt katmanında harç içine ahşap kalasların yerleştirildiği tabanları bulunmaktadır.

2.1.1.3. Radye Temel

Dolgu zemin veya zayıf zeminlerde, yapının oturduğu tüm alanın harçlı taş dolgu ile doldurulması şeklinde yapılan temellerdir.

Tarihi yapılarda temel güçlendirmesi için günümüze kadar çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Genel olarak zayıf zeminlerde, temel tabanının ahşap kazıklar yardımıyla güçlendirildiği görülmektedir [20].

2.1.2. Taşıyıcı Duvarlar

Taşıyıcı duvarlar yapının dış hatlarını, ara bölme ayrımlarını oluşturmakta ve çatı yüklerinin temele aktarılmasını sağlamaktadır. Kâgir duvarlar düşey yük etkisinde kalan taşıyıcı basınç elemanlarıdır. Gevrek olan yapılarından dolayı yalnız basınç gerilmelerini taşıyabildiği, çekme gerilmelerini taşıyamadığı kabul edilmektedir. Bağlayıcı olarak kireç, horasan harcı ya da çamur kullanılan taşıyıcı duvarlar genelde normal ve kesme kuvvetine karşı dayanıklı olan yontma veya moloz taş, tuğla ya da kerpiçten yapılmaktadırlar [18, 20].

2.1.2.1. Kaba Yonu Taş Duvar

Kaba yonu taş duvar, taşların yontulmasıyla düzleştirilen yüzeylerinin, görünen her iki duvar yüzeyine gelecek şekilde yerleştirilmesi ve bu yüzeylerin orta bölgelerine taş dolgu yapılmasıyla oluşmaktadır. Tarihi yapılardaki bu tarz taş duvarlar birer metre örüldükten sonra duvarda düzleme yüzeyi yapılır. Duvar düzleme yüzeyinde tuğladan iki veya daha fazla sıra duvar bölgesi yapılması bir gelenektir. Çekme kuvvetlerini karşılamak için düzleme bölgelerine, ahşap hatıllar yapılmaktadır. Hatıllar yapının bu yükseklikteki tüm duvar bölgelerini kapsamaktadır. Özellikle Anadolu da deprem bölgelerinde hatılsız duvar yapılmamaktadır [17, 19].

2.1.2.2. Sıfır Derz Taş Duvar

Mimari estetik ve sürtünmenin azaltılması veya kapiller suların duvar üst katmanlarına çıkmaması için taşlar arasında harç kullanılmadan yapılan duvarlardır. Yığma duvarlarda taş veya tuğla ara derz bölgelerindeki harçlar, duvarlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmakta, aynı zamanda bir üst sıradan gelen yükleri alt sıraya üniform olarak aktarımalarını sağlamaktadır. Bu derz bölgeleri ayrıca duvara belirli oranda esneklik sağlamaktadır. Derzsiz olarak örülen duvarlarda bu avantajlar yoktur [17, 19].

2.1.2.3. Tuğla Duvar

Pişirilmiş kil olan harman tuğlası ile yapılan duvarlara taşıyıcı tuğla duvar denilmektedir [17].

2.1.2.4. Kenet Demiri

6 ile 10 mm kalınlığında 60-70 mm eninde lama demirlerinin çeşitli boylardaki parça uçlarının 10 ile 15 cm kıvrılmasıyla oluşturulan elemanlara kenet demiri denilmektedir. Uygulama sırasında kıvrılan uçlarının taş oyuklarının içine gömülmesi ve bu oyukların kurşunla doldurulması kenet demirinin yapıdan sıyrılmasını engelleyeceğinden önemlidir. Kenet demiri çekme özelliği göstermemektedir [17, 19].

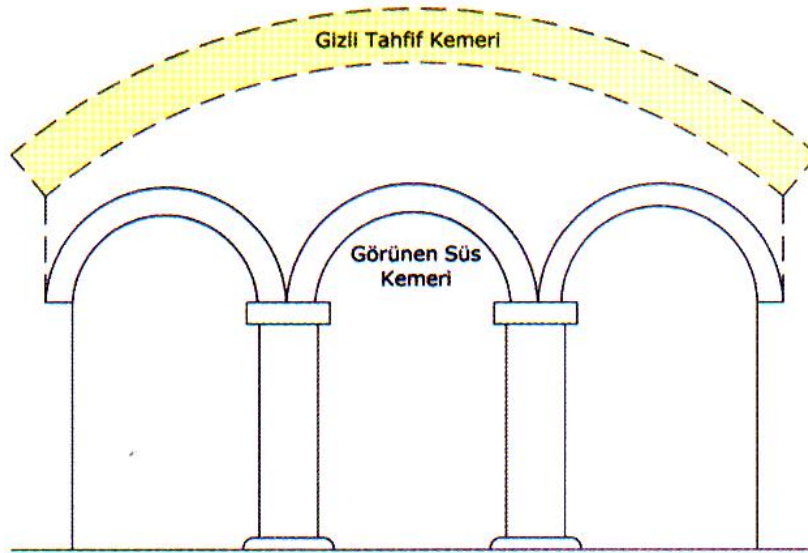
2.1.2.5. Zıvana Demiri

Duvarlarda üst üste gelen taşları birbirine bağlamak için yapılan pimlere zıvana demiri denilmektedir. Zıvana demirleri alt ve üst taşlar arasında çekme elemanı görevini yapmaktadır [17, 19].

2.1.3. Kemerler

Düşey yükleri belli noktalara yönlendirilen, taşıyıcı yapı elemanlarıdır. Mesnetlerinde gergi çekme çubukları olabildiği gibi gergisizde yapılabilmektedirler. Gergisiz olarak yapıldıklarında mutlaka güçlü duvarlara oturmuş olması veya ayak kısımlarında ağırlık kulelerinin bulunması gerekmektedir. Ağırlık kuleleri, kemer ayağında oluşan yatay kuvvetleri düşeye yönlendirmektedir. Kemerlerin taşıma kapasitesini ve dayanımlarını meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri belirlemektedir [17, 19].

Deprem yüklerine kemerlerin pek dayanıklı olduğu söylenemez. Yük taşıma özelliği hassas dengelerle oluştuğu için, yatay yük etkilerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Bazen taşıyıcı duvarların alt katlarında büyük boşlukların yapılması veya büyük açıklıkların sütunlarla geçilmesi gerekirse, yapı üst katlarından gelecek yükleri sütunlara etki ettirmemek için, sütun üstündeki taşıyıcı duvarın içine Şekil 2.1. de verilen gizli kemerler yerleştirilir (tahfif kemeri) [17, 19, 21, 22].



Şekil 2. 1. Tahfif kemeri

2.1.4. Kubbeler

Kubbeler tarihte büyük mekânları örten yapılar olarak inşa edilmişlerdir. Tüm yapı taşıyıcı sistemi kubbenin mesnetlenmesi ve desteklenmesi doğrultusunda biçimlenmektedir. Duvarlar gibi kubbelerde basınç altında mukavemet göstermektedirler. Kubbelerin en önemli sorunu dairesel mesnetlerinde oluşan eğik mesnet kuvvetlerinin desteklenmesidir. Mesnetlerde, kubbeden gelen kuvvet vektörü yatayda kayma gerilmesi oluşturmakta, kasnakta ise boyuna doğrultuda çekme kuvveti meydana getirmektedir. Kubbe mesnetlerinde oluşan çekme ve kayma gerilmeleri nedeniyle, kubbenin dairesel bir mesnede oturması ve mesnedinde çekme elemanları ile kuşaklanması gerekmektedir. Kasnakta çekme kuvvetinin varoluşu sünme problemine neden olmaktadır. Kasnaklar yapı olarak çok kararsız elemanlardır. Kararsız durumda olan kubbenin yatay yük taşıma özelliği zayıf olan duvara oturması yapıyı daha kararsız yapmaktadır [17, 19, 22, 23, 24].

Küresel bir örtü sisteminin kare veya dikdörtgen plana uyması ancak Tromp, Pandatif veya Türk üçgeni gibi geçiş elemanları ile olabilmektedir. Bu geçiş elemanlarının bulunması kubbeleri, anıtsal yapıların vazgeçilmez örtüsü haline getirmiştir. Osmanlı mimarisinde kubbe, yapının tüm biçimlenmesini belirleyen çıkış noktasıdır[17, 21, 22, 24].

2.1.5. Tonoz Bingi (Tromp)

Kare tabana oturan kubbenin, kare tabanın köşelerinde açıkta kalan kubbe çemberinin doldurulması amacıyla köşelere atılan çaprazvari baş kemerlerin çeyrek kubbelerle kare taban köşelerine birleştirilmesinden meydana gelen geçiş elemanıdır. Kubbe çapı büyük değilse tromp mesnet yüklerinden fazla etkilenmemektedir [17, 19].

2.1.6. Küresel Bingi (Pandatif)

Kare tabana oturan kubbe kasnağının açıkta kalan köşe kısımlarının, kubbe devamı gibi üçgen vari küre parçaları ile doldurulması sonucunda oluşan geçiş elemanıdır [17, 19].

2.1.7. Türk Üçgeni

Poligon oluşturulmuş kubbe kasnağının kare yapıya oturtulurken, kasnakla kare taban arasında kalan boşlukları doldurmak için kullanılan geçiş elemanıdır. Çokgen olan kasnağın kare taban köşesine isabet eden parçalarının her biri bir üçgenin taban kenarı olacak şekilde, üçgenin tepesi kare taban köşesine gelecek biçimde duvarların örülmesiyle Türk üçgeni oluşmaktadır. Osmanlı mimarisinde Türk üçgeni dekoratif ve strüktürel amaçlar için kullanılmıştır [17, 19].

2.1.8. Payanda

Kubbelerin deprem esnasında stabilitesinin sağlaması ve hareket enerjisinin sönmelenmesi amacı ile yapılan geçiş elemanlarıdır. Yapılarında makas denilen sert lama demirleri mevcuttur. Lama demiri payandaya izolatör özelliği kazandırmaktadır. Kubbelerin ağırlık merkezi seviyesinden mesnetlenen payandalar, kubbeyi yumuşak şekilde desteklemektedirler [17, 19, 23, 24].

2.1.9. Minareler

Minareler yapı itibari ile temel, kaide, küp, gövde, şerefe, petek, külah ve aleminden oluşmaktadır. Minareler statik özellik bakımından temele ankastre konsol sütun biçimindedirler. Tüm konsol yapılar gibi, minareler de yatay yükler altında kararsız ve gevrek davranış özelliği göstermektedir. Bu tip yapılar emniyet sınırının az üstünde yüklemelerde plastik şekil değiştirme yapmadan, hemen kopmaktadırlar. Minareler denge konumları itibari ile kararlı durumdan kararsız duruma çabuk geçebilen yapılardır [17, 19, 23, 24].

2.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Malzemeler

Tarihi yapılarda kullanılan malzemeleri doğal taş, harman tuğlası, kireç, katkı malzemeleri, harç, horasan harcı, kireç harcı, kâgir duvar harcı, sıva şeklinde sıralayabiliriz. Yığma malzemeler genellikle basınca karşı dayanıklı olup, çekmeye karşı düşük direnç göstermektedirler. Yığma malzeme ile inşa edilmiş yapının malzeme karakteristiklerini belirlemek oldukça güçtür [14]. Tarihi yapılardaki mevcut yapı malzemesinin özelliklerinin bilinmesi amacıyla gerekli deney ve ölçümlerin yapılması, yapının davranış analizinin belirlenmesi için önemlidir [17].

2.2.1. Doğal Taşlar

Taşlar, yığma yapılarda en çok kullanılan malzemelerden biridir. Bunun nedeni hemen hemen her yerde bulunabilmesidir. Tablo 2.1. de verilen çeşitli taşların fiziksel özelliklerinden de anlaşılacağı üzere taşlar basınca dayanıklı, çekmeye karşı ise zayıf özellik göstermektedirler. Eski yapılarda, işlenebilme kolaylığı bakımından daha çok metamorfik ve tortul taşlar kullanılmıştır. Şayet yapı iyi bir tasarım oluşturularak ve dayanıklı malzeme kullanılarak yapılmışsa yüzlerce yıl ayakta kalabilmektedir [1, 2, 3].

Tablo 2.1. Doğal yapı taşlarının ortalama fiziksel özellikleri

Taşın cinsi	Basınç Dayanımı (kPa)	Kayma Dayanımı (kPa)	Çekme Dayanımı (kPa)	Elastisite Modülü (kPa)
Granit	30.000-70.000	14.000-33.000	4.000-7.000	30x10 ⁶ -55x10 ⁶
Mermer	25.000-65.000	9.000-45.000	1.000-15.000	25x10 ⁶ -70x10 ⁶
Kireç Taşı	18.000-35.000	6.000-20.000	2.000-6.000	10x10 ⁶ -55x10 ⁶
Kumtası	5.000-30.000	2.000-10.000	2.000-4.000	13x10 ⁶ -50x10 ⁶
Kuvars	10.000-30.000	3.000-10.000	3.000-4.000	15x10 ⁶ -55x10 ⁶
Serpantin	7.000-30.000	2.000-10.000	6.000-11.000	23x10 ⁶ -45x10 ⁶

2.2.2. Harman Tuğlası (Horasan Tuğlası)

Harman tuğlası; içerisinde kireç bulunmayan kil veya killi topraklardan, belirli oranlarda kum ve kuvars karıştırılarak oluşturulan hamurun, kalıplarda biçim verilerek pişirilmesiyle elde edilen yapay taşlardır [1, 2, 3]. Tuğlaların puzolanik özellikte olabilmesi için pişirme sıcaklığının 700-900°C arasında olması ve bünyelerinde puzolanik özellik sağlayacak miktarda kil minerallerinin bulunması gerekmektedir. Yeni tekniklerle üretilen veya geleneksel ocaklarda pişirilen tuğlaların mutlaka puzolanik özellikte olup olmadığı kontrol edilmeli, puzolanik özelliğe sahip olmayan tuğlalar tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmamalıdır. Puzolanik özellikte olmayan tuğlaların yapıları dayanıklı olmamaktadır. Tuğlanın her yerde kolay bulunup üretilmesi ve ucuz olması, yapı ana malzemesi olma niteliğini kazandırmıştır. Tuğlanın Tablo 2.2. verilen fiziksel değerleri incelendiğinde taş gibi yalnız basınçla dayanıklı bir malzeme olduğu ve bu nedenle yapı taşıyıcı sisteminin basınç alacak şekilde biçimlendirilmesi gerekmektedir [17, 25, 26, 27].

Tablo 2.2. Tuğlaların ortalama fiziksel özellikleri

Basınç Dayanımı (kPa)	Çekme Dayanımı (kPa)	Kayma Dayanımı (kPa)	Elastisite modülü (kPa)
10.000-30.000	2.700-5.000	10.000-20.000	150.000-300.000

2.2.3. Kireç

Tüm harçlarda kullanılan bağlayıcı kireçtir.

a-Yağlı kireç: Saf kireç taşı kalkerin (CaCO_3) 900 derecede pişirilmesiyle elde edilen kalsiyum okside (CaO) sönmemiş kireç denilmektedir. Su ile söndürülmesi neticesinde oluşan Ca(OH)_2 de yağlı kireç denilmektedir. Kireç harcı taş ve tuğla gibi tabii malzemelere yapışma özelliğinden dolayı her türlü harcın bağlayıcısı olmaktadır.

b-Su kireci: %20 oranında kil ihtiva eden kalkerin pişirilmesiyle elde edilen malzemelerin su ile söndürülmesi sonucu olan hidratelerin tümüne su kireci denilmektedir. Su kirecinin oluşması için pişirilen malzemede en az %10 CaO olması gerekmektedir.

Kirecin kalitesine etki eden unsurlara dikkat etmek gerekmektedir. Kireç taşları büyük parçalar ihtiva etmemeli, gözenekli yapıda olmalıdır. Söndürmede kullanılan su yeteri kadar, saf ve katkısız olmalıdır. Söndürme işlemi düşük sıcaklıklarda ve karıştırılarak yapılmalıdır. Söndürülmüş kirecin uzun süre havayla temas etmeden bekletilerek kullanılması da yapı için büyük fayda sağlamaktadır. Sönmemiş kirecin bekletilmesindeki amaç, bünyesinde sönmemiş kalker kalmasına engel olmak içindir. Havasız ortamda bekletilen kirecin plastikliği ve su tutma özelliği artmaktadır. Kireç kristallerinin boyutları küçülmekte ve havadaki karbondioksit ile reaksiyona girecek yüzey alanı çoğalmaktadır. Yüzey alanı arttığından karbonatlaşma daha kolay olmaktadır [17, 27].

2.2.4. Su

Yığma yapılarda kireç harcı hazırlanmasında kullanılan su içilebilir olmalı, yapısında sülfat veya sülfid, klorür iyonları bulunmamalıdır [17].

2.2.5. Agreg

Dolgu olarak kullanılan malzemelerin kireçle reaksiyona girebilenlerine puzolanik agreg, kireçle reaksiyona girmeyenlerine ise etkisiz agreg denilmektedir. Puzolanik agregalar kireçle asit-baz reaksiyonuna girebilen silikatlar ve alimünatlardan oluşmaktadır. Harçların nemli ortamlarda, suda ve kuru havada, sertleşmeyi sağlayan asidik yapıdaki puzolanları, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal puzolanlar genelde volkanik oluşumlardır (Tüf, Tras). Yapay puzolanlar pişirilmiş malzemelerdir. (Tuğla, kiremit kırıkları, pirinç kabuğu yakılarak elde edilen külleri) [17, 27].

2.2.6. Katkı Malzemeleri

Katkı malzemeleri sertleşmeyi hızlandırmak veya su izolasyonu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Harçlara basınç ve çekme mukavemeti kazandırabilmek için tarihte birçok katkı malzemeleri kullanılmıştır. Sertleşmeyi hızlandırmak amacıyla domuz yağı, kan, süt, yumurta beyazı gibi katkı malzemeleri katılmıştır. Su izolasyonu sağlamak için hayvan tutkalı, arap sabunu, keten tohumu yağları katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Hayvan tüyleri, keten lifleri, arpa, idrar, arap zambkı, incirin sütü gibi katkı maddeleri kireç harcına çekme ve basınç mukavemeti kazandırmak için katılmaktadır [17, 27].

2.2.7. Harç

Killi toprak, saman veya kendir parçalarının su ile yoğurulmasından elde edilen karışım en basit harçtır. Karışım malzemesi olarak kireç (su kireci, yağlı kireç), puzolan, pişirilip öğütölmüş kil, taş tozları, tuğla kiremit tozları kullanılmaktadır. Harcın katılaşp bağlayıcı özellik kazanması hidratasyon olayıyla başlamaktadır. Harç malzemesinin, zerreler arasındaki boşlukları tamamen su ile dolmuş ise yumuşak olmaktadır. Boşluk suyu harç yapısını hızlı terk ederse harçta kristalleşme oluşmaktadır. Harç yapısından suyun tamamen çıkması istenmeyen bir durumdur. Harcın kristalleşip bağlayıcı özelliğini sürdürebilmesi için zerreler üzerindeki absorbe suyun ve köşe sularının harç bünyesinde kalması istenir. Aborbe sular ve köşe suları harcın bağlayıcı özelliği için önemlidir. Zerreler arasındaki bu sular yapıyı terk ederse harç uçucu kül haline gelmektedir. Boşluk sularının harcı terk etmesinden sonra su ile tekrar dolması istenmeyen bir durumdur. Bu takdirde zerreler arasındaki boşluk suyu basıncı artmakta zerreler arasındaki kayma mukavemeti azalmakta harcın dış tesirlerle dağılması kolaylaşmaktadır. Yığma yapı harcının çekme özelliğinin olması istenmektedir. Bu amaç ile katkı malzemeleri kullanılmaktadır [26, 27].

2.2.8 Kireç Harcı

Bağlayıcı olarak kireç, dolgu olarak agrega kullanılarak, su ile yapılan hamura kireç harcı denilmektedir. Kireç harcı hazırlanmasında harcın özelliklerini iyileştirmek için kullanılacak yapı kısımlarına uygun organik veya inorganik katkı malzemeleri kullanılabilir [26, 27].

2.2.9. Horasan Harcı

Horasan pişirildikten sonra öğütülmüş kildir. Su ile hidrate olan Ca(OH)_2 zamanla suyunu atarak, kristalleşmekte ve katılaşmaktadır. Kirecin bu katılaşması kristalleşme olayından dolayı meydana geldiği için suyla temasında tekrar yumuşar. Kirecin suda erimeyen katı cisme dönüşmesi karbondioksitle kimyasal reaksiyona girerek kalsiyum karbonata dönüşmesiyle mümkün olmaktadır. Hidrate kirecin karbondioksitle reaksiyona girmesi için ilk önce kuruması gerekmektedir. Harç mutlaka duvar örüldükten sonra kuru ortamda muhafaza edilmelidir. Kirecin kalsiyum karbonata dönüşmesinden sonra sertleşme süreci devam eder. Pişirilmiş kil tozu kimyasal etkinlik kazanmış silistir. (SiO_2) Silis zayıf bir asittir. Kuvvetli baz olan kireç pişirilmiş kil tozları ile asit-baz reaksiyonuna girince kalsiyum silikat oluşur. Bu oluşum için rutubetli ortam yeterlidir. Kalsiyum karbonat ve kalsiyum silikat dış tesirlere dayanıklı malzemelerdir [17, 19, 27].

2.2.10. Sıva

Taşıyıcı sistemin ana malzemesini oluşturan tuğlanın veya taşın dış etkilerden korunması maksadı ile duvar dış kaplaması olarak yapılmaktadır. Sıva sırf korucu maksatla yapıldığı gibi su veya ısı geçirgenliğinin azaltılması amacıyla da kullanılmaktadır. Koruma maksatlı kullanılan sıvanın yapışkan özellikte olması, duvar yüzeyinde dökülmeden uzun süre kalabilmesi, duvarı oluşturan yapı malzemesiyle uyumlu olması gerekmektedir. Sıva harcı mutlaka puzolanik özellik göstermelidir. Sıva, duvarın taş veya tuğla malzemesine nüfuz ederek yapışmalıdır. Eğer sıva duvar yüzeyine yapışarsa tuğla ve taşların bünyeleri de yenilenmekte veya yüzeylerinde sağlam tabaka oluşturmaktadır. Sıvanın, duvar

koruyuculuğunu tam yapabilmesi için duvarda kılcal çatlakların olmaması gerekmektedir. Dış tesirlerden bünyeleri bozulan sıvalar dikkatle sıyırılmalı ve temizlendikten sonra yeniden sıvanmalıdır. Sıvanın periyodik olarak sökülüp yenilenmesi ana taşıyıcının stabilitesi bakımından önemlidir [26, 27].

3. TARİHİ YAPILARDA OLUŞAN HASARLAR, ONARIM VE GÜÇLENDİRME

3.1. Tarihi Yapılarda Oluşan Hasarların Nedenleri

Tarihi yapılarda genel olarak şu nedenlerle hasar ve dolayısıyla göçmeler oluşmaktadır:

a- Yanlış yapılan restorasyon ve güçlendirme metotları: Restorasyon çalışmalarında genel olarak güçlendirme düşünülmediğinden dolayı yapı bozuklukları sadece onarımlarla kapatılmıştır. Bu çalışmalar sırasında yapıların taşıma mukavemetlerini oluşturan elemanların yenilenmesi yapılmadığından, yapıların eskime hızları artmıştır. Yanlış restorasyonlar tarihi yapıların stabilitesini bozduğu için binaların yıpranmaları daha kolay olmuştur.

b- Kullanım amaçlı yapılan tadilatlar; Yeni kullanım şartlarına uygun çalışma mekânları yaratmak için taşıyıcı duvarlarda tadilatlar yapılmaktadır. Yapının ilk yapıldığı andaki sistemi ile yatay yük taşıma sistemi dikkate alınmadan yapılan tadilatlar yapı taşıyıcı sistemini dağıtmaktadır.

c- Yılların yıpratıcı çevresel etkilerinden dolayı yapı malzemelerinin bozulması ya da çürümesi; Yapılarda kullanılan tüm çekme elemanları genel olarak demir veya ahşap malzemelerdir. Bu iki malzemede dış etkenlere karşı dayanıksız olup, ömürleri kısadır. Yapılardaki demir ve ahşap malzemeleri bakımsız kalınca daha hızlı çürüyerek özelliklerini kaybetmektedirler.

d- Zeminde oluşan çökme sebebiyle hasarların meydana gelmesi: Tarihi eserler genelde oldukça sağlam zeminler üzerine inşa edilmişlerdir. Yeteri derecede sağlam olmayan zeminler üzerine inşa edilenler inşa edildikleri çağlarda konsolidasyon vb. gibi oturmalar nedeniyle yok olarak günümüze kadar gelememişlerdir. Günümüze kadar gelen tarihi eserleri günümüzde yapılan aktiviteler dolayısıyla (civarda açılan inşaat çukurları, yol hafriyatları, tünel kazıları ile zeminden su çekilmesi, yapılan barajların yükselttiği yeraltı suyu seviyesi) oluşan çökmeler, tehdit etmektedir.

e- Depremler vb. gibi zemin hareketleri, genelde yalnızca basınç gerilmeleri taşıyabilen tarihi yapılarda olağanüstü büyüklükte çekme gerilmeleri oluşturmakta ve düşey yüklerden oluşmuş basınç gerilme değerleri aşılarak büyük hasarlara hatta yıkımlara se-

bebiyet vermektedirler. Olabilecek ikinci depremlerde yapının tamamen yıkılacağı düşünülerek onarımların güçlendirme şeklinde yapılması gerekmektedir [17, 20].

3.2. Tarihi Yapılarda Onarım ve Güçlendirme

Tarihi eserlerin onarımı ile güçlendirilmelerini birbirinden ayırmak mümkün değildir. Tarihi eser onarımlarının birinci aşaması hasar nedenlerinin doğru olarak tespit edilmesidir. Bunun için çatlak etütleri yapıp haritalandırılmalı ve yapının bilgisayar modellemesi yapılarak çatlak nedeni olan çekme gerilmelerinin büyüklükleri olabildiğince doğru hesaplanmalı ve buna bağlı olarak sağlıklı bir onarım-güçlendirme projesi hazırlanmalıdır [17, 21, 22].

Tarihi yapılar, homojen olmayan malzeme özelliklerinden, blok ve harçların çekme mukavemetinin az olmasından, kütle yükünden, doğrusal olmayan davranış özelliği gösterdiklerinden, sismik güvenlik açığının fazla olmasından dolayı deprem güvenliği düşük olan yapılardır [28]. Güçlendirme ve onarım çalışmalarında bunların dikkate alınması gerekmektedir.

3.2.1. Temellerin Onarımı ve Güçlendirilmesi

Yapı tasarımlarında zemin sularının ıslahı için önlemler alınmış ve yapıların korunması sağlanmıştır. Tarihi yapılarda, özellikle kapiller suların duvar katlarına çıkmaması amacıyla temel de galeriler yapılmış, duvar içlerine yerleştirilen bacalarla ve beden duvarlarının dışına çıkan kapılarla, bu galeriler havalandırılmıştır [17, 18].

3.2.1.1. Temel Zemininin Güçlendirilmesi

Deprem odaklı zemin güçlendirilmesindeki amaç, zeminlerin dayanımını ve rijitliğini deprem esnasında muhafaza etmesidir. Sıvılaşma ile zemin hareketinin oluşmaması sağlanmalıdır. Bunun için boşluk suyu basıncını artıran sebeplerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Mevcut zemin iyileştirme teknikleri arasında tarihi yapılar için

en uygun olanı drenaj tekniğidir. Ayrıca zemin sıkılaştırma teknikleri, güçlendirme teknikleri, enjeksiyon ve karıştırma teknikleri de vardır [17, 18, 29].

3.2.1.1.1. Drenaj Tekniği

Tarihi yapılar için en uygun zemin iyileştirme tekniğidir. Drenaj, su sarnıçları ile yapılabildiği gibi deşarjı kolaylaştıracak dolgu malzemeleri ile de yapılabilir. Su sarnıçları yeraltı suyunu temellerden uzak tutmak için ve temelleri kapiller sulara karşı korumak için iyi bir uygulamadır. Günümüze kadar gelen tarihi yapıların tümünde yapı temellerinde su sarnıçlarına rastlanmaktadır. Su sarnıçları deprem esnasında yeraltı suyunun yükselmesini geciktirerek deprem etkilerinin geçmesinden sonra yeraltı suyunun temel alt katmanlarına ulaştırmakta, depremin ilk sarsıntılarında yapının temel zeminini korumaktadır. Yeraltı suyunun depremde ani yükselişinin önlenmesi, zemin boşluk suyu basıncının ani artmasına engel olmaktadır. Depremin zeminlerdeki yıkıcı etkilerinin en önemlisi olan zemin taşıma gücünün azalmasının bu şekilde önüne geçilebilir [18].

3.2.2. Taşıyıcı Duvarların Güçlendirilmesi

Taşıyıcı duvarlar basınç etkisinde kalan yapı elemanlarıdır. Kesitlerindeki gerilmeler basınç emniyet gerilmesini geçmemelidir. Duvar kesitindeki basınç, emniyet gerilmesini aşıyorsa, yapılması gereken yapının duvar kesitini büyütmektir. Duvar kesit alanı artırılırken, kullanılan malzemenin eski duvar malzemesi ile her bakımdan uyumlu olmasına dikkat edilmelidir. Ek duvarın yapı taşları ve harcının, eski duvar harç yapısı ile uyumlu olması, kesit büyütmenin standardını oluşturmaktadır. Eski duvar ile ek duvarın birleşimi de oldukça önemlidir. Duvarlar arasındaki ayrılma, çekme ve kayma kuvvetleri tespit edilip, bulunan çekme kuvveti kadar kenet elemanları yerleştirilmelidir. Kenet elemanlarının yerleştirilmesinde asıl olan yeni duvardaki her bir parçanın eski duvara kenetlenmesidir. Her taş eski duvara bağlanamıyorsa, birer atlayarak kenetlemek asgari şart olmalıdır. Yeni duvar taşları yatayda ve düşeyde birer atlayarak eski duvara kenetlenmelidir. Kenet ebatlarının, duvarların arasındaki çekme ve kayma kuvvetlerini karşılayabilecek boyutlarda olmasına dikkat edilmelidir.

Tuğla duvarın desteklenmesinde eski duvarın tuğlaları yer yer çürütülerek yerleştirilecek yeni tuğlaların, yeni duvar ile bütünleştirilmesi veya kenet çekme elemanlarını eski duvarlara ankrajlayarak yeni duvarla birlikte çalışması sağlanabilir. Çekme elemanlarının dış tesirlerden korunur olması gerekmektedir. Kenet çekme elemanları korozyona uğramayan veya yerine konmadan izole edilebilen özellikte olan malzemelerden olmalıdır.

Duvarların çekme kuvvetlerine göre güçlendirilmesi gerekmektedir. Yatay çekme gerilmelerinin tümü çekme elemanları ile alınmalıdır. Gevrek olan duvar bünyesini yatayda çekme elemanları ile liflemek, duvar yapısının çekme özelliği kazanmasını sağlamaktadır. Çekme özelliği, duvarda bulunan yatay derz bölgelerine ait harcın 10 cm boşaltılarak içlerine çekme özelliğine sahip elemanların yerleştirilmesiyle yapılmaktadır. Sonuç olarak duvara dışarıdan yapılan ilave ve kaplamalar yapının orijinal haldeki statik durumunu bozmakta, homojenliği ortadan kaldırmakta ve yapıda deprem yükleri altında ilave kuvvetlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Orijinal haldeki statik durumuna göre projelendirilmiş olan yığma yapıların, bu şekilde yapılan bilinçsiz güçlendirmelerden dolayı deprem yükleri altındaki davranışı karmaşık bir hal almaktadır. Oysa özel çekme bantları ile yapılan güçlendirmelerde, sistemde yapısal bir değişiklik yoktur. Kullanılan malzeme yapının ağırlığını ve rijitliğini artırmamaktadır. Çekme elemanları yığma duvara diğer yöntemlerdeki gibi dışarıdan değil bünyesine yerleştirilerek dahil edilmektedir. Bu şekilde mevcut yapıyla beraber çalışmaları sağlanmış olur [17, 19, 21, 22, 29].

3.2.3. Kemerlerin Onarılması

Kemerlerdeki hasarlar genellikle kemeri oluşturan taş ya da tuğlanın zamanın yıpratıcı etkisi dolayısı ile çürümesi, kemer mesnetlerinin çeşitli nedenlerle birbirinden uzaklaşacak şekilde deforme olması ya da kemer gergisinin çürümesi veya başka bir nedenle işlevini kaybetmesi ile oluşmaktadır. Kemerler onarımları sırasında taş değiştirmenin gerekli olduğu durumlarda kemer askıya alınmalıdır. Bu askı sistemi yardımı ile kemere yukarı doğru çok az da olsa deformasyon yaptırılmalı, gerekli taşlar değiştirilmeli, derzler orijinal harç enjeksiyonu ile doldurulmalıdır. Varsa gergiler yenilenmeli, kısmen ön gerilme verilerek mesnetler birbirine yaklaşacak şekilde zorlanmalı

ve bundan sonra askı tertibatı aşağıya doğru yavaş yavaş indirilerek kemerin kontrollü olarak yüklenmesi sağlanmalıdır. Deprem esnasında büyük açıklıklı kemerlerin az hasar gördüğü küçük açıklıkların ise fazla hasar gördükleri gözlenmektedir. Küçük açıklıklı kemerlerde deprem dolayısıyla oluşan çekme gerilmeleri düşey yüklerden oluşan basınç gerilmelerinden genelde daha fazla olduğu için deprem esnasında hasar olmaktadır. Bu tür kemer çatlaklarına, olabildiğince yüksek kama kuvveti verilerek, kemer basınç gerilmeleri kısmen de olsa artırılmalı ayrıca mümkün olan durumlarda kemer karbon elyafı ya da paslanmaz metal çekme elemanları ile takviye edilmelidir [17, 21, 22, 29].

3.2.4. Tonozların Güçlendirilmesi

Tonozların onarım ve güçlendirme ilkeleri genel olarak kemerlerle aynıdır. Ancak tonozla mesnet olan duvarlardaki yatay hareketler çoğu zaman geri döndürülemeyebilir. Bu durumda tonoz üzengi kesitinin açılıp kamalanması ya da dışarıdan geçici ek gergiler konulup sıkıştırılarak orijinal formuna getirilmesi ve bu işlem esnasında duvarların dışında oluşan çatlakların kamalanıp tamir harcı ile doldurulması gerekmektedir [17, 21, 22, 29].

3.2.5. Kubbelerin Onarılması

Onarıma kubbenin bazasını oluşturan çemberin onarım ve güçlendirilmesiyle başlanmalıdır. Eğer çember çok hasarlı ise kubbe mutlaka askıya alınmalıdır. Çemberin çürümüş elemanlarının onarımından sonra çemberin dışına açılan derz içine kısmen öngörme verilen karbon elyafı ön germe teli yerleştirilip kilitlenmeli ve dışarıdan orijinal derz dolgu harcı ile doldurularak onarılmalıdır. Bunun yanında kubbe dıştan teğetsel ve radyal doğrultularda yeterli ve güvenli derinlikte açılan kanallar içinden geçirilerek, kısmen gerilen karbon elyafı ön gerilme telleriyle sarılmalı, bozuk taşlar onarılmalı, çatlaklar kamalanmalıdır. Kubbenin kurşun kaplaması su geçirmeyecek şekilde onarılmalıdır.

Kubbe yapımında kullanılan malzemeler gevrek malzeme olup yapı mukavemeti bakımından kararsızdırlar. Devamlı çekme gerilmelerine maruz kalmalarından dolayı kubbelerde sünme meydana gelmektedir. Kasnağın açılması kubbe duvarları stabilitesini

bozmakta ve aynı zamanda duvarlardaki basınç gerilmesini azalmaktadır. Ön gerilme ile dayanım gösteren kubbeler, ön gerilmenin azalması ile deprem etkisinde dağılmaktadırlar. Kubbelerin oturduğu kasnakların rehabilitasyonu mutlaka yapılmalıdır. Kasnağın oturduğu duvarlar kesme kuvveti itibariyle güçlendirilmelidir. Kasnaklar yapısı ve konumu itibariyle camilerin en nazik kısımlarıdır. Kubbe duvarlarında dağılmayı önlemek için kasnaklara ön gerilme verilmesi gerekmektedir [17, 21, 22, 29].

3.2.6. Minarelerin Güçlendirilmesi

Yığma yapılarda deprem yükleriyle üstten başlayan dağılmalar meydana gelmektedir. Minarelerde deprem yük etkileriyle yıkılma oluşmamakta ancak yapının dökülmesiyle yapı dağılmaktadır. Deprem esnasında oluşan çok yüksek devrilme momentleri nedeniyle en fazla hasar gören yapı elemanlarıdır. Hemen hemen tüm minarelerin depreme karşı güçlendirilmesi zorunludur. Minarelerin yatay yükler altında eğilme momentini taşıyacak şekilde tasarlanması doğru değildir. Minareler eğilmeye karşı esneyebilen kaymaya karşı sünek olabilen taşıyıcı sistem olarak oluşturulmalıdır. Mimar Sinan minareleri tasarlarken her katmandaki taş derzlerini harçsız yapmış düşeyde kurşun içine yerleştirilen güçlü zıvanalar koymayı da ihmal etmemiştir. Kurşun içine yerleştirilen zıvana demiri yatay ve düşey de esneme özelliği sağlamaktadır. Taş derzlerini harçsız yapmakla, yatay da esneyebilen düşeyde moment almayacak yığma yapı sistemini oluşturulmaktadır [17, 21, 22, 23, 24, 29].

3.2.7. Fil Ayaklarının Güçlendirilmesi

Kubbeli yapıların ana kubbeyi taşıyan askı kemerlerinden gelen yükleri temele aktaran sütunlardır. Sürekli basınç altındadırlar. Aşırı miktarda yük taşıdığından dolayı mermer taşlardan yapılmaması gerekmektedir. Eğer mermer bloklardan yapılacaksa granit mermer kullanılmalıdır. Hareli mermer ile fil ayağı yapılması durumunda, hareli düzlemin yatay olmasına dikkat edilmelidir. Hareli mermerler, ahşap yapı özelliği göstermektedir. Mermer bloğu harelere dik istikamette basınca dayanıklıdır. Hare istikametinde oluşan basınç gerilmesinde mermer blok çatlamaktadır [17, 21, 22, 29].

4. YIĞMA YAPILARDA KULLANILAN MODELLEME YÖNTEMLERİ

4.1. Yığma Yapı Modelleme Teknikleri

Yığma yapılar, yapımlarının kolay olması ve kullanılan malzemelerin yaygın bulunmasından dolayı ülkemizde önemli yer tutmaktadır. Yapılarda kullanılan malzemelerin kompozit olması nedeniyle malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tam olarak bilinmemesi, analiz çalışmalarını zorlaştırmaktadır. Ancak bilgisayar tekniklerinin gelişmesi sayesinde yığma yapılarla ilgili yapılan bilimsel çalışmalar hız kazanmıştır.

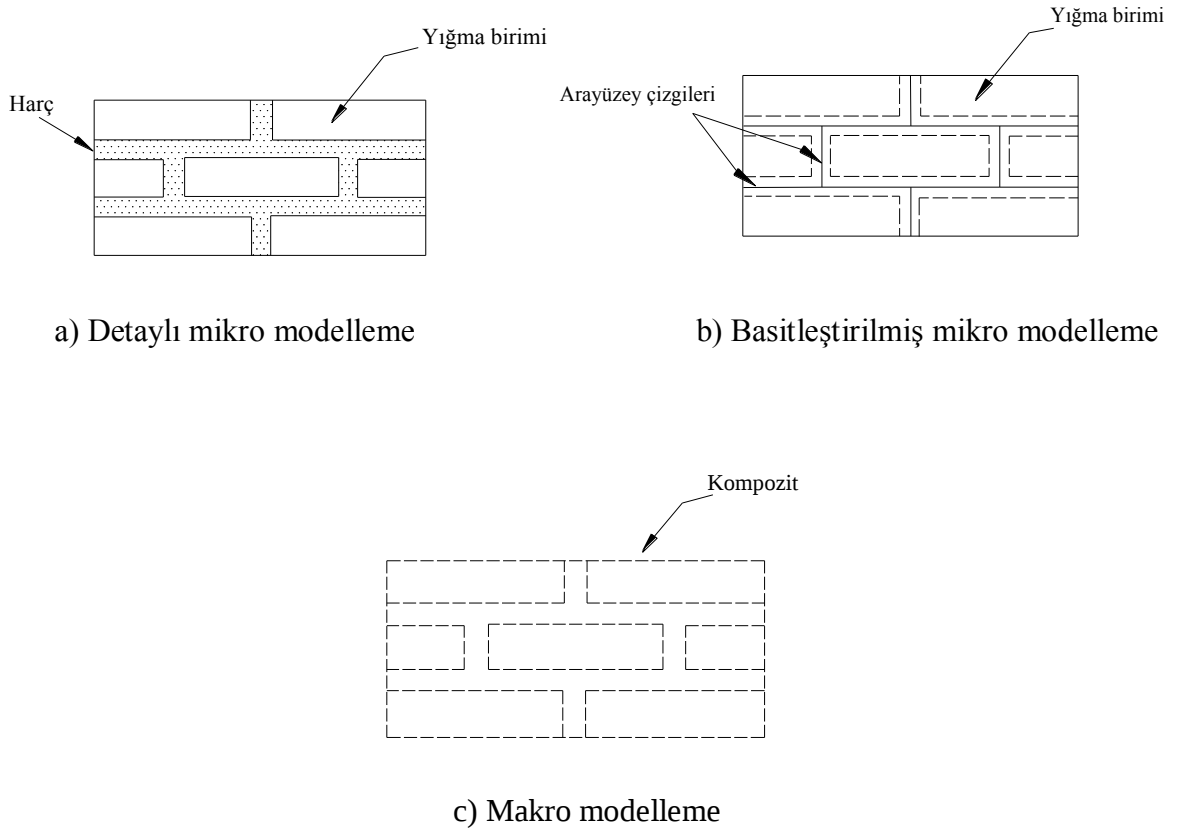
Yığma yapılarda sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan modelleme çalışmalarında ki kabuller, betonarme yapılardan farklıdır. Betonarme yapılarda malzeme heterojen olmasına rağmen bir yapısal elemanı aynı çeşit sonlu elemanla geçmek mümkün olmaktadır. Ancak yığma yapılarda farklı karakteristiklere sahip yapı malzemelerinin olması böyle bir kabulü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle farklı yapı malzemelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi ile yapılan modelleme çalışması bizi daha doğru sonuçlara götürür.

Yığma yapılarda yapılan analiz çalışmalarında, yapı sistem büyüklüğüne göre 3 farklı modelleme tekniği bulunmaktadır. Bunlar:

1. Detaylı mikro modelleme
2. Basitleştirilmiş mikro modelleme
3. Makro modelleme

Yığma yapılarda kullanılan modelleme teknikleri şekil 4.1. de verilmektedir

Modelleme teknikleri birbirinden farklı durumlarda kullanılmaktadır. Mikro modelleme yığma duvarların detaylı incelenmesinde, kritik bölgelerin analizinde kullanılırken, makro modelleme karmaşık ve büyük sistemlerde tüm yığma binanın analizinde tercih edilmektedir. Uygun sonlu elemanlara ayırmak suretiyle zaman açısından tasarruf sağması sebebiyle makro modelleme en çok tercih edilen bir yöntemdir [30].



Şekil 4.1. Yığma yapıların modelleme teknikleri

4.1.1. Detaylı Mikro Modelleme

Bu modellemede, yığma duvarı meydana getiren yığma biriminin ve harcın ayrı ayrı elastisite modülleri, poisson oranları ve elastik olmayan diğer özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımda çatlakların yığma birim ve harcın arasındaki ara yüzeylerde meydana geleceği varsayılmaktadır [30, 31].

4.1.2 Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Bu modelleme tekniğinde, yığma birimlerin boyutları, harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç tabakası ihmal edilmekte ve yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılmaktadır. Meydana gelmesi muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde oluşabileceği kabul edilmektedir.

Olası göçme mekanizmalarının tümünün dikkate alınmaması bu modellemede önemli sorunlardan biridir. Modellemede tanımlanacak olan ara yüzeylerde hem çekme hem de kayma davranışlarının birlikte tanımlanması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan kabule göre; yığma duvarlarda meydana gelebilecek olan çekme ve kayma çatlaklarının ve tüm hasarın ara yüzeylerde oluşacağı ve tuğlalarda meydana gelebilecek olan potansiyel çatlakların ise tuğlanın orta kısmında düşey olarak gerçekleşeceği kabul edilmektedir [30, 31].

4.1.3. Makro Modelleme

Bu modellemede, yığma birim ve harcın özellikleri çeşitli homojenleştirme işlemlerine tabi tutulması suretiyle yığma duvarın kompozit bir malzeme olarak kabul edilmesine dayanmaktadır. Homojenleştirme işlemleri sonucunda modelin mekanik özellikleri belirlenmektedir.

Yığma yapılarda tüm sistemlerin modellenmesi durumunda, özellikle doğrusal olmayan analizlerde mikro modellemede meydana gelen güçlükler sebebiyle yığma birim ve harç arasındaki ilişki ihmal edilmektedir. Çok büyük boyutlardaki sistem rijitlik matrisi ile analiz sonuç dosyalarının boyutunun büyük olması sebebiyle tüm yapı için en uygun yöntem makro modellemedir [30, 31].

5. MALATYA ULU CAMİ TARİHÇESİ VE YAPI ÖZELLİKLERİ

5.1. Malatya Ulu Caminin Tarihçesi

Malatya'nın yaklaşık 8 km. kuzeyinde bulunan Ulu Cami VII. yüzyılda Araplar tarafından yaptırılmıştır. Bu yapı yıkılmış ve kitabesinden öğrenildiği kadarıyla Anadolu Selçuklu Sultanı I. Alâeddin Keykubad zamanında Mansur Bin Yakub tarafından 1224 yılında yeniden yapılmıştır. Yapı günümüze kadar sürekli onarılmış ve orijinalinden oldukça değişik bir yapıya dönüşmüştür.

Geniş orta avlusu, tuğlanın da kullanıldığı malzemesi ve genel plan tasarımı ile İran Büyük Selçuklu camilerini andıran Malatya Ulu Cami, Büyük Selçuklu mimari geleneğinin günümüze kadar ulaşan örneklerindendir. Bu yapı, Anadolu Selçuklu mimarlarının İran'daki Büyük Selçuklu tasarımlarına yabancı olmadıklarını, ancak Anadolu'da yeni bir tasarım gerçekleştirmek için çalıştıklarını kanıtlayan güzel bir örnektir [32].

5.2. Malatya Ulu Caminin Yapısal Özellikleri

Malatya Ulu Caminin, Büyük Selçuklu camilerinden, Zevvare Mescid-i Cuma örnek alınarak yapıldığı düşünülmektedir. Caminin boyutları 36.44×57.22 m. olup, kuzey-güney doğrultusunda dikdörtgen şeklindedir. Erken dönem ulu cami tipinde, tek eyvanlı, iç avlulu bir örnek oluşturmaktadır. Cami harim ve kaysariye olmak üzere iki bölümden meydana gelmektedir. Caminin minaresi batısında bulunan kaysariye kısmında yer almaktadır. Minare tamamen tuğladan yapılmış olup gövde kısmı halen ayakta. Caminin cephelerinde, büyük olasılıkla sonradan eklendiği düşünülen birbirlerinden farklı boyutlarda dikdörtgen kesitli 24 payanda bulunmaktadır. Doğu ve batı cephelerinde bulunan daha küçük boyutlardaki dikdörtgen payandaların orijinal olduğu sanılmaktadır. Caminin doğu ve batı cephelerindeki bölümler taştan yapılmış olup oldukça sade bir taş işçiliği göstermektedir.

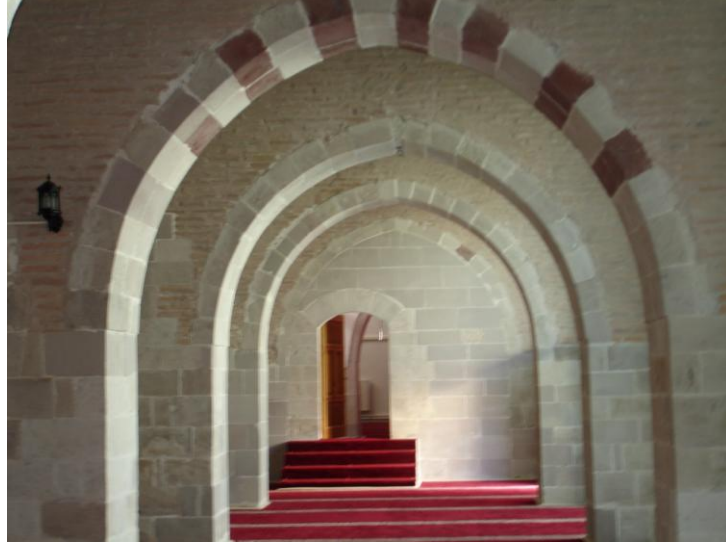
Caminin harim bölümü, dikdörtgen payelerle doğu-batı yönünde, sivri kemerli, enine sekiz alana ayrılmaktadır. Yapının orta ekseninde, mihrap önünde L biçimli payeler,

sivri kemerler, kuzey-güney yönünde dikdörtgen planlı bir iç avlu ve güneyde kare planlı bir eyvan ve mihrap önü bölümünü oluşturmuştur. Mihrap önü üç dilimli, kemerli tromplu bir kubbe ile örtülmüştür. Kubbenin içerisi firuze ve patlıcan moru çini mozaikler ve Mühr-ü Süleyman motifi ile süslenmiştir. Mihrap önünde kuzey-güney yönünde sivri kemerlerle kare planlı iki mekân meydana getirilmiştir.

Şekil 5.1-5.10. arasında dış ve iç yapı elemanları gösterilen Malatya Ulu Caminin planı, kullanılan malzemeleri, tasarımı ve yapım teknikleri ile Büyük Selçuklu mimari özelliklerini yansıtan önemli bir eserdir [32].



Şekil 5.1. Malatya Ulu cami dış görünüşü



Şekil 5.2. Malatya Ulu cami iç görünüşü



Şekil 5.3. Malatya Ulu cami avlu kemeri görünüşü



Şekil 5.4. Malatya Ulu cami minare görünüşü



Şekil 5.5. Malatya Ulu cami avlu görünüşü



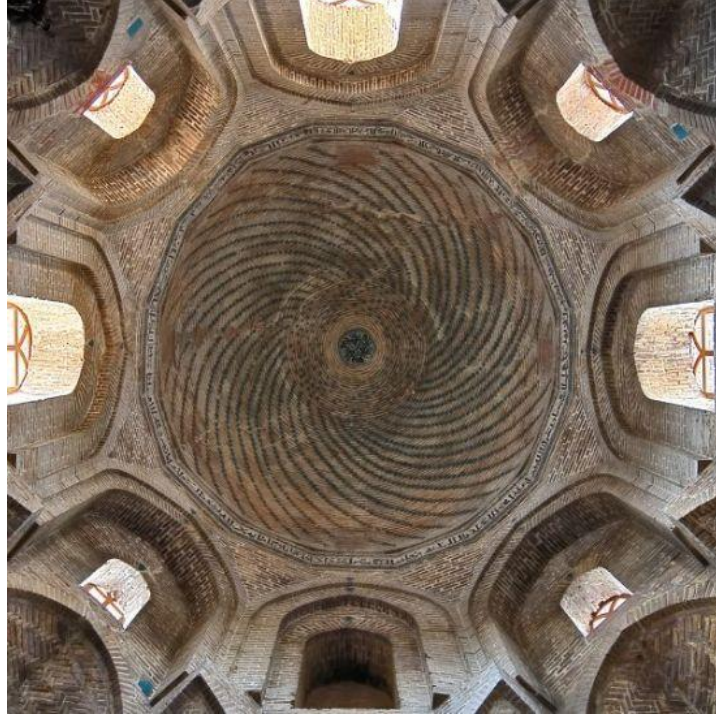
Şekil 5.6. Malatya Ulu cami tonoz görünüşü



Şekil 5.7. Malatya Ulu cami çini motifleri



Şekil 5.8. Malatya Ulu cami kapatılan güney kapısının görünüşü



Şekil 5.9. Malatya Ulu cami kubbe görünüşü

5.3. Yapı Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

Tarihi yapıların gelecek nesillere aktarılması için yapılacak restorasyon çalışmalarında yapı davranışlarının ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi önemli bir adımdır. Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin kompozit özellikte olması ve benzer elemanların farklı malzeme özellikleri göstermesinden dolayı yapı malzeme karakteristiğinin belirlenmesi oldukça güçtür. Malzeme özelliklerinin bilinmesi yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde de önemlidir. Yapının sismik davranışını düşey taşıyıcı elemanların rijitliği belirlemektedir. Yapının rijit olup olmadığı, düşey taşıyıcı elemanların alanının kat planı alanına oranının bulunmasıyla belirlenebilmektedir.

Malatya Ulu Caminin sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere Tablo 5.1.'de verilen malzeme parametreleri çok sayıda literatür araştırılmasıyla belirlenmiş olup, taş + harç için Romanesque Kilisesi, tuğla+harç için Saint Anrea Kulesindeki değerler baz alınarak analiz yapılmıştır [12,13].

Tablo 5.1. Analizde kullanılan malzeme parametreleri

Malzeme	Elastisite Modülü (kPa)	Basınç Dayanımı (kPa)	Çekme Dayanımı (kPa)
Tuğla+Harç	1.8×10^6	4×10^3	4×10^2
Taş + Harç	3×10^6	8×10^3	8×10^2

6. MALATYA ULU CAMİSİNİN DEPREM DAVRANIŞI

6.1. Malatya Ulu Caminin Sonlu Elemanlar Modeli ve Analizi

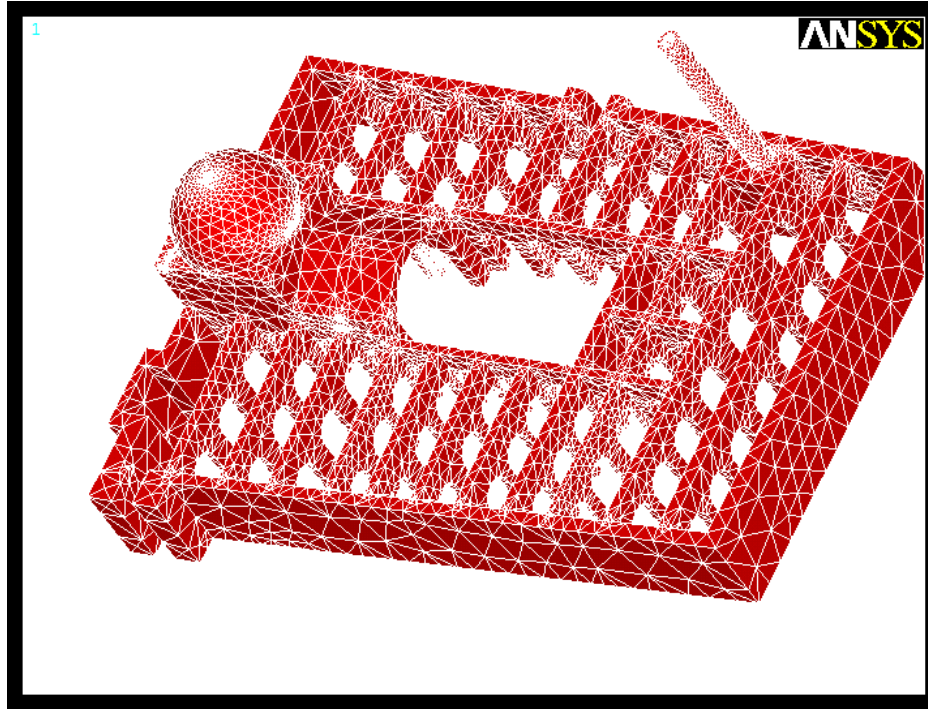
Tarihi yapıların mühendislik hesap yöntemleriyle analiz edilmesi, geometrik yapılarının karmaşık olması, taşıyıcı elemanlar ve malzeme özelliklerinin tam olarak bilinmemesi gibi sebeplerden dolayı zor olmaktadır [33]. En mükemmel analiz yöntemi kullanılsa bile birçok bilinmeyen olduğundan yapılan analizler yüzde yüz güvenli olmayacaktır. Bu nedenle yapılan analizler yapısal davranış hakkında fikir sahibi olmak için yorumlanmalıdır.

Günümüzde bilgisayar teknolojisinde ki hızlı gelişmeler sebebiyle yapısal analiz programlarının geliştirilmesi ve veri hazırlama kolaylıkları, özellikle karmaşık geometriye sahip tarihi binaların yapısal analizlerine olan ilgiyi artırmıştır. Ancak analitik modelleme kurallarına dikkat edilmeden yapılan analizlerin sonuçlarında önemli hatalar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, tarihi binaların sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan hesaplarında modelleme aşaması çok önemlidir. Ayrıca, analitik modellemede önemli olan başka bir konu ise modellemenin tarihi yapıya en uygun şekilde idealleştirilmesidir [34].

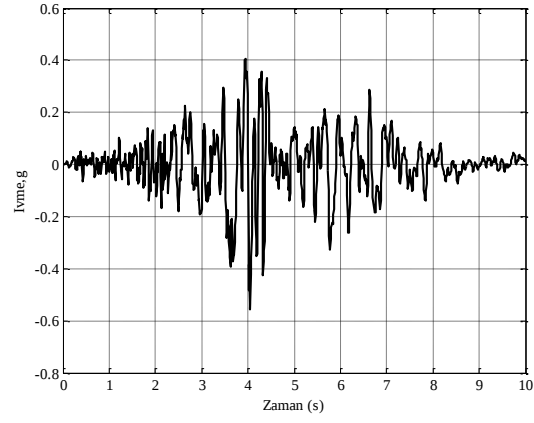
Malatya Ulu Caminin analizi, çeşitli geometrik şekillere sahip yapı elemanlarının bütün kesit ve malzeme özelliklerinin kolaylıkla tanımlanabileceği bir analiz yöntemi olan, sonlu elemanlar metoduyla yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde yapının veya yapı elemanlarının geometrisi sonlu sayıda düğüm noktası ile belirlenmektedir. Bu yüzden Malatya Ulu Cami analizinde, yapı davranışının doğru bir şekilde belirlenmesi için çok sayıda düğüm noktası kullanılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelinde, 41661 adet üçgen prizmatik eleman, 14556 adet düğüm noktası kullanılmıştır. Yapının gerçek malzeme özellikleri bilinmediğinden, kullanılan malzeme özellikleri belirlenirken Tablo 5.1. de verilen değerler esas alınmıştır.

Malatya Ulu Caminin Şekil 6.1 de gösterilen sonlu elemanlar yöntemi ağ modeli ANSYS paket programıyla yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzeme parametreleri; taş için elastisite modülü, 3000 MPa, poisson oranı, 0.25, birim hacim ağırlığı, 2.2 t/m³ ve tek eksenli çekme dayanımı 0.8 MPa, basınç dayanımı 8 MPa olarak belirlenmiştir. Tuğla için elastisite modülü 1800 MPa, poisson oranı 0.15, birim hacim ağırlığı 1.8 t/m³, tek

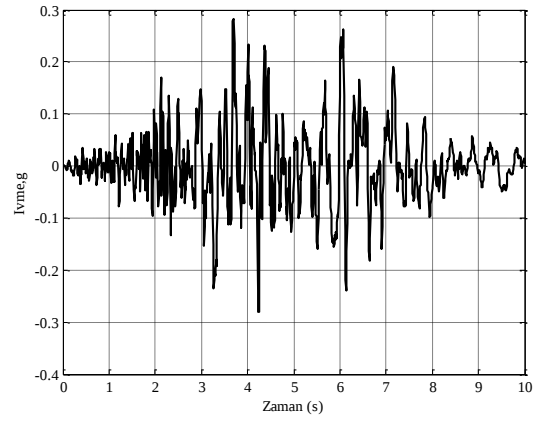
eksenli çekme dayanımı 0.4 MPa, basınç dayanımı 4 MPa olarak alınmıştır [12, 13]. Temelin rijit olduğu kabul edilmiştir. Analizlerde Şekil 6.2. de verilen, aletsel büyüklüğü 6.1 olan 1 Mayıs 2003 Bingöl depreminin ivme kayıtları kullanılmıştır. Depremin doğu-batı ivme genliği 0.55g, kuzey-güney ivme genliği 0.28g, düşey ivme genliği ise 0.48g dir. Bingöl depreminin doğu-batı bileşeni caminin uzun doğrultusuna, kuzey güney bileşeni kısa doğrultusuna, düşey bileşeni ise düşey doğrultusuna etki ettirilmiştir. Bingöl depreminin uygulanması durumunda camide ağır hasarlar meydana geldiği için deprem ivme genlikleri 0,5 kat azaltılarak lineer ve lineer olmayan çözümler tekrarlanmıştır. Yapı sistemi için Rayleigh sönümü dikkate alınmıştır. Rayleigh sönüm katsayılarının hesabını yapmak için önce yapının modal analizi yapılmıştır. Yapıya ait ilk 20 mod etkin kütle oranları ile birlikte Tablo 6.1. de verilmiştir. 4. modun etkin modlardan biri olduğu görülmektedir. 4. ve 14. mod şekilleri Şekil 6.3. de verilmiştir. Rijitlik ve kütle orantılı Rayleigh sönüm katsayıları 4. ve 14. modlarda 0.05 sönüm oranını sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Dinamik analizde HHT- α algoritmasının tahmin-düzeltilme yöntemiyle birleştirilmiş formu kullanılmıştır. İntegrasyon zaman adımı, malzemelerdeki kırılma ve ezilmenin davranışa etkisini yansıtacak şekilde 0.005 s seçilmiştir.



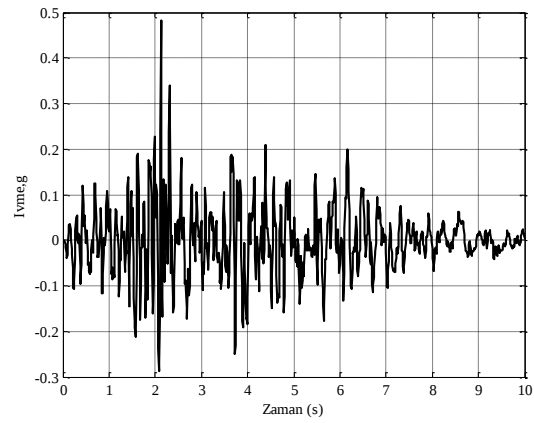
Şekil 6.1. Malatya Ulu cami sonlu elemanlar modeli



a) Doğu-batı bileşeni



b) Kuzey-güney bileşeni

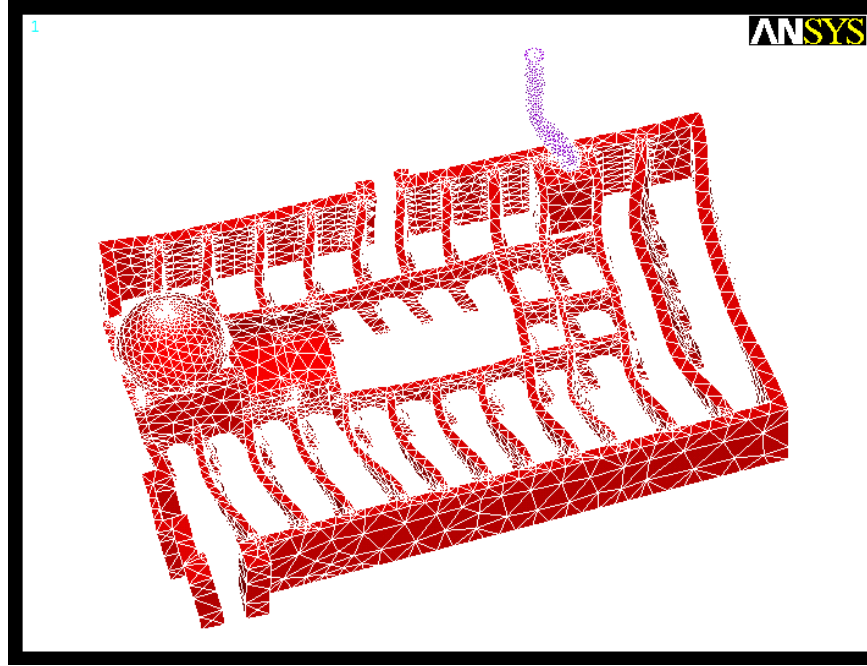


c) Düşey bileşeni

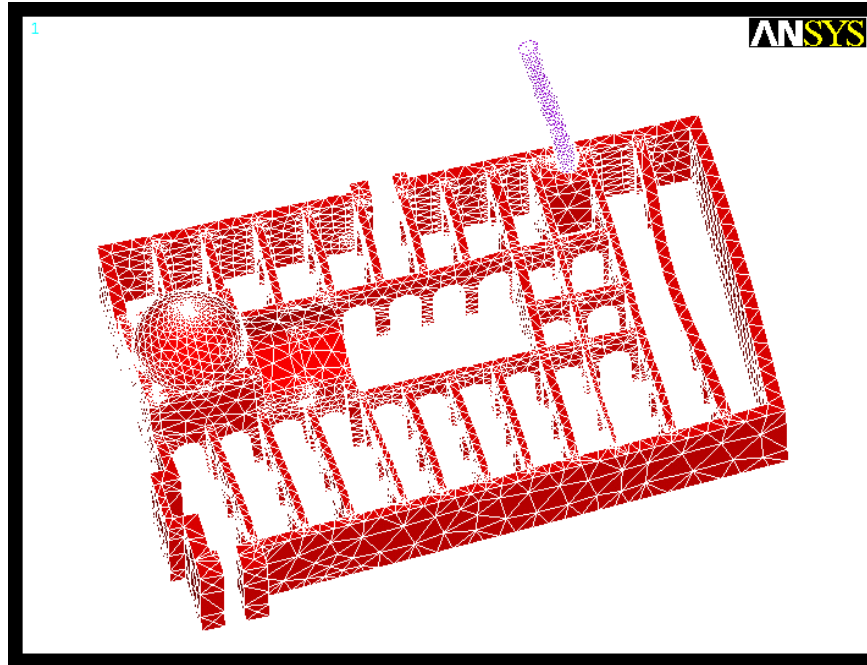
Şekil 6.2. Bingöl depremi ivme kayıtları

Tablo 6.1. Malatya Ulu cami modal analiz sonuçları

Mod	Frekans (Hz)	Periyod (sn)	Toplamsal Etkin Kütle (%)		
			X	Y	Z
1	1.26821	0.78851	0.9033	0.0078	0.00009
2	1.27668	0.78328	0.9083	1.375	0.00104
3	5.34270	0.18717	5.652	1.377	0.00112
4	6.34990	0.15748	72.062	1.384	0.7895
5	7.45597	0.13412	72.404	1.603	0.8563
6	7.46401	0.13398	72.481	2.534	0.8995
7	8.27503	0.12085	72.677	44.353	44.829
8	8.38507	0.11926	72.679	44.363	44.831
9	8.47697	0.11797	72.793	79.577	71.510
10	8.94800	0.11176	75.425	81.966	78.409
11	9.37975	0.10661	76.649	84.113	78.411
12	9.90658	0.10094	77.920	84.123	82.183
13	10.1465	0.09856	77.945	84.620	82.444
14	10.2180	0.09787	83.445	86.199	87.338
15	10.6715	0.09371	83.573	86.385	89.441
16	10.7246	0.09325	85.401	92.076	91.500
17	10.9443	0.09137	86.941	98.327	94.776
18	11.1961	0.08932	87.001	99.395	94.782
19	11.3077	0.08844	97.276	99.402	96.610
20	11.4866	0.08706	100	100	100



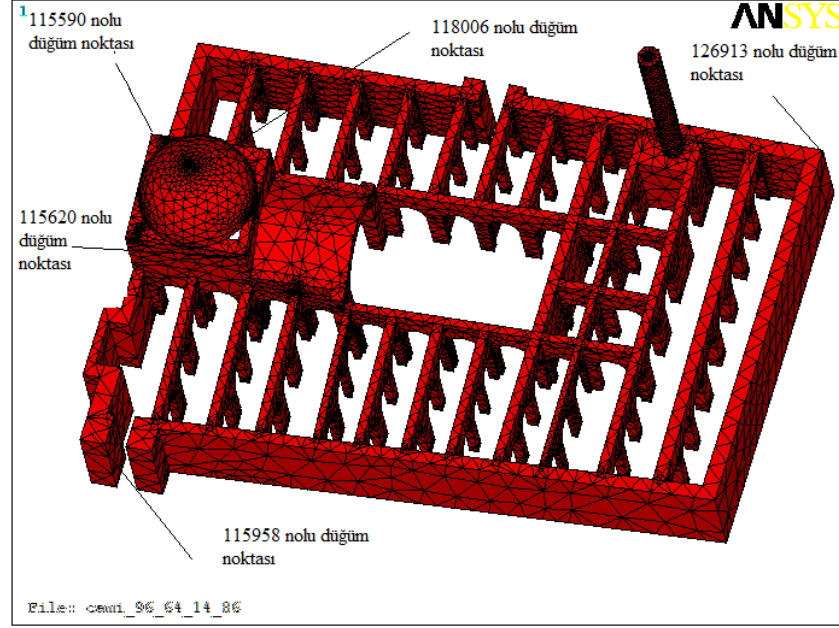
a) 4. mod şekli



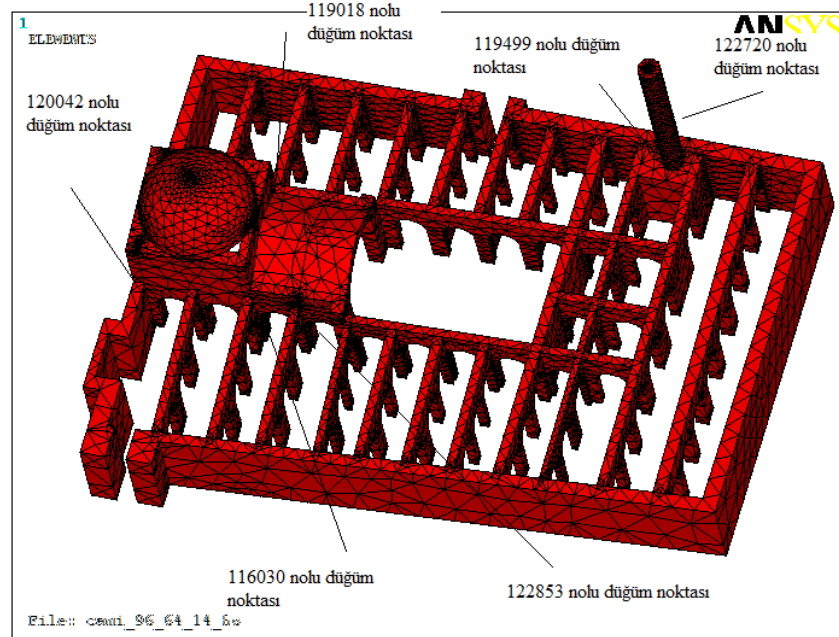
b) 14. mod şekli

Şekil 6.3. Malatya Ulu cami 4. ve 14. mod şekilleri

Tepki büyüklükleri olarak yer değiştirmeler, asal gerilmeler ve hasarlar dikkate alınmıştır. Yer değiştirmelerin zamanla değişimlerinin verildiği düğüm noktaları Şekil 6.4. de, asal gerilmelerin zamanla değişimlerinin verildiği elemanlar ve ilgili düğüm noktaları Şekil 6.5. de verilmiştir.



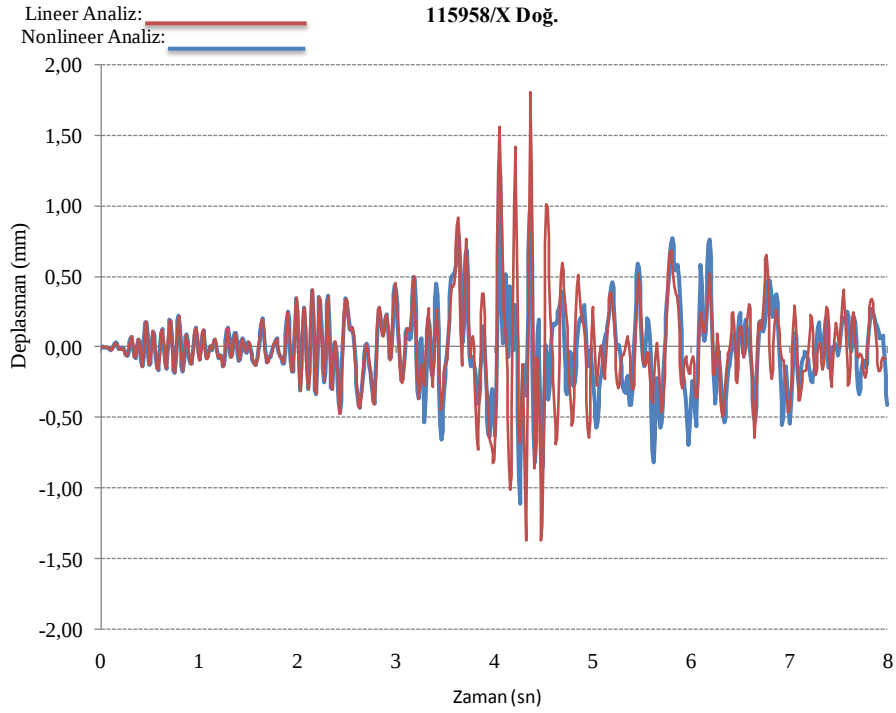
Şekil 6.4. Yer değiştirmelerin zamanla değişimlerinin incelendiği düğüm noktaları



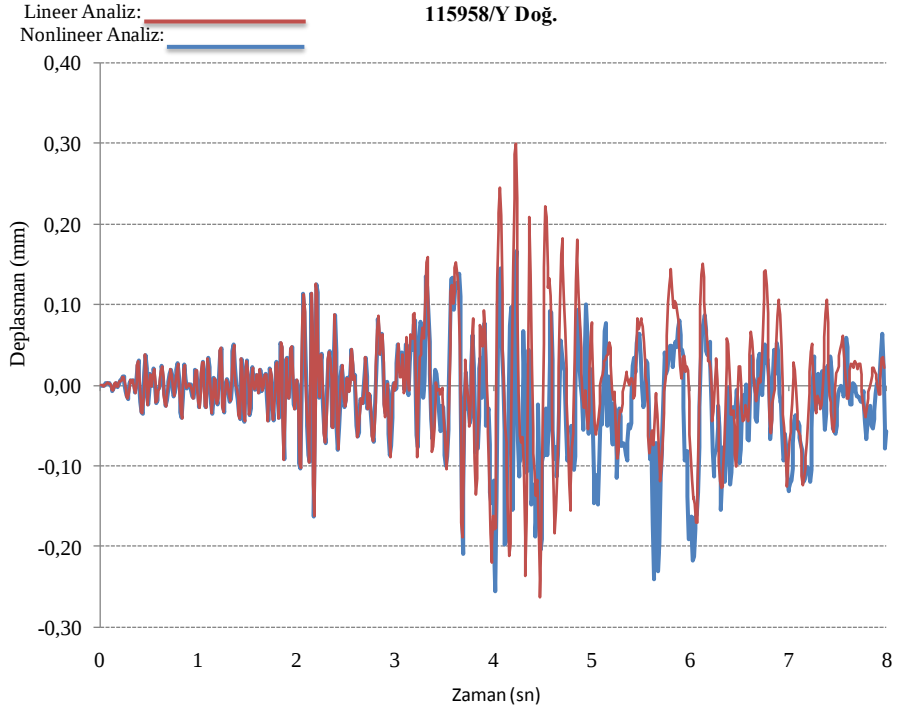
Şekil 6.5. Asal gerilmelerin zamanla değişimlerinin incelendiği düğüm noktaları

Caminin lineer ve lineer olmayan analizlerinde 115958, 126913, 115590, 115620, 118006 numaralı düğüm noktalarının x, y, z doğrultusundaki yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 6.6-6.20 de verilmiştir.

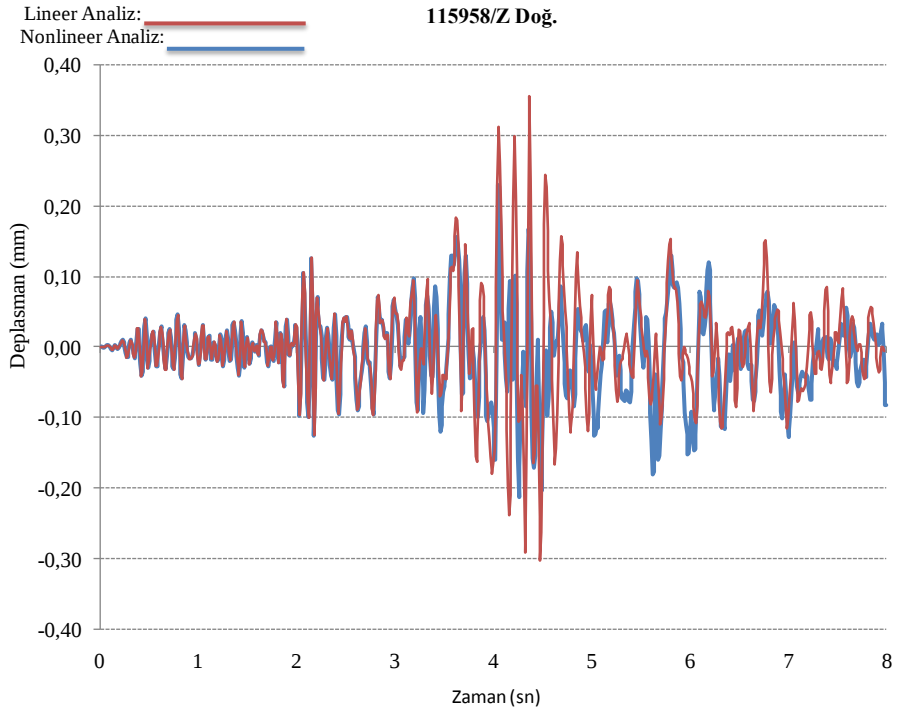
115958 nolu düğüm noktası caminin doğu kapısı girişinin üst noktasından alınmıştır. Bu düğüm noktasının maksimum yer değiştirmesi lineer analizde 1.8 mm, lineer olmayan analizde 1.3 mm dir. Lineer olmayan analiz sonuçlarının lineer analiz sonuçlarına göre Tablo 6.2. verilen maksimum yer değiştirme mutlak farkı % 41.7 dir.



Şekil 6.6. 115958 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

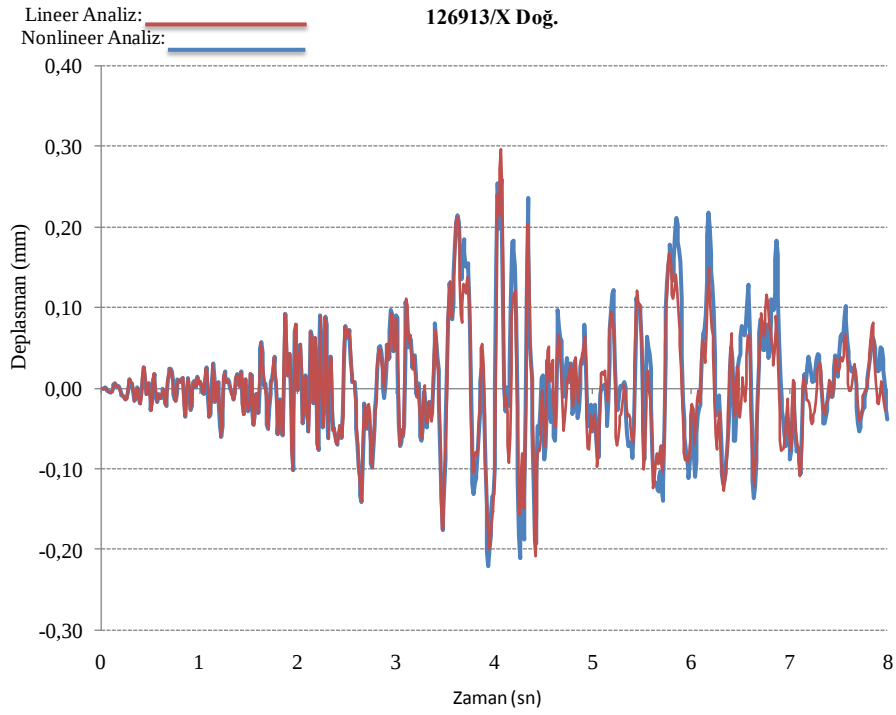


Şekil 6.7. 115958 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

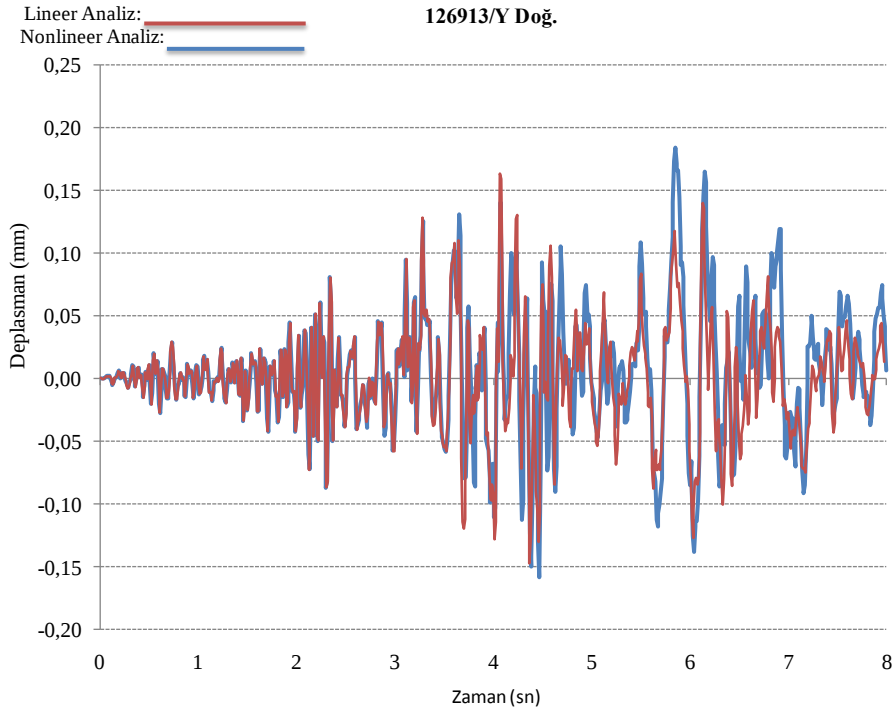


Şekil 6.8. 115958 nolu düğüm noktasının z doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

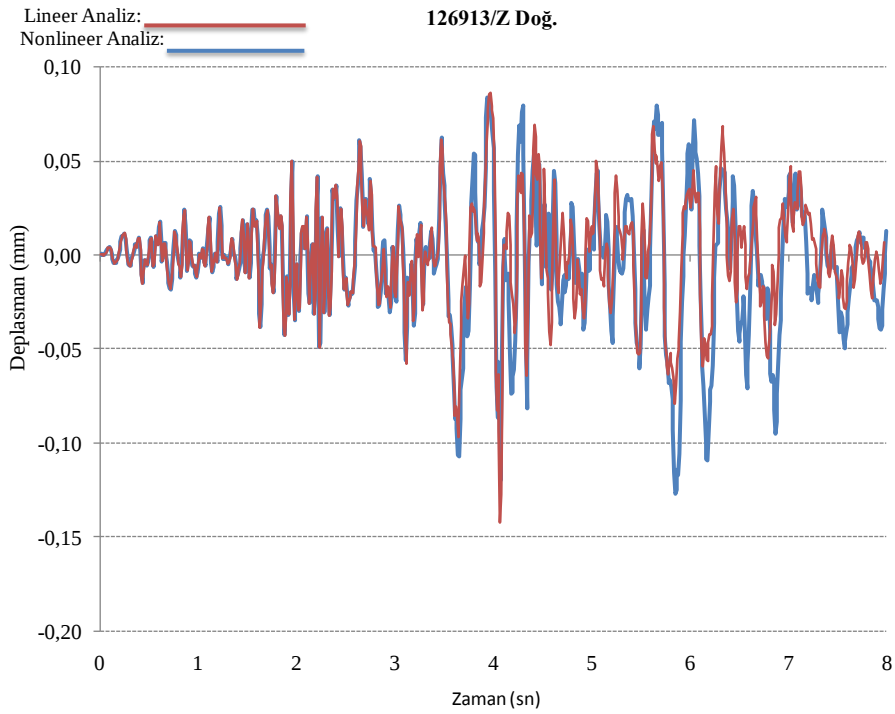
126913 nolu düğüm noktası cami dış duvarının kuzey-batı yönündeki köşe birleşim noktasından alınmıştır. Bu noktanın maksimum yer değıştirmesi x doğrultusunda ve lineer analizde meydana gelmiştir. Lineer olmayan ve lineer analizler sonucunda oluşan mutlak yer değıştirme farkı % 14.3 dür.



Şekil 6.9. 126913 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değıştirmesinin zamanla değışimi

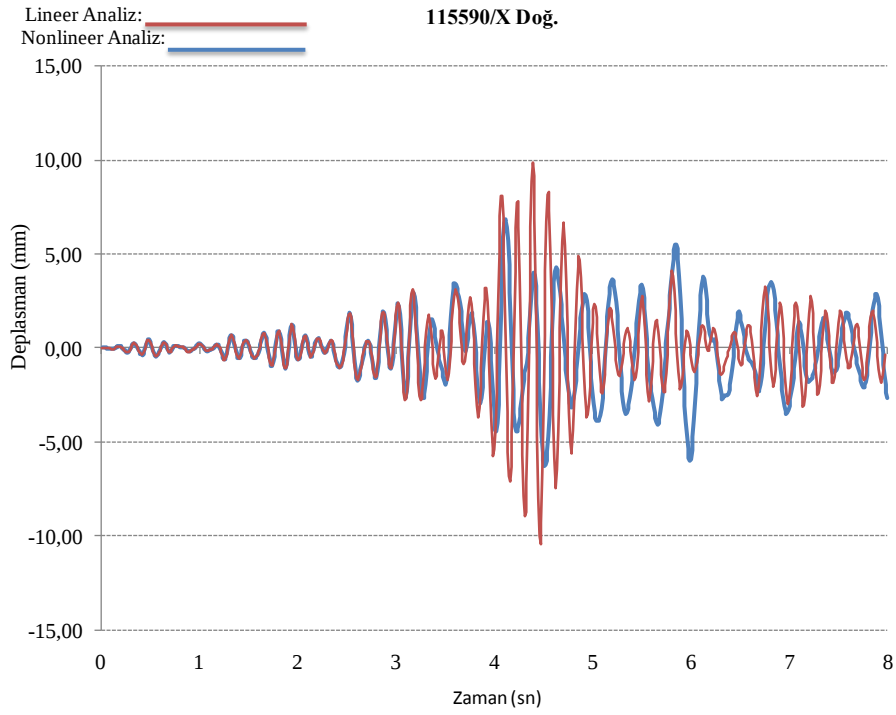


Şekil 6.10. 126913 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

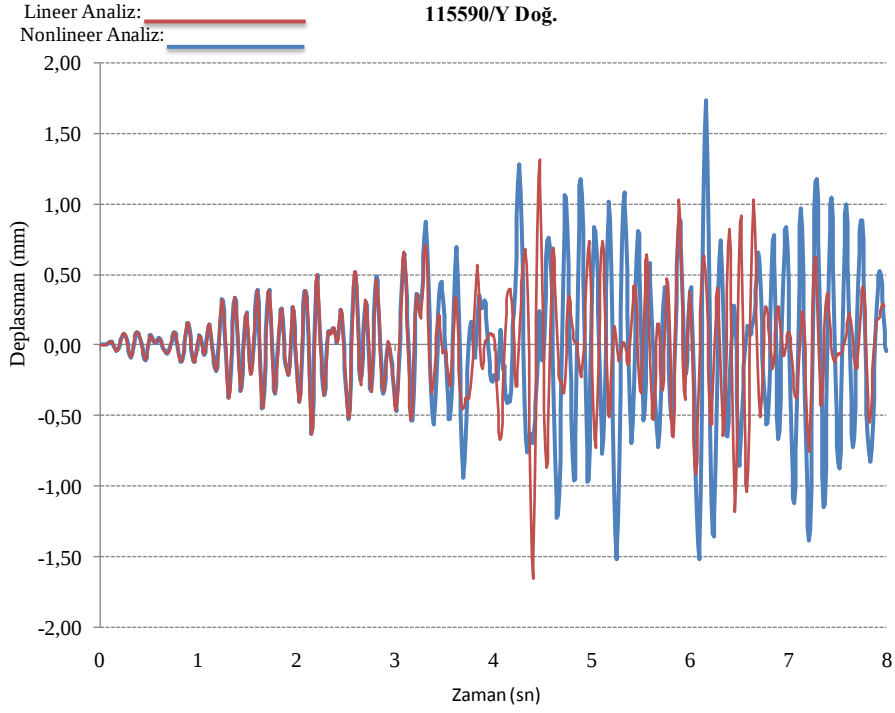


Şekil 6.11. 126913 nolu düğüm noktasının z doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

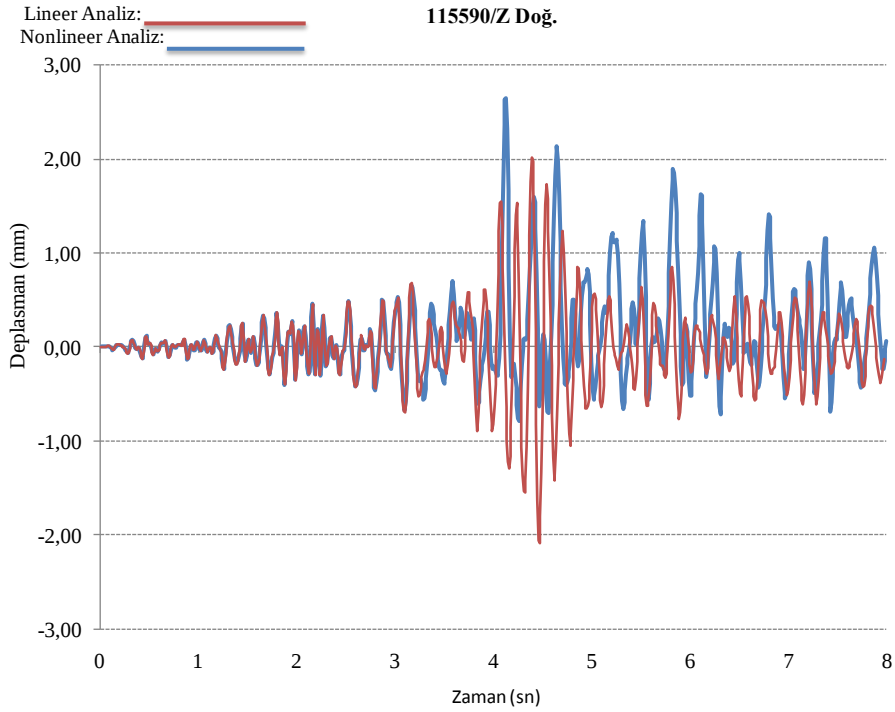
115590 nolu düğüm noktası caminin kuzey-doğu doğrultusunda, kubbenin kasnak kısmının oturduğu taşıyıcı duvarın alt noktasından alınmıştır. Lineer analizde caminin bu noktada yapmış olduğu deplasman 9.8 mm, lineer olmayan analizde ise 6.9 mm dir. İki analiz sonucunda yer değiştirme mutlak farkı % 43.3 dür.



Şekil 6.12. 115590 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

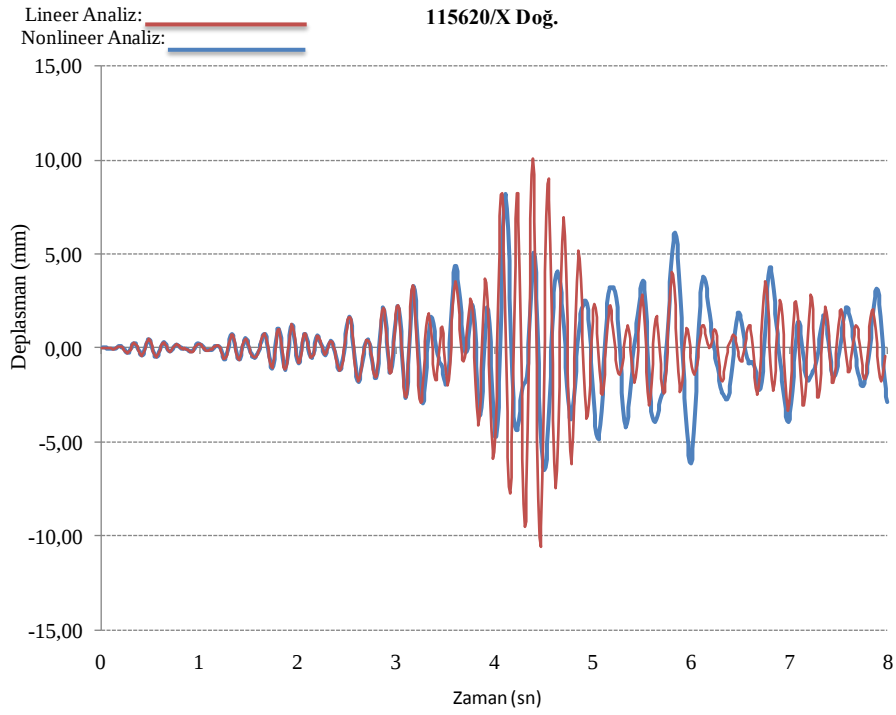


Şekil 6.13. 115590 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

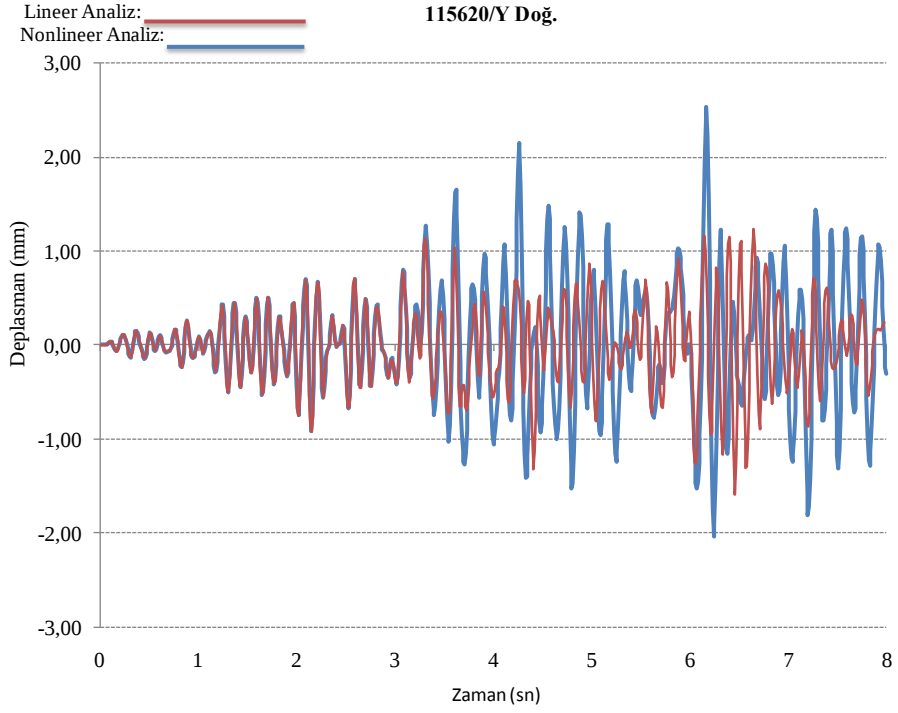


Şekil 6.14. 115590 nolu düğüm noktasının z doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

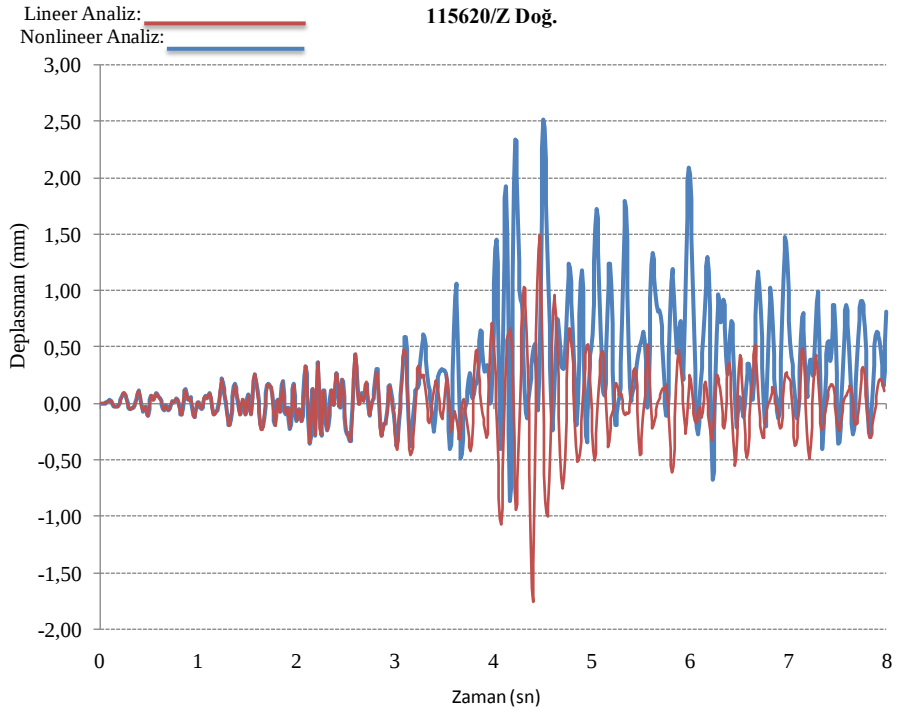
115620 nolu düğüm noktası kubbe ile tonozun kuzey-güney doğrultusunda birleşim bölgesinde bulunan taşıyıcı duvarın alt kısmından alınmıştır. Lineer analizde x yönünde maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir ve iki analiz sonucunda oluşan mutlak fark %22.5 dir.



Şekil 6.15. 115620 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

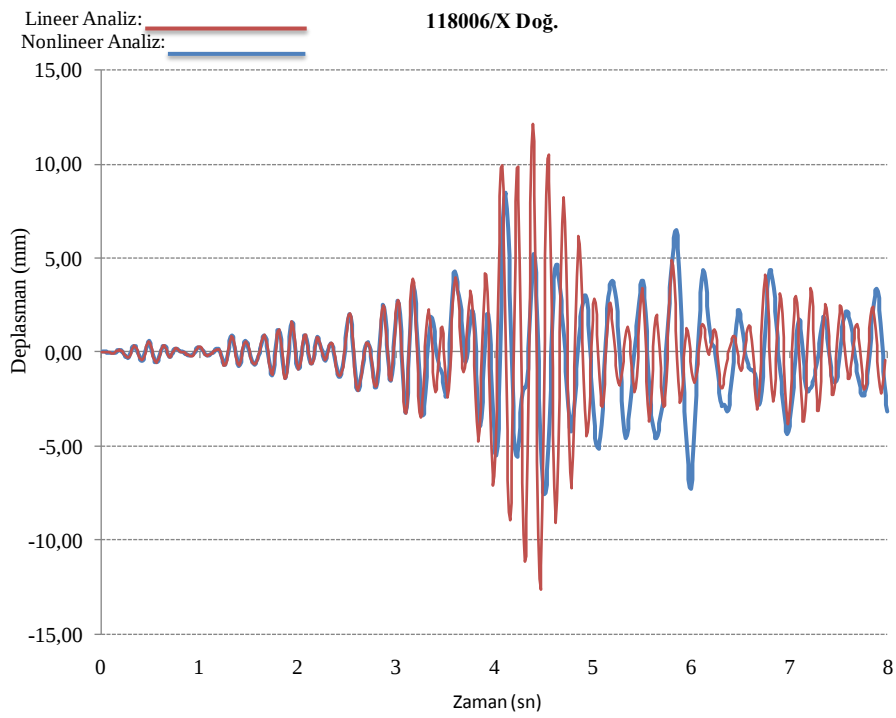


Şekil 6.16. 115620 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

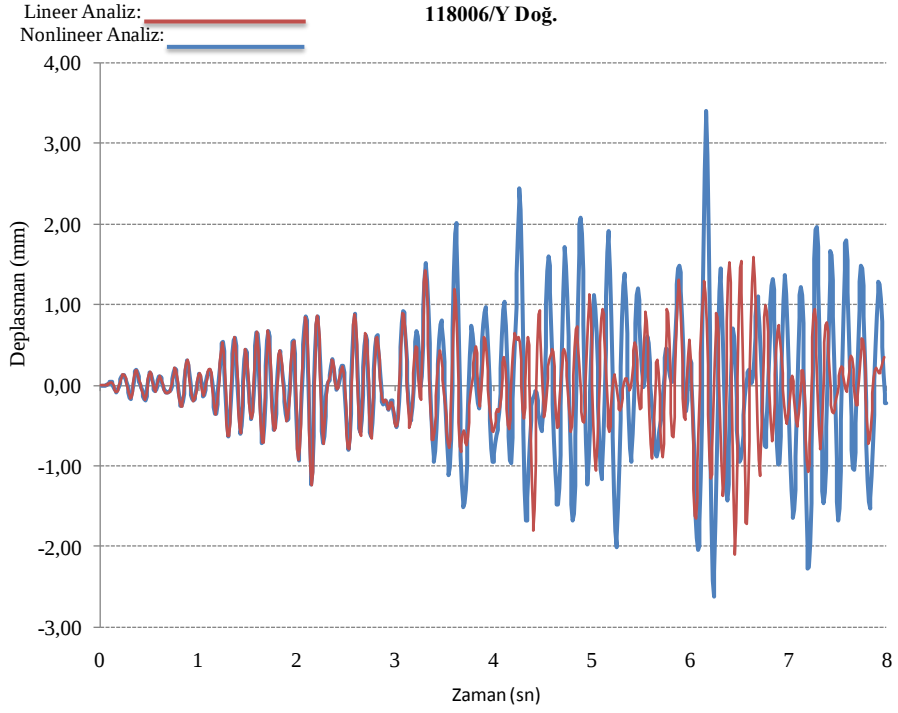


Şekil 6.17. 115620 nolu düğüm noktasının z doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

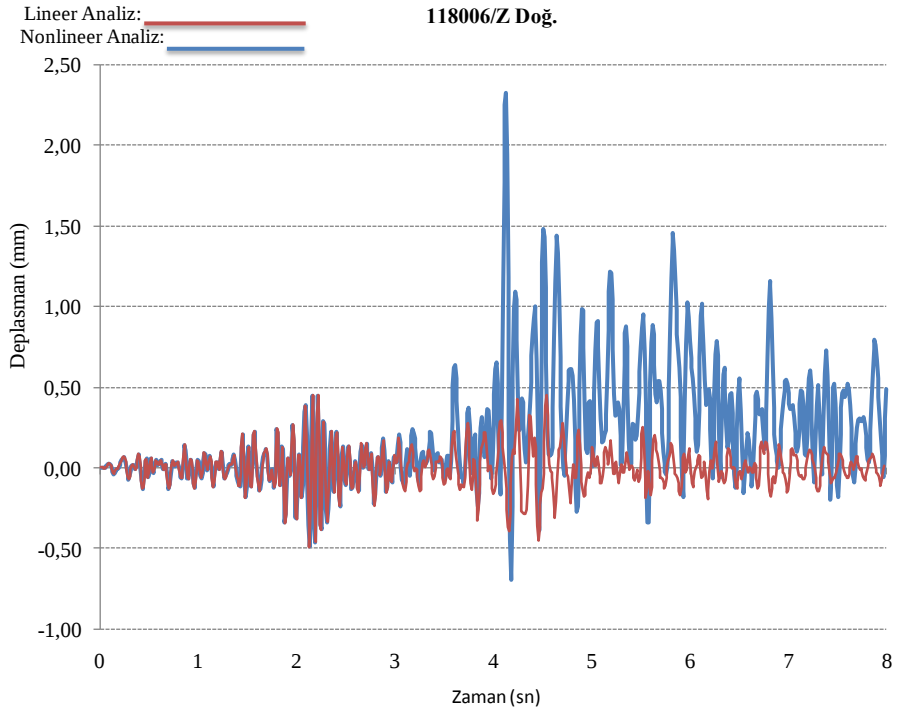
118006 nolu düğüm noktası kubbenin tepe noktasından alınmıştır. Düğüm noktasında ki maksimum yer değıştirme lineer analizde 12.1 mm, lineer olmayan analizde ise 8.5 mm olup x doğrultusunda meydana gelmektedir. Y ve z doğrultusunda lineer olmayan analizde daha fazla deplasman yapmış olduğu Tablo 6.2 de görölmektedir. Analiz sonuçlarında maksimum yer değıştirme mutlak farkı %42.6 dır.



Şekil 6.18. 118006 nolu düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değıştirmesinin zamanla değışimi



Şekil 6.19. 118006 nolu düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

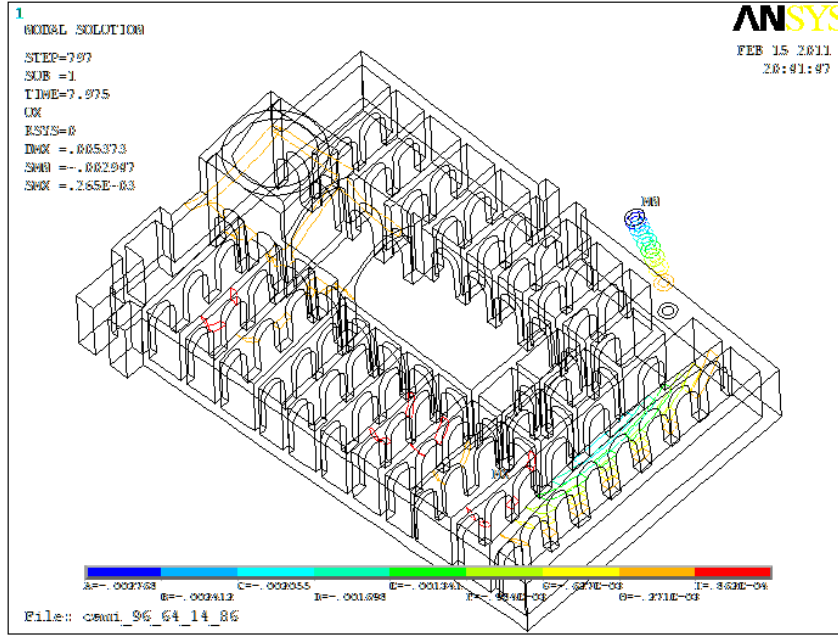


Şekil 6.20. 118006 nolu düğüm noktasının z doğrultusundaki yer değiştirmesinin zamanla değişimi

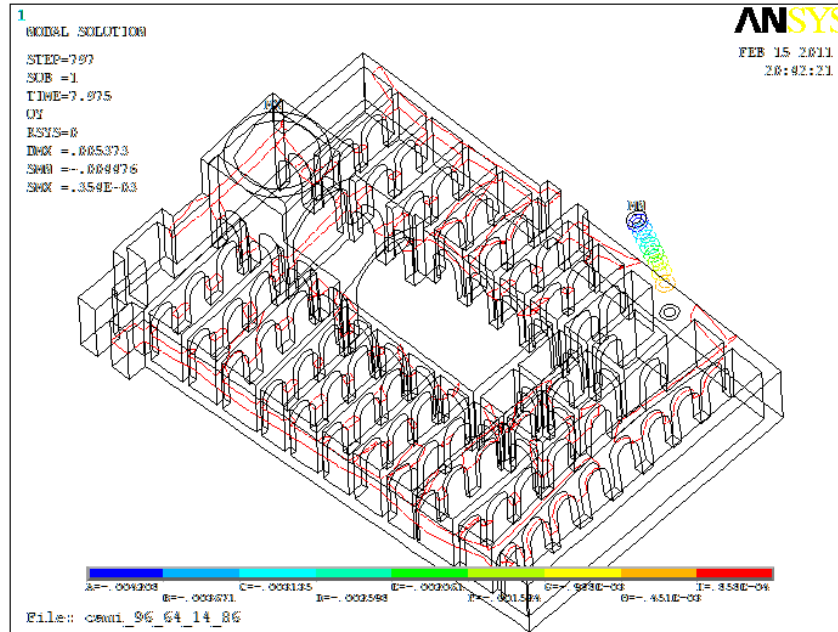
115598, 126913, 115590, 115620, 118006 nolu düğüm noktalarında x, y, z doğrultularında lineer ve lineer olmayan analizler sonucunda meydana gelen mutlak maksimum yerdeğiştirmeleri ve yüzdesel farkları Tablo 6.2. de verilmiştir. Yüzdesel farklar lineer çözümler baz alınarak hesaplanmıştır. Bu düğüm noktalarının x doğrultusunda daha fazla yerdeğiştirme yaptığı görölmektedir. X doğrultusunda yapılan yerdeğiştirmenin fazla olması Bingöl depreminin maksimum ivme genliğinin bu doğrultuda verilmesinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Lineer ve lineer olmayan analizlerde maksimum yerdeğiştirme kubbenin tepe noktasından alınan 118006 nolu düğüm noktasında meydana gelmiştir. Lineer analiz sonucunda x ve z yönündeki yer değiştirmelerin kubbe, minare ve tonoz kısmında daha fazla olduğu, y yönündeki yer değiştirmelerin ise genel olarak yapının temel kısmında meydana geldiği şekil 6.21, 6.22 ve 6.23 de görölmektedir. Lineer olmayan analiz sonucunda ise yerdeğiştirmelerin x ve z doğrultusunda kubbe, tonoz, minare, kemer ve dış duvarlarda meydana geldiği y yönündeki yerdeğiştirmelerin lineer analizde olduğu gibi yapı temel kısmında olduğu şekil 6.24, 6.25 ve 6.26 dan anlaşılmaktadır.

Tablo 6.2. Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen düğüm noktalarının mutlak maksimum yer değiştirmelerinin karşılaştırılması

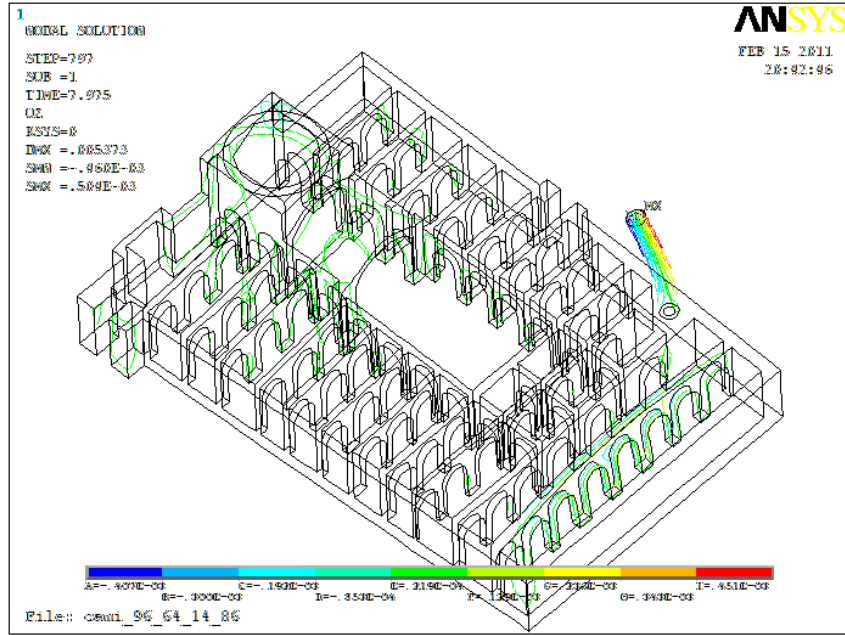
Düğüm Noktası	115958			126913			115590			115620			118006		
Yön	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Lineer Yer değiştirme (mm)	1,8	0,3	0,4	0,3	0,2	0,1	9,8	1,3	2,0	10,0	1,2	1,5	12,1	1,6	0,5
Lineer Olmayan Yer Değiştirme (mm)	1,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	6,9	1,7	2,7	8,2	2,5	2,5	8,5	3,4	2,3
Mutlak Maksimum % Fark	41,7	79,7	54,7	14,3	11,3	1,9	43,3	24,3	24,3	22,5	51,4	40,9	42,6	53,0	80,5



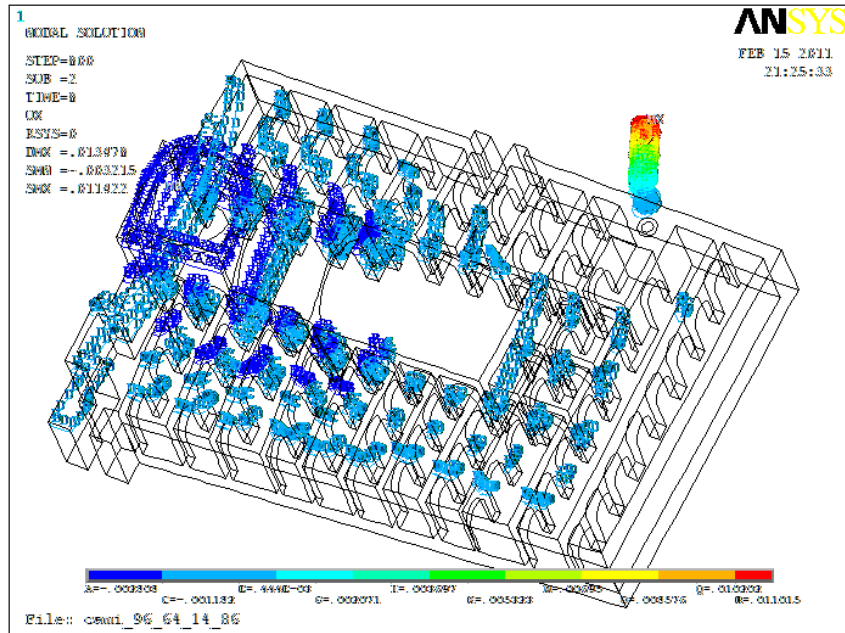
Şekil 6.21. $t=8$ s anında x doğrultusunda yapıda oluşan yer değiştirmeler
(lineer analizde)



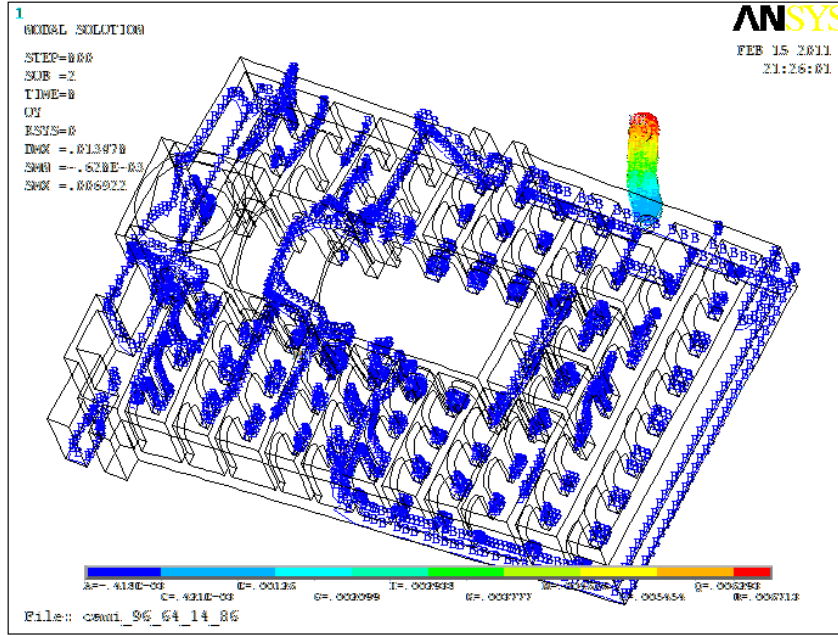
Şekil 6.22. $t=8$ s anında y doğrultusunda yapıda oluşan yer değiştirmeler
(lineer analizde)



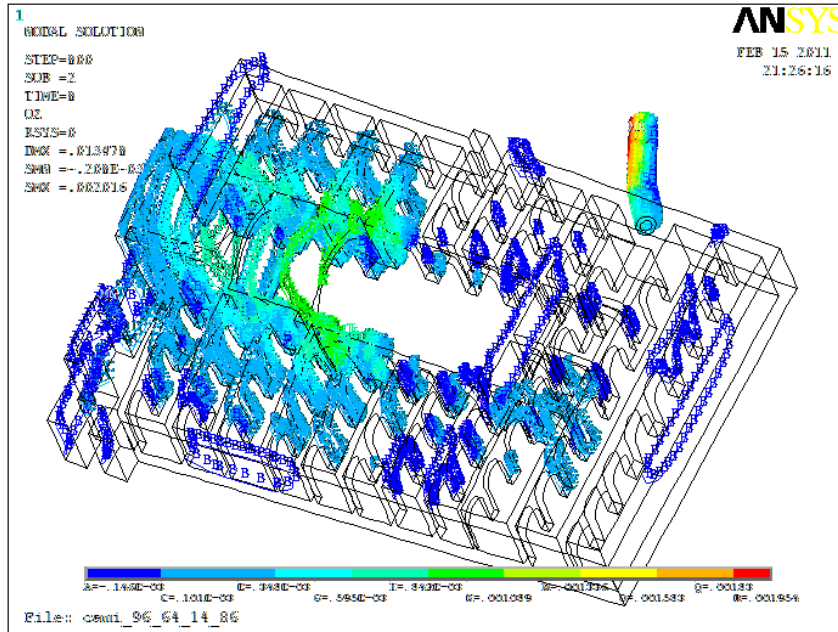
Şekil 6.23. $t=8$ s anında z doğrultusunda yapıda oluşan yer değiştirmeler
(lineer analizde)



Şekil 6.24. $t=8$ s anında x doğrultusunda yapıda oluşan yer değiştirmeler
(lineer olmayan analizde)



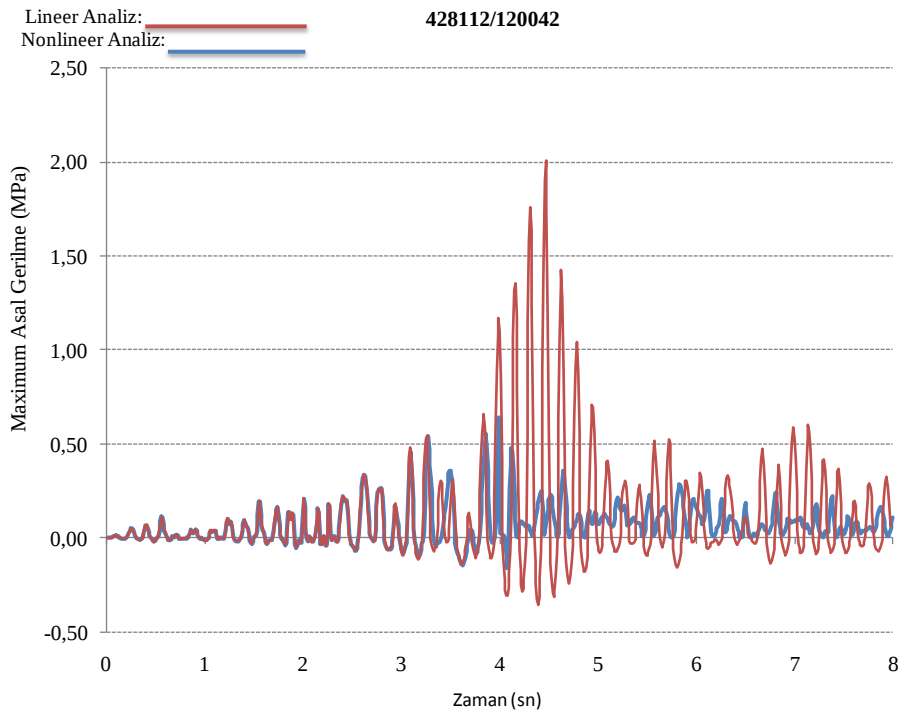
Şekil 6.25. $t = 8$ s anında y doğrultusunda yapıda oluşan yer değiştirmeler (lineer olmayan analizde)



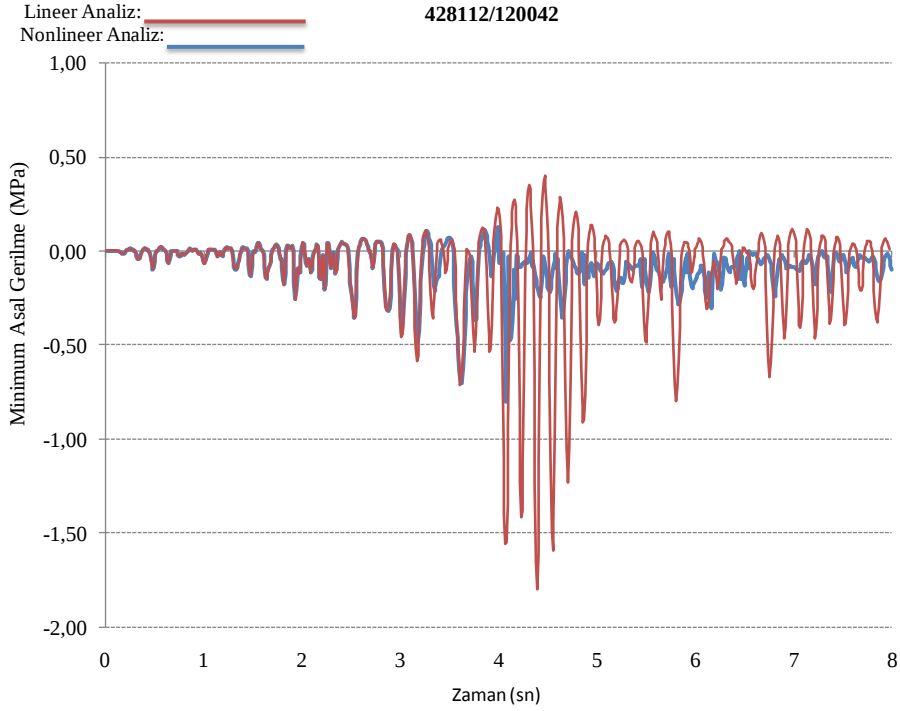
Şekil 6.26. $t = 8$ s anında z doğrultusunda yapıda oluşan yer değiştirmeler (lineer olmayan analizde)

Caminin 120042, 119018, 116030, 122853, 119499, 122720 nolu düğüm noktalarının analizleri sonucunda meydana gelen maksimum ve minimum asal gerilmeleri Şekil 6.27-6.38 de verilmiştir.

120042 nolu düğüm noktası cami doğu yönündeki dış duvar ile kubbenin oturduğu taşıyıcı duvar kesişim bölgesinden alınan noktadır. Şekil 6.27 ve 6.28 de görüldüğü gibi maksimum asal gerilmelerin lineer ve lineer olmayan analizlerde çekme gerilmesini aşmadığı anlaşılmaktadır. Tablo 6.3 de verilen bilgilere göre lineer analizde maksimum asal gerilme 2.0 MPa olurken, lineer olmayan analizde 0.6 MPa dır. Lineer olmayan analiz sonuçlarının lineer analiz sonuçlarına göre maksimum farkı % 215.1 dir.

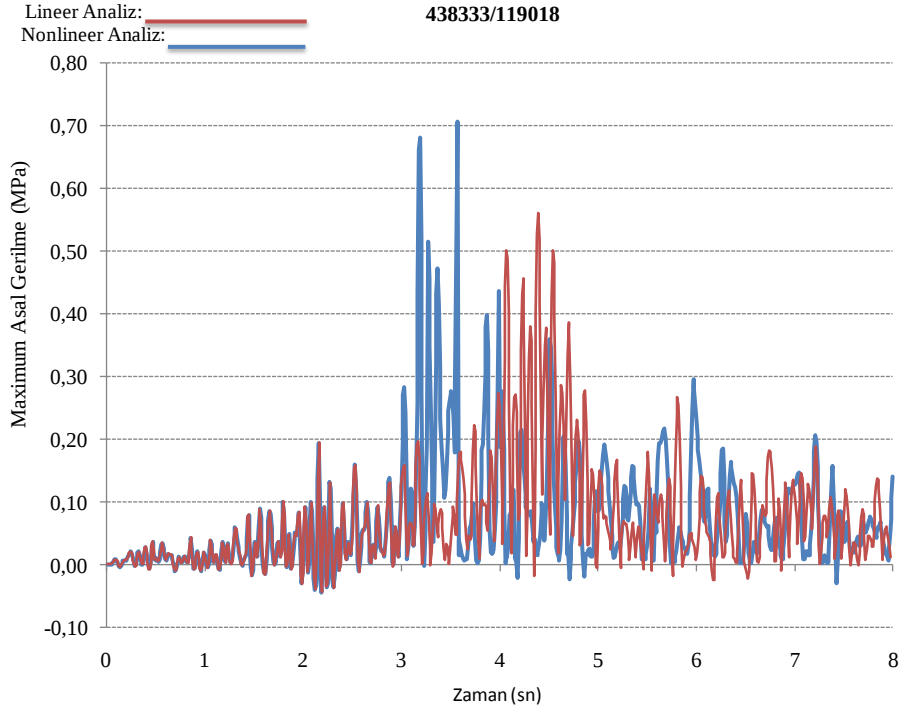


Şekil 6.27. 120042 nolu düğüm noktasının maksimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

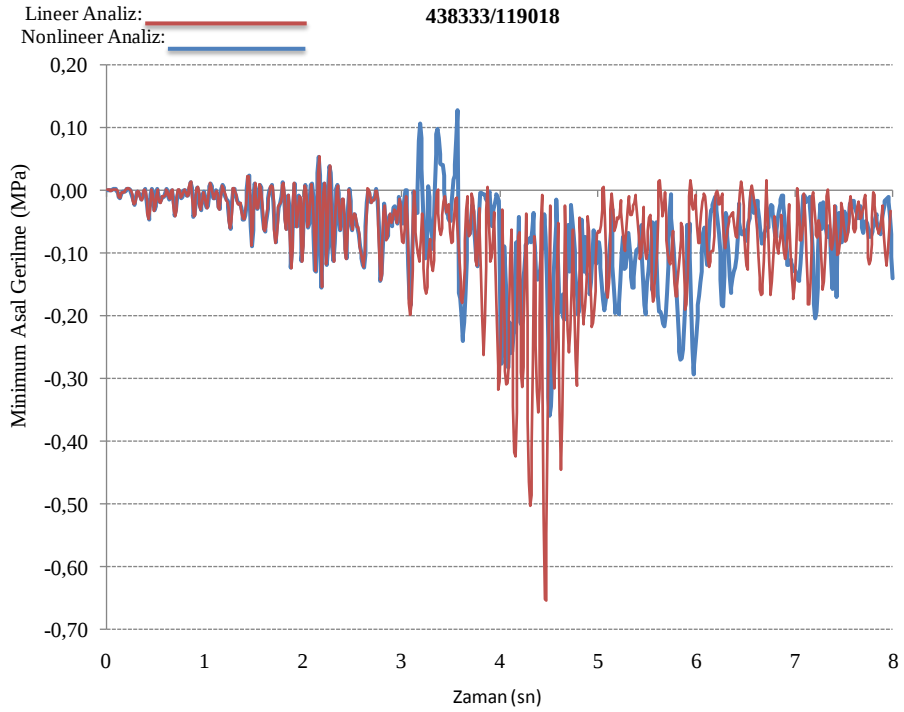


Şekil 6.28. 120042 nolu düğüm noktasının minimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

119018 nolu düğüm noktası kubbenin oturduğu taşıyıcı duvarın en alt noktasından alınmıştır. Şekil 6.29 ve 6.30 de verilen grafiklerden anlaşılacağı gibi lineer olmayan analiz sonucunda meydana gelen maksimum asal gerilme 0.7 MPa dır. Her iki çözümün 3. sn ye kadar benzer olarak ilerlediği ancak 3. sn den sonra lineer olmayan gerilmelerinin arttığı görülmektedir. Lineer analizde maksimum asal gerilme 0.6 MPa olarak ölçülmüştür. Lineer ve lineer olmayan çözümlerde maksimum asal gerilmelerin çekme dayanımını aşmadığı görülmektedir. İki analiz sonucunda maksimum fark % 20.8 dir.

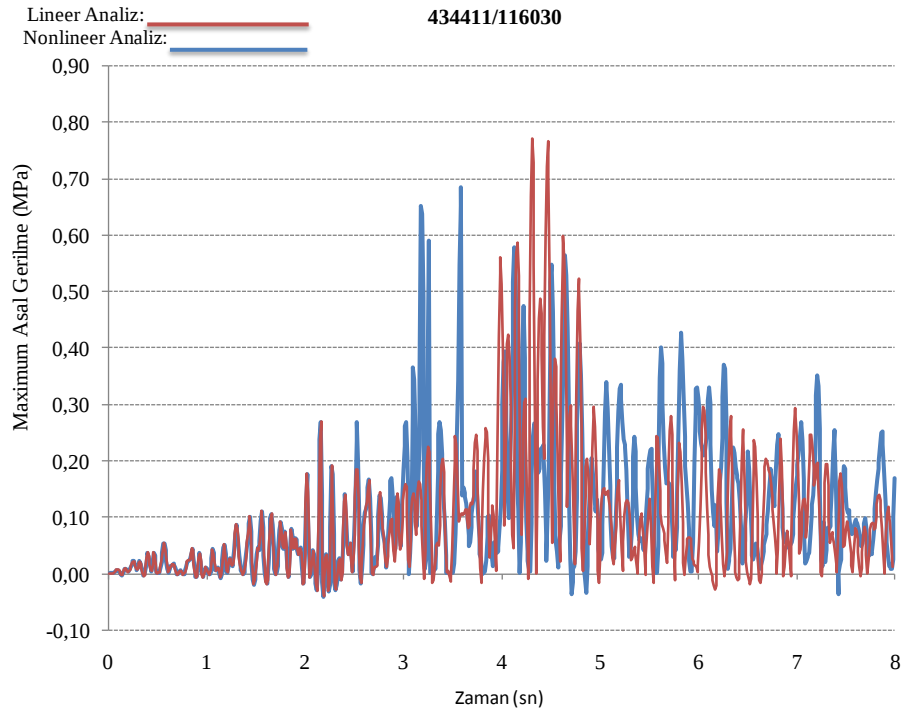


Şekil 6.29. 119018 nolu düğüm noktasının maksimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

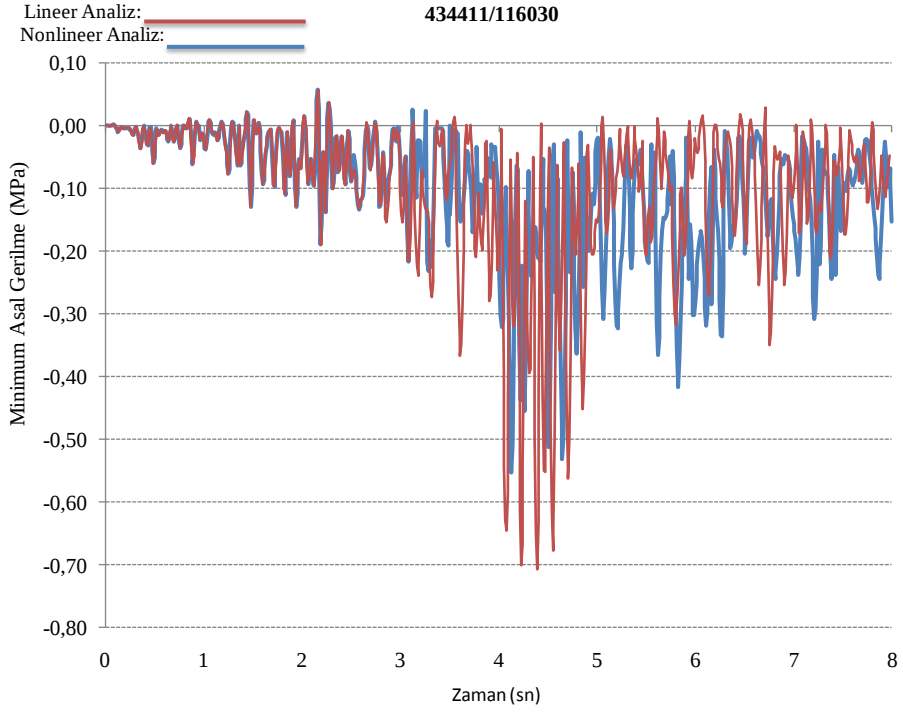


Şekil 6.30. 119018 nolu düğüm noktasının minimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

116030 nolu düğüm noktası caminin tonoz ve kubbe birleşim bölgesindeki taşıyıcı duvarın en alt noktasından alınmıştır. Lineer analizde oluşan maksimum gerilme 0.8 MPa iken lineer olmayan analizde 0.7 MPa dır. Analizlerin 2.53 sn kadar benzer olduğu görülmektedir. Sonuçta meydana gelen maksimum asal gerilme farkı %12.3 dür.

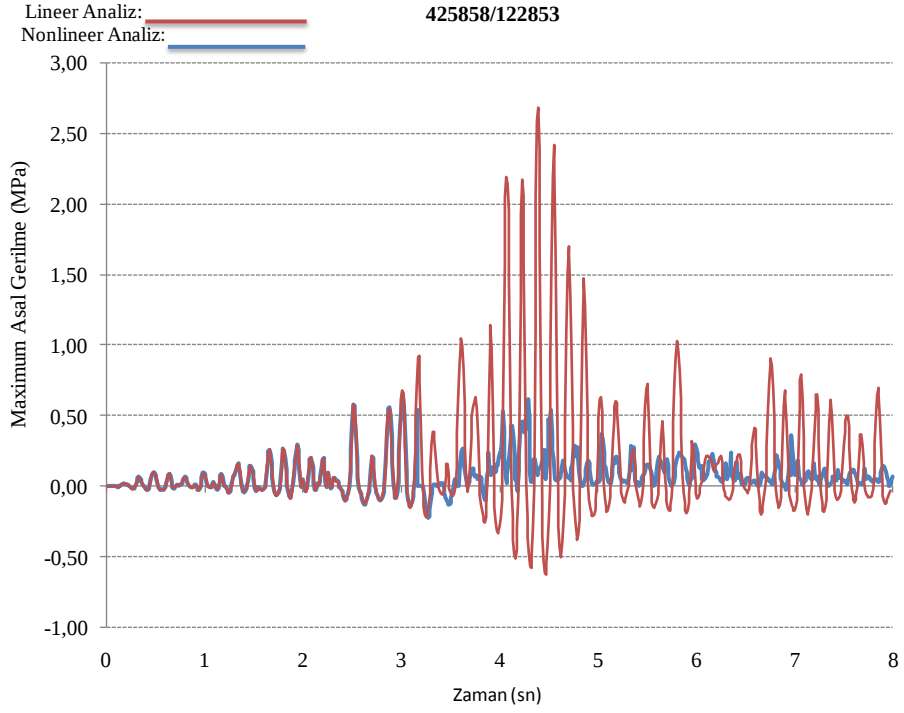


Şekil 6.31. 116030 nolu düğüm noktasının maksimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

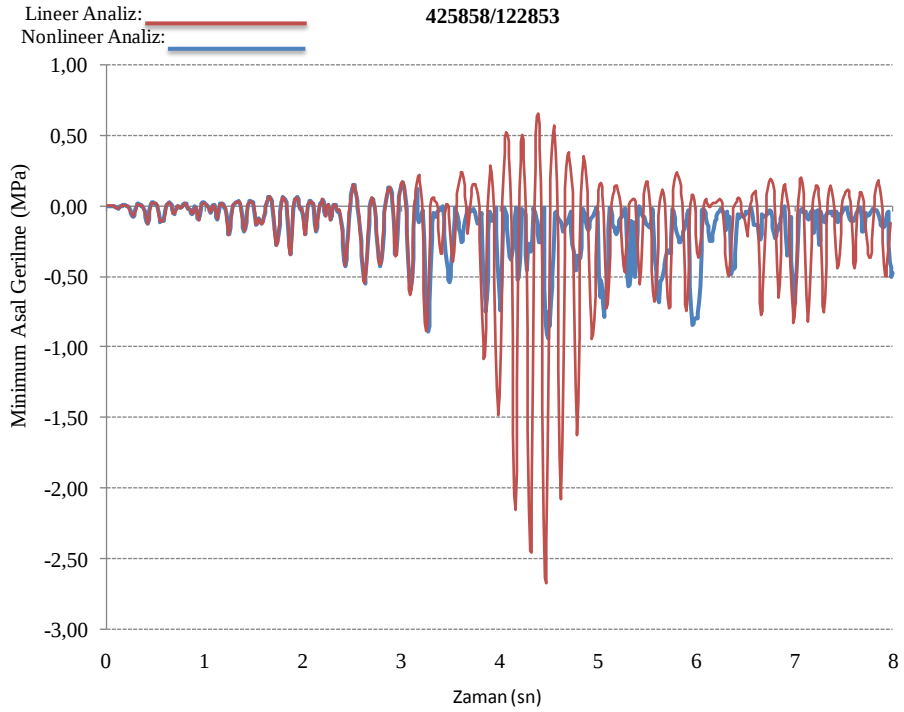


Şekil 6.32. 116030 nolu düğüm noktasının minimum asal gerilmesinin zamanla değişim

122853 nolu düğüm noktası tonozun altında bulunan kemerin en alt kısmından alınmıştır. Bu noktada oluşan gerilme lineer çözümde 2.7 MPa, lineer olmayan çözümde ise 0.7 MPa dır. Yapının bu elemanının çekme gerilmesini aşmadığı Şekil 6.33 ve 6.34 deki grafiklerden görülmekte olup, maksimum gerilme farkının % 309.4 olduğu Tablo 6.3 den anlaşılmaktadır.

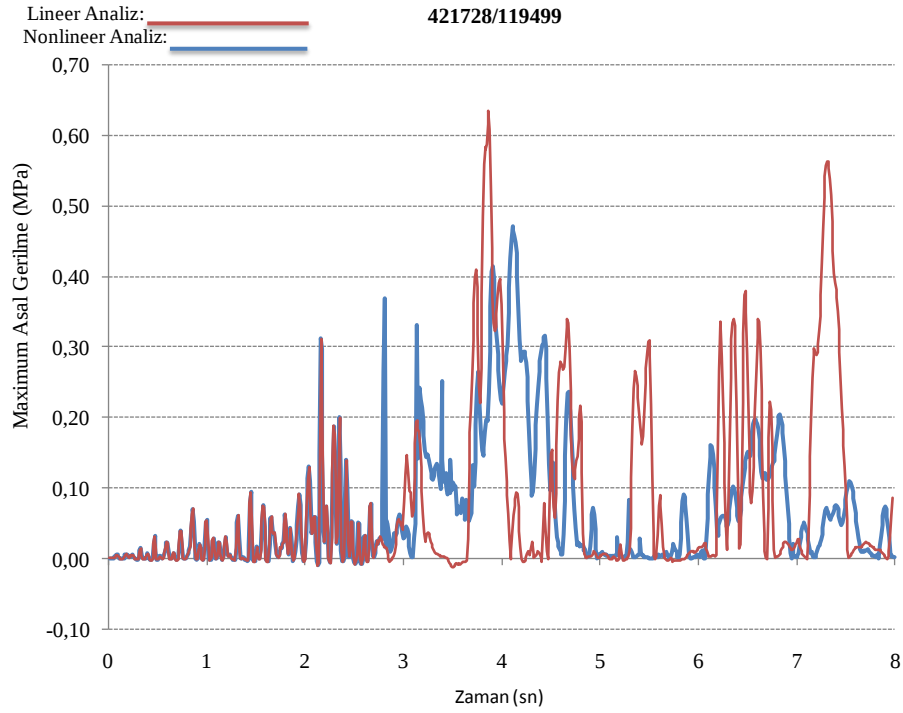


Şekil 6.33. 122853 nolu düğüm noktasının maksimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

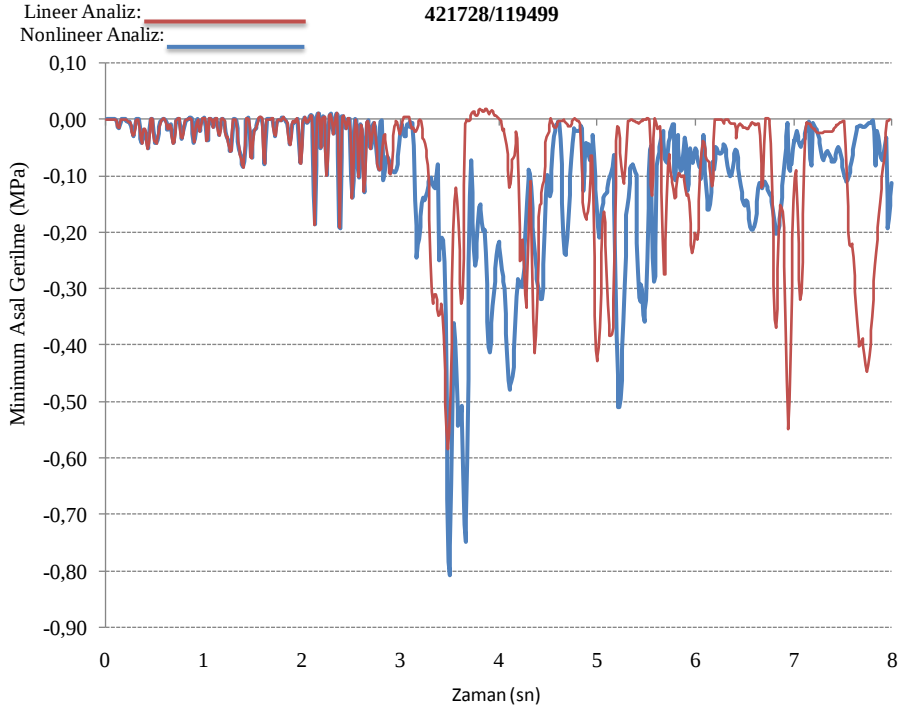


Şekil 6.34. 122853 nolu düğüm noktasının minimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

119499 nolu düğüm noktası minarenin cami ile birleşim bölgesinden alınmıştır. Bu noktada lineer asal gerilme 0.6 MPa iken lineer olmayan asal gerilme 0.5 MPa dır. Analizlerin 2.62 sn. kadar benzer olduğu görülmektedir. Asal gerilme farkı %34.7 dir.

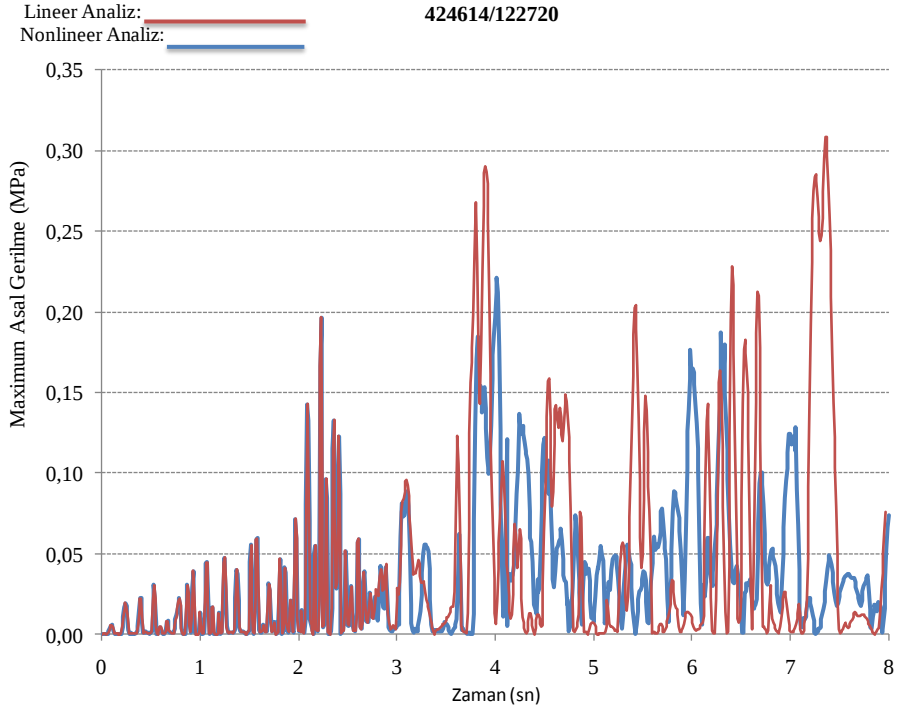


Şekil 6.35. 119499 nolu düğüm noktasının maksimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

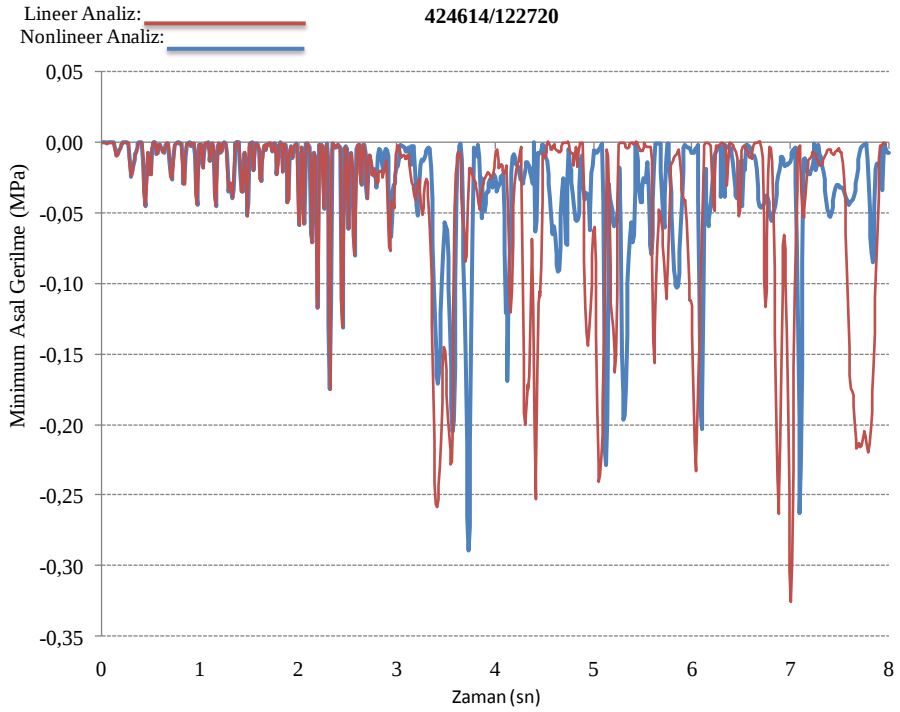


Şekil 6.36. 119499 nolu düğüm noktasının minimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

122720 nolu düğüm noktası minarenin gövde kısmından alınmıştır. Minarenin gövde kısmı tuğladan yapılmıştır. Yapının lineer maksimum asal gerilmesi 0.3 MPa, lineer olmayan asal gerilmesi ise 0.2 MPa dır. Farkın % 39.5 olduğu bu noktada çekme gerilmesinin sınır değeri geçmediği görülmektedir. Lineer ve lineer olmayan çözümlerde maksimum asal gerilmelerin ilk 3 sn. de hemen hemen aynı olduğu Şekil 6.37 ve 6.38 de görülmektedir.



Şekil 6.37. 122720 nolu düğüm noktasının maksimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

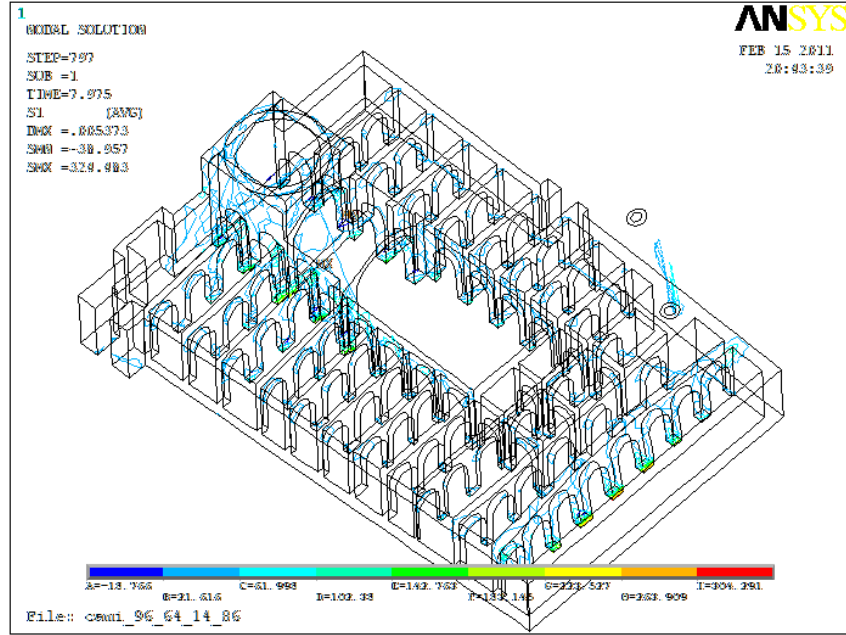


Şekil 6.38. 122720 nolu düğüm noktasının minimum asal gerilmesinin zamanla değişimi

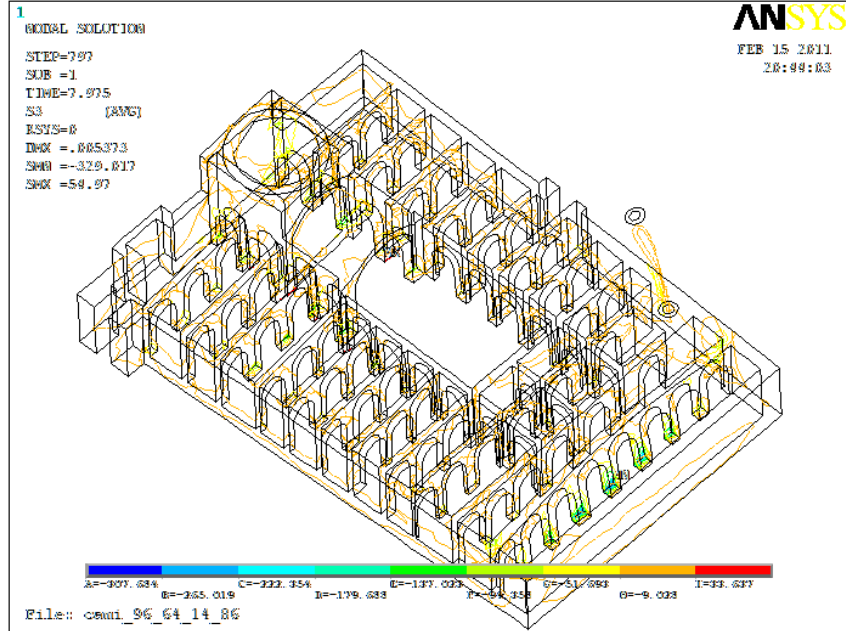
120042, 119018, 116030, 122853, 119499, 122720 nolu düğüm noktalarında lineer ve lineer olmayan analizleri sonucunda meydana gelen maksimum ve minimum asal gerilmeler ve bunların yüzdesel farkları Tablo 6.3. de verilmektedir. Yüzdesel farklar lineer çözümler baz alınarak hesaplanmıştır. Analizler karşılaştırıldığında farkın 122853 nolu düğüm noktasında daha fazla olduğu görülmektedir. Lineer analizde gerilmelerin özellikle minare ile kubbenin alt kısımlarında yoğunlaştığı ve genellikle caminin uzun doğrultusunda meydana geldiği Şekil 6.39 ve 6.40 dan anlaşılmaktadır. Şekil 6.41 ve 6.42 de verilen lineer olmayan analiz gerilmelerinin, lineer analizde olduğu gibi caminin uzun doğrultusunda yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca kemerler ile duvarların birleşim noktalarında meydana gelen gerilmelerde oldukça yüksektir.

Tablo 6.3. Lineer ve lineer olmayan analizlerden elde edilen düğüm noktaları maksimum ve minimum asal gerilmelerinin karşılaştırılması

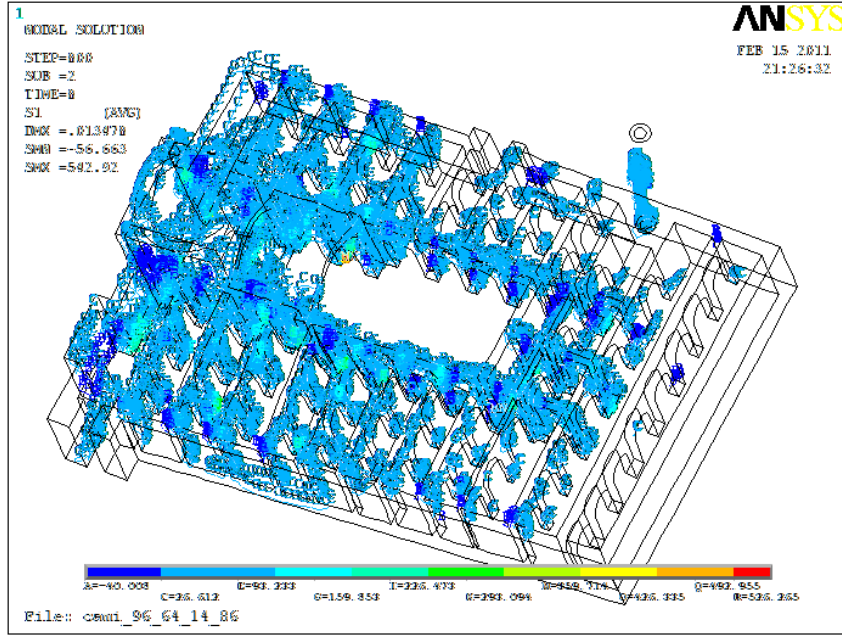
Düğüm Noktası	120042		119018		116030		122853		119499		122720	
Asal Gerilme (MPa)	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
Lineer Çözüm	2,0	0,4	0,6	0,1	0,8	0,1	2,7	0,7	0,6	0,0	0,3	0,0
Lineer Olmayan Çözüm	0,6	0,1	0,7	0,1	0,7	0,1	0,7	0,2	0,5	0,0	0,2	0,0
Maksimum % Fark	215,1	208,3	20,8	57,8	12,3	0,1	309,4	293,7	34,7	67,7	39,5	226,9



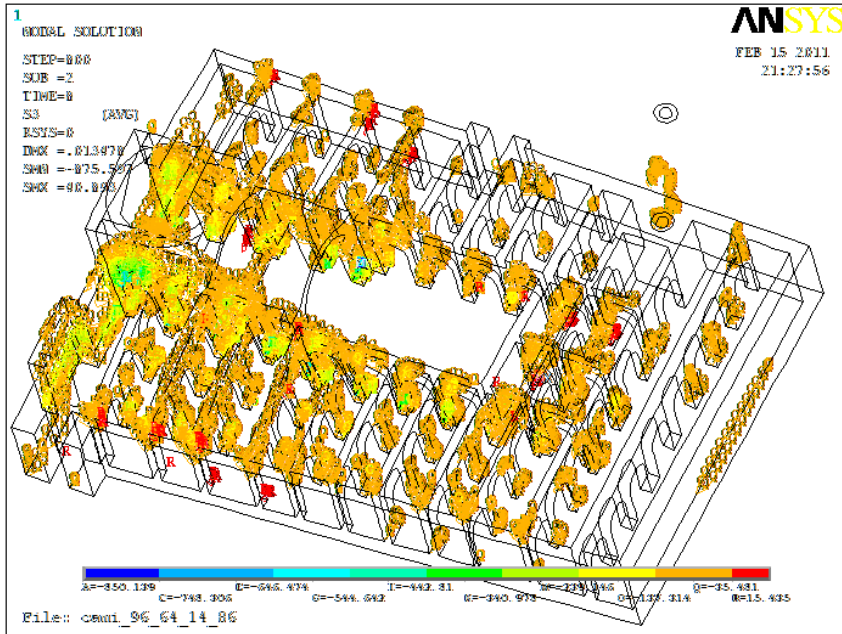
Şekil 6.39. $t=8$ s anında yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler (lineer analizde)



Şekil 6.40. $t=8$ s anında yapıda oluşan minimum asal gerilmesi (lineer analizde)

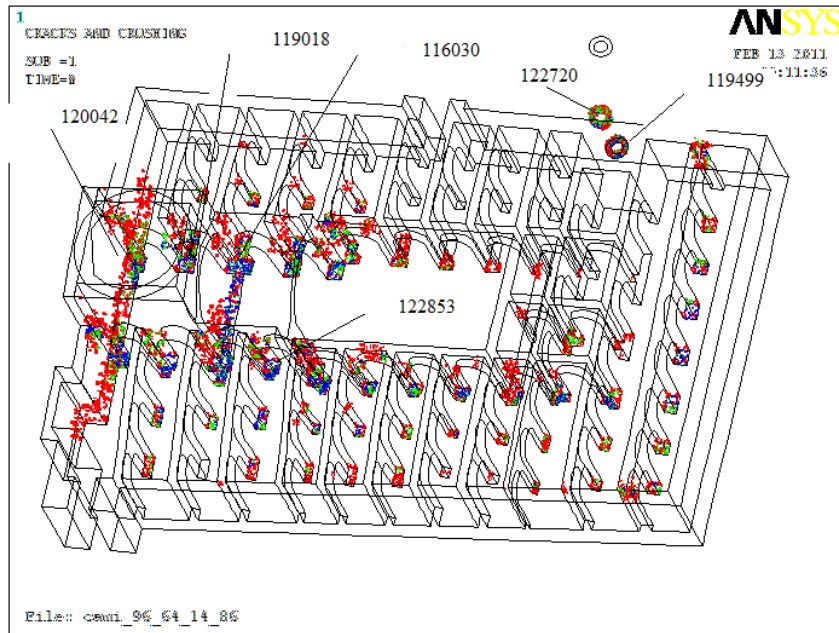


Şekil 6.41. t=8 s anında yapıda oluşan maksimum asal gerilmeler
 (lineer olmayan analizde)

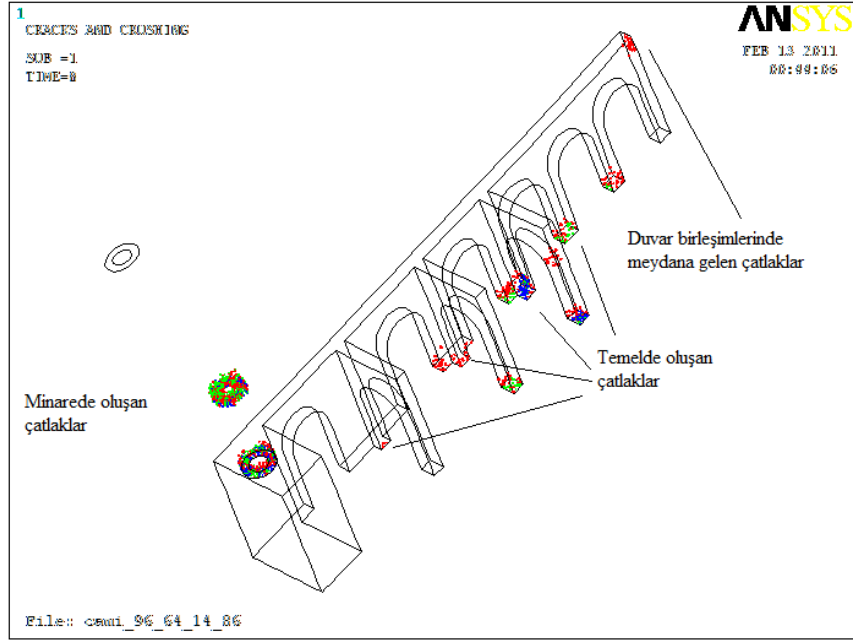


Şekil 6.42. t=8 s anında yapıda oluşan minimum asal gerilmesi
 (lineer olmayan analizde)

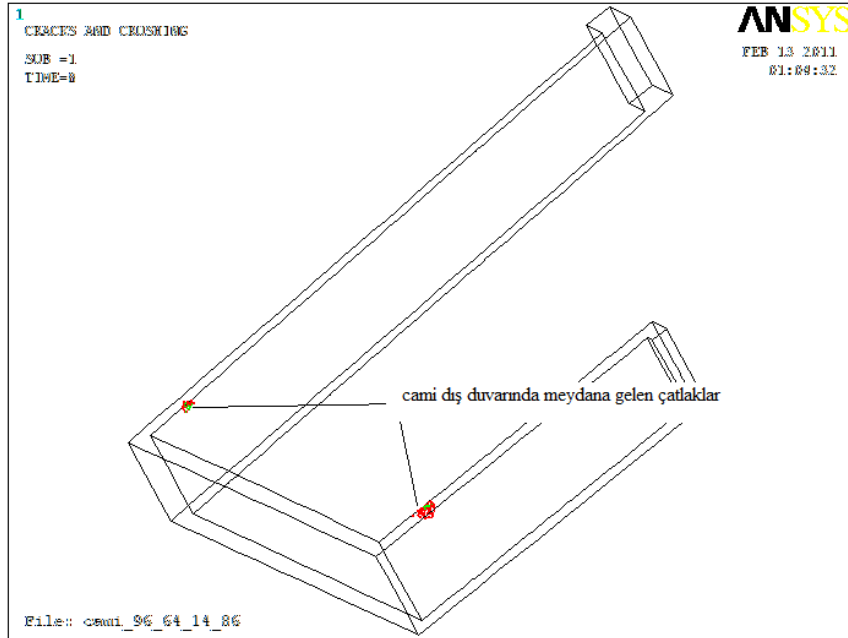
Caminin lineer olmayan analizi sonucunda meydana gelen çatlaklar Şekil 6.43-6.49 da verilmiştir. 120042, 119018, 116030, 122853, 119499, 122720 nolu düğüm noktalarında lineer olmayan analiz sonucunda oluşan çatlaklar Şekil 6.43 de gösterilmiştir. Şekil 6.44 de çatlakların daha çok minarenin cami ile birleşim yerinde ve gövde kısmında, duvar birleşim bölgelerinde ve caminin temel kısmında olduğu görülmektedir. Şekil 6.45 deki cami dış cephe duvarlarında fazla bir hasar meydana gelmemiştir. Şekil 6.46 de kubbenin kuzey ve güney bölümünde ki duvarlar incelendiğinde meydana gelen çatlakların daha çok kemer ve duvar birleşim bölgelerinde arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 6.47 ve 6.48 da sırasıyla tonoz ve kubbenin altındaki bölgede oluşan hasarlar verilmiştir. Bu hasarların genelde cami temel birleşim bölgesinde ve kemer üst kısımlarında yoğunlaştığı gözlenmiştir. Şekil 6.49 de avlunun kuzey ve güney tarafında ki duvar ve kemerlerde meydana gelen çatlaklar verilmiştir. Diğer bölgelerde meydana gelen çatlaklara benzer olarak bu bölgede meydana gelen çatlaklarda daha çok duvar birleşim yerlerinde ve kemer üst kısımlarında meydana gelmiştir. Camide oluşan hasarların genellikle duvarların birbirleriyle birleştiği bölgelerde ve kemer kısımlarında olduğu ayrıca caminin temel ile birleşim bölgesinde yoğunlaştığı görülmektedir.



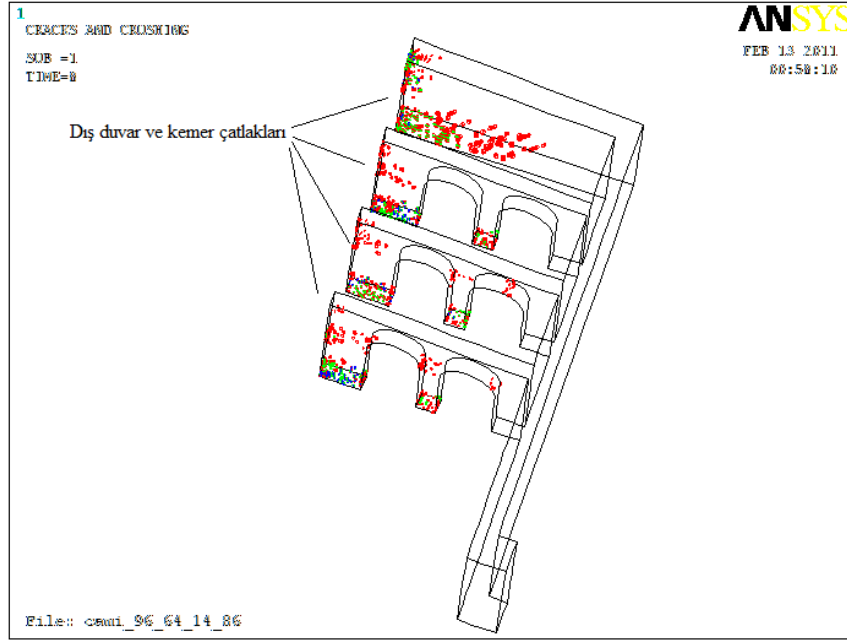
Şekil 6.43. $t = 8$ s anında yapının tümünde oluşan çatlaklar



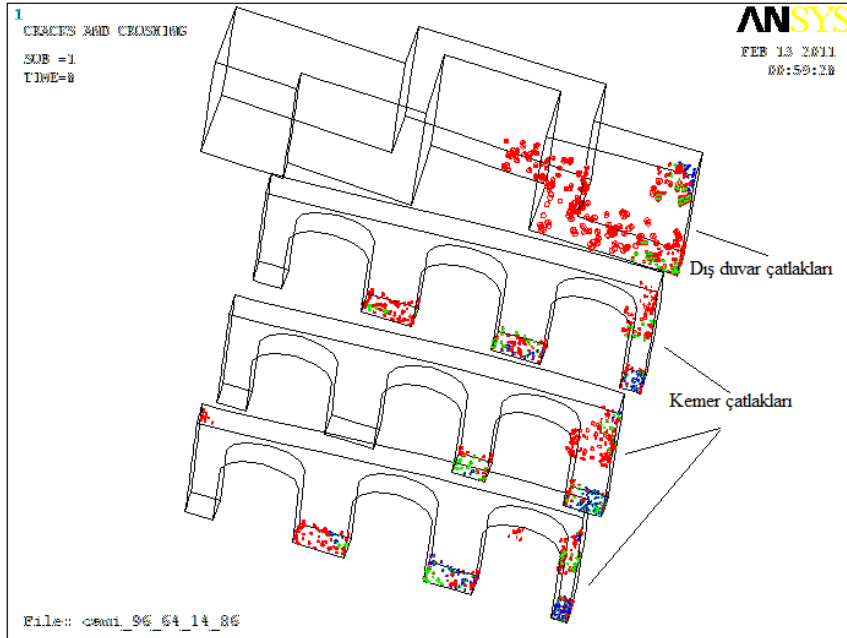
Şekil 6.44. $t=8$ s anında minare ve minareye yakın kemerlerde oluşan çatlaklar



Şekil 6.45. $t=8$ s anında dış duvarda oluşan çatlaklar

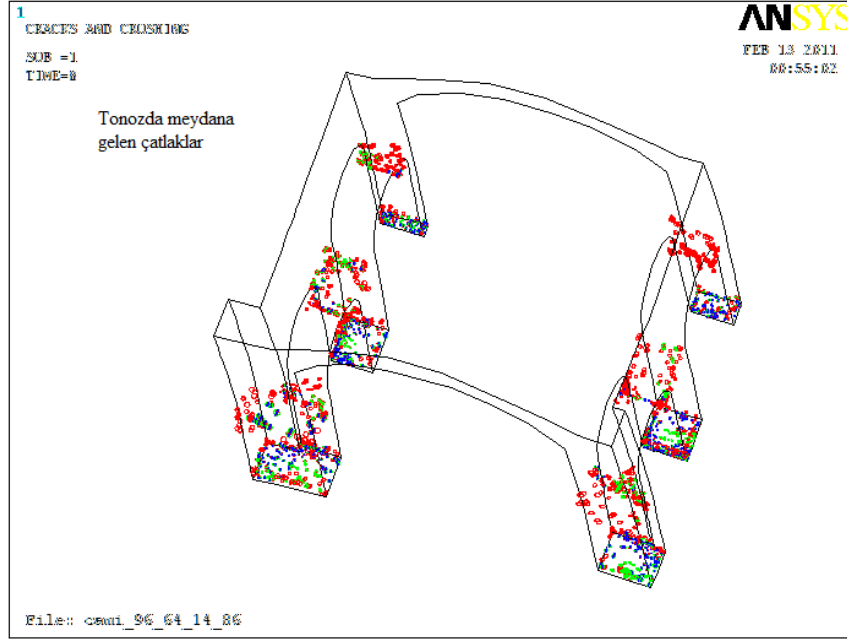


a) Kubbenin kuzey tarafı

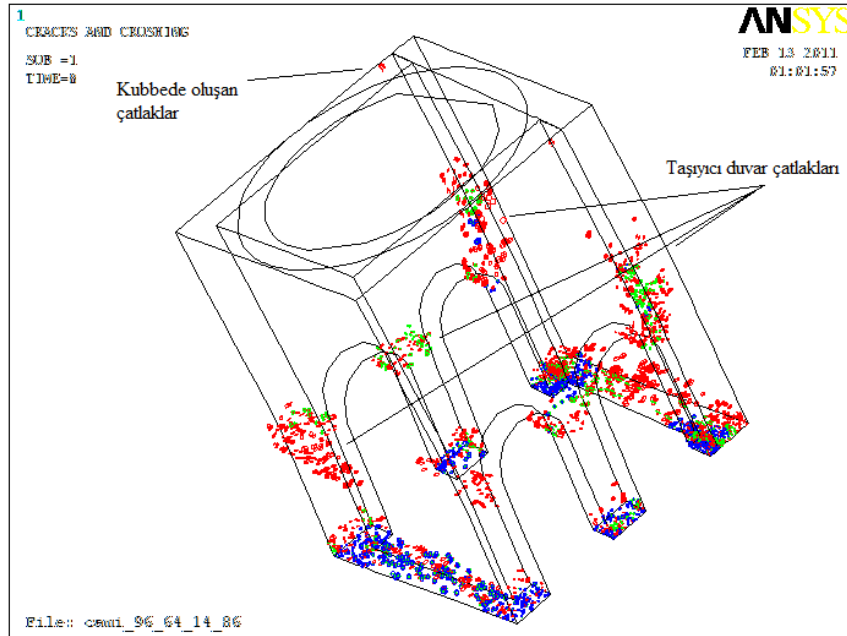


b) Kubbenin güney tarafı

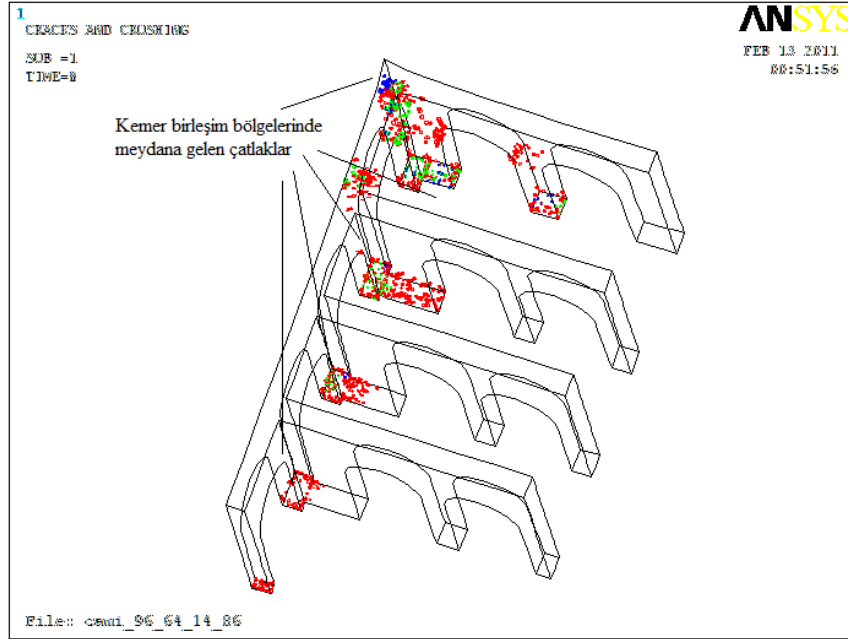
Şekil 6.46. $t=8$ s anında kubbe tarafındaki kemer ve duvarlarda oluşan çatlaklar



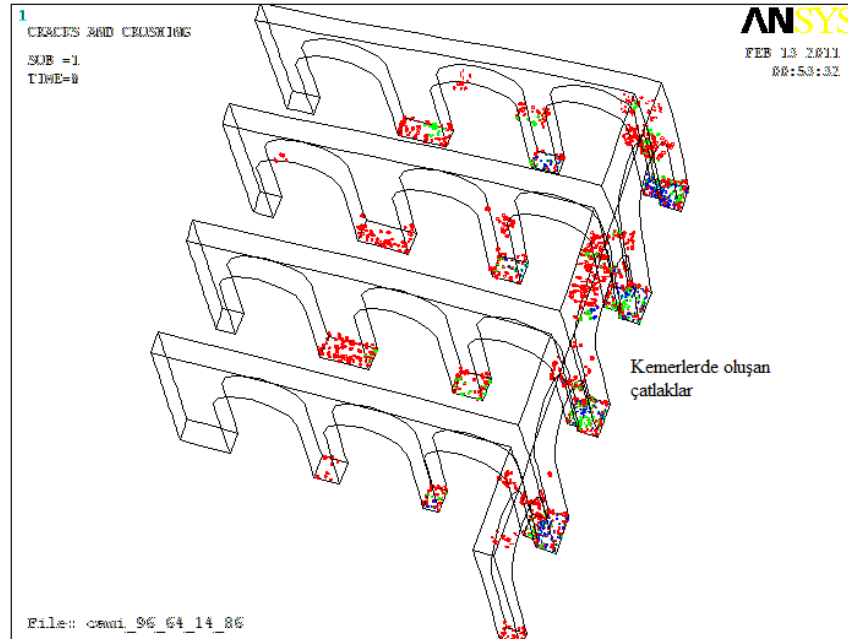
Şekil 6.47. $t=8$ s anında tonozda oluşan çatlaklar



Şekil 6.48. $t=8$ s anında kubbede oluşan çatlaklar



a) Avlunun kuzey tarafı



b) Avlunun güney tarafı

Şekil 6.49. $t = 8$ s anında avlu tarafındaki kemer ve duvarlarda oluşan çatlaklar

7. SONUÇLAR

Tarihi yapılar kültürel miras özelliğine sahip korunması gereken yapılardır. Bu yapıların yapısal analizleri günümüzün modern yapım tekniklerine göre üretilen yapıların yapısal analiziden farklıdır. Tarihi yapıların gelecek kuşaklara özellikleri bozulmadan aktarılabilmesi için söz konusu yapıların geometrik ve malzeme özelliklerinin ayrıntılı olarak bilinmesinin yanında, uygun modelleme teknikleri kullanılarak yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi ve analiz sonuçlarına bağlı olarak gerekli görülen yapıların onarım ve güçlendirmelerinin yapılması gerekir.

Bu çalışmada; tarihi yapılarda taşıyıcı sistem elemanları ve kullanılan malzemeler hakkında bilgi verildikten sonra, tarihi yapılarda oluşan hasarlar, onarım ve güçlendirme ile yığma yapılarda kullanılan modelleme yöntemleri kısaca anlatılmıştır. Sayısal uygulama için 1224 yılında yığma bir yapı olarak inşa edilen Malatya Ulu Cami seçilerek, bu yapının lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Dinamik etki olarak, 1 Mayıs 2003 Bingöl depremi ivme kayıtları seçilmiş ve bu kayıtların ivme değerleri 0.5 ile ölçeklendirilerek analizlerde kullanılmıştır. Cami, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak makro modelleme yaklaşımı ile modellenmiş ve ANSYS paket programı yardımıyla çözümleri elde edilmiştir. Tepki büyüklükleri olarak; değişik noktalara ait yer değiştirmeler, bazı noktalara ait maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamana bağlı değişimleri ile yapıdaki hasar durumu göz önüne alınmıştır. Ayrıca analizin son anına ait yapıda oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin dağılımı ile hasar durumu verilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Lineer olmayan analizde camide çekme gerilmelerinin fazla olduğu bölgelerde çatlaklara bağlı oluşan hasarların yoğunlaştığı görülmüştür. Çatlaklar; çekme gerilmelerinin büyük değerler aldığı kemer-duvar birleşim bölgelerinde, duvar birleşim bölgelerinde ve duvar-temel birleşim arayüzeyinde yoğunlaştığı görülmüştür. Minaredeki çatlaklar ise, genelde minarenin orta kısmında ve minare-cami duvarı birleşim bölgesinde yaygın olarak ortaya çıkmıştır. Minaredeki hasarlara devrilme momentinin önemli etkisinin olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. **Ünay, A.İ.**, 1997, Method for the Evaluation of the Ultimate Safety of Historical Masonry Structures, Ph.D. Dissertation, METU, Ankara.
2. **Şener, İ.N.**, 2004, An innovative Methodology and Structural Analysis for Relocation of Historical Masonry Monuments, METU, Ankara.
3. **Ünay A. İ.**, , 2002, “Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı”, ODTÜ Mimarlık Fakültesi.
4. **Çakmak, A. S., Taylor, R.M, Durukal, E.**, 2008, The structural configuration of the first dome of Justinian’s Hagia Sophia : An investigation based on structural and literary analysis .
5. **Erdik, M., ve Durukal, E.**, 1993, “Ayasofya’nın Deprem Davranışı”, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
6. **Ozkula T.A., Kurıbayashib E**, 2005, Structural characteristics of Hagia Sophia: I—A finite element formulation for static analysis.
7. **Gentile C. , Saisi A.**, 2005, Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment.
8. **Çakmak, A. S., Moropoulou, A., Mullen, C. L.**, 1994, “Interdisciplinary Study of Dynamic Behavior and Earthquake Response of Hagia Sophia” Department of Civil Engineering and Operations Resarch, Princeton Universty, Princeton, NJ 08540, USA National Technical Universty of Athens, Greece.
9. **Selahiye, A., Aydınoglu, N.M., erdik, M.**, 1994, “Süleymaniye Camiinin Dinamik özelliklerinin Deneysel ve Analitik Yöntemlerle Belirlenmesi”, İstanbul.
10. **Ramous, L.F., Marques, L., Lourenço, P.B., Roeck, G., Campos-Costa, A., Roque, J.**, 2010, Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies.
11. **Yüzügüllü, Ö., Durukal, E.**, 1997, “The Effects of the Train Traffic on the Küçük Ayasofya Mosque in Istanbul”, International Conference on Studies in Ancient Structures, YTÜ, Faculty of Architecture, İstanbul.
12. **Betti, M., Vignoli, A.**, 2008, Modelling and analysis of a Romanesque church under eartquake loading: Assessment of seismic resistance.

13. **Russo, G., Bergamo, O., Damiani, L., Lugato, D.,** 2009, Experimental analysis of the ‘‘Saint Andrea’’ masonry bell tower in venice. A new method for the determination of ‘‘Tower Global Young’s Modulus E’’.
14. **Timur, T.,** 2001, ‘‘Edirnekapı Mihrimah Sultan Camii Taşıyıcı Sistem Davranışının İncelenmesi’’, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ İns. Müh. Bölümü, İstanbul.
15. **Teomete, E., Aktas, E.,** 2004, ‘‘Structural Assessment of a Historical Masonry Structure: Urla Kamanlı Mosque’’, Sixth International Congress on Advances in Civil Engineering, Bogazici University.
16. **Akan, A. E., Özen, Ö.,** 2005 ‘‘Bursa Yeşil Türbe’nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Deprem Analizi’’, Deprem Sempozyumu, Kocaeli.
17. **Bayraktar, A.,** 2006, Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme Metotları.
18. **Dönmezer, H.,** Zemin Mekaniği.
19. **Çelebi, M.R.,** Yapı Elemanları.
20. **Bahtiyar M.,** 1998, ‘‘Restorasyonda Strüktürel Sorunlar’’ , Y.Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-23, 43-53, 67, 70-76.
21. **Çamlıbel, N.,** 1988, Sinan Mimarlığında Yapı Analitik İncelenmesi .
22. **Koçak, A.,** 1999, Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Analitik İncelenmesi.
23. **Aslanpa, O.,** 1989, Osmanlı Devri Mimarisi.
24. **Sönmez, Z.,** 1987, Mimar Sinan Dönemi Türk Mimarlığı ve Sanatı.
25. **Lourenço, P.B., Vasconcelos, G., Ramos, L.,** 2001, Assessment of the Stability Conditions of a Cistercian Cloister’’, 2nd International Congress on Studies in Ancient Structures, Yıldız Technical University, İstanbul.
26. **Kanıt R., Isık N S.,** 2004 , ‘‘Horasan Harcı Kullanılarak Yapılan Model Kemerin Performansının Deneysel Ve Sayısal Olarak Belirlenmesi’’, Politeknik Dergisi, Cilt 7, Sayı:2, s. 179-183.
27. **Böke,H.,** Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harcı ve Sıvaların Özellikleri.

28. **Giordano, A., Mele, E., Luca De, A.,** 2002 , “Modelling of Historical Masonry Structures: Comparison of Different Approaches Through a Case Study”, İtalya.
29. **Şahin, M.,** 2002, Dynamic Response of Hagia Sophia Considering Craks, Doktora Tezi, Mimar Sinan Üniversitesi, İstanbul.
30. **Ural, A.,** 2009 , ‘‘ Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi’’ , KTÜ.
31. **Lourenço, P.B.,** 1996, Computational Strategies for Masonry Structures.
32. Malatya İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü, Malatya Ulu Cami Tarihi.
33. **Celep, Z., Kumbasar, N.,** , 2000, “Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı”, Beta Dağıtım, İstanbul.
34. **Lourenço, P.B.,** 2002, Computations on Historic Masonry Structures, Prog. Struct. Engineering Materials, 2002, 4: 301-319, John Wiley&Sons Ltd.
35. **Lourenço, P.B.,** 2001, Analysis of Historical Constructions: From Thrust Lines to Advanced Simulations, Historical Constructions, Eds. P.B. Lourenço and P. Roca, Universidade do Minho, Guimarães, p. 91-116.
36. **Reddy, J.,** 1993, “An Introduction to the Finite Element Method”, McGraw Hill International Editions.
37. **Nath, B.,** 1993, “Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri, Çeviren: GÜNAY, D., Sakarya Üniversitesi.
38. **Petyt, M.,** 1990, “Introduction to Finite Element Vibration Analysis”, Cambridge University.
39. **Çamlıbel, N.,** 2000, “Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi ve Temellerin Takviyesi”, Birsan Yayınevi, İstanbul.
40. **Anthoine A.,** , 1997, “Homogenization Of Periodic Masonry: Plane Stress, Generalized Plane Strain Or 3d Modelling?”, International Journal of Solids and Structures.
41. **Zucchini a., Lourenço p.b.,** 2002, “A micro-mechanical model for the homogenisation of masonry”, International Journal of Solids and Structures.
42. “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik”, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 1997.

ÖZGEÇMİŞ

1981 Malatya doğumlu Öznur AKDENİZ, ilk ve ortaöğretimini Malatya Sümer İlköğretim Okulunda tamamlamıştır. Malatya SSK Sağlık Meslek Lisesini derece ile bitirdikten sonra 2001 yılı da Süleyman Demirel Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesini kazanmıştır. 2002 yılında Fırat Üniversitesine yatay geçiş yaparak 2005 yılında bölüm birincisi olarak mezun olmuştur. 2007 yılında Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Mekanik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimi almaya hak kazanmıştır. 2004-2008 yılları arasında Elazığ/Maden Devlet Hastanesinde hemşirelik yaptıktan sonra 2008 yılında Ardahan İl Özel İdaresine atanmıştır. Halan Ardahan İl Özel İdaresinde Plan, Proje, Yatırım ve İnşaat Müdürü olarak çalışmaktadır.