



**TARİHİ YIĞMA CAMİLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME
ESASLI HASAR SINIRLARININ BELİRLENMESİ**

İrfan KOCAMAN

**Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İlker KAZAZ**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

TARİHİ YIĞMA CAMİLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR
SINIRLARININ BELİRLENMESİ

İrfan KOCAMAN

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İlker KAZAZ

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

20/10/2022

İrfan KOCAMAN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TARİHİ YIĞMA CAMİLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRME ESASLI HASAR SINIRLARININ BELİRLENMESİ

İrfan KOCAMAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İlker KAZAZ

Sismik performans değerlendirmesinde şekil değiştirme esaslı hasar limitleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak birçok çalışmada şekil değiştirme esaslı hasar limitlerinin uygulanmasında, yıkılma mekanizmalarındaki değişkenlik, geometrik belirsizlikler, yükleme ve sınır koşulları ve yönetmelikler arasında uyumsuz hasar limitleri gibi zorluklar belirtilmektedir. Bu tez çalışmasında, ülkemizde bulunan tarihi camilerin önemli bir kısmını temsil edebilecek 11 tarihi cami seçilmiştir. 11 tarihi yığma caminin zaman tanım alanı ve itme analizlerinden elde edilen ötelenme değerlerini karşılaştırarak, farklı yönetmelik ve kılavuzlarda önerilen ötelenme sınırlarının güvenilirliği tartışılmıştır. Sonlu eleman modellerinin doğruluğu için farklı yığma duvar örnekleri kullanılarak sonlu eleman yaklaşımı kontrol edilmiştir. Sonlu eleman modellerinde kullanılan elastisite modülünün yapının ötelenme oranı kapasitesi üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Yığma elemanlarda elastisite modülünün muhtemel alt ve üst değerleri dikkate alınarak, analizler farklı malzeme özellikleri ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ötelenme değerleri, tarihi yapılarla ilgili daha önce yapılmış çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yönetmelik ve kılavuzlarda önerilen ötelenme değerlerinin anıtsal miras olan camiler üzerinde yanlış ve güvenli olmayan sismik değerlendirmelere yol açabileceği tespit edilmiştir. Tarihi camilerin ötelenme sınırlarını belirlemek için geometri ve mekanik özelliklerle ilgili basitleştirilmiş denklemler önerilmiştir. Ayrıca tarihi camilerde yaygın olarak görülebilecek hasar mekanizmaları tanımlanmıştır.

2022, 383 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yığma cami, dinamik analiz, hasar limiti, sismik performans

ABSTRACT

Ph.D

DETERMINATION OF DRIFT-BASED DAMAGE LIMITS FOR HISTORICAL MASONRY MOSQUES

İrfan KOCAMAN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İlker KAZAZ

Drift-based performance limits are commonly used in seismic performance assessment. However, many studies have indicated substantial considerations for the displacement-based approach when applied to historical masonry structures. Variability in failure mechanisms, geometrical uncertainties in structural form, loading and boundary conditions and incompatible performance damage limits among codes can be examples to such considerations. In this study, 11 historical mosques that can represent a significant portion of the historical mosques in our country have been selected. It discusses the reliability of the drift limits recommended in different codes and guidelines by comparing drift values obtained from the time-history and pushover analyzes of 11 historical masonry mosques. For verification of the finite element models, the finite element approach is calibrated using different masonry wall experimental studies. The effect of modulus of elasticity on the drift capacity of the structure is discussed. Considering the possible lower and upper values of the modulus of elasticity in masonry elements, analyzes were carried out with different material properties. The obtained drift values were compared with the results of previous studies on historical structures. It was determined that the drift values proposed in the codes and guidelines can lead to incorrect and unsafe seismic evaluation on architectural heritage. Simplified equations related to geometry and mechanical properties were proposed to determine the drift limits of historical mosques. In addition, damage mechanisms that can be seen commonly in historical mosques are defined.

2022, 383 pages

Keywords: Masonry mosque, dynamic analyses, damage limits, seismic performance

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde; engin bilgisinden, aydınlatıcı ve ufuk açıcı deneyimlerinden yararlandığım, çalışma boyunca bana yüreklendirici ve yapıcı eleştiri atmosferi sağlayan danışman hocam Prof. Dr. İlker Kazaz'a teşekkür ederim. Karşılaştığım problemlerin çözümünde çalışma boyunca olduğu gibi gelecekte de rehberliğine ihtiyaç duyacağım değerli hocamın danışmanlığında bu tezin hazırlanmış olması benim için büyük bir ayrıcalık ve fırsat olduğu kadar mutluluk vericidir.

Tezin hazırlanması ve sonuçlandırılmasında cömert katkılarını, sonsuz sabır ve desteklerini benden esirgemeyen tez izleme üyelerim Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Demir ve Dr. İsmet Çalık'a da teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, değerli zamanlarını ayırıp savunma jürime katılan ve çalışmayı detaylı bir biçimde inceleyip tavsiyeler veren saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Özgür Avşar'a ve Dr. Öğr. Üyesi Dilek Okuyucu'ya da teşekkür ederim.

Doktora dersleri süresince bilgilerinin yanı sıra seçkin kişilikleriyle de bana örnek olan hocalarıma, tüm eğitim hayatım boyunca gelişimime katkı sağlayan eğitimcilere ve -burada isimlerini teker teker saymanın mümkün olmadığı- eğitim camiası içerisinde/dışarısında yer alan ve yollarımın kesiştiği tüm arkadaşlarıma da bu çalışma vesilesiyle teşekkür ederim.

Bu uzun süreçte bana desteklerini hiç esirgemeyen aileme minnettarım. En büyük destekçim sevgili eşim Ceren'e ve evlatlarıma bana karşı göstermiş olduğu büyük anlayış ve sabırdan dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İrfan KOCAMAN
Ekim 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Tezin Amacı	6
1.3. Tezin İçeriği	6
2. LİTERATÜR TARAMASI	8
2.1. Tarihi Yığma Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar	8
2.2. Tarihi Camilerin Deprem Performansının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	19
2.3. Tarihi Yapıların Hasar Sınırlarının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar	22
3. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN DOĞRULANMASI	27
3.1. Analizlerde Kullanılan Sonlu Eleman ve Malzeme Modelleri	27
3.1.1. Willam-Warnke göçme kriteri	28
3.1.2. Von-Mises akma kriteri.....	311
3.1.3. Drucker-Prager plastisite modeli.....	32
3.1.4. Çok doğrulu pekleşmeli plastisite modeli (MISO, MKIN ve KINH).....	36
3.1.5. Birleştirilmiş malzeme modeli	37
3.1.6. SOLID65 elemanı	38
3.1.7. İdealize plastisite eğrisi önerisi	40
3.2. Ele Alınan Deneysel Çalışmalar ve Sonlu Eleman Modelleri	42
3.2.1. Oliveira (2003) deneysel çalışması	43
3.2.2. Vasconcelos (2005) deneysel çalışması	49
3.2.3. Demir (2012) deneysel çalışması	54
3.2.4. Silva (2012) deneysel çalışması	60
3.2.5. Maccarini et al. (2018) deneysel çalışması	67
3.3. Deneysel Doğrulama Sonucunda Değerlendirmeler	788

4. SONLU ELEMAN MODELLERİNDE KULLANILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	80
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI.....	855
5.1. Cami Tiplerinin Belirlenmesi.....	855
5.1.1. Tip 0.....	866
5.1.2. Tip 1.....	877
5.1.3. Tip 2.....	877
5.1.4. Tip 3.....	888
5.1.5. Tip 4.....	89
5.1.6. Tip 5.....	89
5.1.7. Tip 6.....	900
5.2. Cami Parametrelerinin Belirlenmesi ve İncelenmesi.....	900
5.3. Camilerin Belirlenmesi.....	977
5.3.1. 1. grup camiler.....	988
5.3.2. 2. grup camiler.....	1011
5.4. Camilerin Tarihi ve Mimari Özellikleri.....	1033
5.4.1. Konya Karapınar Sultan Selim cami (M1).....	1033
5.4.2. Konya İlgin Lala Mustafa Paşa cami (M2).....	1055
5.4.3. Ankara Cenabi Ahmet Paşa cami (M3).....	1077
5.4.4. İstanbul Kadırga Sokullu Mehmet Paşa cami (M4).....	1088
5.4.5. Diyarbakır Behram Paşa cami (M5).....	1100
5.4.6. Erzurum Narmanlı cami (M6).....	1111
5.4.7. Giresun Şebinkarahisar Fatih cami (M7).....	1122
5.4.8. Konya Karatay Şerafettin cami (M8).....	1144
5.4.9. İstanbul Beyazid cami (M9).....	1166
5.4.10. İstanbul Tophane Kılıç Ali Paşa cami (M10).....	1188
5.4.11. Erzurum Lala Mustafa Paşa cami (M11).....	119
5.5. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması.....	1200
6. ANALİZLER VE SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	126
6.1. Teorik Altyapı.....	1266
6.1.1. Analitik (sonlu eleman yöntemiyle) modal analiz.....	1266
6.1.2. Statik itme analizi.....	1288
6.1.3. Zaman tanım alanında (dinamik) analiz.....	129
6.1.4. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin idealleştirilmesi.....	131
6.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	1355
6.2.1. Analitik modal analiz sonuçları.....	1355

6.2.2. İtme analizi sonuçları	1377
6.2.3. Dinamik analiz sonuçları	138
6.3. Kuvvet Kapasitelerinin, Ötelenme Limitlerinin ve Yıkılma Mekanizmalarının Belirlenmesi.....	1411
6.3.1. Camilerin kuvvet kapasitesinin belirlenmesi	1411
6.3.2. Ötelenme limitlerinin belirlenmesi	1433
6.3.3. Yıkılma mekanizmalarının belirlenmesi	1488
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	157
KAYNAKLAR	162
EKLER.....	172
EK-1	172
EK-2	383



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
σ	Gerilme
A_{duvar}	Duvar alanı
β_c	Kapalı çatlaklar için kesme kuvveti aktarım katsayısı
β_t	Açık çatlaklar için kesme kuvveti aktarım katsayısı
cm	Santimetre
D	Duvarın düzlem içi yatay boyutu (derinlik)
$\Delta_{tc,r}$	Köşe kırılmasının (toe crush) başladığı yanal yer değiştirme
Δ_y	Akma yer değiştirmesi
E	Elastisite Modülü
f_b	Duvarın basınç dayanımı
f_c	Basınç dayanımı
f_t	Çekme dayanımı
f_{vko}	Karakteristik başlangıç kesme dayanımı
h	Duvar yüksekliği
H_0	Eğilme kapasitesinin elde edildiği bölüm ile büküm noktası arasındaki mesafe
h_{eff}	Yanal (sismik) kuvvetin bileşke yüksekliği
h_k	Kubbe kilit taşının zeminden yüksekliği
L	Duvarın uzunluğu (D ile aynı)
l_k	Kısa duvar uzunluğu
l_u	Uzun duvar uzunluğu
m	Metre
mm	Milimetre
p_a	Fil ayağı ve/veya serbest paye alanı
PGA75	Tekrarlama periyodu 475 yıllık depremin en büyük yer ivmesi
r_k	Ana kubbe çapı
σ_d	Hesaplanmış duvar düşey basınç gerilmesi
t	Duvar kalınlığı
t_a	Yapının toplam alanı

V	Kuvvet
V_r	Duvarın devrilme hareketinde kesme dayanımı
$V_{tc,r}$	Devrilme hareketi başladıktan sonra köşe kırılmasına (toe crush)
V_{ult}	Duvarın kesme kapasitesi
α	Duvarın elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki katsayı
γ	Birim hacim ağırlık
δ	Ötelenme oranı
ε	Birim şekil değiştirme

Kısaltmalar

Cap	Cape Mendocino Depremi
ÇSDS	Çok serbestlik dereceli sistem
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
Duz	Gölcük Depremi
Erz	Erzincan Depremi
GÖ	Göçme Öncesi
Imp_Val	Imperial Valley Depremi
KH	Kontrollü Hasar
Kobe	Kobe Depremi
LVDT	Bağımsız Doğrusal Pozisyon Sensörü
SH	Sınırlı Hasar
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TSDS	Tek serbestlik dereceli sistem
VGM	Vakıflar Genel Müdürlüğü
WW	William-Wranke malzeme modeli
WW-P	William-Wranke malzeme modeline ek plastisite eğrisi tanımlanan malzeme modeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Camilere meydana gelen hasar örnekleri.....	2
Şekil 1.2. Tarihi yapılarda performans düzeyleri (VGM 2017).....	3
Şekil 1.3. Kuvvet-ötelenme oranı eğrileri (a) Kocaman et al.; (b) Aşıkoğlu et al.	5
Şekil 2.1. Tek cidarlı duvarların (σ - ε) eğrileri (Demir 2012)	11
Şekil 2.2. Ramos et al. 2010 çalışmasında tanımlanan elastisite modülü yerleşimi	18
Şekil 2.3. Dinamik kalibrasyon sonrasında deneysel ve teorik frekans değerleri ve mod şekilleri (Maccarini et al. 2018).....	19
Şekil 3.1. Üç boyutlu gerilme yüzeyinde göçme eğrisi	29
Şekil 3.2. ANSYS’de Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu.....	31
Şekil 3.3. Drucker-Prager kriterinin göçme yüzeyine eşlenmesi.....	34
Şekil 3.4. Deviatorik Gerilme vb. durumunda meridyenlerin gösterimi	34
Şekil 3.5. Willam-Warnke, Drucker-Prager ve Von-Mises göçme-akma yüzeyleri	38
Şekil 3.6. SOLID65 elemanı geometrisi (ANSYS kullanım kılavuzu)	39
Şekil 3.7. Yığma duvarlar için idealize edilmiş σ - ε eğrisi.....	41
Şekil 3.8. Deneysel çalışmalarla elde edilen ε_{co} - ε_{cu} ve f_c -- f_{cu} arasındaki ilişkiler.....	41
Şekil 3.9. Düzgün kesme taşlı harçsız duvar deneyleri için uygulanan geometri ve yükleme şeması	44
Şekil 3.10. Deneysel kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	45
Şekil 3.11. Oliveira (2003) tarafından test edilen duvar numunelerinin sonlu eleman modeli.....	46
Şekil 3.12. Oliveira duvarlarında kullanılan idealize σ - ε eğrileri.....	48
Şekil 3.13. Deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	48
Şekil 3.14. Geometri (a) düzgün kesme taşlı harçsız duvar WS; (b) düzensiz duvar WI; (c) moloz duvar WR	50
Şekil 3.15. Vasconcelos tarafından yapılan duvar numunelerinin sonlu eleman modeli	52
Şekil 3.16. Vasconcelos duvarlarında kullanılan idealize σ - ε eğrileri	52
Şekil 3.17. Deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	53
Şekil 3.18. Vanconcelos duvarlarının deneysel hasar mekanizması ve analitik asal çekme birim şekil değiştirmelerinin karşılaştırılması	54
Şekil 3.19. Deneylerde kullanılan üç cidarlı duvarların geometrik özellikleri (Demir 2012).....	55
Şekil 3.20. Deneysel olarak elde edilen ve analizlerde kullanılan σ - ε eğrileri.....	56
Şekil 3.21. Demir (2012) deneysel duvarlarının analitik modeli.....	57
Şekil 3.22. Deneysel ve bu çalışmada elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri	57

Şekil 3.23. Demir M-25 duvarının deneysel hasar mekanizması ve analitik asal çekme birim şekil değiştirmelerinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 3.24. (a) Analizlerde kullanılan σ - ε eğrileri; (b) M-50; (c) M-75; (d) M-100 duvarının deneysel ve analitik eğrileri	59
Şekil 3.25. Deneysel olarak elde edilen ve analizlerde kullanılan σ - ε eğrileri.....	62
Şekil 3.26. Deneysel çalışmada kullanılan duvarlar ve geometrik özellikleri (cm)	63
Şekil 3.27. Silva (2012) deneysel duvarlarının analitik modeli.....	65
Şekil 3.28. C duvarlarının deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	66
Şekil 3.29. E duvarlarının deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	67
Şekil 3.30. Duvar görüntüleri ve taş dizilim detayları (m) (Maccarini et al. 2018).....	69
Şekil 3.31. Duvar planları ve ilk katman kesitleri (m) (Maccarini et al. 2018).....	69
Şekil 3.32. İlk mod şekilleri ve frekans değerleri (a) IRG duvar; (b) REG duvar.....	70
Şekil 3.33. Maccarini et al. duvar numunelerinin sonlu eleman modeli.....	71
Şekil 3.34. Duvar modellerine uygulanan mesnet ivme-hız-yer değiştirme yükleri	73
Şekil 3.35. f_t değişimi ile kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin değişimi	75
Şekil 3.36. Deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	76
Şekil 3.37. Deney sonrası IRG duvarda meydana gelen çatlaklar	77
Şekil 3.38. IRG duvarın sonlu eleman modelinden elde edilen şekil değiştirme görüntüleri	77
Şekil 4.1. Magenes ve Penna (2009) basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi	84
Şekil 5.1. Van Hüsrev Paşa camisi planı (Anonymous 2020a)	87
Şekil 5.2. İstanbul Rüstem Paşa camisi planı (Anonymous 2020a)	87
Şekil 5.3. İstanbul Üsküdar Mihrimah Sultan camisi planı (Anonymous 2020a)	88
Şekil 5.4. İstanbul Çemberlitaş Atik Ali Paşa camisi planı (Tuluk 2000).....	88
Şekil 5.5. İstanbul Eyüp Zal Mahmut Paşa camisi planı (Anonymous 2020a)	89
Şekil 5.6. İstanbul Süleymaniye camisi planı (Anonymous 2020a)	90
Şekil 5.7. Payas Sultan Selim camisi planı (Tuluk 2000).....	90
Şekil 5.8. Parametrelerin detaylı gösterimi.....	91
Şekil 5.9. Camilerin bulundukları konumlar	92
Şekil 5.10. Cami parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri (a) $t-l_k$; (b) $t-h$; (c) l_k-h ; (d) r_k-h_k ; (e) r_k-t_a ; (f) p_a-t_a	95
Şekil 5.11. Camilerin Türkiye Deprem Tehlike Haritasında yeri.....	97
Şekil 5.12. (a) t_d -PGA475; (b) h_k -PGA475 ilişkileri.....	97
Şekil 5.13. 1. grup cami parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri (a) $t-l_k$; (b) $t-h$; (c) l_k-h ; (d) r_k-h_k ; (e) r_k-t_a ; (f) PGA475- t	100
Şekil 5.14. 1. grup camilerin $h/t - l/h$ ilişkisi ve temsil edecek camiler	101

Şekil 5.15. 2. grup cami parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri (a) $t-l_k$; (b) $t-h$; (c) l_k-h ; (d) r_k-h_k ; (e) r_k-t_a ; (f) t_a-p_a	102
Şekil 5.16. 2. grup camilerin $h/t - l/h$ ilişkisi ve temsil edecek camiler	103
Şekil 5.17. Sultan Selim Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	104
Şekil 5.18. Sultan Selim Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli .	104
Şekil 5.19. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	105
Şekil 5.20. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli.....	106
Şekil 5.21. Cenabi Ahmed Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	107
Şekil 5.22. Cenabi Ahmed Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli.....	107
Şekil 5.23. Sokullu Mehmet Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	108
Şekil 5.24. Sokullu Mehmet Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli.....	109
Şekil 5.25. Behram Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)1.....	110
Şekil 5.26. Behram Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli.	111
Şekil 5.27. Narmanlı Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c).....	111
Şekil 5.28. Narmanlı Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli	112
Şekil 5.29. Şebinkarahisar Fatih Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c).....	113
Şekil 5.30. Şebinkarahisar Fatih Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli.....	114
Şekil 5.31. Karatay Şerafettin Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	115
Şekil 5.32. Karatay Şerafettin Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli.....	116
Şekil 5.33. Beyazıt Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	116
Şekil 5.34. Beyazıt Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli	117
Şekil 5.35. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	118
Şekil 5.36. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) batı cephesinden görünüm.....	119
Şekil 5.37. Lala Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)	119
Şekil 5.38. Lala Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) batı cephesinden görünüm	120
Şekil 5.39. Konya Karapınar Sultan Selim Cami son cemaat yerinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerine etkisi (a) X yönü; (b) Z yönü	122
Şekil 5.40. Sultan Selim Cami'nin son cemaat yerinin hasar mekanizmasına etkisi ...	122
Şekil 5.41. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami (a) Son cemaat yerinin kuvvet-yer değiştirme eğrisine etkisi; (b) Son cemaat yerinin hasar mekanizması	123
Şekil 5.42. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami son cemaat yerinin hasar mekanizmasına etkisi	124
Şekil 5.43. Camilerin sonlu eleman modelleri.....	125

Şekil 6.1. (a) Kütle sistemi, (b) yer hareketi etkisi, (c) Efektif deprem yükü (Kazaz et al. 2006).....	130
Şekil 6.2. Yığma duvarlar için performans tanımları (Saloustros et al. 2020)	132
Şekil 6.3. Yığma duvarlar için performans tanımları (Bosiljkov et al. 2010)	133
Şekil 6.4. Yığma duvarlar için geliştirilmiş kuvvet-deformasyon ilişkisi (ASCE41-13).....	134
Şekil 6.5. Kuvvet-ötelenme ilişkileri (a) elastik-plastik, (b) üç doğrulu, (c) elastik-artık dayanımlı plastik ve (d) çok doğrulu.....	135
Şekil 6.6. İtme analizleri sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri	137
Şekil 6.7. Analizlerde kullanılan yer hareketleri ivme-zaman ve ivme spektrum grafikleri	139
Şekil 6.8. Camilerin dinamik kapasite eğrileri.....	140
Şekil 6.9. Denklem 6.14 ile dinamik analiz kuvvet kapasitelerinin karşılaştırılması ...	142
Şekil 6.10. Tarihi camiler için $V-\delta$ idealizesi.....	144
Şekil 6.11. Analiz ve denklemlerle elde edilen limitlerin karşılaştırılması	147
Şekil 6.12. Baskın yıkılma mekanizmalarına örnekler	150
Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları	151

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Bazı yönetmelikler ve kılavuzlarda önerilen yığma duvar hasar limitleri....	4
Çizelge 2.1. α katsayısının değişimi	9
Çizelge 2.2. Üç cidarlı duvarların mekanik özellikleri	12
Çizelge 2.3. Sinan strüktürü yapılarda kullanılması tavsiye edilen malzeme mekanik özellikleri (Şeker 2011)	14
Çizelge 2.4. Literatürde bazı tarihi yapılar için belirlenen malzeme özellikleri ve hasar limitleri	26
Çizelge 3.1. Beton malzeme tanım çizelgesi	30
Çizelge 3.2. Drucker-Prager modeli parametrelerinin hesaplanması	36
Çizelge 3.3. Literatürde bulunan üç cidarlı duvarların basınç testi sonuçları.....	40
Çizelge 3.4. Duvar notasyonu ve uygulanan eksenel yükler	44
Çizelge 3.5. Oliveira deneylerinde kullanılan malzeme özellikleri.....	47
Çizelge 3.6. Duvar notasyonu ve uygulanan eksenel yükler (toplam 24 duvar)	50
Çizelge 3.7. Vasconcelos deneylerinde kullanılan malzeme parametreleri.....	52
Çizelge 3.8. Duvar notasyonu ve uygulanan eksenel yükler	56
Çizelge 3.9. Duvar notasyonu ve uygulanan yüklemeler	61
Çizelge 3.10. Teorik ve deneysel frekansların karşılaştırılması	72
Çizelge 3.11. Sonlu eleman modelinde tanımlanan malzeme özellikleri	72
Çizelge 3.12. IRG ve REG duvarlarının sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri.....	75
Çizelge 4.1. Literatürde bulunan bazı yığma yapıların malzeme özellikleri	81
Çizelge 4.2. Literatürden elde edilen üç cidarlı duvarların özellikleri	82
Çizelge 4.3. Yığma duvar malzemelerinin mekanik özellikleri (VGM 2017)	83
Çizelge 4.4. Sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özellikleri	84
Çizelge 5.1. Çalışmada ele alınan camiler ve parametreleri	93
Çizelge 6.1. Camilerin kütle katılım oranı, birinci mod frekans ve modal katılım oranı değerleri.....	136
Çizelge 6.2. Dinamik analizlerde kullanılan yer hareketlerinin özellikleri	138
Çizelge 6.3. Camilerde kuvvet kapasiteleri ve hasar sınır limitleri	145
Çizelge 6.4. Denklem katsayıları	147

1. GİRİŞ

1.1. Genel

Tarihi yapılar karmaşık geometrik formları, yapım teknikleri ve kullanılan yapı malzemeleri nedeniyle yapısal davranış açısından oldukça komplekstir. Bu yapılarda oluşacak hasara müdahale için öncelikle yapı davranışının ve deformasyon şekillerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, tarihi yapılarda deprem etkilerinden dolayı oluşan hasar şekilleri, göçme mekanizmaları ve yük taşıma kapasitelerini anlamak oldukça önemlidir. Özellikle, son yıllarda cami, kilise, köprü, anıt, kule veya medrese gibi birçok tarihi yapının deprem performansının belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Oliveira 2012; De Santis et al. 2016; Kocaman et al. 2020; Altunışık et al. 2021; Kazaz et al. 2021; Cattari and Magenes 2022; Aşıkoğlu and Avşar 2022; Bianchini et al. 2022; Zizi et al. 2022).

Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer alan Türkiye, sismik hassasiyeti yüksek yapı stoku ile şiddetli depremlerin tehdidi altında bir ülkedir. Bu nedenle yüksek sismik aktivitenin ülke genelinde hâkim olması, özellikle yığma yapılar için kritik bir durumdur. Son yıllarda ülkenin farklı bölgelerinde meydana gelen depremlerin yığma yapılara etkisi araştırmacılar tarafından incelenen bir konudur (Bayraktar et al. 2007; Sayın et al. 2014; Yön ve Onat 2017; Oyguc and Oyguc 2017; Akgül ve Doğan 2020; Kocaman and Kazaz 2021).

Depremlerde sadece yığma yapılar değil aynı zamanda tarihi öneme sahip bazı yapılar da hasar görmüştür. Yaşanan depremlerden en çok hasar gören yapı grupları içerisinde tarihi camiler de bulunmaktadır. Bu yapılar hem kültürel hem de dini öneme sahiptirler. Birçok tarihi cami halen aktif olarak kullanılmaktadır. Tarihi camilerde yığma duvarlar taşıyıcı sistemin temel elemanıdır. Cami alanı büyüdükçe, merkezde serbest payeler de görülmektedir. Serbest payelerin bulunduğu camilerde, taşıyıcı duvarlar ile bu payelerin birleşimi kemer sistemler ile gerçekleşmektedir. Taşıyıcı unsurlar genellikle merkez bir kubbe ve küçük kubbeler veya tonozlar kullanılarak örtülmektedir. Uzun yıllar boyunca farklı etkilere maruz kalan, çeşitli sebeplerden dolayı hasara maruz kalan bu yapılarda hasar mekanizmaları genellikle benzer olduğu görülmektedir. Şekil 1.1'de

1. GİRİŞ

farklı depremler sırasında hasar gören farklı camiler verilmektedir. Minare göçmesi, kubbe hasarları, duvar çatlakları ve duvar göçmeleri oldukça yaygın olarak gözlemlenmektedir. Ayrıca tarihi camilerde, pencere boşlukları çevresinde ve kubbelerde çatlak hatları, duvarların birleşme bölgelerinden ayrılması oldukça fazladır (Doğangün and Sezen 2012). Deprem sebebiyle çeşitli hasar mekanizmaları gözlemlenen bu yapıların, deprem davranışlarının belirlenmesi önem arz etmektedir.



Kaya Çelebi Cami, Van Depremi (2011)



Kadı Cami, Düzce Depremi (1999)



Düzce Merkez Cami, Düzce Depremi (1999)



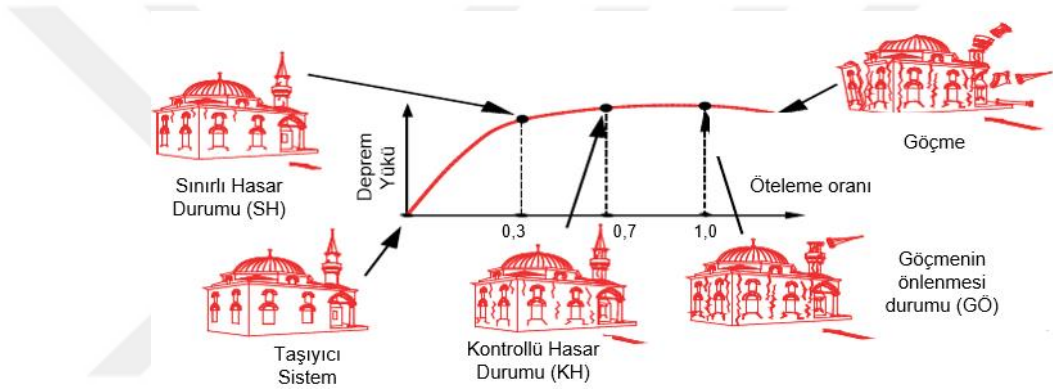
Malatya Ulu Cami, Elazığ Depremi (2020)

Şekil 1.1. Camilerde meydana gelen hasar örnekleri

Yapıların performansa dayalı tasarımı ve değerlendirilmesi yapı mühendisliği açısından yeni bir kavram değildir. Ülkemizde bu kavramın yönetmeliklere girmesi 2007 yılında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (DBYBHY) ile gerçekleşmiştir. Yapıların performansa dayalı sismik değerlendirilmesinde, yapının ve yapı elemanının performans hedefleri mühendislik ve sosyoekonomik parametrelere bağlı olarak sınırlandırılmaktadır. Son olarak yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)'de dört farklı performans düzeyi tanımlanmaktadır. Bunlar Kesintisiz Kullanım (KK), Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans düzeyi olarak tanımlanmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) mevcut çağdaş betonarme, çelik ve yığma binaların performans değerlendirmesiyle sınırlıdır. Yönetmelikte tarihi binalar kapsam dışında tutulmaktadır. Tarihi yığma yapıların modern yapılar gibi değerlendirilmesi mümkün

1. GİRİŞ

değildir. Karmaşık geometrileri, farklı formları, belirsiz ve çeşitli malzeme özellikleri, önceki sismik olaylarda hasar görmesi gibi sebepler, bu yapıların özel yöntemler kullanılarak değerlendirilmesini gerektirmektedir. Türkiye’de Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan Tarihi Yapılarda Deprem Yönetimi Rehberi (VGM 2017) tarihi yığma yapıların performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kılavuzun temel amacı, tarihi yapıların sismik değerlendirilmesi, güçlendirme uygulamalarının esasları hakkında teknik belgeler sunmaktır. Kılavuzda tarihi yapıların Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi (GÖ) hasar durumları için sırasıyla %0,3, %0,7 ve %1,0 ötelenme oranları önerilmektedir. Şekil 1.2’de kılavuzda önerilen yapı performans düzeyleri görülmektedir.



Şekil 1.2. Tarihi yapılarda performans düzeyleri (VGM 2017)

Yığma duvarların performansına dayalı tasarım için farklı yönetmelikler farklı hasar limitleri önermektedir. ASCE41-13, FEMA 356, EC8-3, NTC18 bu yönetmeliklerden en çok kullanılanlarıdır. Bu yönetmeliklerde önerilen hasar limitleri bir sistemin değil, bir duvarın limiti olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bahsi geçen yönetmeliklerde önerilen limitlerin birçoğu, tuğla duvarlarda yapılan çalışmalar neticesinde elde edilmiştir. Bu yönetmeliklerde duvarın yıkılma mekanizmasına bağlı olarak önerilen limit değişkenlik göstermektedir. Yığma duvarlarda göçme mekanizması ile süneklik düzeyi arasında ilişki kurulmaktadır. Az sünek duvarlarda köşe hasarları ve düzlem dışı yıkılma mekanizması görülürken, yüksek sünek duvarlarda kayma göçmeleri ve devrilme mekanizmaları beklenmektedir. Çizelge 1.1’de SH, KH ve GÖ hasar durumları için önerilen ötelenme limitleri verilmektedir. ASCE41-13 ve VGM yönetmeliklerinde KH limiti %0,70-0,75 olarak önerilirken FEMA ve EC8-3 yönetmeliğinde %0,30-0,40 önermektedir. Bu farklılığın temel sebebi limitlerin belirlendiği duvarların malzemesi, tipoloji ve yükleme protokolü olarak gösterilebilir.

1. GİRİŞ

Yönetmeliklere ek olarak, Vanin et al., (2017) literatürde bulunan 123 adet yığma taş duvar deneysel çalışmalarını derleyerek 5 farklı tipolojiye (duvarın yapım tekniği, kullanılan taşların şekli ve taşların yerleştirilmesi) ayırmıştır. Her tipoloji için düzlem içi yer değiştirme limitleri önermektedir. Kesme taşlardan meydana gelen duvar tipolojisi dikkate alındığında SH, KH ve GÖ hasar limitleri için sırasıyla %0,375, %0,75 ve %1,50 ötelenme oranları önerilmektedir.

Çizelge 1.1. Bazı yönetmelikler ve kılavuzlarda önerilen yığma duvar hasar limitleri

	Sınırlı Hasar	Kontrollü Hasar		Göçmenin Önlenmesi	
	SH (%)	KH (%)		GÖ (%)	
		Eğilme	Kesme	Eğilme	Kesme
ASCE41-13	0,10	$0, / h_{eff} < 2,25$	0,75	$100\Delta_{tc,r} / h_{eff} < 2,5$	1,00
FEMA 356	0,10	$0,3h_{eff}/L$	0,30	$0,40h_{eff}/L$	0,40
EC8-3	V_{ult}	$0,8H_0/D$	0,40	$1,07H_0/D$	0,53
NTC18	0,20	-	-	1,00	0,50
VGM	0,30	0,70		1,00	

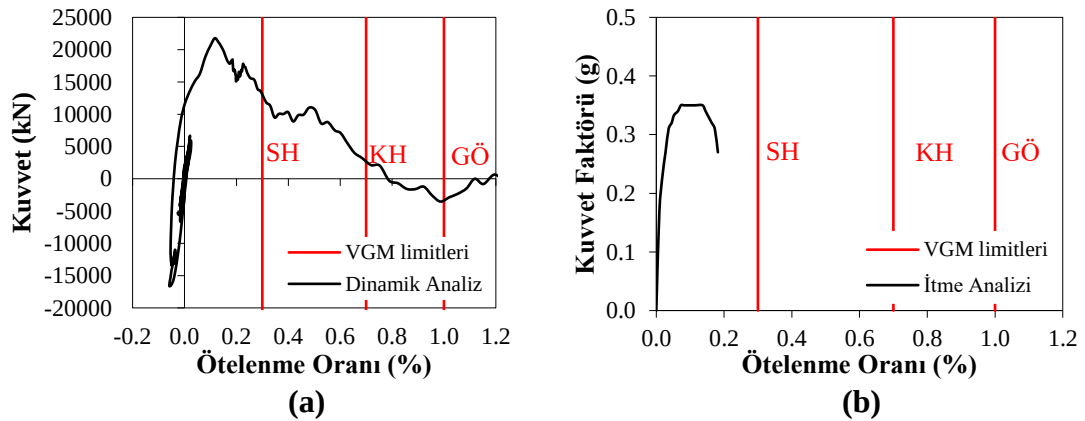
H_0 : Eğilme kapasitesinin elde edildiği bölüm ile büküm noktası arasındaki mesafe; h_{eff} : Yanal (sismik) kuvvetin bileşke yüksekliği; D : Duvarın düzlem içi yatay boyutu (derinlik); L : Duvarın uzunluğu (D ile aynı); V_{ult} : Duvarın kesme kapasitesi; $\Delta_{tc,r}$: Köşe kırılmasının (toe crush) başladığı yanal yer değiştirme

Yönetmelikler ve çalışmalara bakıldığında tarihi yığma camiler özelinde kapsamlı bir çalışma sonucunda önerilen hasar limitlerinin olmadığı açıkça görülmektedir. Tarihi yığma camiler karmaşık geometrik formları, yapım teknikleri ve kullanılan yapı malzemeleri nedeniyle yapısal davranış açısından oldukça komplekstiler. Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, tarihi camilerin deprem performansının belirlenmesi ve deprem öncesinde ve sonrasında meydana gelen hasar nedenlerinin araştırılması son yirmi yıldır önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Özellikle, son yıllarda tarihi camilerin deprem performansının belirlenmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde bazı araştırmacılar bu özel yapıların hasar limitlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Kocaman et al. (2020) tarihi Erzurum Lala Paşa Cami ele alarak yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Sonlu eleman modellerinde Erzincan yer hareketi

1. GİRİŞ

altında dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizler neticesinde belirlenen kuvvet-yer değiştirme ilişkisi Şekil 1.3a’da verilmektedir. Çalışmada duvarların elastisite modülü 786 MPa olarak tanımlanmıştır. SH, KH ve GÖ limitleri için ötelenme oranlarını sırasıyla %0,05, 0,13, 0,18 olarak belirlemişlerdir. Aşıkoğlu et al. (2019) tarihi Kütahya Kurşunlu Cami’nin sonlu eleman modelini oluşturarak bir dizi itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi Şekil 1.3b’de görülmektedir. Çalışmada camini duvarlarında elastisite modülü 1.500 MPa kullanılmıştır. SH, KH ve GÖ ötelenme oranı sınır değerleri sırasıyla %0,03, %0,11 ve %0,18 olarak elde edilmiştir. Bu elastisite modülü değerleri tarihi camilerin duvarları için alt sınır olarak kabul edilebilir (Magenes and Penna 2019). Literatürde bazı çalışmalarda daha yüksek elastisite modülü önerilmektedir. Doğal olarak, yüksek elastisite modülü ile yapılan analizler daha da düşük limitler verecektir. Bu kısa literatür değerlendirmesine bakıldığında tarihi camilerde yapılan çalışmalarda belirlenen maksimum ötelenme oranlarının yönetmeliklerde önerilen ötelenme limitlerinden düşük olduğu gözlemlenmektedir. VGM (2017) tarafından SH sınır durumu için önerilen %0,30 ötelenme limitine ulaşılmadan yapının başlangıç rijitliğini ve kuvvet taşıma kapasitesini kaybettiği açıkça görülmektedir. Tarihi camiler için VGM (2017)’de önerilen hasar limitlerinin literatürde camiler için hesaplanan hasar limitlerinden oldukça fazla olduğu açıktır.



Şekil 1.3. Kuvvet-ötelenme oranı eğrileri (a) Kocaman et al. (2020) (b) Aşıkoğlu et al. (2019)

Tarihi camilerin deprem performansının belirlenmesinde dikkat çeken ikinci önemli husus ise sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleridir. Kültürel miras olarak kabul edilen bu yapılarda tahribatlı testler ile malzeme özelliklerinin belirlenmesi oldukça zor ve riskli bir durumdur. Literatürde farklı tipolojide ve boyutta

yığma taş duvarlarda yapılan çalışmalarda, farklı basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmalarda duvarların basınç testleri sonucunda gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Bu sonuçlara dayanarak basınç dayanımı ve elastisite modülü önerilmektedir. Çalışmalarda aynı duvarların basınç-kesme deneyleri gerçekleştirilerek kuvvet ve yer değiştirme kapasiteleri elde edilmektedir. Sonrasında duvarların sonlu eleman modelleri oluşturularak, deneysel eğriler ışığında analitik eğriler değerlendirilmektedir. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri, basınç testlerinden elde edilen değerlerden farklı olduğu görülmektedir. Analitik eğrilerin başlangıç rijitlikleri ve kuvvet kapasitelerinin deneysel eğriler ile uyuşması için malzeme özelliklerinde kalibrasyona ihtiyaç duyulmaktadır (Vasconcelos 2005; Silva 2012; Demir 2012). Çalışmalarda yığma duvarlarda basınç dayanımı ve özellikle elastisite modülünün oldukça değişken olabildiği vurgulanmıştır. Hasar limitlerinin belirlenmesinde oldukça önemli olan basınç dayanımı ve elastisite modülündeki bu belirsizlik, irdelenmesi gereken önemli bir husus olarak öne çıkmaktadır.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada, tarihi yığma camilerin sismik performans değerlendirmesinde kullanılmak üzere hasar sınırlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Tarihi camilerin deprem performansının belirlenmesinde oldukça yaygın kullanılan sonlu eleman modelleme yaklaşımına yönelik dikkat edilmesi gereken hususlar belirlenecektir. Ayrıca tarihi camilerin sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özelliklerindeki belirsizliklere dikkat çekerek, malzeme özelliklerinin kullanılmasına yönelik bir yaklaşım geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1.3. Tezin İçeriği

Çalışma giriş kısmından sonra tarihi camilerin deprem performansının belirlenmesine yönelik çalışmaların derlenmesi ile devam etmektedir. Ayrıca Tarihi camilerin sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özelliklerine yönelik literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Konu bütünlüğünü sağlayan çalışmalar bir araya getirilmiştir ve sıralanmıştır.

Üçüncü bölümde sonraki kısımlarda kullanılacak olan sonlu eleman yaklaşımının doğruluğunu değerlendirmek amacıyla sonlu eleman model doğrulamaları gerçekleştirilmiştir. Farklı tipolojilere, yükleme şekillerine sahip çeşitli deneysel yığma duvarlar derlenerek, sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelleri ile deneysel çalışmaların karşılaştırılması yük-deplasman eğrileri, göçme mekanizmaları, sistemin genel davranışı gibi yönler ele alınarak yapılmıştır.

Dördüncü bölümde tarihi camilerin sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Literatürde bulunan çeşitli tarihi yapı çalışmaları ve tarihi camileri temsil eden üç cidarlı duvar çalışmaları derlenmiştir. Mevcut çalışmalar ve yönetmelik önerileri dikkate alınarak, çalışmanın sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özellikleri belirlenmiştir.

Beşinci bölümde ise literatürde detaylı boyutsal özellikleri bulunan tarihi camiler derlenmiştir. Tez kapsamında detayı verilen parametreler ışığında gruplandırılmıştır. Belirli kriterler göz önüne alınarak ele alınan tarihi cami grubunu temsil edebilecek camiler seçilmiştir. Seçilen camilerin tarihi, mimari özellikleri ve sonlu eleman modellerinin oluşturulması hususlarında detaylar sunulmaktadır.

Altıncı bölümde oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal, statik itme ve doğrulsa olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarının derlenmesi ve anlamlı hale getirilmesi hususunda izlenilen yollar anlatılmaktadır. Analizler neticesinde tarihi camilerin hasar limitleri belirlenmiş, baskın yıkılma mekanizmaları anlatılmıştır. Ayrıca önceki bölümlerde detayı verilen boyutsal parametreler ile hasar limitleri ilişkilendirilmiş, basit ampirik yaklaşımlar önerilmiştir.

Son olarak yedinci bölümde ise bu çalışmanın önemli sonuçları verilmiştir. Tarihi yığma camilerin hasar limitleri belirlenmiş, literatür ve yönetmelik önerileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca sonlu eleman modellemesi, kullanılacak malzeme özellikleri ve hasar mekanizmaları gibi tarihi camilerin deprem performansının belirlenmesine yardım edecek hususlar açıklanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tarihi yığma yapılar, dünyanın birçok bölgesinde görülmektedir. Dünyada ve ülkemizde korumak ve geleceğe güvenle aktarmakla yükümlü olduğumuz kültür mirası binaların çoğunluğunun yığma yapılardan oluştuğu görülmektedir. Bu yapıların sismik yükler altında davranışlarının belirlenmesi ve muhtemel hasarlara karşı önlemlerin alınması için yapıların malzeme özellikleri ve deprem davranışlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu sebeple bu konular üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu kısmında tarihi yığma yapıların malzeme özelliklerinin ve deprem davranışının belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalar derlenmiştir.

2.1. Tarihi Yığma Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Yığma binalarda kullanılan malzeme, binanın yapıldığı bölgeye ve o bölgedeki mimari ve kültüre göre değişiklik göstermektedir. Bu taşıyıcı elemanlarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, taşıyıcı eleman davranışının doğru belirlenmesinde ilk ve önemli bir adımdır. Malzeme özelliklerinde elastisite modülünün doğru belirlenmesi, yığma duvarların yer değiştirme limitlerini, performans noktalarını doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu sebeple yığma duvarlarda elastisite modülünün doğru biçimde belirlenmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir.

Yapıya etki eden statik ve/veya dinamik yükler sonucunda yapıda gerilme ve şekil değiştirmeler meydana gelir. Doğrusal elastik davranışta, meydana gelen bu gerilmeler ile şekil değiştirmeler birbirleriyle orantılıdır. Bu davranış Denklem 2.1’de verilen Hooke Kanunu ile ifade edilir (Onaran 2009).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Bağıntıdaki σ gerilmeyi, ε birim uzama oranını ve orantı katsayısı E ise elastisite modülüdür. Elastisite modülü malzemenin elastik şekil değiştirmeye gösterdiği karşı gösterdiği direnç veya rijitlik anlamına gelir. Yapılan analizin doğruluğu taşıyıcı

2. LİTERATÜR TARAMASI

elemanlara tanımlanacak elastisite modülünün ve basınç dayanımının gerçeğe en yakın şekilde belirlenmesine bağlıdır.

Yığma duvarlarda elastisite modülünün belirlenmesi tahribatlı/tahribatsız deneyler yardımıyla belirlenmektedir. Ancak taşıyıcı elemanı meydana getiren yapı malzemesinin taş olması birçok belirsizliği de beraberinde getirmektedir. Aynı ocaktan, aynı numunedan alınan aynı tür taşların bile malzeme özelliklerinin farklı olması taş ile oluşturulan taşıyıcı elemanlarda genelleştirme yapılmasını zorlaştırmaktadır. Taşıyıcı elemanlarda ise işçilik oldukça önemli bir etkidir. Büyük boyutlarda inşa edilen yığma elemanın her bölgesinde aynı düzenin gösterilememesi, elemanın özellik bakımından homojen davranmasını engellemektedir. Bu karmaşık duruma taş büyüklüğü, taşın cinsi, harcın çeşidi, bölgesel çevre etkisi vb. birçok etken eklenince, yığma duvarların malzeme özelliklerinin belirlenmesi çok zor olmaktadır. Bu yığma eleman tarihi bir yapı olunca zamanla bilinen ve bilinmeyen etkenler de devreye girmektedir.

Yığma yapıların modellenmesi ve analizinde kullanılmak üzere elastisite modülünün belirlenmesi amacıyla birçok yönetmelikte farklı ampirik eşitlikler önerilmiştir. Elastisite modülünün belirlenmesi için önerilen ifadelerin birçoğu taşıyıcı elemanın basınç dayanımına bağlıdır. Bu bağıntılarda elastisite modülü basınç dayanımının α katsayısı ile çarpına eşittir (Denklem 2.2).

$$E = \alpha \times f_c \quad (2.2)$$

Burada f_c duvarın basınç dayanımı, α ise duvarın elastisite modülü ile basınç dayanımı arasındaki katsayıdır. Çizelge 2.1’de bazı yönetmeliklere göre α katsayısının değişimi görülmektedir.

Çizelge 2.1. α katsayısının değişimi

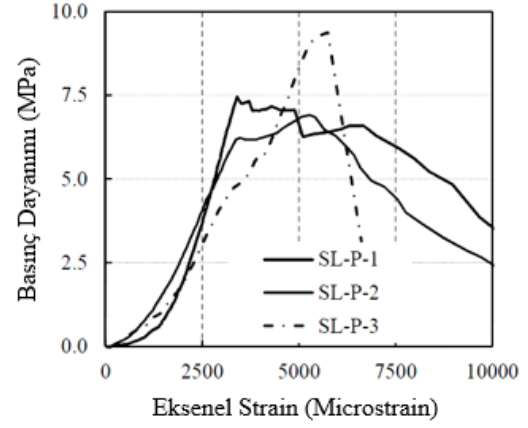
Yönetmelik	α
FEMA 356 2000	550
Eurocode 6 2005	1.000
DBYBHY 2007	200
TBDY 2018	750

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere yığma duvarlarda kullanılmak üzere basınç mukavemetinden faydalanarak elastisite modülünü hesaplamak için her bir yönetmelik farklı α katsayıları önermektedir.

Ancak Çizelge 2.1’deki yönetmelikler duvar tipolojisinin farklılığına değinmemişlerdir. Sonraki bölümlerde daha detaylı incelenecek olan duvar tipolojisi, duvarın davranışını tamamıyla etkileyen bir parametredir. Megenes and Penna (2009) çalışmalarında duvar tipolojisine bağlı olarak yığma duvarların basınç, kayma dayanımları, elastisite ve kayma modüllerinde kullanılabilecek aralıklar önermişlerdir. Bu aralıklara ek olarak Vakıflar Genel Müdürlüğü’nün hazırlamış olduğu Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu’nda (2017) ek olarak duvarların harç, duvar işçiliğine ve duvar enine bağlantılarının özelliklerine bağlı kullanılabilecek düzeltme katsayıları önerilmektedir. Megenes and Penna (2009)’nın önerdiği değerlere bakıldığında kaba yonu yığma duvarlar için elastisite modülü yaklaşık olarak $1160f_c$, kesme taşı iyi bağlantılı yığma duvarlar için ise ortalama $1000f_c$ önerilmektedir. Megenes and Penna (2009)’nın önerdiği aralıklar tek cidarlı (single leaf) duvarların özellikleridir.

Demir (2012) doktora tezinde düzgün kesme taşı harçsız duvar numunelerinin deneysel olarak mekanik özelliklerini belirlemiştir. Duvar numunelerinde Küfeki taşı kullanmıştır. Küfeki taşının basınç dayanımının $7,5-25,5$ MPa, elastisite modülünün ise $3352-12191$ MPa arasında olduğu belirtilmiştir. Çalışmada $500 \times 400 \times 130$ mm boyutlarında duvar numuneleri oluşturularak basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Şekil 2.1’de tek cidarlı duvarların ($\sigma-\epsilon$) eğrileri verilmektedir. Grafikten anlaşılabileceği üzere farklı numunelerin basınç dayanımları $7,45, 6,91, 9,38$ MPa elastisite modülleri ise $3400, 2366, 2079$ MPa mertebesinde. Basınç dayanımı elastisite modülü arasındaki α katsayısının ise sırasıyla $456f_c, 342f_c$ ve $222f_c$ olduğu görülmektedir.

Aynı çalışma kapsamında üç cidarlı duvar numuneleri oluşturularak basınç testine tabi tutulmuştur. Duvar boyutları $400 \times 500 \times 300$ mm’dir. Dört farklı duvar deneyi sonucunda basınç dayanımları $5,44, 5,75, 5,63$ ve $5,49$ MPa, elastisite modülleri sırasıyla $732, 991, 779$ ve 964 MPa olarak belirlenmiştir. Duvarların elastisite modülü sırasıyla $135f_c, 172f_c, 138f_c$ ve $176f_c$ olduğu görülmektedir. Bu değerler Çizelge 2.1’de önerilen α katsayılarına uzaktır. Sadece DBYBHY 2007’de önerilen $200f_c$ değerine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1. Tek cidarlı duvarların (σ - ϵ) eğrileri (Demir 2012)

Binda et al. (2006) çalışmalarında iki farklı taş tipi (Noto kireçtaşı and Serena küfeki taşı) kullanmışlardır. Noto taşı ortalama 20,6 MPa basınç dayanımına, 9.475 MPa elastisite modülüne, Serena taşı ise ortalama 104,2 MPa basınç dayanımına ve 18.218 MPa elastisite modülüne sahiptir. Bu taşları kullanarak düzgün kesme taşlı harçsız tek cidarlı duvarların mekanik özelliklerini elde etmişlerdir. Noto and Serena taşıyla yapılan duvarların ortalama basınç dayanımı sırasıyla 8,7 ve 39,8 MPa, elastisite modülleri ise 3.150 ve 4.870 MPa olarak belirlenmiştir. Serena taşının yüksek basınç dayanımı sebebiyle duvarın da basınç dayanımı oldukça yüksektir.

Almeida et al. (2010) Porto’da bulunan bir 20. yy. yapısından çıkardıkları duvar panellerinin üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Bu numunelerin ikisinde basınç testi gerçekleştirerek duvarın mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan testlerde duvar basınç dayanımları 3,94 ve 2,50 MPa, elastisite modülleri ise 220, 330 MPa olarak belirlenmiştir. Duvarların elastisite modülü $85f_c$ olarak belirlenmiştir. Bu çarpanın Çizelge 2.1’de yönetmeliklerin önerdiği çarpanlara göre oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Dünyanın farklı bölgelerinde, farklı dönemlerde yapılan tarihi yapıların birçoğu üç cidarlı duvarlar ile inşa edilmiştir. Bu sebeple, tarihi camilerin incelenmesinde üç cidarlı numunelerin deneysel çalışmaları, yapının davranışına yaklaşmak adına daha doğru sonuçlar verecektir. Tarihi yapılardaki üç cidarlı duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde farklı parametreler devreye girmektedir. Üç cidarlı duvarın dış kısımlarının özellikleri, tarihi yapılarda gerçek olarak elde edilmesi pek mümkün

2. LİTERATÜR TARAMASI

olmayan iç dolgu dayanımı, bu iki duvarın birleşimi, birleşim çizgisi vb. birçok önemli parametre vardır. Bu bilinmezler altında, tarihi yapılardaki üç cidarlı duvarların davranışlarının belirlenmesi ya da laboratuvar ortamında, test amaçlı üretilen duvar numunelerinin bu taşıyıcı elemanları ne kadar temsil ettiği sorgulanmaktadır.

Çizelge 2.2. Üç cidarlı duvarların mekanik özellikleri

			Malzemenin Basınç Dayanımları (MPa)			Duvar Numunelerinin Mekanik Özellikleri		
Deney No	Boyutlar (cm x cm)	Kalınlık (cm)*	Taş/Tuğla	Harç	Dolgu Malzeme	f_c (MPa)	E (MPa)	$E-f_c$ ilişkisi
Toumbakari 2002								
SC1	60x120	13-14-13	55	3,4	1,0	2,02	720	$356f_c$
SC2	60x120	13-14-13	55	3,4	1,0	2,09	1.140	$545f_c$
SC3	60x120	13-14-13	55	3,4	1,0	2,65	1.370	$517f_c$
SC4	60x120	13-14-13	55	3,4	1,0	2,71	1.440	$531f_c$
BC2	60x120	9-22-9	25	3,4	1,0	2,41	730	$303f_c$
BC3	60x120	9-22-9	25	3,4	1,0	2,09	1.020	$488f_c$
BC4	60x120	9-22-9	25	3,4	1,0	2,18	1.100	$505f_c$
BC5	60x120	9-22-9	25	3,4	1,0	2,28	1.140	$500f_c$
Valluzzi 2003								
4X	80x140	18-14-18	164	1,58	-	1,83	180	$98f_c$
6I1	80x140	18-14-18	164	1,58	-	2,16	310	$144f_c$
5I1m	80x140	18-14-18	164	1,58	-	1,60	370	$231f_c$
1I2	80x140	18-14-18	164	1,58	-	2,18	220	$101f_c$
8I2	80x140	18-14-18	164	1,58	-	2,12	240	$113f_c$
7R	80x140	18-14-18	164	1,58	-	1,86	290	$156f_c$
3Rm	80x140	18-14-18	164	1,58	-	1,10	1.140	$1036f_c$
2T	80x140	18-14-18	164	1,58	-	2,16	230	$106f_c$
9T	80x140	18-14-18	164	1,58	-	1,82	320	$176f_c$
Vintzileou and Tassios 1995								
2	60x120	13-14-13	100	1,7	0,15	1,30	2.710	$2085f_c$
4	60x120	13-14-13	100	1,7	0,15	1,60	4.420	$2763f_c$
5	60x120	13-14-13	100	1,7	0,15	1,70	5.670	$3335f_c$
6	60x120	13-14-13	100	1,7	0,15	1,35	5.630	$4170f_c$
Vintzileou et al. 2006								
1	100x120	19-12-14	25	4,35	0,15	1,82	1.000	$549f_c$
2	100x120	19-12-14	25	4,35	0,15	1,74	1.440	$828f_c$
3	100x120	19-12-14	25	4,35	0,15	2,26	1.500	$664f_c$
* Dış Cidar-İç Cidar-Dış Cidar Kalınlığı								

Çizelge 2.2’de üç cidarlı duvarlar üzerine yapılan bazı deneysel çalışmalar hakkında bilgiler verilmektedir. Görüldüğü üzere farklı yapı malzemelerinden (taş veya

tuğla) ve farklı harçlar ile meydana gelen, dolgu kısmının karakteristiği birbirine benzemeyen duvar numunelerin hem basınç dayanımları hem de elastisite modülleri birbirinden oldukça farklıdır. Elastisite modülleri ve basınç dayanımları arasındaki ilişki ise ele alınan çalışmalar ışığında oldukça değişken bir oranda olduğu görülmektedir. Üç cidarlı duvarların mekanik özelliklerini belirleyen parametrelerin çokluğu, yapı malzemesinin temelde homojen olmaması bu geniş aralıkların meydana gelmesine sebep olduğu söylenebilir. Bu sebeple üç cidarlı duvarlarda birim taşın ve harcın özelliklerine, moloz iç dolgunun durumuna, duvar tipolojisine bağımsız genelleştirilmiş yaklaşımlar sorgulanmalıdır.

Tahribatlı deney sonuçlarından görüldüğü üzere, yığma bir duvarın basınç dayanımı ve elastisite modülü belirli bir aralıkta verilmesi ya da tek bir katsayı ile ilişkilendirilmesi doğru olmayacaktır. Duvar tipolojisi, duvarın boyut oranları, yapım tekniği (cidar sayısı/tipolojisi), kullanılan harcın, taşın/tuğlanın özelliği, çok cidarlı duvarların birleşimi vb. birçok parametre bu özellikleri belirlemektedir. Tarihi yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çeşitli tahribatsız yöntemler kullanılmaktadır. Yapı elemanlarının basınç dayanımları ve elastisite modüllerinin belirlenmesi için ultrases ve sertlik ölçümleri sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Bu iki tahribatsız deney yöntemi, tarihi yapıların farklı yerlerinde çokça tekrarlanarak homojen bir malzeme özelliği elde etmek amacıyla kullanılabilir. Flat-Jack ve yerinde kayma deneyleri gibi az tahribatlı deneylerde ise yapı elemanının gerçeğe daha yakın mekanik özellikleri belirlenmektedir. Bu deney yöntemlerinde az da olsa tahribat gerçekleşmesi yapının birçok yerinde tekrarlanmasını kısıtlamaktadır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, tarihi yapıların mekanik özellikleri bölgesel değişiklik gösterebilmektedir. Bu deneylerin farklı yapılarda tekrar edilmesi, belirli bir bölgede bulunan yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olacaktır.

Hem tahribatsız deneyler hem de laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar göstermektedir ki elastik özellikler laboratuvar ortamında üretilen numune duvarlar üzerinden değil, yapılarda mevcut olan duvarlar üzerinden belirlenmelidir (Lourenço, 1996; Oliveira 2003). Çünkü duvar numuneleri büyük duvarlara göre daha homojen bir davranış göstererek elastisite modülünün gerçek yapılara göre daha farklı çıkmasına sebep olacaktır. Bu nedenle duvarların rijitliklerinin modal parametrelerle kalibre edilmesi

2. LİTERATÜR TARAMASI

doğru bir yaklaşım olacaktır (Vanin et al. 2017). Son yıllarda birçok araştırmacı da bu yöntemde çalışmalar yapmışlardır.

Şeker (2011) doktora tezinde literatüre verdiği atıflar sonucunda Mimar Sinan strüktürü 28 caminin analizlerinde kullanılabilecek malzeme özelliklerini Çizelge 2.3'te verildiği gibi önermiştir. Ancak araştırmacı çalışmalarının bazılarında yerinde aldığı taş numunelerin basınç dayanımlarından yola çıkarak $1000f_c$ çarpanıyla taşıyıcı elemanın elastisite modülünü belirlemiştir. Ele aldığı hiçbir yapıda deneysel çalışmalar ile dinamik parametrelerin doğruluğu mevcut değildir. Doktora tezi kapsamında Şeker, yapıların gerçek davranışının elde edilmesi amaçlanmasa da ülkemizde bulunan camilerin analizlerinde kullanılacak malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla iyi bir çıkış yolu olacaktır. Önerilen mekanik özelliklerin aldığı değerlere bakıldığında VGM tarafından önerilen değer aralıklarından oldukça fazla olduğu görülmüştür. Aynı zamanda deneysel çalışmalar ışığında ise üç cidarlı duvarların elastisite modüllerinin oldukça fazla kabul edildiği görülmektedir.

Çizelge 2.3. Sinan strüktürü yapılarda kullanılması tavsiye edilen malzeme mekanik özellikleri (Şeker 2011).

	Eleman Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (N/mm³)	Poisson Oranı
Duvarlar	Katı eleman	8.370	26,5E-009	0,17
Kemerler	Katı eleman	8.370	26,5E-009	0,17
Fil Payeler	Katı eleman	8.370	26,5E-009	0,17
Asıl ve Yarım Kubbeler	Kabuk eleman	2.510	26,0E-009	0,17

Mustafaraj and Yardım (2012) çalışmalarında tarihi Naziresha Cami'sini ele almışlardır. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak, taş ve tuğlanın mekanik özelliklerinden yola çıkarak duvarların ve kemerlerin elastisite modülünü 1740, kubbenin ise 2.100 MPa olarak belirlemişlerdir. Ancak birim elemanların mekanik özelliklerinin taşıyıcı elemanlara tanımlamasının doğru olmadığı önceki bölümlerde gösterilmektedir. Araştırmacıların önerdiği mekanik özelliklere bakıldığında elastisite modülü deneysel olarak belirlenen elastisite modüllerine göre kabul edilebilir düzeydedir.

Köseoğlu (2011) yüksek lisans tezinde tarihi Ankara Cenabı Ahmet Paşa Cami'sinde oluşan çatlakları irdelemiştir. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak

homojenleştirilmiş duvarlara elastisite modülü 30.000 MPa, poisson oranı 0,2 ve birim hacim ağırlık 2,7 t/m³ olacak şekilde mekanik özellikler tanımlamıştır. Sonlu eleman modelinin gerçekliği deneysel bir çalışma ile kontrol edilmese de zemin oturması ile yapıda meydana gelen hasarlar ile sonlu eleman modeli üzerindeki tahminler örtüşmüştür.

Karaton and Aksoy (2017) çalışmalarında tarihi Diyarbakır Ulu Cami'nin malzeme özelliklerini farklı tahribatsız deney yöntemleri ile belirlemişlerdir. Hem taşın hem de harcın mekanik özelliklerinden yola çıkarak literatürde önerilen bağıntılar yardımıyla duvarların ve taş kolonların mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri taş sütunlar için sırasıyla 5,045, 1,104 ve 3.027 MPa, duvarlar için ise sırasıyla 6,918, 1,514 ve 4.151 MPa'dır. Tahribatsız yöntem olarak Schmidt çekici ve ultrasonik test yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerin tarihi yapılarda rahatlıkla kullanılabileceğini göstermişlerdir. Elastisite modülü $1.000f_c$ olarak alınmıştır. Ancak, Eurocode 6'da önerildiği gibi elastisite modülünün 0,6 katı alınmıştır.

Yukarıda değinilen çalışmaların deneysel bir test prosedürü ile kalibre edilmemesi bu değerleri oldukça sorgulanır kılmaktadır. Ancak bu çalışmalar, tarihi yapıların değerlendirilmesinde araştırmacıların malzeme mekanik özelliklerini hangi aralıkta aldığına yönelik fikir edinilmesine yardımcı olmuştur. Araştırmacıların, deneysel çalışma gerçekleştiremedikleri durumlarda, yapının karakteristiğinden yola çıkmak yerine, genel kabuller ile analizlerini gerçekleştirdikleri görülmektedir. Bu kabuller sonucunda tarihi yapıların malzeme özelliklerinin oldukça geniş bir aralıkta kabul edilerek araştırmalar gerçekleştirildiği görülmektedir.

Ercan and Nuhoğlu (2014) çalışmalarında tarihi İzmir Vezir Ağası su kemerinin taş ve tuğla mekanik özelliklerini tahribatlı ve tahribatsız deneyler yardımıyla belirlemişlerdir. Birim malzeme özelliklerinden yola çıkarak literatürde önerilen bağıntılar yardımıyla taş duvarlar için 10,49 MPa basınç dayanımı, 1,05 MPa çekme dayanımı, 871 MPa elastisite modülü elde etmişlerdir. Bu değerler ışığında sonlu eleman modelinde modal analiz gerçekleştirerek analitik frekansları belirlemişlerdir. Yapının operasyonel modal analizini de gerçekleştirerek sonlu eleman modelinin doğruluğunu irdelemişlerdir. Malzeme mekanik özelliklerine bakıldığında elastisite modülü harçlı taş

duvarda $83f_c$, tuğla kısımda ise $56f_c$ olduğu görülmektedir. Bu α katsayıları yönetmeliklerin önerdiklerine göre oldukça düşük değerlerdir. Önerilen malzeme mekanik özellikler kullanılarak elde edilen analitik frekanslar deneysel frekanslarla oldukça uyumlu olduğu rapor edilmiştir.

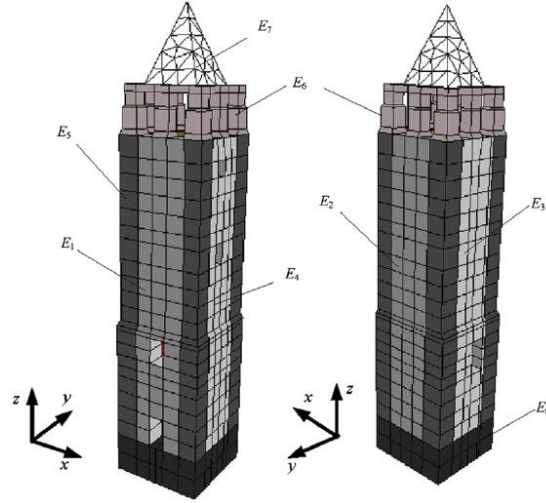
Torres et al. (2017) çalışmalarında Santiago şehrinde bulunan büyük katedralin malzeme dayanımlarını literatür yardımıyla belirlemişlerdir. Bu malzeme dayanımlarından yola çıkarak yine literatürde önerilen bağıntılar kullanmışlardır. Elde ettikleri mekanik özellikleri sonlu eleman modeli oluşturarak homojen halde taşıyıcı elemanlara tanımlamışlardır. Yapının farklı bölgelerinde farklı malzeme ve duvar tipolojisi kullanıldığı için bu mekanik özellikler söylenen iki parametreye bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Taş duvarların elastisite modülünü 1.390 MPa olarak kabul etmişlerdir. Araştırmacılar duvarların tipolojisi içinde dahi elastisite modülünün çok farklı değerler alabildiğini belirtmişlerdir. Taş duvarın elastisite modülünden önce birim taşın elastisite değerini belirlemişler, bu değer de onda birini almışlardır. Tuğla duvarın elastisite modülü ise literatürde önerilen aralıktan belirlemişlerdir. Yapının deneysel modal analizi operasyonel modal analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analitik ve deneysel frekansların oldukça uyumlu olduğunu belirten araştırmacılar tanımladıkları malzeme özellikleri ile deneysel sonuçlara yaklaşmışlardır.

Altunışık vd. (2017) çalışmalarında tarihi Trabzon Zağnos Burcu'nun dinamik karakteristiklerini operasyonel modal analiz yöntemiyle elde etmişlerdir. Burcun sonlu eleman modelini oluşturarak analitik modal analiz parametrelerini deneysel sonuçlara göre kalibre etmişlerdir. Malzemeyi homojen olarak alan araştırmacılar elastisite modülü değerleri duvarlarda 2.400, kemerlerde 4.000, betonarme zeminde 25.000 ve çelik kolonlarda ise 200.000 MPa olarak kabul etmişlerdir. Deneysel ve analitik frekanslar neticesinde malzemelerin elastisite modüllerinde değişiklikler yaparak analitik değerleri deneysel değerler ile karşılaştırılmış/yaklaştırılmıştır. Taş duvarların elastisite modülü 2.400 MPa'dan 1.320 MPa'a; kemerlerin elastisite modülü ise 4.000'den 2.550 MPa'a indirilmiştir. Bu değişiklikler sonucunda frekans değerlerinin ve mod şekillerinin oldukça uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Sevim et al. (2011) iki farklı tarihi köprünün deneysel frekanslarını ve mod şekillerini OMA yöntemiyle belirlemişlerdir. Köprülerin sonlu eleman modellerini oluşturan araştırmacılar, malzemeleri homojenleştirme yöntemiyle belirlemişlerdir. Her iki köprü için de malzeme elastisite modülü taş kemerlerde 3.000 MPa, dolgu bloklarda 1.500 MPa, duvarlarda ise 2.500 MPa olarak tanımlanmıştır. Bu malzeme özelliklerinin hangi bilgiler ışığında belirlendiğine dair bir bilgiye değinmemişlerdir. Analitik olarak belirlenen frekanslar deneysel frekanslar ile karşılaştırılarak modellerde kalibrasyon önerilmiştir. Bu kalibrasyonlar dış duvarların rijitliği artırılması ile sonlandırılmıştır. Ancak rijitlik artışının ne kadar olduğu konusunda bir bilgiye yer verilmemiştir. Her iki köprü için de analitik ve deneysel mod şekilleri ve frekanslar oldukça uyumludur.

Bayraktar et al. (2009) çalışmalarında tarihi Trabzon Ayasofya kulesinin sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Operasyonel modal analiz yöntemiyle kulenin deneysel frekanslarını belirlemişlerdir. Çalışmada hem analitik hem de deneysel mod şekilleri irdelenmiş ve her iki yöntemle elde edilen mod şekillerinin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Sonlu eleman modeline duvar malzemesi homojen olarak tanımlanmıştır. Duvarların mekanik özellikleri yoğunluk 1.600 kg/m^3 , poisson oranı 0,15, elastisite modülü ise 1.300 MPa olarak tanımlanmıştır. Kuleyi oluşturan duvar tipolojisi harçlı moloz (kaba yonu) taştır.

Ramos et al. (2010) Lizbon'da bulunan tarihi Mogadouro saat kulesinin operasyonel modal analiz yöntemiyle mod şekillerini ve frekanslarını belirlemişlerdir. Kulenin sonlu eleman modeli deneysel parametrelerle kalibre edilmiştir. Saat kulesi farklı malzemelerle oluşturulmuştur. Bu sebeple Şekil 2.2'de gösterilen sonlu eleman modeline göre farklı elastisite modülleri belirlenmiştir. Araştırmacılar kendi belirledikleri E_1 - E_8 duvarlarına 195-3.875 MPa aralığında değişen elastisite modülü atamışlardır. Yapının görüntüsüne bakıldığında duvarlar benzer tipolojidedir. Ancak farklı duvarlar için farklı rijitlikler tanımlanmıştır. Bunun sebebinin yapının çeşitli bölgelerinde hasar durumlarının farklılık göstermesi olarak yorumlanmıştır.



Şekil 2.2. Ramos et al. (2010) çalışmasında tanımlanan elastisite modülü yerleşimi

Maccarini et al. (2018) çalışmalarında laboratuvar ortamında iki farklı tipolojiye sahip moloz taş duvar numuneleri oluşturmuşlardır. Farklı yer değiştirme deneyleri yapmak için oluşturulan duvarlarda, duvarların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ultrasonik test ve deneysel modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Duvar numunelerini bilgisayar ortamında modelleyen araştırmacılar, deneysel frekanslar ışığında sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme elastisite modülünü kalibre etmişlerdir. Şekil 2.3'te deneysel ve teorik frekanslar verilmektedir. Araştırmacılar dinamik kalibrasyon sonrasında IRG tipi duvar için malzeme elastisite modülünü, poisson oranını ve yoğunluğu sırasıyla 3.285 MPa, 0,33 ve 2.430 kg/m³; REG duvar tipi için ise 4.115 MPa, 0,39 ve 2.495 kg/m³ şeklinde tanımlamıştır.

Kazaz et al. (2019) çalışmalarında tarihi Diyarbakır Seyit Mutahhar Cami'nin dört ayaklı minaresini incelemişlerdir. Çalışmada minarenin sonlu eleman modelini oluşturarak, minarenin deprem davranışı incelenmiştir. Sonlu eleman modelinde tanımlanan malzeme özellikleri literatürde önerilen bir dizi bağıntılar yardımıyla belirlenmiştir. Araştırmacıların kullandığı bu teknik Kazaz ve Kocaman (2018) de detaylı şekilde açıklanmaktadır. Elde edilen malzeme özelliklerinde minare duvarlarının basınç dayanımı 5,21 MPa, elastisite modülü ise 3.911 MPa olarak dikkate alınmıştır. Kullanılan malzeme özellikleri ile elde edilen teorik frekansın deneysel frekansa oldukça yakın olduğu belirtilmiştir.

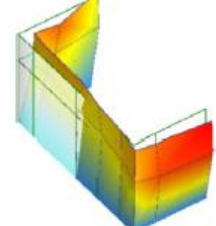
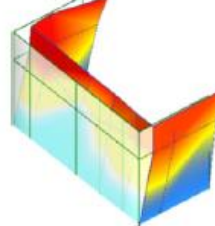
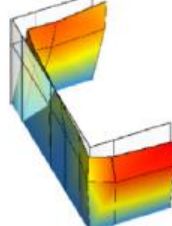
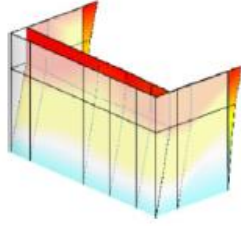
Deneysel Modlar

IRG Duvar Tipi
Mod1-25,8Hz

Mode2-33,3Hz

REG Duvar Tipi
Mod1-26,7Hz

Mode2-34,9Hz



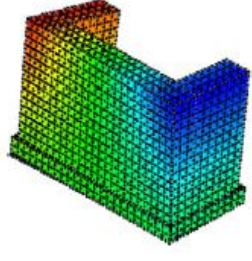
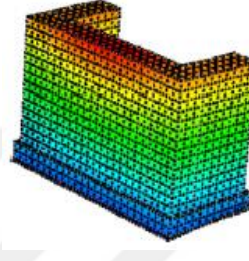
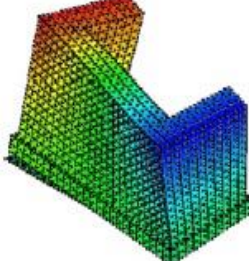
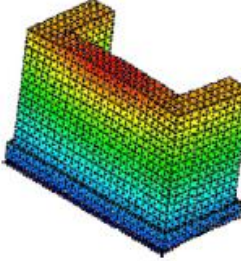
Teorik Modlar

IRG Duvar Tipi
Mod1-25,6Hz

Mode2-30,1Hz

REG Duvar Tipi
Mod1-25,8Hz

Mode2-30,9Hz



%0,7 Hata

%9,4 Hata

%3,1 Hata

%11,4 Hata

Şekil 2.3. Dinamik kalibrasyon sonrasında deneysel ve teorik frekans değerleri ve mod şekilleri (Maccarini et al. 2018).

Deneysel modal analiz çalışmaları, tahribatlı deneyler ve yönetmeliklerde önerilen aralıklar göz önüne alındığında, yığma duvarlarda elastisite modülünün değerini belirli aralıklarda önermek doğru bir yaklaşımdır. Ancak literatürde de belirtildiği gibi (Tomazevic 1999) elastisite değerleri oldukça geniş aralıkta değerler almaktadır. Bu durum tarihi yapılarda daha da karmaşık bir hal almaktadır. Yığma duvar yüzyıllar boyunca farklı bölgelerde meydana gelecek irili-ufaklı hasarlar sebebiyle farklı mekanik özellikler gösterecektir. Bu sebeple taş birim ve harç birimin özellikleri, duvarın tipolojisi vb. duvar karakteristiğini yansıtan parametrelerden yola çıkarak, modal doğrulama da yaparak elastisite modülünün belirlenmesi ve bu belirleme yöntemi uygulanırken yapıya zarar verilmemesi önerilmektedir (Çalık 2017).

2.2. Tarihi Camilerin Deprem Performansının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Tarihi camiler karmaşık geometrik formları, değişken yapım teknikleri ve kullanılan malzeme özellikleri sebebiyle yapısal davranışların belirlenmesi zor yapılardır. Bu yapılarda meydana gelebilecek hasarların belirlenmesi ve planlanması için öncelikle

yapının davranışının en doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca tarihi camilerde oluşan deformasyon şekilleri, göçme mekanizmaları ve yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde de oldukça önemlidir. Ancak, davranış açısından karmaşık yapıya sahip tarihi camilerin analitik hesaplarla değerlendirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle, tarihi camilerin sonlu eleman yöntemi kullanarak modellenmesi ve modellenen yapıların bilgisayar analizleriyle değerlendirilmesi kullanışlı ve yaygın bir yöntemdir.

Gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte, tarihi camilerin deprem performansının ve meydana gelen hasarların belirlenmesi, ülkemizde ve dünyada önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Özellikle, son yıllarda yıkıcı depremlerden etkilenen tarihi yapıların performansı ile ilgili birçok bilimsel çalışma yürütülmüştür.

Soyluk and Tuna (2011) tarihi yığma bir cami sisteminin sismik izolasyon teknolojisi uygulanarak güçlendirilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla İstanbul Şehzade Mehmet Cami dikkate alınarak, cami sisteminin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman modelinde ankastre mesnet ile yüksek sönümlü kauçuk mesnetli modellerinin dinamik davranışları karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar sismik taban izolatörü uygulamasının tarihi yığma caminin dinamik davranışını önemli ölçüde iyileştirdiğini gözlemiştir.

Kazaz and Kocaman (2018) Erzurum Lala Paşa Camisi'nin statik ve dinamik yükler altındaki davranış sonlu eleman yöntemiyle incelemiştir. Sonlu eleman modelinde dinamik analizler gerçekleştirilerek caminin kuvvet kapasitesi belirlenmiştir. Ayrıca literatürde önerilen kuvvet kapasitesini belirlemeye yönelik bağıntıların yeterliliği irdelenmiştir.

Aslay and Okuyucu (2020) Erzincan ilinde bulunan tarihi Değirmenli köy kilisesini ele alarak deneysel modal analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapının sonlu eleman modeli deneysel modal analiz sonuçları ışığında kalibre edilmiştir. Araştırmacılar 1992 Erzincan Deprem kaydını kullanarak yapının sismik performansını incelemiştir.

Çalık et al. (2016) yığma taş duvarlı camilerin dinamik davranışlarının belirlenmesi adına çalışmalar yürütmüşlerdir. Tarihi Trabzon Akçaabat Dürbinar camisinin restorasyon öncesi ve sonrası doğal frekanslarını deneysel modal analiz yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Restorasyon sonrasında caminin ilk modunda belirgin bir değişikliğe vurgu yapmışlardır.

Usta et al. (2020) tarihi Afyon Sandıklı Ulu Cami ele alarak statik ve dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Analizler neticesinde yapının deprem etkisi altında davranışı ve sismik hassasiyeti ortaya konulmuştur.

Çakır (2021) tarihi yapıların deprem performansını belirlemek amacıyla deplasmana dayalı basitleştirilmiş bir yöntem önermiştir. Önerilen yöntem Van Kaya Çelebi Cami örneği ile detaylandırılmıştır.

Maraş et al. (2022) çalışmalarında 2020 Elâzığ depremi sonrasında bölgede bulunan tarihi Sütçü camisinde meydana gelen hasarları sonlu eleman modeli yardımıyla belirlemişlerdir. Sonlu eleman modelinde elde edilen hasar ve çatlak mekanizmaları ile yapıda deprem sırasında oluşan hasarların oldukça uyumlu şekilde örtüştüğünü belirlemişlerdir.

Bayraktar et al. (2019) tarihi Trabzon Fatih Camisinin restorasyonu sırasında belirlenen 12 kapalı pencere açıklığının yapı davranışına etkisini incelemiştir. Restorasyon öncesi ve sonrasında yapının deneysel doğal frekansı belirlenerek sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sonlu eleman analizleri lineer dinamik analizlere tabi tutularak, pencere açıklıklarının yapının davranışına etkisi irdelenmiştir.

Uray et al. (2019) İznik Yeşil Camisinin malzeme özelliklerini tahribatsız yöntemlerle belirlemişlerdir. Yapının zemin özellikleri zemin etüt çalışmaları ile incelenmiştir. Yapının sonlu eleman modeli oluşturularak statik analizler altında yapısal gerilmeler incelenmiştir.

Portioli et al. (2011) Üsküp Mustafa Paşa Cami'nin sismik davranışını belirlemek ve CFRP tabanlı bir güçlendirme tekniğinin etkinliğini değerlendirmek amacıyla çalışma

gerçekleştirmişlerdir. Caminin büyük ölçekli bir modeli sarsma tablası testlerine tabi tutularak sonlu eleman modeli kalibre edilmiştir. Kalibre edilen sonlu eleman modelinde statik ve dinamik analizler gerçekleştirerek, güçlendirme yönteminin etkinliği ve caminin sismik davranışı ortaya konulmuştur.

Kocaman et al. (2020) çalışmalarında tarihi Erzurum Lala Paşa caminin sonlu eleman modelinin oluşturarak, deprem davranışını dinamik analizler ile belirlemişlerdir. Tarihi camilerin kuvvet kapasitesinin belirlenmesi için kinematik bir yaklaşım önerilmiştir. Tarihi Erzurum Narmanlı cami ele alınarak önerilen kinematik yaklaşımın yeterliliği kontrol edilmiştir.

Aşıkoğlu et al. (2019) tarihi Kurşunlu caminin sonlu eleman modelini oluşturarak bir dizi itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Yapının uygulanan restorasyon öncesi ve sonrası kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır.

Altunışık et al. (2021) deprem esnasında ağır hasar gören Van Hüsrev Paşa ve Van Kaya Çelebi camilerini ele almıştır. Camilerin sonlu eleman modelleri oluşturularak yakın ve uzak fay yer hareketlerinin cami modelleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2.3. Tarihi Yapıların Hasar Sınırlarının Belirlenmesine Yönelik Çalışmalar

Birçok çalışma, tarihi yapıların hasar sınır durumlarını belirlerken çeşitli yaklaşımlar ele almaktadır. Yapının bütünsel (global) kapasitesi ya da taşıyıcı eleman kapasiteleri veya yapının bölümlerine ayırarak ele alınması oldukça yaygın yaklaşımlardır (Lagomarsino and Cattari 2015; Çakır et al. 2015a; Genç et al. 2020; Kallioras et al. 2020). Yapılan çalışmalar sonucu araştırmacıların elde ettikleri hasar limitleri yapı tipine, kullanılan tekniğe vb. durumlara göre farklılık göstermektedir. Bazı çalışmalarda elde edilen hasar limitleri, farklı bölgelerde kabul gören yönetmelikler ile uyumluyken, bazı çalışmalarda ise bu limitleri yönetmeliklerde önerilenden oldukça düşük elde edildiği görülmektedir. Bu kısımda literatürde tarihi yığma binaların hasar limitlerinin belirlenmesine değinen bazı çalışmalar sıralanmıştır. Bazı çalışmalarda sınır limitleri çalışma kapsamında belirtilmişken, bazı çalışmalarda ise ilerleyen bölümlerde açıklanacak yöntemler kullanılarak kuvvet-yer değiştirme eğrileri ışığında belirlenmiştir.

Cattarini et al. (2015) 2007 Gisborne depreminde hasar gören Lancaster House isimli iki katlı yığma bir binayı ele almışlardır. Araştırmacılar yapının sonlu eleman modelini oluşturarak itme analizleri gerçekleştirmişlerdir. İtme analizi sonucu yapıda oluşabilecek nispeten küçük hasarların %0,02 gibi bir ötelenme oranında meydana geleceğini gösterilmiştir. Araştırmacılar SH, KH ve GÖ ötelenme oranı hasar limitlerini sırasıyla %0,02, %0,09 ve %0,18 olarak belirlemiştir.

Marino et al. (2016) 2011 yılında Canterbury depreminde hasara uğramış Royal Otel (RH) ve Avonmore Evi (AH) yığma yapılarını ele almışlardır. Araştırmacılar her iki yapının sonlu eleman modellerini oluşturarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde RH yapısının SH, KH ve GÖ hasar limitlerini sırasıyla %0,04, 0,20 ve 0,66; AH yapısında ise SH, KH ve GÖ hasar limitlerini sırasıyla %0,05, 0,20 ve 0,44 olarak belirlemiştir. Her iki yapının deprem esnasında yıkıldığı raporlanmıştır. Araştırmacılar elde ettikleri sonuçları ASCE yönetmeliği tarafından önerilen değerler ile karşılaştırmışlar ve yönetmeliğe göre oldukça küçük hasar sınır değerleri elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Vintzileou et al. (2015) ahşap zeminli ve üç cidarlı taş duvarlara sahip tarihi yapıların deprem davranışının anlaşılması amacıyla çalışma yürütmüşlerdir. 1:2 ölçeğe sahip bir bina modeli oluşturarak sarsma tablasında testler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan sarsma testlerinden sonra yapının SH, KH ve GÖ hasar limitlerini sırasıyla %0,13, 0,25 ve 0,31 olarak belirlenmiştir.

Milani and Valenta (2015) 2012 Emilia-Romagna depremi esnasında hasar gören tarihi kiliselerin incelemişlerdir. Kiliselerde meydana gelen hasar durumuna göre, yapıların hasar limitleri hakkında çalışmalar yürütmüşlerdir. Toplamda 7 tarihi kilise inceleyen araştırmacılar SH limitli için %0,05-0,15 arasında; KH limiti için ise %0,26-0,85 arasında değerler belirlemişlerdir.

Endo et al. (2017) yığma duvar sistemi ile yığma kubbe-kemer sistemi ele alarak farklı analiz yöntemleri altında davranışlarını incelemiştir. Yapılan analizler neticesinde hesaplanan kuvvet-yer değiştirme eğrileri paylaşmıştır. Bu eğriler ışığında yığma duvar

2. LİTERATÜR TARAMASI

sisteminde SH ve KH hasar limitlerini sırasıyla %0,03 ve %0,06; yığma kubbe-kemer sisteminde ise SH ve KH hasar limitleri sırasıyla %0,06 ve %0,15 olarak belirlenmiştir.

Panto et al. (2016) tarihi kiliselerde düzlem içi ve dışı davranışın birbiri ile etkisini irdelemek amacıyla oldukça tipik bir yığma kemer sistemi ele almıştır. Kemer sistemde birtakım analizler gerçekleştirerek, sistemin deprem davranışını elde etmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler neticesinde kemer sistemin SH, KH ve GÖ hasar limitleri sırasıyla %0,05, 0,06 ve 0,08 olarak belirlenmiştir.

Literatürde tarihi camilerin incelendiği bazı çalışmalarda hasar limiti önerileri bulunmaktadır. Portioli et al. (2011) Üsküp'te bulunan tarihi Mustafa Paşa caminin sismik davranışını ve güçlendirme etkisini araştırma üzere birtakım analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada yapılan analizlerde maksimum kuvvet mertebesinde ötelenme oranı %0,14 olarak belirlenmiştir.

Soyluk and Tuna (2011) tarihi Şehzade Mehmet Cami'nin sismik taban izolasyon etkisi ile davranışının nasıl değişeceğini irdelemişlerdir. Bu amaçla izolasyon bulunmayan sonlu eleman modelinde maksimum kuvvet mertebesinde ötelenme oranı %0,02 olarak belirlenmiştir.

Altunışık et al. (2021) iki tarihi yığma camiyi ele almıştır. Yapıların sonlu eleman modellerinde dinamik analizler gerçekleştirerek maksimum ötelenme oranlarını %0,07 ve %0,10 olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmalarda cami duvarlarının elastisite modülü 430-1500 MPa arasında değişmektedir.

Karantoni and Dimakopoulou (2021) Kos adasında meydana gelen deprem sonrası tarihi Gazi Hasan Paşa camisinde meydana gelen hasarları incelemişlerdir. Yapının sonlu eleman analizleri gerçekleştirilerek, meydana gelen hasarların SH sınır düzeyinde olduğunu belirtmişlerdir. Bu düzeyde meydana gelen limitin %0,03 olduğu görülmektedir.

Çakır (2022) tarihi Van Kaya Çelebi Cami örneğinden, tarihi yapıların deprem performansının belirlenmesine yönelik birtakım önerilerde bulunmuştur. Yapılan

analizler neticesinde yapıda oluşan maksimum ötelenme oranı %0,13 olarak belirlenmiştir.

Mangia et al. (2016) Tunceli’de bulunan tarihi Elti Hatun Cami’nin itme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar yapının analizleri sonucunda çatlak mekanizmalarını, yıkılma şekillerini elde etmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde SH ve KH sınır değerleri sırasıyla %0,03 ve %0,06 olarak elde edilmiştir.

Aşıkoğlu et al. (2019) tarihi Kütahya Kurşunlu Camide bir dizi itme analizi gerçekleştirmişlerdir. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden SH, KH ve GÖ sınır değerleri sırasıyla %0,03, %0,11 ve %0,18 olarak elde edilmiştir.

Kocaman et al. (2019) iki caminin sonlu eleman modelini oluşturarak dinamik analizler neticesinde kuvvet-yer değiştirme kapasitesini elde etmişlerdir. SH, KH ve GÖ limitleri için sırasıyla birinci camide %0,05, %0,13, %0,18, ikinci camide ise %0,09, %0,15 ve %0,34 olarak belirlemişlerdir.

Bal et al. (2010) tarihi İstanbul Atık Ali Paşa Cami’nin ortam titreşimlerinde yola çıkarak malzeme özelliklerinin belirlemişlerdir. Belirlenen malzeme özellikleri ışığında sonlu eleman modeli oluşturularak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde caminin SH, KH ve GÖ sınır değerleri sırasıyla %0,02, %0,04 ve %0,07 olarak elde edilmiştir.

Dinani et al. (2021) tarihi Esfahan Şah Cami’de bir dizi tahribatsız deneyler yaparak, caminin malzeme özelliklerini belirlemişlerdir. Caminin sonlu eleman modeli oluşturularak itme analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler neticesinde caminin SH, KH ve GÖ sınır değerleri sırasıyla %0,04, %0,07 ve %0,35 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2.4’de literatürde bulunan bazı tarihi yığma yapıların hasar sınırları, analizlerde kullanılan elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri verilmektedir. Literatürde mevcut bu değerler arasındaki ilişkinin daha iyi anlaşılabilmesi için çizelge oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Çizelge 2.4. Literatürde bazı tarihi yapılar için belirlenen malzeme özellikleri ve hasar limitleri.

Çalışma	Yapı Tipi	SH (%)	KH (%)	GÖ (%)	E (MPa)	f _c (MPa)
Bal et al. (2010)	Cami Kemer	0,02	0,04	0,07	2.500	2,00
Portioli et al. (2011)	Cami	-	0,14	-	430	3,00
Soyluk and Tuna (2011)	Cami	-	0,02	-	8.500	-
Cattari et al. (2015)	Yapı	0,02	0,09	0,18	2.843	9,50
	Kilise_1	0,11	0,34	-		
	Kilise_2	0,07	0,27	-		
	Kilise_3	0,08	0,29	-		
Milani and Valena (2015)	Kilise_4	0,05	0,26	-	1.600	1,40
	Kilise_5	0,13	0,43	-		
	Kilise_6	0,11	0,58	-		
	Kilise_7	0,15	0,85	-		
Vintzileou et al. (2015)	Yapı	0,13	0,25	0,31	840	4,33
Mangia et al. (2016)	Cami	0,03	0,06	-	1.500	3,00
	Yapı_1	0,05	0,20	0,44	10.280	20,55
Mariano et al. (2016)	Yapı_2	0,04	0,20	0,66	2.010	6,68
Panto et al. (2016)	Kemer	0,05	0,06	0,08	1.650	3,30
	Duvar	0,03	0,06	-	5.000	4,00
Endo et al. (2017)	Kemer-Kubbe	0,06	0,15	-	2.000	4,00
Aşıkoğlu et al. (2019)	Cami	0,03	0,11	0,18	1.500	2,60
	Cami_1	0,05	0,13	0,18	785	3,92
Kocaman et al. (2020)	Cami_2	0,09	0,15	0,34	785	3,92
	Cami_1	-	0,10	-	1.500	1,80
Altunişik et al. (2021)	Cami_2	-	0,07	-	1.500	1,80
Çakır (2021)	Cami	-	0,13	-	8.500	-
Dinani et al. (2021)	Cami	0,04	0,07	0,35	1.050	2,10

3. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN DOĞRULANMASI

Bu çalışmada yığma duvarların ve tarihi camilerin statik ve dinamik yükler altında davranışlarının belirlenmesi için ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Sonlu eleman modelleri herhangi bir yazılım kullanılarak yapılabilir. Ancak her yazılımın ayrı eleman türleri ve malzeme modelleri mevcuttur ve bunları doğru bir şekilde kullanmak gerekmektedir. Bu yazılımlar kullanılırken ele alınan yapının özellikleri ışığında kullanılacak sonlu eleman teorisine ve malzeme yasalarına aşina olunmalıdır. Bu bölümün amacı, bilinen elastik ve plastik malzeme modellerinin, yığma duvarlarda kuvvet-yer değiştirme tepkisini ANSYS yazılımıyla tespit etmek ve deneysel sonuçlarla karşılaştırarak kullanılabilirliğini göstermektir.

Bu bölüm ANSYS yazılımında yığma duvarların güvenilir sonlu eleman modellerini oluşturmak için kapsamlı analiz çalışmalarına ayrılmıştır. Birkaç farklı tipolojide yığma duvar deneylerinin ölçülen ve hesaplanan sonuçları karşılaştırılacaktır. ANSYS yazılımı içinde kullanılan malzeme modellerinin ve elemanların yığma duvarlara uygunluğu araştırılacaktır. Çalışmada daha önce farklı araştırmacılar tarafından yapılan deney sonuçları kullanılmıştır. Bu deneylerdeki numuneler tek cidarlı düzgün kesme taşlı harçsız, iki cidarlı moloz ve üç cidarlı duvar tipolojilerini içermektedir. Deneylerde duvarlar düzlem içi ve düzlem dışı yüklemelere maruz kalmıştır. Analizler sonucunda elde edilecek güvenilir ve anlamlı sonuçlar çalışmanın sonraki kısmında yapılacak olan cami analizleri için kılavuz olacaktır.

3.1. Analizlerde Kullanılan Sonlu Eleman ve Malzeme Modelleri

ANSYS eleman kütüphanesinde, yapıların analitik olarak oluşturulması için katı, çubuk ve kiriş elemanlar önerilmektedir. Bu bölümde kullanılan sonlu eleman ve malzeme modellerinin detaylı açıklamaları sunulmaktadır. Kullanılan eleman ve malzeme modelleri ışığında ele alınan farklı tipolojide yığma duvarların analizleri gerçekleştirilecektir.

Beton/taş malzemenin yükleme altındaki (bir eksenli, iki eksenli ve üç eksenli) davranışı oldukça karmaşıktır. Beton için önerilen malzeme modelleri taş elemanlarda da

kullanılmaktadır. ANSYS beton/taş elemanların modellenmesinde kullanılmak üzere farklı malzeme özellikleri sunar. Programda Willam-Warnke (1975) ölçütü beş parametre SOLID65 elemanı ile kullanılmak üzere verilmektedir. Modelde, betonda/taşa ezilme oluşana kadar gerilme-şekil değiştirme arasında, doğrusal elastik bir ilişki olduğu kabul edilir. Plastisite yasası kullanılmaz ise, betonun/taşın şekil değiştirme kapasitesi düşük çıkmaktadır. Çünkü kırılma-ezilme yükü aşılana eleman, doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. ANSYS yazılımı, basınç altındaki beton/taş elemanların böyle doğrusal olmayan davranışını yansıtabilecek birçok özelliği (kinematik ve izotropik plastiklik) dikkate almaktadır. Drucker-Prager plastisite modeli (DP), Von-Mises tek eksenli (BISO) ve çok doğrulu izotropik gerilme plastisitesinin (MISO) Willam-Warnke malzeme modelinin (CONC) gerilme göçme kriteri ile birleştirilmiş halidir. Parantez içinde verilen notasyon ANSYS’de kullanılan plastisite modellerini ifade etmek için kullanılır.

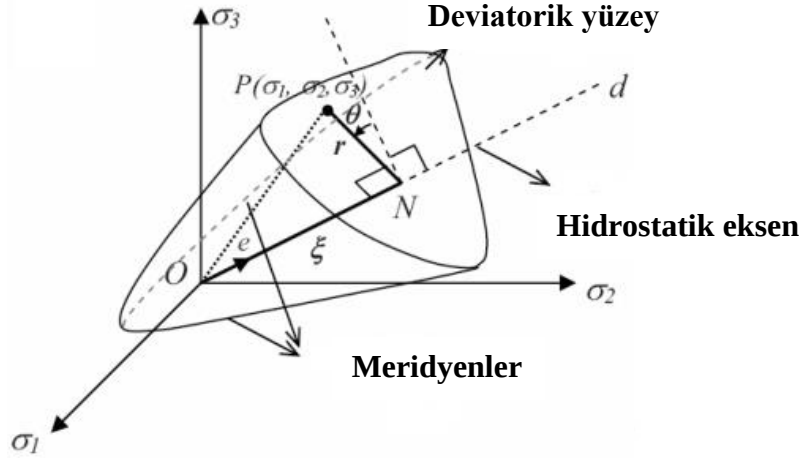
3.1.1. Willam-Warnke göçme kriteri

Betonun göçme yüzeyinin genel özellikleri deneylerle tespit edilebilir. Deney sonuçları sapma yüzeyindeki göçme eğrisinin sahip olduğu genel özellikleri göstermektedir. Göçme eğrisinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Göçme eğrisi düzgündür.
- Basınç gerilmelerinde göçme eğrisi dış bükeydir.
- Göçme eğrisinin enine kesiti üç eksenle simetriktir.
- Göçme eğrisi çekme ve küçük basınç gerilmeleri için yaklaşık üçgendir (Π yüzeyine yakın küçük ξ değerlerine karşılık gelen) ve yüksek basınç değerleri (ξ nin artmasına veya yüksek hidrostatik basınca karşılık gelen) için giderek genişler.

Bu durumdan sonra üç boyutlu gerilme yüzeyinde göçme yüzeyinin şekli deviatorik düzleminde kesit şekli ile boylam düzleminde (θ =sabit ile hidrostatik eksen

içeren alan) meridyenlerle tanımlanabilir. Şekil 3.1’de yukarıda verilen özelliklere göre göçme yüzeyinin genel geometrik şekli verilmiştir.



Şekil 3.1. Üç boyutlu gerilme yüzeyinde göçme eğrisi (Kazaz 2010)

Beton malzeme modeli gevrek malzemenin göçmesini öngörür. Hem çatlama hem de kırılma göçme modları verilmektedir. Çok eksenli gerilme durumunda betonun göçme kriteri formu aşağıdaki gibi verilebilir (Willam-Warnke 1975):

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (3.1)$$

Burada F asal gerilme durumunun bir fonksiyonu (σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp}), S Beton malzeme çizelgesinde beş parametre (f_t , f_c , f_{cb} , f_1 , f_2) ve asal gerilme terimleriyle ifade edilen kırılma yüzeyi, f_c tek eksenli basınç dayanımı, σ_{xp} , σ_{yp} , σ_{zp} asal gerilmeleri temsil etmektedir.

Eğer Denklem 3.1 sağlanmazsa, ezilme ve çatlama meydana gelmeyecektir. Aksi takdirde malzeme ya ezilir ya da çatlar. Eğer bütün gerilmeler basınç ise ezilme meydana gelir, ancak; asal gerilmelerden herhangi biri çekme ise malzeme çatlayacaktır.

Hem kırılma yüzeyini hem de ortamdaki hidrostatik gerilme durumunu tanımlamak için toplam beş dayanım parametresine (her biri sıcaklığa bağlı olarak tanımlanabilir) ihtiyaç duyulur. Bu parametreler malzeme çizelgesinde verilmektedir

(Çizelge 3.1). Bu çizelge ANSYS’de concrete menüsü veya TB, CONCR komutu yardımıyla tanımlanabilir.

Çizelge 3.1. Beton malzeme tanım çizelgesi

Sembol	Açıklama
f_t	Tek eksenli çekme dayanımı
f_c	Tek eksenli basınç dayanımı
f_{cb}	İki eksenli basınç dayanımı
σ_h^a	Ortamdaki hidrostatik gerilme durumu
f_1	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan iki eksenli basınç durumu için basınç dayanımı
f_2	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan tek eksenli basınç durumu için basınç dayanımı

Kırılma yüzeyinin en az iki sabit (f_t, f_c) ile de tanımlanması mümkündür. Diğer üç sabit için ANSYS şu değerleri varsayar:

$$f_{cb} = 1,2 f_c \quad (3.2)$$

$$f_1 = 1,45 f_c \quad (3.3)$$

$$f_2 = 1,725 f_c \quad (3.4)$$

Bu varsayılan değerler, sadece Denklem 3.5 şartının sağlandığı gerilme durumları için geçerlidir. Eğer hidrostatik gerilme durumu bu şartı sağlamazsa, kullanıcının bu parametreleri kendisinin tanımlaması gereklidir.

$$\sigma_h \leq \sqrt{3} f_c \quad (3.5)$$

Hem F fonksiyonu hem de S kırılma yüzeyi $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ifadeleriyle gösterilen asal gerilme terimleri cinsinden ifade edilir. Bu asal gerilmeler:

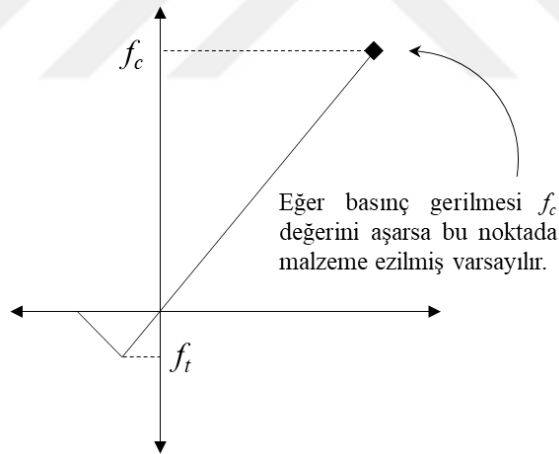
$$\sigma_1 : \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (3.6)$$

$$\sigma_3 : \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (3.7)$$

ve $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ tür. Betonun kırılma hali 4 grupta toplanabilir:

1. $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Basınç-Basınç-Basınç)
2. $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Çekme-Basınç-Basınç)
3. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (Çekme-Çekme-Basınç)
4. $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (Çekme-Çekme-Çekme)

Eğer Willam-Warnke'nin göçme kriteri plastisite ilkesiyle birleştirilmemişse, betonun davranışı kırılma durumunda doğrusaldır ve kırılma gerilmesi güç kaybından dolayı ilk göçme yüzeyinde sonuçların sıfır olması ile rijitliğin azalmasına katkıda bulunarak eleman rijitliğini azaltır. Bir eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. ANSYS'de Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu

3.1.2. Von-Mises akma kriteri

Betonun basınç altındaki davranışını temsil etmede, izotropik zorlanmayla Von-Mises plastisite modeli (BISO), kinematik zorlanma veya bileşik zorlanma yaygın olarak kullanılır. İzotropik zorlanmayla Von-Mises akma kriteri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F = \sqrt{J_2} - \sigma(\varepsilon_p) = 0 \quad (3.8)$$

Burada J_2 , esas gerilme alanında tanımlanabilen ikinci gerilme sabiti:

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right] \quad (3.9)$$

Denklem 3.8'deki $\sigma(\varepsilon_p)$ plastik uzamaya karşılık gelen zorlanma gerilmesi olarak tanımlanır. ε_p aşağıdaki denklemdeki gibidir:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} \quad (3.10)$$

Burada ε_{ij}^p birim uzama bileşenine karşılık gelen plastik kısımdır. Bu modelde hidrostatik gerilmenin büyüklüğünün bağımsız olması, büyük basınç gerilmelerinde beton için uygun plastisite modelinin oluşturulamamasına neden olmaktadır. Basınç durumunda, beton dayanımıyla uyumlu şekil değiştirmelerin birlikte verildiği BISO malzeme modelini ANSYS programında kullanmak oldukça uygun olmaktadır. Bu modelin çelik donatının modellenmesinde kullanılması daha uygun olmaktadır.

3.1.3. Drucker-Prager plastisite modeli

Granüler malzemenin basınç davranışının modellenmesi için ANSYS'de kullanılan ikinci bir malzeme modeli de Drucker-Prager akma kriteridir. Drucker-Prager tarafından önerilen Mohr-Coulomb yüzeyine düzgün bir yaklaşım Von-Mises akma kriterinin değiştirilmiş halidir.

$$f(I_1, I_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \tau_0 \quad (3.11)$$

Burada α ve τ_0 pozitif malzeme parametreleridir. $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ gerilme tensörünün birinci sabiti olup, J_2 ise Denklem 3.9'da verilmiştir. Aynı şekilde, $\xi = I_1 / \sqrt{3}$ ve $r = \sqrt{2J_2}$ kullanılmasıyla gerilme durumunun geometrik yorumu ve akma yüzeyi belirlenebilir:

$$f(\xi, r) = \sqrt{6}\alpha\xi + r - \sqrt{2}\tau_0 = 0 \quad (3.12)$$

Gerilme tensörünün deviatorik bileşeni r ve hidrostatik bileşeni ξ 'dir. Drucker-Prager modeli çok eksenli basınç gerilmesi etkisindeki beton yüzeyinde iyi sonuçlar verir ve akma yüzeyi düzdür. Deneysel verilerle Drucker-Prager modeli karşılaştırıldığında çok eksenli basınç gerilmesi etkisindeki betonun davranışını modellemede kullanılmasının uygun olduğunu, basınç-çekme veya çekme-çekme yüklemesi yapılan betonun kapasitesini daha yüksek hesaplamaktadır.

ANSYS programında kullanılan Drucker-Prager parametreleri (α ve τ_0) Mohr-Coulomb modelinde tanımlanan c ve ϕ terimleriyle yorumlanmaktadır. c parametresi kohezyon ve ϕ içsel sürtünme açısı olarak tanımlanır. Mohr-Coulomb kriteri için genel tanım aşağıdaki gibi verilebilir:

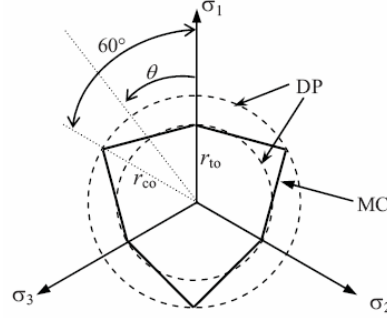
$$(1 + \sin \phi)\sigma_1 - (1 - \sin \phi)\sigma_3 = 2c \cdot \cos \phi \quad (3.13)$$

Betonun bir eksenli çekme ve basınç göçme durumu için karakteristik dayanma değeri Mohr-Coulomb gerilme ilişkisiyle aşağıdaki gibi tanımlanır:

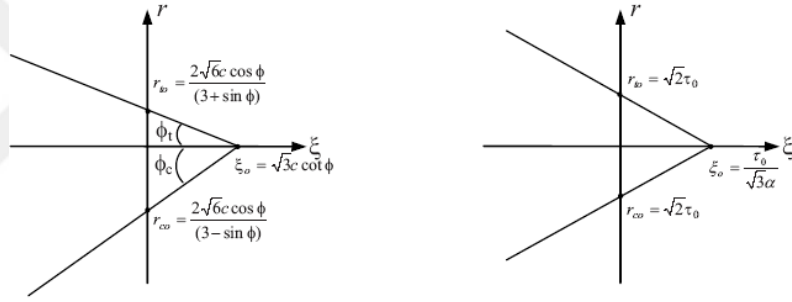
$$f_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (3.14)$$

$$f_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.15)$$

Drucker-Prager sabitleri, Mohr-Coulomb sabitleri c ve ϕ ile ilişkilendirilebilir. Drucker-Prager kriterinin konisinin büyüklüğü, basınç meridyenlerine karşılık gelen köşelerin birleştirilmesiyle oluşan Mohr-Coulomb altıgeni ile veya Şekil 3.3’de verilen çekme meridyenleriyle ayarlanabilir.



Şekil 3.3. Drucker-Prager kriterinin göçme yüzeyine eşlenmesi



Şekil 3.4. Deviatorik Gerilme vb. durumunda meridyenlerin gösterimi

Üç boyutlu eşleşen durumda, eğer iki göçme yüzeyi basınç meridyenlerinde karşılaşırsa malzeme sabitlerinden iki tanesi aşağıdaki gibi ilişkilendirilir:

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad \tau_0 = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (3.16)$$

Eğer çekme meridyenleri kullanılırsa:

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad \tau_0 = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3.17)$$

Çeşitli yükleme durumlarında betonun davranışındaki değişiklikten dolayı malzeme sabitlerinin de farklı tanımlanması gerekir. Drucker-Prager sabitleri α ile τ_0 , iki eksenli gerilme durumunda Mohr-Coulomb sabitleri c ile ϕ , malzeme testlerinden elde edilen iki nokta ile bulunur.

Düzlem gerilme altında ($\sigma_2 = 0$), gerilme tensörünün sabiti, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_3$ ve $J_2 = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3)/3$ olarak verilebilir. Bir eksenli basınç ve çekme testleri ile iki eksenli basınç deneyleri dikkate alınarak, gerilmenin temel değerleri, I_1 ve J_2 sabitleri ve Haigh-Westergaard koordinatları, ξ , r ve θ Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Drucker-Prager kriteri durumu için, bir eksenli basınç (f_c) ve çekme (f_t) altında pik gerilmelerin değerleri yerine konur ve model parametreleri Denklem 3.14 ve 3.15 için çözümlerse aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\alpha = \frac{f_c - f_t}{\sqrt{3}(f_c + f_t)} \quad (3.18)$$

$$\tau_0 = \frac{2f_c f_t}{\sqrt{(f_c + f_t)}} \quad (3.19)$$

Düzlem gerilme durumu altında, Denklem 3.11’deki kriter aşağıdaki formda verilebilir.

$$4(\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + \left(2 - 3\frac{f_c^2 + f_t^2}{f_c + f_t}\right)\sigma_1\sigma_3 + 4(f_c + f_t)(\sigma_1 + \sigma_3) - 4f_c f_t = 0 \quad (3.20)$$

Çizelge 3.2. Drucker-Prager modeli parametrelerinin hesaplanması

Gerilme Durumu	σ_1	σ_3	I_1	J_2	ξ	r	θ , derece
Bir Eksenli Çekme	f_t	0	f_t	$f_t^2/3$	$f_t/\sqrt{3}$	$f_t\sqrt{2/3}$	0
Bir Eksenli Basınç	0	$-f_c$	$-f_c$	$f_c^2/3$	$f_c/\sqrt{3}$	$f_c\sqrt{2/3}$	60
Eş İki Eksenli Basınç	$-f_{bc}$	$-f_{bc}$	$-2f_{bc}$	$f_{bc}^2/3$	$-2f_{bc}/\sqrt{3}$	$f_{bc}\sqrt{2/3}$	0

f_t / f_c oranına bağlı olarak Denklem 3.21 elips, parabol veya hiperbol olabilir. Çekme ve basınç altındaki bir eksenli dayanımların birbirine uyumuyla, gerçek göçme zarfında tek eksenli çekme ve çekme-basınca karşılık gelen uygun bir değer kullanmak gerekir. Ancak, basınç-basınç altında eş iki eksenli dayanım noktası sonsuz olur, çünkü f_t / f_c oranı azalır. Diğer yandan, bir eksenli basınç durumunda iyi bir yaklaşım elde etmek için tek eksenli ve eş iki eksenli basınç (f_{bc}) dayanımı birleştirilmesiyle elde edilebilir. Bu sonuçla;

$$\alpha = \frac{f_{bc} - f_c}{\sqrt{3}(2f_{bc} - f_c)} \quad (3.21)$$

$$\tau_0 = \frac{f_{bc} f_c}{\sqrt{3}\sqrt{2(f_{bc} - f_c)}} \quad (3.22)$$

Denklem 3.21'e benzer olarak, düzlem gerilme altında, basınç bölgesinde daha iyi bir yaklaşım elde edebilmek için aşağıda verilen form da yazılabilir.

$$\left(2 - 3\frac{f_{bc}}{f_c}\right)(\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + \left(3\frac{2f_{bc}^2 + f_c^2}{f_c f_{bc}} - 8\right)\sigma_1\sigma_3 - 2(f_{bc} - f_c)(\sigma_1 + \sigma_3) + f_c f_{bc} = 0 \quad (3.23)$$

3.1.4. Çok doğrulu pekleşmeli plastisite modeli (MISO, MKIN ve KINH)

Basınç etkisindeki betonun modellenmesinde kullanılan BISO ve DP modellerinin en büyük eksikliği hem betondaki yumuşamanın modellenememesi hem de maksimum kuvvet ve sonraki davranışın modellenememesinden kaynaklanmaktadır.

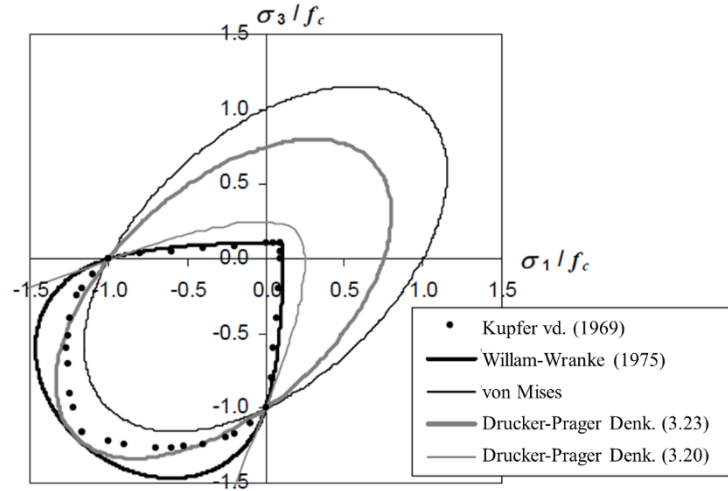
Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan eğri kısmı için ANSYS malzeme modelleri kütüphanesindeki çok doğrulu plastisite modeli kullanılır. Çok doğrulu izotropik pekleşme (Multilinear Isotropic Hardening, MISO) özellikleri iki doğrulu eğri yerine çok doğru kullanılması dışında iki doğrulu izotropik sertleşme özelliklerine benzer.

Tepe noktalarıyla tanımlanan ve pekleşme özelliklerinin tanımlandığı malzeme modelleri kullanıldığı zaman, sonlu eleman çözümlerinin sonlu eleman boyutunda bir duyarlılığa sahip olduğu ve burada elemanların yakınsamasında zorluklarla karşılaşılacağı bilinmektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan sonlu eleman analizi kuvvet tipi yüklemde, modelin ulaştığı nihai kuvvetten sonra gerilme-şekil değiştirme eğrisinin düşmeye başladığı yumuşama kısmını verememektedir. Betonarme elemanın, yer değiştirme kontrollü yüklenmesi dayanımının aşılmasından sonra yakınsama sağlanması amacıyla verilir.

3.1.5. Birleştirilmiş malzeme modeli

Beton davranışı modellenirken basınç yüklemesi için yukarıda bahsedilen modeller, çekme yüklemesi için Willam-Warnke modeli ile birlikte kullanılarak kırılma yüzeylerinin plastik davranışı verilmektedir.

ANSYS’de plastisite tabanlı modeller Willam-Warnke beton malzeme modeliyle birlikte tanımlandığında plastisite kontrolü çatlama ve ezilme kontrolünden önce yapılır. Malzeme modelinin herhangi bir noktasının akması veya çatlaması ana gerilmeler üzerinde değerlendirilir. Bu yaklaşım problemi yaklaşık düzlem gerilme durumuna indirgemenin bir yoludur. Şekil 3.5’de verilen grafikte 2B akma yüzeylerinin göz önüne getirilmesi için birleştirilmiş malzeme modelleri aynı grafikte verilmiştir.



Şekil 3.5. Willam-Warnke, Drucker-Prager ve Von-Mises göçme-akma yüzeyleri

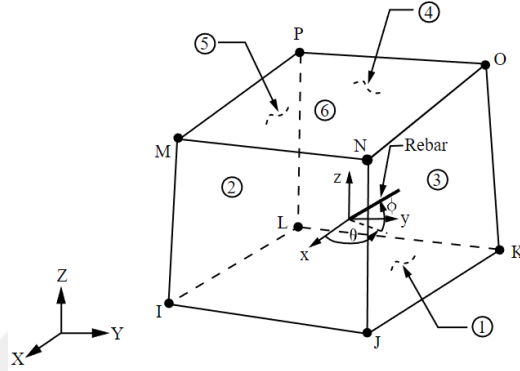
Bu görünümde ve düzlem gerilme probleminin basitleştirilmesinde, Şekil 3.5’de görüleceği gibi, çekme-çekme ve çekme-basınç eğrileri için beton çatladıktan sonra Willam-Warnke modelinin geçerli olacağı açıktır. Çatlak düzlemi üzerindeki gerilmeye azalma, çatlak doğrultusuna dik durumdaki gerilmeyi azaltır. Çatlak üzerindeki gerilmenin azalmasına takiben her iki modelde çekme-basınç eğrileri birbirilerini etkileyecektir. Basınç-basınç eğrilerinde tam olarak plastik davranış geçerli olacaktır. Bu açıklama şu sonuca yol açar. Çatlak yüzeyine dik doğrultuda sıfır çekme gerilmesiyle çatlamış beton dikkate alındığında, eşdeğer gerilme hesaplaması $\sigma_2 = 0$ için beton basınç dayanımına tamamen bağlıdır.

İki eksenli gerilme durumunda ANSYS’de Willam-Warnke beton modeli ile Drucker-Prager malzeme modeli parametrelerinin birlikte verilmesi durumunda, bu parametrelerin betonun gerçek basınç dayanımına (f_c) yakın belirlenmesi gerektiğini belirtmek gerekir.

3.1.6. SOLID65 elemanı

SOLID65, her düğüm noktasında üç ötelenme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşan bir elemandır. Bu 3D blok eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, basınç gerilmelerinde ezilme (plastik şekil değiştirme) özelliklerine de sahiptir. Çatlak oluşumu, etkili ayırık çatlak veya yayılı bant çatlakları olarak, iki farklı şekilde

verilmektedir. Yayıllı bant çatlakları, malzeme özelliklerinde bir ayarlama ile elde edilmektedir. Beton malzemesi başlangıçta izotropik olarak tanımlanır. Farklı üç yönde donatı tanımlanabilir. Bağlar ve etriyeler bu özellik kullanılarak modellenenebilir. Tanımlanan donatılar çekme ve basınç kuvvetlerini taşır, kesme kuvvetlerini taşımaz. SOLID65, plastik şekil değiştirme yeteneğine de sahiptir. Geometri, düğüm yerleri ve koordinat sistemi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. SOLID65 elemanı geometrisi (ANSYS kullanım kılavuzu)

Sekiz düğüm noktalı izoparametrik SOLID65 elemanı, sekiz birleşim (düğüm) noktası ile, (2x2x2) geometri ve yer değiştirme için sekiz enterpolasyon fonksiyonu verilmektedir. Bu eleman için enterpolasyon şekil fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 \pm \xi)(1 \pm \eta)(1 \pm \zeta) \quad i=1, \dots, 8 \quad (3.24)$$

Bu N_i şekil fonksiyonuna bağlı olarak, noktasal yer değiştirme (u_i, v_i, w_i) eleman üzerindeki bir noktanın (ξ, η, ζ) koordinatlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} u &= u_1 N_1 + u_2 N_2 + \dots + u_8 N_8 \\ v &= v_1 N_1 + v_2 N_2 + \dots + v_8 N_8 \\ w &= w_1 N_1 + w_2 N_2 + \dots + w_8 N_8 \end{aligned} \quad (3.25)$$

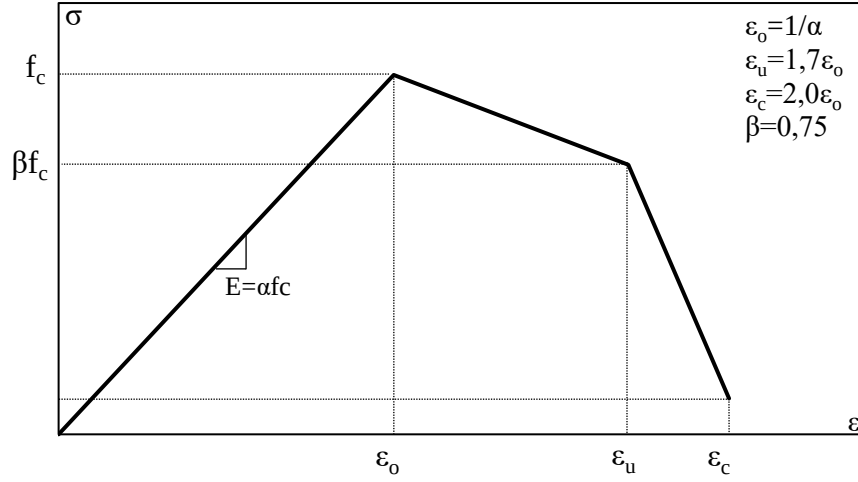
3.1.7. İdealize plastisite eğrisi önerisi

Çalışmada analizler hem WW modeliyle hem de plastisite modeli tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Ele alınan deney düzeneklerinde numunelerin gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) eğrileri varsa bu eğriler kullanılmıştır. Bu kısımda herhangi bir σ - ϵ eğrisi olmayan deney düzeneklerinde kullanılabilecek eğri belirlenmiştir.

Birçok çalışmada yığma duvarların basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak kullanılan taş malzeme, ya da duvarın yapım tekniği sebebiyle elde edilen eğriler geniş bir aralıkta değişiklik göstermektedir. Çizelge 3.3'te farklı araştırmacıların gerçekleştirmiş oldukları basınç testlerinin sonuçlarından derlenen değerler verilmektedir. Çizelgede verilen değerler Şekil 3.7'de verilen idealize edilmiş σ - ϵ eğrisine uygun olarak sunulmaktadır.

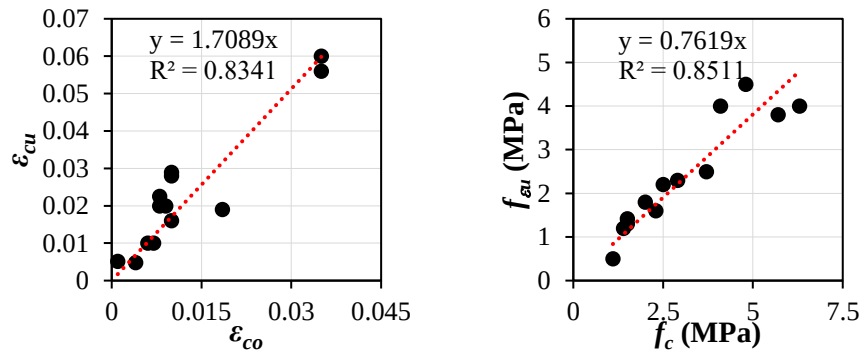
Çizelge 3.3. Literatürde bulunan üç cidarlı duvarların basınç testi sonuçları

	Duvar Tipi	ϵ_{co}	ϵ_{cu}	f_c (MPa)	βf_c	β	E (MPa)
Demir 2012	Üç Cidarlı	0,0080	0,0200	3,7	2,50	0,68	463
Binda et al. 2006	Üç Cidarlı	0,0350	0,0560	5,7	3,80	0,67	163
	Üç Cidarlı	0,0350	0,0600	6,3	4,00	0,63	180
Silva et al. 2012	Üç Cidarlı	0,0080	0,0225	1,5	1,42	0,95	188
Valluzzi et al. 2004	Üç Cidarlı	0,0185	0,0190	1,1	0,50	0,45	59
Oliveira et al. 2012	Üç Cidarlı	0,0010	0,0052	1,5	1,30	0,87	1.500
	Üç Cidarlı	0,0040	0,0048	2,5	2,20	0,88	625
	Üç Cidarlı	0,0070	0,0100	2,3	1,60	0,70	329
	Üç Cidarlı	0,0060	0,0100	1,4	1,20	0,86	233
Silva et al. 2013	Üç Cidarlı	0,0090	0,0200	2,0	1,80	0,90	222
	Üç Cidarlı	0,0100	0,0290	4,1	4,00	0,98	410
	Üç Cidarlı	0,0100	0,0280	2,9	2,30	0,79	290
	Üç Cidarlı	0,0100	0,0160	4,8	4,50	0,94	480



Şekil 3.7. Yığma duvarlar için idealize edilmiş σ - ϵ eğrisi

Çizelgede verilen her bir parametrenin oldukça geniş bir değer aralığında olduğu görülmektedir. Ancak Şekil 3.8’de ϵ_{co} - ϵ_{cu} ve f_c - f_{su} arasındaki ilişkiler verilmektedir. Ele alınan kümede bu iki ilişki arasında sırasıyla $R^2=0,84$ ve $0,85$ değerleriyle temsil edilen güçlü korelasyonlar görülmektedir. Bu iki ilişkiden elde edilen değerler ile Şekil 3.7’de verilen idealize σ - ϵ eğrisi oluşturulabilir. Eğrinin lineer kısmı ise araştırmacının kabul edeceği $E=\alpha f_c$ ilişkisine göre değişmektedir. Deneysel olarak belirlenen E ve f_c değeri ışığında σ - ϵ eğrisi oluşturularak WW modeliyle yapılan analizlere ek olarak maksimum gerilme sonrası yumuşamayı dikkate alan WW + Plastisite modeliyle de analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Deneysel çalışmalarla elde edilen ϵ_{co} - ϵ_{cu} ve f_c - f_{su} arasındaki ilişkiler

3.2. Ele Alınan DeneySEL Çalışmalar ve Sonlu Eleman Modelleri

Yığma duvarlarda yukarıda belirtilen malzeme ve eleman modellerini yeterliliği için bir dizi analizler gerçekleştirilmiştir. Ele alınan duvar deneyleri farklı tipolojide farklı eksenel yüklere maruz ve farklı yükleme protokollerine sahiptirler. Sonlu elemanlarda yükleme protokolünün kuvvet-yer değiştirme ve davranışa etkisi bazı deneylerde irdelenmiştir. Her duvar deneyinin analizleri sonucunda malzeme özellikleri, eksenel yük değerleri ve analiz farklılıkları tartışılmaktadır. Deney ve analizi birleştiren bu kapsamlı incelemesonraki bölümlerde yapılacak olan cami analizlerinin temelini oluşturacaktır. Bu çalışma kapsamında ele alınan deneyler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- Oliveira (2003): Düzgün kesme taşlı harçsız tipolojiye sahip duvarların düzlem içi davranışı 4 farklı eksenel yük seviyesi altında monotonik yükleme ile belirlenmiştir.
- Vasconcelos (2005): Düzgün kesme taşlı harçsız, düzgün kesilmiş taş ve moloz taştan yapılan toplam 3 tip duvar incelenmiştir. Her bir duvar tipolojisi 3 farklı eksenel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Duvarlar aynı zamanda basınç testine tabi tutularak $\sigma-\varepsilon$ eğrileri elde edilmiştir. Her bir duvarın çevrimsel yüklemeye düzlem içi davranışları belirlenmiştir.
- Demir (2012): Tarihi camileri temsil edecek şekilde üç cidarlı duvar modelleri 4 farklı eksenel yükleme altında test edilmiştir. Duvarlar aynı zamanda basınç testine tabi tutularak $\sigma-\varepsilon$ eğrileri elde edilmiştir. Çevrimsel yüklemeye düzlem içi davranışlar elde edilmiştir.
- Silva (2012): İki farklı ölçekte üç cidarlı duvar olarak tanımlanan moloz duvar modelleri farklı eksenel yükleme altında düzlem içi kuvvetlere maruz bırakılmıştır. Bir bütün olarak inşa edilen duvar elemanı belirtilen boyutlarda kesilerek rastgele taş ve harç seçimi yapılmıştır. Araştırmacı duvarları basınç testine tabi tutularak $\sigma-\varepsilon$ eğrileri elde edilmiştir. Çevrimsel yüklemeye düzlem içi davranışlar elde edilmiştir.

- Maccarini et al. (2018): İki çeşit moloz taş duvarın düzlem dışı davranışı belirlenmiştir. U şeklinde yapılan duvar modelleri sabit eksenel yüke maruz kalacak şekilde konumlandırılarak davranışı belirlenmiştir.

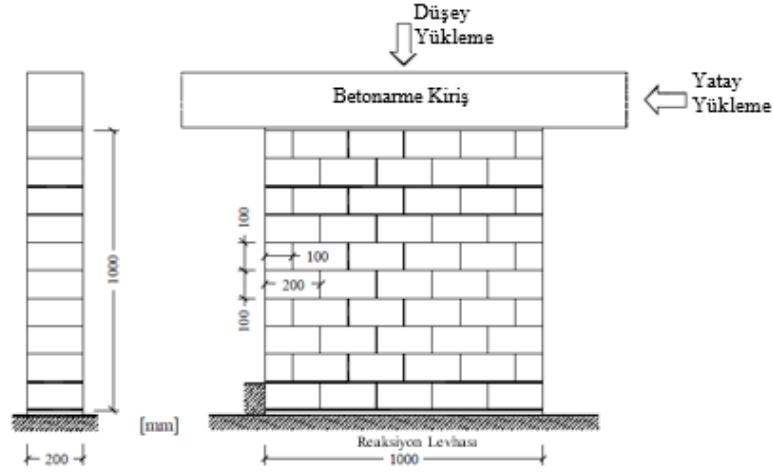
3.2.1. Oliveira (2003) deneysel çalışması

Bu bölümde düzgün kesme taşlı harçsız yığma duvarların yapısal davranışına ilişkin Oliveira (2003)'nın yapmış olduğu deneysel çalışma sonuçları ve bu deneysel çalışmanın sonlu eleman modeli sunulmaktadır. Herhangi bir birleştirme malzemesi olmadan kum taşı ile inşa edilmiş yedi duvar, kombine basınç ve kesme yükleri altında test edilmiştir. Bu testler iki ana hedefe cevap vermektedir;

- ✓ Basınç ve kesme yüküne eş zamanlı maruz kalan bir düzgün kesme taşlı harçsız duvar elemanın yapısal davranışının aydınlatılmasıdır. Bu bilgi, harcın zamanla kaybolması, duvarın yıpranması, zayıf dayanımlı malzeme kullanılması sonucu veya orijinal olarak taş birimler arasında herhangi bir bağlayıcı bulunmayan tarihi duvarların davranışına ışık tutacaktır. Bu tür yapılar ülkemizde oldukça yaygın şekilde görülmektedir.
- ✓ Sayısal model oluşturarak, bu duvar tipolojisini kalibre etmektir. Sunulan duvarların sayısal modellerin doğrulaması doğrudan deneysel sonuçlardan elde edilen verilerle gerçekleştirilmiştir.

- ***Geometrik Özellikler***

Test edilen 7 duvar Şekil 3.9'da verilen geometrik koşullara sahiptir. Deneyde monotonik yükleme uygulanmıştır. Kullanılan bütün taşlar güzelce kesilmiş oldukça pürüzsüz bir yüzeye sahiptirler.



Şekil 3.9. Düzgün kesme taşlı harçsız duvar deneyleri için uygulanan geometri ve yükleme şeması.

Duvar terminolojisi ve her bir duvar için uygulanan eksenel kuvvet Çizelge 3.4’te verilmektedir.

Çizelge 3.4. Duvar notasyonu ve uygulanan eksenel yükler

Duvar	Eksenel Yük (kN)	Eksenel Gerilme (MPa)
SW.30.1	30	0,15
SW.30.2	30	0,15
SW.100.1	100	0,50
SW.100.2	100	0,50
SW.200.1	200	1,00
SW.200.2	200	1,00
SW.250.1	250	1,25

Tarihi yapılarda duvarlara etkiyen basınç genellikle düşüktür. Bu duruma laboratuvar imkanları da eklenince araştırmacılar eksenel yükleri 30, 100, 200 ve 250 kN olarak belirlemişlerdir. Bu yüklemeler duvar numunelerinde sırasıyla 0,15, 0,50, 1,00 ve 1,25 MPa değerlerinde eksenel basınç gerilmesi oluşturmaktadır. Duvar numunelerinde yer değiştirmeleri takip etmek amacıyla LVDT’ler yerleştirilmiştir.

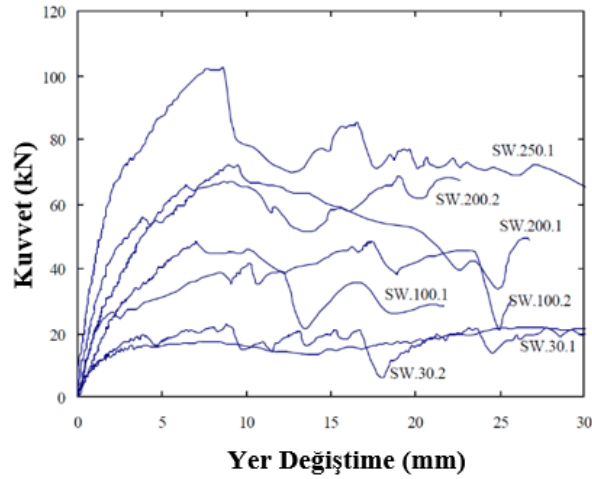
- **Test Prosedürü**

Duvar numuneleri inşa edildikten bir gün sonra teste tabi tutulmuştur. Numunelerin mesnedinde hızlı dayanım alan harç kullanılmıştır. Eksenel yükün uygulanmasında 1.000 kN kapasiteli ve 1 kN/s hassasiyetinde yük uygulayabilen hidrolik

aktüatör kullanılmıştır. Eksenel yük uygulandıktan sonra duvar numunesinin üst kısmında bulunan betonarme kirişe yatay yer değiştirme uygulanmıştır. Kırılmanın meydana geldiği duvar numunelerinde ise, mekanizma oluşuktan sonra ani bir göçme meydana gelmiştir.

- ***Kuvvet-Yer Değiştirme Eğrileri***

Deney prosedürüne sadık kalınarak yapılan testlerde araştırmacılar oldukça fazla veri elde etmişlerdir. Şekil 3.10'da verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, araştırmacılar tarafından kabul edilen en makul ve kabul edilebilir eğrilerdir. Yatay yük, aktüatör ile betonarme kiriş arasına konulan yük hücresi ile ölçülmüştür. Yer değiştirmeler ise kiriş ile mesnet arasındaki yer değiştirme farkıdır. Şunu belirtmekte fayda vardır ki, duvarın mesnetindeki taşlarda herhangi bir yer değiştirme görülmemiştir.

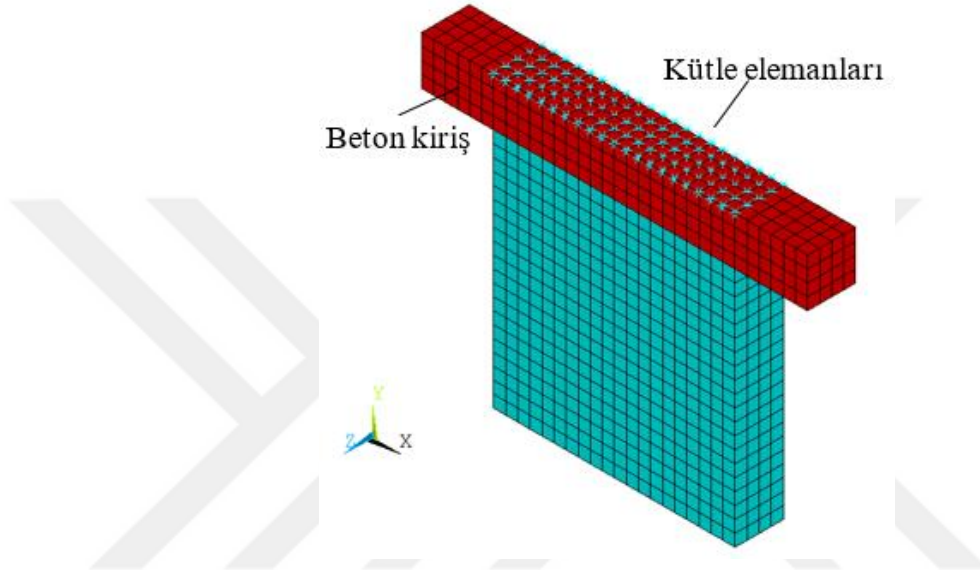


Şekil 3.10. Deneyel kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 3.10'da kuvvet-yer değiştirme eğrileri iki farklı ana davranış göstermektedir. Başlangıçta eğriler oldukça rijit davranış sergilemiştir. Elastik davranış, ilgili maksimum yükün neredeyse %30'larına kadar gözlemlenmiştir. Sonrasında artan yatay yer değiştirmeler neticesinde rijitlik bozulmaları meydana gelmiştir. Diyagramların ikinci kısımları yatay yükün uygulanması ile karakterize edilir. Grafikteki salınımlar ani bağlı taş hareketleri, taşlar arasında harç olmaması gibi sebeplerden kaynaklanmıştır.

- ***Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması ve Doğrulaması***

Duvar elemanlarının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımında oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinde SOLID65 elemanı kullanılmıştır. Malzeme modeli olarak beş parametrelili Willam-Warnke (1975) modeli (CONC) kullanılmıştır. Ele alınan duvar Şekil 3.11’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.11. Oliveira (2003) tarafından test edilen duvar numunelerinin sonlu eleman modeli.

Willam-Warnke malzeme modeli kullanılan elemanların doğrusal olmayan analizlerinde kesme kuvveti aktarım katsayısı mutlaka dikkate alınmalıdır. Kapalı çatlaklar (β_c) için bu katsayı 0,8, açık çatlaklar (β_t) için kesme kuvveti aktarım katsayısı 0,05 olarak kabul edilmiştir (Kazaz et al. 2006).

Öte yandan sonlu eleman modellerine tanımlanması gereken diğer önemli parametreler ise Elastisite modülü (E), duvar basınç dayanımı (f_c) ve duvar çekme dayanımı (f_t)’dir. Elastisite modülü değerleri araştırmacının deneysel olarak belirlediği değerler kullanılmıştır. Çekme dayanımı değerleri ile duvar modeline etki eden eksenel basınç değerleri (σ) ile;

$$f_t = 0.0613\sigma + 0.0418 \quad R^2=0,99 \quad (3.26)$$

Şeklinde bir doğrusal ilişki belirlenmiştir. Taş birimler arasında harç gibi bir bağlayıcının olmaması duvar elemanın da çekme dayanımının olmaması anlamına gelmektedir. Ancak duvar elemanına uygulanan basınç yüklemesi, duvara çekme dayanımı kazandırmaktadır. Bu yüklemenin büyüklüğü de çekme dayanımının değerini değiştirmektedir.

Duvar modellerinin basınç dayanımı ise Tsoutrelis and Exadaktylos (2003) tarafından önerilen ve farklı araştırmacılar tarafından kullanılabilirliği teyit edilen denklemler ile belirlenmiştir.

$$f_c = e^{-0.3117 \times L \times f} \times f_u \quad (3.27a)$$

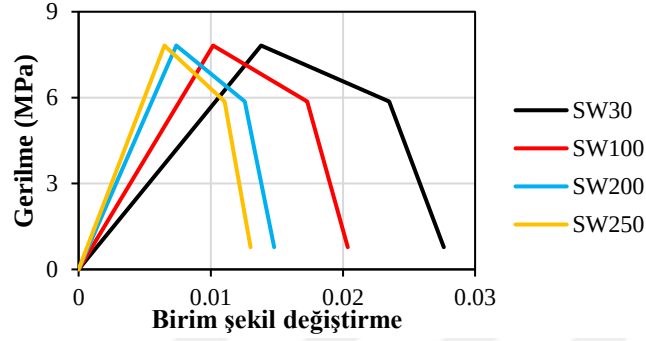
$$L = \sqrt[3]{l \times h \times t} \quad (3.27b)$$

Bu denklemde f_c , duvar karma basınç dayanımı; f_u taşın basınç dayanımı; l , h , t sırasıyla duvarın genişliği, yüksekliği, kalınlığı ve f çatlak yoğunluğunu temsil etmektedir. Çatlak yoğunluğu duvarı oluşturan taşların bütün boyutlarda sürekliliği bozan yüzeylerinin toplam alanının duvarın hacmine bölümüdür (m^2/m^3). Denklemler ışığında duvar modellerinin basınç dayanımı 7.82MPa olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen elastisite modülü değeri (E_0), duvarlara etki eden eksenel yükleme sırasında ölçülen düşey yer değiştirme verileri ışığında elde edilmiştir. Çalışmada eksenel yükün artmasıyla duvarın elastik modülünün arttığı belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.5'te verilmektedir.

Çizelge 3.5. Oliveira deneylerinde kullanılan malzeme özellikleri

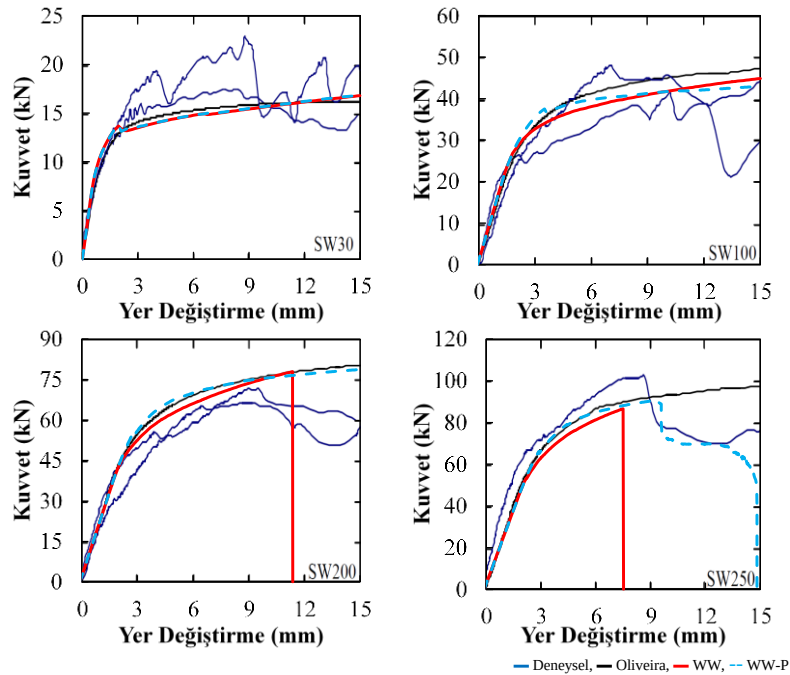
Deney Kodu	Eksenel Gerilme (MPa)	Açık Çatlak Katsayısı β_t	Kapalı Çatlak Katsayısı β_c	Çekme Dayanımı f_t (MPa)	Basınç Dayanımı f_c (MPa)	Elastisite Modülü, E_0 (MPa)
SW30	0,15	0,05	0,8	0,050	7,82	566
SW100	0,50	0,05	0,8	0,075	7,82	768
SW200	1,00	0,05	0,8	0,100	7,82	1.057
SW250	1,25	0,05	0,8	0,120	7,82	1.202

Duvarlara tanımlanacak elastisite modülü ve basınç dayanımı belirledikten sonra önceki bölümlerde idealize edilen σ - ε eğrisi vasıtasıyla analizlerde kullanılacak σ - ε eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3.12’de her bir duvar analizinde kullanılan σ - ε ilişkisi verilmektedir.



Şekil 3.12. Oliveira duvarlarında kullanılan idealize σ - ε eğrileri

Şekil 3.13’de deneyden, Oliveira’nın yapmış olduğu analitik çalışmadan ve bu tez kapsamında yapılmış olan nümerik modellerden elde edilen yanal yük-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmaktadır. Hesaplanan yük kapasitelerinin deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Verilen eğriler ışığında çalışmada kullanılan malzeme ve eleman modelinin düzgün kesme taşlı harçsız duvar modellerinde güvenle kullanılabileceği görülmektedir.



Şekil 3.13. Deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

SW30 ve SW100 duvarlarında statik eksenel gerilmeler sırasıyla 0,15 ve 0,50 MPa'dır. Bu iki duvarda William-Wranke (WW) malzeme modeli ve WW malzeme modeline ek tanımlanmış plastisite eğrisi (WW-P) ile yapılan analizler arasında belirgin bir ayrım bulunmamaktadır. Ancak SW200 ve SW250 duvarlarında (sırasıyla 1,00 ve 1,25 MPa statik eksenel gerilme uygulanmıştır) iki malzeme modeliyle hesaplanan sonuçlar arasında belirgin farklar gözlemlenmektedir. Bu durum düşük eksenel yüklemelerde sadece WW ile yapılan analizin yeterli olabileceğini göstermektedir. Ancak, yüksek eksenel gerilme seviyelerinde ezilmeyi dikkate almak için WW modelinin plastisite ile birlikte kullanılması gerekmektedir. SW250 duvarında WW-P analiz sonuçları ile deneysel eğrinin oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmektedir.

3.2.2. Vasconcelos (2005) deneysel çalışması

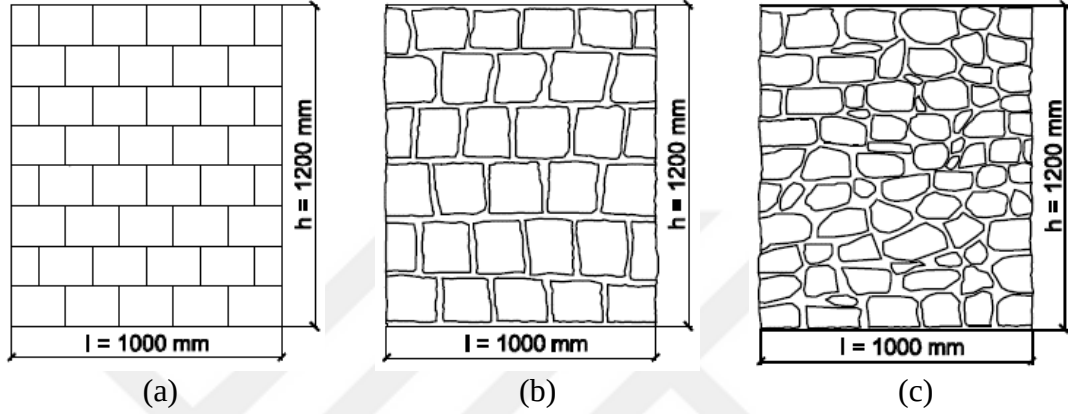
Bu bölümde düzenli ve düzensiz olarak nitelendirilen moloz taş duvarların yapısal davranışına ilişki Vasconcelos'un (2005) yapmış olduğu deneysel çalışmanın sonuçları ve deneysel numunelerin sonlu eleman modelleri sunulmaktadır. Bu deneyin ele alınmasında ki en önemli sebep aynı geometrik koşullara, eksenel yüklemelere ve deneysel şartlara sahip olan farklı tipolojideki duvarların davranışlarının incelenmesidir.

- **Geometrik Özellikler**

Duvar numunelerinin yapıldığı taş, Portekiz'in kuzey bölgesinde bulunan ve araştırmacıya göre tarihi yapılarda kullanılan malzemeleri temsil edebilecek bir malzemedir. Bu taşların mekanik özellikleri araştırmacının çalışmasında detaylı şekilde bulunmaktadır. Duvar numunelerinde kullanılan harcın basınç dayanımı yaklaşık olarak 3 MPa'dır. Bu dayanım seviyesi tarihi yapılarda bulunan harçları temsil ettiği kabul edilmiştir.

Şekil 3.14'de görüldüğü gibi, araştırmacı duvar numunelerini 3 ayrı tipolojide inşa edilmiştir. WS kodlu duvarlar düzenli şekilde kesilmiş taş birimlerin herhangi bir harç yardımı olmadan bir araya gelmesi ile inşa edilmiştir. Bu duvar tipi önceki bölümde örnek verilen düzgün kesme taşlı harçsız duvar tipolojisine girmektedir. Ancak duvar numunelerinin boyutlarının aynı olması ve aynı çalışmada yer alması sebebiyle bu duvar

numunelerinin sonlu eleman doğrulaması da burada verilmiştir. WI duvar tipi (Irregular Wall) benzer şekilde düzensiz olarak elle kesilen taş birimlerin harç dolgu ile birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. WR (Regular Wall) ise rastgele şekle sahip taş birimlerin yine harç yardımıyla birbirlerine birleştirilmesi sonucunda oluşturulmuştur. WI ve WR duvar tipleri ülkemizde ve dünyanın farklı birçok tarihi yapısında oldukça yaygın görünen duvar tipleridir.



Şekil 3.14. Geometri (a) düzgün kesme taşlı harçsız duvar WS; (b) düzensiz duvar WI; (c) moloz duvar WR.

Duvar boyutları, laboratuvar limitlerine ve yatay aktüatör kapasitesine uygun 120x100x20 cm şeklinde belirlenmiştir. Araştırmacılar belirlenen boyutların Portekiz'in kuzey bölgelerinde bulunan tipik duvarların 1:3 ölçeğini temsil ettiğini belirtmişlerdir. Duvar numuneleri doğrudan test düzeneğinin içinde inşa edilmiştir. Böylece taşıma esnasında meydana gelebilecek bir hasarın önüne geçilmiştir. WI ve WR duvarları taş ustası tarafından geleneksel kurallara uygun olarak inşa edilmiştir. Bu duvarlardaki testler yapımlarından 7 gün sonra gerçekleştirilmiştir.

Duvarlar düzlem içi yükleme öncesinde farklı eksenel yüklere maruz kalmaktadır. Bu eksenel yükler 100, 175 ve 250 kN mertebelerindedir. Duvarların boyutları göz önüne alındığında bu yükler duvarlarda sırasıyla 0,50, 0,875 ve 1,25 MPa basınç gerilmesine sebep olmaktadır. Duvar tipolojileri, eksenel yüklemeler ve duvar sayılarının ifade edildiği notasyon detayları Çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.6. Duvar notasyonu ve uygulanan eksenel yükler (toplam 24 duvar)

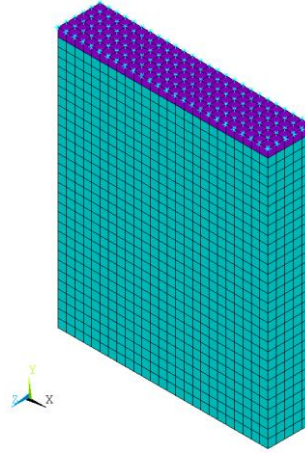
Duvar	Düşey Yük (kN)	Basınç Gerilmesi (MPa)
WS.100 (4), WI.100 (2); WR.100 (2)	100	0,50
WS.175 (3), WI.175 (3); WR.175 (2)	175	0,875
WS.250 (3), WI.250 (2); WR.250 (3)	250	1,25

- **Test Prosedürü**

Statik testler üç farklı eksenel yük altında gerçekleştirilmiştir. Tabandaki yatay yer değiştirme, çelik kirişlerle engellenmiştir. Düşey yükün duvar üzerine homojen dağılabilmesi için oldukça rijit bir kiriş kullanılmıştır. Duvarın düzlem dışı hareketinin engellenmesi için çelik borular kullanılmıştır.

- **Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması ve Doğrulaması**

Şekil 3.15’de duvar numunelerin sonlu eleman modeli verilmektedir. Sonlu eleman modellerinde Elastisite modülü (E_0), duvar basınç dayanımı (f_c) ve duvar çekme dayanımı (f_t)’dir. Elastisite modülü değerleri için deneysel olarak belirlenen değerler kullanılmıştır. Aynı boyutlardaki farklı üç duvar tipolojisi sebebiyle, uygulanan eksenel gerilim (σ) ile E , f_c ve f_t özellikleri arasındaki ilişki üç duvar için ayrı ayrı irdelenmiştir. Araştırmacı çalışmasında basınç dayanımı değerlerini WS duvarlar için 73 MPa, WI ve WR duvarlar için ise 18,4 MPa olarak alınmasını tavsiye etmiştir. Bu değerler yanal yükleme sonrası literatürde önerilen ilişkiler sonucunda belirlenmiştir. E_0 değerleri her bir duvarda eksenel gerilme yüklemesi yapıldıktan sonra deneysel olarak elde edilen birim şekil değiştirmeler yardımıyla elde edilmiştir. Sonlu eleman modellerinde kullanılan diğer parametreler Çizelge 3.7’de verilmektedir. Çizelgede ayrıca kalibre elastisite modülleri (E_k) de verilmektedir. Araştırmacının önermiş olduğu elastisite modülleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda deneysel kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin başlangıç rijitlikleri yakalanamamıştır. Bu sebeple tablo verilen kalibre elastisite modülleri kullanılarak WW ve WW-P malzeme modelleriyle analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yükleme olarak hem monotonik hem de çevrimsel yüklemeler kullanılmıştır. Sonuçlarda bu iki yükleme prosedürü kullanılarak elde edilen eğriler verilmektedir.

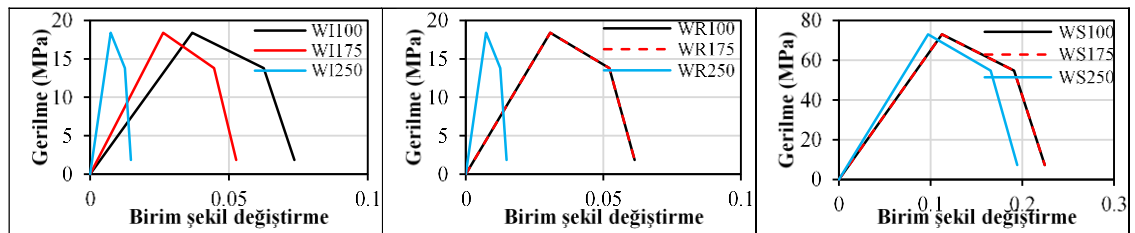


Şekil 3.15. Vasconcelos tarafından yapılan duvar numunelerinin sonlu eleman modeli

Çizelge 3.7. Vasconcelos deneylerinde kullanılan malzeme parametreleri

Deney Kodu	Eksenel Gerilme (MPa)	Açık Çatlak Katsayısı β_t	Kapalı Çatlak Katsayısı β_c	Çekme Dayanımı f_t (MPa)	Basınç Dayanımı f_c (MPa)	Elastisite Modülü, E_o (MPa)	Kalibre Elastisite Modülü, E_k (MPa)
WS100	0,500	0,05	0,8	0,12	18,4	3.841	500
WS175	0,875	0,05	0,8	0,12	18,4	3.864	700
WS250	1,250	0,05	0,8	0,12	18,4	3.912	2.500
WI100	0,500	0,05	0,8	0,11	18,4	2.330	600
WI175	0,875	0,05	0,8	0,11	18,4	2.394	600
WI250	1,250	0,05	0,8	0,11	18,4	2.496	2.496
WR100	0,500	0,05	0,8	0,07	73,0	3.288	650
WR175	0,875	0,05	0,8	0,095	73,0	4.069	650
WR250	1,250	0,05	0,8	0,12	73,0	4.822	750

Analizlerde kullanılacak elastisite modülü ve basınç dayanımı belirlendikten sonra önceki kısımlarda idealize edilen σ - ϵ eğrisi kullanılarak bu analizlerde kullanılacak σ - ϵ eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3.16’da her bir duvar analizinde kullanılan σ - ϵ eğrileri verilmektedir. σ - ϵ eğrilerinde E_k değeri kullanılmıştır.



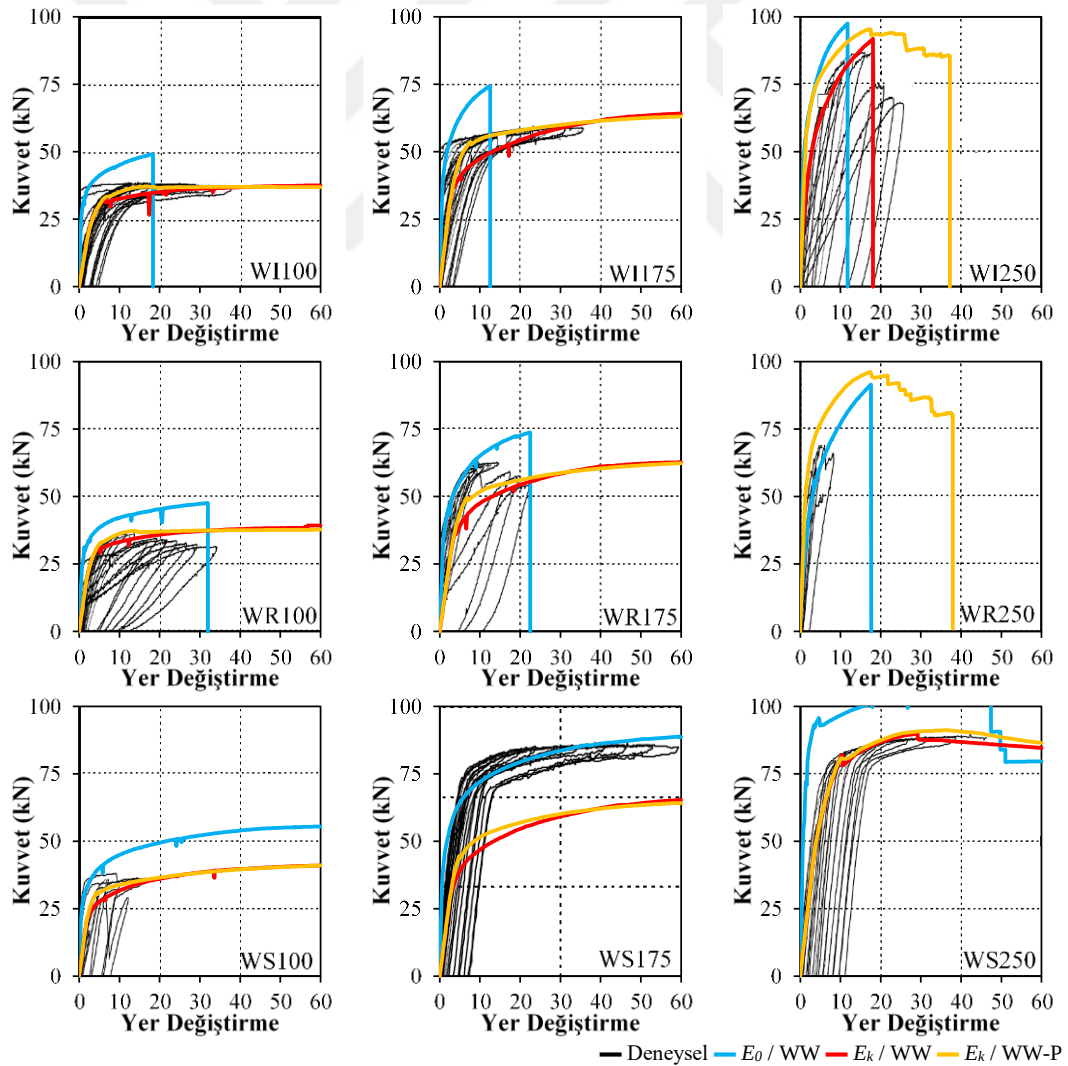
Şekil 3.16. Vasconcelos duvarlarında kullanılan idealize σ - ϵ eğrileri

Şekil 3.17’de deneyden ve bu tez kapsamında yapılmış olan analitik modellerden elde edilen yanal yük-yer değiştirme eğrileri bulunmaktadır. Kuvvet kapasiteleri deneysel

3. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN DOĞRULANMASI

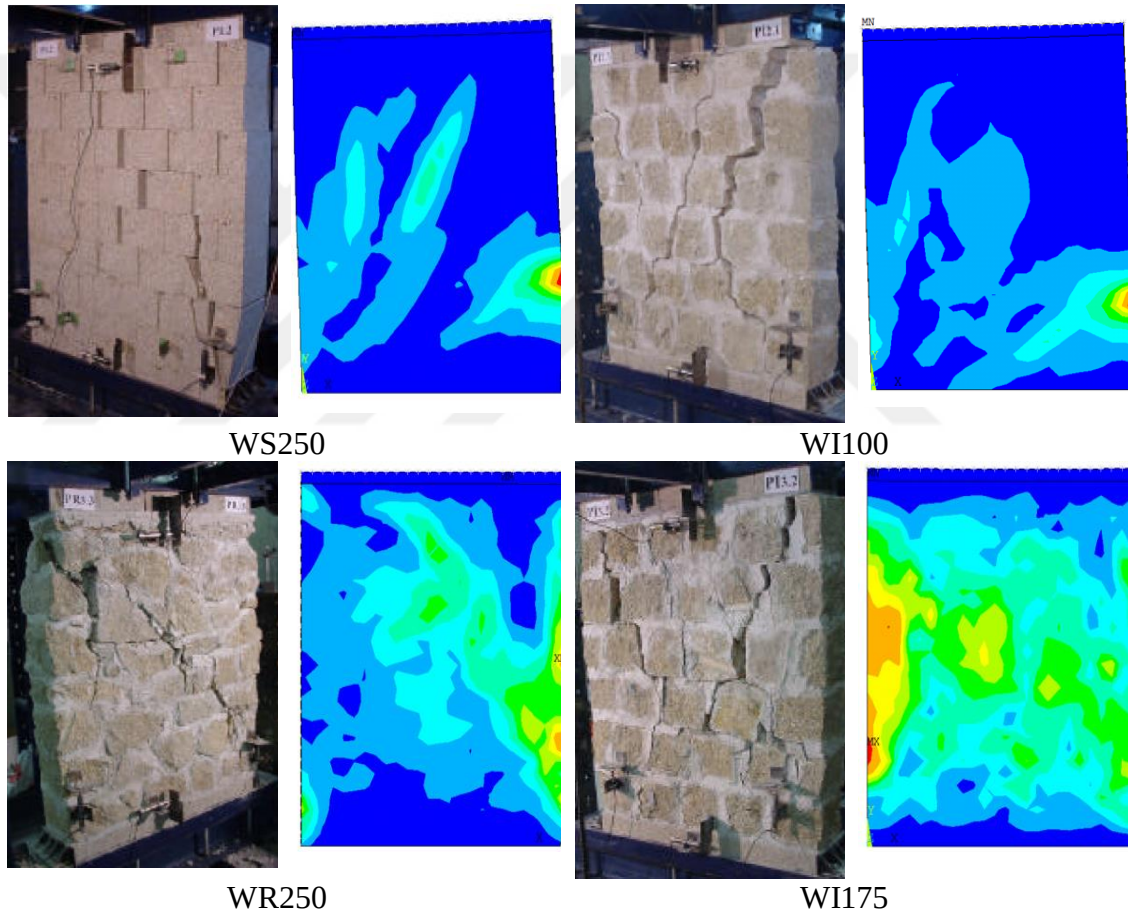
verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Verilen eğriler ışığında çalışmada kullanılan malzeme ve eleman modelinin düzgün kesme taşlı harçsız duvar modellerinde, düzensiz duvar modellerinde ve moloz taş duvar modellerinde güvenle kullanılabileceği görülmektedir.

Şekil 3.17’de E_k kullanılarak yapılan WW ve WW-P analizlerine bakıldığında WI250 ve WR250 duvarları hariç diğer 7 duvarda oldukça yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Önceki deneysel doğrulama örneğinde de değinildiği gibi yüksek olmayan eksenel kuvvetlerde plastisite kullanmadan sadece WW malzeme modeliyle yapılan analizlerin yeterli olduğu görülmektedir. Ancak statik eksenel gerilmenin 1,25 MPa olduğu duvarlarda yığma duvar davranışını basınç bölgesindeki ezilmeler belirlediği için WW malzeme modeliyle birlikte plastisite kullanılması (WW-P) gerektiği görülmektedir.



Şekil 3.17. Deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Bu analiz setinde, monotonik yüklemeye ek olarak çevrimsel yükleme altında da analizler gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi duvarlardaki yıkılma mekanizmalarının monotonik yüklemeye elde edilememesidir. Şekil 3.18’de her bir duvar için çevrimsel yükleme ile elde edilen yıkılma mekanizmaları ile deneysel yıkılma mekanizmaları verilmektedir. Verilen yıkılma mekanizmaları ışığında, kullanılan malzeme ve eleman ile kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve yıkılma mekanizması deneysel verilere yakın bir şekilde elde edilebilmektedir. Ayrıca deneydeki gibi tek duvardan oluşan analizlerde gerçeğe yakın yıkılma mekanizmasının elde edilmesi hedefleniyorsa, analizlerin çevrimsel yükleme altında yapılması önerilmektedir.



Şekil 3.18. Vanconcelos duvarlarının deneysel hasar mekanizması ve analitik asal çekme birim şekil değiştirmelerinin karşılaştırılması.

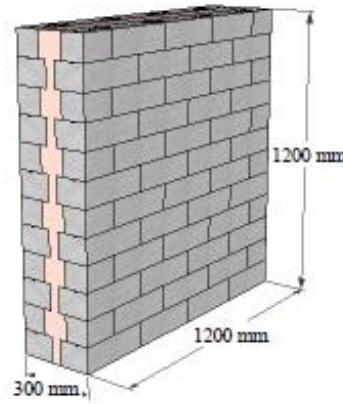
3.2.3. Demir (2012) deneysel çalışması

Bu bölümde üç cidarlı yığma duvarların davranışının belirlenmesi amacıyla Demir (2012) yapmış olduğu deneysel çalışma ve bu çalışmanın sonlu eleman modeli

sunulmaktadır. Araştırmacı ülkemizde bulunan tarihi camilerin göz önüne alarak ürettiği duvar modelleri, sonraki kısımlarda ele alınacak cami modelleri açısından önem arz etmektedir.

- **Geometrik Özellikler**

Araştırmacı tarihi camilerde bulunan duvarları temsil edebilecek üç cidarlı duvarların basınç ve kesme kuvveti altında davranışlarını belirlemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Deneyde, tarihi camilerde bulunan duvarların benzer yapım teknikleri kullanılarak modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller boyut olarak ikiye ayrılmaktadır. Araştırmacı 1. grup duvarlar üzerinde sadece basınç testi gerçekleştirerek duvarların gerilme-şekil değiştirme eğrilerini elde etmiştir. 2. grup duvarlarda ise eksenel yükün artırılması ile duvar yanal yer değiştirme kapasitesi irdelenmiştir. Şekil 3.19’da eksenel yük altında düzlem içi davranışının irdelendiği duvar modellerinin geometrik özellikleri sunulmaktadır.



Şekil 3.19. Deneylerde kullanılan üç cidarlı duvarların geometrik özellikleri (Demir 2012).

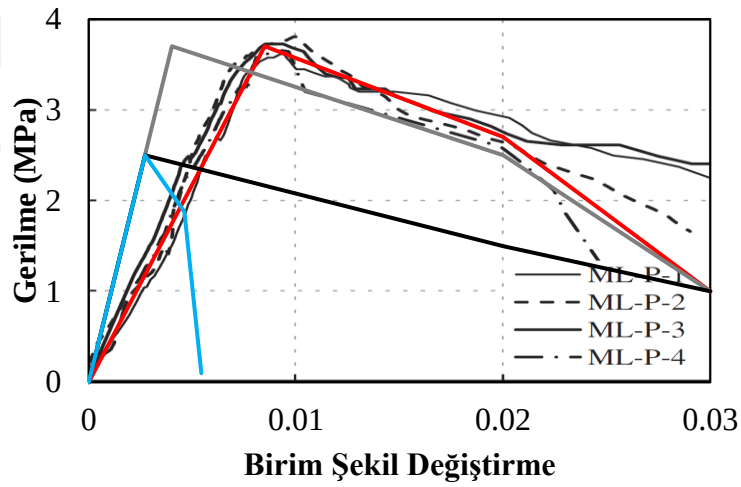
Duvarların düzlem içi yüklemesi öncesinde farklı eksenel yüklere maruz kalmaktadır. Bu eksenel yükler 90, 180, 270 ve 360 kN mertebelerindedir. Duvarların boyutları göz önüne alındığında bu yükler duvarlarda sırasıyla 0,25, 0,50, 0,75 ve 1,00 MPa basınç gerilmesine sebep olmaktadır. Duvar tipolojileri, eksenel yüklemeler ve duvar sayılarının belirtildiği notasyon detayları Çizelge 3.8’de verilmektedir.

Çizelge 3.8. Duvar notasyonu ve uygulanan eksenel yükler

Duvar	Düşey Yük (kN)	Basınç Gerilmesi (MPa)
M-25	90	0,25
M-50	180	0,50
M-75	270	0,75
M-100	360	1,00

- Basınç Testi**

Araştırmacı basınç-kesme deneylerinden önce Şekil 3.19’da verilen duvar numunesinin daha küçük boyutlarında (500x400x300 mm) aynı tipolojide 4 duvar numunesi daha üretmiştir. Bu duvar numuneleri basınç testine tabi tutularak duvarların σ - ε eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler Şekil 3.20’de verilmektedir. Test sonucunda 4 duvarın basınç dayanımları 3,62, 3,81, 3,73 ve 3,66 MPa (Ortalama 3,71 MPa) olarak elde edilmiştir.



— Deneysel — σ - ε _1: $E_k=920\text{MPa}$; $f_c=3.7\text{MPa}$ — σ - ε _2: $E_k=920\text{MPa}$; $f_c=2.5\text{MPa}$ — İdealize σ - ε _3

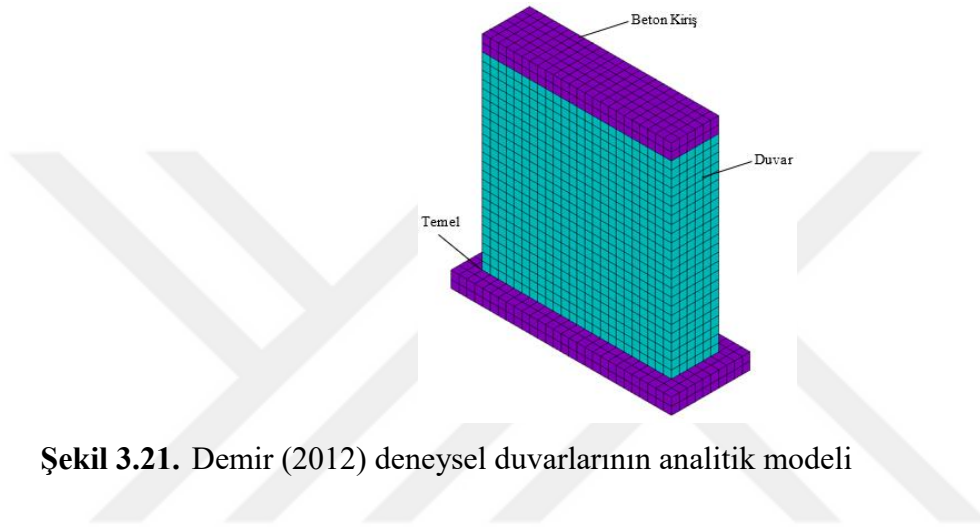
Şekil 3.20. Deneysel olarak elde edilen ve analizlerde kullanılan σ - ε eğrileri

- Test Prosedürü**

Statik testler üç farklı eksenel sıkıştırma altında gerçekleştirilmiştir. Tabandaki yatay yer değiştirme, çelik kirişlerle engellenmiştir. Düşey yükün duvar üzerine homojen dağılabilmesi için oldukça rijit bir kiriş kullanılmıştır.

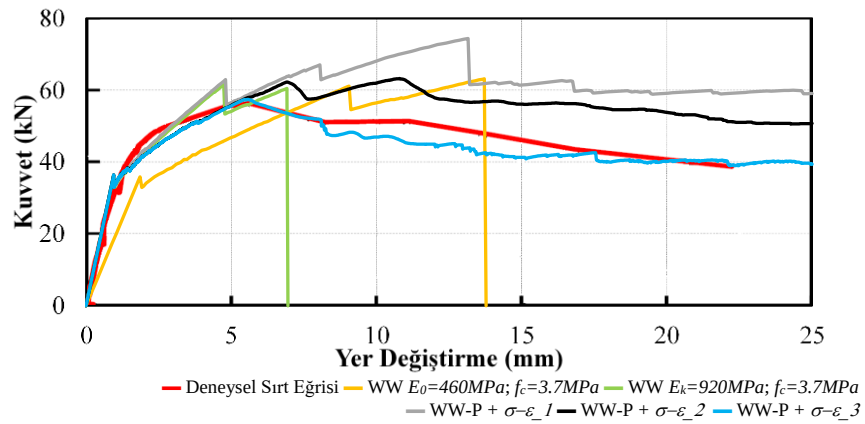
- **Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması ve Doğrulaması**

Ele alınan duvar modelleri ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modelde aksel yükler üst kısımda bulunan kiriş üzerine kuvvet olarak uygulanmıştır. Taşın üç aksenli gerilme altında göçme yüzeyini modellemek için William-Warnke beton modeli (CONC) kullanılmaktadır. Sonlu eleman modeli Şekil 3.21’de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Demir (2012) deneysel duvarlarının analitik modeli

Şekil 3.22’de deneyden ve bu çalışma kapsamında oluşturulan sonlu eleman modellerinden elde edilen yanal yük-yer değiştirme eğrileri sunulmuştur. Verilen eğriler M-25 (aksel gerilme 0,25 MPa) duvarına aittir. Bu çalışma kapsamında farklı parametrelere sahip 4 analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde 4 numaralı analiz sonucunun deneysel sonuç ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.22. Deneysel ve bu çalışmada elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Analizler arasındaki farklılık şu şekilde açıklanabilir. İlk analizde WW malzeme modeliyle $E_o=460$ MPa, $f_c=3,7$ MPa değerleri kullanılmıştır. Bu değerler Demir (2012) çalışmasında basınç testine tabi tutulan 4 duvar numunesinden elde edilmiştir. Elde edilen analiz yük-yer değiştirme eğrisine bakıldığında başlangıç rijitliğinin yakalanamadığı görülmektedir. Ayrıca malzeme kırıldıktan sonra (azami kuvvete ulaştığı nokta sonrası) eğrinin devam edemediği (malzeme modeli sebebiyle) görülmektedir.

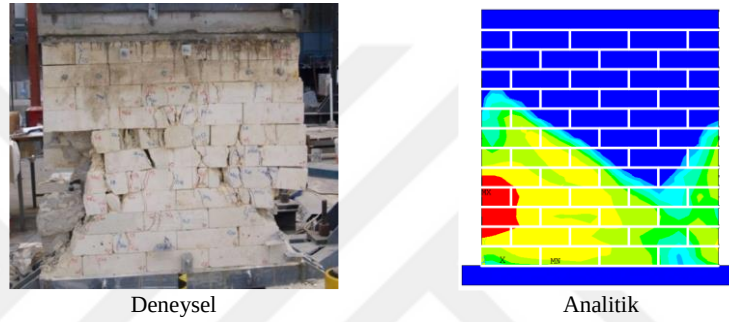
İkinci analizde WW modeli kalibre elastisite modülü ile kullanılmıştır. $E_k=920$ MPa mertebesine çekilmiştir. Analiz eğrisine bakıldığında başlangıç rijitliğini oldukça iyi bir şekilde yakalandığı görülmektedir. Bu sebeple duvar modelinin elastik modülü 920 MPa olarak kabul edilip, diğer analizlere bu değer üzerinden devam edilmiştir. Bu noktada bu değişimin açıklanması uygun olacaktır. Şöyle ki; Demir (2012)'in çalışmasında kullanılan taşın cinsi Küfeki'dir. Çalışmada birçok taş numunesi basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucunda taşın basınç dayanımının 7,5-25,5 MPa arasında oldukça geniş bir aralıkta değere sahip olduğu görülmüştür. Bu sebeple başka taşlar kullanılarak elde edilen basınç dayanımları, elastisite modülleri vb. duvar malzeme özellikleri farklı bir duvarı tam olarak temsil etmeyecektir. Bu sebeple malzeme özelliklerinde kalibrasyon ihtiyacı duyulmaktadır.

Üçüncü analizde, yük-yer değiştirme eğrisinin azami kuvvet sonrasında devam etmemesi sebebiyle WW-P modeli kullanılmıştır. Analizde Şekil 3.20'de verilen $\sigma-\varepsilon_1$ eğrisi kullanılmıştır. Malzeme modeli artık maksimum basınç gerilmesi sonrası plastik yumuşama davranışı sergilemektedir. Bu sebeple WW malzeme modeli kullanılan analizlerden elde edilen eğrilere göre farklı davranış sergilemektedir. Duvarın basınç dayanımının fazla seçilmiş olduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu sebeple diğer parametreler sabit kalacak şekilde duvarın basınç dayanımı 2,5 MPa olarak düzenlenerek dördüncü analiz gerçekleştirilmiştir. Dördüncü analizde WW-P modeli ile Şekil 3.20'de verilen $\sigma-\varepsilon_2$ eğrisi kullanılmıştır. Analiz neticesinde deneysel eğri ile analitik eğrinin göreceli uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 3.20'de verilen $\sigma-\varepsilon$ eğrisindeki noktaların belirsiz ve değişken olması sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca elastik analizlerle başlangıç rijitliğini ve ilk çatlak sonrası maksimum dayanım noktalarının oldukça iyi yakalandığı görülmektedir. Son olarak bu çalışmada önerilen idealize $\sigma-\varepsilon$ eğrisi

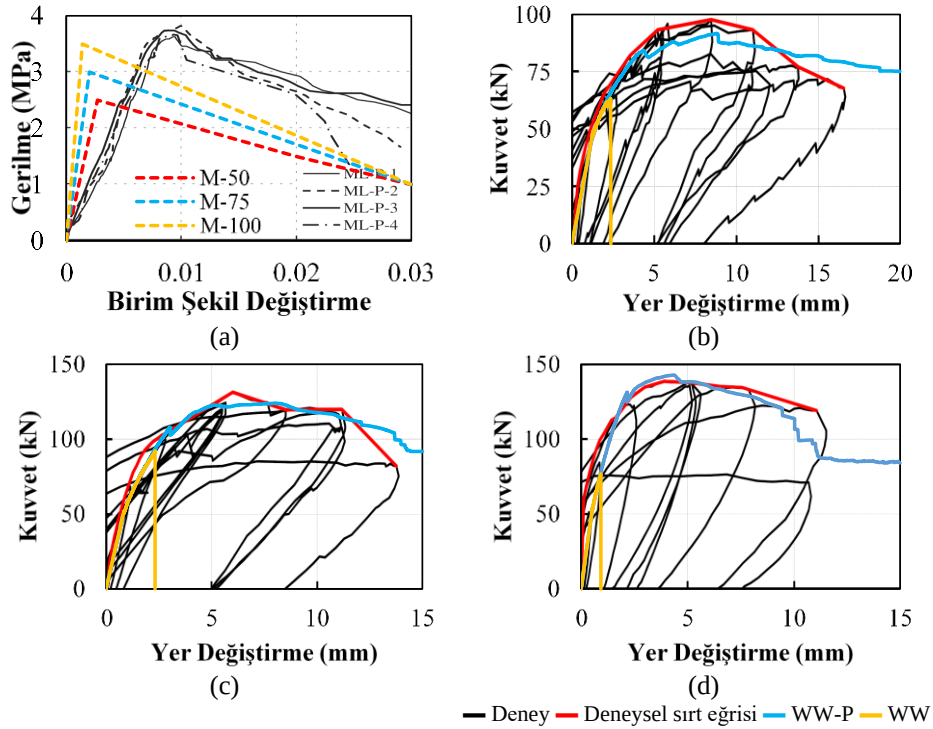
3. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN DOĞRULANMASI

kullanılmıştır. WW-P modelinin kullanıldığı analiz sonucunun deneysel ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Malzeme özelliklerinin tam olarak kalibre edilmesinden sonra deney prosedüründe uygulanan çevrimsel yükleme protokolü modele uygulanmıştır. Bu analiz sonucunda duvarın yıkılma mekanizmasının elde edilmesi hedeflenmektedir. Şekil 3.23’de deneysel ve analitik olarak elde edilen yıkılma mekanizmaları verilmektedir. Elde edilen sonuçlar, doğru yükleme protokolü altında, kullanılan malzeme ve elemanın yıkılma mekanizmasını deneyselle oldukça yakın sunduğunu göstermektedir.



Şekil 3.23. Demir M-25 duvarının deneysel hasar mekanizması ve analitik asal çekme birim şekil değiştirmelerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.24. (a) Analizlerde kullanılan σ - ϵ eğrileri; (b) M-50; (c) M-75; (d) M-100 duvarının deneysel ve analitik eğrileri.

Araştırmacı eksenel yükü artırarak diğer duvarların da davranışlarını belirlemiştir. Şekil 3.24b, c ve d’de eksenel basıncın 0,50, 0,75 ve 1,00 MPa olduğu M-50, M-75 ve M-100 duvarlarının deneysel ve analitik olarak elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bu analizlerde kullanılan σ - ε eğrileri Şekil 3.24a’da verilmektedir. Analizler hem WW hem de WW-P malzeme modelleriyle gerçekleştirilmiştir. M-50, M-75 ve M-100 duvarlarında sırasıyla elastisite modülü 920, 1.500 ve 2.500 MPa, basınç dayanımı ise 2,5, 3,0 ve 3,5 MPa olarak kabul edilmiştir. Deneysel ve analitik eğrilerin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Bu pratik, duvar tipolojisi, deneysel basınç testi ve eksenel yük çeşitliliği bakımından oldukça önemli bir çalışma olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışma sonucunda;

- Deneysel olarak belirlenen σ - ε eğrilerinin doğrudan kullanımı mümkün olmamaktadır. Elde edilen eğriler ışığında basınç dayanımı ve elastisite modülü kalibre edilmektedir. Bu durumun yığma duvarlarda kullanılan taşların basınç ve elastisite modülü değerlerinin geniş bir aralıkta olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- 0,25 MPa eksenel gerilmeye sahip M-25 duvarında WW ve WW-P analizleri göreceli olarak birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Ancak eksenel yükün arttığı diğer duvar modellerinde WW modeli kullanılan analizler deneysel ve WW-P analiz sonuçlarına yanaşamamaktadır. Bu durum düşük eksenel gerilime sahip duvarlarda WW modelinin yeteceği ancak eksenel gerilme arttıkça plastisite eğrisinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

3.2.4. Silva (2012) deneysel çalışması

Bu bölümde üç cidarlı yığma moloz duvarların davranışının belirlenmesi amacıyla Silva (2012) yapmış olduğu deneysel çalışma ve bu çalışmanın sonlu eleman modeli sunulmaktadır. Araştırmacı duvar modellerini bir bütün olarak inşa ettikten sonra belirlediği ölçülerde keserek deney numunelerini elde etmiştir. Böylece işçilik hataları, taşlardaki değişken malzeme karakteristiğini rastgele seçmiştir. Ayrıca seçilen duvarlar basınç testine tabi tutularak duvarların σ - ε eğrileri elde edilmiştir.

- **Geometrik Özellikler**

Araştırmacı üç cidarlı moloz duvarları temsil edebilecek modeller üreterek basınç ve kesme kuvveti altında davranışlarını belirlemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Deneyde, işçilik hatası ve taş dayanımlarının farklılığı azaltmak ayrıca taş örgüsünün rastgele seçimini yapmak için uzun duvar panelleri oluşturmuştur. Bu paneller belirtilen geometriye uygun şekilde kesilerek basınç ve basınç-kesme deneylerine tabi utulmuştur. Şekil 3.25’de bu çalışmada ele alınan B, C, D ve E duvarları ve boyutları verilmektedir. Ele alınan duvarlardan B ve C duvarları 1:1 ölçeğinde C ve E duvarları ise 2:3 ölçeğindedir. B ve C duvarları 50x100x120 cm, C ve E duvarları ise 33x80x100 cm boyutlarına sahiptir. Araştırmacı bazı duvarları güçlendirerek çalışmasını genişletmiştir ancak bu duvarlar bu deneysel doğrulama göz ardı edilmiştir.

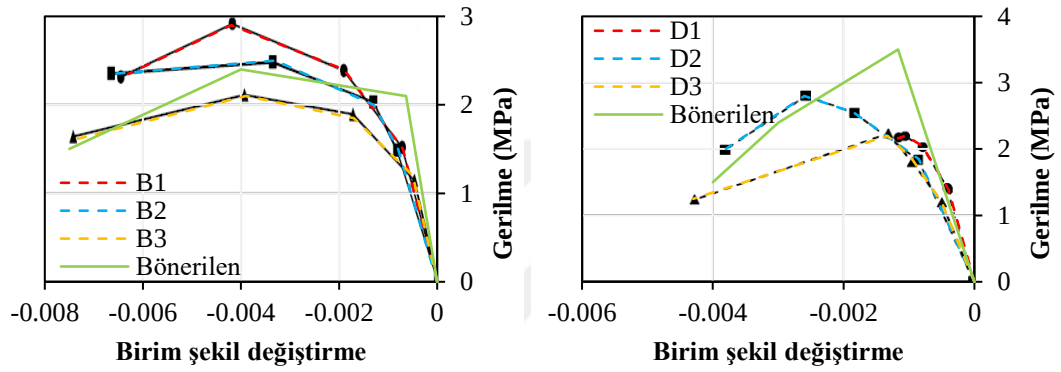
Duvarların bir kısmı basınç diğer kısmı ise basınç-kesme testine tabi tutulmaktadır. Düzlem içi yükleme öncesinde farklı eksenel gerilmeler karşımıza çıkmaktadır. Bu eksenel gerilmeler 0,5, 0,75, 1,00 ve 1,25 MPa mertebelerindedir. Duvar kodları eksenel yüklemeler, test prosedürü ve duvar sayılarının belirtildiği notasyon detayları Çizelge 3.9’da verilmektedir.

Çizelge 3.9. Duvar notasyonu ve uygulanan yüklemeler

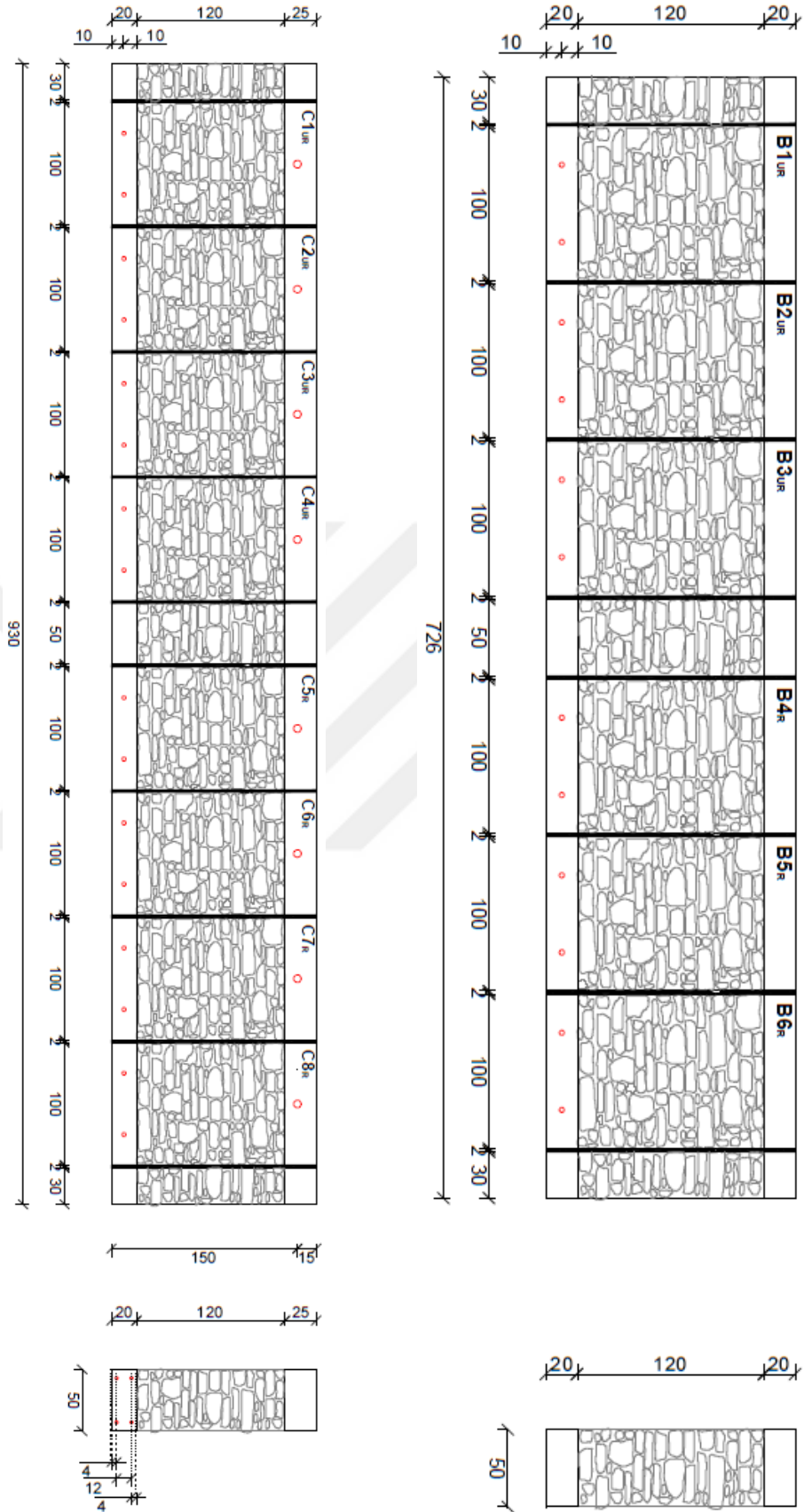
Duvar	Ölçek	Basınç Gerilmesi (MPa)	Test Prosedürü	E (MPa)	f_c (MPa)
B1	1:1	-	Basınç	2.143	2,9
B2	1:1	-	Basınç	1.875	2,5
B3	1:1	-	Basınç	2.400	2,1
D1	2:3	-	Basınç	3.500	2,2
D2	2:3	-	Basınç	2.176	2,8
D3	2:3	-	Basınç	2.400	2,2
C1	1:1	1,00	Basınç-Kesme	3.300	2,4
C2	1:1	1,25	Basınç-Kesme	3.300	2,4
C3	1:1	0,75	Basınç-Kesme	3.300	2,4
C4	1:1	0,50	Basınç-Kesme	3.300	2,4
E1	2:3	0,50	Basınç-Kesme	3.000	3,5
E2	2:3	1,00	Basınç-Kesme	3.000	3,5
E3	2:3	0,75	Basınç-Kesme	3.000	3,5
E4	2:3	1,25	Basınç-Kesme	3.000	3,5

- **Basınç Testi**

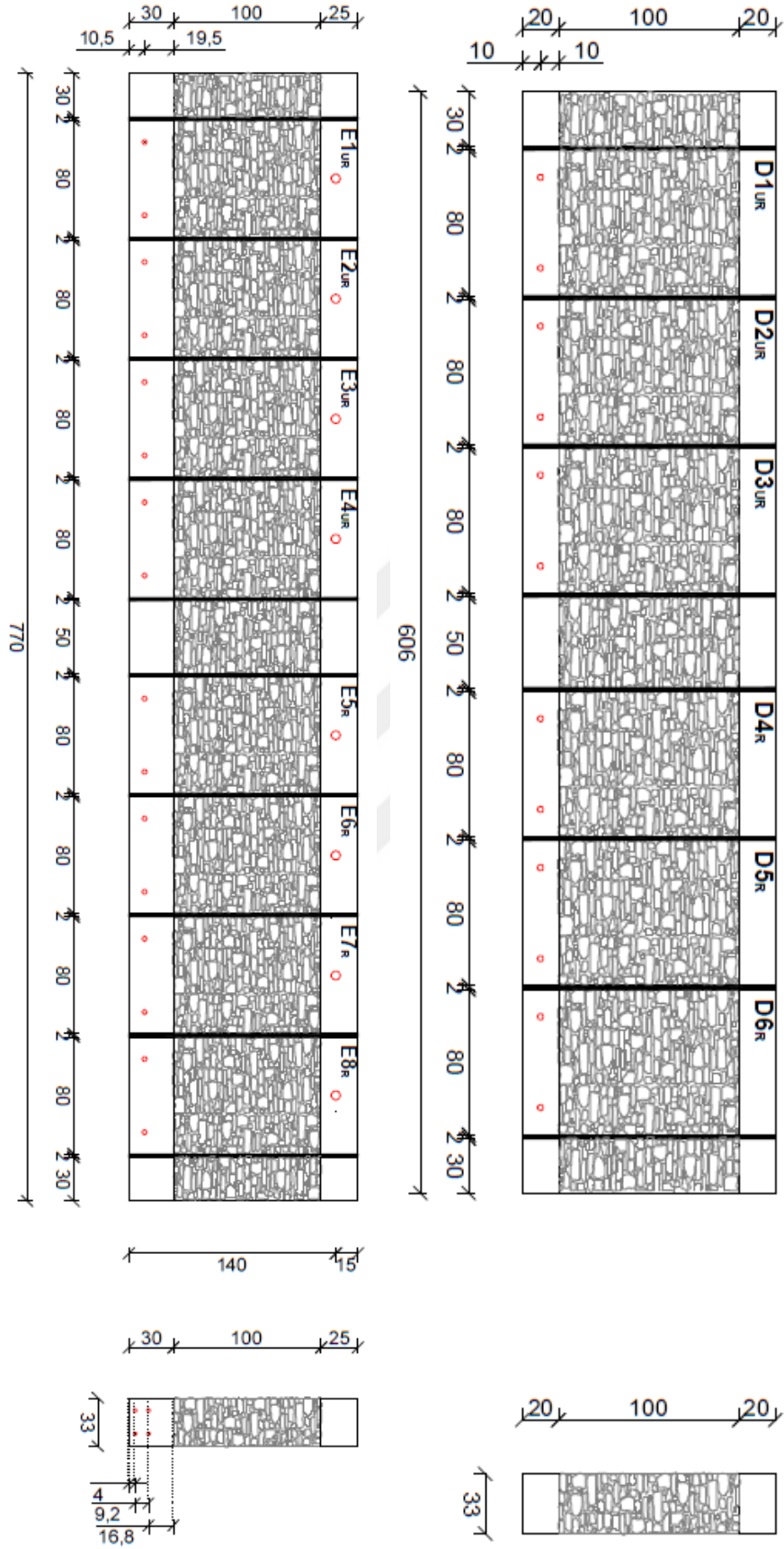
Araştırmacı basınç-kesme deneylerinden önce Şekil 3.25’de detayları verilen duvar numunelerini basınç testine tabi tutmuştur. Bu duvar numuneleri basınç testine tabi tutularak duvarların σ - ε eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler Şekil 3.26’da verilmektedir. Toplamda 4 farklı σ - ε eğrisi elde edilmiştir. C duvarları için B duvarlarından elde edilen, E duvarları için ise D duvarlarından elde edilen eğriler kullanılmıştır.



Şekil 3.25. DeneySEL olarak elde edilen ve analizlerde kullanılan σ - ε eğrileri



Şekil 3.26. Deneysel çalışmada kullanılan duvarlar ve geometrik özellikleri (cm)



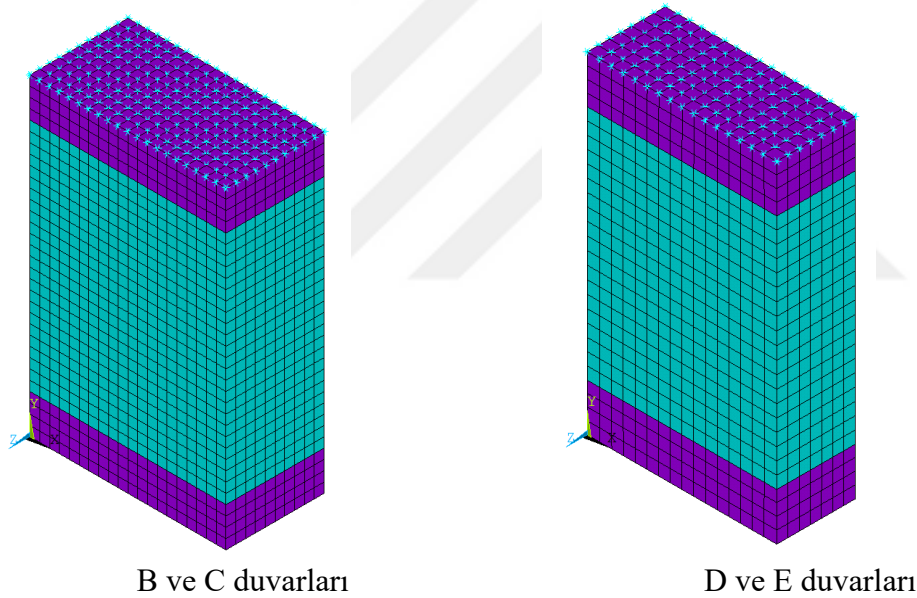
Şekil 3.26. Deneysel çalışmada kullanılan duvarlar ve geometrik özellikleri (cm) (devam)

- **Test Prosedürü**

Statik testler dört farklı eksenel sıkıştırma altında gerçekleştirilmiştir. Tabandaki yatay yer değiştirme, çelik kirişlerle engellenmiştir. Düşey yükün duvar üzerine homojen dağılabilmesi için oldukça rijit bir kiriş kullanılmıştır.

- **Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması ve Doğrulaması**

Ele alınan duvar modelleri ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Modelde eksenel yükler üst kısımda bulunan kiriş nodlarına kuvvet olarak uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli Şekil 3.27’de gösterilmektedir.

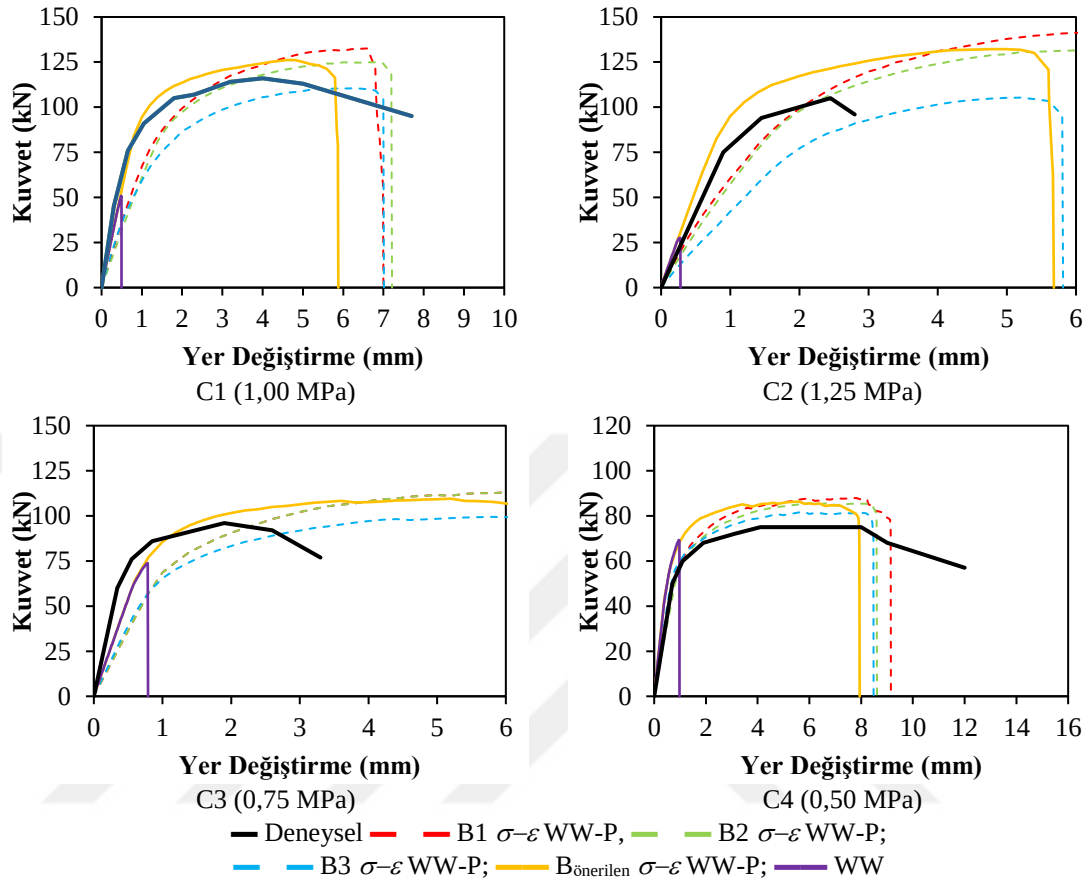


Şekil 3.27. Silva (2012) deneysel duvarlarının analitik modeli

Çalışmada iki çeşit duvar bulunmaktadır. Bu iki duvar çeşidi de basınç testine tabi tutulmuştur. Yapılan sonlu eleman modellerinde, C duvarlarında B1, B2 ve B3, E duvarlarında ise D1, D2 ve D3 duvarlarından elde edilen σ - ε eğriler kullanılmıştır. Ayrıca araştırmacı çalışmasında her iki duvar σ - ε eğrisi önermektedir. Önerilen eğri kullanılarak yapılan analize ek olarak önerilen elastisite modülü ve basınç dayanımı kullanılarak elastik analizlerde gerçekleştirilmiştir. Her bir grafikte deneysel eğriye ek olarak toplam 5 analitik eğri verilmektedir. Şekil 3.28’de 1:1 ölçeğe sahip C1, C2, C3 ve

3. SONLU ELEMEN MODELLERİNİN DOĞRULANMASI

C4 duvarlarının; Şekil 3.29’da ise E1, E2, E3 ve E4 duvarlarının kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir.

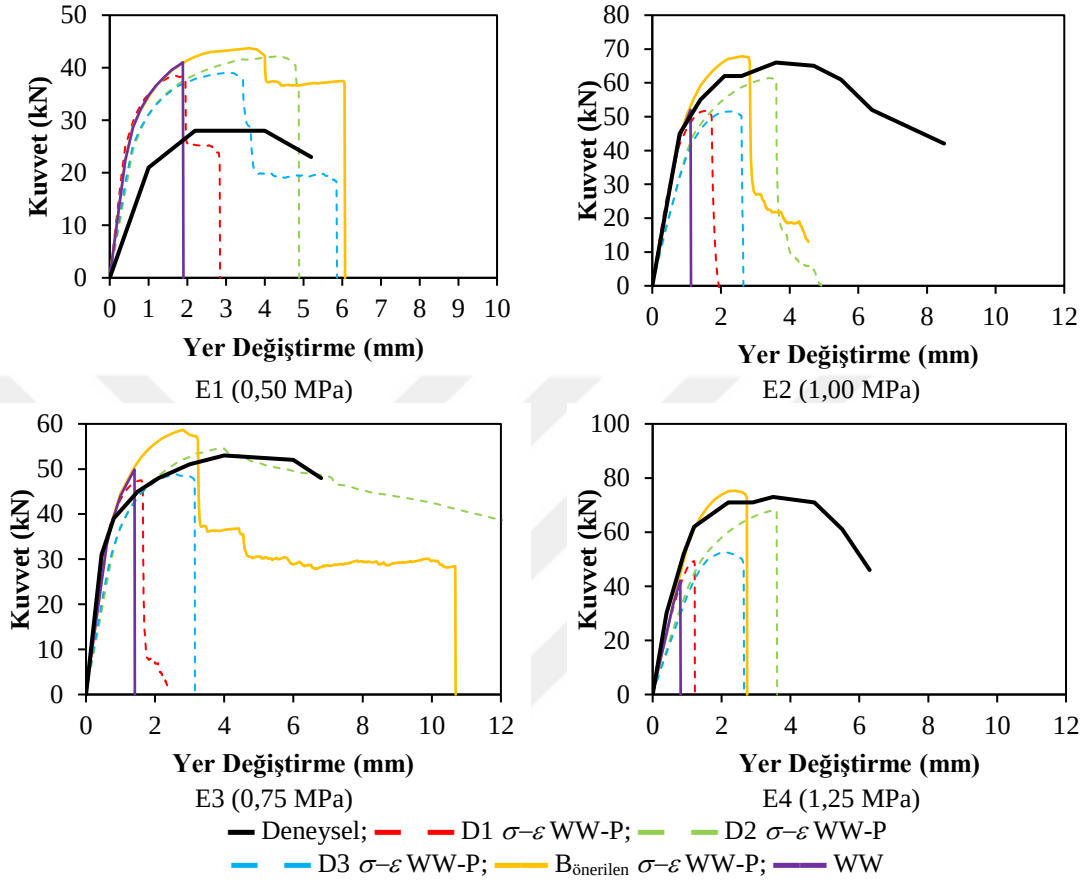


Şekil 3.28. C duvarlarının deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Elde edilen eğriler neticesinde bu deneysel çalışmadan çıkarılan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Aynı anda aynı koşullarda inşa edilen duvarlardan elde edilen $\sigma-\varepsilon$ eğrileri farklılık gösterebilmektedir. Her bir duvar kendine ait bir $\sigma-\varepsilon$ eğrisine sahiptir. Ayrıca basınç testleri sonucunda elde edilen eğriler basınç-kesme deneylerinde kullanılması doğru sonuca yaklaşırsa da elastisite modülü ve basınç dayanımı özelliklerinde kalibrasyon gerektirmektedir.
- Eksenel yük değeri düştükçe elastik analiz ile plastik analiz sonuçları birbirine yakın olmaktadır. Görüldüğü üzere 1,25, 1,00 MPa mertebelerinde eksenel yüke sahip duvarlarda WW modelinin yetersiz kaldığı görülmektedir.

Deney çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilmiştir. Ancak analitik çalışmalar monotonik yükleme ile yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin araştırılacağı çalışmalarda monotonik yüklemenin yeterli olduğu görülmektedir.



Şekil 3.29. E duvarlarının deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrileri

3.2.5. Maccarini et al. (2018) deneysel çalışması

Bu bölümde iki çeşit moloz duvarların yapısal davranışını Maccarini et al. (2018) yapmış oldukları deneysel çalışma sonuçları ve bu deneysel çalışmanın sonlu eleman modeli sunulmaktadır. Araştırmacılar duvar tipolojilerini belirlerken ana hedefleri araştırmanın yapıldığı bölge olan Portekiz'in kuzeyindeki yerel yapıları temsil etmesidir. Ancak nihai tipolojinin Akdeniz ülkelerinde oldukça yaygın olan bir tipoloji olduğunu belirtmişlerdir. Ele alınan tipolojiler, Portekiz'in dışında dünyanın farklı bölgelerinde bulunan yapıları da temsil etmektedir.

Araştırmacılar deney düzeneğinin tanımlanması için üç aşama belirtmişlerdir. Bu aşamalar şu şekilde sıralanabilir;

✓ Sonik testler ve dinamik modal analiz testlerini içeren, malzeme ve yapısal davranışın belirlenmesinde yardımcı olan tahribatsız yöntemler kullanılmıştır. Böylelikle duvar elemanında kullanılan malzemenin elastisite modülü belirlenmiştir. Ayrıca duvarın sonlu eleman modeli, deneysel mod şekilleri ve frekanslar ile kalibre edilmiştir.

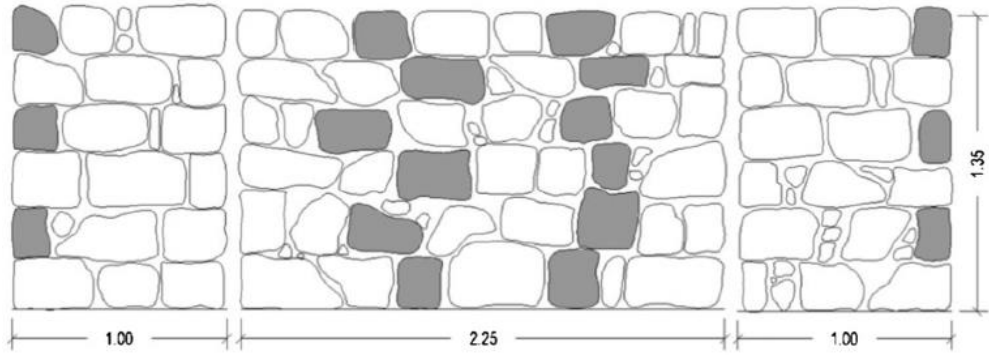
✓ Duvarların düzlem dışı hareketini sağlamak için hava yastığı kullanmışlardır. Böylelikle düzgün yayılı bir yükleme uygulanmış olmaktadır.

✓ Sonlu eleman analizleri gerçekleştirerek, deneysel veriler ışığında sonlu eleman modelinin doğrulaması yapılmıştır.

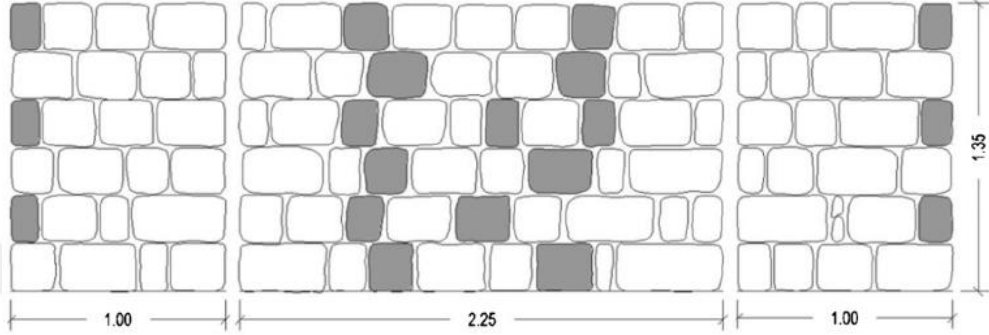
- **Geometrik Özellikler**

Duvar numuneleri Akdeniz ülkelerinde oldukça yaygın görülen tipoloji hedeflenerek yapılmıştır. Literatürde Martins et al. (2016) çalışmalarında duvarların düzlem dışı davranışlarının belirlenmesinde cephe duvarının enine duvarlarla bağlantısının modellenmesine karar vermiştir. Böylelikle U şeklinde taş duvar inşa edilmiştir. Araştırmacılar da bu yöntemin kullanımının uygun olacağı kanaatine varmışlardır. Duvar geometrileri için bölgeyi temsil eden boyutlar kullanılmaya özen gösterilmiştir. Duvar numuneleri 1:2 ölçeğinde inşa edilmiştir.

Duvar numunelerin detaylı çizimleri Şekil 3.30'da görülmektedir. Duvarlar birkaç kilit taşının yeri belli olan bir projeye bağlı kalınarak, deneyimli bir taş ustası tarafından inşa edilmiştir. Kilit taşlar Şekil 3.30'de griye boyanmıştır. Duvar cidarları arasında yeterli bağlantıyı sağlayacak taş şekilleri seçilmiştir. Bu yöntem ile duvara etki edecek yüklemeler homojen şekilde tüm duvar kalınlığına yaymak hedeflenmiştir. Moloz taş tipolojisini düzensiz taş duvar (IRG-Irregular Masonry Bold) ve düzenli taş duvar (REG-Regular Masonry Bold) olarak iki şekilde ele alınmıştır. Şekil 3.30a ve 3.30b'de detaylar verilmektedir. Taş birimlerin boyları yaklaşık olarak 0,3 m genişliğinde ve 0,25 m yüksekliğindedir.



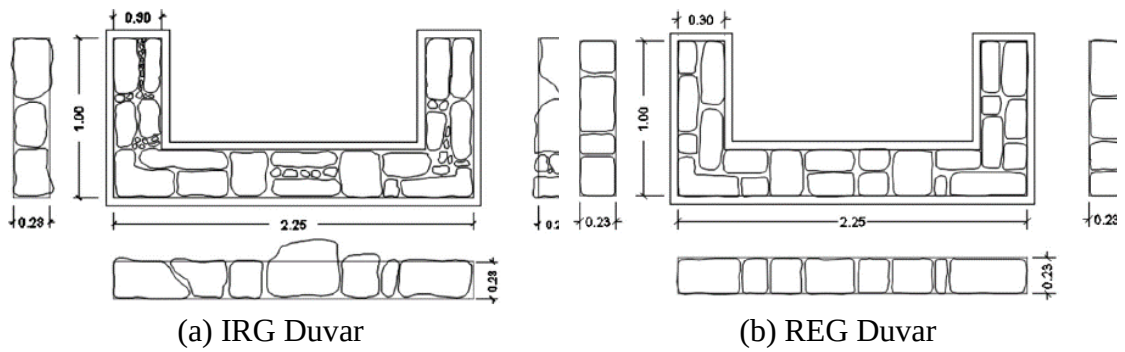
(a) IRG Duvar



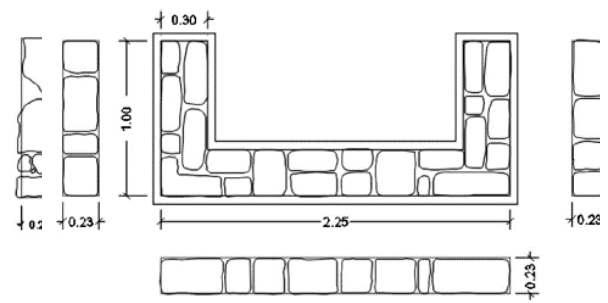
(b) REG Duvar

Şekil 3.30. Duvar görüntüleri ve taş dizilim detayları (m) (Maccarini et al. 2018)

Şekil 3.31’de her iki duvar numunesinin enine kesit detayı gösterilmektedir. Taş birimleri boylarının uygun olması ile duvarların cidarlarını oldukça iyi temsil ettiği düşünülmektedir. Ayrıca IRG duvarlarda birimler arası boşluklar aynı taş malzemeden daha küçük malzemeler ile doldurulmuştur.



(a) IRG Duvar



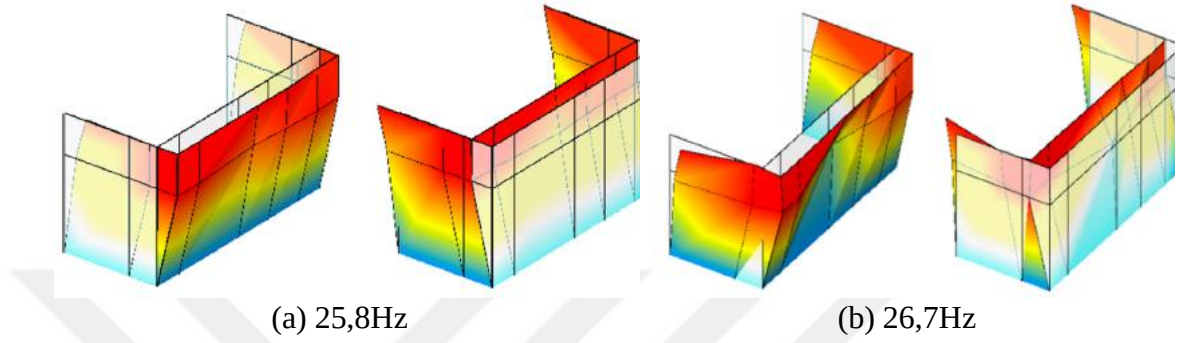
(b) REG Duvar

Şekil 3.31. Duvar planları ve ilk katman kesitleri (m) (Maccarini et al. 2018)

- **Deneyisel Modal Analiz**

Deneyisel modal analiz testleri bir yapının doğal frekanslara ve titreşim modları bakımından dinamik kimliğin elde edilmesini amaçlar. Bu bilgiler ise o yapının sayısal

modellemesinin kalibrasyonu için gereklidir. Deneysel modal analiz testleri tek eksenli ivme ölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki duvarda da ilk mod oldukça benzer çıkmıştır. Bu durum duvar morfolojisinden çok yapının geometrisinin ilk moda etkisinin olduğunu göstermektedir. Şekil 3.32’de her iki duvar tipolojisi için mod şekilleri ve frekans değerleri verilmektedir.



Şekil 3.32. İlk mod şekilleri ve frekans değerleri (a) IRG duvar; (b) REG duvar

- **Test Prosedürü**

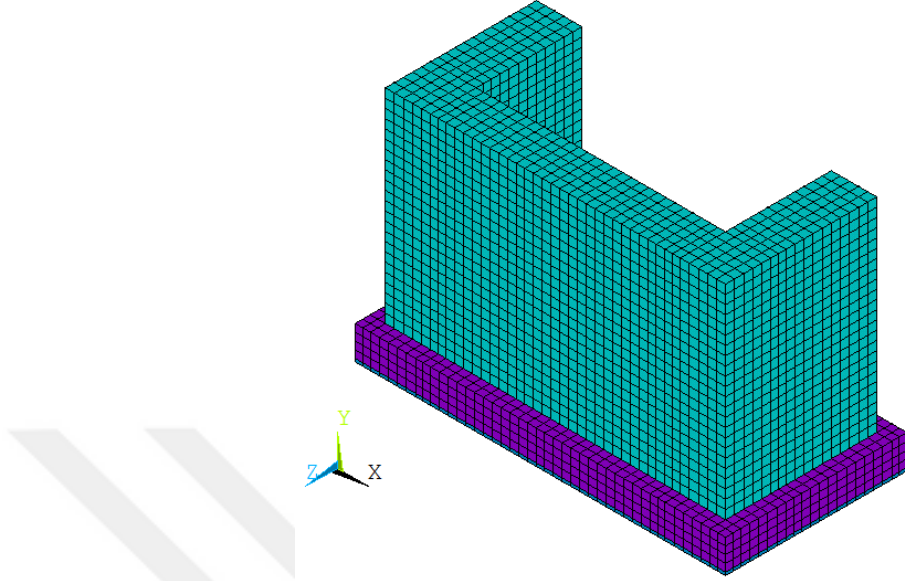
Duvar modelinde düzlem dışı yükleme 1,65 x 1,36 m boyutlarında bir hava yastığı ile verilmiştir. Hava yastığı yüklemeyi duvarın her yerine düzgün yayılı şekilde dağıtabilmesi için çelik levha kullanılmıştır. Çelik levha ile reaksiyon duvarı arasında çelik profiller ile bağlantı gerçekleştirilmiştir. Bu profiller ile duvar çeperi arasına yerleştirilen yük hücreleri ile duvara uygulanan yük kayıt altına alınmıştır.

Enine duvarlara üst yapıdan gelen sabit yükü temsil için 10 kN mertebesinde yük uygulanmıştır. Bu yüklerin duvarlara düzgün yayılması amacıyla çelik profiller uygulanmıştır. Yükleme sonucu duvarlarda yaklaşık olarak 0,05 MPa’lık bir eksenel gerilme oluşmuştur. Yatay yükleme sadece ön duvarda, bu eksenel yüklemeler sonrasında uygulanmıştır.

- **Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması ve Doğrulaması**

Duvar elemanlarının sonlu eleman modeli ANSYS yazılımında gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modellerinde SOLID65 elemanı kullanılmıştır.

Malzeme modeli olarak beş parametrelili Willam-Warnke (1975) modeli (CONC) kullanılmıştır. Şekil 3.33’de duvarların sonlu eleman modelleri verilmektedir.



Şekil 3.33. Maccarini et al. duvar numunelerinin sonlu eleman modeli

Deneyde deneysel modal analiz testleri yapılmıştır. Bu testler neticesinde ilk mod şekli ve frekans değerleri ışığında oluşturulan sonlu eleman modelinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.10’da hem deneysel modal analiz sonuçları hem de teorik modal analiz sonuçları verilmektedir. Çalışmada deneysel ve teorik modal analiz sonuçları da kalibre edilmiştir. Araştırmacıların 1. ve 2. modlarda sırasıyla IRG duvarda hata oranları %0,7 ve %9,4 iken, bu çalışmada %0 ve %7,5; REG duvarda %3,1 ve %11,4 iken, bu çalışmada %2,6 ve %10 mertebesine kadar düşürülmüştür.

Çizelge 3.10. Teorik ve deneysel frekansların karşılaştırılması

	IRG Duvar				REG Duvar			
	Mod 1 (Hz)	Hata (%)	Mod 2 (Hz)	Hata (%)	Mod 1 (Hz)	Hata (%)	Mod 2 (Hz)	Hata (%)
Deneysel	25,8	-	33,3	-	26,7	-	34,9	-
Maccarini et al.	25,6	0,7	30,1	9,4	25,8	3,1	30,9	11,4
Bu çalışma	25,8	0,0	30,8	7,5	26,0	2,6	31,4	10

Çizelge 3.11’de her iki duvar tipi için duvar elemanının ve alt kısımdaki betonarme temelin elastisite modülü, poisson oranı ve yoğunluk değerleri verilmektedir. Araştırmacılar duvar modelinin zemin ile bağlantısının ankastre olmadığını, bu sebeple

bu bağlantıyı bir yüzey elemanı tanımlayarak modellediklerini belirtmişlerdir. Bu çalışmada ise bu yüzey elemanı oldukça ince bir tabaka olarak tanımlanmıştır. Tabakanın alt kısmı tamamen ankastre olarak modellenmiştir. Bu tabaka kısmı için herhangi bir ağırlık, çekme dayanımı ve basınç dayanımı tanımlanmayıp sadece 13 MPa değerinde bir elastisite modülü tanımlanmıştır.

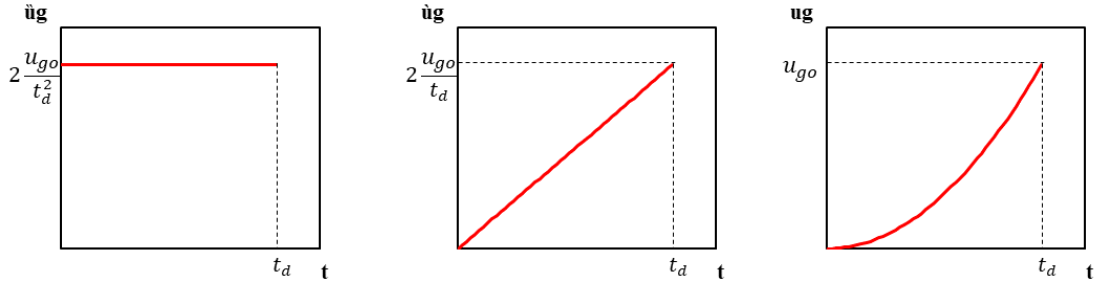
Çizelge 3.11. Sonlu eleman modelinde tanımlanan malzeme özellikleri

		IRG Duvar	REG Duvar
Duvar Elemanı	Elastisite Modülü (MPa)	2.850	3.600
	Poisson Oranı	0,33	0,39
	Yoğunluğu (kg/m ³)	2.430	2.495
Betonarme Temel	Elastisite Modülü (MPa)	31.000	31.000
	Poisson Oranı	0,2	0,2
	Yoğunluğu (kg/m ³)	2.400	2.400
Duvar-Zemin Tabakası	Elastisite Modülü (MPa)	13	13

Sonlu eleman modelinde düzlem dışı yükleme prosedürünün uygulanmasında farklı bir yol izlenmiştir. Şöyle ki; yatay kuvvetin düzgün yayılı yük olarak etki ettirilmesi durumunda en büyük kuvvet sonrası yükte azalma yazılımında kullanılan analiz yöntemi ile gerçekleştirilmediğinden tepe sonrası davranış hesaplamamaktadır. Bu sebeple duvar elemanın tabanından, dinamik bir etki oluşturabilecek zaman diliminde sabit bir ivme uygulanmıştır. Bu mesnet hareketiyle modelin bir yönde devrilmesi amaçlanmıştır (dinamik itme analizi). Böylelikle duvar elemanının yanal yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

- **Yükleme Protokolü**

Duvar elemanında uygulanması planlanan ivme kuvveti Şekil 3.34’de basitçe gösterilmektedir. İvme yüklemesinin düzgün yayılı ve sabit olmasının sebebi, deney düzeneğinde kullanılan hava yastığının, duvara düzgün yayılı bir yük uygulamasıdır. Düzgün yayılı ivme kuvveti ile deney düzeneğinde uygulanan yük protokolüne sadık kalınması amaçlanmıştır.



Şekil 3.34. Duvar modellerine uygulanan mesnet ivme-hız-yer değiştirme yükleri

İvmenin duvar elemanın düzlem dışı göçmesine sebep olabilecek şiddette ve uygulama zamanında olması oldukça önemlidir. t_d değerinin belirlenmesinde Chopra (2001)'da oldukça detaylı bir açıklama bulunmaktadır. Bu çalışmada $t_d/T_n=1/2$ oranı ile devam edilmiştir. Bu noktada sistemin göçmesine sebep olacak yer değiştirme u_{go} değerinin t_d zamanında olduğu düşünüldüğünde u_g fonksiyonu;

$$u_{go} = at_d^2 \quad (3.29a)$$

$$a = \frac{u_{go}}{t_d^2} \quad (3.29b)$$

$$u_g = u_{go} \left(\frac{t}{t_d} \right)^2 \quad (3.29c)$$

Şeklinde belirlenir. Bu noktada sistemde t_d zamanında oluşacak yer değiştirmenin u_{go} belirlenmesi gerekmektedir. Ele alınan deney düzeneğinde IRG duvarın yanal yük kapasitesi 41 kN, REG duvarın ise 47.5 kN mertebelerindedir. Bu yanal yük kapasite değerleri, sistemlerin modal analizinden elde edilen kütle katılım oranları ve duvarın kütlesi göz önüne alındığında, IRG duvar için maksimum yanal ivme;

$$F = M_d \times \alpha \times S_a \quad (3.30)$$

Burada F yanal yük kapasitesi (41 kN), M_d duvar ağırlığı (4,65 ton), α kütle katılım oranı (0,72) ve S_a ise duvarın bu kapasiteye ulaşmasını sağlayan ivme değeridir

(12,4 m/s²). Bu S_a değeri t_d zamanında oluşacak u_{go} değeri Denklem 3.29a'ya bağlı alınarak 4,657 mm olarak belirlenir. Bu durumda IRG duvar sistemine etki ettirilecek yer değiştirme fonksiyonu;

$$u_g = 4.657 \left(\frac{t}{0.019838} \right)^2 \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (3.31)$$

Şeklinde belirlenir. Toplam analiz süresi 0,09 s alınmıştır. Analizin 0,09 saniyeye kadar sürdürülmesinin sebebi darbe etkisinden sonra başlayan devrilme hareketinin t_d zamanında sonra da devam etmesidir. Tepe yer değiştirmesi yaklaşık 100 mm mertebelerine kadar ulaşmaktadır. Bu değer deneysel koşullara göre düzenlenebilir.

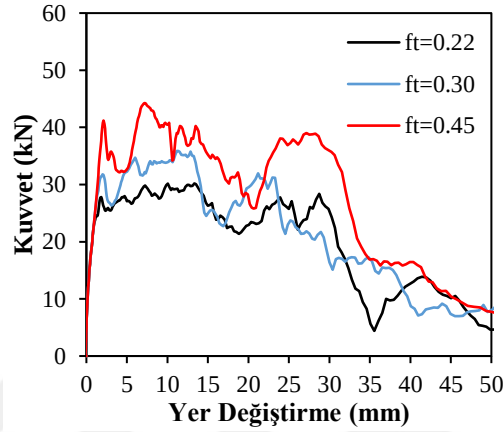
Aynı işlem akışı REG duvar için de yapılmıştır. Bu duvar modelinde F yanal yük kapasitesi 47,5 kN, M_d duvar ağırlığı 4,75 ton, α kütle katılım oranı 0,74 ve S_a ise duvarın bu kapasiteye ulaşmasını sağlayan ivme değeri ise 13,53 m/s² olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında REG duvar için sisteme etki ettirilecek yer değiştirme fonksiyonu ise aşağıda verilmektedir.

$$u_g = 5.011 \left(\frac{t}{0.019246} \right)^2 \quad 0 \leq t \leq t_d \quad (3.32)$$

• *Sonlu Eleman Modelinin Analizi ve Doğrulaması*

Araştırmacılar deneysel çalışmalarının yanında elastisite modülü, yoğunluk, poisson oranı değerleri Çizelge 3.12'de verildiği gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modellerinde basınç dayanımları araştırmacılar tarafından IRG duvar için 2,8 MPa, REG duvar için ise 3,6 MPa olarak önerilmiştir. Bu değerler bu çalışmada da kullanılmıştır. Çalışmada çekme dayanımlarını her iki duvar için basınç dayanımının %1 değerleri (IRG için 0,025 MPa, REG için 0,036 MPa) kullanılmıştır. Araştırmacılar duvar yapımında kullanılan harcın basınç dayanımının yaklaşık olarak 5 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Bu değerden yola çıkarak kullanılan harcın çekme dayanımının 0,3-0,5 MPa mertebelerinde olacağı, araştırmacıların sonlu eleman modellerinde kullandıkları çekme

dayanımı değerlerinin oldukça düşük olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada duvarların çekme dayanımları IRG ve REG duvarlar için sırasıyla 0,45 MPa ve 0,48 MPa olarak kabul edilmiştir. Çekme dayanımının kuvvet-yer değiştirme eğrilerine etkisi sadece IRG duvarda yapılan parametrik çalışma ile Şekil 3.35’de verilmektedir. Çekme dayanımının artması duvar kapasitesinin artmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

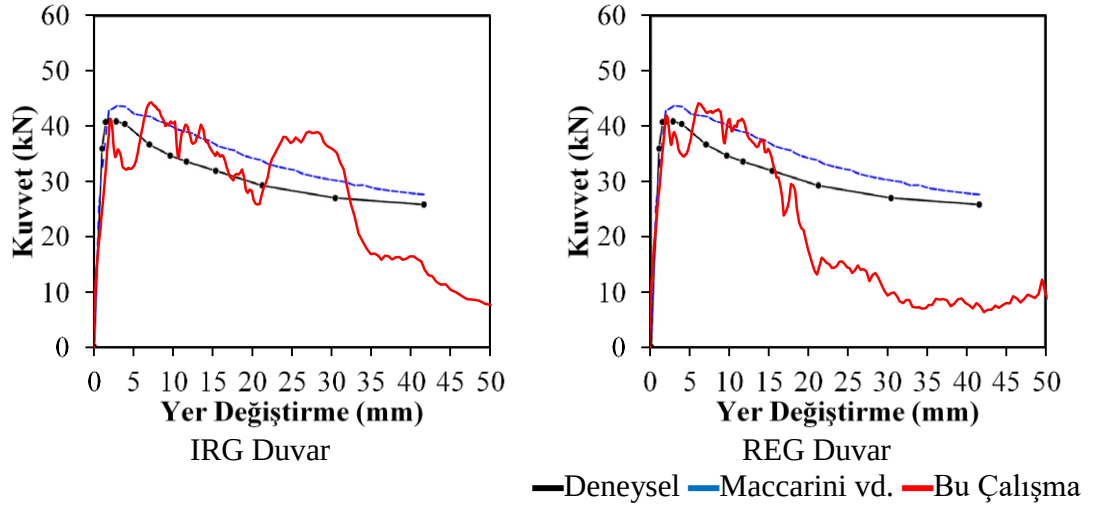


Şekil 3.35. f_t değişimi ile kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin değişimi

Çizelge 3.12. IRG ve REG duvarlarının sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri.

		IRG Duvar	REG Duvar
Duvar Elemanı	Elastisite Modülü (MPa)	2.850	3.600
	Açık Çatlak Katsayısı β_t	0,02	0,02
	Kapalı Çatlak Katsayısı β_c	0,20	0,20
	Çekme Dayanımı f_t (MPa)	0,45	0,48
	Basınç Dayanımı f_c (MPa)	2,80	3,60

Sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri ve malzeme modeline özel parametreler Çizelge 3.12’de bir arada verilmektedir. Bu parametreler ışığında her iki duvar tipolojisi için deneysel veriler, araştırmacının yapmış olduğu analitik eğri ve bu çalışma sonucu elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.36’da verilmektedir. Eğrilere bakıldığında önerilen yükleme protokolünün doğru bir sonuca ulaşmada oldukça başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 3.36. Deneysel ve analitik kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

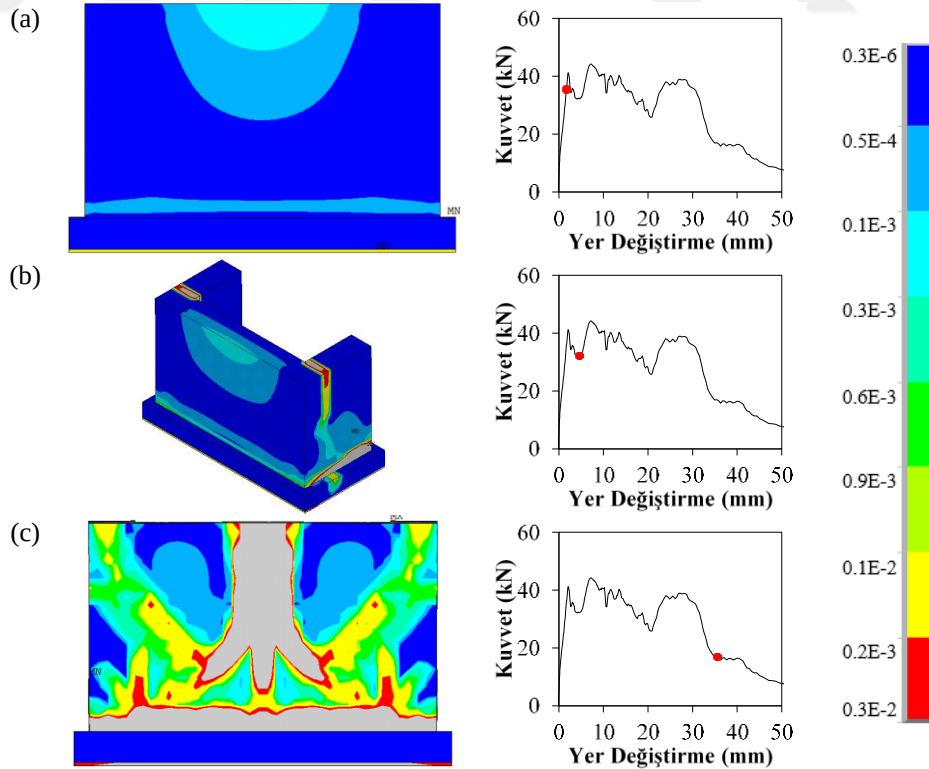
Analitik modelden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerin deneysel sonuçlara oldukça yakın olması, kuvvet ve yer değiştirme kapasitesi açısından oldukça önemlidir. Ancak yığma duvarlarda özellikle kinematik modellerin oluşturulması ve geliştirilmesinde duvar elemanın kırılma biçimi önemli bir rol oynamaktadır (Kocaman et al. 2019). Bu sebeple sonlu eleman modeli üzerinde yapılacak çalışmalarda sadece bu eğrilerin doğrulaması ile değil aynı zaman da duvar modelinin yıkılma mekanizmasının da deneysel sonuçlar ile örtüşmesi gerekmektedir. Bu noktada IRG duvar dikkate alınmıştır.

Şekil 3.37’de araştırmacıların sunduğu, deney sonrası IRG duvar modelinde oluşan çatlaklar verilmektedir. Duvarda neredeyse simetrik şekilde ön duvarda çatlaklar gözlemlenmektedir. Test sırasında U duvarın arka yüzeylerinin hava yastığı ve diğer ekipmanlar sebebiyle takip edilemediği belirtilmiştir. Ek olarak test düzeneğinin sökülmesinden sonra araştırmacılar, dikine olan duvarlardan başlayan çatlakların ön duvarın köşesinden önüne doğru ilerlediğini belirtmişlerdir. Bu durumun düzlem dışı eğilme modundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar lineer rejimin sonunda ön duvarların dış yüzeylerinde herhangi bir çatlak bulunamadığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 3.37. Deney sonrası IRG duvarda meydana gelen çatlaklar

Şekil 3.38'e bakıldığında sonlu eleman analizinin farklı üç safhasında duvar elemanın şekil değiştirme görüntüsü verilmektedir. Duvar elemanın maruz kaldığı şekil değiştirme ışığında elastik kısımda herhangi bir çatlak oluşmamaktadır (Şekil 3.38a). Kuvvet kapasitesi sonrasında yan duvarlar ile ön duvar arasında ciddi şekil değiştirmeler görülmektedir (Şekil 3.38b). Bu durum duvarı deneysel davranışında da görülmektedir. Aynı zamanda yer değiştirmenin yaklaşık 35 mm olduğu zaman diliminde ön duvarda deneysel hasara benzer, simetrik bir çatlak mekanizması gözlemlenmektedir (Şekil 3.38c). Bu yine deneysel olarak elde edilen çatlak biçimi ile uyushmaktadır.



Şekil 3.38. IRG duvarın sonlu eleman modelinden elde edilen şekil değiştirme görüntüleri.

3.3. Deneysel Doğrulama Sonucunda Değerlendirmeler

Bu bölümde çalışmanın sonraki kısımlarında yapılacak olan sonlu eleman modellerini doğruluğunu göstermek adına deneysel çalışmalar ışığında analiz yöntemi/yöntemleri kalibre edilmiştir. 5 farklı araştırmacı tarafından toplam 25 duvar modellenmiştir. Modellenen duvarlarda düzgün kesme taşlı harçsız, iki cidarlı moloz taş, iki cidarlı düzgün kesilmiş moloz taş, üç cidarlı duvar gibi farklı tipolojide duvarlar bulunmaktadır. Duvarlarda 23 düzlem içi, 2'si ise düzlem dışı davranışı belirlenmiştir. Yapılan sonlu eleman modellerinden çıkarılan sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ ANSYS yazılımına ait SOLID65 elemanı yığma duvarların kullanımı için uygundur.
- ✓ Sonlu eleman modellerinde kullanılan Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu yaklaşımı ve bu yaklaşıma ek olarak tanımlanan birleştirilmiş malzeme modeli yığma duvarlarda kullanıma uygundur.
- ✓ Yapılan analizler neticesinde yığma duvarların hem düzlem içi hem de düzlem dışı davranışlarının doğrulandığı, ele alınan malzeme ve elemanın her iki yüklemeye de uygun olduğu görülmektedir.
- ✓ Yığma duvarlarda eksenel gerilmenin yaklaşık 0,50 MPa ve aşağıda olduğu durumlarda, herhangi bir plastisite eğrisine gerek kalmaksızın çatlamanın dikkate alındığı analizler doğru ve kabul edilebilir kuvvet-yer değiştirme eğri sonuçları sunmaktadır. Belirtilen eksenel gerilmenin üstünde gerilmeye sahip duvarlarda ise basınç altında plastistik davranışın dikkate alınmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.
- ✓ Deney mekanizmasında ve/veya değerlendirilecek duvarda bir basınç testinin yapılmasına imkân yoksa, bu bölümde literatür ışığında sunulan idealize $\sigma-\varepsilon$ eğrisi doğruya yakın sonuçlar sunmaktadır. Araştırmacılar yığma duvarlarda bu eğriyi kullanabilirler.

✓ Deney kapsamında yapılan basınç testleri neticesinde elde edilen σ - ε eğrileri kullanılarak yapılan analizler gerçeğe yakın sonuçlar sunmaktadır. Ancak bu eğrileri birbirinden farklı olması ve elastisite modülü, basınç dayanımı gibi önemli parametrelerin kalibrasyonu ile daha iyi hale gelmesi göz önüne alındığında, deneysel σ - ε eğrileri yaklaşık sonuç vermeden öteye gidememektedir. Bu sebeple ele alınacak duvarın deneysel basınç testine tabi tutulması birçok açıdan fayda sağlasa da kalibrasyon mekanizmasına tabi tutulması gerekmektedir.

✓ Yığma duvarlarda kuvvet-yer değiştirme kapasitelerinin yanında yıkılma mekanizmasının irdeleneceği çalışmalarda, duvarların çevrimsel yükleme kullanılarak analizlerinin gerçekleşmesi önerilmektedir. Ele alınan örneklerde analitik hasar mekanizmalarının deneysel hasar ile oldukça uyduğu gözlemlenmiştir.

Yukarıda belirtilen sebepler sonucunda sonraki bölümde yapılacak olan cami modellerinde SOLID65 elemanı ile Willam-Warnke göçme kriteri kullanılacaktır.

4. SONLU ELEMAN MODELLERİNDE KULLANILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİ

Bu çalışma kapsamında tarihi camilerin ötelenme ve kapasitelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu hedefe ele alınacak sonlu eleman modelleri kullanılarak varılacaktır. Ancak tarihi camilerin sayıca fazlalığı, bölgeden bölgeye tasarım anlayışının farklı olması, farklı bölgelerde bulunmaları gibi oldukça çeşitli parametreler karşımıza çıkmaktadır. Bu parametrelerin fazlalığı sebebiyle daha basit yaklaşımlar düşünülmüştür.

Cami modelleri dinamik analizi öncesinde her bir taşıyıcı elemanın malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Yığma yapılarda malzeme özellikleri tahribatlı/tahribatsız deneyler yardımıyla belirlenmektedir. Ancak taşıyıcı elemanı meydana getiren yapı malzemesinin taş olması birçok belirsizliği de beraberinde ortaya çıkarmaktadır. Aynı ocaktan, aynı numuneden alınan aynı tür taşların bile malzeme özelliklerinin farklı olması taş ile meydana gelen taşıyıcı elemanlarda genelleştirme yapılmasını zorlaştırmaktadır. Taşıyıcı elemanlarda ise işçilik oldukça önemli bir etkidir. Büyük boyutlarda inşa edilen yığma elemanın her bölgesinde aynı düzenin gösterilememesi, elemanın özellik bakımından homojen davranmasını engellemektedir. Bu karmaşık duruma pencere boyutları ve yerleri, taş büyüklüğü, taşın cinsi, harcın çeşidi, bölgesel çevre etkisi vb. birçok etken eklenince, yığma elemanların malzeme özelliklerinin belirlenmesi çok zor olmaktadır. Bu yığma eleman tarihi bir yapı olunca zamanla bilinen ve bilinmeyen etkenler de devreye girmektedir.

Belirtilen sebepler tarihi yapılarda malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorluğunu açıklamaktadır. Ancak bu yapıların özellikle deprem gibi dinamik etkilerden korunması amacıyla davranışlarının belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmanın bu kısmında yığma yapılarda kullanılmak üzere yönetmeliklerin önerdiği bağıntılar irdelenmiştir. Literatürde laboratuvar ortamında yapılan tahribatlı yöntemlerle bu bağıntılar karşılaştırılmıştır. Tarihi yapılarda kullanılması daha uygun tahribatsız yöntemler irdelenerek tarihi camilerin taşıyıcı elemanlarında kullanılabilecek malzeme özellikleri belirlenmiştir.

4. SONLU ELEMAN MODELLERİNDE KULLANILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİ

Çalışmanın literatür araştırmaları kısmında yığma yapıların malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalar ve farklı yönetmelikler irdelenmiştir. Kullanılan tahribatlı ve tahribatsız yöntemler neticesinde yığma duvarların basınç dayanımları (f_c) ve elastisite modülleri (E) belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de farklı çalışmalardan elde edilen tarihi yapıların malzeme özellikleri verilmektedir.

Çizelge 4.1. Literatürde bulunan bazı yığma yapıların malzeme özellikleri

Çalışma	Yapı Tipi	E (MPa)	f_c (MPa)
Altunışık et al. (2016)	Cami	1.600	2,40
Altunışık et al. (2017)	Burç	2.400	8,92
Altunışık et al. (2021)	Cami	1.500	1,80
Apostolopoulos and Sotiropoulos (2008)	Kilise	2.750	-
Aşıkoğlu et al. (2019)	Cami	1.500	4,20
Bal et al. (2010)	Cami	2.500	2,00
Bayraktar et al. (2008)	Minare	2.000	-
Betti and Vignoli (2008)	Kilise	2.000	4,00
Boscato et al. (2014)	Kilise	2.036	7,30
Boscato et al. (2014)	Kilise	2.261	8,36
Cattari et al. (2015)	Bina	2.843	9,50
Çakır (2021)	Cami	8.500	-
Dinani et al. (2021)	Cami	1.050	2,10
Endo et al. (2017)	Duvar	5.000	4,00
Endo et al. (2017)	Kemer	2.000	4,00
Ercan and Nuhoglu (2014)	Su Kemerli	871	10,49
Gentile et al. (2014)	Kule	2.970	-
Karantoni and Dimakopoulou (2021)	Cami	1.325	2,65
Kazaz et al. (2019)	Kule	3.911	5,21
Kocaman et al. (2019)	Cami	785	3,92
Mangia et al. (2016)	Cami	1.500	3,00
Mariano et al. (2016)	Bina	10.280	20,55
Mariano et al. (2016)	Bina	2.010	6,68
Milani and Valena (2015)	Kilise	1.600	1,40
Mustafaraj and Yardım (2012)	Cami	2.100	2,50
Nohutçu et al. (2015)	Cami	1.210	7,42
Panto et al. (2016)	Kemer	1.650	3,30
Portioli et al. (2011)	Cami	430	3,00
Ramos et al. (2010)	Kule	1.974	-
Sadan et al. (2007)	Cami	3.500	-
Soyluk and Tuna (2011)	Cami	8.500	-
Şeker (2011)	Cami	8.370	-
Torres et al. (2017)	Katedral	1.560	-
Türker ve Yanık (2020)	Cami	2.000	-
Usta and Bozdağ (2021)	Cami	3.000	-
Vintzileou et al. (2015)	Bina	840	4,33

4. SONLU ELEMAN MODELLERİNDE KULLANILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİ

Tarihi yapılarda kullanılan basınç dayanımları 1,40-20,55 MPa arasında, elastisite modülü 430-10.280 MPa arasında değişmektedir.

Çizelge 4.2’de literatürde bulunan çalışmalardan derlenen üç cidarlı duvarların tahribatlı yöntemlerle basınç dayanımı ve elastisite modülü belirlenmiş ve değerleri verilmiştir. Camilerde taşıyıcı duvarların ekseriyeti üç cidarlı olması sebebiyle üç cidarlı duvarlar üzerinde yapılan çalışmalar seçilmiştir. Çizelge 4.2’de duvarların basınç dayanımları, elastisite modülleri ve bazı özellikleri verilmektedir. Duvarların basınç dayanımı 1,30-6,40 MPa arasında, elastisite modüllerinin ise 517-7.000 MPa arasında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 4.2. Literatürden elde edilen üç cidarlı duvarların özellikleri

Araştırmacı	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	h/t oranı	h/l oranı	Tipoloji
Vintzileou and Tassios (1995)	2,10	7.000	2,00	3,00	Dış kesme taş, iç moloz dolgu duvar
	1,30	2.706	2,00	3,00	
	2,40	5.000	2,00	3,00	
	1,60	4.442	2,00	3,00	
	1,70	5.670	2,00	3,00	
	1,35	5.625	2,00	3,00	
Valuzzi et al. (2004)	1,45	2.390	1,75	2,80	Moloz duvar
	1,95	2.029	1,75	2,80	
	1,97	1.450	1,75	2,80	
	1,91	1.559	1,75	2,80	
	1,95	1.504	1,75	2,80	
	1,65	2.058	1,75	2,80	
	1,50	1.863	1,75	2,80	
Binda et al. (2006)	5,80	1.770	2,55	1,55	Dış kesme taş, iç moloz dolgu duvar
	6,40	2.085	2,55	1,55	
Silva et al. (2008)	2,30	780	1,80	3,70	Dış kesme taş, iç moloz dolgu duvar
	1,70	1.889	1,80	3,70	
	1,40	711	1,80	3,70	
	2,60	1.351	1,80	3,70	
Vintzileou and Miltiadou-Fezans (2008)	1,82	1.000	1,20	2,67	Dış kesme taş, iç tuğla eklemeli moloz dolgu duvar
	1,74	1.440	1,20	2,67	
	2,26	1.500	1,20	2,67	
Demir (2012)	3,62	488	4,00	1,00	Dış kesme taş, iç moloz dolgu duvar
	3,81	656	4,00	1,00	
	3,73	517	4,00	1,00	
	3,66	642	4,00	1,00	
Ortalama	2,45	2.236			

4. SONLU ELEMAN MODELLERİNDE KULLANILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİ

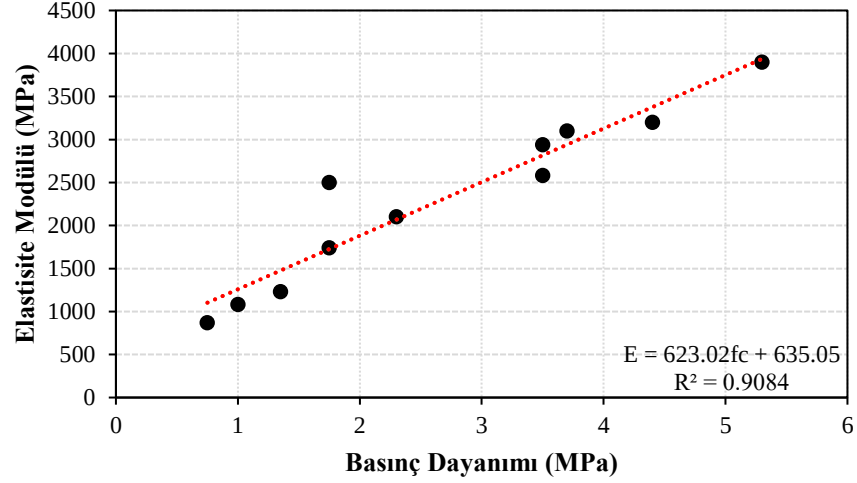
Çizelge 4.3’de Magenes and Penna (2009) tarafından önerilen yığma duvarların tipolojiye bağlı olarak değişkenlik gösteren basınç dayanımı, kayma dayanımı, elastisite modülü, kayma modülü ve birim hacim ağırlığı değerleri verilmektedir. Bu Çizelge Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan Tarihi Yapılar İçin Deprem Risklerinin Yönetim Kılavuzunda da (VGM) (2017) kullanılması önerilmektedir.

Çizelge 4.3. Yığma duvar malzemelerinin mekanik özellikleri (VGM 2017)

Duvar türü	Basınç dayanımı	Kayma dayanımı	Elastisite modülü	Kayma modülü	Birim hacim ağırlığı
	f_c (MPa)	τ_o (kPa)	E (MPa)	G (MPa)	w (kN/m ³)
Moloz taşlı yığma duvar	0,6-0,90	20-32	690-1.050	115-175	19
Kaba yonu taşlı yığma duvar	1,1-1,6	35-51	1.020-1.440	170-240	20
Kesme taşlı iyi bağlantılı yığma duvar	1,5-2,0	56-74	1.500-1.980	250-330	21
Yumuşak taşlı (kalker, tüf) yığma duvar	0,8-1,2	28-42	900-1.260	150-210	16
Düzensiz kesme taşlı, sıvalı yığma duvar	3,0-4,0	78-98	2.340-2.820	390-470	22
Kireç harçlı tuğla yığma duvar	1,8-2,8	60-92	1.800-2.400	300-400	18
Çimento harçlı yarı boşluklu tuğla yığma duvar	3,8-5,0	240-320	2.800-3.600	560-720	15
Boşluk oranı %45’den küçük olan tuğla yığma duvar	4,6-6,0	300-400	3.400-4.400	680-880	12
Boşluk oranı %45’den küçük düşey derzleri harçsız tuğla yığma duvar	3,0-4,0	100-130	2.580-3.300	430-550	11
Boşluk oranı %45-65 arasında bulunan beton bloklu yığma duvar	1,5-2,0	95-125	2.200-2.800	440-560	12
Boşluğu doldurulmuş beton bloklu yığma duvar	3,0-4,4	180-240	2.700-3.500	540-700	14

Şekil 4.1’de, Çizelge 4.3’de önerilen basınç dayanımı ve elastisite modülü aralıklarının ortalaması alınarak bu iki verinin grafiği verilmektedir. Elastisite modülü basınç dayanımı ilişkisi $623f_c+635$ gibi belirlenmiştir. Bu da Magenes and Penna’nın tek bir α katsayısı yerine birinci dereceden bir polinomla ilişki verdiği anlaşılmaktadır. Ancak, duvar tipolojisinin basınç dayanıma etkisinin göz önüne alındığı görülmektedir. Çalışmada her ne kadar duvar tipolojisine göre mekanik özellikler ayrılrsa da tipolojiden bağımsız bir ilişki bulunmaktadır.

4. SONLU ELEMAN MODELLERİNDE KULLANILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİ



Şekil 4.1. Magenes and Penna (2009) basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi

Literatüre bakıldığında tarihi camilerin malzeme özelliklerinin belirlenmesinin zorluğu görülmektedir. Oldukça geniş aralıkta ve farklı yaklaşımlarla öneriler bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılacak malzeme özellikleri Çizelge 4.4'te verilmektedir. Değerler literatürde farklı yöntemlerle elde edilen sonuçlar ve duvar tipolojisi göz önüne alınmıştır.

Çizelge 4.4. Sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özellikleri

Cami Elemanı	f_t (MPa)	f_c (MPa)	γ (kN/m ³)	Poisson Oranı	$E=200f_c$	$E=750f_c$
Duvarlar	0,30	3,00	25	0,18	600	2.250
Çatı örtüsü (kubbe, tonoz vb.)	0,30	3,00	25	0,18	500	1.000
Kemerler	0,55	5,50	25	0,18	1.100	-
Fil Ayakları	0,55	5,50	25	0,18	1.100	-
Taş Sütunlar	1,00	10,00	25	0,18	10.000	-

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Bu çalışma kapsamın tarihi camilerin ötelenme ve yük kapasitelerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu hedefe ele alınacak sonlu eleman modelleri kullanılarak varılacaktır. Ancak tarihi camilerin sayıca fazlalığı, bölgeden bölgeye tasarım anlayışının farklı olması, farklı bölgelerde bulunmaları gibi oldukça çeşitli parametreler karşımıza çıkmaktadır. Bu parametrelerin fazlalığı sebebiyle daha basit yaklaşımlar düşünülmüştür.

Çalışmanın bu kısmında tarihi camilerin mekânsal genişlemesi dikkate alınarak sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında literatürden derlenen tarihi camilerin özellikleri verilerek, ele alınan kümeyi temsil edebilecek camiler seçilmiştir. Seçilen camilerin analizlerini gerçekleştirmek amacıyla sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinin oluşturulmasında dikkat edilen hususlar, kullanılan yaklaşımlar ve modellerin detayları bu kısımda sunulmaktadır.

5.1. Cami Tiplerinin Belirlenmesi

Geleneksel yapım tekniklerinde, yapıyı oluşturan duvar, fil ayağı, sütun, kubbe, tonoz vb. elemanlar yapıda hem taşıyıcılık hem de sınırlandırma görevi görmektedirler. Kubbe ile taşıyıcı elemanların örtünmesi, Osmanlı döneminde yerel malzemelerin kullanılması ile beraber yüzyıllar boyunca kullanılan bir teknik olmuştur.

Osmanlılar, hükmettikleri toprakların farklı yerlerinde birçok cami inşa etmişlerdir. Bu camilerin birçoğu günümüzde halen faal olarak kullanılmaktadır. Camilerin mimari gelişimi, bu yapıların daha basit bir kubbe mimarisine dönüşmesine yol açmıştır. Bu durum tip camilerin ortaya çıkmasına ve mekânsal genişlemenin de kapılarının aralanmasına yol açmıştır (Tuluk 2000).

15. yy. ortalarına kadar Osmanlı mimarları, İslam ve Selçuklu yapım gelenekleri ile kendi teknolojilerini geliştirerek, ana kubbenin bir duvarla ve/veya sütunla taşındığı açıklıklı kubbeli camiler ortaya çıkarmışlardır. Osmanlı mimarlarının Ayasofya ile

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

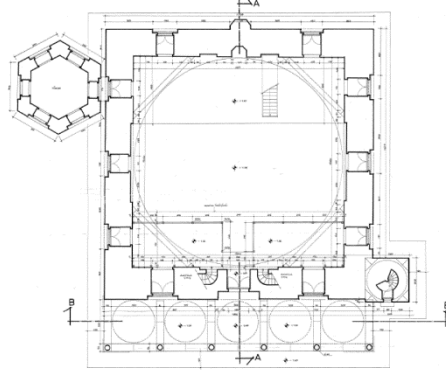
tanışmasından sonra ana mekânı mümkün olduğunca büyük bir kubbe ile örterek, ibadet alanının ferah tutulmasını amaçlamışlardır. Bu kubbenin belirli ölçülerin üzerine çıkmasını hedefleyen mimarlar, dört taşıyıcı duvarından sıyrılıp dört, altı ve sekiz ayaklı büyük bir çardağa benzeyen yapılar ortaya çıkarmışlardır (Tuluk 2000).

Camiler hem ekonomik hem de kültürel yönden oldukça önemli yapılardır. Ancak sayılarının fazla olması ve farklı mimari özelliklere sahip olması sebebiyle bu yapıların toplu olarak araştırması zor olabilmektedir. Bu sebeple, fazla sayıda cami çalışması yapan araştırmacılar İstanbul Mimar Sinan Camileri, Mimar Sinan Camileri, ya da belirli tarihler arasında inşa edilmiş veya belirli bir bölgede inşa edilmiş camiler üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Bu zorluk ve karışıklık sebebiyle bu çalışmada Tuluk (2000) tarafından cami mimarisine dayanarak oluşturulan sınıflandırma kullanılmıştır. Bu sınıflandırma caminin mimarına, yapım tarihine, yapım yerine bağımsız olarak sadece caminin mimari geometrisine bağlıdır. Çalışmada Tuluk'un önerdiği tipolojiye ek olarak oldukça yaygın görülen bir tipte eklenmiştir.

5.1.1. Tip 0

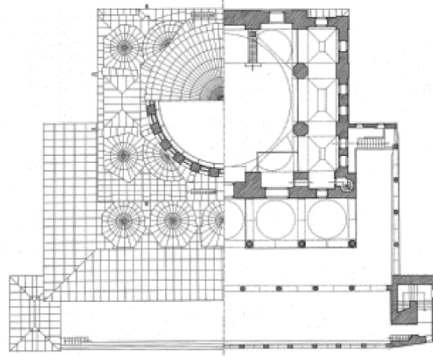
Bu tip mekân kurgusunda cami, kare olarak planlanmış, dört ana taşıyıcı duvar üzerinde bir büyük kubbeden meydana gelmektedir. Ana kubbe duvarların ortasındaki boşluğun çok büyük kısmını kapatmaktadır. Ana kubbeye ek olarak duvarların birleşim yerlerinde çeyrek kubbeye benzeyen ancak çatı kısmı düz olan geçiş elemanları bulunmaktadır. Bu tip Anadolu'nun farklı şehirlerinde oldukça yaygın olarak görülmektedir. Şekil 5.1'de bu tipe örnek olarak Van Hüsrev Paşa Cami'nin planı verilmektedir.



Şekil 5.1. Van Hüsrev Paşa camisi planı (Anonymous 2020a)

5.1.2. Tip 1

Bu tip mekânsal kurguda cami dikdörtgen olarak planlanmıştır. Dikdörtgenin tam ortasında kısa kenar boyutlarında bir kare alan, ana kubbe ile kapatılmıştır. Ana kubbenin sağ ve sol tarafında kalan alanlar ise camiye göre ya yarım kubbeler ile ya da sütunlar ile eşit bölünerek küçük kubbeler ile örtülmüştür. Bu tip kurguda güney mihrabın olduğu duvarda çıkıntıların görülmesi de yaygındır. Şekil 5.2’de bu tipe uygun olarak İstanbul Rüstem Paşa Cami’nin planı verilmektedir.



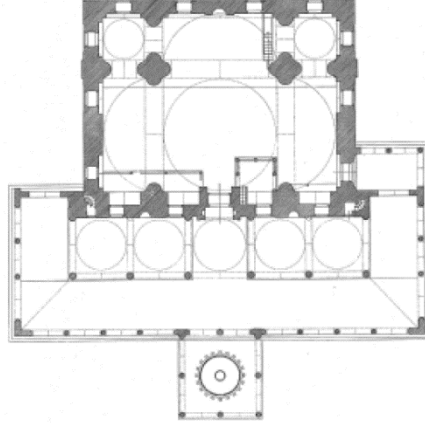
Şekil 5.2. İstanbul Rüstem Paşa camisi planı (Anonymous 2020a)

5.1.3. Tip 2

Tip 2 mekân kurgusu, oldukça nadir görülen bir mimari kurgudur. Dikdörtgen olarak planlanan caminin giriş kapısının bulunduğu duvara (kuzey duvarı) yaslı olarak diğer ekseninde simetrik bir kare plan ana kubbe ile örtülmüştür. Ana kubbenin doğu ve batı kısımları yarım kubbeler veya sütun destekleri ile küçük kubbeler ile örtülmüştür.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

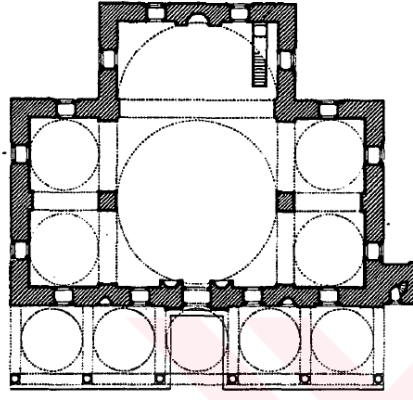
Ana kubbenin güney kısmı ise genellikle yarım kubbe ile kapatılmıştır. Aynı zamanda caminin kuzey doğu-batı kısımları kubbeler ile örtünmektedir. Bu tip mekân örgüsü Konya Selimiye Cami, Çankırı Ulu Cami ve İstanbul Üsküdar Mihrimah Sultan Cami'nde (Şekil 5.3) görülmektedir.



Şekil 5.3. İstanbul Üsküdar Mihrimah Sultan camisi planı (Anonymous 2020a)

5.1.4. Tip 3

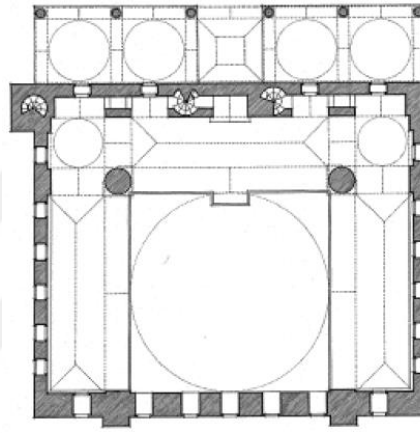
Bu mekân kurgusu Tip 2'ye oldukça benzemekle beraber en büyük farkı kuzey doğu-batı kısımlarında duvarların devam etmemesidir. Merkez kare açıklığın doğu-batı-kuzey kısımları genellikle yarım kubbeler ile örtülmüştür. Çok yaygın olmayan bu mekân kurgusu Manisa Muradiye Cami, İstanbul Çemberlitaş Atik Ali Paşa Cami'nde görülmektedir. Şekil 5.4'de bu tipolojiye örnek plan verilmektedir.



Şekil 5.4. İstanbul Çemberlitaş Atik Ali Paşa camisi planı (Tuluk 2000)

5.1.5. Tip 4

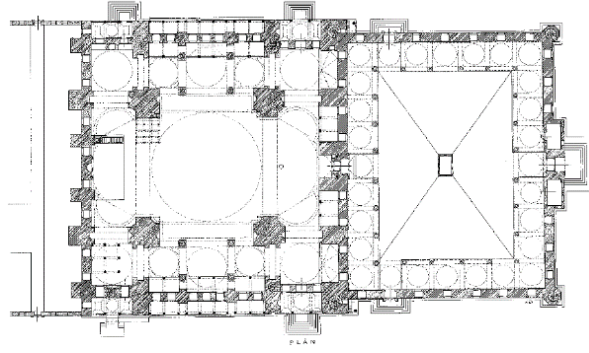
Bu mekân kurgusu da pek yaygın olmayan ve örneğine oldukça az rastlanır. Caminin ana kubbesi ortada kuzey duvarına yapışık halde bulunur. Bu merkezin doğu-batı ve güneyi yarım veya tam kubbeler ile örtülürken, güney doğu-batı kısımlarında tam kubbeler bulunur. Bu mekân kurgusuna örnek olarak Çorum Kargı Oğuz Köyü Cami ve İstanbul Eyüp Zal Mahmut Paşa Cami gösterilebilir. Şekil 5.5’de bu tipe örnek plan gösterilmektedir.



Şekil 5.5. İstanbul Eyüp Zal Mahmut Paşa camisi planı (Anonymous 2020a)

5.1.6. Tip 5

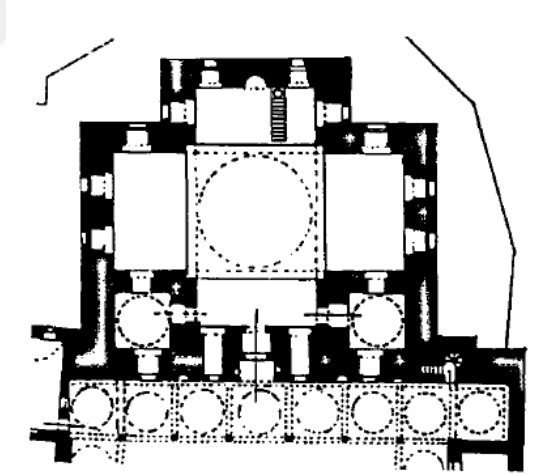
Bu mekân kurgusu Anadolu’nun farklı bölgelerinde oldukça sık görülmektedir. Birçok şehrin önemli camileri bu tip kurguya sahiptir. Merkez orta kubbenin dört bir yanı yarım kubbeler ile örtülmüştür. Ana kubbenin köşegenleri ise küçük kubbeler ile kapatılmıştır. Ortada fil ayakları ana kubbenin taşınmasından sorumludur. Bu yapı tipi Sultan Ahmet Cami, Süleymaniye Cami vb. oldukça önemli tarihi yapıların sahip olduğu mekân kurgusudur. Şekil 5.6’da bu tipolojiye örnek gösterilmiştir.



Şekil 5.6. İstanbul Süleymaniye camisi planı (Anonymous 2020a)

5.1.7. Tip 6

Bu mekân kurgusu Tip 5 ile oldukça benzemesine karşın, caminin kuzey doğu-batı kısımlarındaki duvarların devam ettirilmemesi ile meydana gelmektedir. Çok yaygın olmayan bu kurgunun örnekleri Payas Sultan Selim Cami ve Tosya Abdurrahman Paşa Cami olarak gösterilebilir. Şekil 5.7’de bu kurguya ait örnek plan verilmektedir.



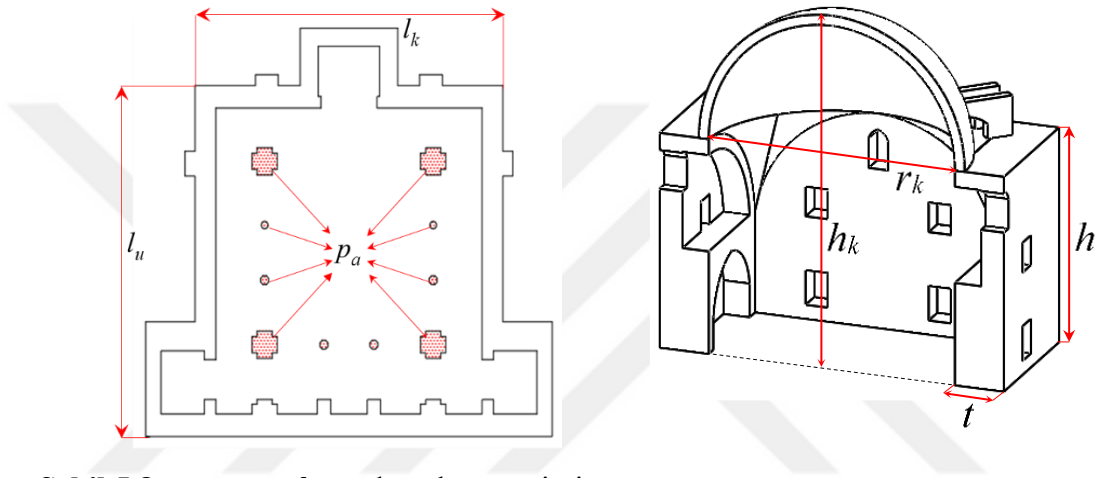
Şekil 5.7. Payas Sultan Selim camisi planı (Tuluk 2000)

5.2. Cami Parametrelerinin Belirlenmesi ve İncelenmesi

Ülkemizde çok farklı tipolojide, farklı bölgelerde birçok tarihi cami bulunmaktadır. Bu camilerin gruplandırılarak ele alınması hem araştırmacılar için hem de camilerin restorasyonu ve güvenliği için önemli olmaktadır. Bu çalışma kapsamında literatürde (Tuluk 2000; Sönmezer 2003; Şeker 2001; Çalık 2017) bulunan toplan 49 cami ele alınmıştır. Ele alınan camilerin bulundukları iller, yapıldıkları yüzyıllar, önceki

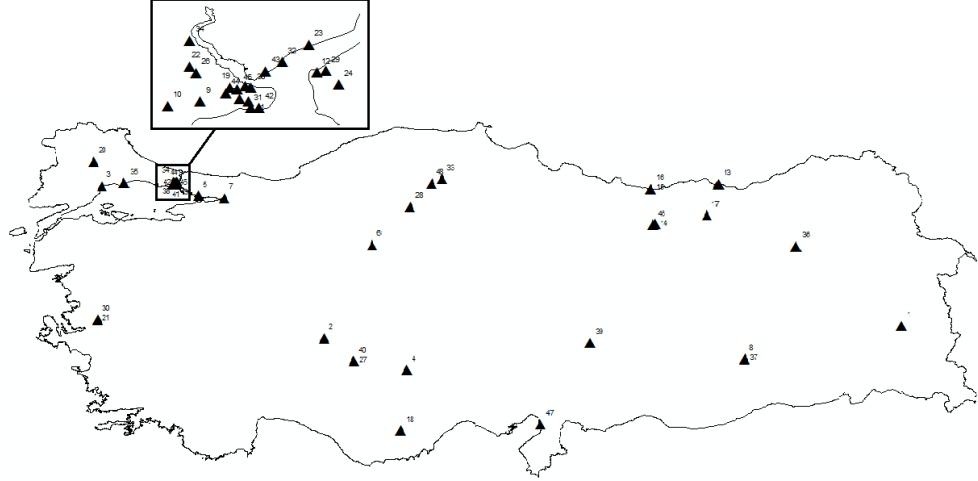
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

kısımda açıklanan tiplere göre tipleri, duvar kalınlıkları (t), yapı dikdörtgen ise kısa duvar uzunluğu (l_k), uzun duvar uzunluğu (l_u) (yapı eğer kare ise her iki sütunda da aynı duvar uzunluğu verilmiştir), yapının duvar yüksekliği (h), yapının kubbesinin kilit taşının zeminden yüksekliği (h_k), yapının ana kubbesinin çapı (r_k), eğer camide fil ayağı ve/veya serbest paye varsa onun alanı (p_a), yapının toplan alanı (t_a) ve yapının bulunduğu yerin 2019 deprem haritasında 475 PGA değeri PGA475 olarak parametreler belirlenmiştir. Çizelge 5.1’de camiler bu parametreler; detaylı olarak verilmiştir. Şekil 5.8’de parametrelerin cami modelleri üzerinde detaylı gösterimleri verilmektedir.



Şekil 5.8. Parametrelerin detaylı gösterimi

Ele alınan camiler 19 farklı ilde bulunmaktadır. Ankara, Çankırı, Çorum, Gümüşhane, Hatay, Kahramanmaraş, Kastamonu, Kırklareli, Mersin, Tekirdağ, Trabzon ve Van illerinden birer cami, Erzurum, Diyarbakır, Kocaeli ve Manisa illerinden ikişer, Giresun ve Konya illerinden dörder ve son olarak İstanbul ilinden 21 cami bulunmaktadır. Şekil 5.9’de camilerin bulundukları konumlar Türkiye haritası üzerinde işaretlenmiştir. Ele alınan camilerin %43,75’i İstanbul il sınırları içinde bulunmaktadır. Camilerin 12.yy eseri 1 adet, 15.yy ve 17.yy eseri 3’er adet, 1 adet 18.yy eseri, 5 adet 19.yy eseri ve 36 adet 16.yy eseri bulunmaktadır. Camiler, önceki kısımda açıklanan tiplere göre ayrıldığında, 18 adet Tip 0, 9 adet Tip 1, 3’er adet Tip 2, Tip 3 ve Tip 4, 11 adet Tip 5 ve 2 adet Tip 6’dan oluşmaktadır. Camilerin 24’ü (%50) Mimar Sinan tarafından inşa edildiği ve/veya uzaktan kontrol ettiği bilinmektedir. Bu durum ele alınan veri kümesinde Mimar Sinan Camilerinin, İstanbul sınırları içinde olması, Tip 0 ve Tip 5 olmaları ve genellikle 16. yüzyılda inşa edilmiş olmaları öne çıkmaktadır.



Numaralar Çizelge 5.1’de yapılan numaralandırmaya uyumludur.

Şekil 5.9. Camilerin bulundukları konumlar

Çizelge 5.1’de verilen parametrelerin her birinin birbirleri ile olan ilişkisini incelemek anlamlı bir sonuç çıkarmamaktadır. Bu sebeple duvar elemanlarının parametreleri ($t-l_k-h$) birbirleri ile olan ilişkilerinin yanında kubbe çapının kubbe yüksekliği ve toplam alan ile olan ilişkisi irdelenmiştir. Bu parametrelerin yanında serbest payesi olan camilerde paye alanı ile toplam alan arasında da ilişki irdelenmiştir. Şekil 5.10’da bu parametrelerin birbirleri ile olan ilişkileri verilmektedir.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Çizelge 5.1. Çalışmada ele alınan camiler ve parametreleri

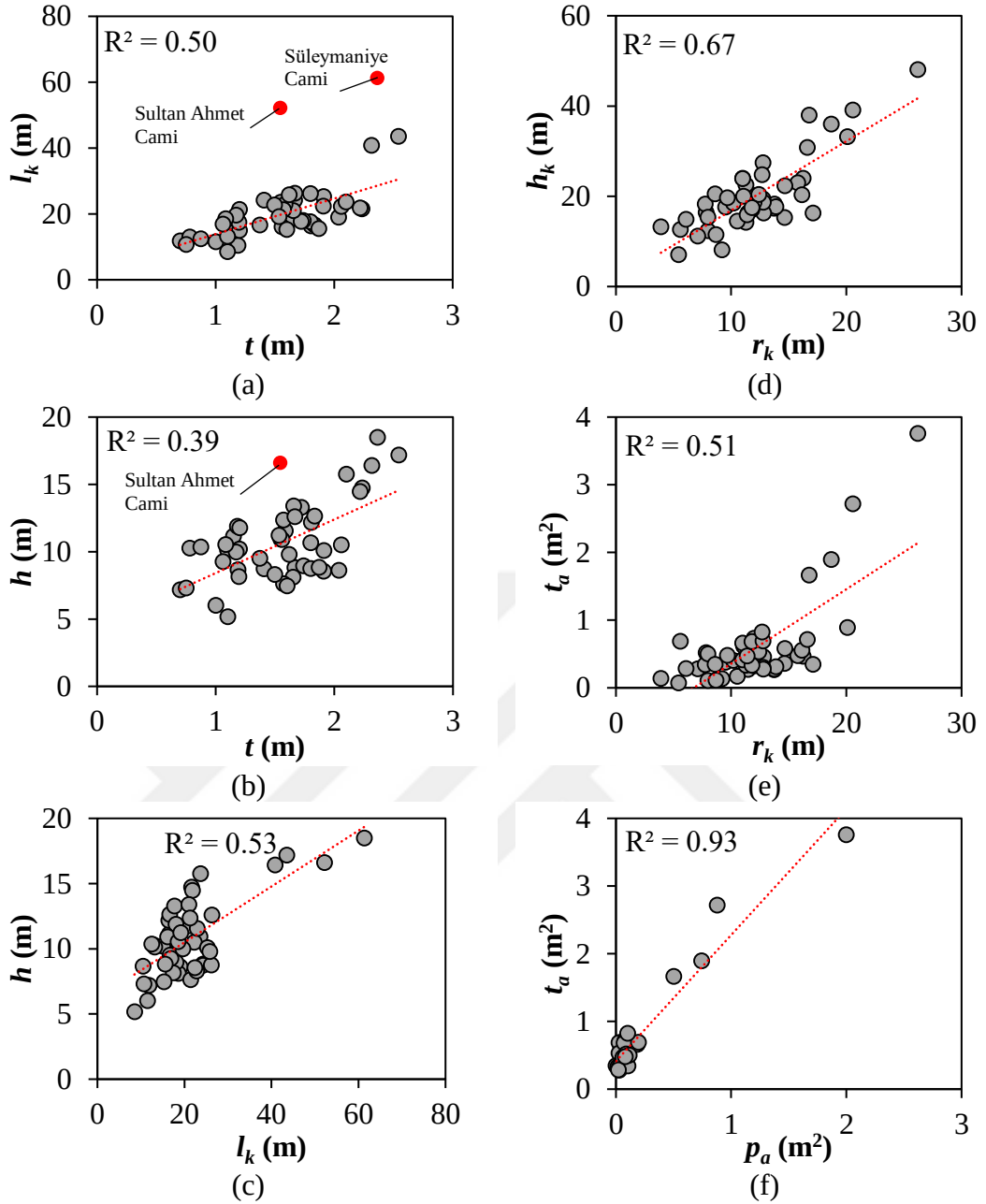
No	Cami Adı	İl	YY.	Tipi	t (mm)	l _k (mm)	l _u (mm)	h (mm)	h _k (mm)	r _k (mm)	p _a (m ²)	t _a (m ²)	PGA475 (g)
1	Hüsrev Paşa Cami	Van	16	0	2037	19000	19000	8605	15287	14629	0	361	0.273
2	Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami	Konya	16	0	1148	16519	16519	11148	16370	11481	0	273	0.257
3	Rüstem Paşa Cami	Tekirdağ	16	0	1804	16392	16392	12174	17370	13739	0	269	0.411
4	Karapınar II. Selim Cami	Konya	16	0	1833	16611	16611	12639	18306	13750	0	276	0.100
5	Çoban Mustafa Paşa Cami	Kocaeli	16	0	2234	21576	21576	14733	24000	16253	0	466	0.544
6	Cenabi Ahmet Paşa Cami	Ankara	16	0	1800	17603	17603	10657	17664	13881	0	310	0.151
7	Pertev Mehmet Paşa Cami	Kocaeli	16	0	2217	21783	21783	14474	23000	15789	0	475	0.683
8	Behram Paşa Cami	Diyarbakır	16	0	1548	23516	23516	10927	20317	16146	0	553	0.136
9	Haseki Hürrem Sultan Cami	İstanbul	16	0	1665	24197	24197	8810	14230	11300	0	586	0.408
10	Sivrikapı Hadım İbrahim Paşa Cami	İstanbul	16	0	1182	17996	17996	11880	20140	12000	0	324	0.419
11	Kadirga Sokollu Mehmed Paşa Cami	İstanbul	16	0	1201	21391	21391	11770	16300	12820	0	458	0.402
12	Üsküdar Şemsi Ahmed Paşa Cami	İstanbul	16	0	1187	10433	10433	8670	12360	8000	0	109	0.363
13	Hacı Kasım Muhittin Cami	Trabzon	19	0	700	11810	11810	7180	13250	3900	0	140	0.202
14	Behramşah Cami	Giresun	12	0	1000	11500	11500	6010	8110	9200	0	132	0.398
15	Kapu Cami	Giresun	19	0	780	13000	13000	10270	14500	10530	0	169	0.167
16	Kale Cami	Giresun	19	0	750	10680	10680	7310	11520	8700	0	114	0.167
17	Emirler Cami	Gümüşhane	19	0	1100	8500	8500	5170	7090	5450	0	72	0.184
18	Narmanlı Cami	Erzurum	18	0	1650	18600	18600	8100	16300	17100	0	346	0.466
19	Lal Ağa Cami	Mersin	15	1	1739	18000	21000	8949	17642	9511	0	378	0.113
20	Şeyh Vefa Cami	İstanbul	15	1	1200	15000	27000	10200	18500	10200	0	405	0.390
21	Lüleburgaz, Sokullu Mehmed Paşa Cami	Kırklareli	16	1	1721	17705	20000	13278	18900	12049	0	354	0.224
22	Sultan Cami	Manisa	16	1	1098	13174	25329	10129	22500	11292	1,57	334	0.470
23	Edirnekapı Mihrimah Sultan Cami	İstanbul	16	1	1406	24191	36756	8720	33220	20100	0	890	0.381
24	Beşiktaş Sinan Paşa Cami	İstanbul	16	1	2058	22228	30976	10500	12600	5600	2,55	689	0.348

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Çizelge 5.1. Çalışmada ele alınan camiler ve parametreleri (devam)

No	Cami Adı	İl	YY.	Tipi	t (mm)	l _k (mm)	l _u (mm)	h (mm)	h _k (mm)	r _k (mm)	p _o (m ²)	t _a (m ²)	PGA475 (g)
25	Toptaşı Atık Valide Cami	İstanbul	16	1	873	12440	24183	10350	19400	12760	2.88	300.842	0.368
26	Eminönü Rüstem Paşa Cami	İstanbul	16	1	1656	21005	27731	13400	22300	14680	8.668	582.483	0.386
27	Çarşamba Mesih Mehmed Paşa Cami	İstanbul	16	1	1372	16664	16664	9500	18670	12800	0	277.7	0.385
28	Selimiye Cami	Konya	16	2	1911	25244	28978	10080	18680	12000	8.054	731.528	0.132
29	Ulu Cami	Çankırı	16	2	1570	21402	28756	7621	19997	11073	12.5	615.419	0.294
30	Üsküdar Mihrima Sultan Cami	İstanbul	16	2	1584	22914	28886	11562	23980	11000	18.48	661.893	0.361
31	Muradiye Cami	Manisa	16	3	1558	16088	25713	10907	23903	11000	0	413.65	0.470
32	Çemberlitaş Atık Ali Paşa Cami	İstanbul	15	3	2100	23650	30230	15750	30832	16609	9.24	714.94	0.397
33	Fındıklı Molla Çelebi Cami	İstanbul	16	3	1194	17402	19130	8150	17100	11800	3.138	332.897	0.362
34	Kargı, Oğuz Köyü Cami	Çorum	16	4	1600	15265	18292	7467	11159	7097	2.88	279.223	0.661
35	Eyüp Zal Mahmut Paşa Cami	İstanbul	16	4	1571	21271	24937	12360	20400	12400	2.608	530.415	0.361
36	Azapkapı Sokollu Mehmed Paşa Cami	İstanbul	16	4	1172	19645	23922	9980	15900	11400	6.126	469.938	0.377
37	Lala Mustafa Paşa Cami	Erzurum	16	5	1800	26150	26150	8750	17450	11800	7.096	683.823	0.459
38	Fatih Paşa Cami (Kuşunlu Cami)	Diyarbakır	16	5	1497	22750	22750	8294	16403	7833	9	517.563	0.136
39	Eminönü Yeni Cami	İstanbul	17	5	1083	18500	18500	10532	18242	7750	10.4	342.25	0.386
40	Elbistan Ulu Cami	Kahramanmaraş	16	5	1908	22350	22350	8541	15338	8000	11.56	499.523	0.242
41	Şerafeddin Cami	Konya	17	5	1667	26300	26300	12592	27439	12780	19.656	691.69	0.133
42	Beyazid Cami	İstanbul	16	5	2314	40793	40793	16412	37976	16780	50.212	1664.049	0.397
43	Sultan Ahmet Cami	İstanbul	17	5	1543	52135	52135	16599	39107	20562	88	2718.041	0.400
44	Tophane Kılıç Ali Paşa Cami	İstanbul	16	5	1618	25835	31917	9794	24760	12700	10.292	824.59	0.371
45	Şehzade Mehmet Cami	İstanbul	16	5	2541	43523	43523	17170	35980	18700	74.323	1894.252	0.395
46	Süleymaniye Cami	İstanbul	16	5	2363	61310	61310	18500	48100	26200	200	3758.858	0.390
47	Şebinkarahisar Fatih Cami	Giresun	19	5	1060	16880	16880	9260	14890	6100	2.16	284.934	0.443
48	Payas, Sultan Selim Cami	Hatay	16	6	1871	15544	22400	8828	20530	8605	0	348.19	0.299
49	Tosya, Abdurrahman Paşa Cami	Kastamonu	16	6	1533	19157	25000	11222	19665	9674	8	478.927	0.598

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI



Şekil 5.10. Cami parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri (a) t - l_k ; (b) t - h ; (c) l_k - h ; (d) r_k - h_k ; (e) r_k - t_a ; (f) p_a - t_a .

Verilen grafikler ışığında;

- ✓ Ele alınan 49 tarihi caminin duvar kalınlığı, yüksekliği ve uzunluğu arasında boyut ilişkileri bulunmaktadır. Sadece Sultan Ahmed Cami'nde t - l_k ve t - h ilişkisi, Süleymaniye Cami'nde ise t - l_k ilişkilerinde genele göre uyumsuzluk görülmüştür. Bu iki eserin özellikle duvar yükseklikleri ve camilerin duvar uzunlukları bu duruma sebep olmaktadır.

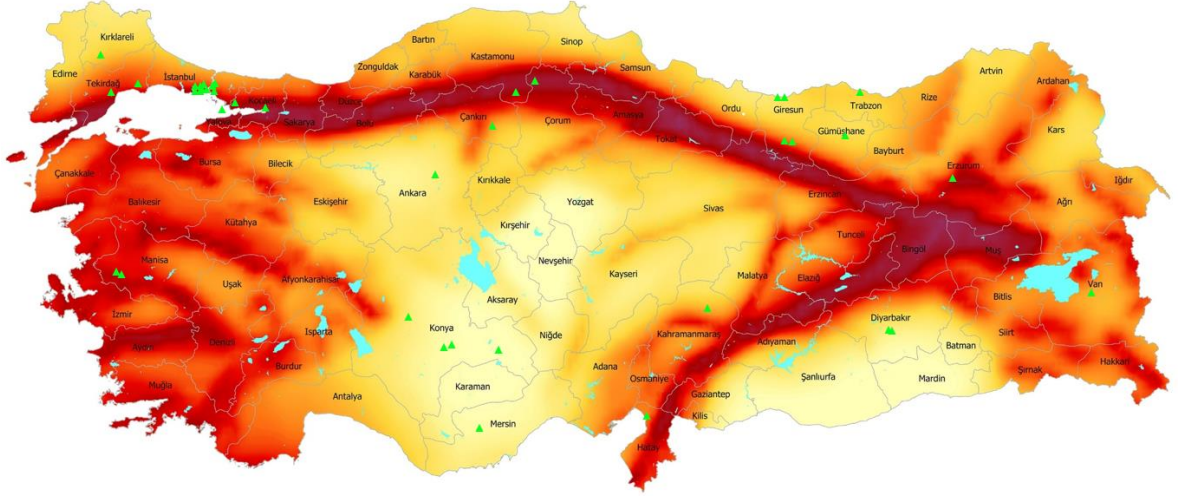
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

- ✓ Ele alınan bütün camilerde kubbe çapı ile kubbenin yerden yüksekliği arasında oldukça iyi bir korelasyona sahip ilişki bulunmaktadır (Şekil 5.10d). Bu durum daha geniş bir alanı örmek için yapılan kubbelerin genişlikleri ile ilişkili olarak yükseldiklerinin göstergesidir.
- ✓ Ele alınan bütün camilerde kubbe çapı arttıkça caminin toplan alanının da arttığı görülmektedir. Bu durum Tip 0 camilerde kesinlikle beklenen bir durum olmakla beraber diğer tiplerdeki yarım kubbe ve/veya küçük kubbelerin de örttüğü alanın yine ana kubbe ile ilişkili olduğunu da göstermektedir.
- ✓ Ele alınan en iyi ilişki ise serbest payeye sahip camilerde paye alanı ile caminin toplan alanı ile arasındaki ilişkidir. Bu durum daha sonra yapılacak analizler için önemli bir ilişki olarak göze çarpmaktadır. Şöyle ki; Çizelge 5.1'e bakıldığında Tip 0 hariç bütün cami tiplerinde serbest paye bulunabilmektedir. Bu sebeple bir tarihi caminin statik ve dinamik yükler altında davranışı incelenirken serbest payelerin davranışa etkisi/katkısının incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

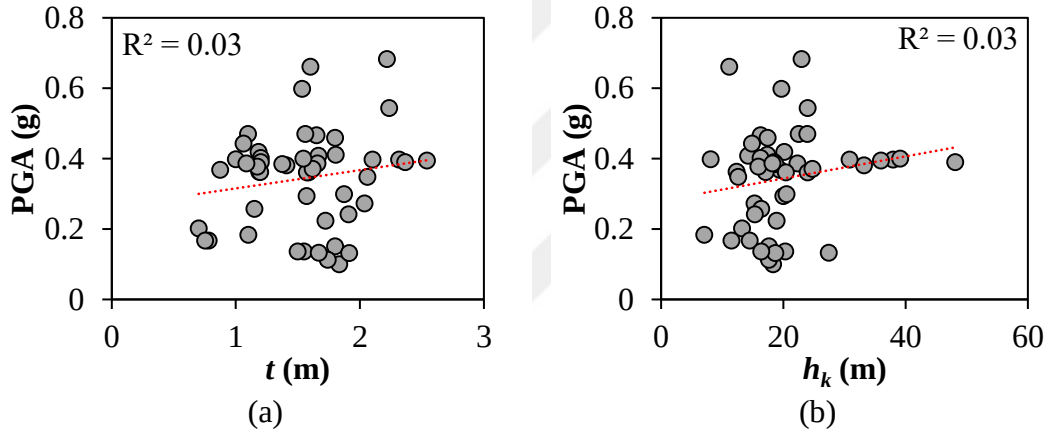
Şekil 5.11'de camilerin konumları 2018 yılında yürürlüğe giren ve AFAD tarafından yayınlanan Türkiye Deprem Tehlike Haritasına işlenmiştir. Bu harita kullanılarak Çizelge 5.1'de verilen PGA475 yer ivmesi değerleri elde edilmiştir. Ele alınan camilerin hem fay hatları üzerinde konumlandığı (Kastamonu, Çorum, Manisa vb.) hem de fay hatlarından uzakta da (Konya, Mersin vb.) yer aldığı görülmektedir. Bu farklılığın camilerin duvar kalınlıklarına ve/veya kubbe yüksekliğine nasıl etki ettiği veya etmiş olduğu incelenmiştir.

Şekil 5.12'de t_d -PGA475 ve h_k -PGA475 ilişkileri verilmiştir. Her iki ilişkide de anlamlı bir korelasyon elde edilememiştir. Bakıldığında deprem hikayelerine uygunluk sağlayarak, deprem bölgelerinde duvar kalınlıklarının artmasını, kubbe yüksekliklerinin de azalması beklenirdi. Ancak durum bu şekilde olmadığı görülmektedir. Deprem bölgesinde veya değil, tarihi camilerin inşasında boyutların birbirleri ile olan ilişkisi gözlemlenmiştir. Eğer daha büyük bir cami yapılması planlanıyorsa daha büyük duvar kalınlığı, buna bağlı olarak daha büyük kubbe çapı ile boyutlar artış göstermiştir.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI



Şekil 5.11. Camilerin Türkiye Deprem Tehlike Haritasında yeri



Şekil 5.12. (a) t_d -PGA475; (b) h_k -PGA475 ilişkileri

5.3. Camilerin Belirlenmesi

Yapılan araştırmalar göstermektedir ki; tarihi camileri temsil edebilecek bir sonlu eleman ağı oluşturmak çeşitli parametrelere bağlıdır. Kubbenin etkisinin oldukça önemli olması, camilerin kuvvet ve yer değiştirme sınırları belirlenirken önemli olmaktadır. Öte yandan bir modelin farklı ölçeklerinin aynı analiz türünde çözülmesi sonucunda farklı davranış sergilediği görülmektedir. Bu parametrelere ek olarak camilerin farklı mekânsal tiplere sahip olması da oldukça önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonraki kısımlarda analiz edilecek sonlu eleman modellerinin belirlenmesi, ülkemizdeki ve dünyadaki tarihi cami stokunu doğru bir şekilde temsil edebilmesi açısından oldukça önemlidir.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Tarihi camilerin doğru sonlu eleman modelleri ile temsil edilebilmesi için şöyle bir yöntem izlenecektir;

- ✓ Bütün modeller kubbeli olarak modellenecektir.
- ✓ Dinamik analizleri daha kolaylaştırmak adına camilerde son cemaat yeri ve minare modellenmeyecektir. Bu iki sonlu eleman modellemeleri kısmında detaylandırılmaktadır.
- ✓ Ele alınan cami örnekleri iki ana gruba ayrılacaktır. 1. Grupta Tip 0 mekânsal kurguya sahip camiler, 2. Grupta ise Tip 5 mekânsal kurguya sahip camiler olacaktır. Bu iki tip cami grubu ele alınan bütün camilerin %60'ını oluşturmaktadır. Bu sebeple daha büyük bir cami grubunu temsil edebilecek camilerin seçilmesi hedeflenmiştir.
- ✓ Her iki grup cami için h , t , l , r_k parametreleri arasında ilişkiler belirlenerek, cami modellerinin boyutları arasındaki ilişkiler grup içinde de belirlenecektir.
- ✓ Her iki grup camilerde l/h ve h/t oranları ışığında iki grubu temsil edebilecek camiler belirlenecektir. Bu durum yapılacak olan dinamik analizleri zorluğu ve uzun sürmesi öngörüldüğü için yapılmaktadır.

5.3.1.1. grup camiler

Bu grup camilerde önceki bölümlerde açıklanan Tip 0 mekânsal kurguya sahip camiler bulunmaktadır. Şekil 5.13'de bu grupta bulunan camilerin boyutsal parametreleri arasındaki ilişkiler verilmektedir. Bu grupta ele alınan camiler toplam 18 adettir. Bu ele alınan cami kümesinin %37'sine tekabül etmektedir.

Verilen ilişkilere bağlı olarak 1. Grup cami modellerinin boyutsal parametreleri arasındaki ilişkiler şu şekilde sırana bilir;

$$t-l_k \quad R^2=0,47 \quad l_k = 6.66t + 7170 \quad (5.1)$$

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

$$t-h \quad R^2=0,38 \quad h = 3.41t + 5138 \quad (5.2)$$

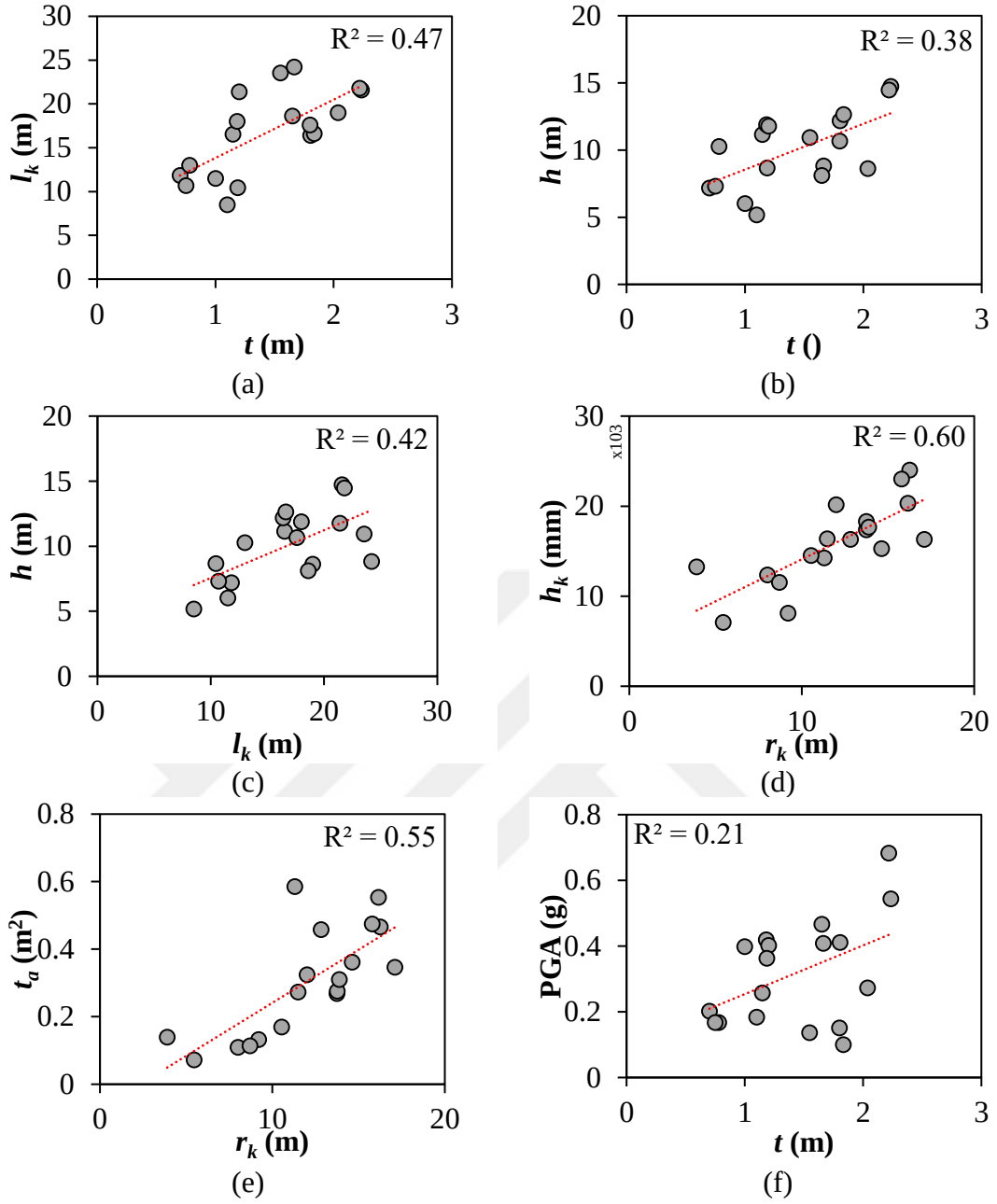
$$l_k-h \quad R^2=0,42 \quad h = 0.37l_k + 5138 \quad (5.3)$$

$$r_k-h_k \quad R^2=0,60 \quad h_k = 0.93r_k + 4760 \quad (5.4)$$

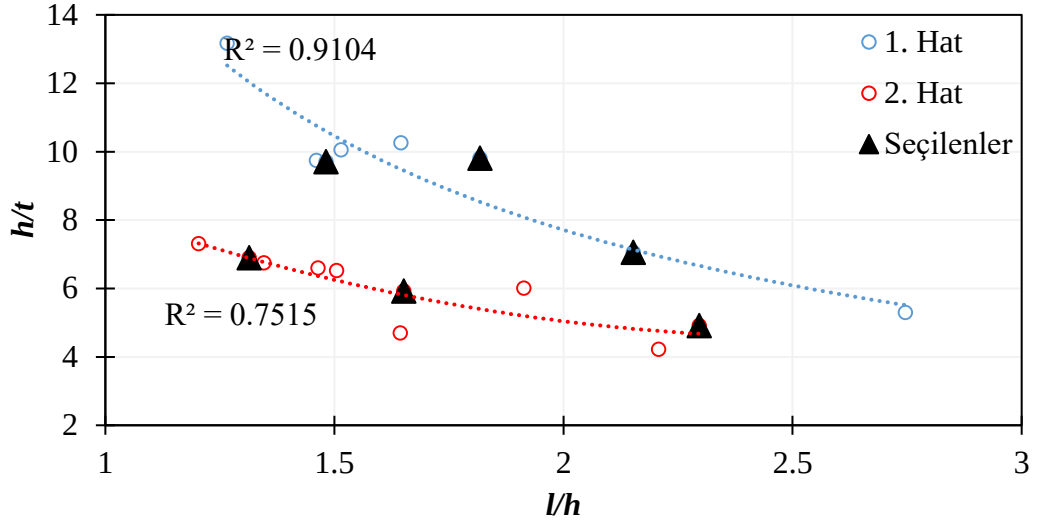
$$r_k-t_a \quad R^2=0,55 \quad t_a = 0.03r_k + 73.15 \quad (5.5)$$

Verilen bağıntılar ele alınan camilerin boyutlarını birbirleri ile bağıntısı olduğunu açıkça belirtmektedir. Bu ilişkilerin güçlü olması, ele alınan bu cami grubunun kuvvet ve yer değiştirme limitlerinin belirlenmesine giden yolda önemli bir etki olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğru şekilde alınacak örnekler, bütün bir grubu temsil edebilecektir.

Ele alınan gruptan belirlenecek camilere, Şekil 5.14’de verilen $l/h-h/t$ grafiği ışığında karar verilmiştir. 1. Grup camilerin bu iki parametresi, camileri farklı iki gruptan tek bir gruba birleştiren iki ana hat olarak ayırmaktadır. Bu değeri birbirine makul seviyede olan camiler seçilerek cami grubunun hemen her noktasını temsil edebilecek doğru camiler seçilmeye çalışılmıştır. Bütün camilerin 18 adet olduğu belirtilmiştir. Ele alınacak her bir caminin kuvvet ve yer değiştirme limitinin belirlenmesi için sonraki bölümde detayı verilecek 7 yer hareketi kullanılacaktır. Dinamik analizlerin yapılabilecek sayıda olması parametresi de dikkate alındığında aynı grafikte işaretlenen 6 cami analizlere devam edilmek üzere seçilmiştir. Bu camiler Konya Karapınar II. Selim Cami, Konya Ilgın Mustafa Paşa Cami, Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami, İstanbul Sokollu Mehmed Paşa Cami, Diyarbakır Sur Behram Paşa Cami ve Erzurum Yakutiye Narmanlı Cami’dir.



Şekil 5.13. 1.grup camii parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri (a) t - l_k ; (b) t - h ; (c) l_k - h ; (d) r_k - h_k ; (e) r_k - t_a ; (f) PGA_{475} - t .



Şekil 5.14. 1. grup camilerin $h/t - l/h$ ilişkisi ve temsil edecek camiler

5.3.2.2. grup camiler

Bu grup camilerde önceki bölümlerde açıklanan Tip 5 mekânsal kurguya sahip camiler bulunmaktadır. Şekil 5.15’de bu grupta bulunan camilerin boyutsal parametreleri arasındaki ilişkiler verilmektedir. Bu grupta ele alınan camiler toplam 11 adettir. Bu, ele alınan cami kümesinin %23’üne tekabül etmektedir.

Verilen ilişkilere bağlı olarak 2. Grup cami modellerinin boyutsal parametreleri arasındaki ilişkiler şu şekilde sırana bilir;

$$t-l_k \quad R^2=0,63 \quad l_k = 16.14t - 2938 \quad (5.6)$$

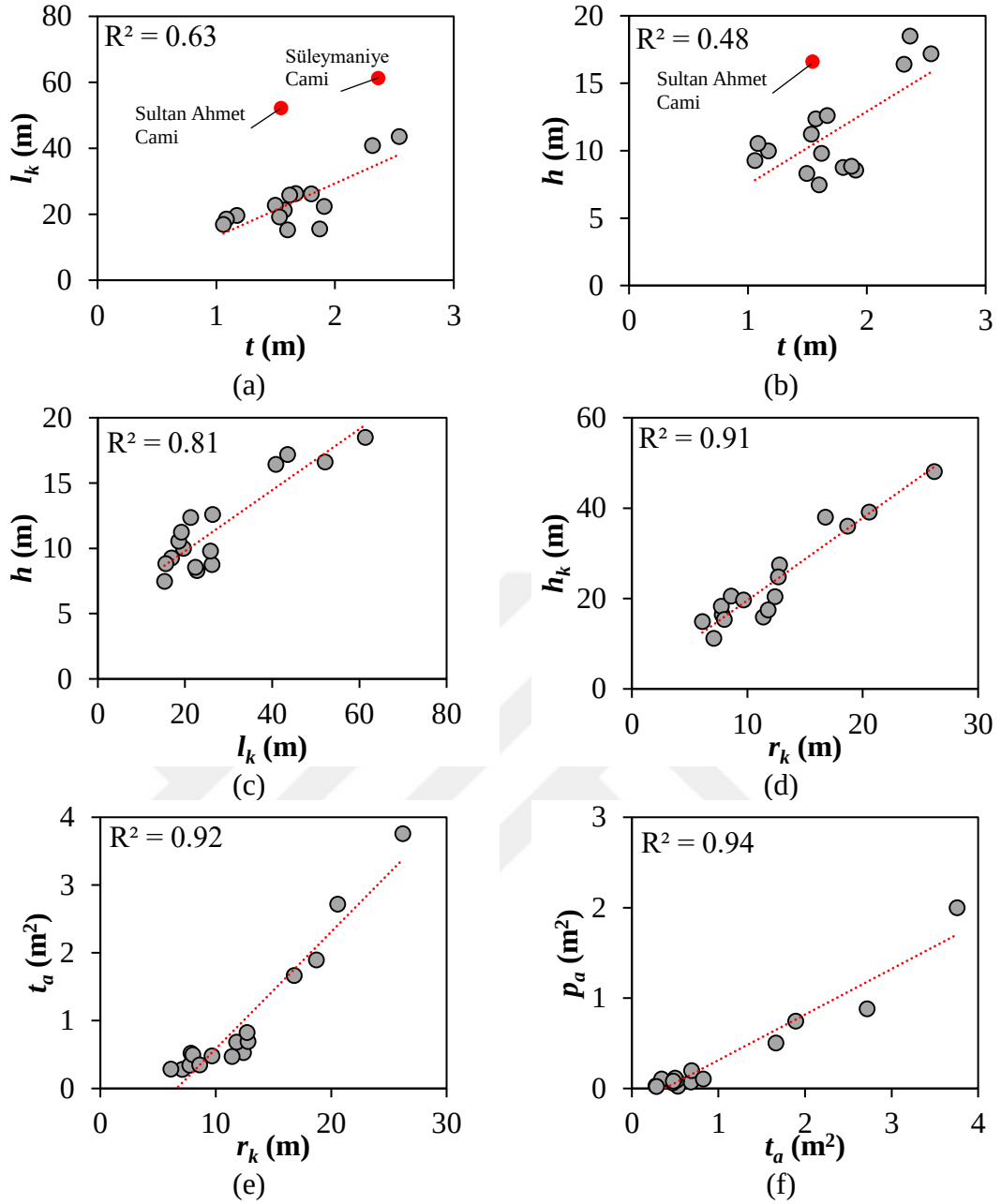
$$t-h \quad R^2=0,48 \quad h = 5.41t + 2083 \quad (5.7)$$

$$l_k-h \quad R^2=0,81 \quad h = 0.23l_k + 5109 \quad (5.8)$$

$$r_k-h_k \quad R^2=0,91 \quad h_k = 1.83r_k + 1324 \quad (5.9)$$

$$r_k-t_a \quad R^2=0,92 \quad t_a = 0.17r_k - 1139 \quad (5.10)$$

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

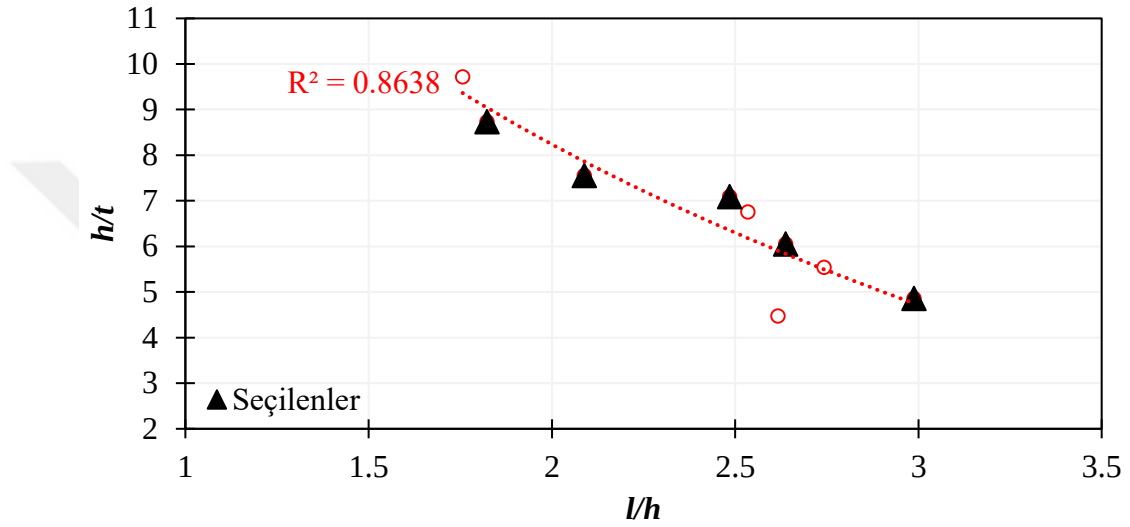


Şekil 5.15. 2. grup cami parametrelerinin birbirleri ile olan ilişkileri (a) t - l_k ; (b) t - h ; (c) l_k - h ; (d) r_k - h_k ; (e) r_k - t_a ; (f) t_a - p_a .

Verilen bağıntılar ele alınan camilerin boyutlarını birbirleri ile bağıntısı olduğunu açıkça belirtmektedir. Bu ilişkilerin güçlü olması, ele alınan bu cami grubunun kuvvet ve yer değiştirme limitlerinin belirlenmesine giden yolda önemli bir etki olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğru şekilde alınacak örnekler, bütün bir grubu temsil edebilecektir. Ancak Sultan Ahmet ve Süleymaniye Camileri boyutları açısından diğer camilerden kendilerini belirgin şekilde ayırdığı görülmektedir.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Ele alınan gruptan belirlenecek camilere, Şekil 5.16’de verilen $l/h-h/t$ grafiği ışığında karar verilmiştir. Ele alınan camiler oldukça düzenli bir şekilde kendini belli etmektedir. Dinamik analizlerin yapılabilirlik sayıda olması parametresi de dikkate alındığında aynı grafikte işaretlenen 5 cami analizlere devam edilmek üzere seçilmiştir. Bu camiler Giresun Şebinkarahisar Fatih Cami, Konya Karatay Şerafettin Cami, İstanbul Fatih Beyazid Cami, İstanbul Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ve Erzurum Yakutiye Lala Mustafa Paşa Cami’dir.



Şekil 5.16. 2. grup camilerin $h/t - l/h$ ilişkisi ve temsil edecek camiler

5.4. Camilerin Tarihi ve Mimari Özellikleri

Çalışmanın bu kısmında dikkate alınacak camilerin tarihi, konumu ve mimari özellikleri hakkında kısa bilgi verilecektir.

5.4.1. Konya Karapınar Sultan Selim cami (M1)

Konya ili Karapınar ilçesi Selimiye Mahallesinde yer alan, 159 ada 4 parselde kayıtlı Sultan Selim Cami, 1563 yılında Sultan II. Selim tarafından yaptırılmıştır. Külliye halinde kurulan yapı, cami, imaret, bedesten, han ve hamamdan oluşmaktadır (Anonymous 2020b). Şekil 5.16’da caminin uydu görüntüsü verilmektedir. Şekil 5.17’de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

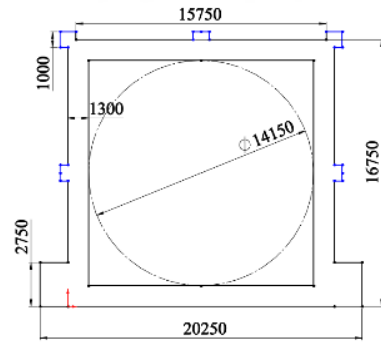


Şekil 5.17. Sultan Selim Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

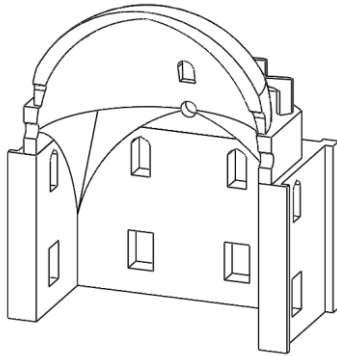
Caminin çevresindeki külliye'nin yapılma amacı İstanbul-Bağdat posta ve ticaret yolunun güvenliğini sağlamaktır. Hamam günümüzde müze olarak kullanılırken, bedesten çarşı olarak han da kafeterya olarak kullanılmaktadır. Caminin kapısı, hanların kapısı ve çeşme aynı hizadadır. Caminin kapısından çeşme çok rahat görülmektedir. Hanın kuzeyden güneye uzunca bir avlusu ve dört tarafa açılan bir kapısı vardır. Kapılar ve hanlar kesme taşlarla yapılmıştır. Bu taşlar birbiriyle çok sıkı birleştirilmiştir. Hanların içine aş evi, ambar, imarethane, at ahır, dinlenme odaları gibi binalar yapılmıştır (Anonymous 2020b).



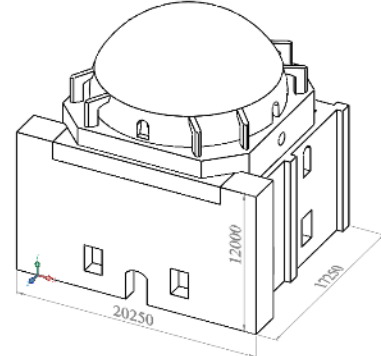
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.18. Sultan Selim Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm)

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Sultan Selim Cami, Mimar Sinan eserleri olarak bilinmektedir. Caminin rölövesi Yüksek Mimar Ali Saim Ülgen tarafından (1951) çizilmiştir. Caminin merkez kubbesi simetrik bulunan ana taşıyıcı dört duvar tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 4 kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri büyük tromplar ile kapatılmıştır. Ana kubbe 14 m çapında, 20,40 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 16,75 x 16,75 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 130 cm'dir. Dört taraftaki duvarlar, kubbeyi taşıyan sekizgen kasnağa kadar yükselmiştir. Caminin, doğu ve batı yüzeylerinde 2 aşağıda ve 2 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde aşağıda ve yukarıda 2'şer pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise aşağıda 2 pencere ve 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer trompları taşımaktadır. Caminin iki minaresi ise camiye birleşik şekilde güney-batı/doğu kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 5.18'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

5.4.2. Konya İlgin Lala Mustafa Paşa cami (M2)

Konya ili Ilgın ilçesi Selimiye Mahallesinde yer alan, 132 ada 7 parselde kayıtlı Lala Mustafa Paşa Cami, 1576 yılında Lala Mustafa Paşa tarafından yaptırılmıştır. Külliye halinde kurulan yapı, cami, imaret, fırın, tabhane odaları, han, arasta ve sebilden oluşmaktadır (Anonymous 2021a). Şekil 5.19'de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.19. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

Lala Mustafa Paşa Külliyesi, Mimar Sinan'a yaptırılmıştır. Caminin rölövesi Kuran (1988)'den elde edilmiştir. Ilgın Lala Mustafa Paşa Külliyesi, Osmanlı külliyesi içinde önemli yer tutan yapılar topluluğudur. Lala Mustafa Paşa Külliyesi'nin çarşı ve

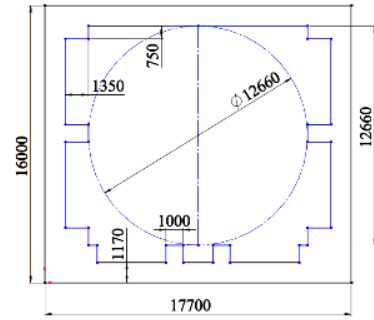
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

kervansarayı ağırlık noktasını teşkil etmektedir. Ilgın'ın coğrafi konumu da göz önünde bulundurularak konaklama ve ticari amaç birinci planda tutulmuştur (Anonymous 2021a).

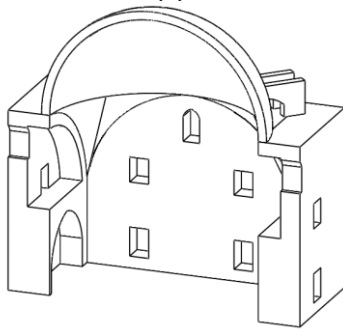
Caminin merkez kubbesi simetrik bulunan ana taşıyıcı dört duvar tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 4 kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri büyük tromplar ile kapatılmıştır. Ana kubbe 12,66 m çapında, 17,80 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 16,00 x 17,70 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 120 cm'dir. Caminin güney duvarı hariç diğer duvarları daha büyük bir kemer sistemine birleşik olarak inşa edilmiştir. 120 cm bu kemer sistemi haricindeki duvar kalınlığıdır. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 2 aşağıda ve 3 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde 2 aşağıda ve 3 yukarıda pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise aşağıda 2 pencere ve 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer trompları taşımaktadır. Caminin minaresi ise camiye birleşik şekilde güney-batı kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 5.20'da caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.



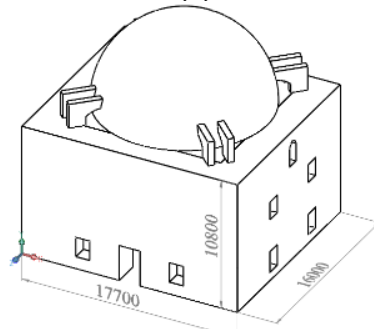
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.20. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm).

5.4.3. Ankara Cenabi Ahmet Paşa cami (M3)

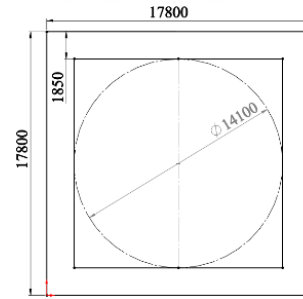
Ankara ili Altındağ ilçesi Sakarya Mahallesi'nde yer alan, 596 ada 1 parselde kayıtlı Cenabi Ahmed Paşa Cami, Kanuni Sultan Süleyman döneminde Ankara'da Anadolu beylerbeyi olarak görev yapan Cenabi Ahmed Paşa tarafından 1565 yılında yaptırılmıştır (Anonymous 2021b). Caminin kuzeydoğusunda Cenabi Ahmed Paşanın türbesi bulunmaktadır. Şekil 5.21'de caminin uydu görüntüsü verilmektedir. Cenabi Ahmed Paşa Cami Ankara ilinde bulunan tek Mimar Sinan eseridir. Cami 1883, 1887 ve 1940 yıllarında onarım görmüştür.



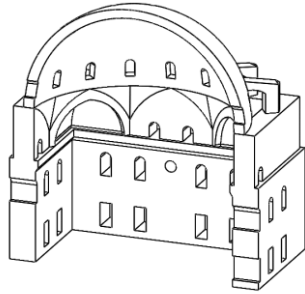
Şekil 5.21. Cenabi Ahmed Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)



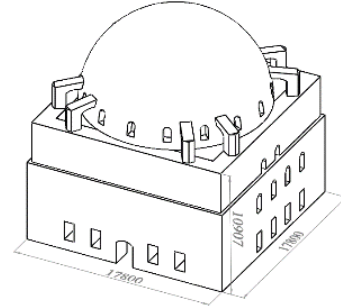
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.22. Cenabi Ahmed Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm).

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Caminin rölövesi Köseoğlu (2011)'den alınmıştır. Caminin merkez kubbesi simetrik bulunan ana taşıyıcı dört duvar tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 8 küçük simetrik kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri küçük tromplar ile kapatılmıştır. Ana kubbe 14,30 m çapında, 18,75 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 60 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 17,80 x 17,80 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 185 cm'dir. Caminin duvarları 720 cm yükseklikten sonra yaklaşık 40 cm daralmaktadır. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 4 aşağıda, 4 ortada ve 2 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde 4 aşağıda, birik küçük olmak üzere 5 ortada ve 2 yukarıda pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise aşağıda 4 pencere ve 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer trompları taşımaktadır. Caminin minaresi ise camiye kısmi olarak birleşik şekilde güney-batı kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 5.22'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

5.4.4. İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa cami (M4)

İstanbul ili Fatih ilçesi Küçükayasofya Mahallesinde yer alan, 122 ada 10 parselde kayıtlı Sokullu Mehmet Paşa Cami, Mimar Sinan'ın eseri olup cami, medrese, tekke, dükkânlar ve çeşmelerden meydana gelir. Caminin kimin tarafından vakfedilmiş olduğu tartışmalıdır. Külliye adını veren Sokullu Mehmed Paşa'nın (ö. 987/1579) vakfiyesinde gerek Eyüp'te türbesine bitişik medresenin gerekse Kadirga'daki caminin paşa tarafından eşi İsmihan Sultan'a hediye olarak yaptırıldığı belirtilmektedir (Anonymous 2021c). Caminin uydu görüntüsü Şekil 5.23'de verilmektedir.



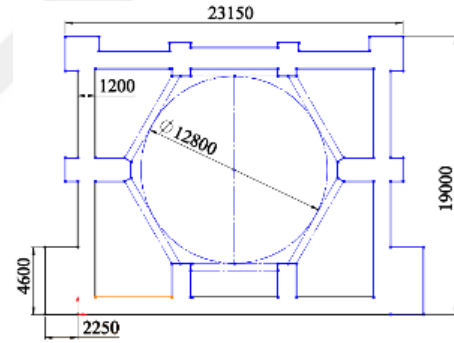
Şekil 5.23. Sokullu Mehmet Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

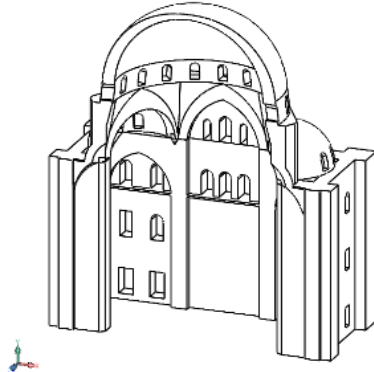
Caminin rölövesi Ülgen (1944) tarafından çizilmiştir. Caminin merkez kubbesi ana taşıyıcı dört ve duvara bitişik payeler tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 6 kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri yarım kubbelerle kapatılmıştır. Ana kubbe 12,80 m çapında, 26,88 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 60 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 19,00 x 23,15 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 120 cm'dir. Caminin kuzey duvarına bitişik kemerli bir sistem mevcuttur. Kemer sisteminin sütunları, kubbeyi taşıyan kemerlerin başlangıcına kadar uzanmaktadır. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 4 aşağıda, 4 ortada ve 4 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde 4 aşağıda, 4 ortada, 7 yukarıda ve 3 kubbeyi taşıyan kasnakta olmak üzere toplam 18 pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise güney duvarına ek olarak ortada kapı boşluğu bulunmaktadır. Caminin minaresi ise güney-batı kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 5.24'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.



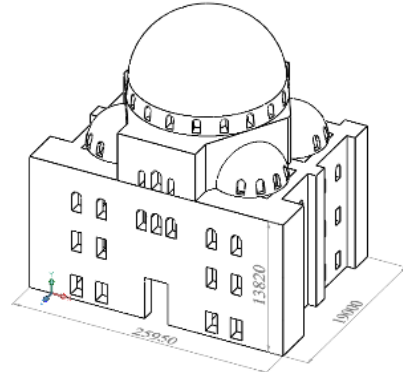
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.24. Sokullu Mehmet Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm).

5.4.5. Diyarbakır Behram Paşa camii (M5)

Diyarbakır ili Sur ilçesi Ziyagökalp Mahallesinde yer alan, 396 ada 3 parselde kayıtlı Behram Paşa Cami, Diyarbakır'ın on üçüncü Osmanlı valisi ve beylerbeyi olan Sokullu ailesinden Kara Şahin Mustafa Paşa'nın oğlu Behram Paşa tarafından yaptırılmıştır. Cümle kapısındaki kitabeden inşasına 1564 yılında başlanıp 1572 yılında tamamlanmış olduğu anlaşılmaktadır. Mimar Sinan'ın İstanbul dışındaki önemli bir eseri ve bir deneme yapısı olarak değerlendirilmektedir (Anonymous 2021d). Şekil 5.25'de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.



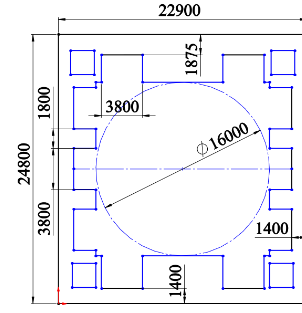
Şekil 5.25. Behram Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

Caminin rölövesi Ülgen (1956) tarafından çizilmiştir. Caminin merkez kubbesi ana taşıyıcı dört ve duvara bitişik kemer sistemi tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 8 kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri küçük tromplar ile kapatılmıştır. Ana kubbe 16,00 m çapında, 21,50 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 60 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 12,90 x 24,80 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 140 cm'dir. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 3 aşağıda ve 1 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde 2 aşağıda ve 1 yukarıda pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise 2 pencere 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Caminin minaresi ise güney-batı kısmına camiye kısıtlı olarak birleşik şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 5.26'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

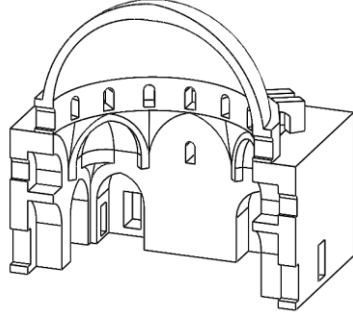
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI



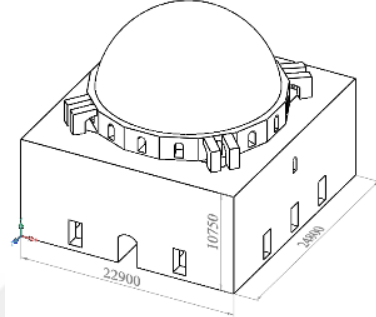
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.26. Behram Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm)

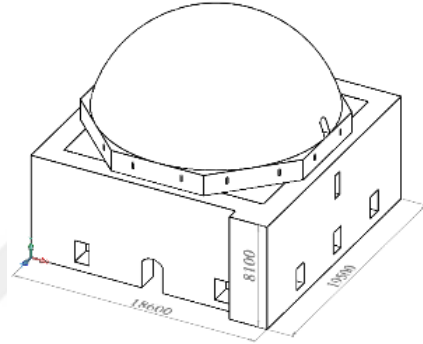
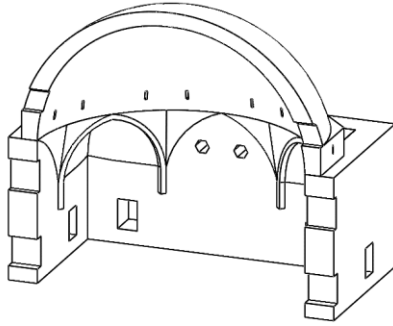
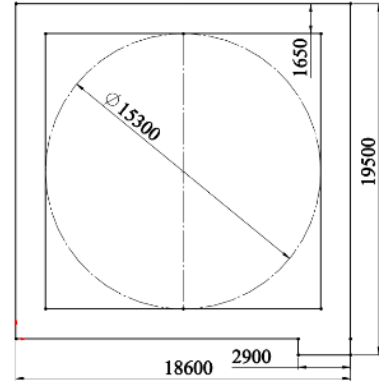
5.4.6. Erzurum Narmanlı cami (M6)

Erzurum ili Yakutiye ilçesi Narmanlı Mahallesinde yer alan, 553 ada 5 parselde kayıtlı Narmanlı Cami, Narmanlı Hacı Yusuf tarafından 1738 yılında yaptırılmıştır. Çifteminareli Medrese, Erzurum Kalesi ve Erzurum Ulu Cami'ne oldukça yakın konumda bulunan cami, düzgün taş işçiliği ile dikkat çekmektedir (Anonymous 2022). Şekil 5.27'de uydu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.27. Narmanlı Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI



Şekil 5.28. Narmanlı Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm)

Caminin rölövesi ENVAR Mimarlık tarafından Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü adına çizilmiştir. Caminin merkez kubbesi ana taşıyıcı dört tarafından taşınmaktadır. Kubbe duvarlara 8 kemer ile oturmaktadır. Duvarların kesişim yerleri küçük tromplar ile kapatılmıştır. Ana kubbe 15,30 m çapında, 16,30 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 18,60 x 18,60 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 165 cm'dir. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 3 aşağıda ve 1 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde 2 aşağıda ve 2 yukarıda (küçük) pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise 2 pencere 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Caminin minaresi ise güney-batı kısmına camiye birleşik şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 5.28'de caminin farklı cephelerden görüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

5.4.7. Giresun Şebinkarahisar Fatih cami (M7)

Giresun ili Şebinkarahisar ilçesi Bülbül Mahallesinde yer alan, 703 ada kayıtlı Fatih Cami, 1473 yılında Fatih Sultan Mehmet'in Otlukbeyi Savaşı'nı kazandıktan sonra

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

Şebinkarahisar'a gelişinde yapımı başlamıştır. Caminin yapımı beş yılda tamamlanmıştır. Cami ilk olarak ahşaptan yapılmış ancak iki kere yandığı, bu yangınlardan sonra 1888 yılında Rasih ve Mahmut Paşalar tarafından yeniden yaptırılmıştır. 1939 Erzincan depreminde caminin bazı kubbeleri çökmüş, 1950 yılında onarılmıştır. Ayrıca cami 1977, 2005 ve 2012 yıllarında onarımlar görmüştür (Anonymous 2021e). Şekil 5.29'de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.



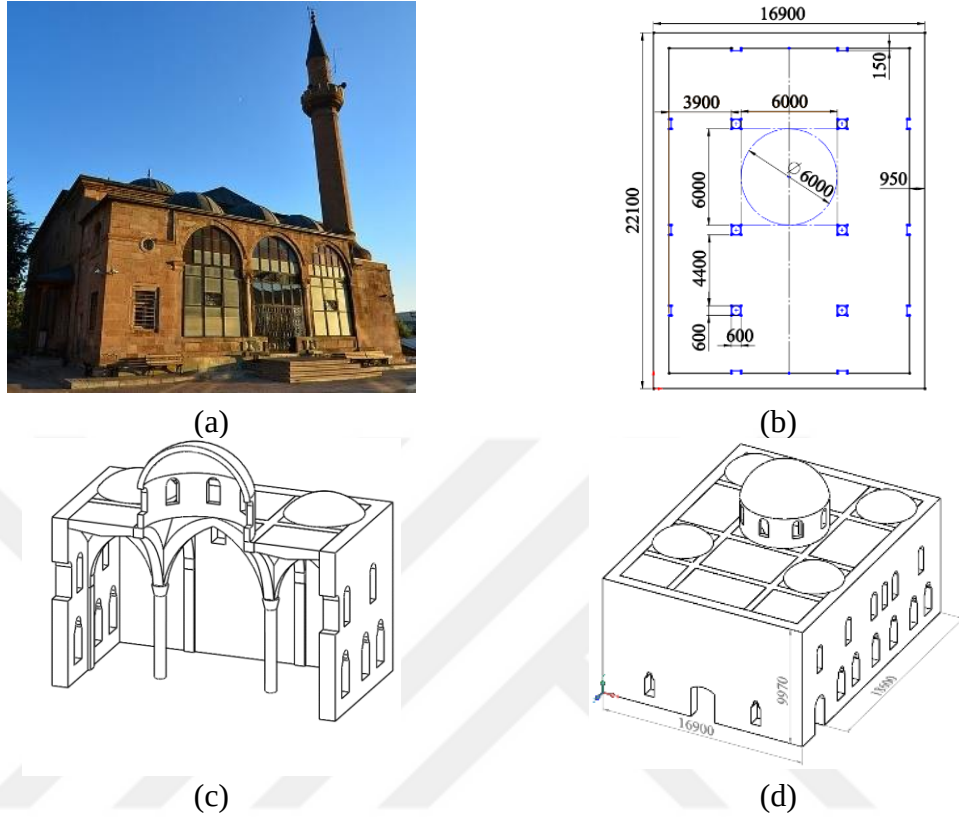
Şekil 5.29. Şebinkarahisar Fatih Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

Caminin rölövesi ZAN Mimarlık tarafından Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü adına çizilmiştir. Şebinkarahisar Fatih Camii, yalnızca yörenin değil bölgenin de en anıtsal yapılarından birisidir. Yüksek bir avlu üzerine kuzey-güney doğrultusunda, dikdörtgen planlı olarak inşa edilen Fatih Camii dış cephe kaplamaları güney cephenin mihraptan üst kısmı hariç tamamen düzgün kesme taş malzeme ile inşa edilmiştir. Eserin dıştan dışa ebatları 16,88 x 22,09 m olup, son cemaat mekânı 4,08 m uzunluğundadır. Taş duvar kalınlığı ortalama 105 cm'dir. Yapıya giriş üç cepheden sağlanmaktadır. Ana giriş kuzey cephesinden olmak üzere doğu ve batı cephesinden de giriş sağlanmaktadır. Ana giriş, iyon başlıklı sütunların üzerine oturduğu yuvarlak kemerli bir bölümdür. Yapının doğu ve batı girişi ise, yuvarlak kemerli, kesme taş sövelidir. Fatih Cami'nin hariminin üzeri yüksek kasnaklı ana kubbe, yan sahanlarda dört küçük kubbe ve dört tonoz ile örtülüdür.

Üç bölümlü kapalı son cemaat yerinin üzeri de üç küçük kubbe ile örtülüdür. Son cemaat yerine girişi sağlayan orta bölümdeki kemerler iyon başlıklı iki sütun üzerine oturmaktadır. Üç bölümlü son cemaat yeri, demir doğramalı pencerelerle kapatılmıştır. Yapının kuzeybatı cephesine bitişik minaresi, yüksek kare kaideli, çokgen gövdeli, tek şerefeli ve konik külahlıdır. Minarenin toplam yüksekliği 27,19 m olup, kaide genişliği

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

3,79 m'dir. Şekil 5.30'de caminin farklı cephelerden görüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.



Şekil 5.30. Şebinkarahisar Fatih Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm).

5.4.8. Konya Karatay Şerafettin cami (M8)

Konya ili Karatay ilçesi Şemsi Tebriz-i Mahallesinde yer alan, 257 ada 2 parselde kayıtlı Şerafettin Cami, 12. yüzyılda Şeyh Şerafettin tarafından yaptırılmıştır. 1444 yılında II. Karamanoğlu İbrahim Bey tarafından tamir ettirilmiş; zamanla harap olan câmi, 1636 yılında Mehmed Çavuşoğlu Memiş Bey tarafından yıktırılarak yeniden yaptırılmıştır (Anonymous 2021f). Şekil 5.31'de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.31. Karatay Şerafettin Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

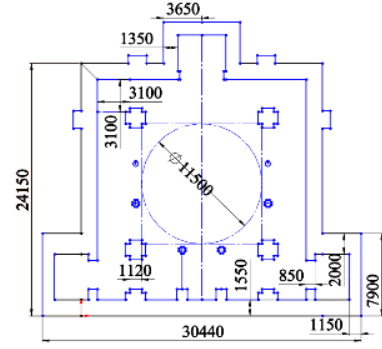
Cami rölövesi D2 Mimarlık tarafından Konya Vakıflar Bölge Müdürlüğü adına çizilmiştir. Cami gövdesi kesme taşlardan büyük bir kubbe ile örtülmüştür. On fil ayağının tutmakta olduğu ana kubbe, güneyinde bir yarım kubbe ile desteklenmektedir. Yarım bir kubbe ile örtülen mihrabın bulunduğu kısım dışarıya taşmaktadır. Güney kısmı hariç diğer yönlerde ikinci kat mahfilleri bulunmaktadır. Caminin içi hat örnekleri ve kalem işi nakışlarla tezyin edilmiş olup, mermer işlemeli minber ve mihrabı takdire değer sanat eserleridir. Yedi kubbeli son cemaat mahalli de bulunan câminin, tek şerefeli minaresi sonradan ilâve edilmiştir. Caminin güney cephesinde yer alan ve 20. yüzyılın başlarında yıkılan Şeyh Şerafettin Türbesi, Vakıflar Bölge Müdürlüğü tarafından 2010 yılında yeniden yaptırılmıştır (Anonymous 2021f).

Caminin merkez kubbesi dört ana fil ayağı tarafından taşınmaktadır. Bu fil ayaklarına ek olarak caminin alt kısmında 6 adet taş sütun bulunmaktadır. Caminin güney duvarında imam yeri için çıkıntı bulunmaktadır. Merkez kubbeyi çevreleyen alanlar küçük kubbeler ve tonozlar ile örtülmektedir. Ana kubbe 12,35 m çapında, 23,78 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 85 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 23,04 x 24,15 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 155 cm'dir. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 17, güney yüzeyinde 18 pencere, kuzey yüzeyinde ise 6 pencere 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Caminin minaresi ise batı duvarı kısmına camiye birleşik şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 5.32'da caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

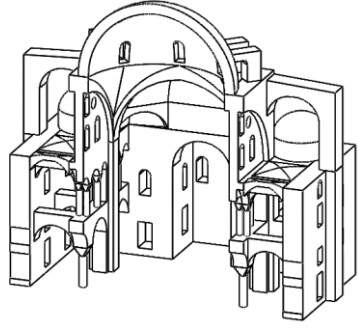
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI



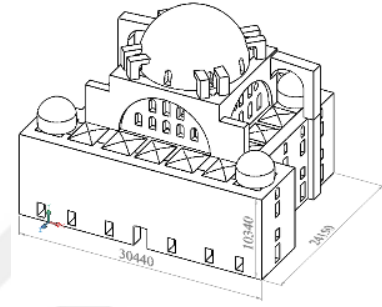
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.32. Karatay Şerafettin Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm).

5.4.9. İstanbul Beyazid cami (M9)

İstanbul ili Fatih ilçesi Beyazıt Mahallesiinde yer alan, 613 ada 18 parsele kayıtlı Beyazıt Cami, Sultan II. Beyazid tarafından 1501 yılında yaptırılmıştır. Yapımı 4 yıl süren külliye bir cami, türbe, aşhane-imaret, sıbyan mektebi, tabhâneler, medrese, hamam ve kervansaraydan ibarettir (Anonymous 2021g). Şekil 5.33’da caminin uydu görüntüsü verilmektedir.



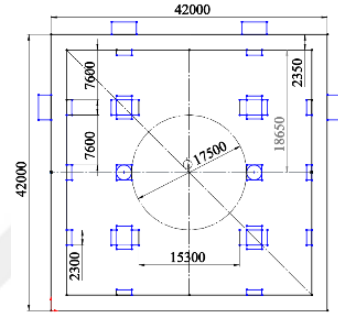
Şekil 5.33. Beyazıt Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

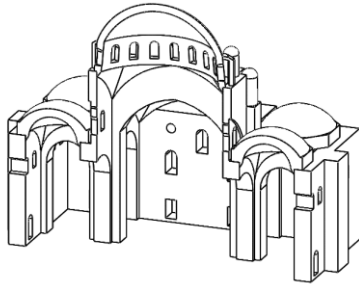
Beyazıt Camii'nin inşaatı bittikten pek az sonra, 915'te (1509) İstanbul'da pek çok binayı harap eden, kırk beş günlük bir müddet içinde zaman zaman tekrarlanan ve "küçük kıyamet" denilen bir zelzele olmuş, herhalde bu sırada binada da bazı hasarlar meydana gelmiştir. Fakat bu tahribatın ne derecede olduğu bilinmemekle beraber caminin kubbesinin "dağılıp pâre pâre olduğu" Künhü'l-ahbâr'daki bir kayıttan öğrenilmektedir (Anonymous 2021g).



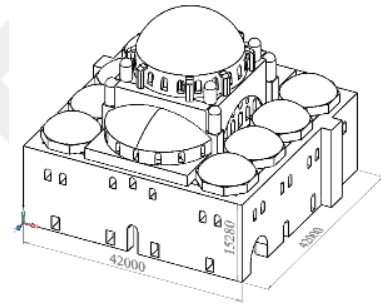
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.34. Beyazıt Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) kesit; (d) 3D modeli (mm)

Caminin rölövesi FOM Grup Mimarlık tarafından İstanbul Vakıflar 1. Bölge Müdürlüğü adına çizilmiştir. Caminin merkez kubbesi dört ana fil ayağı tarafından taşınmaktadır. Bu fil ayaklarına ek olarak caminin alt kısmında 2 adet taş sütun bulunmaktadır. Merkez kubbeyi çevreleyen alanlar küçük kubbeler ve tonozlar ile örtülmektedir. Ana kubbe 19,15 m çapında, 36,18 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 95 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 42 x 42 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 235 cm'dir. Caminin doğu ve batı yüzeylerinde 8, güney yüzeyinde 12 pencere, kuzey yüzeyinde ise 11 pencere 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Şekil 5.34'de caminin farklı cephelerden görüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

5.4.10. İstanbul Tophane Kılıç Ali Paşa cami (M10)

İstanbul ili Beyoğlu ilçesi Kemankuş Mahallesiinde yer alan, 63 ada 17 parselde kayıtlı Kılıç Ali Paşa Cami, Uluç Ali Paşa olarak da bilinen Kaptan-ı Derya Kılıç Ali Paşa tarafından Sultan II. Beyazid tarafından 1580 yılında yaptırılmıştır. Cami, sebil, türbe, medrese ve hamamdan oluşan bir külliye Mimar Sinan Mimarlığında/Mühendisliğinde inşa edilmiştir (Köroğlu 2010). Şekil 5.35’de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.

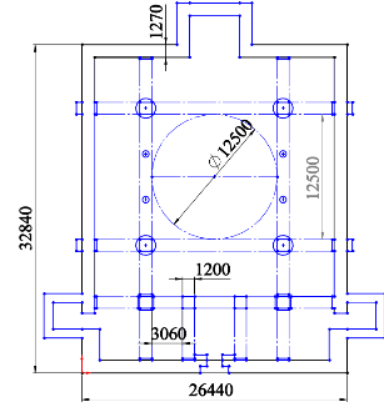


Şekil 5.35. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

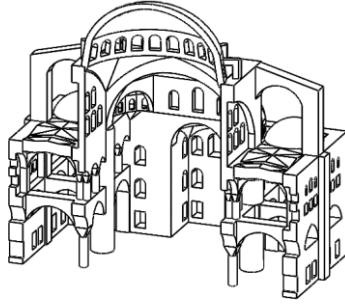
Cami rölövesi Köroğlu (2010) tarafından hazırlanmıştır. Caminin merkez kubbesi dört ana fil ayağı tarafından taşınmaktadır. Bu fil ayaklarına ek olarak caminin alt kısmında 4 adet taş sütun bulunmaktadır. Caminin giriş kısmında 2 kubbe ve 2 tonozla örtülü, 4 taşıyıcı kolonu bulunan ve merkez kubbeyi taşıyan kemer sistemi ile beraber çalışan çerçeve sistem bulunmaktadır. Bu sistem göz ardı edildiğinde cami her iki eksende simetrik olarak inşa edilmiştir. Merkez kubbeyi çevreleyen alanlar küçük kubbeler, yarım kubbeler ve tonozlar ile örtülmektedir. Ana kubbe 13,20 m çapında, 25,25 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 60 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 26,4 x 32,8 m’dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 127 cm’dir. Cami duvarları yekpare dolgu duvardan ziyade, iç çerçeve sistem ile beraber çalışan bir çerçeve yığma sistemi olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple temel kolon ve kemer sistemi haricinde oldukça fazla pencere boşluğu karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5.36’de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.



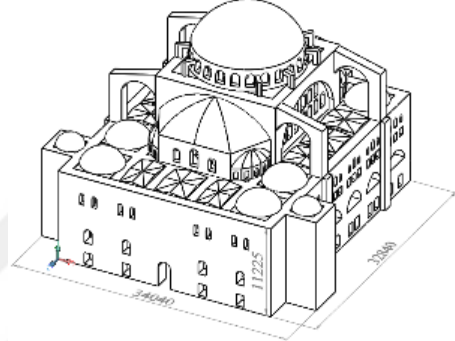
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.36. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) batı cephesinden görünüm (mm).

5.4.11. Erzurum Lala Mustafa Paşa cami (M11)

Erzurum ili Yakutiye ilçesi Lalapaşa Mahallesinde yer alan, 646 ada 2 parselde kayıtlı Lala Paşa Cami, Kanuni Sultan Süleyman'ın komutanı, Kıbrıs fatihi, Sadrazam Lala Mustafa Paşa tarafından 1562 yılında yaptırılmıştır. Mimar Sinan'a ait olan eserin yanında bir saray ve sübyan mektebi yer almış ancak bunlar günümüze kadar ulaşamamıştır (Kocaman 2017). Şekil 5.37'de caminin uydu görüntüsü verilmektedir.

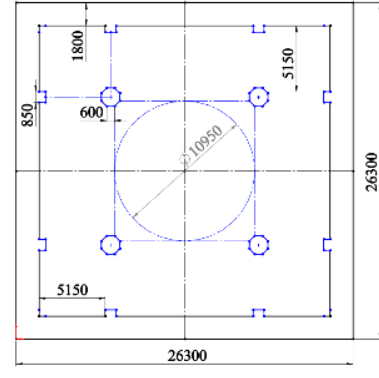


Şekil 5.37. Lala Paşa Cami uydu görüntüsü (Anonymous 2020c)

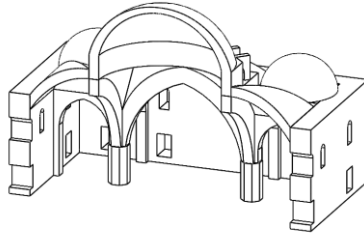
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI



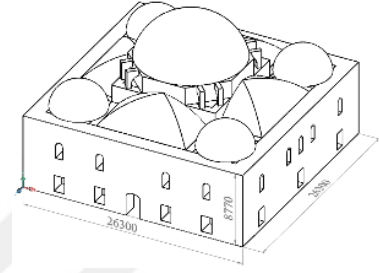
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.38. Lala Paşa Cami (a) genel görünüm; (b) plan; (c) batı cephesinden görünüm (mm).

Cami rölövesi ENVAR Mimarlık tarafından Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü adına çizilmiştir. Caminin merkez kubbesi dört ana fil ayağı tarafından taşınmaktadır. Merkez kubbeyi çevreleyen alanlar küçük kubbeler ve yarım kubbeler ile örtülmektedir. Ana kubbe 13,00 m çapında, 17,45 m yüksekliğinde ve yaklaşık olarak 50 cm kalınlığındadır. Caminin ana boyutları yaklaşık olarak 26 x 26 m'dir. Yapının ana duvar kalınlığı yaklaşık olarak 180 cm'dir. Dört taraftaki duvarlar, çatı seviyesine kadar yükselmiştir. Caminin, doğu ve batı yüzeylerinde 4 aşağıda ve 5 yukarıda pencere boşluğu, güney yüzeyinde aşağıda ve yukarıda 4'er pencere boşluğu, kuzey yüzeyinde ise aşağıda ve yukarıda 4 pencere boşluğu ve aşağıda 1 kapı boşluğu bulunmaktadır. Bu duvarlar ana kubbeyi ve diğer tam ve yarım kubbeleri taşımaktadır. Caminin minaresi ise camiye birleşik şekilde güney-batı kısmına konumlandırılmıştır. Şekil 5.38'de caminin farklı cephelerden görünüşlerini ve kesitleri sunulmaktadır.

5.5. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması

Tarihi camilerin yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesinde kolayca cevaplanamayan bir dizi belirsizlik bulunmaktadır. Bunlar, sınır koşulları, eğrisel geometrik formdaki elemanlar ve bölgeler arasındaki geçiş ve bağlantı detayları, önceden

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

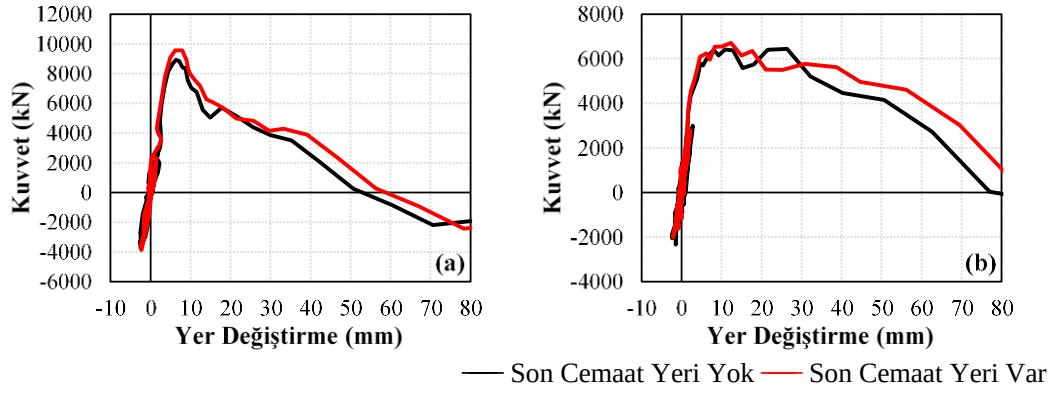
oluşmuş hasarlar, malzeme özellikleri ve geçmiş müdahaleler olarak sıralanabilir. Analizlerde kullanılan araçlar, yapının ele alınan bütün özelliklerini dikkate alacak şekilde gelişmiş ve güvenilir olmalıdır. Cami gibi farklı yapısal taşıyıcı formların iç içe kullanıldığı yığma yapıların hesap modellerinin klasik elemanlarla oluşturulması ve davranışlarının belirlenmesi oldukça zordur. Mimari detaylarından kaynaklanan karmaşıklık, bu yapıların modellenmesinde sorunlar çıkarmaktadır. Yapılan modellemelerde yapısal davranışa etki etmediği düşünülen mimari ince süsleme unsurları göz ardı edilmiştir. Camilerin 3D modelleri SolidWorks (2013) yazılımı kullanılarak üretilmiştir.

Camilerin minare bölümlerinin depremde en kırılgan davranışı gösteren yerler olduğu bilinmektedir. Minareler genelde cami ana kütesine köşede rijit bir kaide üzerinde bağlantılı ya da caminin yanında bağımsız halde bulunur. Camilerin boyutlarına göre bu bağlantı ancak lokal davranışa etki etmekte, sistem davranışını etkilemektedir. Ayrıca deprem esnasında, minarelerin ana yapıdan bağımsız hasar mekanizmasına sahip olduğu raporlanmıştır. (Dogangun et al. 2008; Dogangun and Sezen 2012; Kazaz and Kocaman 2018) tarafından raporlanmıştır. Bu sebeple sonlu eleman modellerinde cami minareleri beden duvarlarının seviyesinde kaideleri dahil olacak şekilde modellenmiştir. Minarenin kaideleri sonrası kısımları dikkate alınmamıştır.

Son cemaat yeri, cami dışında kalan cemaati kapsamak veya hızlı bir şekilde ibadet etmek amacıyla, ince yekpare mermer sütunlar üzerine inşa edilen kemerler tarafından taşınan bir üst örtünün camiye bir duvar tarafında bağlanmasıyla oluşturulur. Minareye göre sistem davranışına daha fazla etkisi olmakla birlikte hasarın en yoğun olduğu bölgelerden biridir (Tapan et al. 2013; Çakır et al. 2015b). Son cemaat yerinin yapının kuvvet-yer değiştirme eğrisine ve yapının hasar mekanizmasına etkisini detaylandırmak amacıyla Konya Karapınar Sultan Selim Cami (M1) ve Konya İlgın Lala Mustafa Paşa Caminin (M2) son cemaat yerinin dikkate alındığı ve alınmadığı iki farklı sonlu eleman modeli karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modelleri sonraki bölümde detayları verilen Erzincan depreminin (1992) ivme kaydı kullanılarak iki dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.39'da Konya Karapınar Sultan Selim Caminin son cemaat yeri modellenmiş ve modellenmemiş iki sonlu eleman modelinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri bulunmaktadır. Eğrilerde, yapının rijitliği, maksimum kuvvet kapasitesi ve elastik

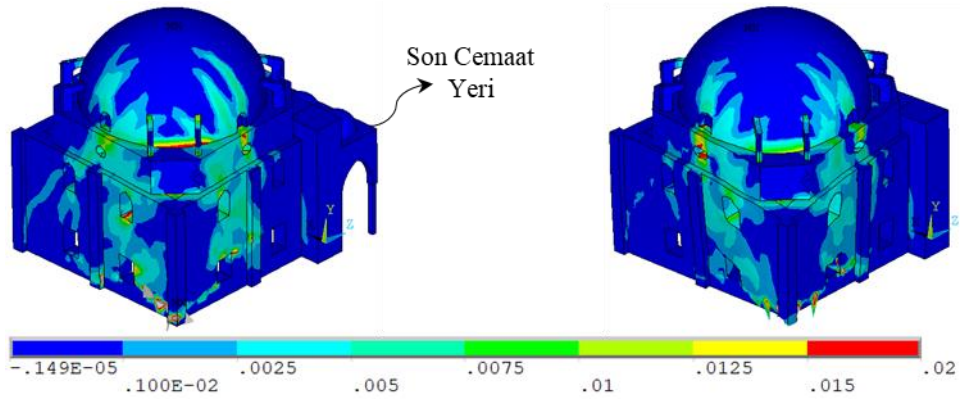
5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

olmayan kısımdaki yer değiştirme davranışının benzer olduğu açıktır. Ayrıca yapının ötelenme oranlarının da değişmediği görülmektedir.



Şekil 5.39. Konya Karapınar Sultan Selim Cami son cemaat yerinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerine etkisi (a) X yönü; (b) Z yönü.

Şekil 5.40’da her iki dinamik analizden elde edilen birinci asal gerilmeler verilmektedir. Caminin yer hareketinin 2.72’inci saniyesinde kuzey-doğu köşesinden göçtüğü görülmektedir. Bu göçme mekanizmasına son cemaate yerinin herhangi bir etkide bulunmadığı oldukça açıktır. Analizde son cemaate yerinde, oldukça düşük birim şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir. Ele alınan bu örnekte son cemaat yerinin yıkılmadığı ancak yapının genel davranışına da herhangi bir etkide bulunmadığı gözlemlenmiştir.

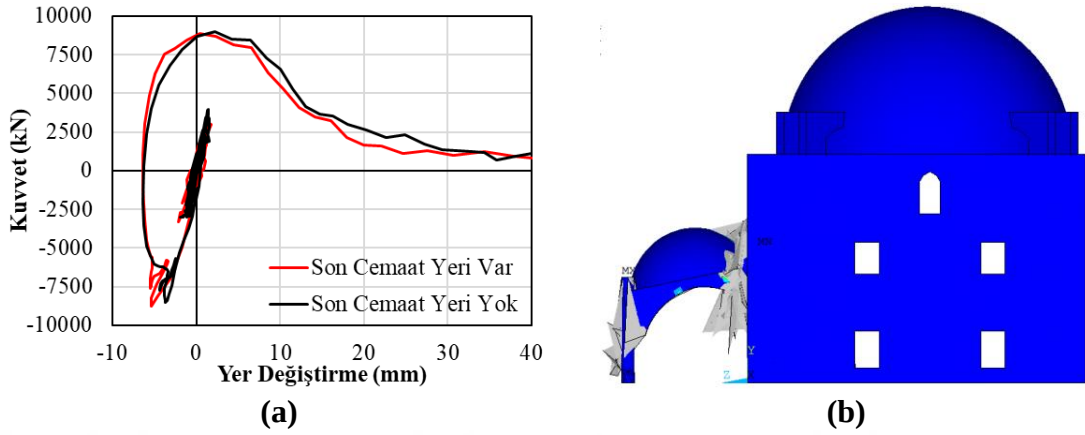


Şekil 5.40. Sultan Selim Cami’nin son cemaat yerinin hasar mekanizmasına etkisi

Şekil 5.41a’da Konya İlgin Lala Mustafa Paşa Cami’nin son cemaat yerinin modellendiği ve modellenmediği iki modelin kuvvet-yer değiştirme eğrileri bulunmaktadır. Bakıldığında yapının rijitliği, maksimum kuvvet kapasitesi ve elastik

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMAN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

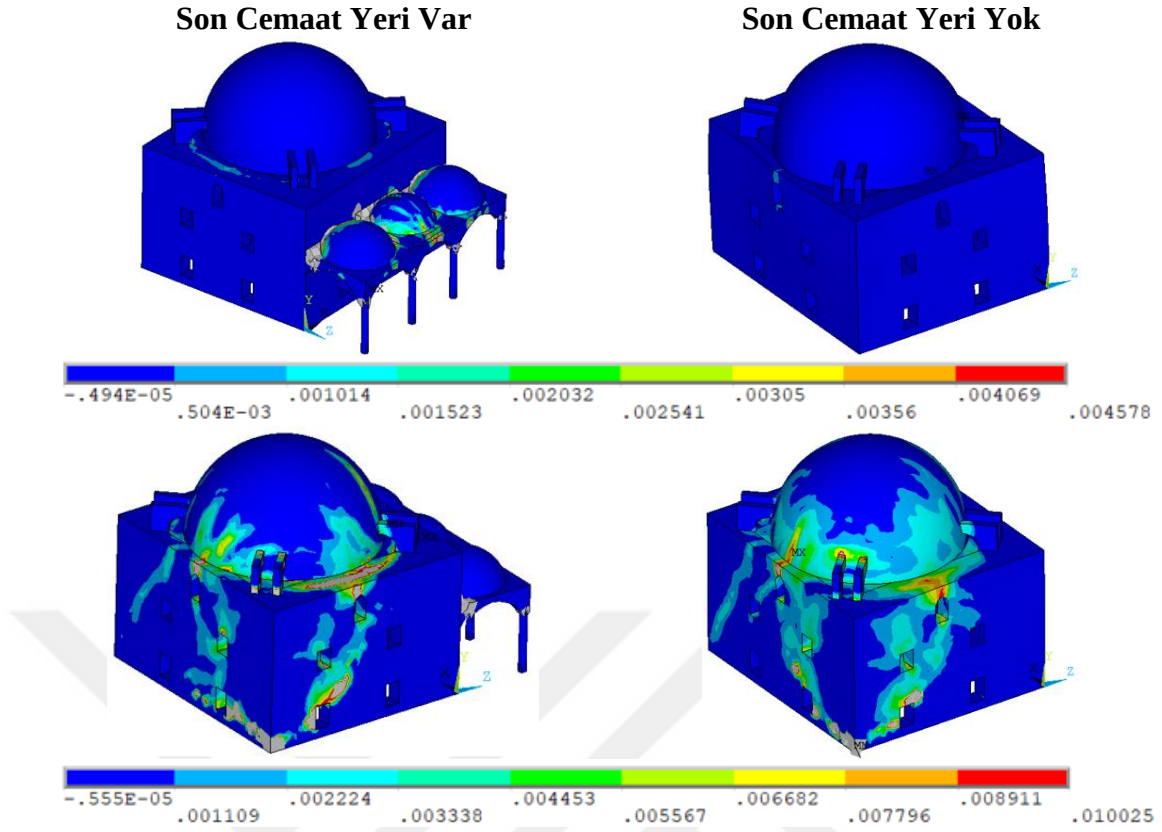
olmayan kısımdaki yer değiştirme davranışının benzer olduğu açıktır. Ayrıca yapının ötelenme oranlarının de değişmediği açıktır.



Şekil 5.41. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami (a) Son cemaat yerinin kuvvet-yer değiştirme eğrisine etkisi; (b) Son cemaat yerinin hasar mekanizması.

Şekil 5.41b’de son cemaat yerinin caminin ana taşıyıcı duvarlarından daha önce hasar alarak camiye birleştiği bölgeden göçtüğü açıkça görülmektedir. Son cemaat yerinin caminin kuzey duvarı ile birleştiği ve üst örtüyü taşıyan taş sütunlar ile kemer sistemin birleştiği bölgelerden, camiden bağımsız şekilde hasar aldığı görülmektedir.

Şekil 5.42’de her iki dinamik analizden elde edilen birinci asal gerilmeler verilmektedir. Son cemaat yerinin yer hareketinin yaklaşık 0.50’inci saniyesinde taş sütunlar ile kubbeleri taşıyan kemer sistem arasında ağır hasarlar olduğu görülmektedir. Ayrıca caminin kuzey duvarı ile son cemaat yerinin birleştiği bölgelerden kaparak göçtüğü söylenebilir. Bu zaman diliminde son cemaat yeri ile caminin kuzey beden duvarı arasında yaklaşık 5-10 mm çatlak genişliği olduğu söylenebilir. Ayrıca son cemaat yeri modellenmemiş camide, 2.96’ıncı saniyede güney-doğu köşesinde meydana gelen hasar mekanizması ile son cemaat yeri modellenmiş caminin aynı zamanda aynı yerde benzer hasar mekanizmasının gözlemlenmektedir.

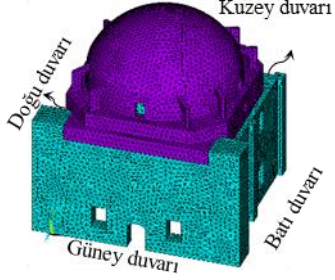
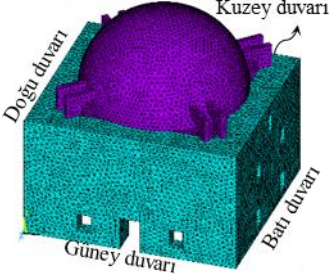
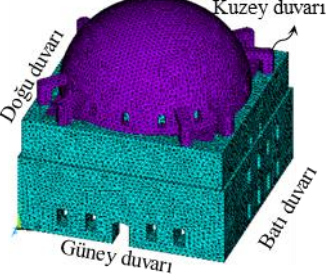
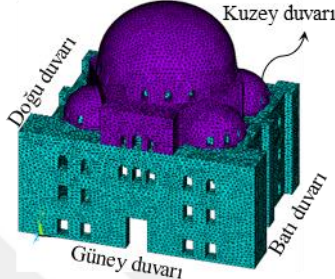
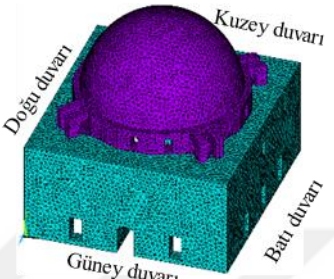
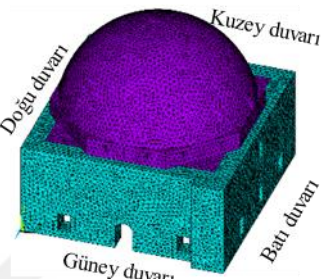
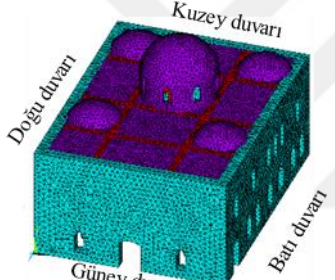
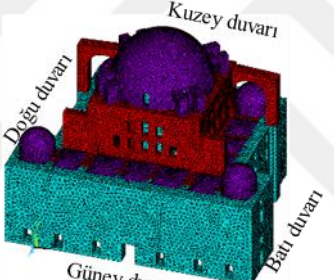
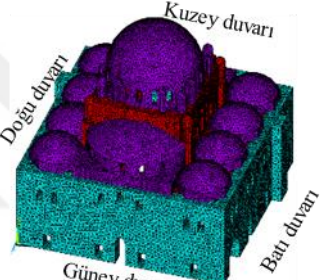
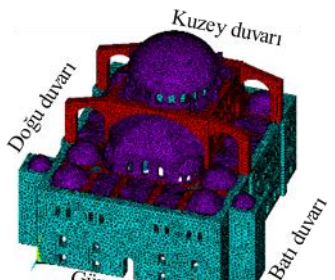
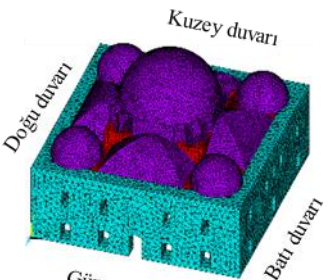


Şekil 5.42. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami son cemaat yerinin hasar mekanizmasına etkisi

Bu durum son cemaate yerinin caminin ana bedeninde ayrı çalıştığı, caminin birincil taşıyıcı duvarlarına etki etmediğini göstermektedir. Ancak iki analiz arasındaki temel fark, analizin başlangıcında lokal hasar gösteren son cemaat yeri, analiz süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Ilgın Lala Paşa Caminin son cemaat yeri dikkate alınan sonlu eleman modelinde yapının 1. modu 5,55 Hz iken göz ardı edilmiş modelde 1. mod 5,62 Hz olarak elde edilmektedir. Belirtilen sebepler ışığında sonlu eleman modellerinde minare ve son cemaat yerleri modellenmemiştir. Bu durum hem yapılacak analizlerin daha sağlıklı ilerlemesine hem de çalışmanın camilerin ana yapısına odaklanmasına olanak sağlamıştır.

Oluşturulan 3D modeller ANSYS APDL (2020) yazılımına aktarılmış ve sonlu eleman modelleri Şekil 5.43’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Her bir modelin eleman ve düğüm noktası sayısı modelin altında belirtilmiştir. Sonlu eleman modelinde SOLID65 elemanı, malzeme modeli olarak beş parametrelili Willam-Warnke (1975) malzeme modeli (göçme yüzeyi) kullanılmıştır.

5. CAMİLERİN BELİRLENMESİ VE SONLU ELEMEN MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI

		
M1 ES: 145717 DN: 32084	M2 ES: 176222 DN: 38030	M3 ES: 206900 DN: 44231
		
M4 ES: 245883 DN: 54411	M5 ES: 226598 DN: 48244	M6 ES: 193605 DN: 40568
		
M7 ES: 169901 DN: 40502	M8 ES: 450484 DN: 103563	M9 ES: 450484 DN: 103563
		ES: Eleman Sayısı DN: Düğüm Noktası Sayısı
M10 ES: 363976 DN: 89317	M11 ES: 158920 DN: 37060	

Şekil 5.43. Camilerin sonlu eleman modelleri

6. ANALİZLER VE SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde sonlu eleman modelleri ile yapılan analizler ve analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Her bir modelde modal analiz, statik itme analizi ve beş yer hareketi altında yapılan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir.

6.1. Teorik Altyapı

6.1.1. Analitik (sonlu eleman yöntemiyle) modal analiz

Sonlu Eleman Yöntemine dayalı N serbestlik dereceli bir sistemin genel hareket denklemi aşağıda verilmiştir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (6.1)$$

Bu denklemde, $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ve $\{\ddot{u}(t)\}$, $\{\dot{u}(t)\}$, $\{u(t)\}$ ve $\{R(t)\}$ ise sırasıyla çok serbestlik dereceli sistemin zamana bağlı ivme, hız, yer değiştirme ve kuvvet vektörlerini ifade etmektedir (Petyt 1990).

Sönüm, Rayleigh sönüm sabitleri ile girilir. Diğer bir deyişle sistemde hem kütle hem de rijitlik oranlı sönümlenmenin bulunduğu varsayılmıştır. α ve β değerlerini tanımlamak için %3 sönümle (Kazaz ve Kocaman 2018; Kocaman 2017; Kocaman et al. 2020) birlikte ilk iki hâkim mod (yatay yönde en yüksek kütle katılım oranına sahip olan) kullanılmıştır.

Yapıda sönüm olmaması durumunda, analitik model kütle ve rijitlik terimleriyle bağıntılı hale gelecektir. Bu halde hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (6.2)$$

şekline dönüşecektir. Yapının doğal frekansları veya modal özelliklerini bulmak için yapının serbest titreşim yaptığı düşünülürse, hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad (6.3)$$

olacaktır. Bu denklemin çözümü için aşağıdaki kabul yapılır (Petyt 1990).

$$\{u(t)\} = \{u_g\}e^{i\omega t} \quad (6.4)$$

Burada $\{u_g\}$, $N \times 1$ boyutunda zamandan bağımsız genliği ifade etmektedir. (6.4) ifadesi (6.3) denkleminde yerine yazıldığında (6.5) denklemi bulunur.

$$([K] - \omega^2[M])\{u_g\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (6.5)$$

Bu denklemin sıfırdan farklı çözümü için,

$$\det|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (6.6)$$

olması gereklidir (Petyt 1990). Bu denklemin çözümünden, serbestlik derecesi kadar (N tane) sönümsüz doğal açısal frekanslar ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_N$) ve mod şekilleri (öz vektörler) bulunur. Belirlenen her doğal frekansa karşılık yapının almış olduğu şekil, mod şekli olarak ifade edilir. Doğal frekansların küçükten büyüğe doğru sıralanması sonucunda elde edilen en küçük frekans temel frekans ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli temel mod şekli olarak adlandırılır.

Modal kütle 1 olacak şekilde normalleştirmiş mod şekilleri denklem (6.7)'den elde edilebilir (Petyt 1990).

$$\{\phi\}_r = (1/\sqrt{m_r})\{u_g\} \quad (6.7)$$

Burada m_r , r . moda ait genelleştirilmiş kütle temsil etmektedir.

6.1.2. Statik itme analizi

Statik itme analizlerinde kullanılan yöntemin detayları da aşağıda verilmiştir. Yapı dinamiğinde doğrusal sistemlerde, bir moddaki davranışı veren eşdeğer statik kuvvetler şu şekilde ifade edilir:

$$\{f_n\} = \Gamma_n [M] \{\phi_n\} S_a(T_n, \xi_n) \quad (6.8)$$

Burada Γ_n modal katılım faktörü, $[M]$ kütle matrisi, ϕ_n n'inci modal vektör ve S_a ise T_n periyotlu ve ξ_n sönüm oranına sahip tek serbestlik dereceli sisteme belirli bir yer hareketi altında etkiyen en büyük ivme veya spektral ivmedir. Bu kuvvet dağılımının uygulanması n'inci mod davranışı ile aynı en büyük tepkiyi sağlayacaktır. Deprem etkisinde yapıların doğrusal olmayan yer değiştirme-yük ilişkisi, yapının dinamik davranışını en büyük kütle katılım oranına sahip baskın modun belirlediği varsayımıyla bu moda ait kuvvet dağılımıyla yapılan itme analizi ile belirlenebilir ve analiz artık doğrusal olmayan statik analiz olarak tanımlanır. Spektral ivme ve modal katılım faktörü Denklem 6.8'de verilen ilişkiyi sadece ölçekleme etkisine sahip olduğu ve doğrusal olmayan bir sistemin yatay yük kapasitesi yer hareketinin şiddetinden bağımsız olduğu için, sistemin yük-yer değiştirme ilişkisi yapı yüksekliğince dağılımı değişmeyen ve monotonik olarak artan yanal kuvvet uygulanmasıyla gerçekleştirilen statik analiz ile elde edilebilir. Bu kuvvet dağılımı, modal atalet kuvvet dağılımlarının bir toplamı olarak genişletilebilir:

$$\{P_n\} = [M] \{\phi_n\} \quad (6.9)$$

Deprem etkisi altında eğer birinci modun baskın olduğu bir davranış sergileniyorsa, eşdeğer statik deprem yükü analizleri birinci modla uyumlu eşdeğer kuvvet vektörüyle yapılabilir. Yukarıda verilen ifadelerle bakılacak olursa, yapı kütlesi yapı yüksekliğince düzgün yayılı ise itme analizinde sadece ϕ_n mod şekliyle uyumlu olacak eşdeğer deprem yükü dağılımının kullanılması yapının baskın moddaki davranışını verecektir. Ancak tarihi yapılarda (camilerde olduğu gibi) kütlelerin yatayda ve düşeyde düzensiz dağılması, kütle dağılımının n'inci moddaki modal vektörle çarpılmasıyla elde edilen Denklem 6.9'daki yük dağılımının kullanılmasını zorunlu

kılmaktadır. Kullanılan programda (ve diğer birçoğunda) kuvvet uygulama şekli dikkate alındığında, n'inci modal yer değiştirme vektörüyle kütlelerin birlikte oluşturacağı deprem yükü profili vektörünü elde etmek için yapıya n'inci mod şekliyle uyumlu ivme yükü uygulamanın daha uygulanabilir bir yol olduğuna karar verilmiştir. Denklem 6.8'de yapı kütlelerine etkiyen ivme profilinin $\ddot{\phi}_n = \phi_n S_a$ olduğu da açıkça görülmektedir.

İtme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri yapının maksimum kapasitesine kadar devam etmektedir. Bunun sebebi itme analizlerinin kuvvet tabanlı gerçekleştirilmesidir (kuvvetin sürekli artacak şekilde uygulanması). Sonraki bölümlerde verilecek olan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, yapının kuvvet kapasitesini ve bu noktadaki yer değiştirme değerinin belirlenmesinde önemli olmaktadır. İtme analizleri global yatay eksenler olan X ve Z yönü dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

6.1.3. Zaman tanım alanında (dinamik) analiz

Dinamik hesaplamalarda yapıda belirli noktalara etkiyen dış dinamik kuvvet $F_i(t)$ altında dinamik denge denklemi (6.1) verilmektedir.

Dinamik deprem analizinde, ANSYS yazılımında yer ivmesini mesnetlere doğrudan uygulamak mümkün değildir. Yer ivmesi uygulamak için modelin tüm eleman düğüm noktaları üzerinde etkiyecek ivme alanları oluşturulur (ACEL komutu). Başka herhangi bir dış yük ya da sonradan ilave edilen bir mesnet olmaması durumunda, yapının genel kartezyen (x, y ve z) eksenlerinin her biri yönündeki ivmesi, ACEL komutunda uygulanan ivmeyle eşit büyüklükte ancak zıt işaretli (ters yönlü) olur. Mesela, yerçekimini simüle etmek için (atalet etkilerini kullanarak) referans çerçeveyi ACEL komutuyla yer çekimine ters yönde ivmelendirmek gerekir. Tüm sönümlü dinamik analizler için (ANTYPE, TRANS), ivmeler eleman kütle matrisleriyle birleştirilerek bir cisim yük vektör terimi oluşturulur. Bu hesap yöntemi yapı dinamiğinde etkili deprem kuvvetleri yöntemi olarak bilinir.

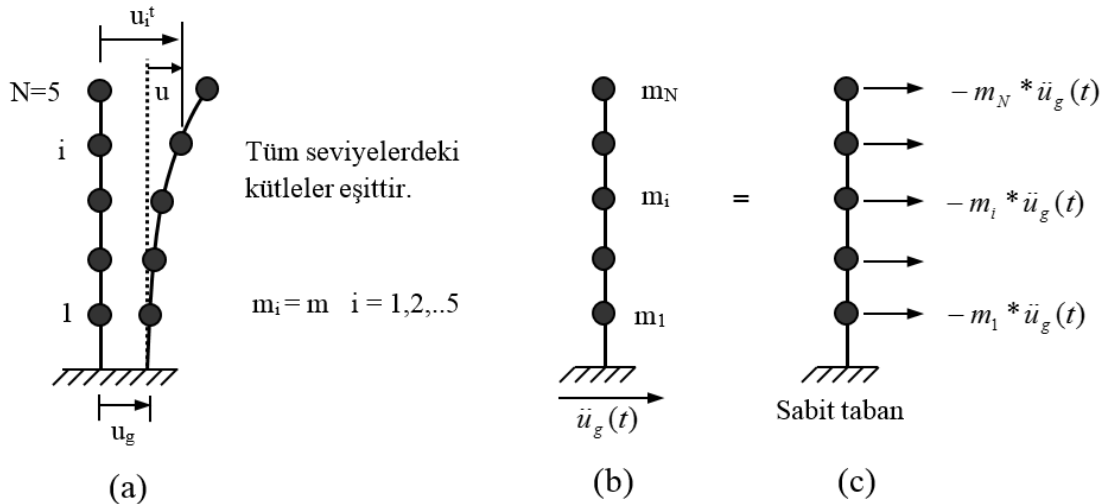
Bu yöntemde, Şekil 6.1a'da gösterildiği gibi yapıda belirli seviyelerde (katlarda) kütlelerin yığıldığı varsayılarak, u_g zemin yer değiştirmesi altında toplam kat yer değiştirme vektörü $\{u^i(t)\}$ Denklem 6.10 ile hesaplanabilir;

$$\{u^t(t)\} = \{u(t)\} + \{I\}u_g(t) \quad (6.10)$$

Burada $\{I\}$ etki vektörüdür. Etki vektörü; kat kütlelerinin bir birim zemin yer değiştirmesinin statik uygulanmasından kaynaklanan yer değiştirmedir. Deprem yüklemesi durumunda harici bir dinamik kuvvet $F(t)=0$ mevcut olmadığından dinamik denge Denklemi 5.10 şu hali alır;

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) \quad (6.11)$$

Denklem 6.1 ve Denklem 6.11 karşılaştırıldığında görülüyor ki; Şekil 6.1b'de $\ddot{u}_g(t)$ yer ivmesine tabi tutulan yapının hareket denklemi ile Şekil 6.1c'de $m_i\ddot{u}_g(t)$ yanal dinamik yükün uygulandığı sistemin hareket denklemi aynıdır. Denklem 6.112 ile hesaplanan ve düğümlerde elde edilen yer değiştirme $\{u(t)\}$ ve ivme $\{\ddot{u}(t)\}$ zemine göre bağıl değerlerdir; dolayısıyla herhangi bir kütlenin toplam ivmesi $\{\ddot{u}_t(t)\}$ hesaplanırken Denklem 6.11 kullanılmalıdır. Yalnız yer ivmesi ACEL komutuyla ters işaretli olarak yapıya uygulandığından mutlak toplam ivmeyi hesaplamak için yer ivmesi $\ddot{u}_g(t)$ -1 ile çarpılarak Denklem 6.10 kullanılmalıdır.



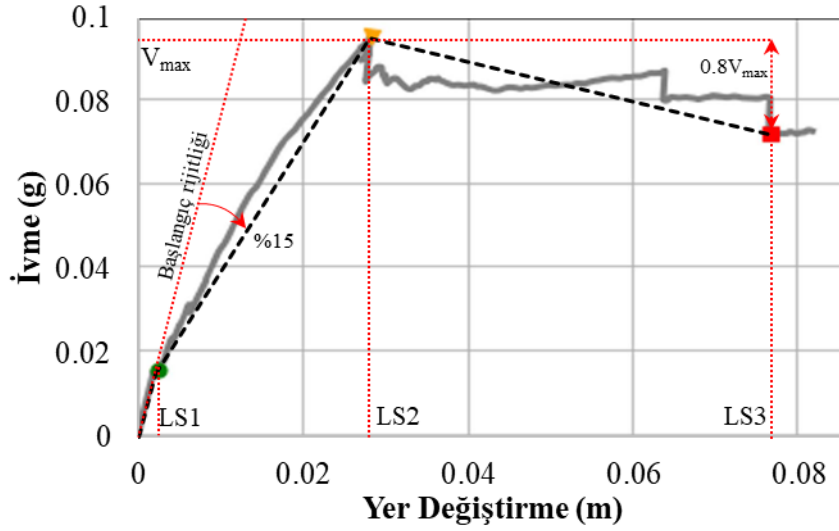
Şekil 6.1. (a) Kütlesel sistem, (b) yer hareketi etkisi, (c) Etkif deprem yükü (Kazaz et al. 2006).

Yukarıda sunulan açıklamalar ışığında, ivme verisi, çözüme başlanmadan önce programa bir dizi şeklinde girilir ve ilgili ivme, tüm zaman tanımlı veri noktalarını kapsayan küçük bir döngü içinde her zaman entegrasyon adımı (Δt) için çözüm evresinde

ilgili diziden çağrılır. Bu ivme alanının belirli bir anda uygulanmasından dolayı, bütün kütleler yer ivmesi değeri ile çarpılır ve elde edilen kuvvet Denklem 6.11’de sağ taraf yük terimi olan harici bir dinamik yükleme olarak yapıya uygulanır. Verilen anlık hareket denklemleri hesaplamalarda zaman entegrasyonu etkileri de dahil edilerek statik olarak çözülür. Newmark zaman integrasyon yöntemi Denklem 6.11 formunda olan hareket denklemlerinin çözümü için kullanılır. Doğrusal olmayan analizde rijitlik matrisi $[K]$, bilinmeyen yer değiştirmelerin bir fonksiyonudur, bu nedenle doğrusal olmayan denklemleri çözmek için Newton-Raphson nümerik iterasyon yöntemi kullanılmıştır.

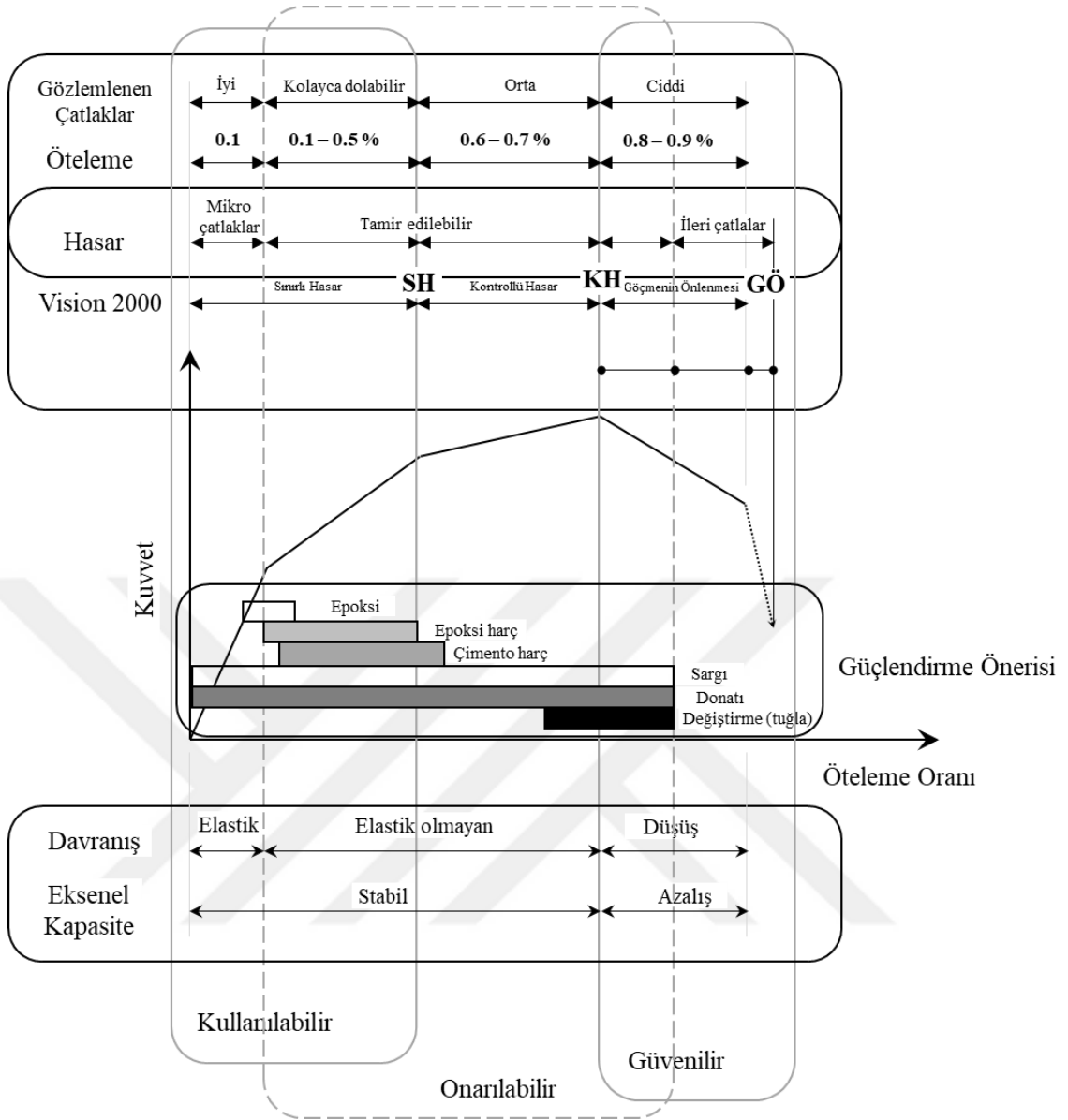
6.1.4. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin idealleştirilmesi

Literatürde çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak yığma duvar ve yapıların kuvvet-ötelenme davranışı için farklı idealleştirmeler önerilmektedir. Saloustros et al. (2020) herhangi bir tarihi yapının bütünü temsil eden bir kuvvet-ötelenme oranı eğrisinin idealleştirilmesinde üç doğrulu idealleştirme önermektedir (Şekil 6.2). Çalışmada tarihi Poblet kilisesinin sonlu eleman modelini oluşturarak yapının sismik davranışını belirlemeye yönelik malzeme özellikleri değiştirilerek 200 adet itme analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri üç parçalı olarak tanımlanmaktadır. Her bir nokta yapının farklı bölgelerinde çatlakların başlaması ve yayılmasının neden olduğu bir sınır durumuna karşılık gelmektedir. Birinci sınır durumu (LS1) yanal rijitlikte %15’lik bir düşüşe karşılık gelmektedir. İkinci sınır durumu (LS2) maksimum kuvvet kapasitesine ve pik sonrası davranış çizgisinin başlangıcına karşılık gelmektedir. Son sınır durumu (LS3) ise yanal kapasitesinin %20’lik bir düşüşün meydana geldiği yer değiştirme seviyesine karşılık gelmektedir.



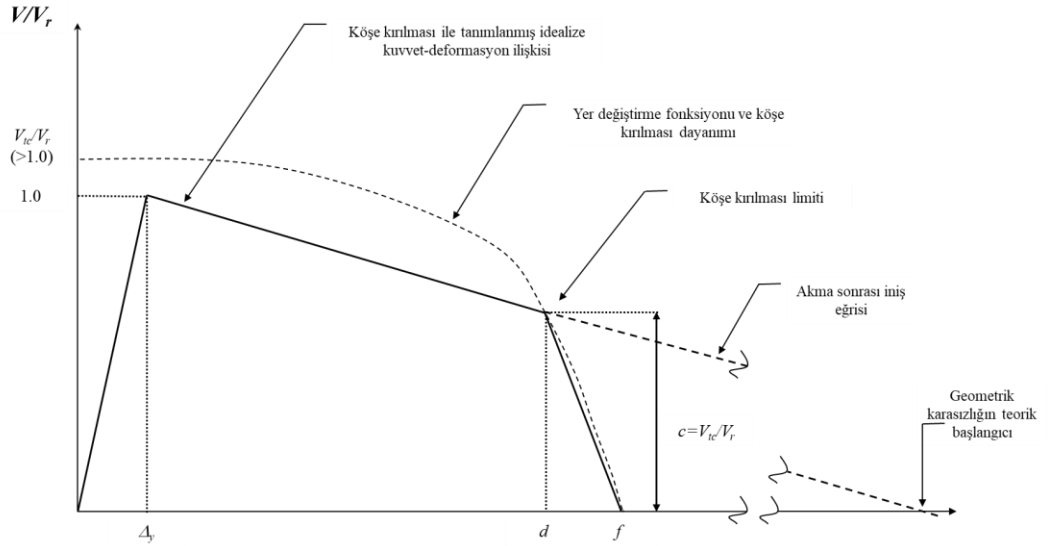
Şekil 6.2. Yığma duvarlar için performans tanımları (Saloustros et al. 2020)

Şekil 6.3’de Bosilijkov et al. (2010) tarafından önerilen hasar çeşitleri, öteleme oranı, duvar davranışı ve olası müdahale çeşitleri bakımından hasar durumu göz önüne alınarak yığma duvarlar için performans seviyeleri tanımlanmaktadır. Bosilijkov et al. (2010)’a göre SH performans düzeyine kadar kuvvet-öteleme eğrisi iki doğrulu olarak idealleştirilmektedir. Bu düzeyde çatlaklar mikro veya tamir edilebilir olarak tanımlanmaktadır. Çatlaklar gözle görülebilir ve kolayca doldurulabilir olarak tanımlanmıştır. Kuvvet-öteleme eğrisinde ilk doğruya kadar sistemin elastik, maksimum kuvvete kadar ise elastik olmayan bir davranış sergileyeceği beklenmektedir. KH performans seviyesinde ise çatlaklar orta seviyede bir hasarı tanımlarken, bu çatlakların kolayca tamir edilebilir olduğu belirtilmiştir. KH performans seviyesi, sistemin kuvvet kapasitesi noktasında tanımlanmaktadır. KH seviyesine kadar sistemin eksenel kapasitesinin stabil olduğu belirtilmiştir. GÖ performans seviyesi için ileri çatlakların gözlemlendiği durum olarak belirtilmiştir. Sistemde eleman yenilenmeleri veya betonarme güçlendirmelere ihtiyaç duyulacak hasarların meydana geldiği belirtilmiştir. Çalışmada performans düzeylerinde beklenen çatlak genişlikleri, hafif ya da ağır hasar olarak tanımlanmış ancak herhangi bir sayısal öneride bulunulmamıştır.



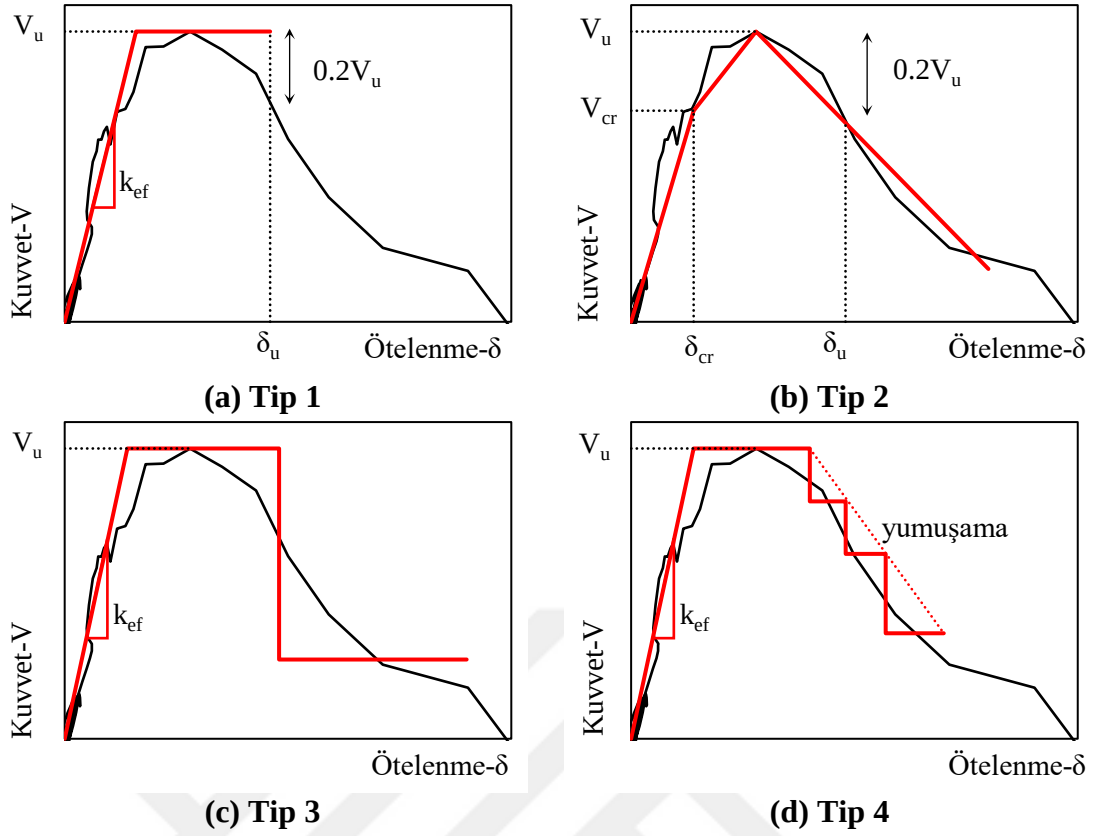
Şekil 6.3. Yığma duvarlar için performans tanımları (Bosiljkov et al. 2010)

ASCE41-13’de devrilme hareketi gösteren bir yığma duvarın genelleştirilmiş kuvvet-deformasyon ilişkisi Şekil 6.4’de verilmektedir. Şekilde verilen c (%) parametresi ($V_{tc,r}/V_r$) devrilme hareketi başladıktan sonra köşe ezilmesine (toe crush) sebep olan kuvvet ile duvarın devrilme hareketinde kesme dayanımına oranı, d (%) parametresi ($100\Delta_{tc,r}/h_{eff}$) $V_{tc,r}$ noktasında meydana gelen düzey yer değiştirme (x100) ile efektif yükseklik oranı, f (%) parametresi ($100(\Delta_{tc,r} + \Delta_y)/h_{eff}$) $V_{tc,r}$ noktasında meydana gelen düzey yer değiştirme (x100) ile akma yer değiştirmesinin efektif yüksek ile oranı olarak tarif edilmektedir.



Şekil 6.4. Yığma duvarlar için genelleştirilmiş kuvvet-deformasyon ilişkisi (ASCE41-13).

Literatürde çeşitli modelleme teknikleri kullanılarak yığma duvar ve yapıların kuvvet-ötelenme davranışı için farklı idealleştirmeler önerilmektedir. Şekil 6.5'de literatürde önerilen bazı kuvvet-ötelenme oranı idealleştirmeleri verilmektedir. Bu eğriler genellikle iki doğrulu veya çok doğrulu şekilde karşımıza çıkarmaktadır. İki doğrulu idealleştirmeler eşit enerji soğurma kapasitesi dikkate alınarak Şekil 6.5(a)'da görüldüğü gibi gerçekleştirilir. Bu yaklaşım için nihai yer değiştirme δ_u genellikle maksimum kuvvette %20'lik bir düşüşün ardından belirlenir. Aynı zamanda efektif rijitlik k_{ef} çeşitli kriterler kullanılarak belirlenmektedir (Doherty et al. 2002; Krzan et al. 2015; Petry and Beyer 2015). Üç doğrulu modellerde, yapı maksimum kuvvet kapasitesine ulaşmadan önce, eğilme veya kesme çatlaklarına bağlı olarak başlangıç rijitliğindeki azalma modellenebilmektedir. Duvarın veya yapının maksimum kuvvet sonrası davranış bölgesi dikkate alınarak nihai ötelenme oranı Şekil 6.5(b-c ve d)'de gösterildiği gibi belirlenebilmektedir (Cattari et al. 2021). Parisse et al. (2021) yığma yapılar için kullanılan çeşitli idealleştirmelerin güvenle kullanılabileceğini belirtmiştir.



Şekil 6.5. Kuvvet-ötelenme ilişkileri (a) elastik-plastik, (b) üç doğrulu, (c) elastik-artık dayanımlı plastik ve (d) çok doğrulu.

6.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde 11 caminin modal, itme ve dinamik analizlerinin sonuçları verilmektedir. EK-1’de her caminin detaylı modal analiz, itme analizi ve dinamik analiz sonuçlarının detayları verilmektedir.

6.2.1. Analitik modal analiz sonuçları

Camilerin temel titreşim frekansları modal analiz sonucunda elde edilmiştir. Sonlu eleman modellerinde kullanılan malzeme özellikleri önceki bölümde verilen değerler ile tanımlanmıştır. Çizelge 6.1’de her caminin kütlesi, ilk moda ait frekans değeri, ilk modun yönü, ilk moda ait kütle katılım oranı (KKO, α_1) ve birinci modun modal katılım faktörünün kubbe modal yer değiştirme genliği ile çarpımı ($\Gamma_1 \cdot \phi_{1,top}$) verilmektedir. Modellerde plan düzlemi X-Z, düşey (yer çekimi yönü) eksen Y olarak alınmıştır. M1-M6 modelleri için modal ve diğer tüm analizler hem $200f_c$ hem de $750f_c$

elastisite modülü ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yığma yapılar için oldukça değişken ve belirsizlikler içeren bu parametrenin yapı davranışına olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. EK-1’de bütün modellerin 20 modda yapılmış analizleri verilmektedir. İlk altı moda ait mod şekilleri ve frekans değeri ekte bulunmaktadır.

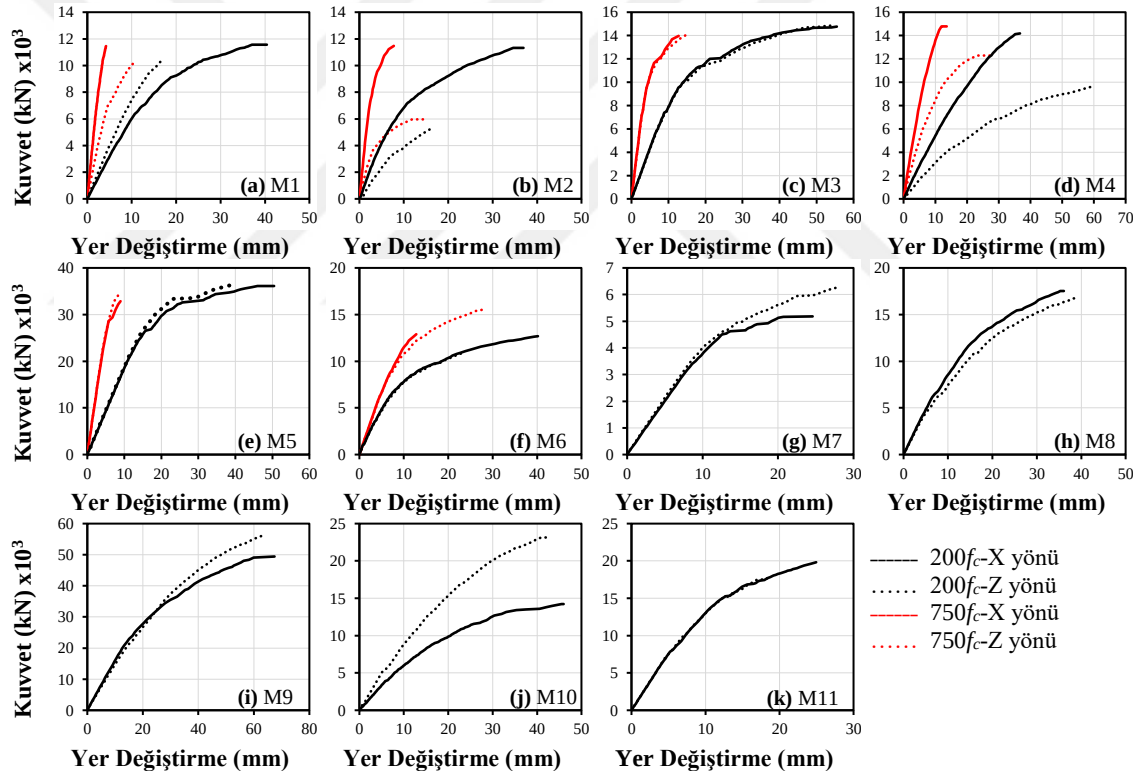
Çizelge 6.1. Camilerin kütle katılım oranı, birinci mod frekans ve modal katılım oranı değerleri.

Cami	Malzeme	Toplam Kütle (t)	Frekans (Hz)	Yön	α_1	$\Gamma_{1,\phi_{1,top}}$
M1_R	750 f_c	3.618	4,13	Z	0,64	1,58
M2_R	750 f_c	3.019	5,62	Z	0,65	1,80
M3_R	750 f_c	3.636	5,20	Z	0,60	1,70
M4_R	750 f_c	6.034	2,67	Z	0,54	1,57
M5_R	750 f_c	7.770	5,39	X	0,54	2,19
M6_R	750 f_c	3.371	5,69	Z	0,54	1,45
M1	200 f_c	3.618	2,33	Z	0,70	1,49
M2	200 f_c	3.019	3,04	Z	0,70	1,84
M3	200 f_c	3.636	2,91	Z	0,67	1,61
M4	200 f_c	6.034	1,55	Z	0,60	1,54
M5	200 f_c	7.770	3,03	Z	0,74	1,81
M6	200 f_c	3.371	3,33	Z	0,55	1,28
M7	200 f_c	2.363	2,58	X	0,72	1,70
M8	200 f_c	7.192	2,31	X	0,55	1,88
M9	200 f_c	28.221	1,53	Z	0,68	1,78
M10	200 f_c	7.860	1,74	X	0,54	1,71
M11	200 f_c	5.797	3,03	X	0,52	1,16

Çizelge 6.1’de cami tipi yapılarda kütleli katılım oranı 0,40 ile 0,74 arasında değişmekte olup, ortalama 0,63 değerinde olduğu görülmektedir. Çok serbestlik dereceli sistemden (ÇSDS) tek serbestlik dereceli sisteme (TSDS) geçişlerde kullanılan modal yer değiştirme dönüşüm faktörünün ($\Gamma_{1,\phi_{1,top}}$) hesaplanmasında birinci modun kubbe tepe genliği ($\phi_{1,top}$) kullanılmıştır. ($\Gamma_{1,\phi_{1,top}}$) değerleri tarihi camilerde 1,5 ila 2,0 arasında bir değer aldığı görülmektedir. Yığma camilerin modal deplasman şekli, yükleme yönüne paralel ve dik duvarların ve kubbenin etkileşiminden etkilenir. Yükleme yönüne paralel yan duvarların büyük düzlem içi rijitliği yatay hareketi engellerken, düzlem dışı yönde çalışan dikey duvarlar ve esnek kubbe, herhangi bir rijit diyafram olmaması nedeniyle daha yüksek yer değiştirir. Bu durum kubbe tepe modal yer değiştirmesini ($\phi_{1,top}$) büyütür. Kubbeler yüksek kabuk kalınlığına ve düşük yüksekliğe sahip olduğunda (basık kubbe), M11 camisinde olduğu gibi $\Gamma_{1,\phi_{1,top}}$, alt değeri 1,0’e yaklaşmaktadır.

6.2.2. İtme analizi sonuçları

İtme analizi yapıların yanal yük kapasitelerini belirlemek için kullanılan, teorik altyapısı oturmuş ve oldukça pratik bir yöntemdir. Bu yöntemde sisteme etki ettirilen yatay yükler bir dağılıma göre belirlenir (genelde birinci titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde), ve yapı ve elemanları şekil değiştirme sınırlarına ulaşana kadar monotonik olarak adım adım arttırılarak uygulanır. Yığma yapılarda kütle, geleneksel betonarme binalarda olduğu gibi, katlarda belli seviyelerde yığılı olmadığından bir yanal yük profili oluşturmak güçtür. Bu nedenle yapının yatay yük kapasitesini aşacak bir ivme değeri belirlenerek bütün elemanlarda kütlenin ivmeyle çarpılması sonucu belirlenen yatay kuvvetler uygulanarak itme analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.6. İtme analizleri sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 6.6’da gösterilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin yapının maksimum kapasitesine kadar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi itme analizlerinin kuvvet tabanlı gerçekleştirilmesidir (kuvvetin sürekli artacak şekilde uygulanması). Şekil 6.3’de verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, yapının kuvvet kapasitesini ve bu noktadaki yer değiştirme değerinin belirlenmesinde önemli olmaktadır. Analizler hem X hem de Z yönü dikkate

alınarak gerçekleştirilmiştir. Verilen grafiklerde her iki yönde elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri bulunmaktadır. M4 ve M10 camileri haricinde her iki yön için hesaplanan itme eğrilerinin yapıların simetrisinden dolayı benzer olduğu görülmektedir. EK-1’de bütün modellerin itme analiz sonuçlarının detayları bulunmaktadır.

6.2.3. Dinamik analiz sonuçları

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, sentetik olarak üretilmiş veya gerçek bir deprem esnasında kaydedilmiş bir yer hareketinin zaman tanım alanındaki ivme kaydı ile yapıda meydana gelebilecek elastik sonrası davranışı elde etmek için kullanılmaktadır. Camilerin yer değiştirme ve kuvvet kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla deprem yükleri altında doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. 5 adet yer hareketinin iki yönlü ivme kayıtları kullanılmıştır.

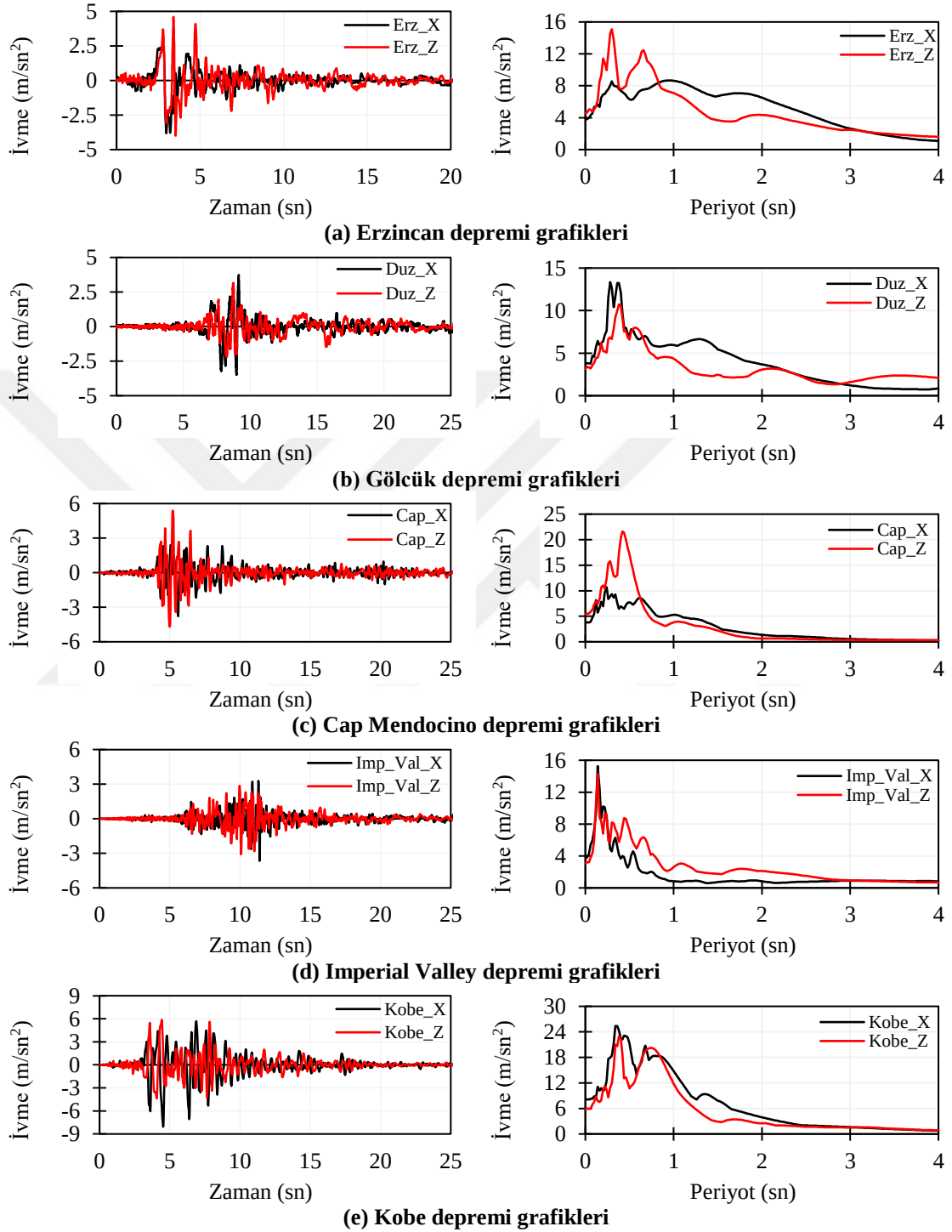
Çizelge 6.2. Dinamik analizlerde kullanılan yer hareketlerinin özellikleri

Deprem	Kodu	Yıl	M _w	İstasyon	PGA (gal)		PGV (cm/sn)	
					X yönü	Z yönü	X yönü	Z yönü
Erzincan	Erz	13.03.1992	6,8	Merkez	381,6	460,5	101,4	94,7
Gölcük	Duz	17.08.1999	7,4	Düzce, Merkez Meteoroloji İstasyonu	373,8	314,9	52,6	59,5
Cape Mendocino	Cap	25.04.1992	7,1	İstasyon No: 89324 (40.503N, 124.100W)	378,3	538,5	45,6	44,0
Imperial Valley	Imp_Val	15.01.1979	6,6	USGS 5115 (32 54 58N, 115 21 58W)	365,2	309,4	32,7	33,7
Kobe	Kobe	16.01.1995	6,9	Japonya Meteoroloji Ajansı JMA istasyonu	805,7	587,1	81,4	74,3

Çizelge 6.2’de ivme kaydı özellikleri verilmektedir. Seçilen yer hareketlerinin şiddeti, doğrusal olmayan TSDS analizleri kullanılarak camilerin dayanım ve yer değiştirme kapasitesini ortaya çıkaracak kadar yüksek olduğu doğrulanmıştır. Camilerin itme eğrileri, her bir caminin doğrusal olmayan TSDS gösterimini elde etmek için modal kapasite eğrilerine dönüştürülmüştür. Daha sonra seçilen yer hareketleri altında uygulanan maksimum yer değiştirme talebi ÇSDS zaman tanım alanı analizi ile değerlendirilmiştir. Kullanılan yer hareketlerinin X ve Z doğrultularının ivme-zaman grafikleri ve ivme spektrumları Şekil 6.7’de verilmektedir. Yer hareketlerine ait diğer özellikler EK-2’de verilmiştir. Etki ettirilen dinamik yüklemeler altında camileri oluşturan elemanlarda meydana gelen çatlama, akma ve sonrasındaki davranışları histerezis çevrimler ile temsil edilmektedir. Bu çevrimlerin asıl amacı, dinamik

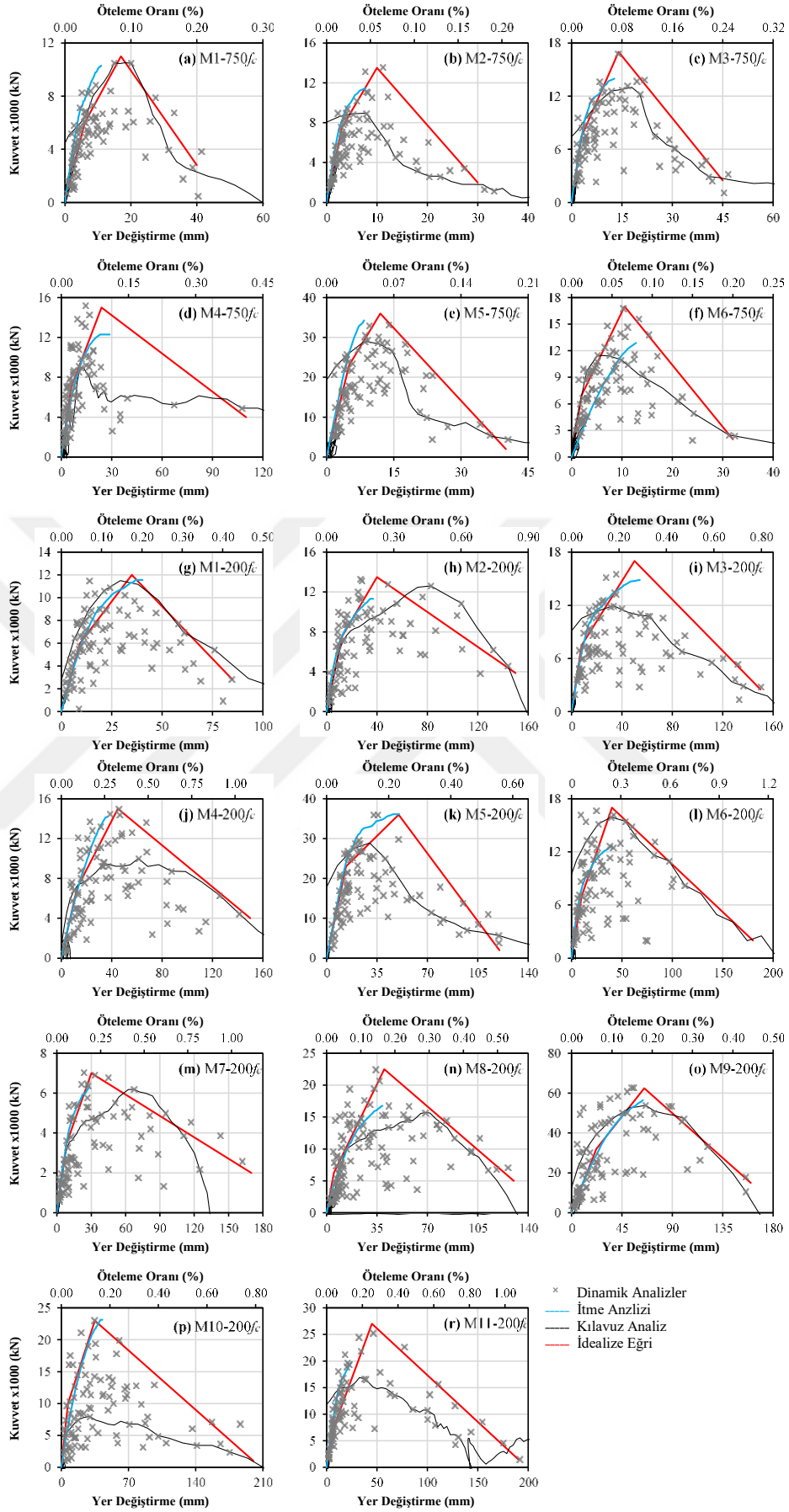
6. ANALİZLER VE SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

yüklemeler altında yapıların davranışlarının olabildiğince doğru bir şekilde elde edilmesidir. Dinamik analizlerde yer hareketleri iki yönlü olarak uygulanmıştır.



Şekil 6.7. Analizlerde kullanılan yer hareketleri ivme-zaman ve ivme spektrum grafikleri

6. ANALİZLER VE SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 6.8. Camilerin dinamik kapasite eğrileri

Şekil 6.8’de her bir cami modelinde gerçekleştirilen tüm analizlerden elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri üzerinde başlangıç rijitliği, maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme, çevrimsel boşaltma yolu gibi kritik eylemleri temsil eden noktasal değerleri kapsayan bir omurga eğrisi çizilerek camilerin idealize edilmiş global taban kesme kuvveti-kubbe yer değiştirme ($V-D$) ilişkisi belirlenmiştir. Başlangıç rijitliğinin belirgin olması için lineer davranış bölgelerinden değerler de alınmıştır. Ayrıca histerezis eğrileri, caminin göçtü kabul edildiği çevrimdeki değerlerin hemen hepsini içermektedir. Göçmeye, histerezis eğrileri ile birim şekil değiştirme değerinin karşılaştırılması ile karar verilmiştir. Yapıların kuvvet-yer değiştirme davranışının daha belirgin şekilde görülebilmesi için grafiğe ayrıca örnek bir deprem kaydı dinamik analizinin en büyük çevrimindeki yer değiştirme-taban kesme kuvveti eğrisi de eklenmiştir. Ayrıca yapıların itme analizlerinden elde edilen eğrileri de grafiklerde görülmektedir. Sunulan tüm bu veriler birleştirilerek, data noktalarını saracak 3 doğrulu idealize zarf eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler üzerinden sonraki bölümlerde tarihi yığma camilerin hasar sınırları tanımlanacaktır.

Toplamda 85 zaman tanım alanında analiz gerçekleştirilmiştir. Düğüm noktası sayıları, eleman sayıları ve modelde oluşan yakınsama sorunları göz önüne alındığında ciddi bir analiz yükü karşımıza çıkmaktadır. Ortalama bir dinamik analiz Intel® Core™ I-7-4790 CPU işlemciye sahip 16GB RAM olan standart bir bilgisayarda 250 saat sürmektedir. Uzun analiz süreleri sebebiyle çalışmada 64 işlemciye sahip AMD EPYC-Rome Processor ve 328GB RAM’e sahip bir iş istasyonu kullanılmıştır. Bu iş istasyonu ile bir analiz yaklaşık 40 saat kadar sürmektedir.

6.3. Kuvvet Kapasitelerinin, Ötelenme Limitlerinin ve Yıkılma Mekanizmalarının Belirlenmesi

Çalışmanın bu kısmında yapılan analizler ışığında camilerin kuvvet kapasiteleri, ötelenme limitleri ve yıkılma mekanizmaları belirlenecektir.

6.3.1. Camilerin kuvvet kapasitesinin belirlenmesi

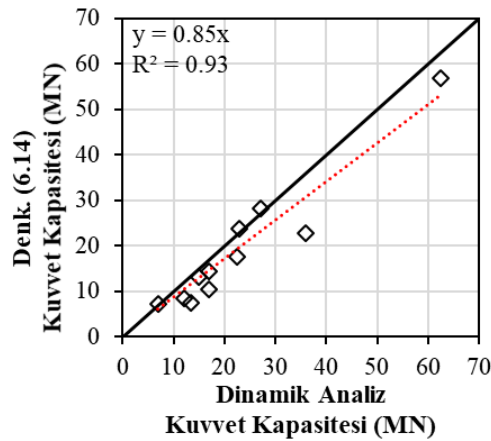
Yığma duvarların yanal yük kapasitelerin belirlenmesinde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Kesme dayanımı, duvarın kesme kuvvetleri altında göçmesi durumu,

duvarın düzlem içi yüklere karşı direncini tanımlayan bir mekanik özelliğidir. Kesme göçmesinin farklı mekanizmaları olduğu için kesme dayanımının tanımlanması kolay değildir. Duvarın tipolojisi, geometrisi, maruz kaldığı eksenel kuvvet ve deney mekanizması oldukça önemlidir. Sonlu eleman modellemesi zor olan tarihi yapıların, yanal yük kapasitelerinin belirlenmesi için yönetmelikle bazı öneriler bulunmaktadır. TBDY (2018) yığma duvarların karakteristik kesme dayanımı (f_{vk}) ve yanal yük kapasitesi (V_{max}) hesaplama için sırasıyla Denklem 6.12 ve 6.13 önerilmektedir.

$$f_{vk} = f_{vko} + 0,4\sigma_d \leq 0,10f_b \quad (6.12)$$

$$V_{max} = A_{duvar} \times f_{vk} \quad (6.13)$$

Burada f_{vko} karakteristik başlangıç kesme dayanımı, σ_d hesaplanmış duvar düşey basınç gerilmesi, f_b duvarın basınç dayanımı, A_{duvar} duvar alanıdır. f_{vko} değeri taş duvarlar için 0.1 MPa olarak önerilmektedir (TBDY 2018). Statik düşey yükler altında basınç gerilmeleri, dinamik analizlerden ve Denklem 6.13'den elde edilen kuvvet kapasiteleri Çizelge 6.3'de verilmektedir. Yanal kuvvet kapasitesi için Denklem 6.13 kullanıldığında, A_{duvar} uygulanan kuvvet yönündeki duvarların alanları olarak hesaplanır. Denklemler ile elde edilen kuvvet kapasitelerinin analizlerden elde edilenlerin %85 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca farklı iki yöntem ile elde edilen kuvvet kapasiteleri oldukça iyi bir korelasyon ilişkisi sergilemektedir (Şekil 6.9). Bu durum tarihi camilerde kuvvet kapasitesinin belirlenmesinde Denklem 6.12, 6.13 yaklaşımının güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.



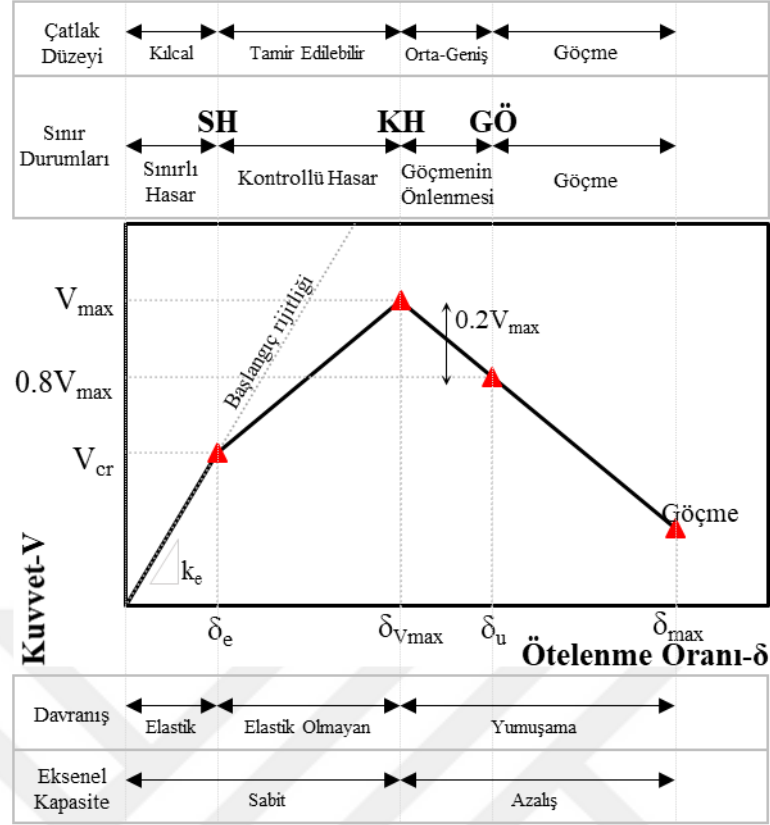
Şekil 6.9. Denklem 6.14 ile dinamik analiz kuvvet kapasitelerinin karşılaştırılması

6.3.2. Ötelenme limitlerinin belirlenmesi

Birçok yönetmelik yığma duvarlar için ötelenme hasar limitleri önermektedir. Ancak özel olarak tarihi camiler için hasar limit önerisi bulunmamaktadır. Çalışmanın bu kısmında tarihi camiler için hasar limitleri belirlenmiştir.

Tarihi camilerin farklı analiz yöntemleri kullanılarak yatay kuvvet-ötelenme oranı ilişkileri belirlenmiştir. Literatürde önerilen idealizasyonlar kullanılarak yığma camiler için hasar sınır durumları ortaya konmuştur. Bu çalışmada tarihi camilerin deprem performans düzeyleri için Şekil 6.10'da gösterildiği gibi üç sınır koşulu önerilmektedir.

- **Sınırlı Hasar (SH):** Bu performans düzeyinde bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı kabul edilir. Yapının doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı hasar düzeyi olarak tanımlanır. Kuvvet-ötelenme eğrisinde başlangıç rijitliğinin değiştiği noktaya denk geldiği kabul edilmektedir. Taşıyıcı elemanlarda göz ile görülebilen ancak kolayca tamir edilebilir mikro çatlaklar gözlemlenir. Yapı SH sınır durumuna kadar elastik davranış sergiler.
- **Kontrollü Hasar (KH):** Bu noktada can güvenliğini sağlamak üzere yapının taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyine karşı gelmektedir. Bu nokta yapının kuvvet-ötelenme eğrisinde maksimum kuvvetin (kapasitenin) ulaşıldığı nokta olarak tarif edilebilir (Maccarini et al. 2018). Bu noktada orta ve düşük düzeyde çatlaklar gözlemlenir. Bu çatlaklar genellikle tamir edilebilir seviyededir. Yapı SH-KH sınır koşulları arasında elastik olmayan davranış sergiler. Bu sınır koşuluna kadar yapının kuvvet kapasitesi stabildir.
- **Göçmenin Önlenmesi (GÖ):** Performans Düzeyi bina taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi duruma karşı gelmektedir. Binanın kısmen veya tamamen göçmesi önlenmiştir. Bu performans düzeyi ise kapasitenin %80'ine tekabül eden kuvvet düzeyinde meydana geldiği kabul edilmektedir. Taşıyıcı elemanlarda ciddi hasar çatlakları ve yığma birimlerde ezilmeler gözlemlenir. Bu performans noktası sonrasında yapının yanal yük kapasitesinde azalma görülmektedir.

Şekil 6.10. Tarihi camiler için V- δ idealizesi

Çizelge 6.3’de ele alınan her bir caminin önerilen idealleştirme yöntemi ile elde edilen hasar sınır durumları verilmektedir. Tabloda her bir caminin üç hasar sınır limiti verilmektedir. M1-M6 camilerinin ise hem $200f_c$ hem de $750f_c$ malzeme yaklaşımı ile elde edilen hasar limitleri görülmektedir. SH, KH ve GÖ hasar sınırları sırasıyla %0,01-0,07, %0,06-0,27 ve %0,08-0,45 arasında değişkenlik göstermektedir. Bu duruma hem elastisite modülü hem cami büyüklüğü hem de caminin mekânsal kurgusunun etki ettiği düşünülmektedir. Ayrıca açıkça söylenebilir ki; tarihi camiler için hasar sınır durumları tek bir değer ile temsil edilemez. En önemli malzeme parametrelerinden olan elastisite modülündeki belirsizlik ve değişkenlik tarihi camilerde hasar sınır durumunu oldukça etkilemektedir. Ayrıca bazı camilerin DL sınır durumuna karşı gelen limitler bazı camilerde SD sınır durumunu ifade etmektedir. Bu durum tarihi camilerde her camiye özel hasar limitlerine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.3’de sunulan hasar sınırları ile Çizelge 1.1’de yönetmeliklerde önerilen değerler karşılaştırılmıştır. İlk olarak her bir hasar sınırı için elde edilen değer aralıklarının en düşüğü dikkate alındığında; SH, KH ve GÖ hasar sınırları için sırasıyla

%0,01, %0,06 ve %0,08 olduğu görülmektedir. Bu değerler yönetmeliklerde önerilen limitlerin oldukça altındadır. En düşük limit değerleri bulunan modellerde elastisite modülü 2.250 MPa ($750f_c$) kullanılmıştır. Elastisite modülü değeri daha yüksek alınan birçok çalışmayı Çizelge 4.1’de görmek mümkündür. Dolayısıyla, elastisite modülünün artırılması bu limitlerin daha da azalmasına neden olacaktır. Bu sebeple doğru elastisite modülü seçimi, performans limitlerini direkt olarak etkilemektedir.

Çizelge 6.3. Camilerde kuvvet kapasiteleri ve hasar sınır limitleri

Cami	Analiz Kapasitesi (kN)	σ (MPa)	Denk. 6.14 Kapasitesi (kN)	SH (%)	KH (%)	GÖ (%)	Göçme
M1- $200f_c$	12.000	0,275	8.436	0,05	0,17	0,24	0,42
M2- $200f_c$	13.500	0,289	7.482	0,07	0,22	0,37	0,84
M3- $200f_c$	17.000	0,361	14.423	0,04	0,27	0,39	0,80
M4- $200f_c$	15.000	0,559	13.048	0,05	0,17	0,27	0,56
M5- $200f_c$	36.000	0,482	22.805	0,06	0,23	0,30	0,56
M6- $200f_c$	17.000	0,212	10.337	0,06	0,25	0,44	1,10
M7- $200f_c$	7.000	0,345	7.213	0,06	0,20	0,45	1,12
M8- $200f_c$	22.500	0,413	17.667	0,02	0,17	0,27	0,55
M9- $200f_c$	62.500	0,512	56.801	0,06	0,15	0,23	0,44
M10- $200f_c$	23.000	0,678	23.731	0,03	0,14	0,28	0,79
M11- $200f_c$	27.000	0,550	28.224	0,05	0,25	0,43	1,07
M1- $750f_c$	12.000	0,275	8.436	0,02	0,09	0,12	0,20
M2- $750f_c$	13.500	0,289	7.482	0,02	0,06	0,08	0,17
M3- $750f_c$	17.000	0,361	14.423	0,02	0,07	0,11	0,24
M4- $750f_c$	15.000	0,559	13.048	0,02	0,09	0,18	0,41
M5- $750f_c$	36.000	0,482	22.805	0,02	0,06	0,08	0,19
M6- $750f_c$	17.000	0,212	10.337	0,01	0,06	0,09	0,20

İkinci olarak her bir hasar sınırı için elde edilen değerlerin maksimumu dikkate alındığında, SH, KH ve GÖ hasar sınırları için sırasıyla %0,07, %0,27 ve %0,45 değerleri elde edilmektedir. Bu modellerde kullanılan elastisite modülü 600 MPa ($200f_c$) olarak kabul edilmiştir. Bu değer yığma duvarlar için önerilen en düşük değerlerden biridir. Bu limit değeri FEMA 356 ve EC8-3 ile yakın olduğu görülmektedir. Ancak diğer yönetmeliklere, özellikle tarihi camileri için hasar limiti önerilen VGM kılavuzuna göre düşük kalmaktadır. Aynı zamanda elde edilen ötelenme oranları bir duvarı değil cami sistemini temsil etmektedir. Ancak camilerin duvarlarından elde edilen ötelenme limitlerinin daha da düşük olduğunu belirtmek gerekir. Bütün bu bulgular göz önüne alındığında yönetmeliklerde önerilen limitlerin tarihi camiler için uygun olmadığı açıktır.

Çalışmanın bu kısmında camilerin geometrik boyutları ve malzeme özellikleri kullanılarak tanımlanan performans seviyelerini belirleyen hasar limit bağıntıları elde edilecektir. Literatürde tarihi yapıların boyutları kullanılarak yapıların birinci mod frekanslarını bulmaya yönelik çalışmalar mevcuttur (Lopez et al. 2019; Çalık et al. 2020). Bu amaçla modellenen ve analizleri gerçekleştirilen 11 cami kullanılarak bir dizi regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde camilerin Çizelge 4.1’de verilen geometrik özellikleri ve Çizelge 6.3’de verilen kuvvet kapasiteleri ve ötelenme oranı limitleri kullanılmıştır. Denklem 6.14 ve 5.15’de oluşturulan formüllerin genel formu verilmektedir. Regresyon analizleri hem lineer (Denklem 6.14) hem de polinom (Denklem 6.15) olarak gerçekleştirilmiştir.

$$y = a + a_1 t + a_2 l_k + a_3 l_u + a_4 h + a_5 h_k + a_6 r_k + a_7 E + a_8 p_a \quad (6.14)$$

$$y = a + a_1 t^{b_1} + a_2 l_k^{b_2} + a_3 l_u^{b_3} + a_4 h^{b_4} + a_5 h_k^{b_5} + a_6 r_k^{b_6} + a_7 E^{b_7} + a_8 p_a^{b_8} \quad (6.15)$$

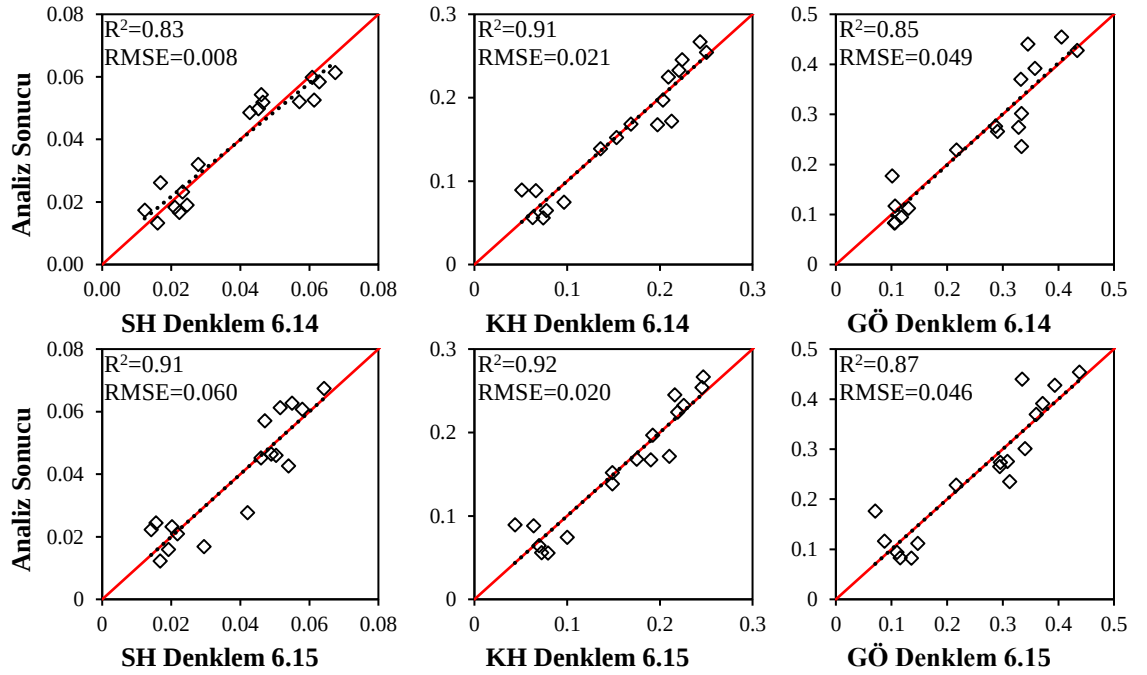
Burada t duvar kalınlığı (m), l_k kısa duvar genişliği (m), l_u uzun duvar genişliği (m), h duvar yüksekliği (m), h_k kubbe yüksekliği (m), r_k kubbe çapı (m), E duvar elastisite modülü (MPa), p_a toplam paye alanıdır (m²).

Çizelge 6.4’de farklı formüllerin kat sayıları ve bu kat sayılar kullanılarak elde edilen değerlerin karşılaştırmaları SH, KH ve GÖ hasar sınırları için verilmektedir. Her iki denklem yaklaşımı ile hasar sınır limitleri oldukça yüksek korelasyonda elde edilmektedir.

Şekil 6.8’de önerilen denklemler ile elde edilen limit değerleri ile analizler sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılmaktadır. SH, KH ve GÖ limitleri için önerilen polinom eşitliklerin daha güvenilir R^2 ve RMSE değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Denklem 6.15 ile elde edilen değerlerin SH, KH ve GÖ limitleri için R^2 değeri sırasıyla 0,83, 0,91 ve 0,85 olarak belirlenmiştir. Denklem 6.16 ile elde edilen değerlerin SH, KH ve GÖ limitleri için R^2 değeri sırasıyla 0,91, 0,92 ve 0,87 olarak belirlenmiştir. Her iki yaklaşım arasında önemli bir R^2 farkı görülmemektedir. Ancak Denklem 6.14’in kullanımı daha kolay, Denklem 6.15’nin kullanımı ise daha güvenli olduğu söylenebilir.

Çizelge 6.4. Denklem katsayıları

	SH (%)		KH (%)		GÖ (%)	
	Lineer Denk (6.14)	Polinom Denk (6.15)	Lineer Denk (6.14)	Polinom Denk (6.15)	Lineer Denk (6.14)	Polinom Denk (6.15)
a	-9,48E-03	2,36E-01	2,13E-01	7,84E-01	4,93E-01	1,143
a ₁	-2,47E-02	-1,15E-01	4,81E-02	2,63E-02	4,20E-02	2,14E-02
a ₂	4,13E-03	1,64E-04	9,92E-03	7,75E-05	2,29E-04	1,53E-04
a ₃	-1,27E-03	-7,48E-06	-7,80E-03	4,78E-01	3,49E-03	3,46E-01
a ₄	1,16E-02	-1,93E-04	7,22E-03	-1,35E-01	1,88E-02	-2,09E-01
a ₅	-5,49E-03	-4,25E-03	-3,36E-03	5,08E-06	-1,59E-02	1,46E-06
a ₆	3,33E-03	-4,45E-03	-3,84E-03	-2,40E-04	-6,38E-03	-6,70E-04
a ₇	-2,11E-02	-5,00E-03	-8,89E-02	-1,33E-01	-1,36E-01	-1,15E-01
a ₈	-3,71E-04	-3,25E-02	-2,67E-03	-5,62E-02	-1,04E-03	-2,84E-02
b ₁	-	0,220	-	2,239	-	2,529
b ₂	-	1,900	-	1,809	-	1,753
b ₃	-	2,300	-	-0,679	-	-0,375
b ₄	-	1,642	-	0,580	-	0,564
b ₅	-	0,655	-	3,015	-	3,503
b ₆	-	0,895	-	2,365	-	2,147
b ₇	-	2,458	-	0,719	-	1,147
b ₈	-	0,211	-	0,336	-	0,659



Şekil 6.11. Analiz ve denklemlerle elde edilen limitlerin karşılaştırılması

6.3.3. Yıkılma mekanizmalarının belirlenmesi

Dinamik analizler sonucunda her bir analizin asal birim şekil değiştirmeleri incelenerek yıkılma mekanizmaları elde edilmiştir. Şekil 6.10'da bu yıkılma mekanizmaları görülmektedir. Bu mekanizmalar yer hareketinin uygulanan yönüne göre cami üzerinde yer değişebilir. Örneğin, Şekilde caminin güney-batı köşesinde oluşan hasar, uygulanan yer hareketinin eksi ile çarpımı sonrası kuzeydoğu köşesine kayabilir. Burada hasarın caminin hangi bölgesinde olmasından ziyade, hasarın belirli bir mekanizması olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Yapılan 85 analiz sonuçları teker teker incelenerek dinamik analizler neticesinde elde edilen hasar mekanizmaları 5 ana gruba ayrıldığı gözlemlenmiştir. Belirli camilerde oldukça özel hasarlar gözlemlenmiş, bu durum ya camiye özel ya da o camide bir yer hareketine özel olduğu değerlendirilmiştir. Sınıflandırılan 5 yıkılma mekanizması cami ya da yer hareketinden bağımsız gözlemlenen, tutarlı bir davranış gösteren mekanizmalardır. Bu yıkılma mekanizmalarının açıklamaları ve detayları şu şekilde sıralanabilir.

- **Mekanizma 1**

Caminin duvarlarda oluşan diyagonal çatlak hatları iki duvarın kesiştiği noktada birleşmektedir. Bu çatlak hatları duvarda bulunan, duvarın taşıma ve şekil değiştirme kapasitesinin zayıflamasına sebep olan pencere boşluklarından ilerlemektedir. Genel olarak V şeklinde görünen bu hasar mekanizması neticesinde cami köşeden göçmektedir. Bu göçme esnasında caminin kubbesi de bu göçme eylemine katılarak sadece mekanizmanın gerçekleştiği köşenin değil, diğer kısımlarında hasar almasına sebep olmaktadır. Şekil 6.9(a)'da bu yıkılma mekanizmasına örnek verilmektedir.

- **Mekanizma 2**

Caminin dikine iki duvarında meydana gelen bu hasar mekanizmasında duvarlar kendi içinde eğilme hareketi gerçekleştirilmektedir. Bu eğilme hareketi sırasında Şekil 6.9(b)'de görüldüğü gibi duvarların ortasından başlayarak köreşelerine diyagonal devam

eden çatlak hatları bulunmaktadır. Ayrıca duvarlar aşağıdaki pencere boşluklarının alt seviyesinden devrilerek Λ şeklinde görünen bir hareket yapmaktadır. Caminin iki duvarında meydana gelen bu yıkılma mekanizmasına ek olarak üst kısımda bulunan kubbede göçme mekanizmasına dahil olmaktadır.

- **Mekanizma 3**

Bu yıkılma mekanizması da caminin iki duvarında birden gözlemlenmektedir. Caminin birbirine dik iki duvarı kesme ve eğilme davranışı etkisiyle uzunluğunun yaklaşık %70'ine kadar alt pencere ve kapı boşlukları seviyesinde kırılmaya maruz kalmaktadır. Bu hattın bittiği noktalarda başlayan ve caminin kubbesine doğru ilerleyen diyagonal çatlak hatları kubbenin tepesine kadar devam etmektedir. Bu çatlak hatları duvarda ilerlerken pencere boşluklarından geçtiği görülmektedir. Yıkılma mekanizması birbirine dik iki dik üçgenin bir araya gelmesi gibi görülmektedir. Şekil 6.9(c)'de bu yıkılma mekanizmasına örnek verilmektedir.

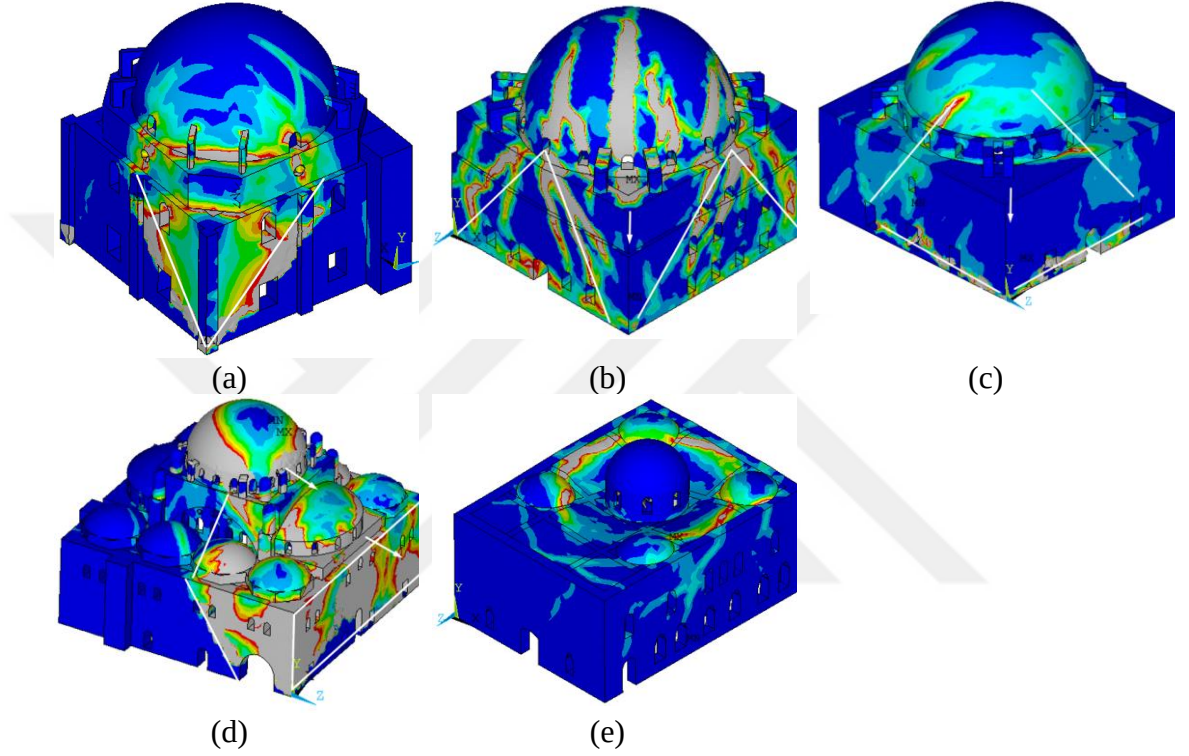
- **Mekanizma 4**

Özellikle Tip 5 mekânsal kurguya sahip camilerde yaygın olarak görülen bu mekanizma ikiden farklı caminin belirli bir yönde hasar görmesi olarak tanımlanabilir. Düzlem dışı davranışa maruz kalan duvar, devrilme esnasında dik iki duvarın belirli bir bölgeden koparak devrilme hareketine katılması şeklinde açıklanabilir. Plandan bakıldığında U şeklinde gerçekleşen yıkılma, üstte bulunan kubbelerinde göçmesine sebep olmaktadır. Dik duvarların kopma kısmı, bu duvarlarda bulunan pencere ve kapı boşluklarına bağlı değişkenlik göstermektedir. Şekil 6.9(d)'de yıkılma mekanizmasına örnek verilmektedir.

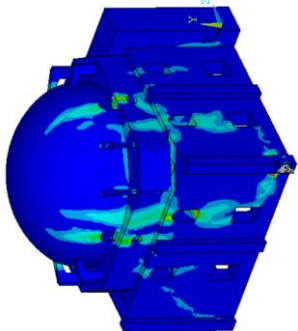
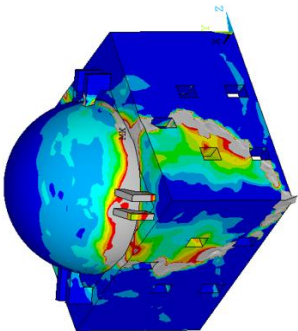
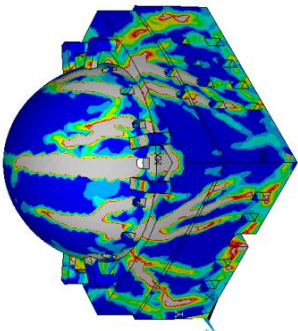
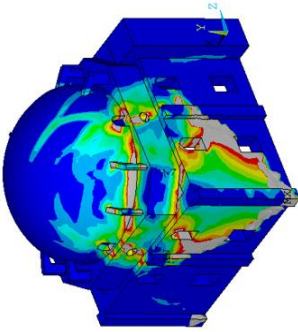
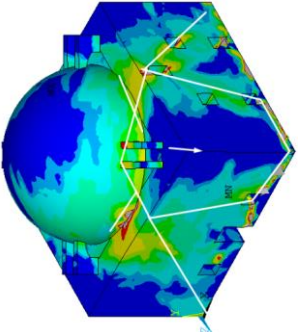
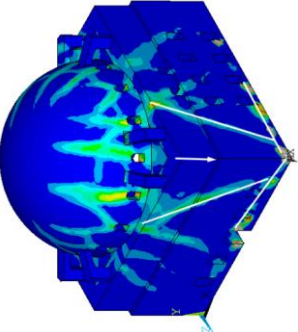
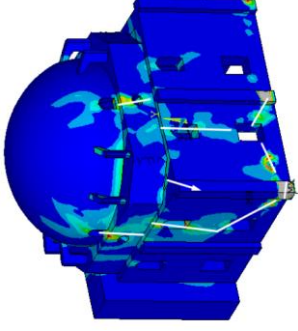
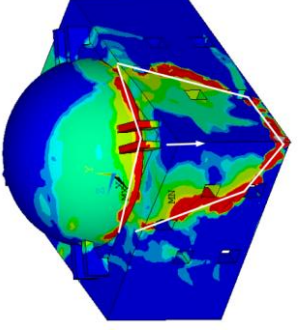
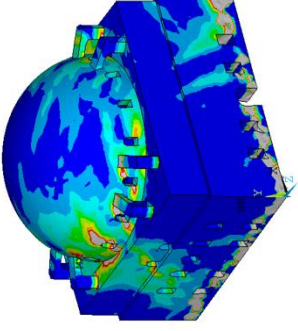
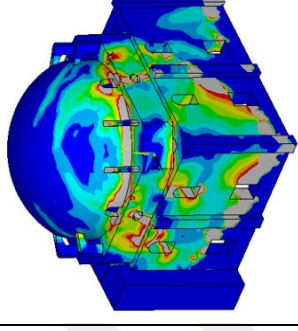
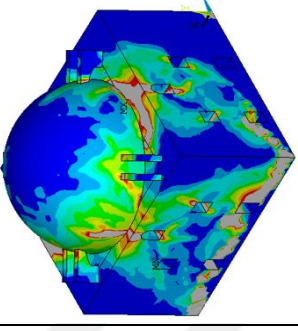
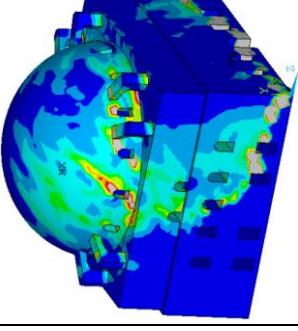
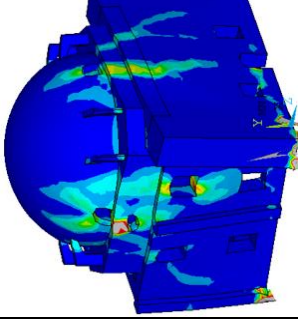
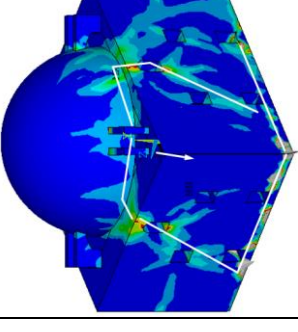
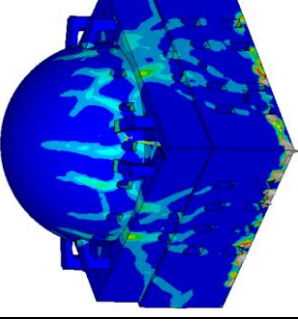
- **Mekanizma 5**

Bu mekanizma da caminin kubbesinin kendi içine doğru göçmesi ile gerçekleşmektedir. Mekanizma sonucu aynı olsa da iki farklı süreçle gerçekleşmektedir. İlk süreçte Tip 0 camilerinde yer hareketi etkisiyle farklı yönlerde yer değiştirmeye maruz kalan caminin duvarlarında ağır hasar olarak nitelenmeyecek çatlaklar olmasına karşın

kubbenin göçme durumudur. İkinci süreç ise Tip 5 mekânsal kurguya sahip camilerde kemer sisteminin hasar görüp cami duvarlarının ya hasar görmediği ya da yukarıda tanımlanan mekanizmalarda birinin kısmen görüldüğü süreçtir. Her iki süreç sonucunda cami kubbesi kendi içine göçerek yıkılmaktadır. Bu mekanizma farklı camilerde farklı yer hareketleri altında görülmektedir. Şekil 6.9(e)'de bu mekanizmaya örnek görsel verilmektedir.



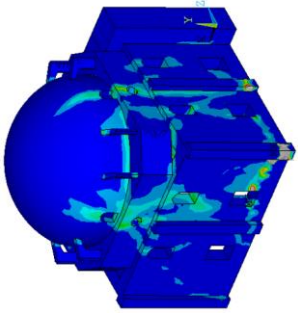
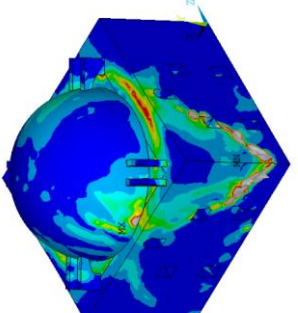
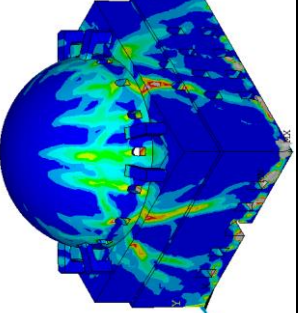
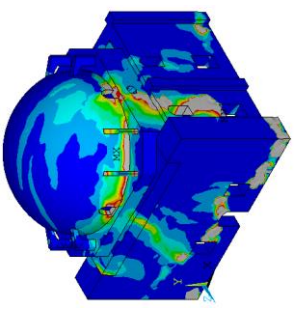
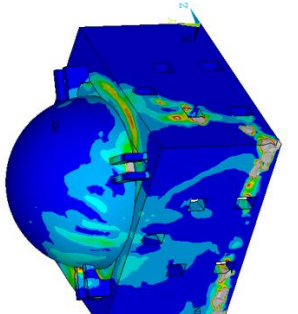
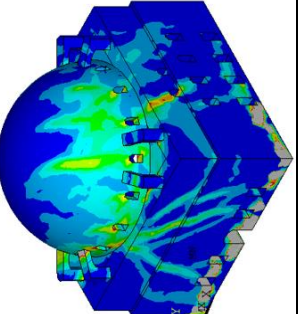
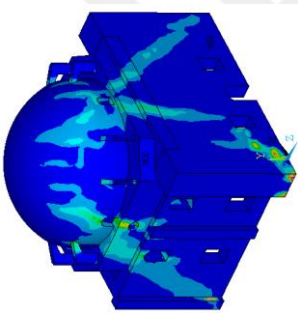
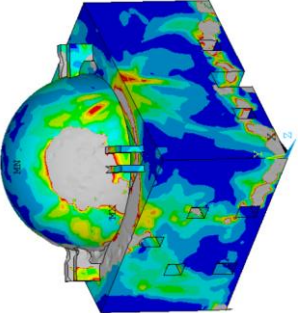
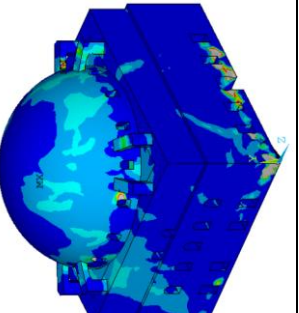
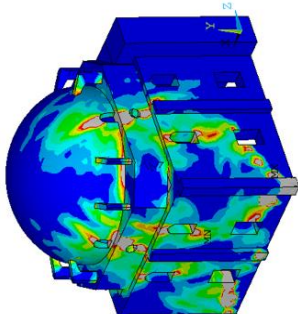
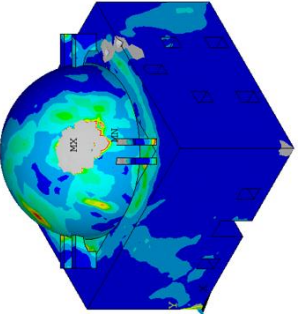
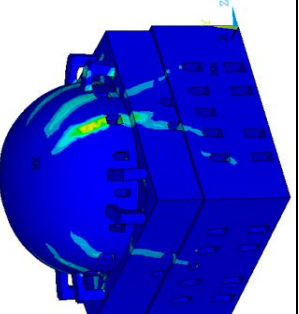
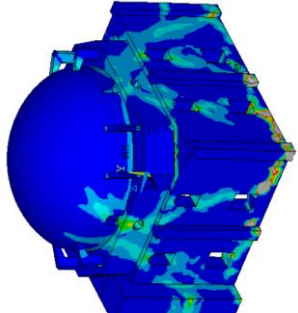
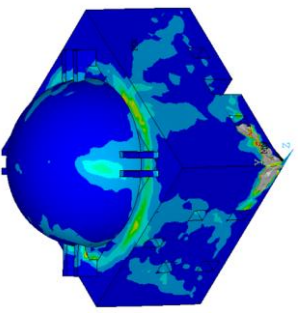
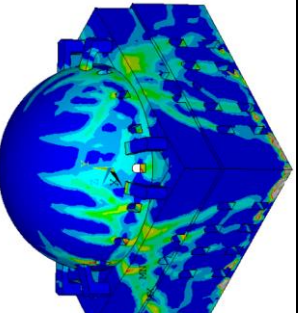
Şekil 6.12. Baskın yıkılma mekanizmalarına örnekler

	M1-750fc-Erz		M2-750fc-Erz		M3-750fc-Erz
	M1-750fc-Duz		M2-750fc-Duz		M3-750fc-Duz
	M1-750fc-Cap		M2-750fc-Cap		M3-750fc-Cap
	M1-750fc-Imp_Val		M2-750fc-Imp_Val		M3-750fc-Imp_Val
	M1-750fc-Kobe		M2-750fc-Kobe		M3-750fc-Kobe

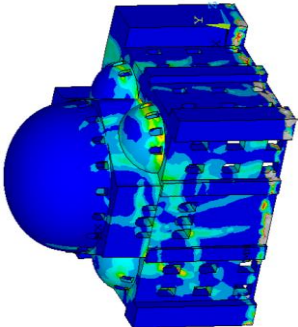
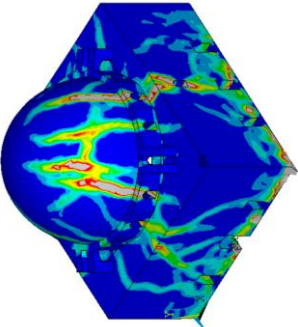
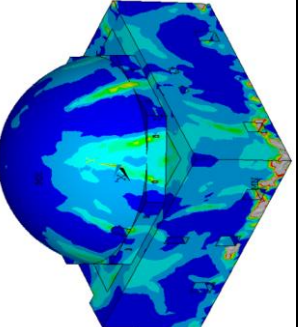
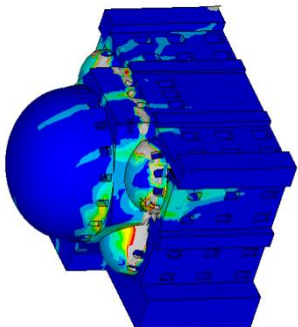
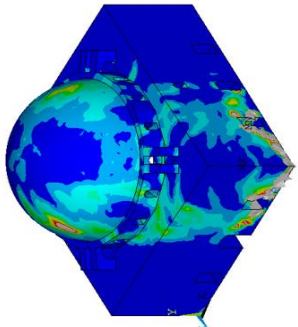
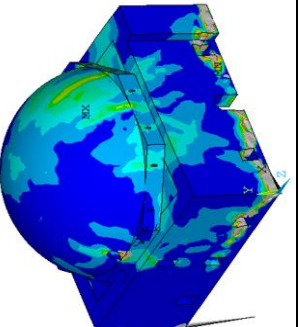
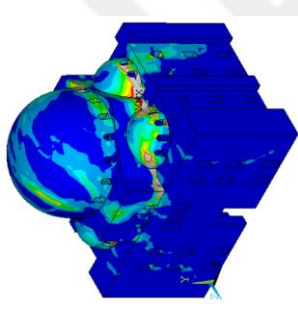
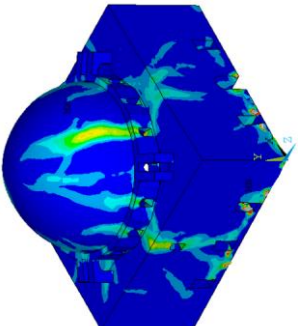
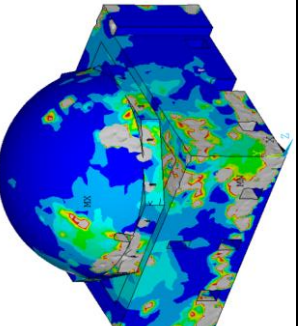
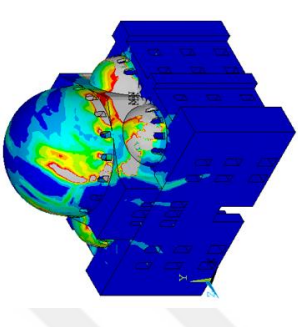
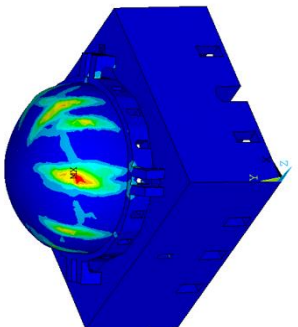
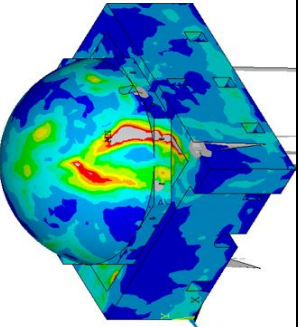
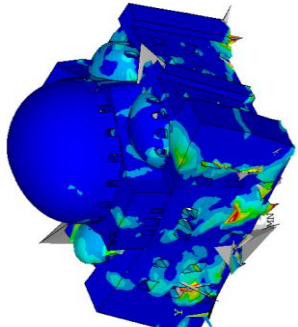
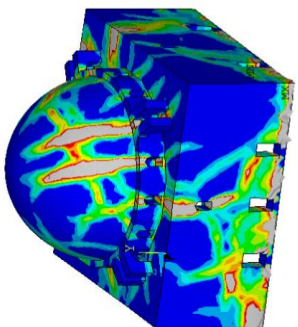
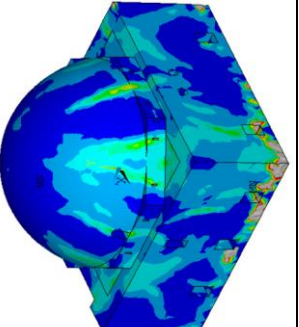
Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları

	M4-750fc-Erz		M5-750fc-Erz		M6-750fc-Erz
	M4-750fc-Duz		M5-750fc-Duz		M6-750fc-Duz
	M4-750fc-Cap		M5-750fc-Cap		M6-750fc-Cap
	M4-750fc-Imp_Val		M5-750fc-Imp_Val		M6-750fc-Imp_Val
	M4-750fc-Kobe		M5-750fc-Kobe		M6-750fc-Kobe

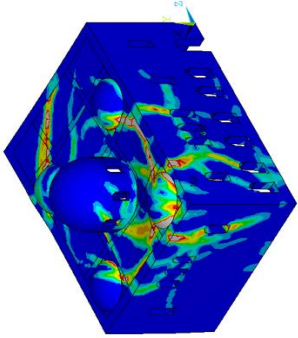
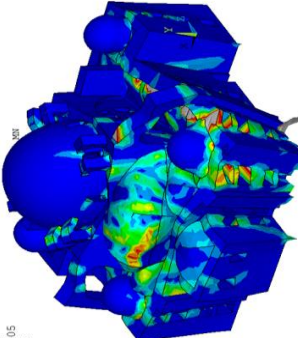
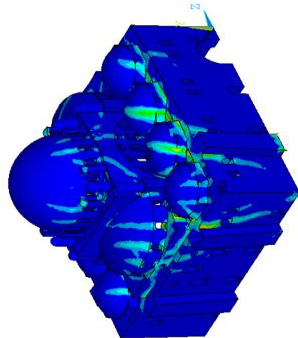
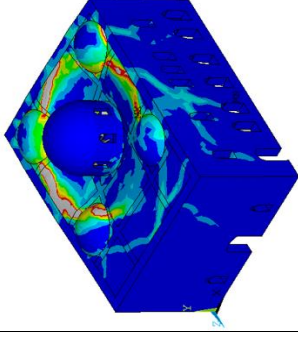
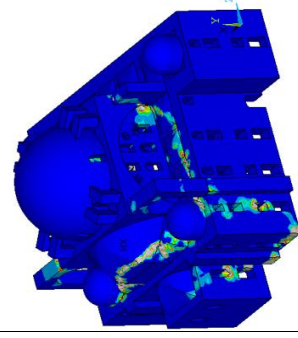
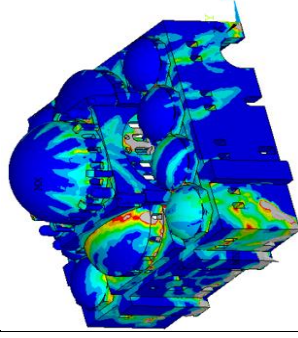
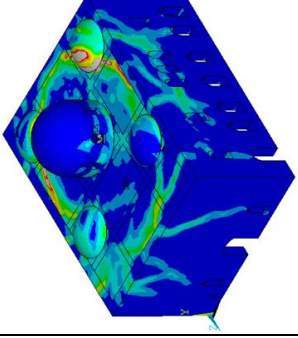
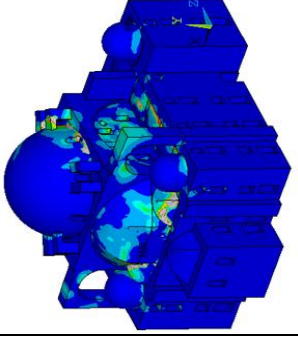
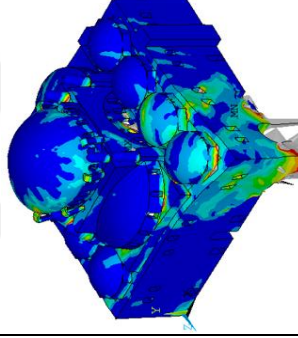
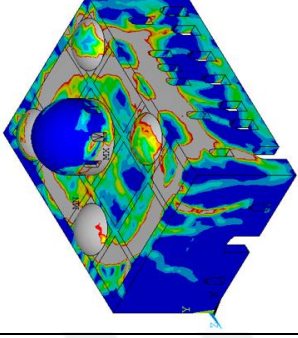
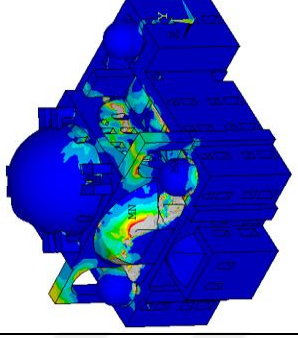
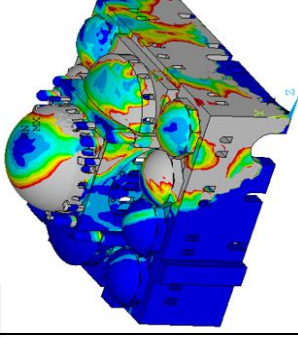
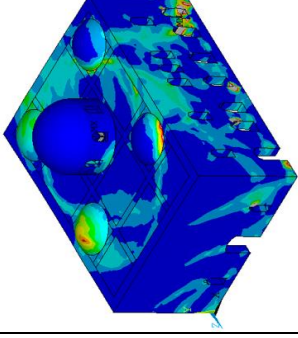
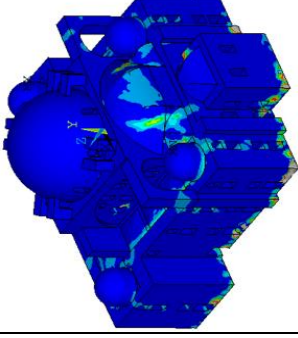
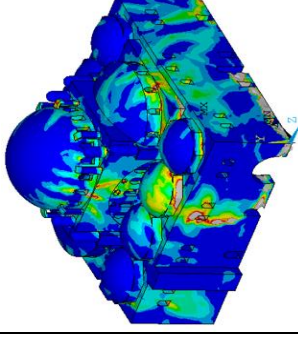
Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları (devam)

	M1-2000/c-Erz		M2-2000/c-Erz		M3-2000/c-Erz
	M1-200/c-Duz		M2-200/c-Duz		M3-200/c-Duz
	M1-200/c-Cap		M2-200/c-Cap		M3-200/c-Cap
	M1-200/c-Imp_Val		M2-200/c-Imp_Val		M3-200/c-Imp_Val
	M1-200/c-Kobe		M2-200/c-Kobe		M3-200/c-Kobe

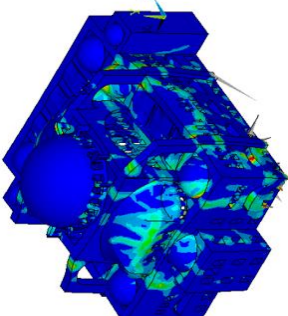
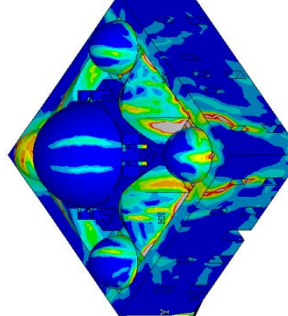
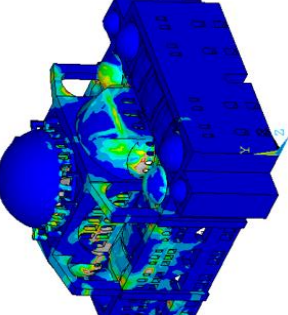
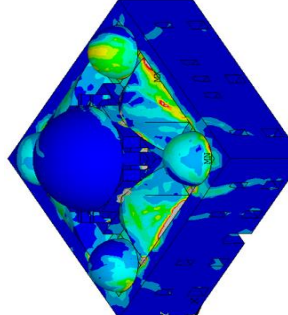
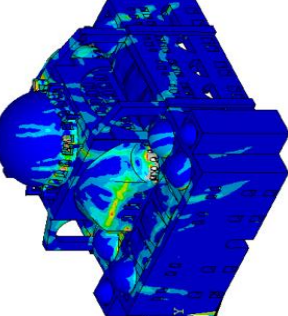
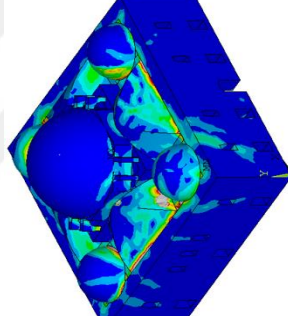
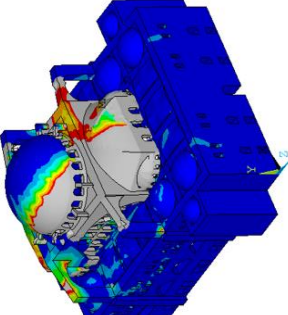
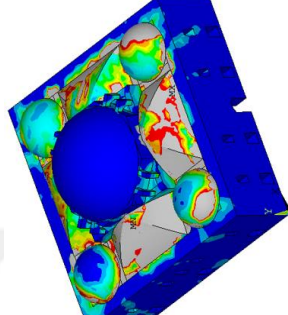
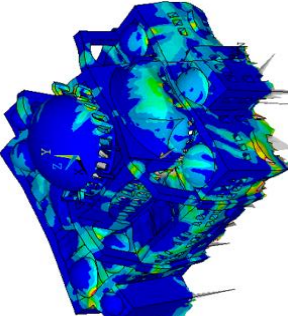
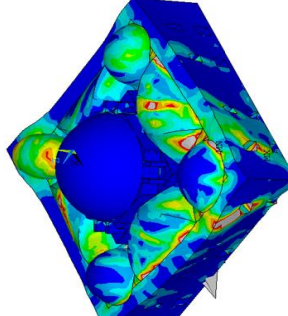
Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları (devam)

	M4-2000fc-Erz		M5-2000fc-Erz		M6-2000fc-Erz
	M4-200fc-Duz		M5-200fc-Duz		M6-200fc-Duz
	M4-200fc-Cap		M5-200fc-Cap		M6-200fc-Cap
	M4-200fc-Imp_Val		M5-200fc-Imp_Val		M6-200fc-Imp_Val
	M4-200fc-Kobe		M5-200fc-Kobe		M6-200fc-Kobe

Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları (devam)

	M7-2000fc-Erz		M8-2000fc-Erz		M9-2000fc-Erz
	M7-200fc-Duz		M8-200fc-Duz		M9-200fc-Duz
	M7-200fc-Cap		M8-200fc-Cap		M9-200fc-Cap
	M7-200fc-Imp_Val		M8-200fc-Imp_Val		M9-200fc-Imp_Val
	M7-200fc-Kobe		M8-200fc-Kobe		M9-200fc-Kobe

Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları (devam)

	M10-2000fc-Erz		M11-2000fc-Erz
	M10-200fc-Duz		M11-200fc-Duz
	M10-200fc-Cap		M11-200fc-Cap
	M10-200fc-Imp_Val		M11-200fc-Imp_Val
	M10-200fc-Kobe		M11-200fc-Kobe

Şekil 6.13. Camilerin dinamik analiz sonucunda oluşan yıkılma mekanizmaları (devam)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarihi camiler geçmişten devraldığımız ve gelecek kuşaklara güvenle devretmemiz gereken kültürel miraslarımızdır. Bu nedenle bu yapıları en uygun şekilde korumak ve uygun formlarda kullanımlarını sağlayarak yok olmalarını önlemek en önemli görevlerimizden biridir. Tarihi yığma camiler inşa tarihleri, yapım teknikleri ve kullanılan malzemelerin davranışı dikkate alındığında sismik açıdan hassas yapılardır. Bu çalışmada tarihi camilerin deprem performans düzeyleri ve ötelenme limitlerinin belirlenmesi üzerine bir inceleme sunulmuştur. Çalışma sonlu eleman analizleri ile ilerlediği için ilk olarak sonlu eleman yönteminin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında literatür yardımıyla sonlu eleman modellerinde kullanılacak malzeme özellikleri belirlenmiştir. Literatürde boyutsal detaylarına ulaşılabilen toplam 49 cami derlenerek, ele alınan cami grubunu en iyi temsil edebilecek toplam 11 cami seçilmiştir. 11 tarihi caminin detaylı sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. İtme analizleri ve dinamik analizler kullanılarak kuvvet kapasiteleri, ötelenme limitleri ve yıkılma mekanizmaları elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

Sonlu eleman modellerinin doğrulanması, çalışmanın ilerlemesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Analiz sonuçları yapılan doğrulamalar ile güvence altına alınmaktadır. Doğrulama için 5 farklı araştırmacı tarafından test edilen çeşitli tipolojiye, yükleme şekline ve değerine maruz toplam 25 duvar modeli ile gerçekleştirilmiştir. Modellenen duvarlarda harçsız düzgün kesme taşı, iki cidarlı moloz taş, iki cidarlı düzgün kesilmiş moloz taş, üç cidarlı gibi farklı tipolojide duvarlar bulunmaktadır. Duvarların 23'ünde düzlem içi, 2'sinde ise düzlem dışı davranış belirlenmiştir. Çalışmalar neticesinde ANSYS yazılımına ait SOLID65 elemanı ve Willam-Wranke göçem kriteri, yığma duvarların düzlem içi ve düzlem dışı davranışının belirlenmesinde kullanımının uygun olduğu görülmektedir. Ancak yığma duvarların düzlem içi davranışları incelenirken, duvara etki eden statik eksenel gerilme 0,50 MPa ve üstü durumlarda William-Wranke yaklaşımına ek olarak bir plastisite eğrisi gerekmektedir. Plastisite eğrisinin bulunamadığı/önerilmediği durumlarda, yığma taş duvarlar için çalışmada önerilen üç doğrulu σ - ε eğrisi, güvenle kullanılabileceği gösterilmiştir.

Tarihi camilerin sonlu elemanlarında kullanılacak malzeme özellikleri, literatürde oldukça çalışılan ve farklı yaklaşımların olduğu bir konudur. Tarihi camilerin birçoğunu temsil eden üç cidarlı duvar deneylerinde de bu çok seslilik kendini göstermektedir. Literatürde, deneysel çalışma gerçekleştirilemeyen durumlarda, yapının karakteristiğinden yola çıkmak yerine, genel kabuller ile analizlerini gerçekleştirdikleri görülmektedir. Bu kabuller sonucunda tarihi yapıların mekanik özellikleri oldukça geniş bir aralıkta kabul edilerek araştırmalar gerçekleştirildiği görülmektedir. Farklı yönetmeliklerde ve çalışmalarda hem tarihi yapılar için hem de üç cidarlı duvarlar için önerilen elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri derlenmiştir. Elde edilen değerlerin ortalaması alındığında tarihi camilerde duvarların basınç dayanımı ortalama 3 MPa, elastisite modülü ise 600 ile 2.250 MPa olduğu görülmektedir. Ayrıca literatürde oldukça yaygın kullanılan $E = \alpha f_c$ yaklaşımı dikkate alındığında, α değeri 85-1.000 arasında değiştiği görülmektedir. Çalışmada tarihi camilerin duvarları için basınç dayanımı 3 MPa olarak kabul edilmiştir. Elastisite modülü ise bir alt ve üst sınır olarak kabul edilen $\alpha=200$ ve $\alpha=750$ olarak belirlenmiştir. Sonlu eleman analizleri bu parametreler ışığında gerçekleştirilmiştir. Elastisite modülünde bu karmaşıklık alt ve üst sınırın belirlenip, sonlu eleman modellerinin iki farklı elastisite modülü ile gerçekleştirilmesi ile aşılabilmektedir.

Ülkemizde çok farklı tipolojide, farklı bölgelerde birçok tarihi cami bulunmaktadır. Bu camilerin gruplandırılarak ele alınması hem araştırmacılar için hem de camilerin restorasyonu ve güvenliği için önemli olmaktadır. Bu çalışma kapsamında literatürde bulunan toplam 49 cami ele alınmıştır. Bu camilerin hepsi kagir kubbeli ve taş yığma duvarlardan meydana gelmektedir. Ele alınan camilerin bulundukları iller, yapıldıkları yüzyıllar, mekânsal kurguları, duvar kalınlıkları (t), yapı dikdörtgen ise kısa duvar uzunluğu (l_k), uzun duvar uzunluğu (l_u) (yapı eğer kare ise her iki sütunda da aynı duvar uzunluğu verilmiştir), yapının duvar yüksekliği (h), yapının kubbesinin kilit taşının zeminden yüksekliği (h_k), yapının ana kubbesinin çapı (r_k), eğer camide fil ayağı ve/veya serbest paye alanı (p_a), yapının toplam alanı (t_a) olarak parametreler belirlenmiştir. Bu parametreleri birbirleri ile korele ettiğimize oldukça anlamlı sonuçlar gözlemlenmektedir. Ele alınan camilerin $l/h-h/t$ grafikleri oluşturularak, cami grubunu temsil edebilecek 11 kagir kubbeli cami seçilmiştir.

Camilerin sonlu eleman modelleri oluşturularak 5 farklı yer hareketi altında dinamik analizleri ve statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde her bir caminin kuvvet kapasitesi belirlenmiştir. TBDY (2018) tarafından önerilen, yığma yapılar için kuvvet kapasitesinin belirlenmesine yönelik denklemler analizler ışığında değerlendirilmiştir. Denklemden eksenel gerilme değeri kullanılmaktadır. 11 caminin eksenel gerilme değerleri 0,2–0,6 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Önerilen denklemler, tarihi camilerin yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesinde güvenle kullanılabilir.

Tarihi camilerin kuvvet-ötenme oranı eğrileri için bir idealleştirme mekanizması önerilmektedir. Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) hasar durumlarını içeren bu idealleştirme, camide oluşacak çatlak düzeyi, yapısal davranışı ve kuvvet kapasitesi tanımları içermektedir. Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyinde bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı kabul edilir. Yapının doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı hasar düzeyi olarak tanımlanır. Kuvvet-ötenme eğrisinde başlangıç rijitliğinin değiştiği noktaya denk geldiği kabul edilmektedir. Taşıyıcı elemanlarda göz ile görülebilen ancak kolayca tamir edilebilir mikro çatlaklar gözlemlenir. Yapı SH sınır durumuna kadar elastik davranış sergiler. Kontrollü Hasar (KH) noktasında can güvenliğini sağlamak üzere yapının taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyine karşı gelmektedir. Bu nokta yapının kuvvet-ötenme eğrisinde maksimum kuvvetin (kapasitenin) ulaşıldığı nokta olarak tarif edilebilir. Bu noktada orta ve düşük düzeyde çatlaklar gözlemlenir. Bu çatlaklar genellikle tamir edilebilir seviyededir. Yapı SH-KH sınır koşulları arasında elastik olmayan davranış sergiler. Bu sınır koşuluna kadar yapının kuvvet kapasitesi stabildir. Göçmenin Önlenmesi performans Düzeyi bina taşıyıcı sistem elemanlarında ileri düzeyde ağır hasarın meydana geldiği göçme öncesi duruma karşı gelmektedir. Binanın kısmen veya tamamen göçmesi önlenmiştir. Bu performans düzeyi ise kapasitenin %80'ine tekabül eden kuvvet düzeyinde meydana geldiği kabul edilmektedir. Taşıyıcı elemanlarda ciddi hasar çatlakları ve yığma birimlerde ezilmeler gözlemlenir. Bu performans noktası sonrasında yapının yanal yük kapasitesinde azalma görülür. Önerilen idealleştirme kullanılarak ele alınan 11 caminin kuvvet-ötenme oranı değerleri belirlenmiştir.

Elde edilen kuvvet-ötelenme oranı değerleri ışığında, tarihi camilerin performans limitleri için ampirik formüller geliştirilmiştir. Bu formüllerde camilerin boyutları ve duvarlarında kullanılan elastisite modülü kullanılmıştır. Ampirik formüllerde elastisite modülünün varlığı, ele alınacak caminin sınır limitleri için alt ve üst limit önerilmesine olanak sağlayacaktır. Çalışmada dikkate alınan 11 caminin genişletilmesi, tarihi camiler için genelleştirilmiş ötelenme limitlerinin önerilmesine olanak sağlayacaktır. Önerilen ampirik formüller ile yapılan analizlerden elde edilen sınır değerlerinin karşılaştırması sonucunda, bu formüllerin kagir kubbeli tarihi camilerde güvenle kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca bu formüller, camilerin performans düzeylerinin doğrusal olmayan statik yöntemlerin kullanılarak elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

EC8-3, FEMA, NTC18 ve VGM gibi farklı yönetmelikler ve kılavuzların performans değerlendirme ilkeleri incelenmiştir. Çoğu uluslararası yönetmelikte, yığma duvarların ötelenme limitlerinin belirlenmesi yıkılma mekanizması ile ilişkilidir. Ancak tarihi camiler için limit öneren VGM ise herhangi bir yıkılma mekanizması ayrımı yapmamaktadır. Ayrıca EC8-3, FEMA, NTC18 yönetmeliklerinde limit değerleri tekil bir yığma duvar için önerilmektedir. Bu çalışmada önerilen limit değerleri VGM kılavuzuna benzer şekilde yapının bütünsel/global limitlerini önermektedir. Elde edilen sonuçlar, tarihi camilerde hasarın bir duvar mekanizmasına indirgenemeyeceği, yapının tamamına bakılması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca elde edilen ötelenme limitleri bu yönetmeliklerde önerilen limitler ile karşılaştırılmıştır. Alt limit olarak kabul edilebilecek elastisite modülü kullanılan modellerden (göreceli olarak şekil değiştirme kapasitesi yüksek) elde edilen hasar limitleri, yönetmeliklerde önerilenlerden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Bu duruma ek olarak literatürde tarihi yapı çalışmalarında elde edilen hasar limitler, bu çalışmada elde edilen hasar limitlerini desteklediği görülmektedir. Bu sebeple bahsedilen yönetmeliklerde önerilen hasar limitlerinin tarihi camiler için kullanılması riskli olacaktır.

Yapılan 85 dinamik analiz neticesinde tarihi yığma camiler için 5 farklı yıkılma mekanizması baskın şekilde gözlemlenmiştir. Gözlemlenen ilk yıkılma mekanizması caminin duvarlarda oluşan diyagonal çatlak hatları iki duvarın kesiştiği noktada birleşmektedir. Genel olarak V şeklinde görünen bu hasar mekanizması neticesinde cami köşeden geçmektedir. İkinci baskın yıkılma mekanizmasında ise duvarların kendi içinde

eğilme hareketi gerçekleştirdiği görülmektedir. Duvarların ortasında kubbeden başlayan ve duvar köşelerine doğru Λ şeklinde görünen çatlak hatları görülmektedir. Üçüncü yıkılma mekanizmasında ise caminin birbirine dik iki duvarı kesme ve eğilme davranışı etkisiyle uzunluğunun yaklaşık %70'ine kadar mesnet kısmında pencere ve kapı boşlukları seviyesinde kırılmaya maruz kalmaktadır. Bu kırılmaların bittiği noktadan caminin kubbesine doğru diyagonal çatlak hatları beklenmektedir. Dördüncü yıkılma mekanizmasında ise düzlem dışı devrilme hareketi gözlemlenen duvarın düzlem içi iki duvarında belirli kısımlardan koparak derilme hareketine katılması şeklinde tanımlanır. Son yıkılma mekanizması ise cami ana kubbesinin beden duvarları ve/veya kemer sisteminin hasar almasıyla kendi içine doğru göçmesi olarak tanımlanır. Bu yıkılma mekanizmaları sonucunda tarihi camilerin kapı ve pencere boşluklarının bulunduğu yer ve büyüklüklerinin caminin yıkılma mekanizmasında ve çatlak hatlarının oluşumunda önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca tarihi camilerde kubbelerindeki pencerelerin ve kubbe yapısının yıkılma mekanizmasını etkilediği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Akgül, M. ve Doğan, O. 2020. 4 Nisan 2019 Elâzığ-Sivrice Depreminin Yığma Yapılara Etkisinin Değerlendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(1), 265-277.
- Almeida, C., Costa, C. Q., Guedes, J., Arede, A., Costa, A. 2010. Mechanical Behaviour Analyzes of One Leaf Stone Masonry Walls. VI Congreso Internacional Sobre Patologia Recuperacion de Estructuras, Cordoba, Argentina.
- Altunışık, A. C., Genç, A. F., Okur, F. Y., Günaydın, M., Adanur, S. 2017. Finite Element Model Updating Effect On Earthquake Behaviour Of Masonry Structures, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Altunisik, A. C., Bayraktar, A., Genc, A. F. 2016. A study on seismic behaviour of masonry mosques after restoration. *Earthquakes and Structures*, 10(6), 1331-1346.
- Altunışık A. C., Sunca F., Genç A.F., Tavşan C. 2021. Post Earthquake Damage Assessments of Historic Camis and Effects of Near-Fault and Far-Fault Ground Motions on Seismic Responses, *International Journal of Architectural Heritage*, 1-36.
- Anonymous, 2020a. Web Sitesi: www.mimarsinanerleri.com, Erişim Tarihi: 09.03.2020.
- Anonymous, 2020b. Web Sitesi: https://konyakultur.gov.tr/index.php?route=modules/towns&town_id=32, Erişim Tarihi: 08.12.2020.
- Anonymous, 2020c. Web Sitesi: <https://www.google.com/intl/tr/earth/>, Erişim Tarihi: 08.12.2020.
- Anonymous, 2021a. Web Sitesi: <http://www.ilgin.gov.tr/ilgin-lala-mustafa-pasa-kulliyesi>, Erişim Tarihi: 12.01.2021.
- Anonymous, 2021b. Web Sitesi: <https://islamansiklopedisi.org.tr/cenabi-ahmed-pasa-camii>, Erişim Tarihi: 21.01.2021.
- Anonymous, 2021c. Web Sitesi: <https://islamansiklopedisi.org.tr/sokullu-mehmed-pasa-kulliyesi--eminonu>, Erişim Tarihi: 29.01.2021.
- Anonymous, 2021d. Web Sitesi: <https://islamansiklopedisi.org.tr/behram-pasa-camii>, Erişim Tarihi: 29.01.2021

- Anonymous, 2021e. Web Sitesi: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/giresun/gezilecekyer/sebinkarahisar-yeniyol-koyu-kucuk-fatih-camii>, Erişim Tarihi: 15.12.2021.
- Anonymous, 2021f. Web Sitesi: <http://www.konya.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 15.12.2021.
- Anonymous, 2021g. Web Sitesi: <https://islamansiklopedisi.org.tr/>, Erişim Tarihi: 15.12.2021
- Anonymous, 2022. Web Sitesi: <https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/erzurum/gezilecekyer/narmanli-cami>, Erişim Tarihi: 16.08.2022
- ANSYS 14.5 Computer software. Canonsburg, PA, Ansys.
- Apostolopoulos, C., Sotiropoulos, P. 2008. Venetian churches of Lefkada, Greece Construction documentation and seismic behaviour “Virgin Mary of the Strangers”. Construction and Building Materials, 22(4), 434-443.
- ASCE 41-13. 2014. Seismic Rehabilitation Standards Committee. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers, 518, Reston.
- Aslay, S. E. ve Okuyucu, D. 2020. Technical Evaluation of Abscissa Damage of Erzincan Değirmenliköy Kilise. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(1), 387-402.
- Aşıkoğlu, A. ve Avşar, Ö. 2022. Investigation of Drift-based Damage Limit States for Historical Masonry Structures. International Journal of Architectural Heritage, 1-19.
- Aşıkoğlu, A., Avşar, Ö., Lourenço, P.B., Silva, L.C. 2019. Effectiveness of seismic retrofitting of a historical masonry structure: Kütahya Kurşunlu Mosque, Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering, 17(6), 3365-3395.
- Bal, I. E., Gülay, F. G., Smyrou, E., Eucentre, P. 2010. A nonlinear analysis approach for defining the seismic behaviour of historical masonry buildings case study of Atik Ali Pasa Mosque in Istanbul. Turkish-Saudi Work Struct Earthq Eng.
- Bayraktar, A., Coşkun, N., Yalçın, A. 2007. Performance of masonry stone buildings during the March 25 and 28, 2004 Aşkale (Erzurum) earthquakes in Turkey. Journal of performance of constructed facilities, 21(6), 432-440.
- Bayraktar, A., Hökelekli, E., Türker, T., Çalık, İ., Ashour, A., Mosallam, A. 2019. Window opening effects on structural behavior of historical masonry Fatih Cami. International Journal of Architectural Heritage, 13(4), 585-599.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunisik, A. C., Yildirim, F. 2009. Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test. J Nondestruct Eval, 28, 37-47.

- Betti, M., Vignoli, A. 2008. Assessment of seismic resistance of a basilica-type church under earthquake loading: Modelling and analysis. *Advances in Engineering Software*, 39(4), 258-283.
- Bianchini, N., Mendes, N., Calderini, C., Candeias, P. X., Rossi, M., Lourenço, P. B. 2022. Seismic response of a small-scale masonry groin vault: experimental investigation by performing quasi-static and shake table tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(3), 1739-1765.
- Binda, L., Pina-Henriques, J., Anzani, A., Fontana, A., Lourenço, P. B. 2006. A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling. *Engineering Structures*, 28(8), 1132-1148.
- Boscato, G., Pizzolato, M., Russo, S., Tralli, A. 2014. Seismic behavior of a complex historical church in L'Aquila. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(5), 718-757.
- Bosiljkov, V., Page, A. W., Bokan-Bosiljkov, V., Zarnic, R. 2010. Evaluation of the seismic performance of brick masonry walls, *Struct. Control Health Monit.* 17, 100-118.
- Cakir, F, Seker, B. S., Durmus, A., Dogangun, A., Uysal, H. 2015a. Seismic assessment of a historical masonry mosque by experimental tests and finite element analyses. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 158-164.
- Cakir, F., Uckan, E., Shen, J., Seker, B. S., Akbas, B. 2015b Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011. *Engineering. Failure Analyses.* 58, 249-266.
- Cattari, S. ve Magenes, G. 2022. Benchmarking the software packages to model and assess the seismic response of unreinforced masonry existing buildings through nonlinear static analyses, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(4), 1901-1936.
- Cattari, S., Giongo, I., Marino, S., Lin, Y., Schiro, G., Ingham, J. M., Dizhur, D. 2015. Numerical simulation of the seismic response of an earthquake damaged URM building, *New Zealand Society for Earthquake Engineering Technical Conference*.
- Cattari, S., Lagomarsino, S., Bazzurro, A., Porta, F. 2015. Critical review of analytical models for the in-plane and out-of-plane assessment of URM Buildings. *NZSEE Conference, Rotorua*.
- Chopra A. K. 2001. *Dynamics of structures. theory and applications to earthquake engineering*, Prentice-Hall, 944, New Jersey.
- Çakır, F. 2021. A simplified method for determining the seismic performance of historical structures: a case of Kaya Çelebi Mosque. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1643-1656.

- Çalık, İ. 2017. Tarihi Cami ve Minarelerin DeneySEL Dinamik Karakteristiklerinin Belirlenmesi ve Restorasyon Etkilerinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Ana bilim Dalı, 520, Trabzon.
- Çalık, İ., Alemdar, B., Türker, T., Karadeniz, H. 2020. Ambient vibration based-simplified frequency formulas for historical masonry stone mosques with timber truss roofs. *J Archit Conserv*, 26(3), 247-264.
- Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T. 2016. Determination of the effect on the dynamic behavior of historical masonry Camis reinforced concrete domes by ambient vibration testing, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 621-630.
- D2 Mimarlık, Konya Şerafettin Cami rölövesi, Konya Vakıflar Bölge Müdürlüğü.
- DBYBHY. 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- De Santis, S., Casadei, P., De Canio, G., de Felice, G., Malena, M., Mongelli, M., Roselli, I. 2016. Seismic performance of masonry walls retrofitted with steel reinforced grout. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(2), 229-251.
- Demir C. 2012. Seismic Behaviour of Historical Stone Masonry Multi-Leaf Walls, PhD thesis, İstanbul Technical University, 450, İstanbul.
- Dinani, A. T., Bisol, G. D., Ortega, J., Lourenço, P.B. 2021. Structural Performance of the Esfahan Shah Mosque. *Journal of Structural Engineering*, 147(10).
- Dogangun, A. ve Sezen, H. 2012. Seismic vulnerability and preservation of historical masonry monumental structures. *Earthquake and Structures*, 3(1), 83-95.
- Dogangun, A., Acar, R., Sezen, H., Livaoglu, R. 2008. Investigation of dynamic response of masonry minaret structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3), 505-517.
- Doherty, K., Griffith, M. C., Lam, N., Wilson, J. 2002. Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(4), 833-850.
- EC8-3. 2005. Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization.
- EN 1996-1-1. 2005. Eurocode 6: Design of masonry structures-Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Endo, Y., Pelà, L., Roca, P. 2017. Review of different pushover analysis methods applied to masonry buildings and comparison with nonlinear dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 21(8), 1234-1255.

- ENVAR Mimarlık, Erzurum Lala Paşa Cami rölövesi, Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü.
- ENVAR Mimarlık, Erzurum Narmanlı Cami rölövesi, Erzurum Vakıflar Bölge Müdürlüğü.
- Ercan, E. ve Nuhoglu, A. 2014. Identification of historical veziragasi aqueduct using the operational modal analysis. The Scientific World Journal.
- FEMA 356. 2000. Pre-standard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency.
- FEMA 440. 2005. Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings and other Structures, Washington ABD.
- FOM Grup Mimarlık, İstanbul Beyazıt Cami rölövesi, İstanbul Vakıflar 1. Bölge Müdürlüğü.
- Gençer, F., Hamamcıoğlu-Turan, M., Aktaş, E. 2020. Investigation of in-plane and out-of-plane Duvar behavior related to lateral loading depending on wall profiles and opening types in Hellenistic Towers. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35(1), 241-253.
- Gentile, C., Saisi, A., Cabboi, A. 2015. Structural identification of a masonry tower based on operational modal analysis. International Journal of Architectural Heritage, 9(2), 98-110.
- Kallioras, S., Correia, A. A., Graziotti, F., 2020. Collapse shake-table testing of a clay-URM Yapı with chimneys. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(3), 1009-1048.
- Karantoni, F. V. ve Dimakopoulou, D. 2021. Displacement-based assessment of the Gazi Hasan Pasha mosque in Kos island (GR) under the 2017 M6. 6 earthquake and Eurocode 8, with proposals for upgrading. Bulletin of Earthquake Engineering, 19(2), 1213-1230.
- Karaton, M. ve Aksoy, H. S. 2018. Seismic damage assessment of an 891 years old historic masonry mosque. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 62(1), 126-135.
- Kazaz, İ. 2010. Dynamic Characteristics and Performance Assessment of Reinforced Concrete Structural Walls, PhD thesis, Middle East Technical University, 379, Ankara.
- Kazaz, İ. ve Kocaman, İ. 2018. Seismic Load Capacity Evaluation of Stone Masonry Mosques. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 557-573.

- Kazaz, İ., Gülkan, P., Kazaz, E. 2021. Numerical assessment of cracks on a freestanding masonry minaret. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(4), 526-547.
- Kazaz, İ., Yakut, A., Gülkan, P. 2006. Numerical simulation of dynamic shear wall tests: A benchmark study. *Computers and structures*, 84(8-9), 549-562.
- Kocaman, İ. 2017. Tarihi yığma yapıların dinamik davranışlarının hesabında gerekli malzeme özelliklerinin tayini. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Yapı Ana bilim Dalı, 108, Erzurum.
- Kocaman, İ., Kazaz, İ. 2021 Evaluation of the effect of 14 June 2020 Bingöl-Karlıova earthquake on masonry structures. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 152-160.
- Kocaman, İ., Kazaz, İ., Kazaz, E. 2020. Seismic Load Capacity of Historical Masonry Mosques by Rigid Body Kinetics. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(6), 849-869.
- Köroğlu, N. 2010. Mimar Sinan Camilerinde Strüktür Morfolojisi Üzerine Bir Araştırma: Kılıç Ali Paşa Camisi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 359, İstanbul.
- Köseoğlu G. Ç. 2011. Investigation of a Damaged Historical Mosque with Finite Element Analysis, Master Thesis, Middle East Technical University, 111, Ankara.
- Kržan, M., Gostič, S., Cattari, S., Bosiljkov, V. 2015. Acquiring reference parameters of masonry for the structural performance analysis of historical buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), 203-236.
- Kuran, A. 1988. Mimarbaşı Koca Sinan: Yaşadığı Çağ ve Eserleri, Vakıflar Genel Müdürlüğü, İstanbul, 175-214.,
- Lagomarsino, S., Cattari, S. 2015. PERPETUATE guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 13-47.
- Lopez, S., D'Amato, M., Ramos, L., Laterza, M., Lourenço, P. B. 2019. Simplified formulations for estimating the main frequencies of ancient masonry churches. *Frontiers in Built Environment*, 5(18), 1-15.
- Lourenco P. B. 1996 Computational strategies for masonry structures. PhD thesis, Delft University Press, 210, Netherlands.
- Maccarini, H., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Ortega, J., Lourenço, P. B. 2018. Out-of-plane behavior of stone masonry walls: Experimental and numerical analysis. *Construction and Building Materials*, 179, 430-452.
- Magenes G., Penna A. 2009. Existing Masonry Buildings: General Code Issues and Methodes of Analysis and Assessment. Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 185-198, Napoli, Italy.

- Mangia, L., Ghiassi, B., Sayın, E., Onat, O., Lourenço, P.B. 2016. Pushover analysis of historical elti hatun mosque.
- Maraş M. M., Özmen A., Sayın E., Ayaz Y. 2022. Seismic Assessment of the Historical Sütülü Minaret Mosque. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445-459.
- Marino, S., Cattari, S., Lagomarsino, S., Ingham, J., Dizhur, D. 2016. Modelling of two damaged unreinforced masonry buildings following the Canterbury earthquakes. *NZSEE Conference*, New Zealand, 1-3 April.
- Martins, L., Vasconcelos, G., Ortega, J., Lourenço, P. B., Rodrigues, H., Silva, L., Palha, C. 2016. Characterization of Dry-stone Walls to Out-of Plane Actions. *10_Congresso Nacional de Mecânica Experimental, CNME 2016, LNEC, Lisbon, Portugal*.
- Milani, G., Valente, M. 2015. Comparative pushover and limit analyses on seven masonry churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna (Italy) seismic events: Possibilities of non-linear finite elements compared with pre-assigned failure mechanisms. *Engineering Failure Analysis*, 47, 129-161.
- Mustafaraj, E. ve Yardım, Y. 2012. Canditional Assessment of Historical Structures: Earthquake Performance of Naziresha Mosque. *International Students Conference of Civil Engineering*, Tirana, Albania.
- Nohutcu, H., Demir, A., Ercan, E., Hokelekli, E., Altintas, G. 2015. Investigation of a historic masonry structure by numerical and operational modal analyses. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24(13), 821-834.
- NTC2018. 2018. Norme Tecniche per le Costruzioni. Gazz Uff della Repubb Italy.
- Oliveira, D. V. 2003. Experimental and numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading. PhD thesis, University of Minho, 211, Portugal.
- Oliveira, D. V., Silva, R. A., Garbin, E., Lourenço, P. B. 2012. Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research. *Materials and Structures*, 45(8), 1259-1276.
- Onaran, K. 2009. Malzeme Bilimi. *Bilim Teknik Yayınevi*, 383, İstanbul.
- Oyguc, R., Oyguc, E. 2017. 2011 Van earthquakes: Lessons from damaged masonry structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 31(5), 04017062.
- Pantò, B., Cannizzaro, F., Caddemi, S., Calì, I. 2016. 3D macro-element modelling approach for seismic assessment of historical masonry churches. *Advances in Engineering Software*, 97, 40-59.
- Parisse, F., Cattari, S., Marques, R., Lourenco, P. B., Magenes, G. 2021. Benchmarking the seismic assessment of unreinforced masonry buildings from a blind prediction test. *Structures*. 31, 982-1005.

- Petry, S. ve Beyer, K. 2015. Cyclic test data of six unreinforced masonry walls with different boundary conditions. *Earthquake Spectra*, 31(4), 2459-2484.
- Petyt, M. 1990. *Introduction to Finite Element Vibration Analysis*, Cambridge University Pres, Cambridge.
- Portioli, F., Mammana O., Landolfo R., Mazzolani F. M., Krstevska L., Tashkov L., Gramatikov K. 2011. Seismic retrofitting of mustafa pasha cami in skopje: finite element analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(4), 620-639.
- Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., Roque, J. 2010. Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291-1305.
- Sadan, O. B., Bal, I. E., Smyrou, E. 2007. Structural Analysis of Istanbul Beyazit II Mosque Retrofitted by Mimar Sinan. *International Symposium on Studies on Historical Heritage*.
- Saloustros, S., Pelà, L., Roca Fabregat, P. 2020. Nonlinear numerical modelling of complex masonry heritage structures considering history-related phenomena in staged construction analysis and material uncertainty in seismic assessment. *Journal of performance of constructed facilities*, 34(6), 04020096.
- SEAOC Vision 2000 Committee. 1995. *Performance Based Seismic Engineering*. Report prepared by Structural Engineers Association of California.
- Seker, B. Ş., Tuhta, S., Koç, V. 2019. Evaluation of Historical Merzifon Dönertaş Mosque with a Single Dome in Terms of Its Structure. *Seismic Isolation, Structural Health Monitoring, and Performance Based Seismic Design in Earthquake Engineering*, 205-217.
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunisik, A. C., Atamturktur, S., Birinci, F. 2011. Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges. *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, 621–634.
- Silva B. L. 2012. *Diagnosis And Strengthening of Historical Masonry Structures: Numerical And Experimental Analyses*, PhD thesis, University of Brescia, 297, Italy.
- Silva, B., Dalla Benetta, M., da Porto, F., Valluzzi, M. R. 2014. Compression and sonic tests to assess effectiveness of grout injection on three-leaf stone masonry walls. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(3), 408-435.
- Silva, R. A. M., Oliveira, D. V., Lourenço, P. B. 2008. On the strengthening of three-leaf stone masonry walls.
- SolidWorks 2013. *Modeling Software*.

- Soyluk, A. ve Tuna M. E. 2011. Dynamic Analysis of Historical Sehzade Mehmet Cami for Base Isolation Application. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26(3), 667-675.
- Sönmezer, Ş. 2003. İstanbul'daki Sinan Camilerinde Mekân ile Serbest Düşey Taşıyıcılar Arasındaki Boyut İlişkisi. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 316, İstanbul.
- Şeker B. Ş. 2011. Mimar Sinan Camilerinin Statik ve Dinamik Yükler Etkisinde Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 340, Trabzon.
- Tapan, M., Comert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakcal, K., Ilki, A. 2013. Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey. Engineering Failure Analyses. 34, 606-628.
- Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu, 2017. Vakıflar Genel Müdürlüğü, T.C. Başbakanlığı, Ankara.
- TBDY. 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Tomazevic, M. 1999. Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings, Singapore: Imperial College Press.
- Torres, W., Almazán, J. L., Sandoval, C., Boroschek, R. 2017. Operational modal analysis and FE model updating of the Metropolitan Cathedral of Santiago, Chile. Engineering Structures, 143, 169-188.
- Toumbakari, E. E. 2002. Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls. PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 210, Leuven.
- Tsoutrelis, C. E. ve Exadaktylos G. E. 1993. Effect of rock discontinuities on certain rock strength and fracture energy parameters under uniaxial compression. Geotechnical and Geological Engineering, 11(2), 81-105.
- Tuluk, İ. 2000. Mekâna bağlı strüktür analizi: osmanlı dini mimarisinde örnekleme (15.-17. YY.). Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, 375, Trabzon.
- Türker, T., Yanık, Y. 2020. İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8(2), 1431-1453.
- Uray, A., Şengel, H. S., Çarbaş, S. 2019. Analysis of historical structures by using finite element method in Iznik Yeşil Mosque. Challenge, 5(4), 121-129.
- Usta, P., Bozdağ, Ö. 2021. Tarihi Başdurak Camisinin Deprem Analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 244-250.

- Ülgen, A. S. 1944. İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami rölövesi.
- Ülgen, A. S. 1951. Konya Karapınar İkinci Selim Cami rölövesi.
- Ülgen, A. S. 1956. Diyarbakır Behram Paşa Cami rölövesi.
- Valluzzi, M. R. 2003. Consolidamento e recupero delle murature. Gruppo Editoriale Faenza Editrice, Italy.
- Valluzzi, M. R., da Porto, F., Modena, C. 2004. Behaviour and modelling of strengthened three-leaf stone masonry walls. *Materials and Structures*, 37, 184-192.
- Vanin, F., Zaganelli, D., Penna, A., Beyer, K. 2017. Estimates for the stiffness, strength and drift capacity of stone masonry walls based on 123 quasi-static cyclic tests reported in the literature. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(12), 5435-5479.
- Vasconcelos, G. 2005. Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: Characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls. PhD thesis, Minho University, 266, Portugal.
- Vintzileou, E. 2008. Effect of timber ties on the behavior of historic masonry. *Journal of Structural Engineering*, 134(6), 961-972.
- Vintzileou, E., Miltiadou-Fezans, A., Vrouva, A., Anagnostopoulou, S. 2006. Mechanical properties of three-leaf stone Masonry, 5th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India.
- Vintzileou, E., Mouzakis, C., Adami, C. E., Karapitta, L. 2015. Seismic behavior of three-leaf stone masonry buildings before and after interventions: Shaking table tests on a two-storey masonry model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(10), 3107-3133.
- Vintzileou, E., Tassios, T. P. 1995. Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts. *Journal of Structural Engineering*, 121(5), 848-856.
- Willam, K. J. ve Warnke E. D. 1975. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. *International Association for Bridge and Structural Engineering*, 19(3):1-30.
- Yön, B., Onat, O. 2017. 3 Aralık 2015 Bingöl-Kığı depreminin Tunceli ilindeki yığma yapılara etkisinin değerlendirilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(1), 375-385.
- ZAN Mimarlık, Giresun Şebinkarahisar Fatih Cami rölövesi, Trabzon Vakıflar Bölge Müdürlüğü.
- Zizi, M., Chisari, C., Rouhi, J., De Matteis, G. 2022. Comparative analysis on macroscale material models for the prediction of masonry in-plane behavior. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(2), 963-996.

EKLER

1. EK-1

1.1. Konya Karapınar Sultan Selim Cami Analizleri ($E=750f_c$)

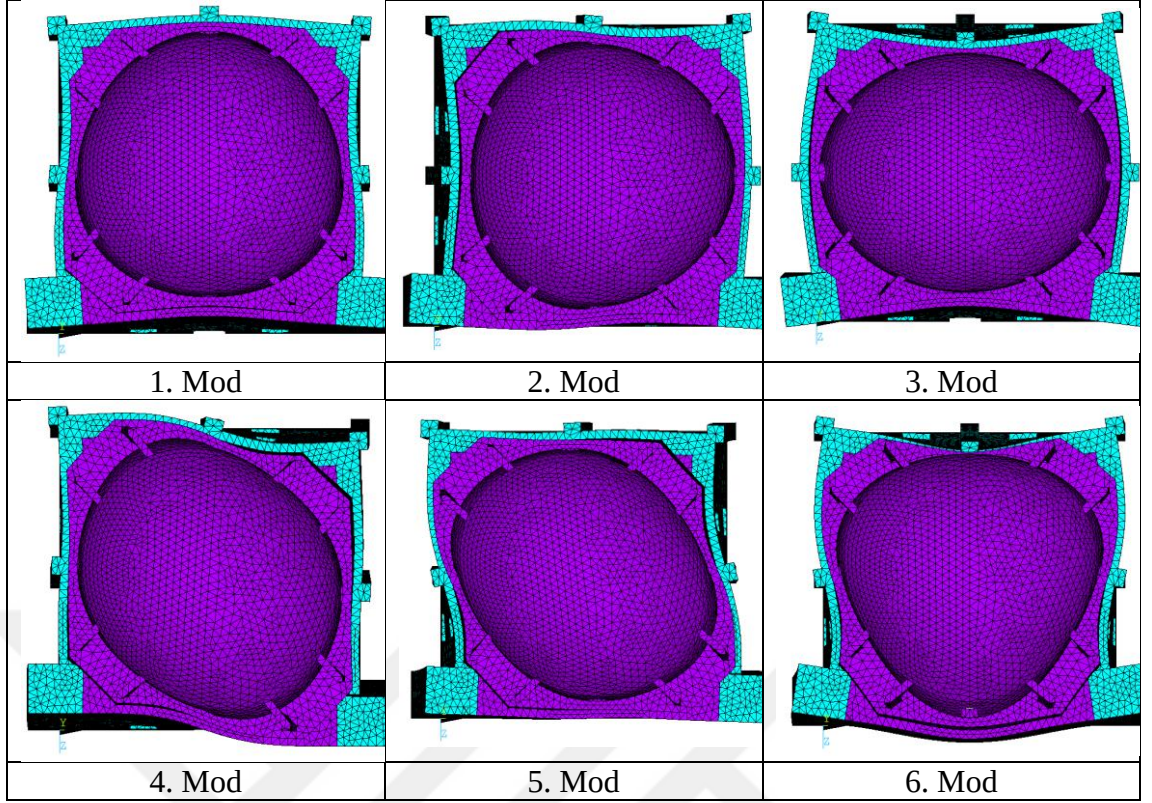
1.1.1. Modal analiz

Sultan Selim Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.1'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.1. Sultan Selim Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=750f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	4.14	1.19E-06	1.28E-05	0.65	0.28
2	4.37	0.65	3.69E-09	1.01E-06	0.57
3	5.56	3.07E-07	6.48E-05	3.12E-05	0.57
4	7.03	4.00E-04	2.15E-07	4.08E-07	0.74
5	7.15	6.18E-03	1.34E-07	3.69E-07	0.83
6	8.18	3.61E-07	6.42E-05	2.59E-03	0.83

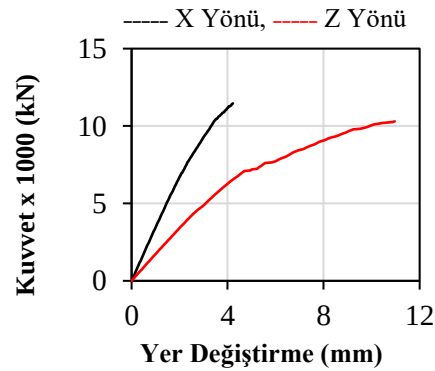
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod kuzey-güney (Z doğrultusu), 2. mod doğu-batı (X doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.1'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3518 tondur.



Şekil EK-1.1. Sultan Selim Cami'nin mod şekilleri ($E=750f_c$)

1.1.2. İtme analizi

Şekil EK-1.2'de Sultan Selim Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 7750 kN, 2,325 mm; Z doğrultusunda ise 5250 kN, 3 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 11458 kN, Z doğrultusunda 10300 kN olarak belirlenmiştir.



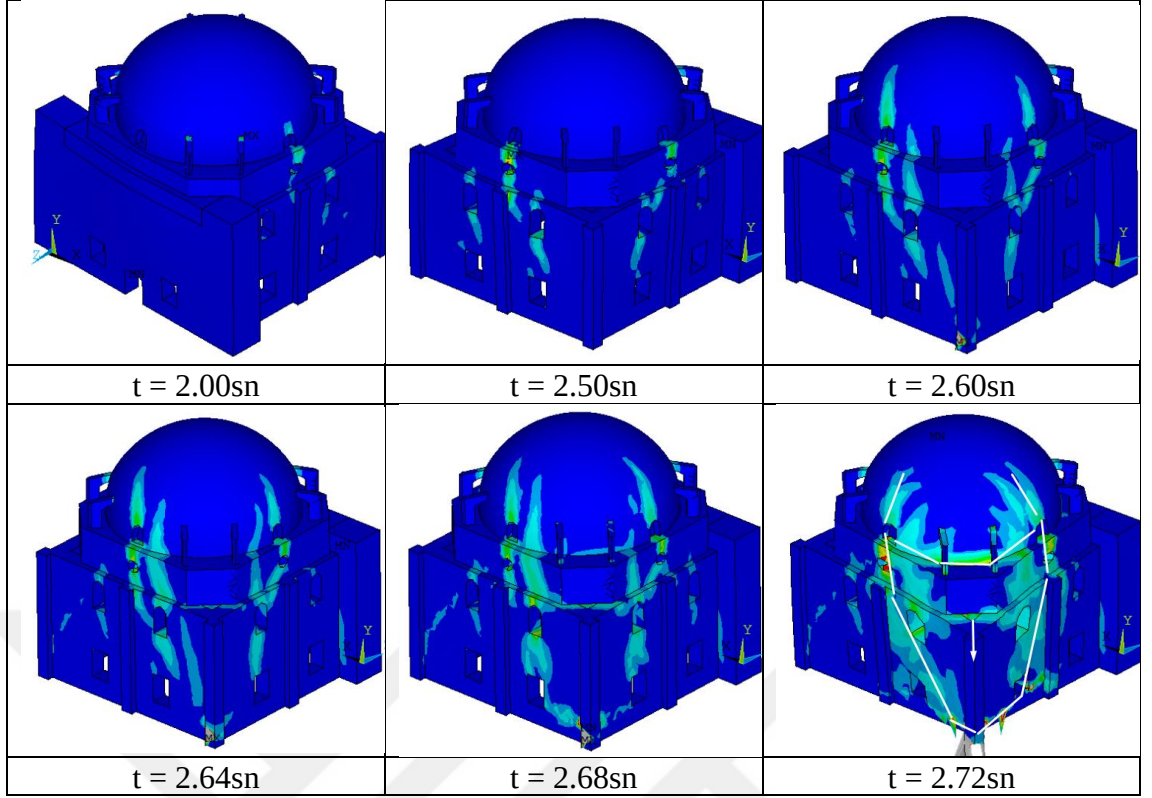
Şekil EK-1.2. Sultan Selim Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=750f_c$)

1.1.3. Dinamik analizler

Konya Karapınar Sultan Selim Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

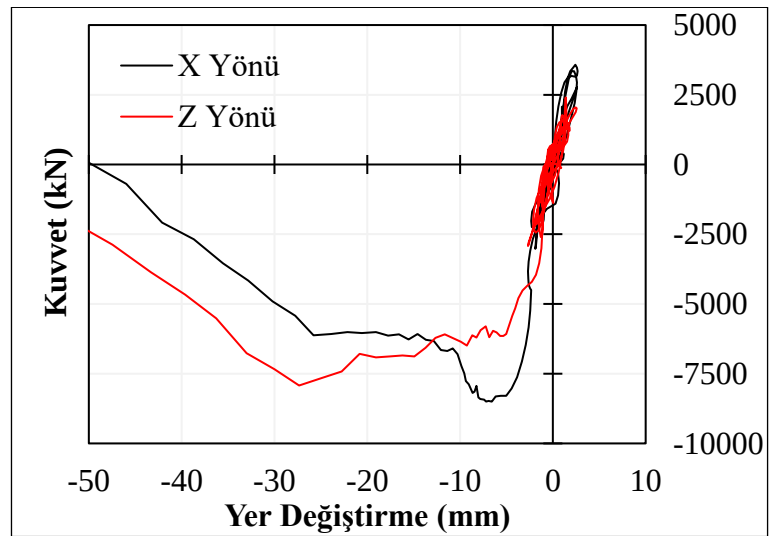
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.3'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00'inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir ancak yapının batı duvarının üst kısmında bulunan kubbe penceresinden duvar üstüne doğru bir hat boyunca çatlaklar oluşmaya başladığı görülmektedir. 2.50'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının doğu ve güney duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 1.0-1.5mm mertebelerindedir. 2.60'cı saniyede yapının doğu ve güney duvarlarındaki çatlaklar yapının güney-doğu köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 5-7mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.3'de görüldüğü üzere doğu ve güney duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının güney-doğu köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 10-15mm bir açılma gözlemlenmektedir.



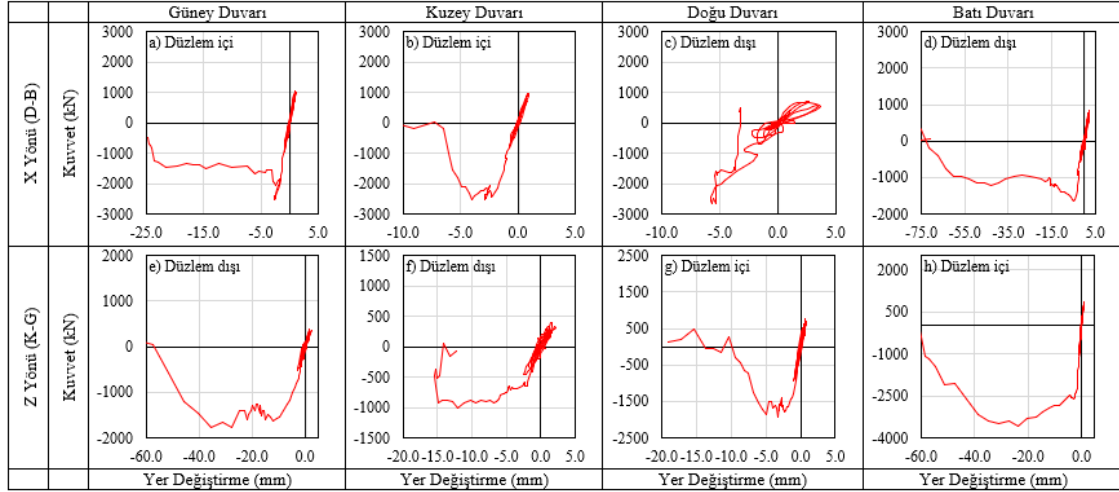
Şekil EK-1.3. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.4’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.4. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

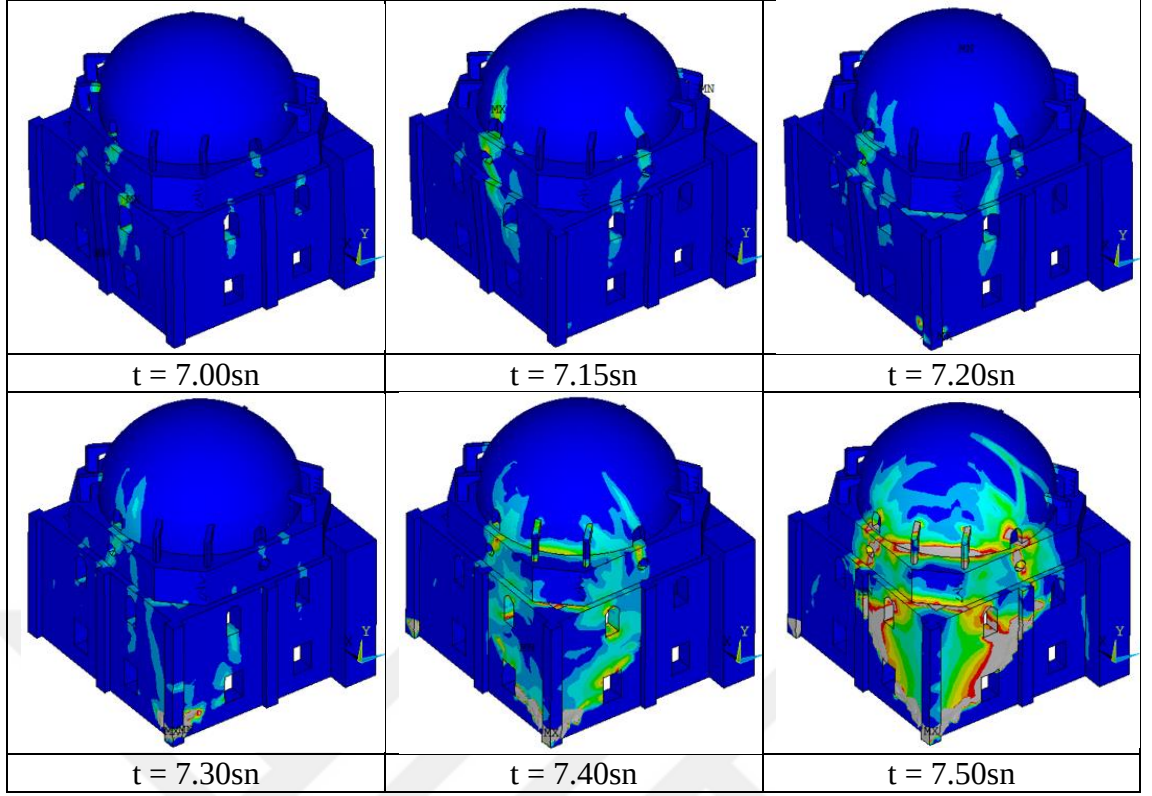
Şekil EK-1.5’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.5. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

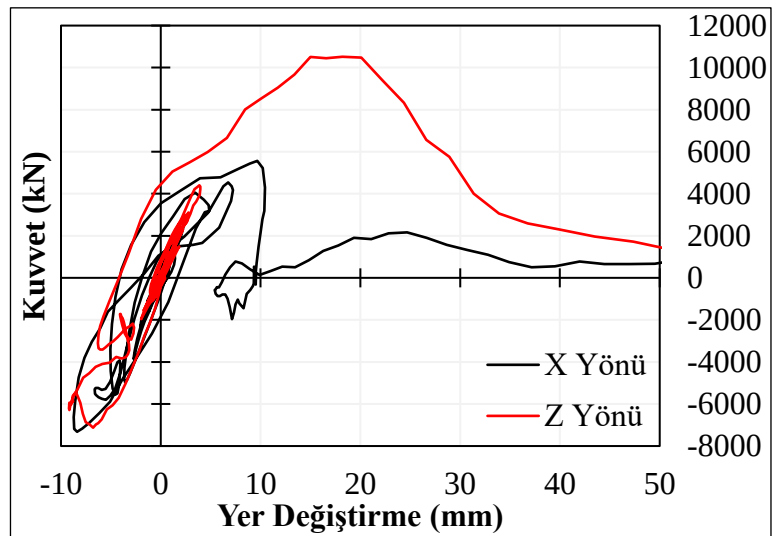
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.6’de verilmektedir. Cami güney-doğu köşesinde, kubbe penceresini ve duvarların üst kısmında bulunan pencere boşluklarını kapsayacak şekilde V şeklinde göçmektedir. Caminin önceki çevrimlerde hasar görmesi, bir kısmın göçtüğü diğer kısımların ise ağır hasar gördüğü olarak tanımlanabilir.



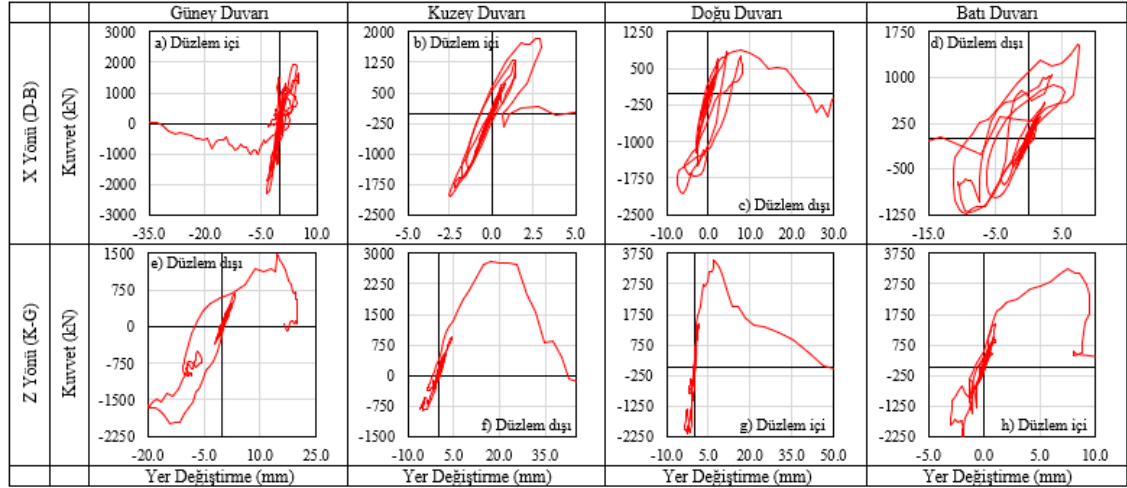
Şekil EK-1.6. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.7’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.7. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.8’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

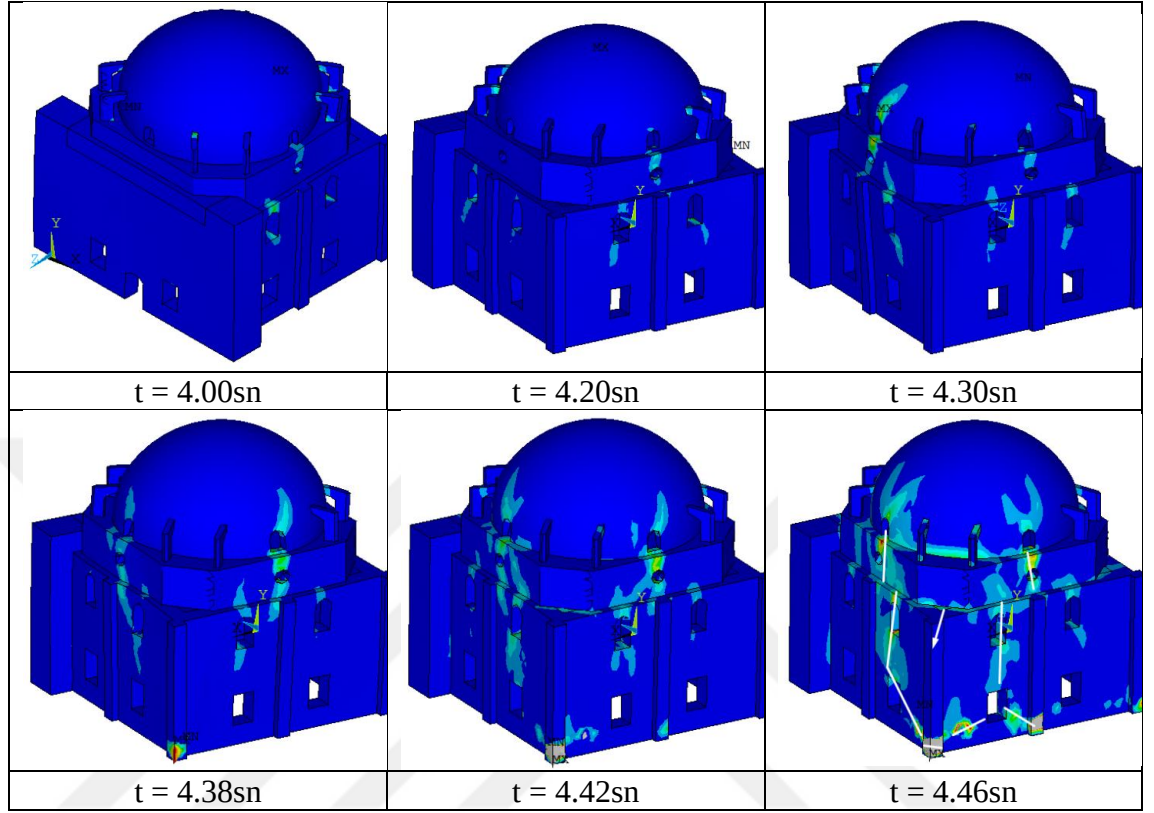


Şekil EK-1.8. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

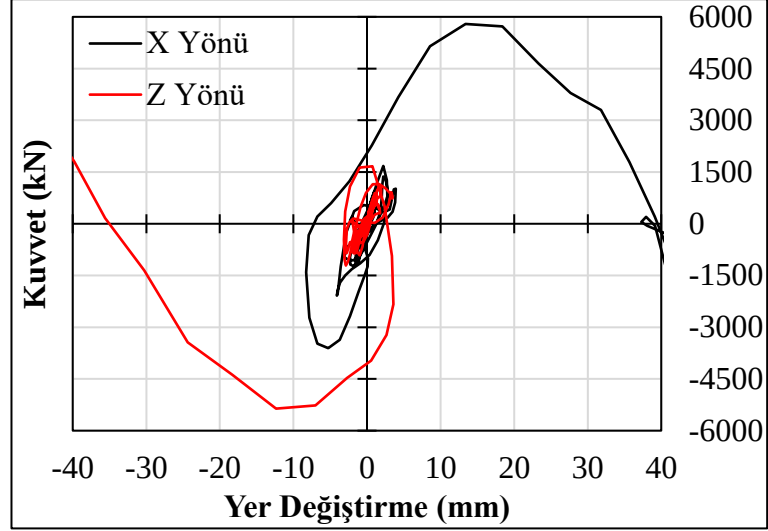
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.9’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 0.5-1.0mm mertebelerindedir. 4.30’uncu saniyede yapının batı duvarlarındaki çatlaklar yapının kuzey -batı köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 2.5-4.0mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.9’da görüldüğü üzere batı ve kuzey duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının kuzey-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir.

Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 10-15mm bir açılma gözlemlenmektedir.



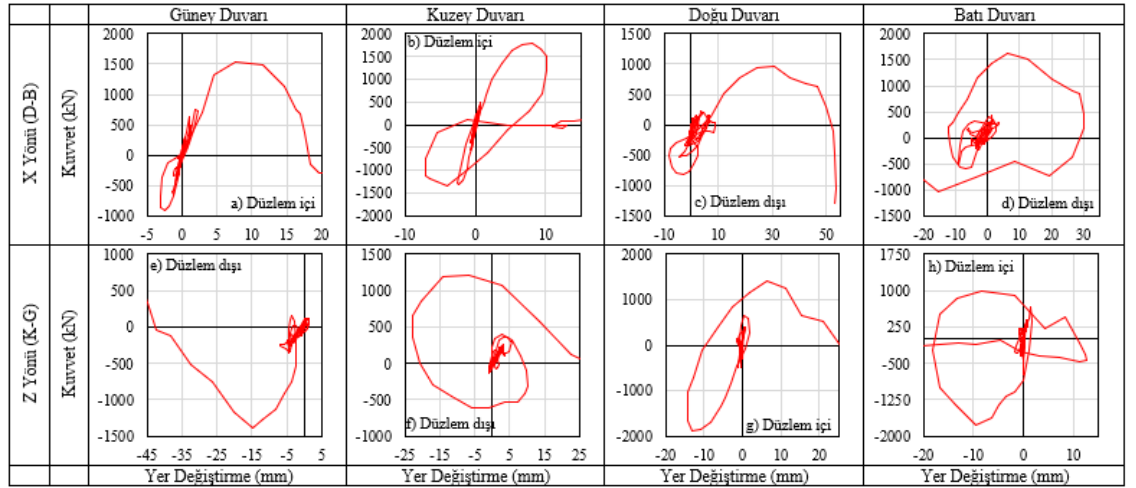
Şekil EK-1.9. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.10’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.10. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

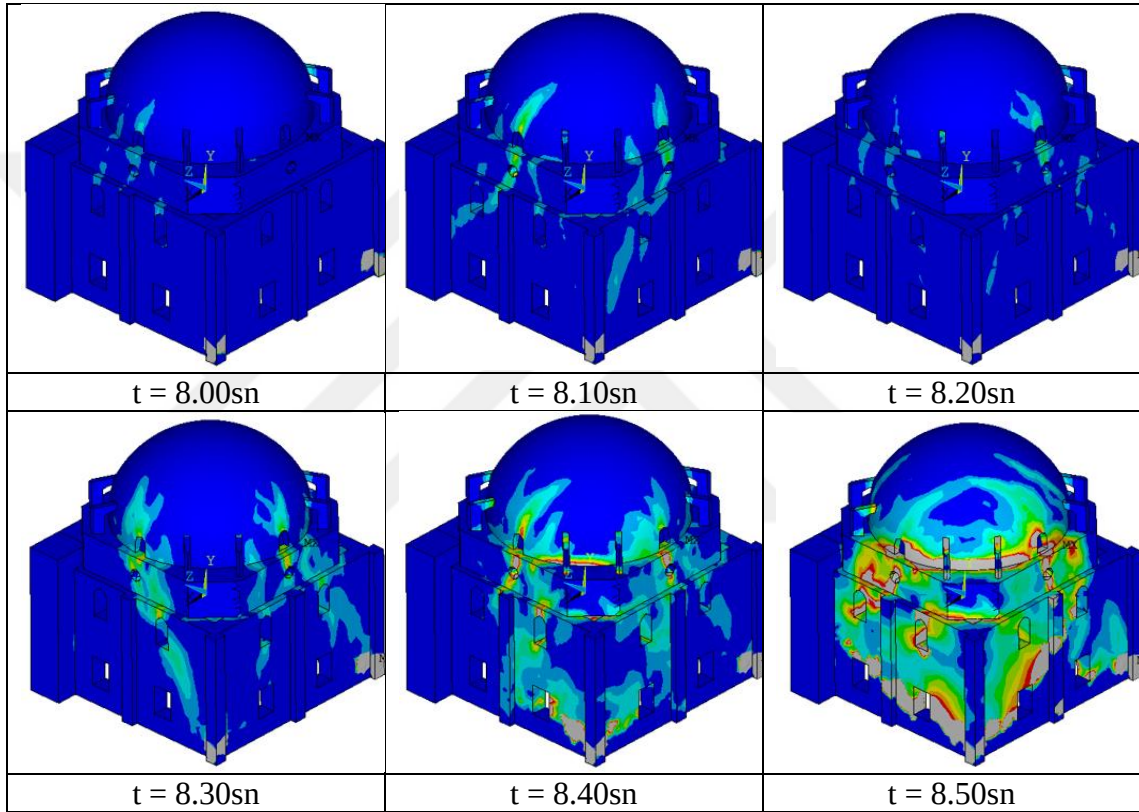
Şekil EK-1.11’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.11. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

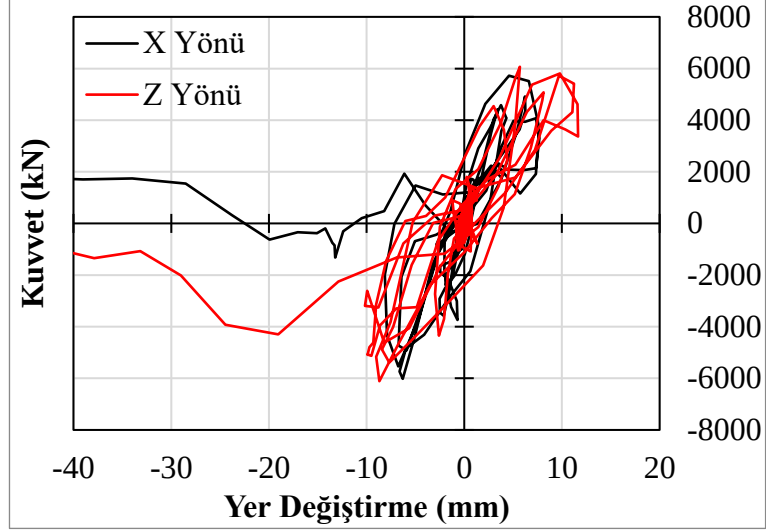
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.12’de verilmektedir. Cami güney-batı köşesinde, kubbe penceresini ve duvarların üst kısmında bulunan pencere boşluklarını kapsayacak şekilde V şeklinde göçmektedir. Caminin önceki çevrimlerde hasar görmesi, bir kısmın göçtüğü diğer kısımların ise ağır hasar gördüğü olarak tanımlanabilir.



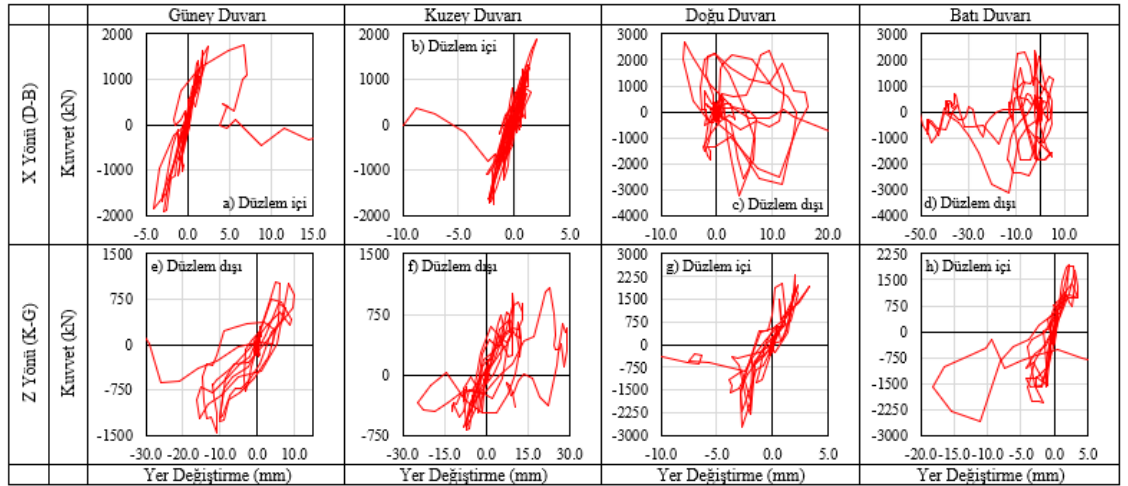
Şekil EK-1.12. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.13’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.13. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

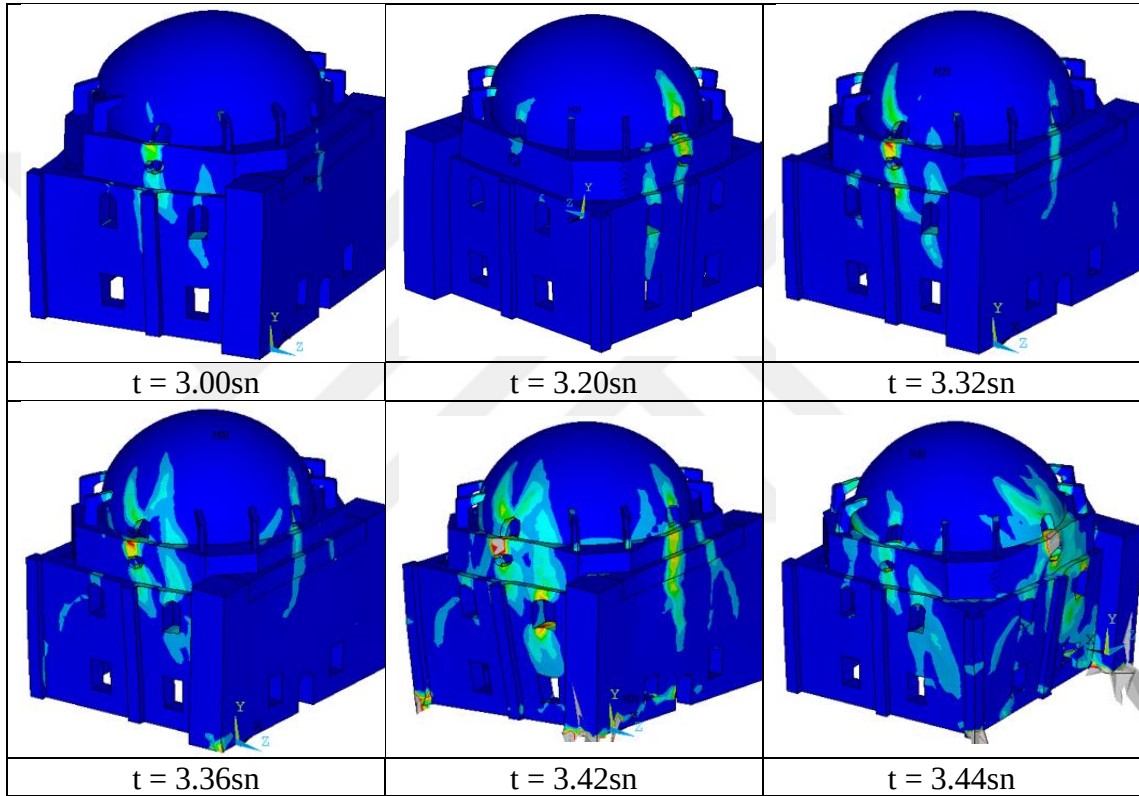
Şekil EK-1.14’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.14. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

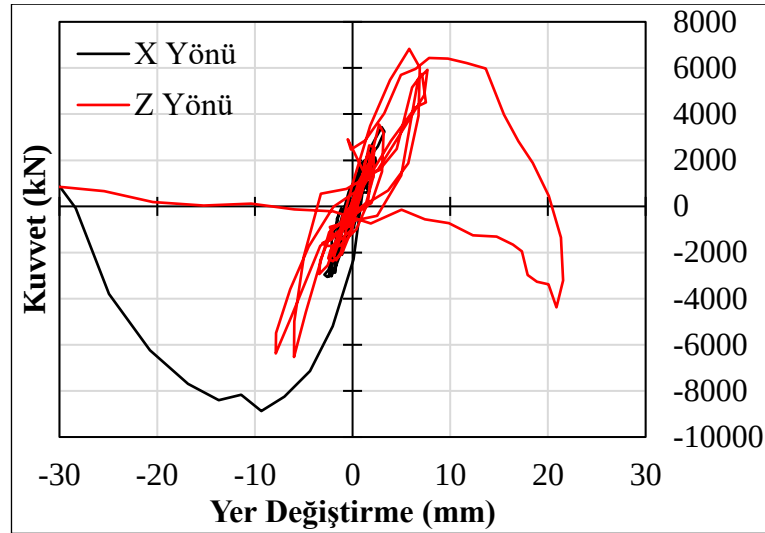
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.15’da verilmektedir. Cami güney-doğu köşesinde, kubbe penceresini ve duvarların üst kısmında bulunan pencere boşluklarını kapsayacak şekilde V şeklinde göçmektedir. Caminin önceki çevrimlerde hasar görmesi, bir kısmın göçtüğü diğer kısımların ise ağır hasar gördüğü olarak tanımlanabilir.



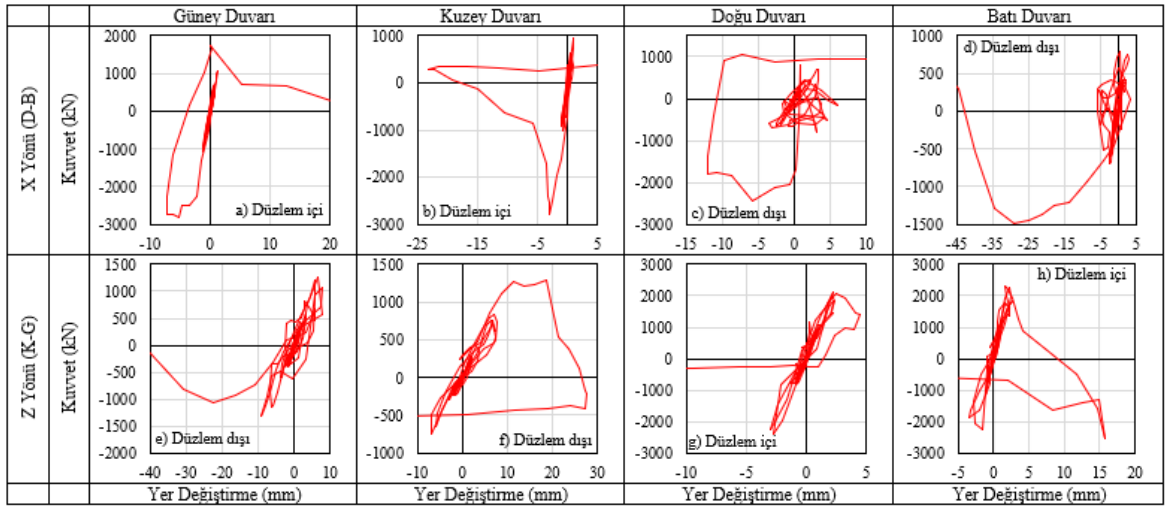
Şekil EK-1.15. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.16’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.16. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.17’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.17. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.2. Konya İlgin Lala Mustafa Paşa Cami Analizleri ($E=750f_c$)

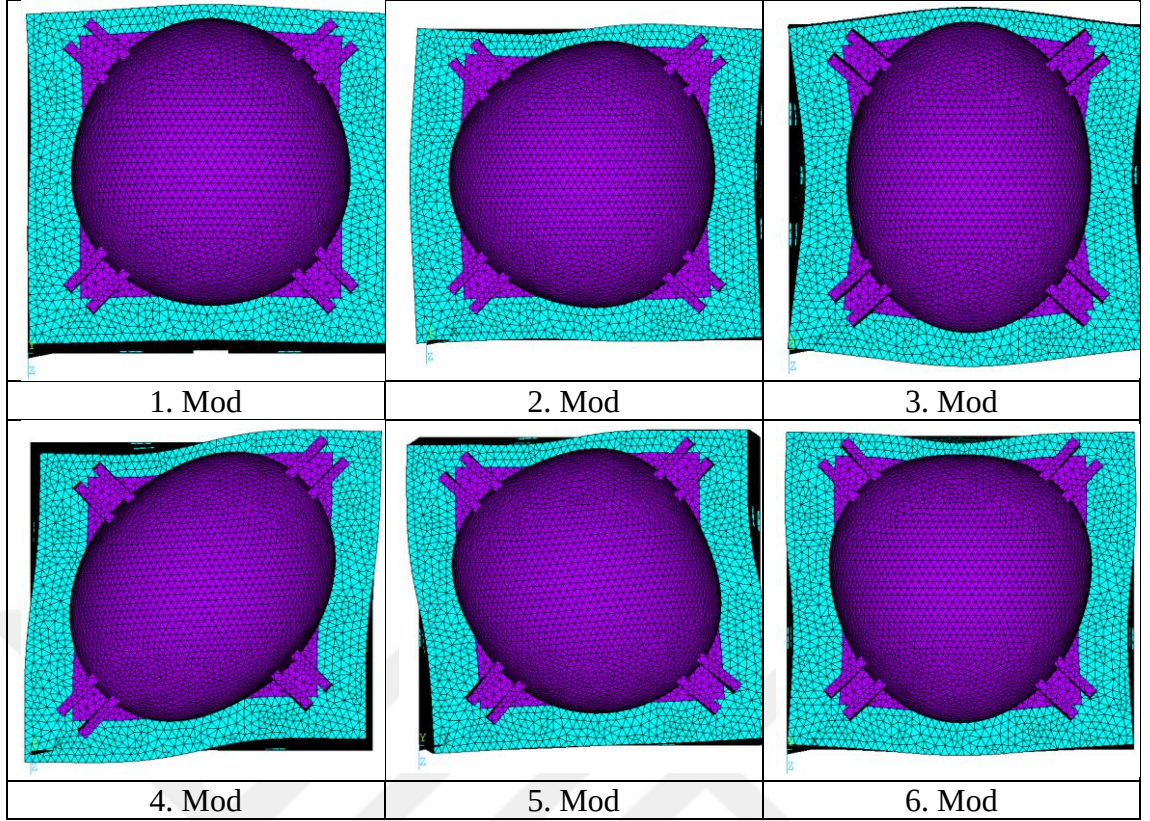
1.2.1. Modal analiz

Konya İlgin lala Mustafa Paşa Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.2'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.2. İlgin Lala Mustafa Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=750f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	5.95	0.67E-06	0.20E-03	0.71	0.32
2	6.22	0.72	0.27E-08	0.82E-06	0.60
3	7.34	0.78E-06	0.20E-02	0.77E-02	0.61
4	8.36	0.56E-02	0.19E-07	0.50E-10	0.62
5	9.65	0.54E-02	0.10E-07	0.29E-08	0.87
6	11.18	0.14E-07	0.82E-02	0.42E-02	0.87

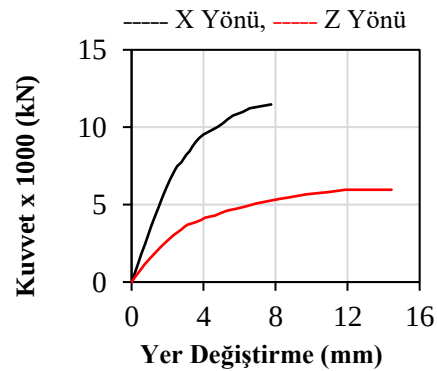
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod kuzey-güney (Z doğrultusu), 2. mod doğu-batı (X doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.18'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3020 tondur.



Şekil EK-1.18. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=750f_c$)

1.2.2. İtme analizi

Şekil EK-1.19'da Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 6100 kN, 1,83 mm; Z doğrultusunda ise 3750 kN, 3 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 11474 kN, Z doğrultusunda 5963 kN olarak belirlenmiştir.



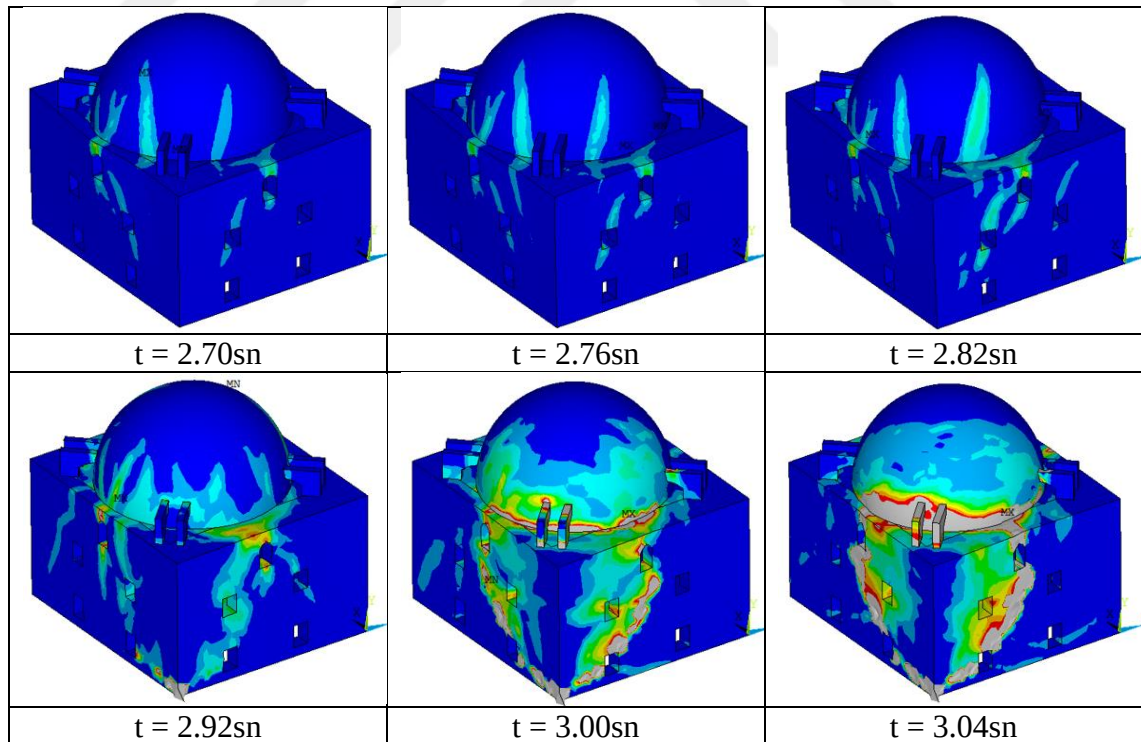
Şekil EK-1.19. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=750f_c$).

1.2.3. Dinamik analizler

Konya Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

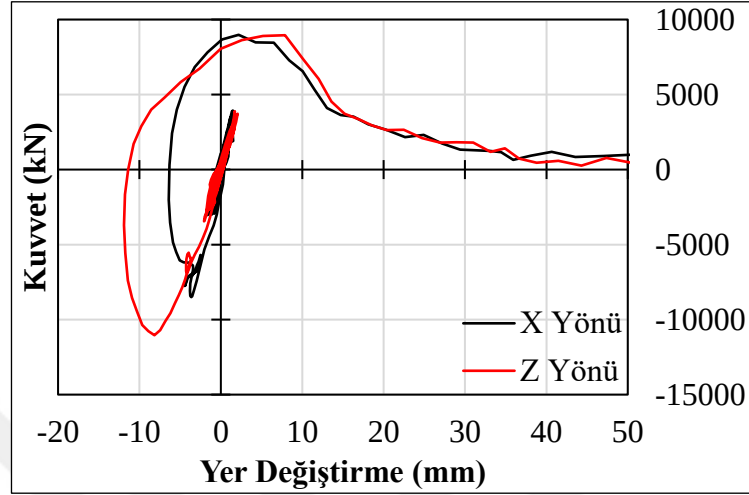
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.20'de verilmektedir. Cami güney-doğu köşesinde, kubbe penceresini ve duvarların üst kısmında bulunan pencere boşluklarını kapsayacak şekilde V şeklinde göçmektedir. Caminin önceki çevrimlerde hasar görmesi, bir kısmın göçtüğü diğer kısımların ise ağır hasar gördüğü olarak tanımlanabilir.



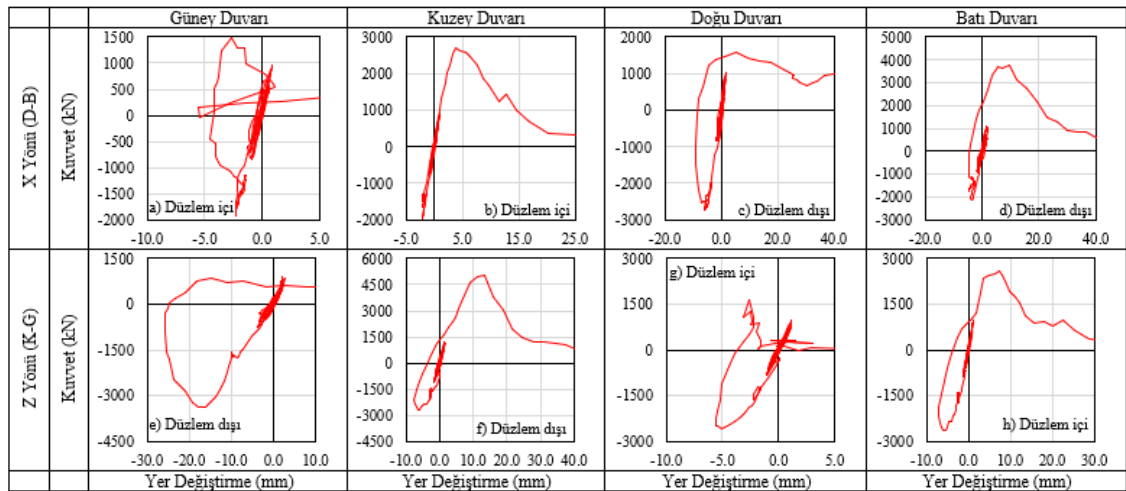
Şekil EK-1.20. Sultan Selim Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.21’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.21. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

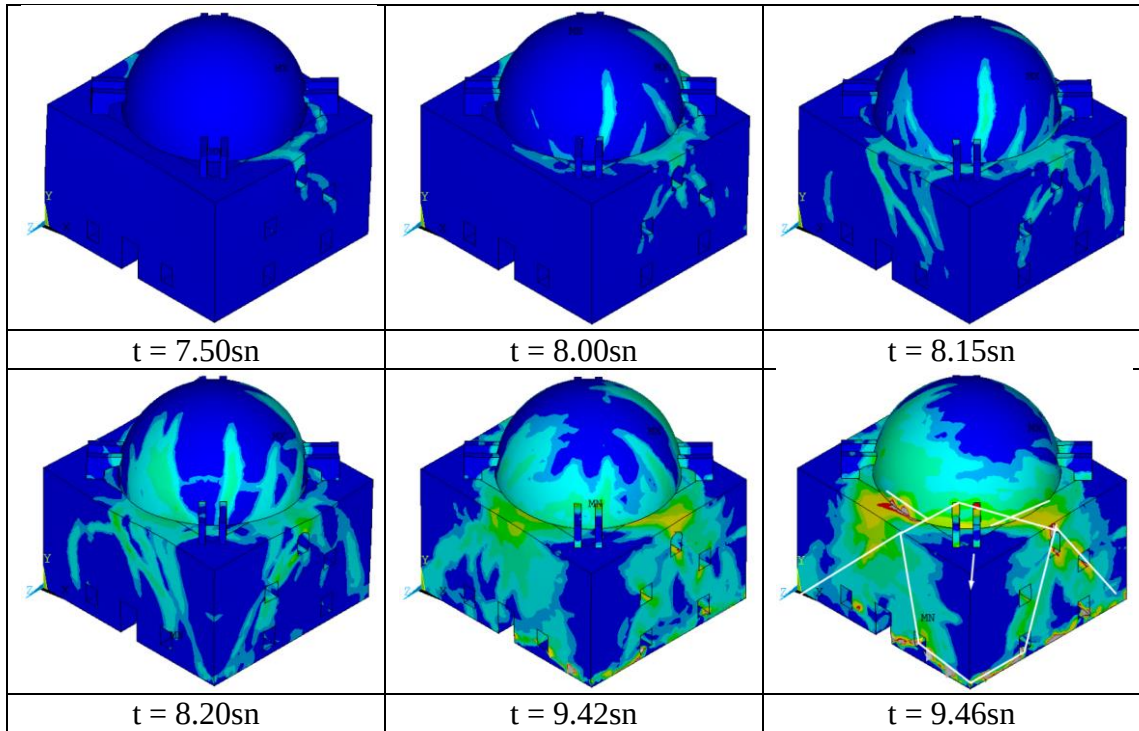
Şekil EK-1.22’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.22. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

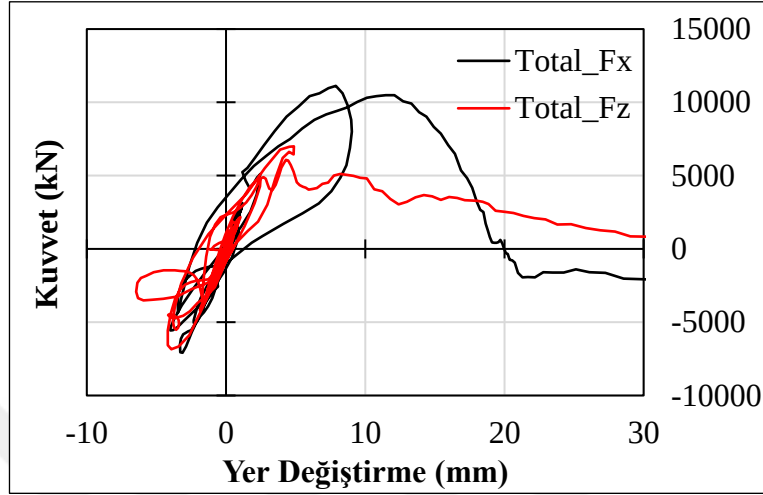
- **Duz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.23’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 7.50’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 8.00’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Ayrıca aynı saniyede yer hareketinin etkisi ile batı duvarında da üst pencereden aşağıdaki pencereler doğru ilerleyen çatlaklar gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar 1.5-2.0mm mertebelerindedir. 8.15’inci saniyede yapının kuzey ve batı duvarlarındaki çatlaklar yapının kuzey-batı köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 2.5-4.0mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.23’de görüldüğü üzere batı ve kuzey duvarlarının kubbe-duvar birleşim yerlerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının kuzey-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 10-15mm bir açılma gözlemlenmektedir.



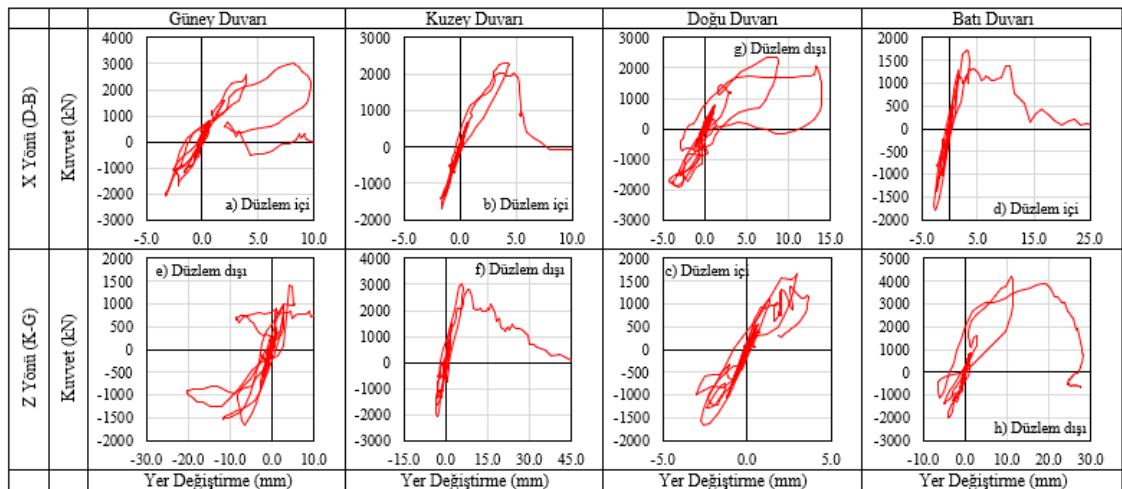
Şekil EK-1.23. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Duz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.24’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.24. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

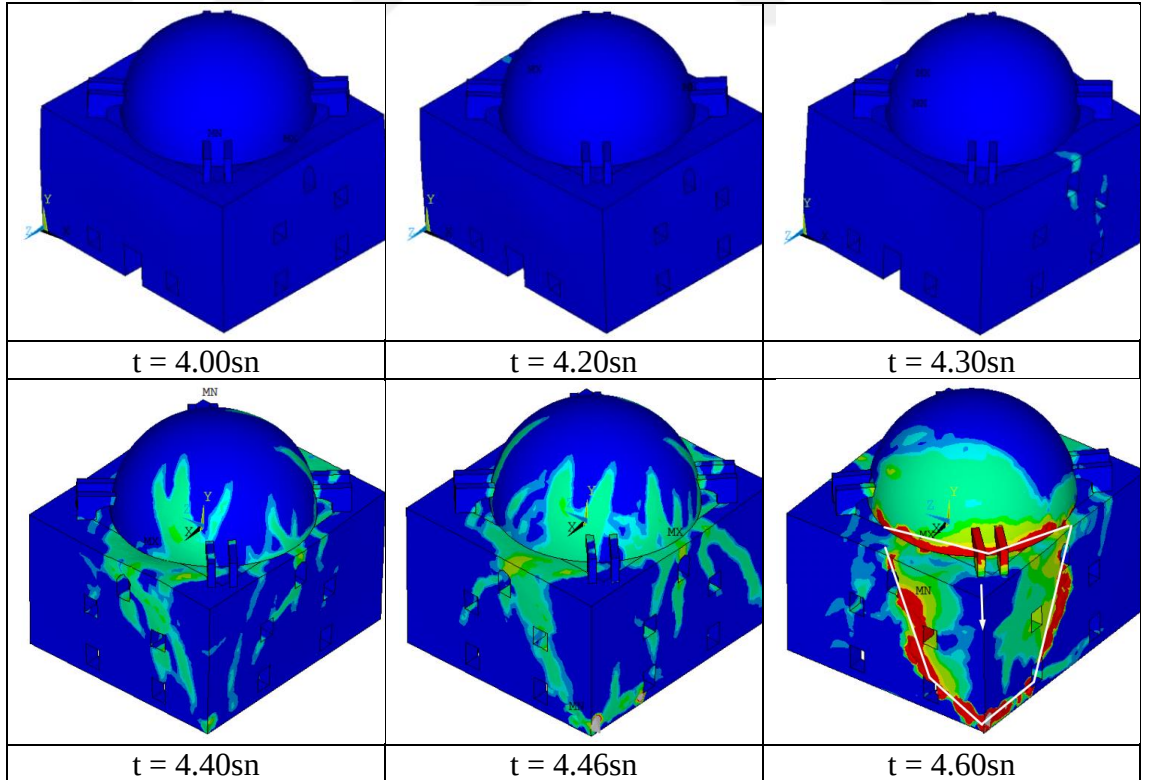
Şekil EK-1.25’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.25. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

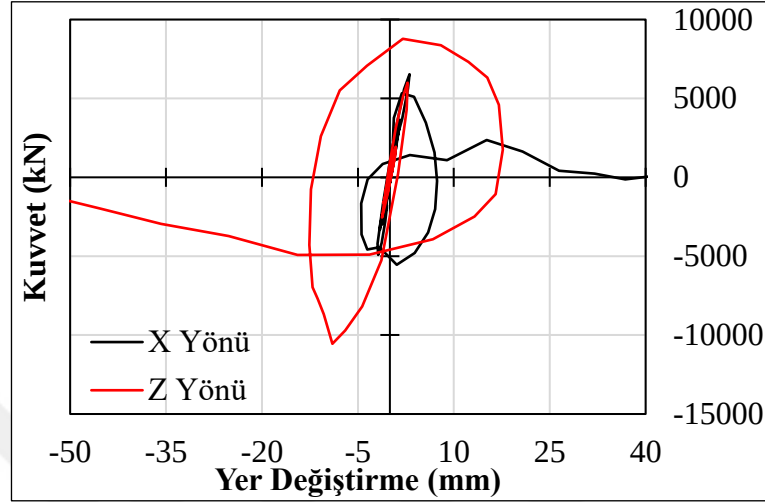
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.26’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.30’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının batı duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 0.5-1.0mm mertebelerindedir. 4.40’uncu saniyede yapının batı duvarlarındaki çatlaklar yapının kuzey-batı köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 3.5-5.0mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.26’de görüldüğü üzere batı ve kuzey duvarlarının kubbenin duvarlarla birleştiği kısımlardan başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının kuzey-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 50-80mm bir açılma gözlemlenmektedir.



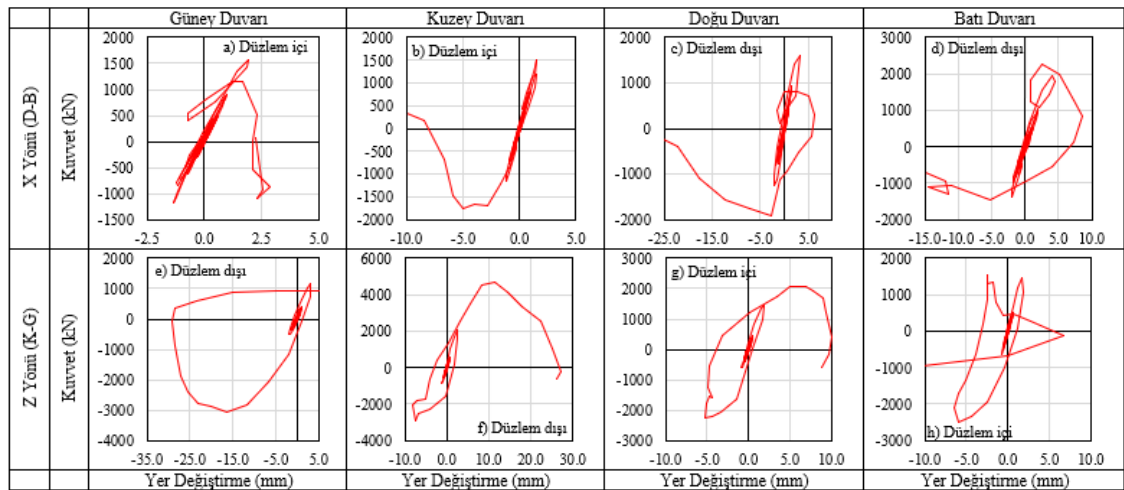
Şekil EK-1.26. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.27’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.27. İlgın Lala Mustafa Paşa ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

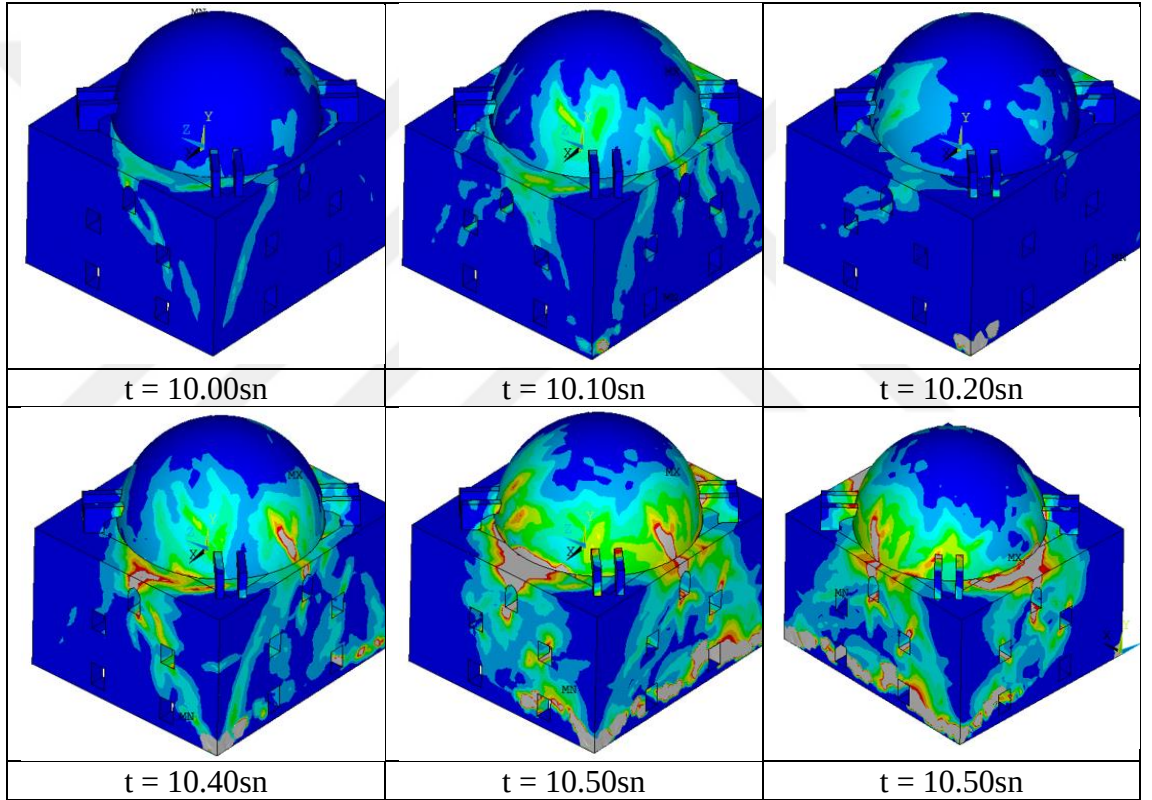
Şekil EK-1.28’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.28. İlgın Lala Mustafa Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

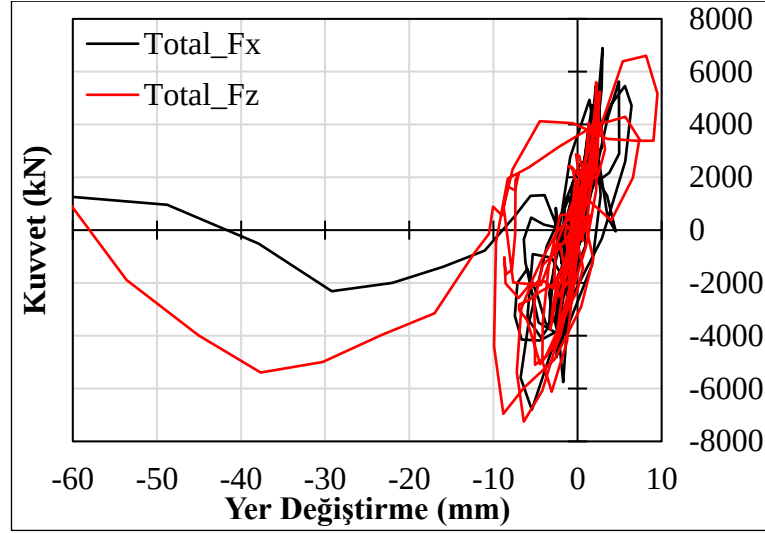
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.29’de verilmektedir. Yer hareketinin farklı çevrimlerinde caminin farklı bölgelerinde çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlaklar zamanla daha geniş bir hasara sebep olmaktadır. Ancak caminin temel yıkılma mekanizması güney duvarının devrilmesi olarak söylenebilir. Bu devrilmede caminin doğu ve batı duvarlarının üst pencere boşluğundan başlayarak güneye doğru diyagonal kırılması görülmektedir. Bu devrilme hareketi ile ana kubbenin de göçtüğü gözlemlenmektedir.



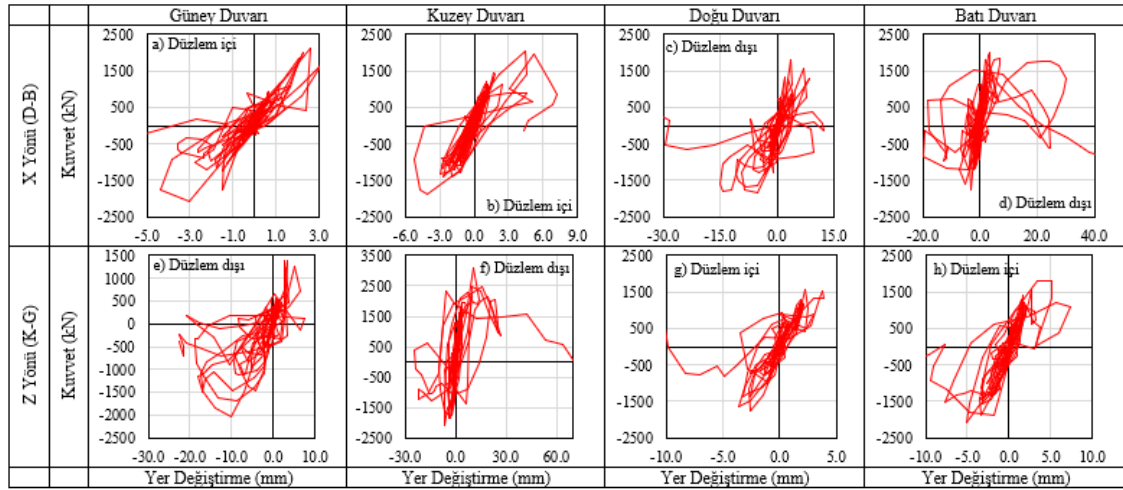
Şekil EK-1.29. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.30’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.30. İlgın Lala Mustafa Paşa ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

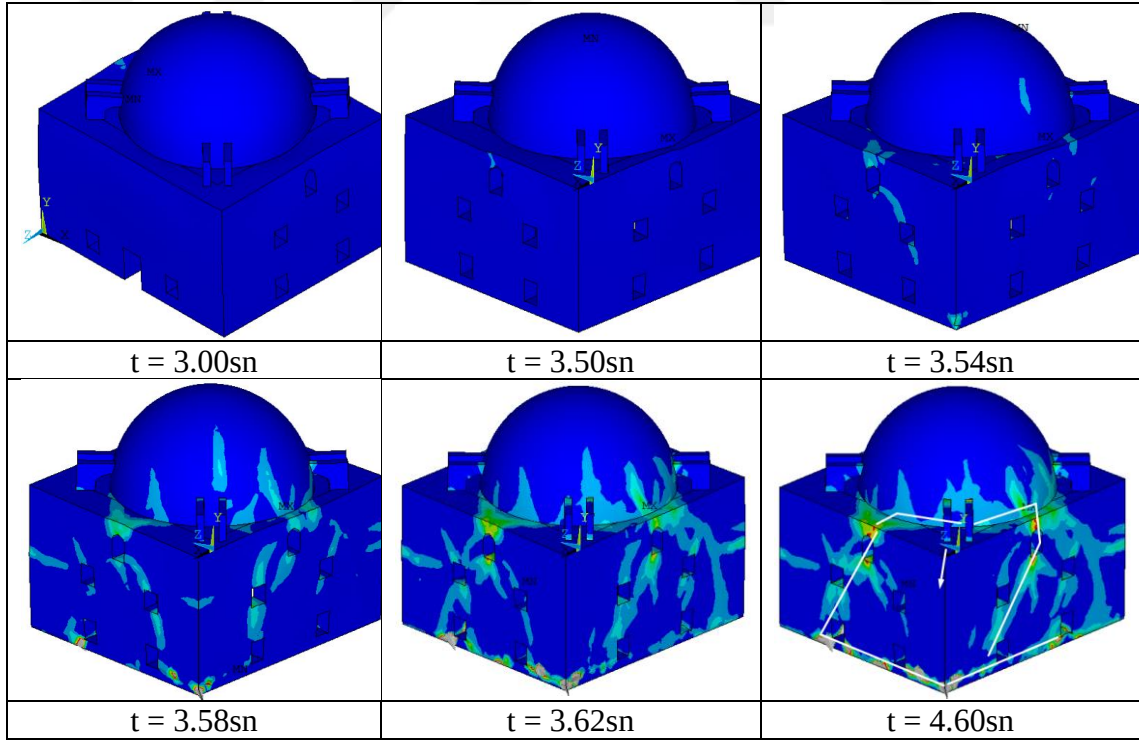
Şekil EK-1.31’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.31. İlgın Lala Mustafa Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

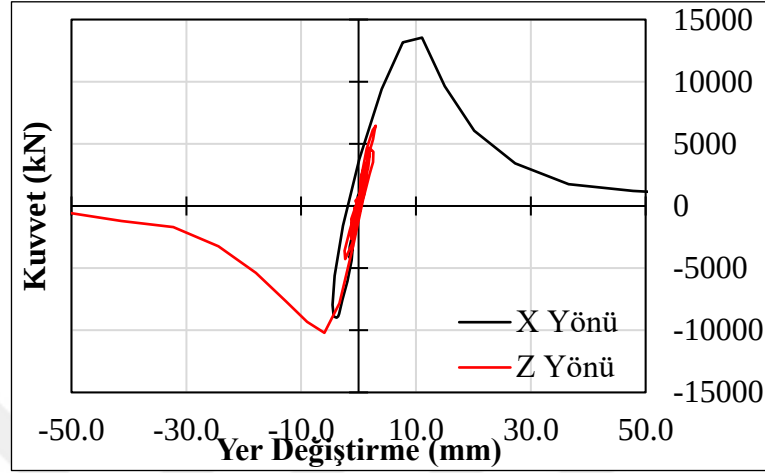
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.32’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.50’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının batı duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 1.0-1.25mm mertebelerindedir. 4.54’üncü saniyede yapının batı duvarlarındaki çatlaklar yapının güney-batı köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 3.5-5.0mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.32’da görüldüğü üzere batı ve güney duvarlarının kubbenin duvarlarla birleştiği kısımlardan başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının güney-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 50-80mm bir açılma gözlemlenmektedir.



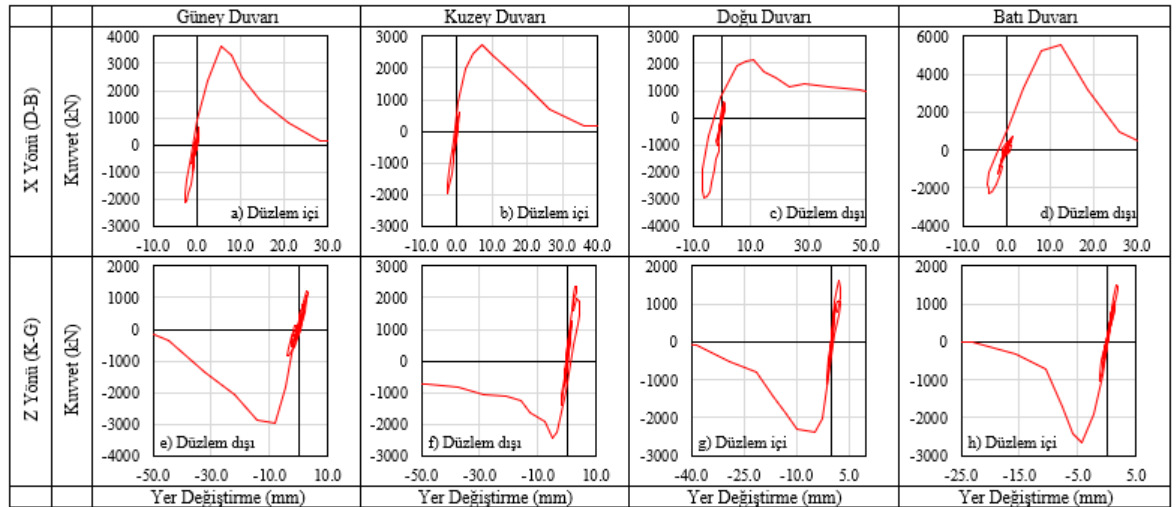
Şekil EK-1.32. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.33’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.33. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.34’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.34. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.3. Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami Analizleri ($E=750f_c$)

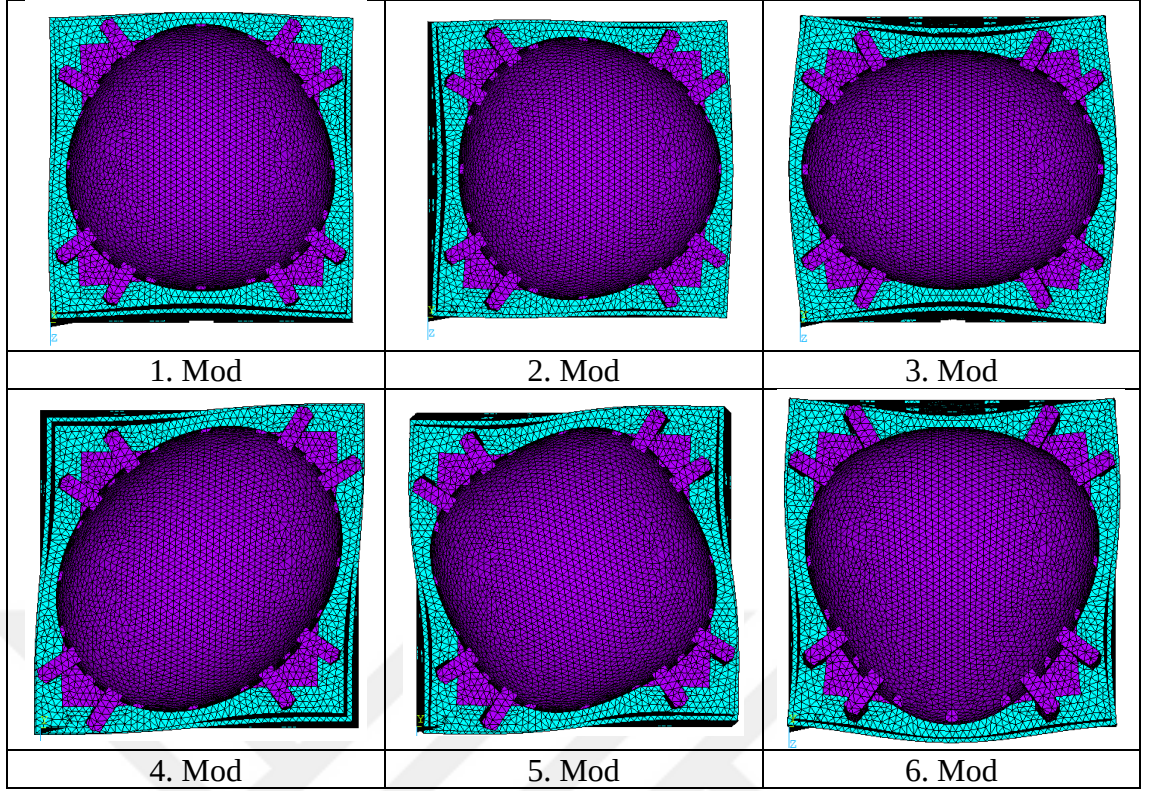
1.3.1. Modal analiz

Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.3'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.3. Cenabi Ahmet Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=750f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	5.20	0.33E-02	0.14E-06	0.60	0.30
2	5.25	0.60	0.15E-06	0.32E-02	0.53
3	6.42	0.15E-06	0.13E-05	0.26E-05	0.53
4	8.20	0.12E-03	0.77E-05	0.72E-05	0.53
5	8.92	0.29E-03	0.69E-05	0.52E-07	0.80
6	9.44	0.17E-06	0.13E-03	0.10E-01	0.81

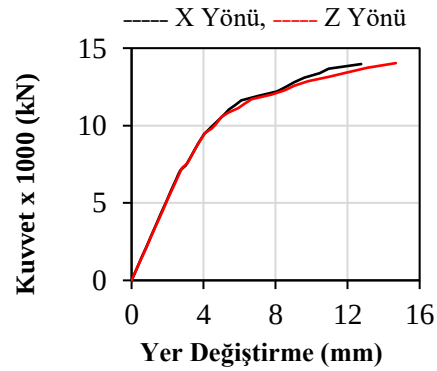
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod kuzey-güney (Z doğrultusu), 2. mod doğu-batı (X doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.35'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3636 tondur.



Şekil EK-1.35. Cenabi Ahmet Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=750f_c$)

1.3.2. İtme analizi

Şekil EK-1.36'de Cenabi Ahmet Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 9500 kN, 3,8 mm; Z doğrultusunda ise 9500 kN, 3,8 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 13971 kN, Z doğrultusunda 14034 kN olarak belirlenmiştir.



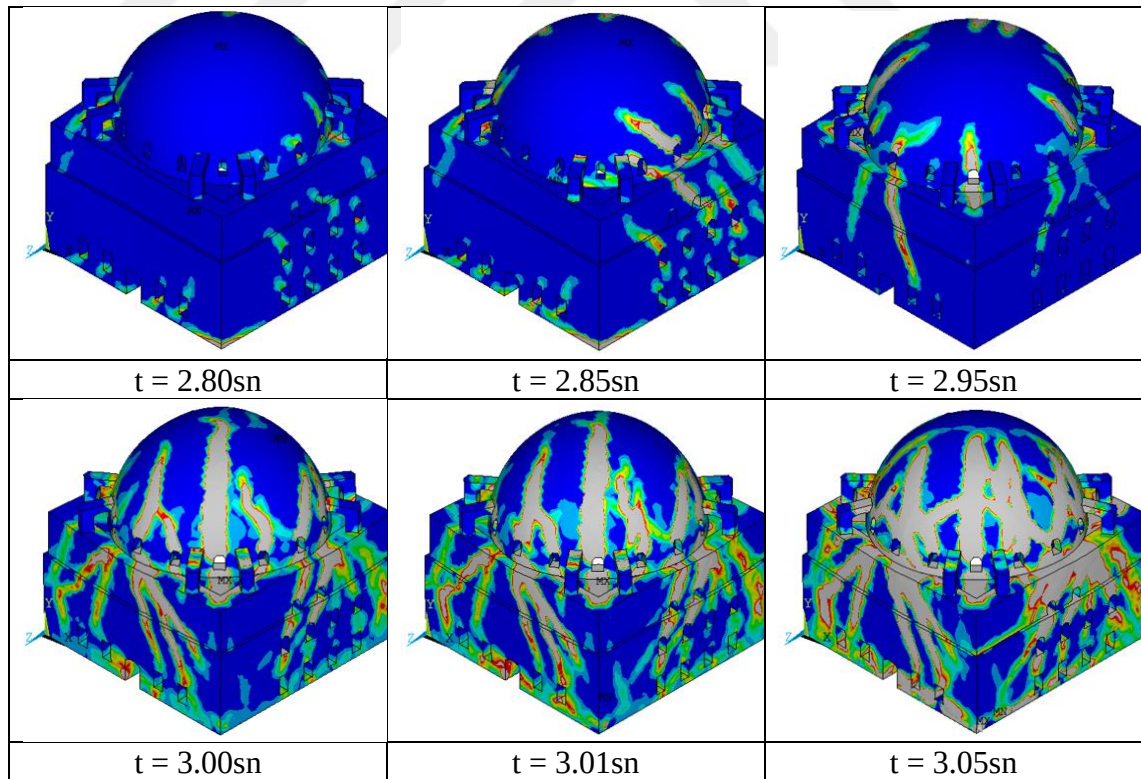
Şekil EK-1.36. Cenabi Ahmet Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=750f_c$).

1.3.3. Dinamik analizler

Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

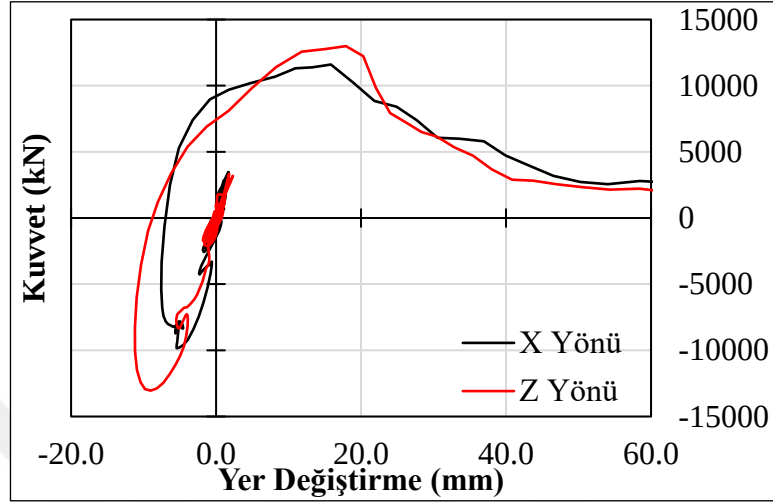
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.37'de verilmektedir. Caminin göçme mekanizması kuzey-batı köşesinde gerçekleşmektedir. Her iki duvarında pencere boşluklarının konumuna bağlı olarak diyagonal çatlak hatları oluşmaktadır. Ayrıca caminin belirli bir seviyesinde incelen taşıyıcı duvarlar, bu kısımların da kopmasına sebep olmaktadır.



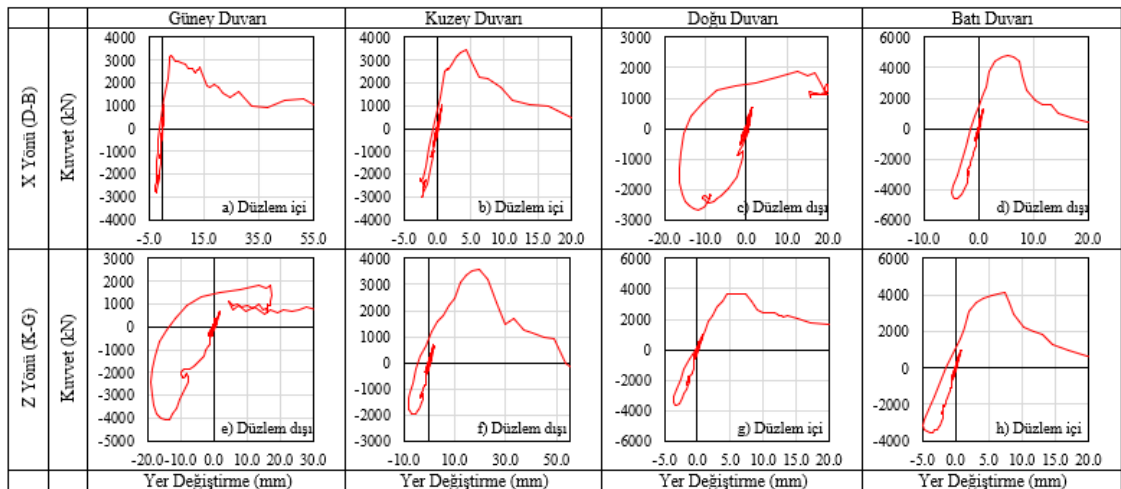
Şekil EK-1.37. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.38’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.38. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

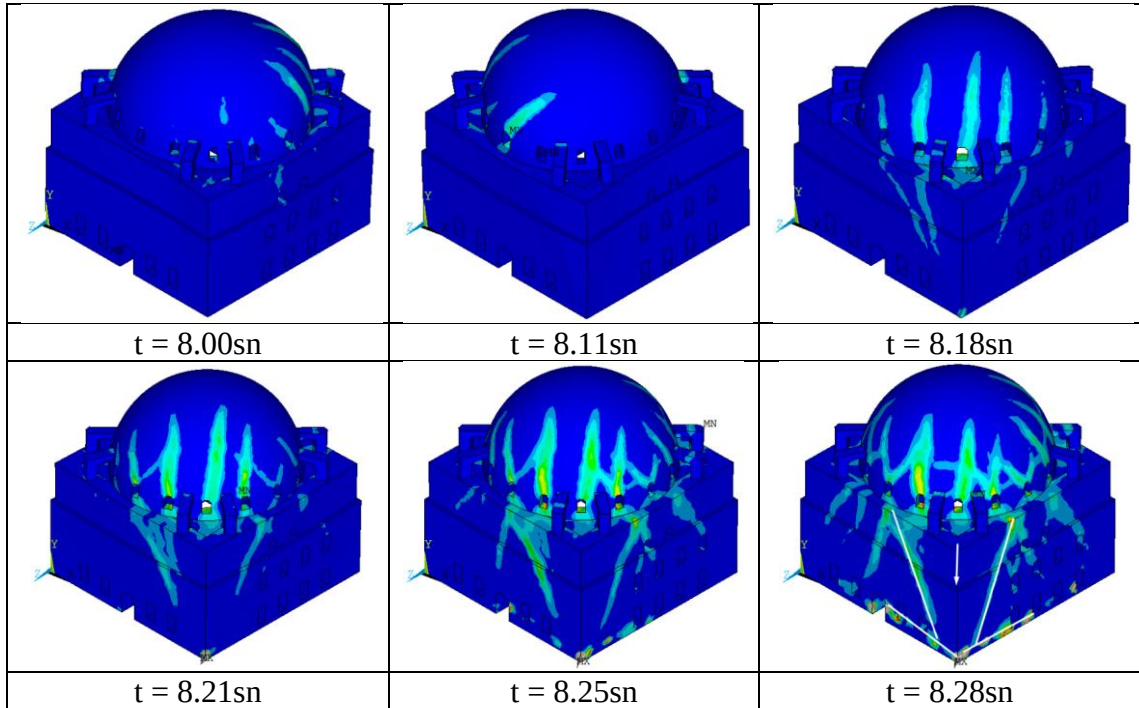
Şekil EK-1.39’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.39. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

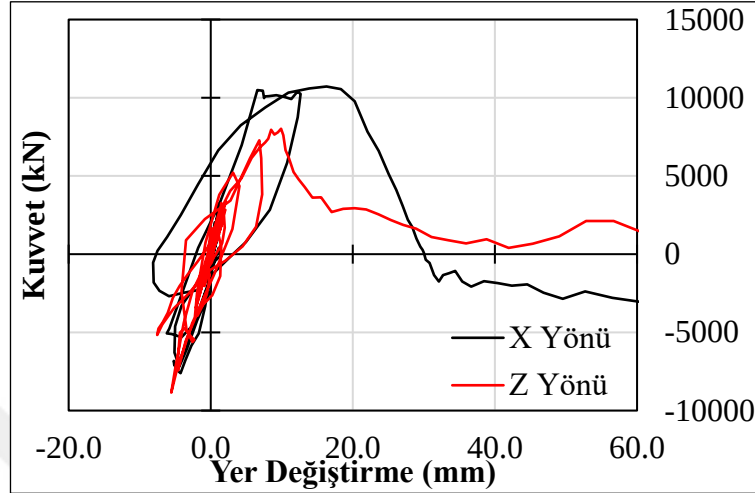
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.40'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 8.00'inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 8.00'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney duvarlarında üst pencere boşluklarında çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Ayrıca aynı saniyede yer hareketinin etkisi ile batı duvarında da üst pencereden aşağıdaki pencereler doğru ilerleyen çatlaklar gözlemlenmektedir. 8.11'inci saniyede yer hareketi etkisiyle yapıda kubbenin kuzey-doğu köşesinde çatlaklar görülmektedir. 8.18'inci saniyede yapının güney-batı köşesinde kubbe pencerelerinden duvarların birleştiği alt noktaya doğru diyagonal çataklar belirginleşmeye başlamıştır. Bu çatlaklar yaklaşık 4.5-6mm mertebelerindedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.40'da görüldüğü üzere batı ve güney duvarlarının kubbe-duvar birleşim yerlerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının kuzey-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 15-25mm bir açılma gözlemlenmektedir.



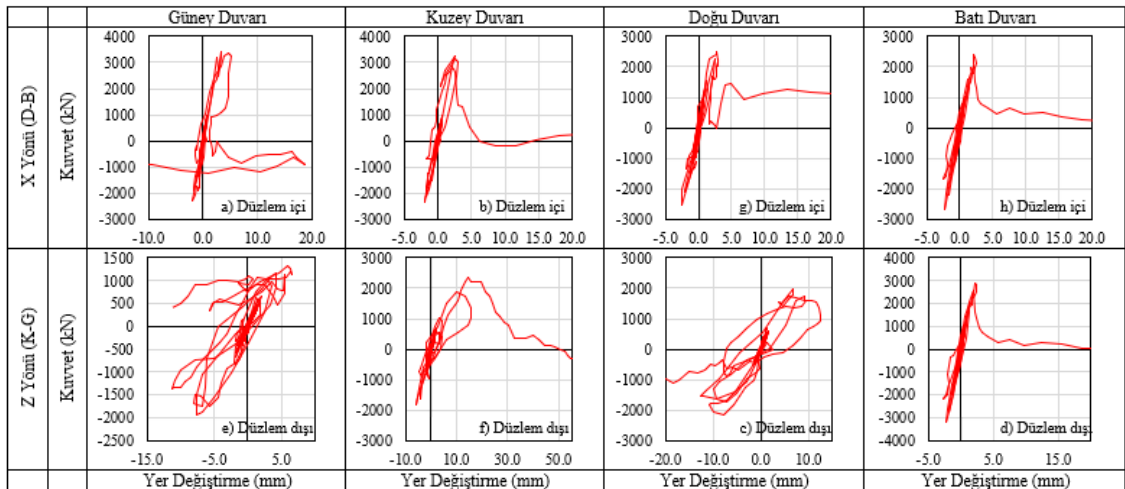
Şekil EK-1.40. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.41’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.41. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

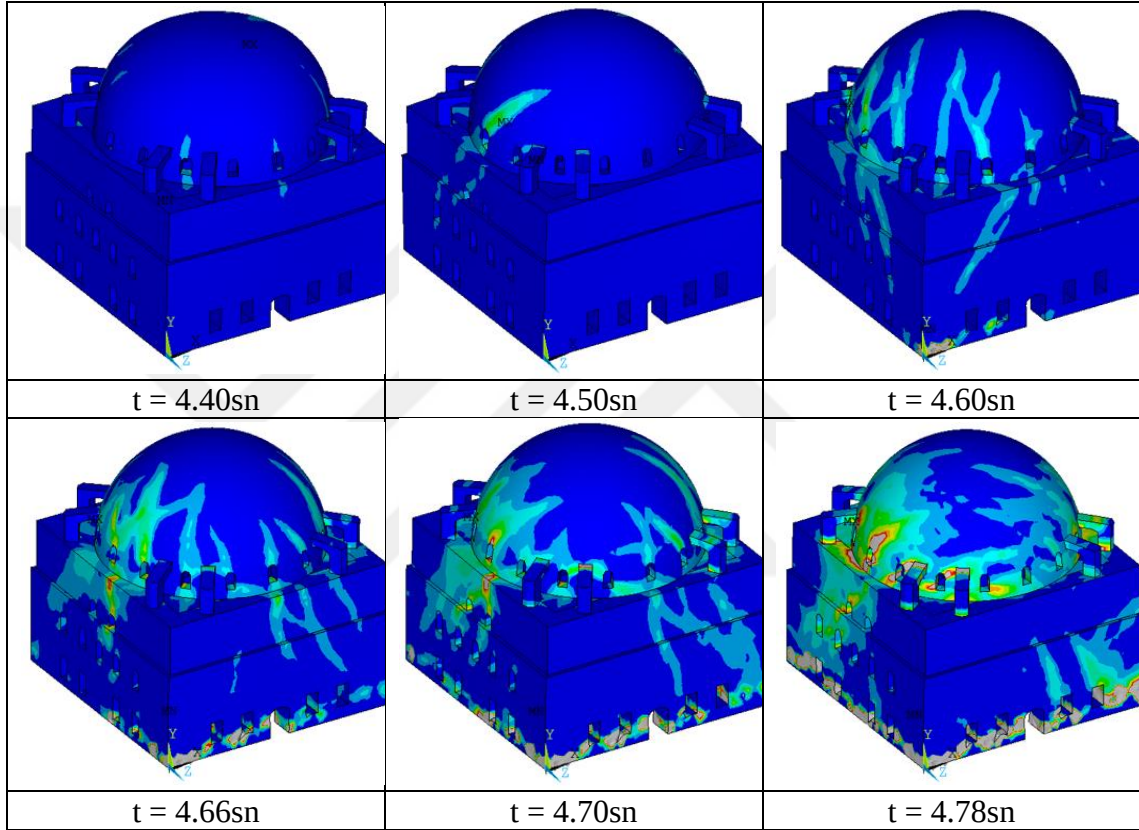
Şekil EK-1.42’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.42. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

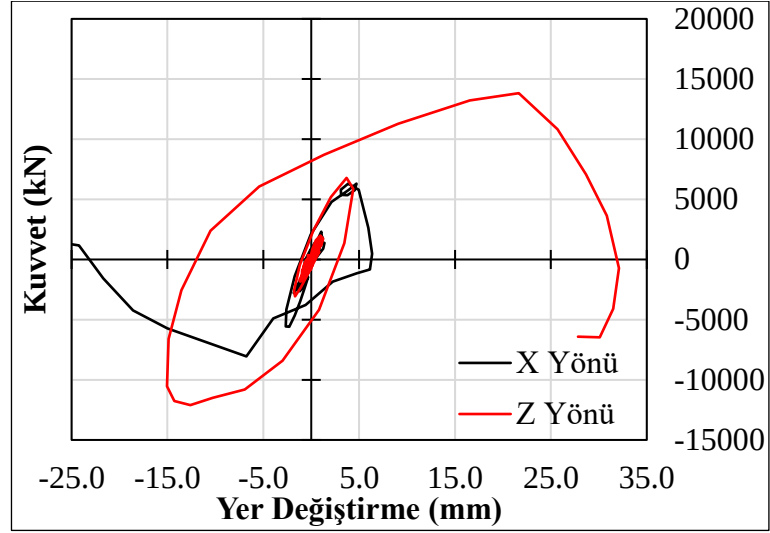
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.43’de verilmektedir. Caminin göçme mekanizması güney ve doğu duvarlarının kubbeden uzanan çatlak hatlarıyla ve kesme etkisiyle alt pencere seviyesinde göçmesiyle gerçekleşmiştir.



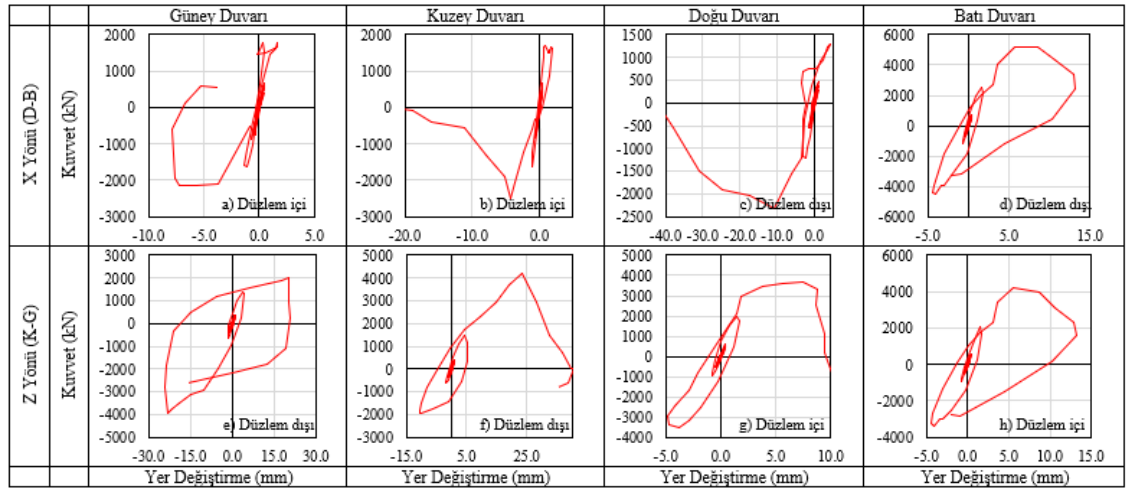
Şekil EK-1.43. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.44’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.44. Cenabi Ahmet Paşa ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

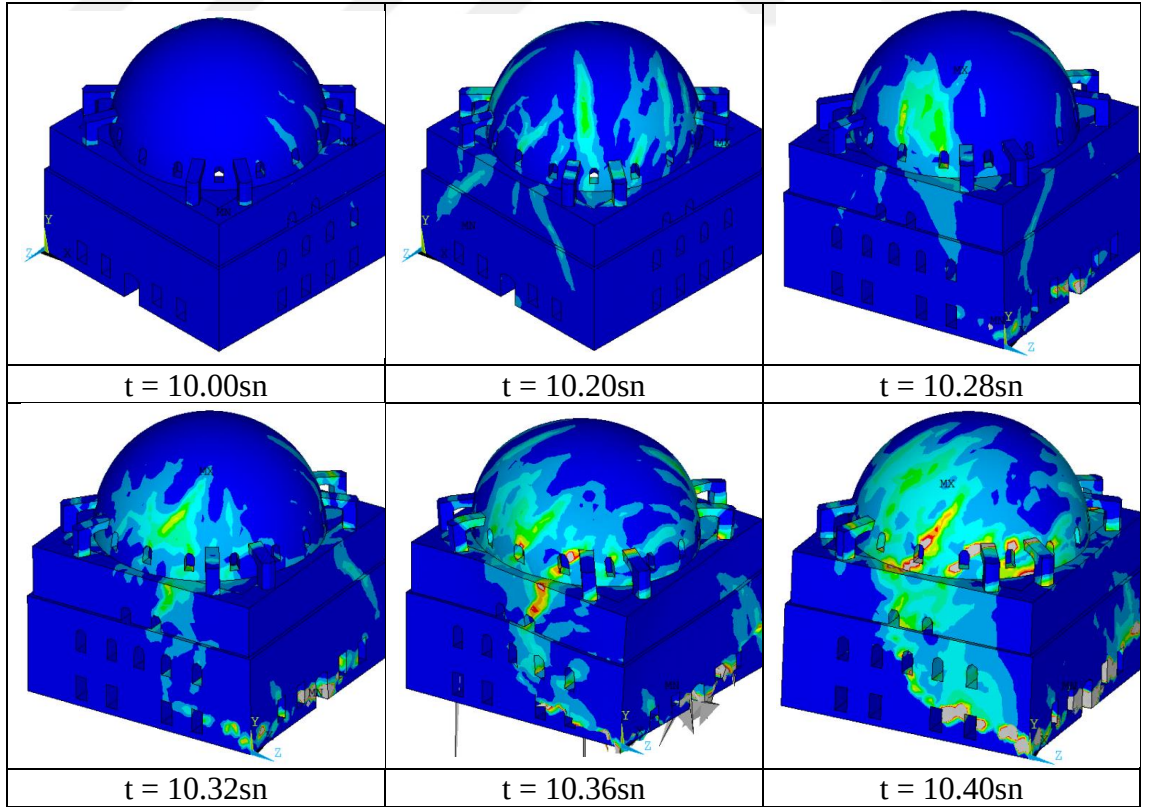
Şekil EK-1.45’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.45. Cenabi Ahmet Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

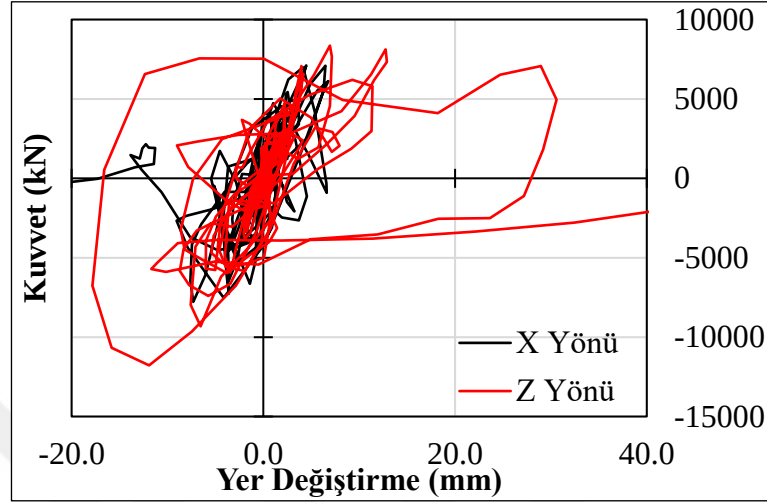
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.46'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 10.00'ıncı saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 10.20'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney duvarlarında kubbe ile duvarın birleştiği bölgeden yapının doğu ve batı duvarlarına ilerleyen diyagonal çatlak hatları görülmektedir. 10.28'inci saniyede yer hareketi etkisiyle çatlaklar yapının doğu duvarı ve kubbenin doğu yüzeyinde yoğunlaşmaktadır. 10.32'inci saniyede yapının doğu duvarında kubbeden başlayarak pencere boşluklarını kapsayan ve güney duvarının kesişim bölgesine doğru ilerleyen çatlaklar belirginleşmektedir. Ayrıca yapının güney duvarında pencere ve kapı boşlukları hizasında ciddi kesme çatlakları gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar yaklaşık 10mm mertebelerindedir. Bu çatlaklar ilerleyen zaman diliminde derinleşerek yapının göçmesine neden olmaktadır. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 20-25mm bir açılma gözlemlenmektedir.



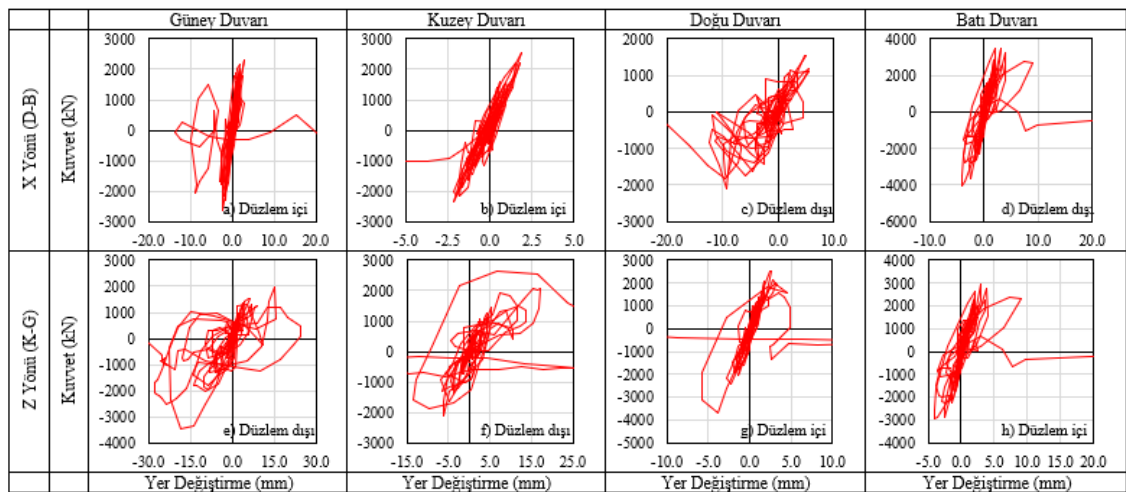
Şekil EK-1.46. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.47’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.47. Cenabi Ahmet Paşa ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

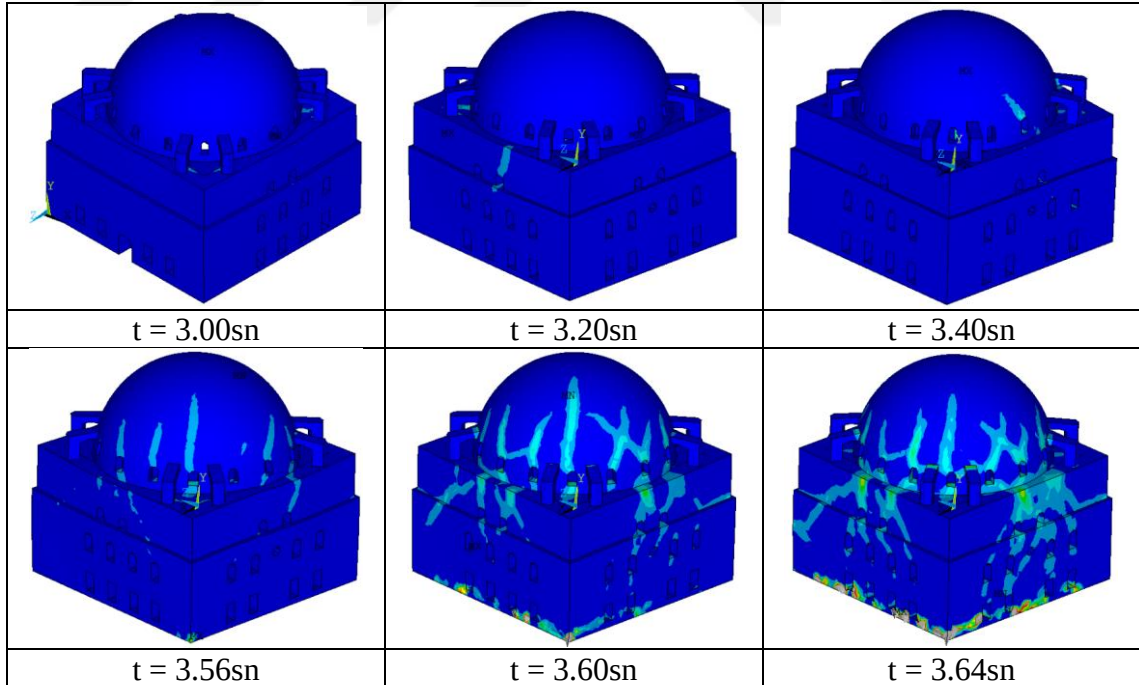
Şekil EK-1.48’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.48. Cenabi Ahmet Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

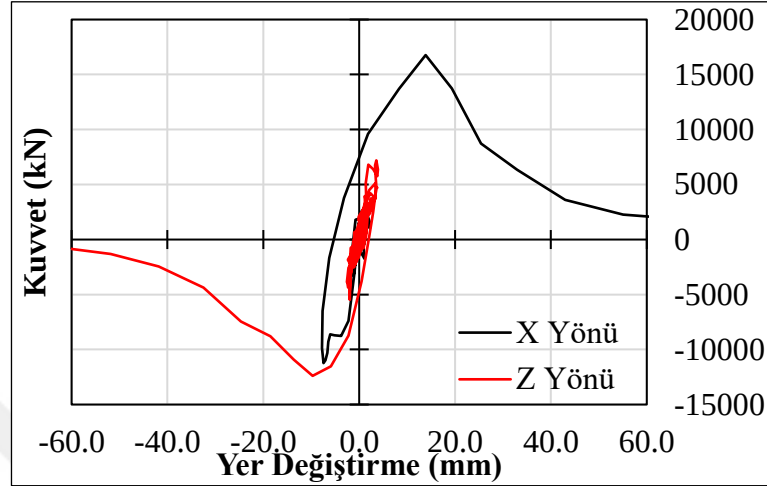
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.49'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00'üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.20'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının batı duvarlarında üst pencere boşluğu ile kubbe arasında çatlaklar görülmeye başlanmıştır. Bu çatlaklar 1.0-1.25mm mertebelerindedir. 3.40'ıncu saniyede yapının kubbesinin kuzey yüzünde çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar başlangıcı yapının göçme mekanizmasının başlangıcı olarak kabul edilebilir. Sonraki zaman adımlarında kubbenin kuzey ve batı yüzündeki çatlaklar yoğunlaşmaya devam etmektedir. Bu çatlaklar kuzey ve batı duvarlarına pencere boşluklarını ilerleyerek yayılmaktadır. Hem kuzey hem de batı duvarının zemine yakın yerlerinde bu çatlaklarla birleşen derin kesme yarıkları görülmektedir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının güney-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 50-80mm bir açılma gözlemlenmektedir.



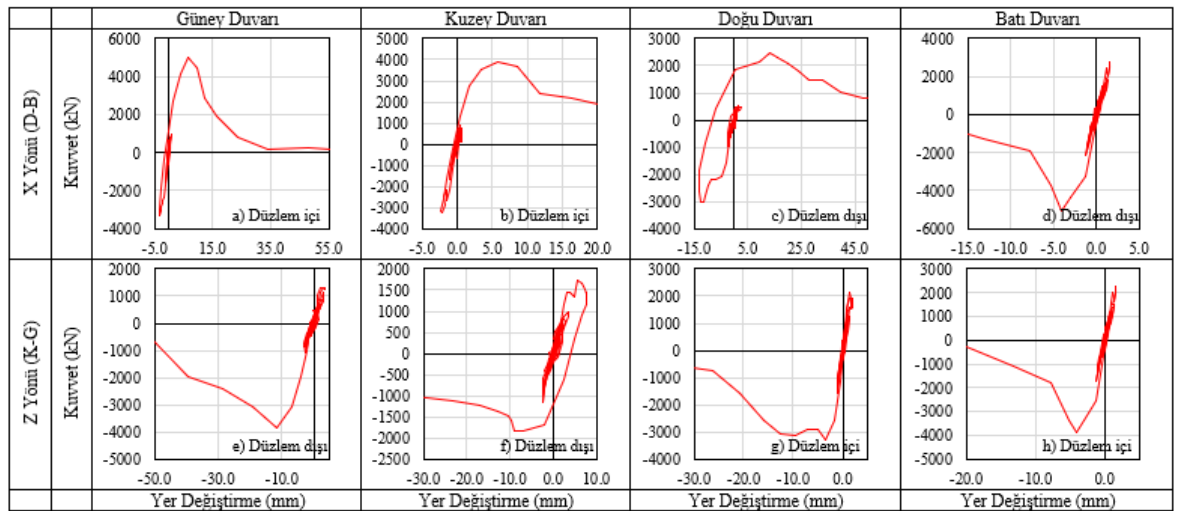
Şekil EK-1.49. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.50’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.50. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.51’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.51. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.4. İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami Analizleri ($E=750f_c$)

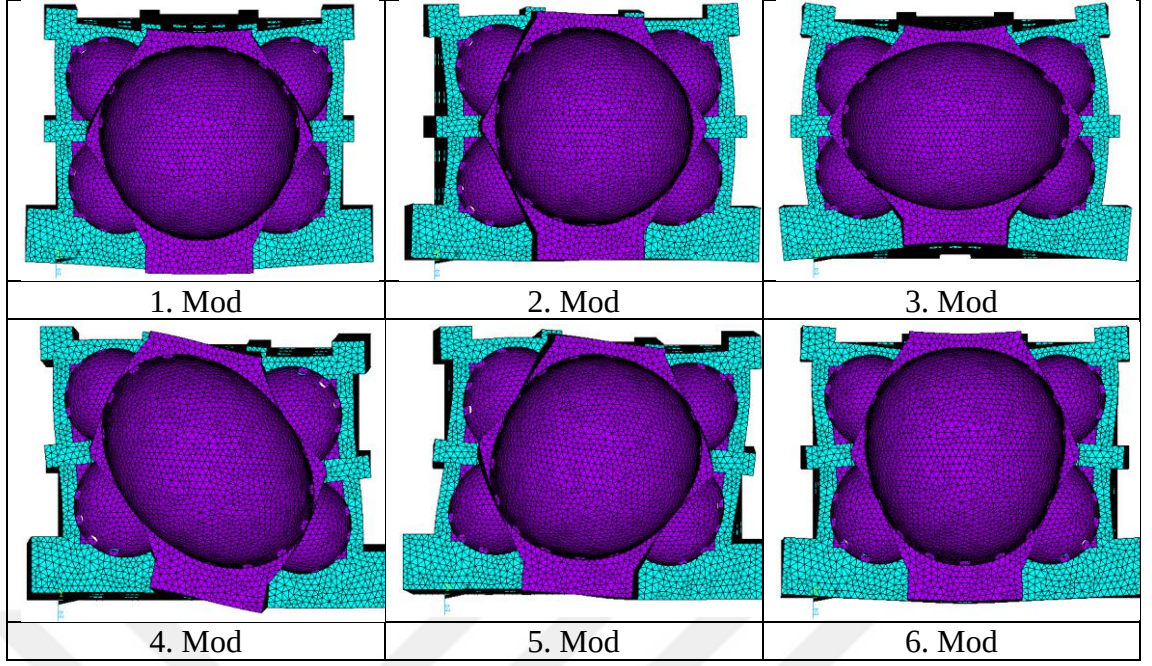
1.4.1. Modal analiz

İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.4'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.4. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=750f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	2.67	0.85E-07	0.23E-03	0.54	0.26
2	3.42	0.60	0.13E-08	0.15E-06	0.47
3	3.63	0.27E-06	0.27E-02	0.20E-02	0.47
4	4.80	0.36E-03	0.98E-08	0.52E-08	0.49
5	5.17	0.80E-02	0.57E-09	0.28E-06	0.67
6	5.82	0.44E-08	0.33E-02	0.67E-02	0.69

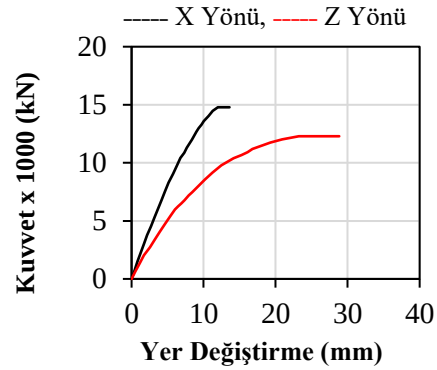
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod kuzey-güney (Z doğrultusu), 2. mod doğu-batı (X doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.52'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 5088 tondur.



Şekil EK-1.52. Kadırga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=750f_c$)

1.4.2. İtme analizi

Şekil EK-1.53'de Kadırga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 9000 kN, 5,4 mm; Z doğrultusunda ise 7000 kN, 7,2 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 14784 kN, Z doğrultusunda 12287 kN olarak belirlenmiştir.



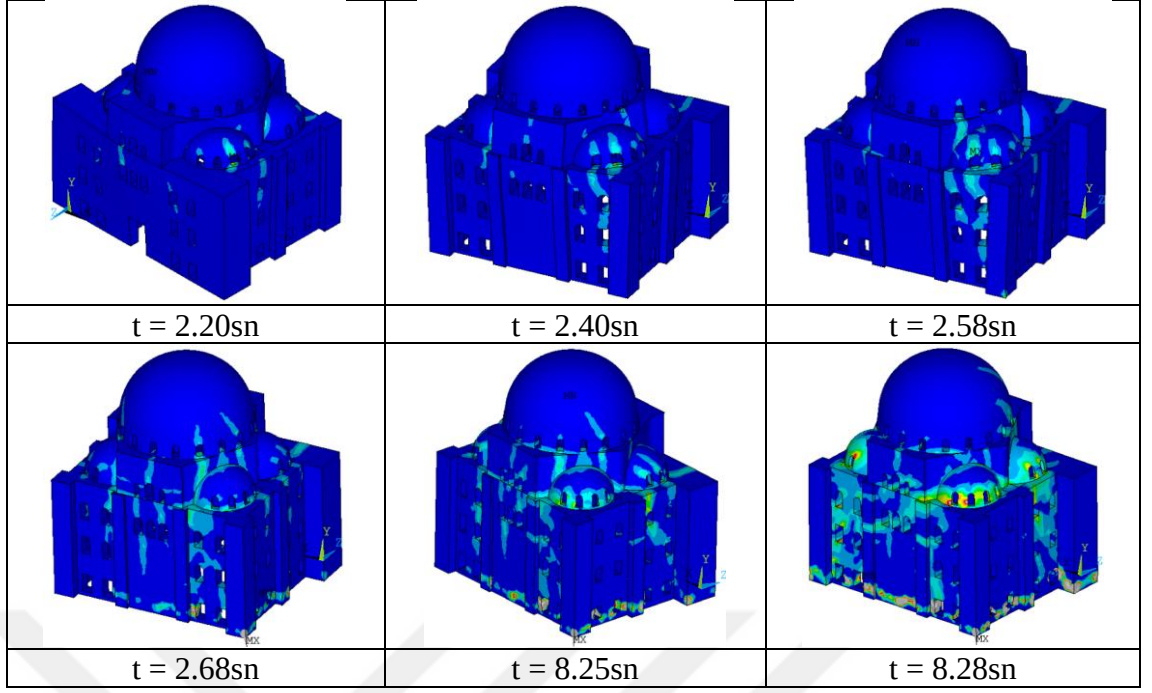
Şekil EK-1.53. Kadırga Sokullu Mehmet Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=750f_c$)

1.4.3. Dinamik analizler

Ankara Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

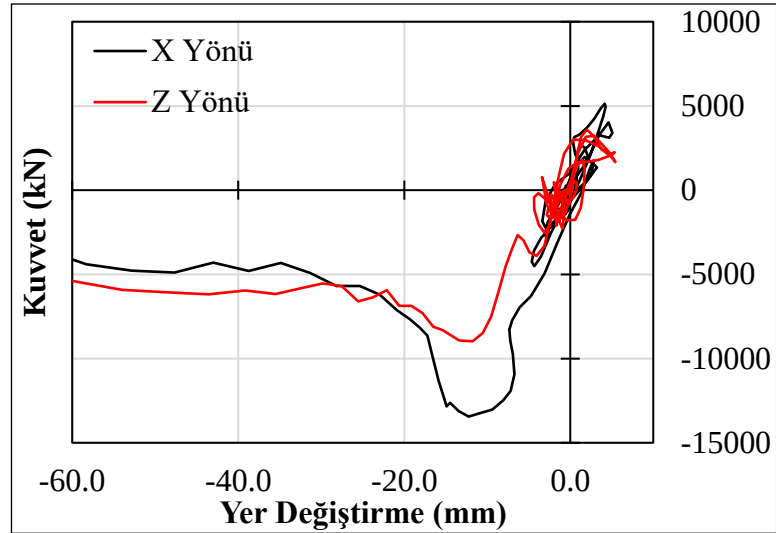
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.54'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00'inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 2.20'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney batı köşesinde bulunan yarım kubbenin pencere boşlukları etrafında çatlaklar görülmektedir. Bu çatlaklar yaklaşık olarak 3.5-4.0mm mertebelerindedir. 2.40'inci saniyede yer hareketi etkisiyle yapının kuzey doğu köşesinde çatlak yoğunluğu görülmektedir. Kuzey-doğu köşesinde bulunan yarım kubbeden başlayan çatlaklar, yarım kubbedeki ve kuzey duvarındaki pencere boşluklarından ilerleyerek yapının bu kısmında boydan boya bir çatlak hattı oluşturmaktadır. Bu çatlaklar yapının yıkılma mekanizmasının başlangıcı olarak kabul edilebilir. Yer hareketinin ilerleyen zaman dilimlerinde yapının kuzey-batı ve kuzey-doğu köşelerinde bulunan yarım kubbelere başlayan çatlakların kuzey duvarında tamamen görüldüğü ayrıca yapının güney doğu köşesinde de aynı mekanizmanın oluştuğu söylenebilir. Kuzey ve doğu duvarlarının zemine yakın bölgelerinden kesme çatlaklarına maruz kalması ile yapının göçtüğü söylenebilir.



Şekil EK-1.54. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

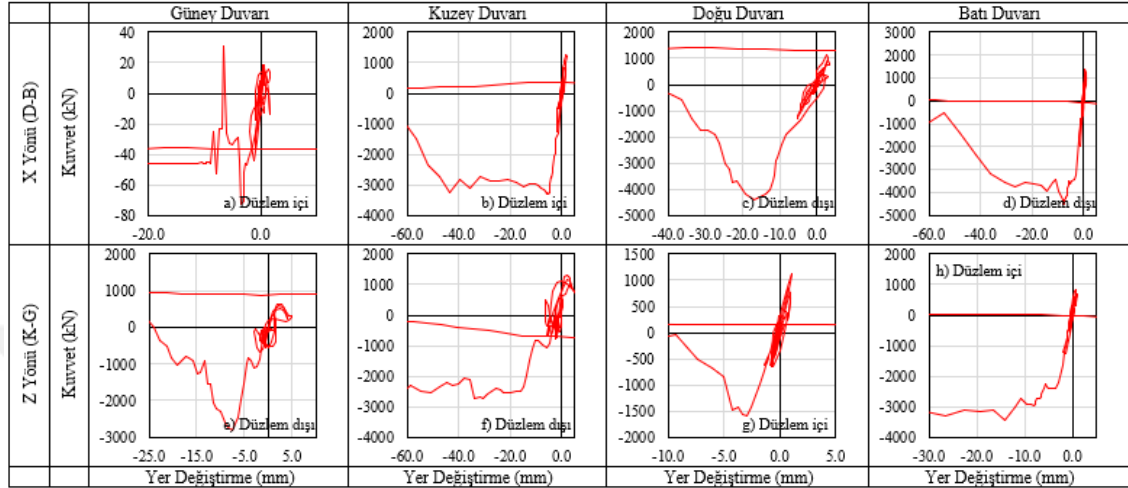
Şekil EK-1.55’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.55. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.56’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim

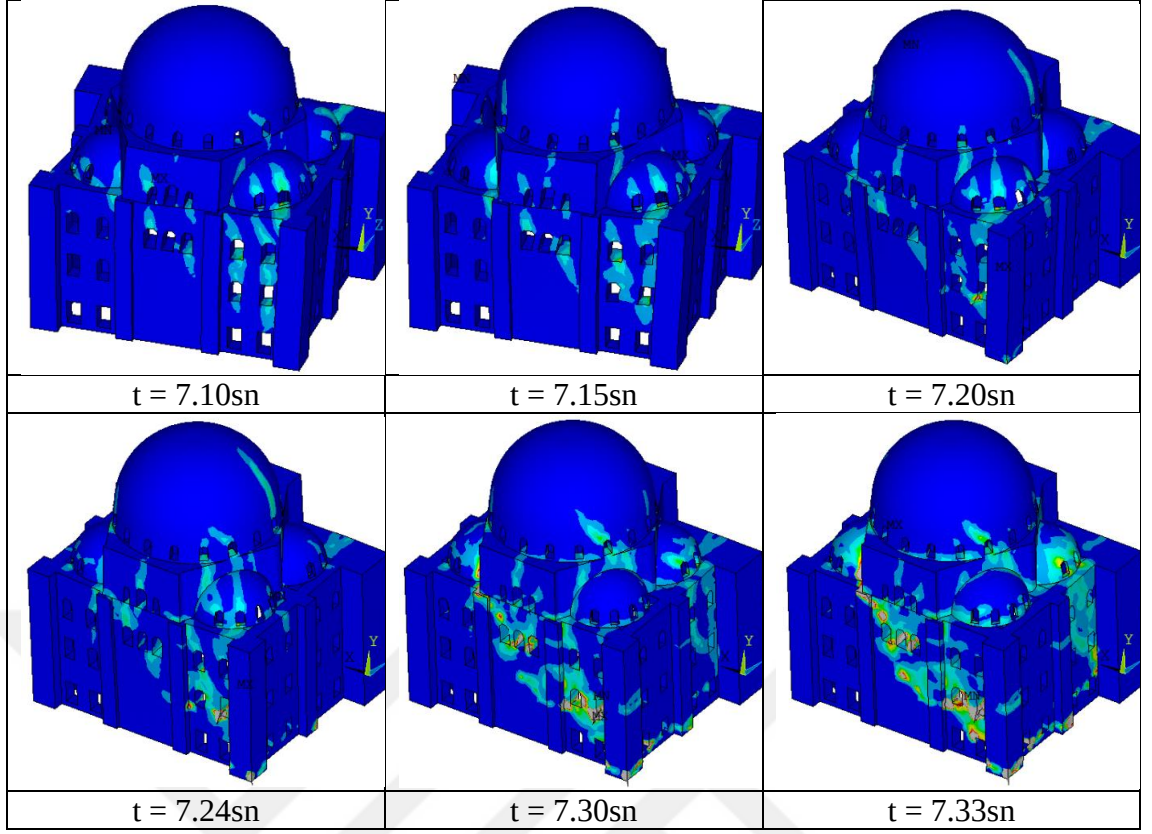
bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.56. Kadırga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

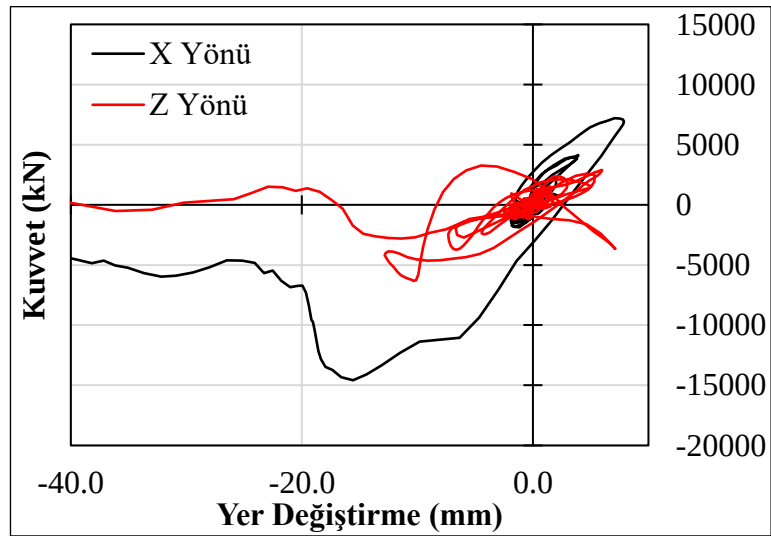
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.57’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 7.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 7.10’uncü saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının kuzey duvarının sol üst pencerelerinin etrafında çatlaklar görülmektedir. 7.20’inci saniyede yer kuzey duvarındaki çatlaklar derinleşerek 20mm mertebelerine çıkmıştır. Ayrıca yapının kuzey ve doğu duvarının birleştiği yerlerde de ezilme çatlakları kendini göstermeye başlamıştır. Yer hareketinin ilerleyen kısımlarında kuzey duvarındaki çatlak hattı kuzey-batı köşesinde bulunan yarım kubbeden başlayarak kuzey-doğu köşesinde duvarların birleştiği bölgeye kadar diyagonal olarak görülmektedir. Bu çatlak hattıyla beraber doğu duvarının güney duvarını bağlayan köşesinde çatlaklar meydana gelmektedir. Böylelikle yapı doğu duvarını tamamen kuzey duvarının da yarısını kapsayan bir yıkılma mekanizması içine girmiştir.



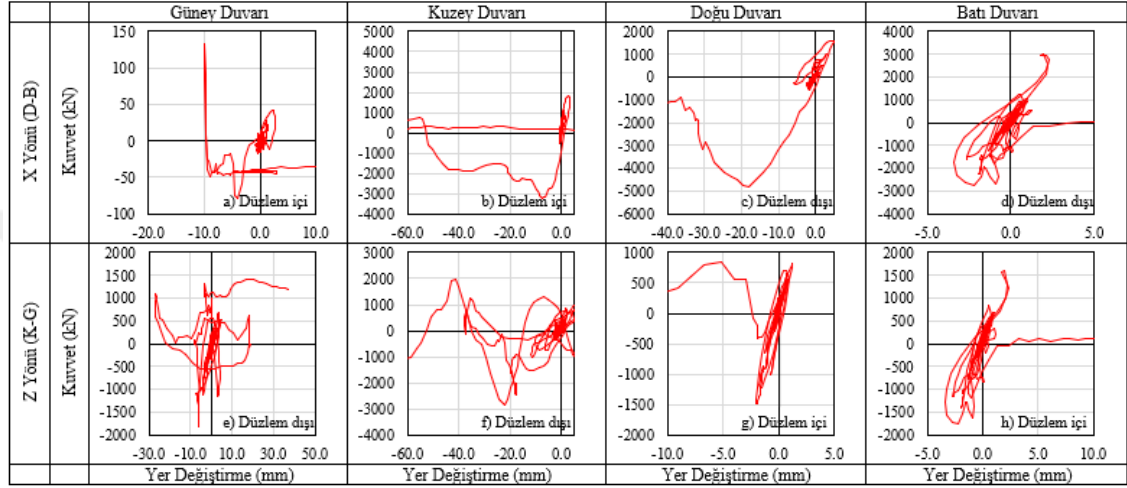
Şekil EK-1.57. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.58’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.58. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

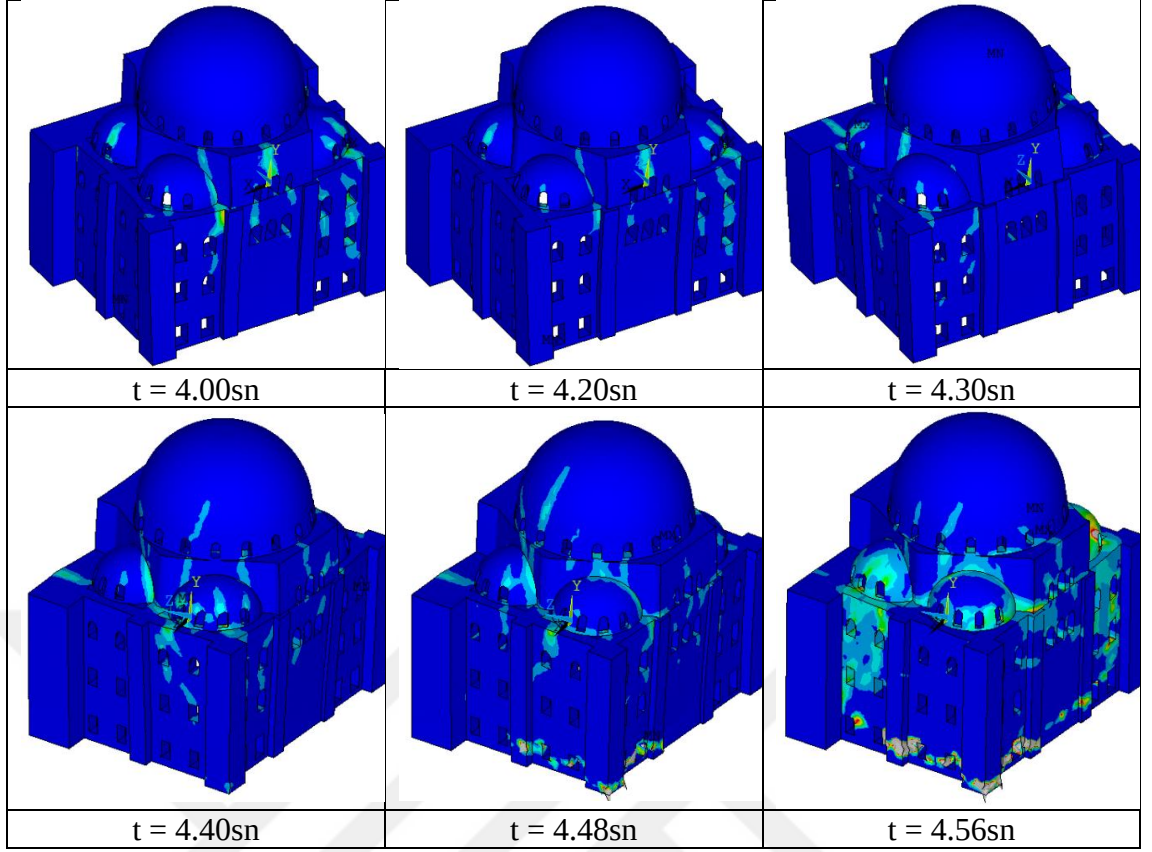
Şekil EK-1.59’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.59. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

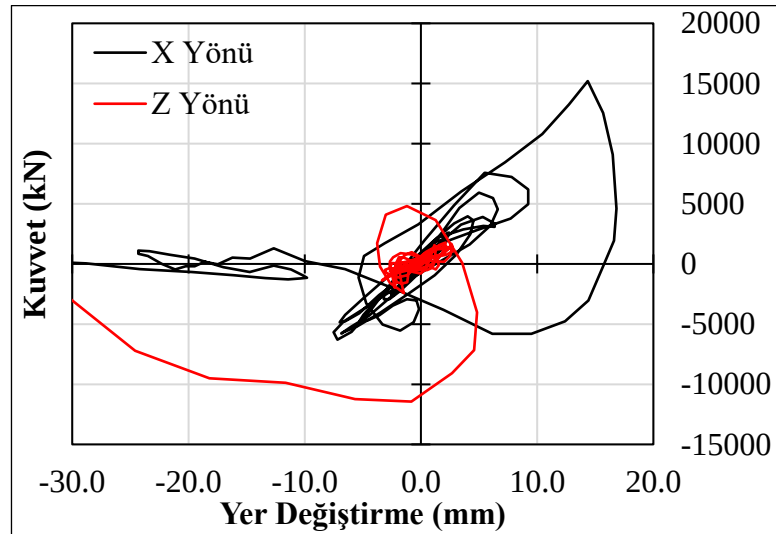
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.60’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının kuzey batı köşesinde her iki duvarda bulunan pencerelerin çevresinde çatlaklar görülmektedir. 4.30’uncü saniyede yer hareketi etkisiyle çatlaklar yapının kuzey batı köşesinde yoğunluğunu göstermektedir. Bu çatlaklar yapının yıkılma mekanizmasına girişin başlangıcı olarak kabul edilebilir. Sonraki zaman adımlarında kuzey batı köşesinde bulunan yarım kubbenin pencerelerinden başlayarak batı duvarının güney duvarı ile birleştiği bölge ile yapının kuzey-doğu köşesini sınırlayan bölge yıkılmaya başlamıştır. Belirtilen sınırlarda hem kuzey hem de batı duvarının zemine yakın yerlerinde kesme çatlakları kendini göstermektedir.



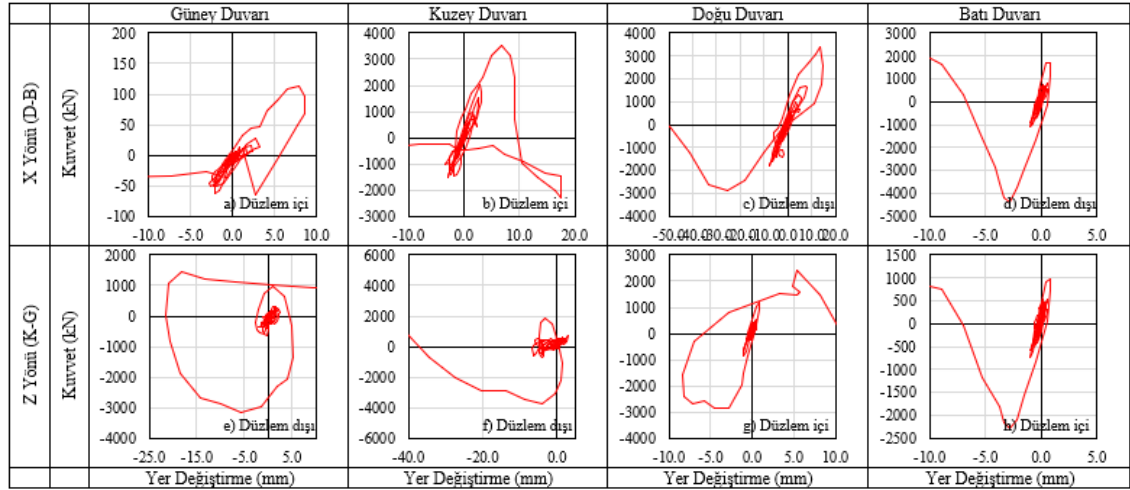
Şekil EK-1.60. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.61’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.61. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

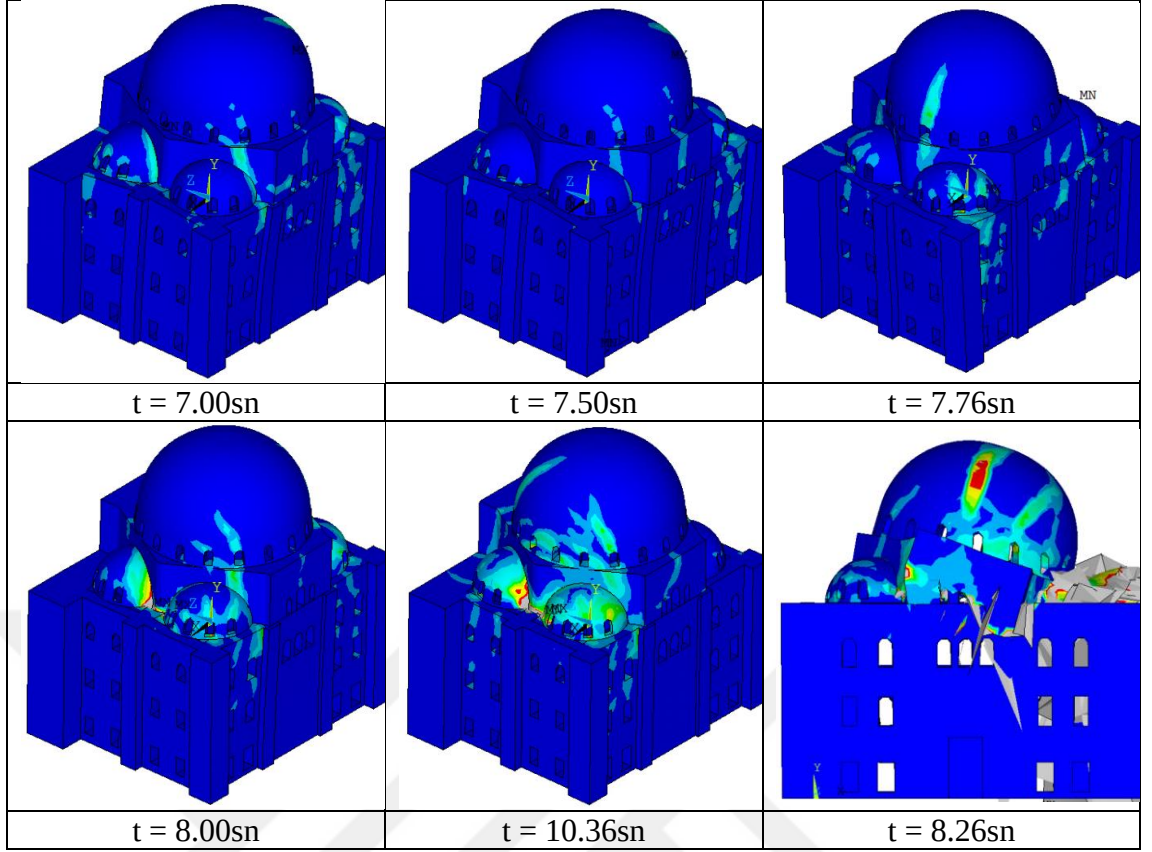
Şekil EK-1.62’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.62. Kadırga Sokullu Mehmet Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

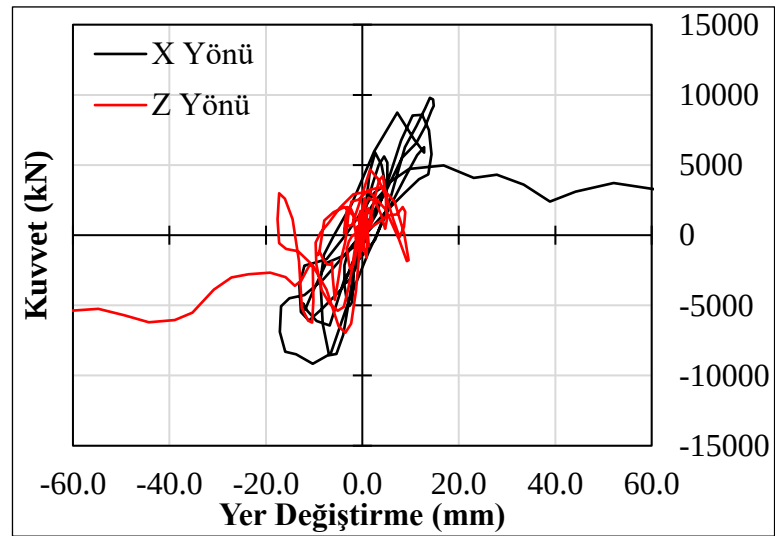
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.63’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 7.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Bu zaman adımı yapıda yapının güney-batı köşesinde bulunan yarım kubbenin yapının ana kubbesini taşıyan kasnakla arasında çatlaklar meydana geldiği görülmektedir. Bu çatlaklar yaklaşık 2.5-3.0mm mertebelerindedir. 7.50’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının kuzey duvarında kubbeden başlayarak duvarın üst pencerelerinde çatlaklar gözlemlenmektedir. 8.00’inci saniyede yapının kuzey-batı ve güney-batı köşelerinde bulunan yarım kubbelerin ve kasnağın bu kısımlarında önemli çatlaklar meydana geldiği görülmektedir. Bu saniyeden sonra yapıda bulunan kasnağın batı duvarına doğru göçtüğü görülmektedir.



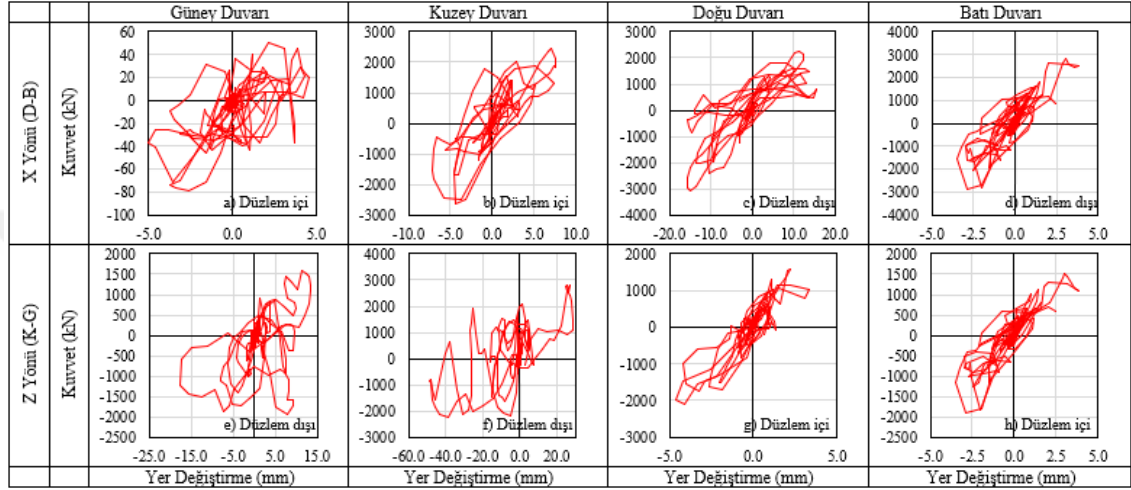
Şekil EK-1.63. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.64’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.64. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.65’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

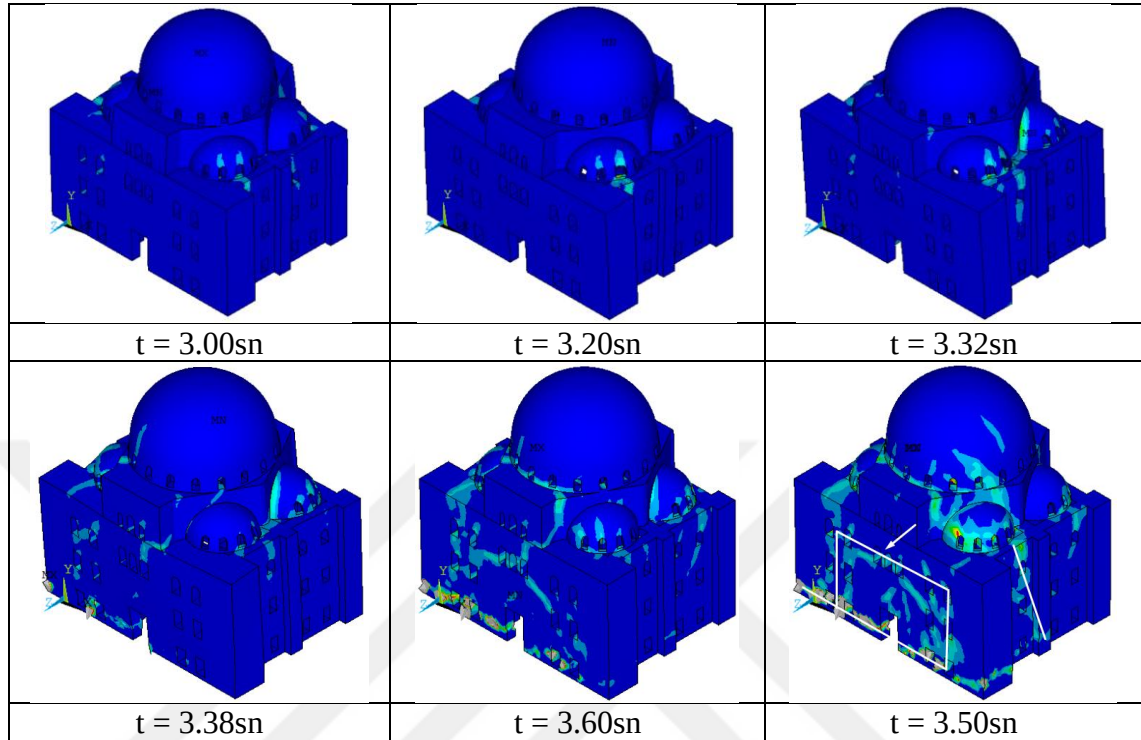


Şekil EK-1.65. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

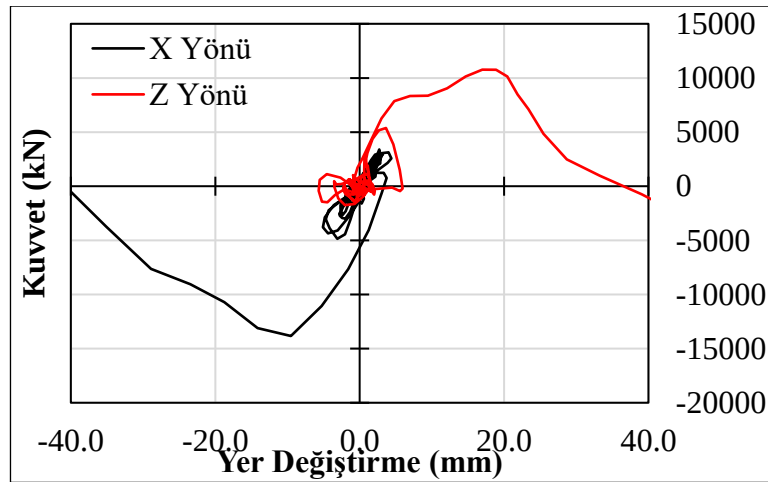
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.66’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney-batı köşesindeki yarım kubbenin pencere çevrelerinde çatlaklar görülmeye başlanmıştır. Bu çatlaklar 1.0-1.25mm mertebelerindedir. 3.32’inci saniyede yapının ana kubbeyi taşıyan kasnağın batı yüzünün ortasından kenarlardaki yarım kubbelere doğru çatlaklar görülmektedir. 3.60’uncü saniyede yapının güney duvarında zemine yakın bölgelerde derin çatlaklar ve ezilmeler görülmektedir. Buna ek olarak kubbeden başlayarak duvarın pencere boşluklarını takip eden boydan boya derin çatlak hatları görülmektedir. Bu çatlaklara yapının doğu ve batı duvarlarında simetrik olarak oluşan ve güney duvarına yakın pencere boşluklarından

çatlak hatları belirgin şekilde görülmektedir. Bu çatlaklar ve kasağın kubbeden ayrılması ile güney duvarının devrilme hareketi yaptığı görülmektedir.



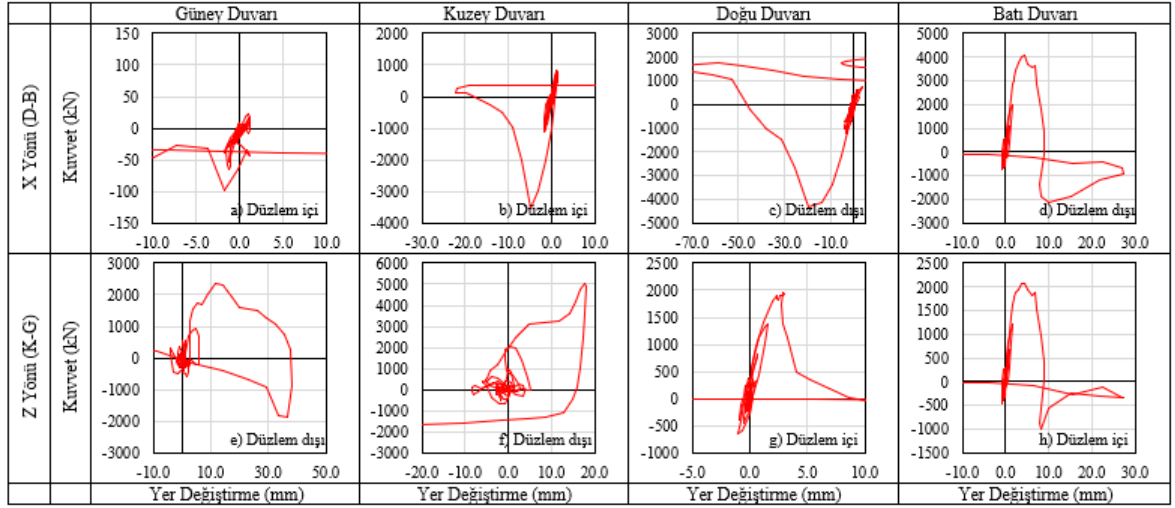
Şekil EK-1.66. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.67’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.67. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.68’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.68. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.5. Diyarbakır Behram Paşa Cami Analizleri ($E=750f_c$)

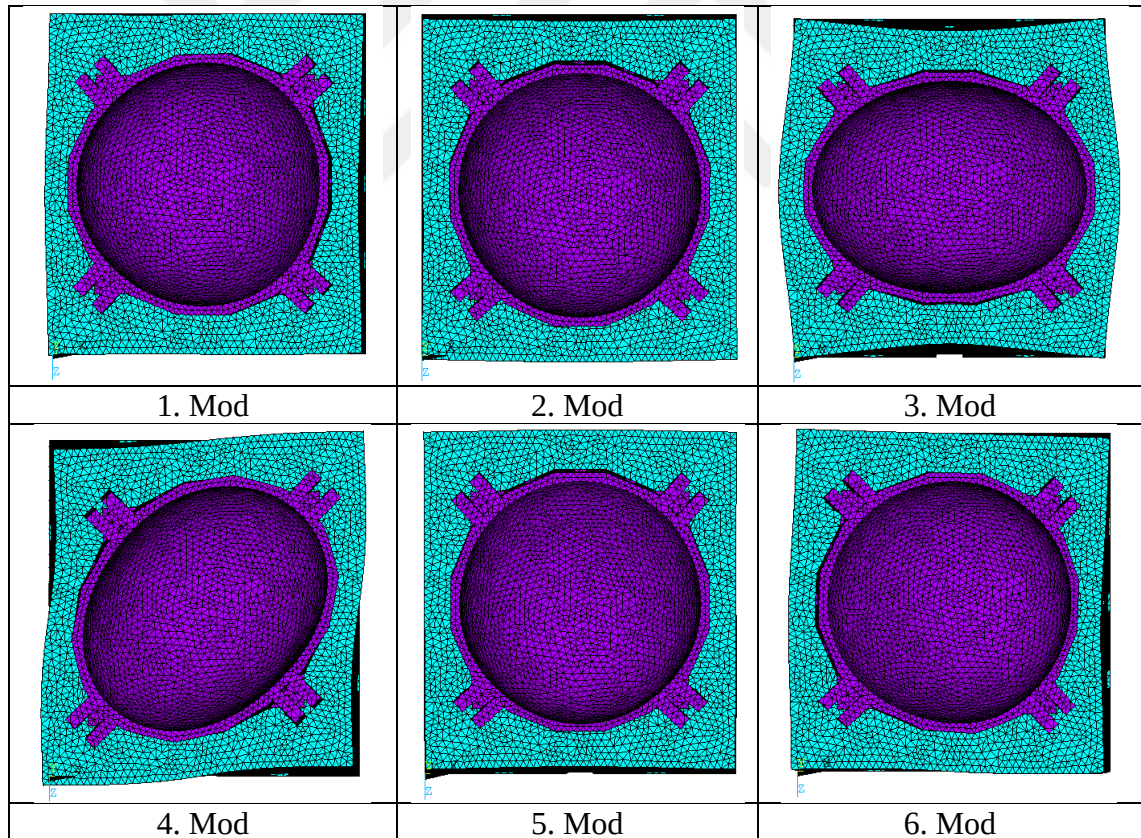
1.5.1. Modal analiz

Diyarbakır Behram Paşa Cami’nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.5’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.5. Behram Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=750f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	5.39	0.54	0.21E-06	0.23E-02	0.19
2	5.39	0.21E-02	0.62E-04	0.60	0.45
3	6.60	0.98E-08	0.24E-03	0.51E-03	0.45
4	7.32	0.17E-03	0.88E-10	0.16E-06	0.46
5	8.19	0.66E-06	0.25E-03	0.19	0.53
6	8.34	0.14	0.62E-09	0.52E-06	0.53

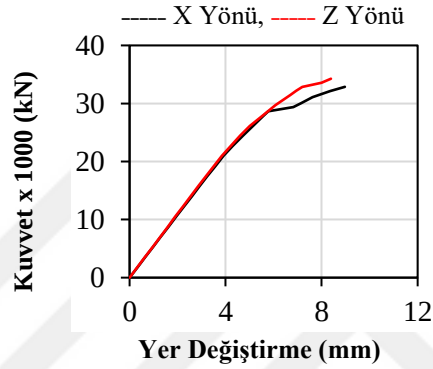
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.69'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 7764 tondur.



Şekil EK-1.69. Behram Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=750f_c$)

1.5.2. İtme analizi

Şekil EK-1.70’de Behram Paşa Cami’nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 23000 kN, 4,14 mm; Z doğrultusunda ise 23000 kN, 4,14 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 32861 kN, Z doğrultusunda 34260 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.70. Behram Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=750f_c$)

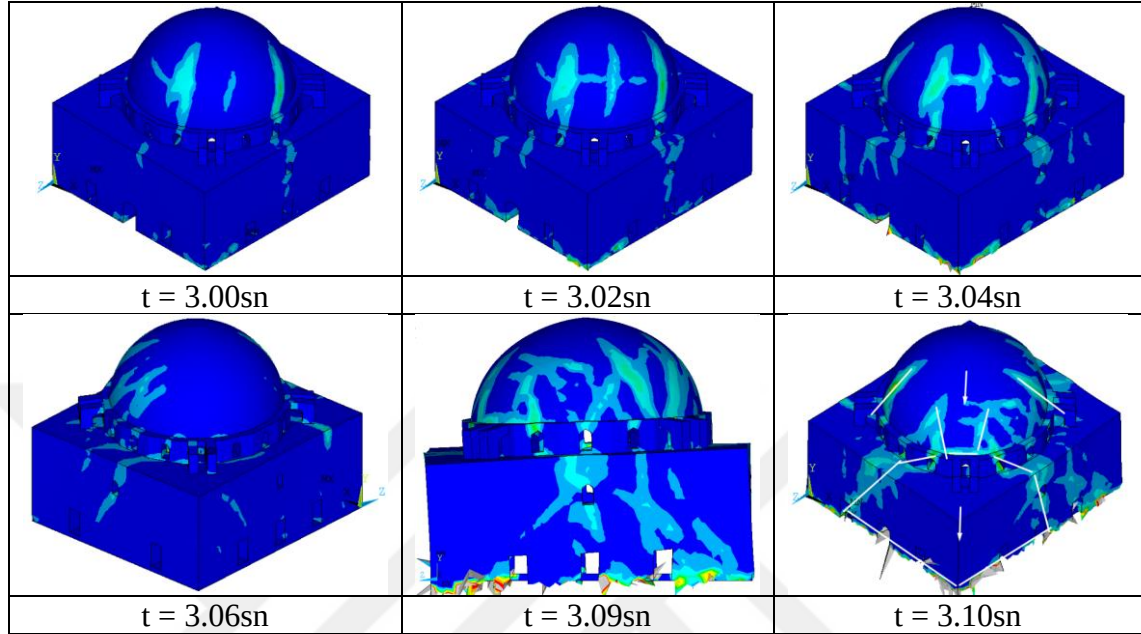
1.5.3. Dinamik analizler

Diyarbakır Behram Paşa Cami’sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

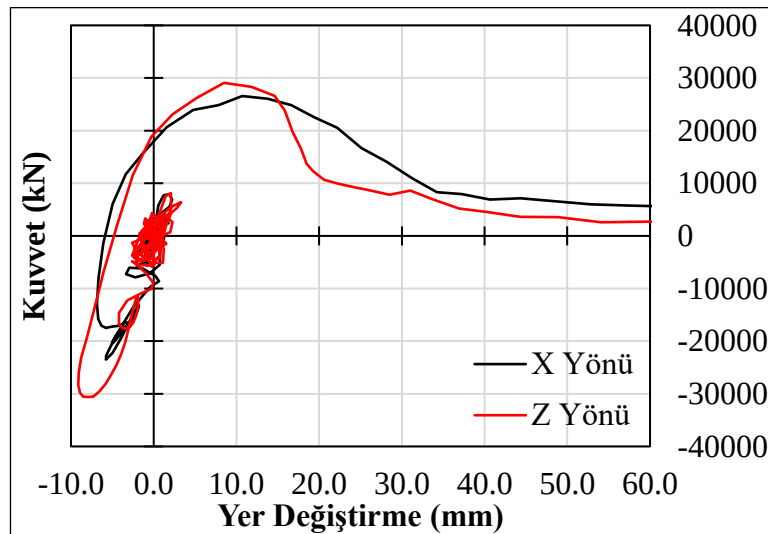
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.71’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Ancak bu saniyende kubbeye, batı duvarında ve kuzey-batı köşesinde oluşan çatlaklar yapının yıkılma mekanizmasına girmesinde önemli rol oynamaktadır. 3.06’inci saniyeye kadar bu bölgelerdeki çatlaklar yoğunluğunu artırarak yaklaşık 5-10mm mertebelerinde görülmektedir. 3.06’inci

saniyede yer hareketi etkisiyle yapının güney duvarında çatlaklar görülmektedir. Ancak bu saniyeden hemen sonra yapının kuzey ve batı duvarlarında önceki çevrimlerde oluşan çatlaklar genişleyerek yapının göçmesine sebep olmuştur.



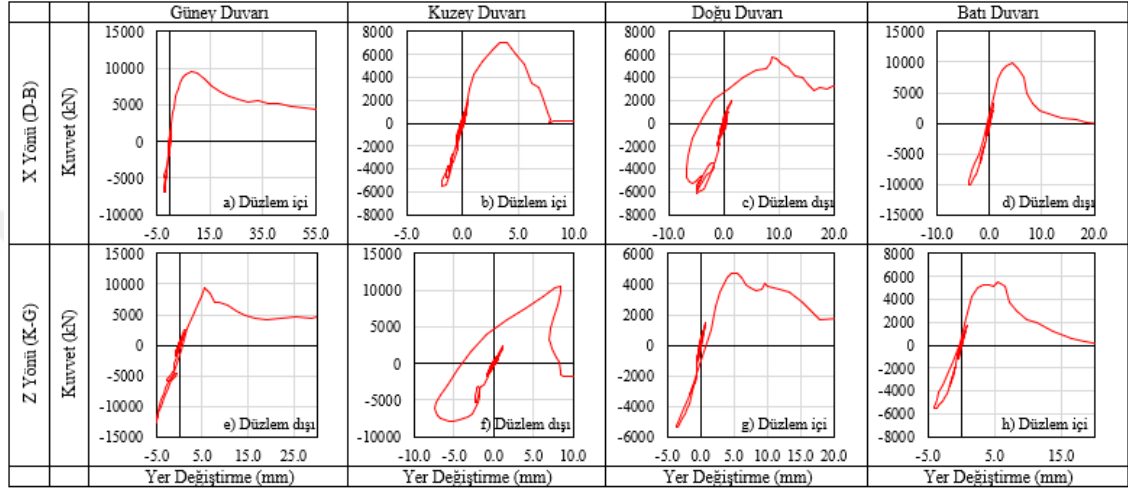
Şekil EK-1.71. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.72’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.72. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

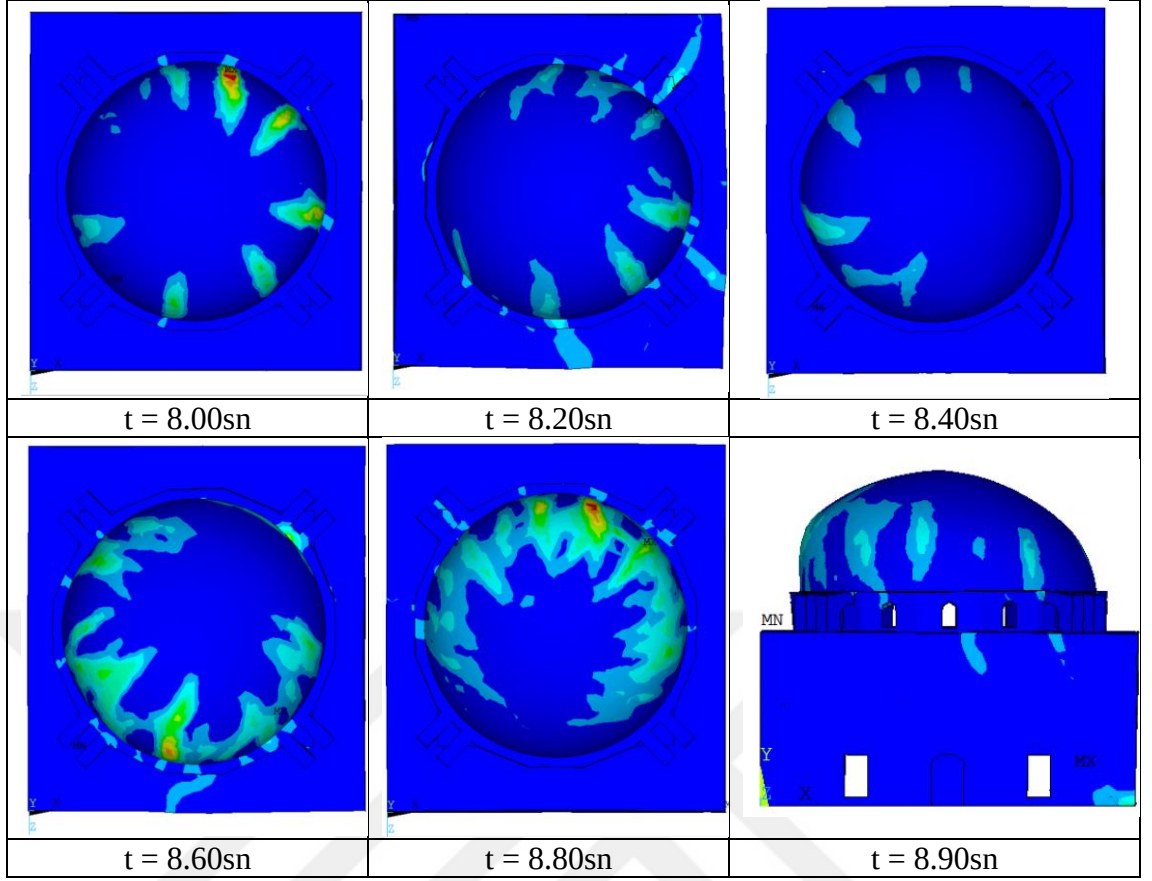
Şekil EK-1.73’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.73. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

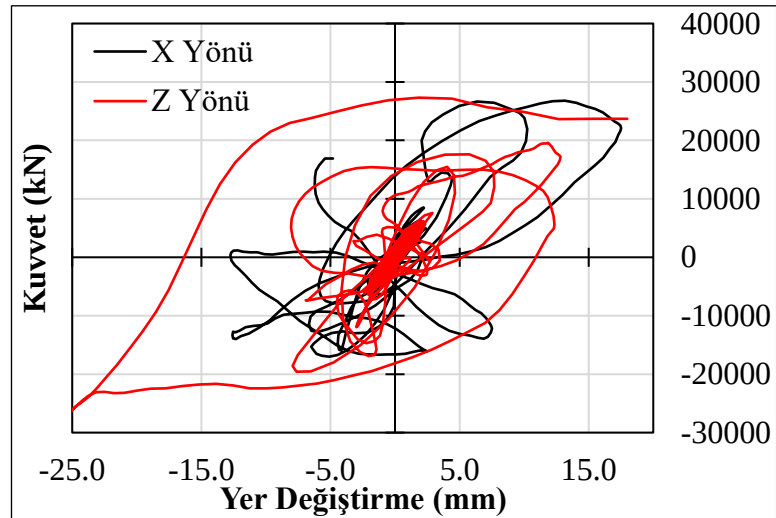
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.74’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 8.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Analiz neticesinde yapının yıkılma şekli tam görülememektedir. Ancak hem caminin diğer yer hareketleri altındaki davranışı hem de yer hareketinin bu tip bir camiye etkisinin diğer analizler neticesinde tecrübe edilmesi sebebiyle yıkılma mekanizması açıklanmaya çalışılmıştır. 8.90’uncü saniyeye kadar kubbede oluşan çatlakların yerleri ve mertebeleri yer hareketinin farklı çevrimlerde kubbede meydana getirdiği hasarı göstermektedir. Yapının kubbesi tamamen göçtüğü söylenebilir. Duvarların rijit olması bu yer hareketinde tam göçmenin görülmemesine açıklama olarak söylenebilir.



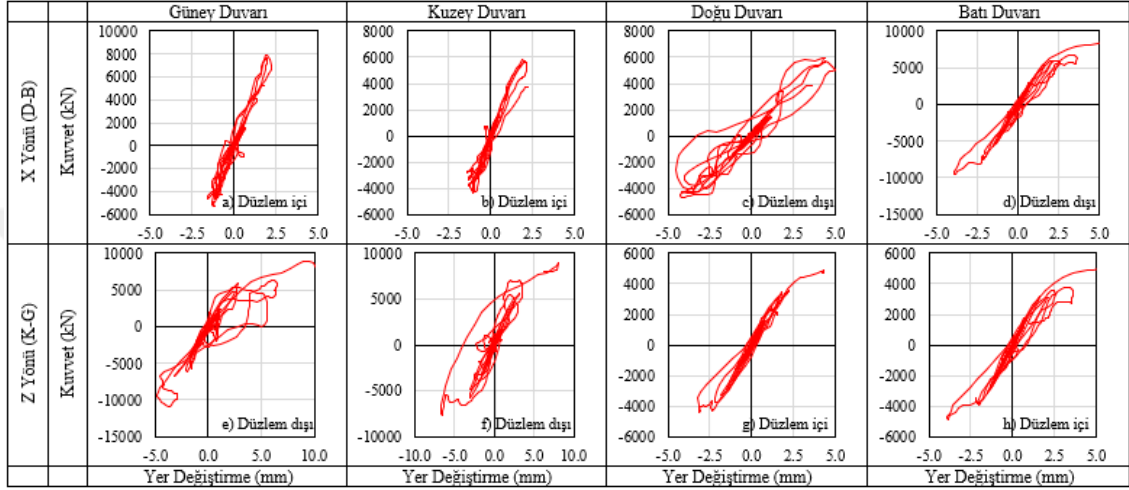
Şekil EK-1.74. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.75’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.75. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

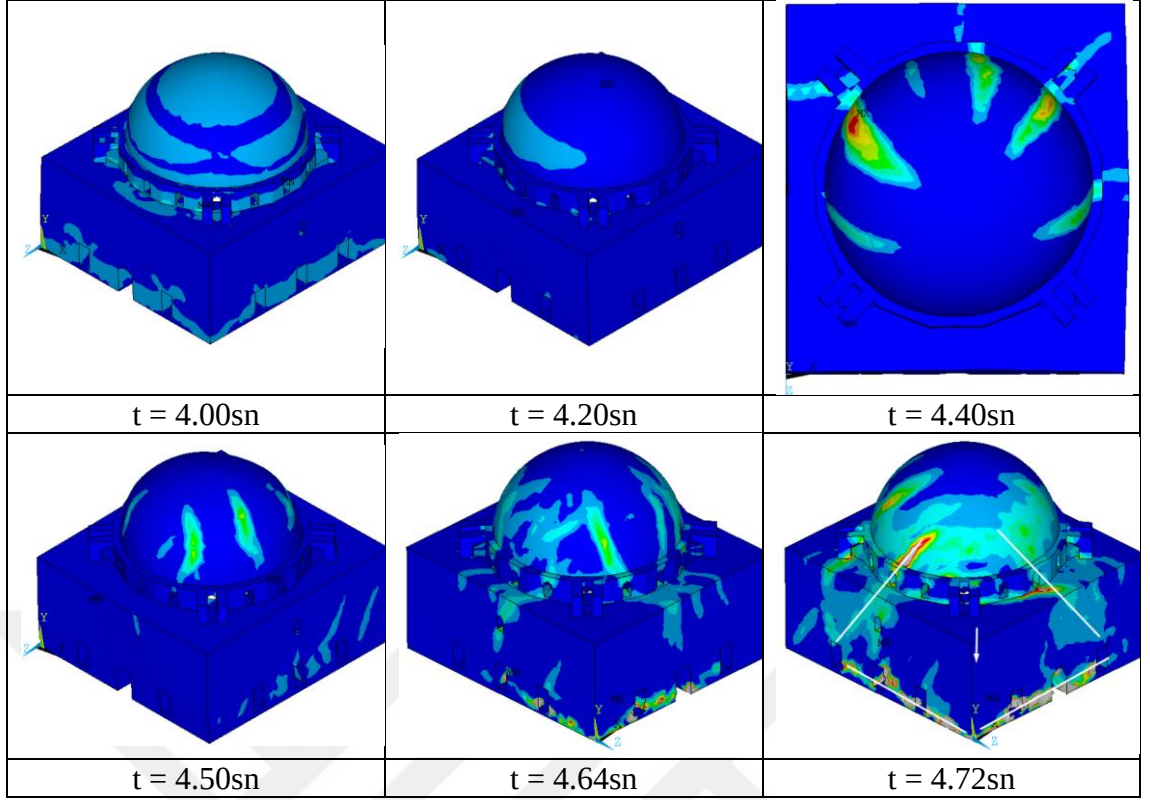
Şekil EK-1.76’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.76. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

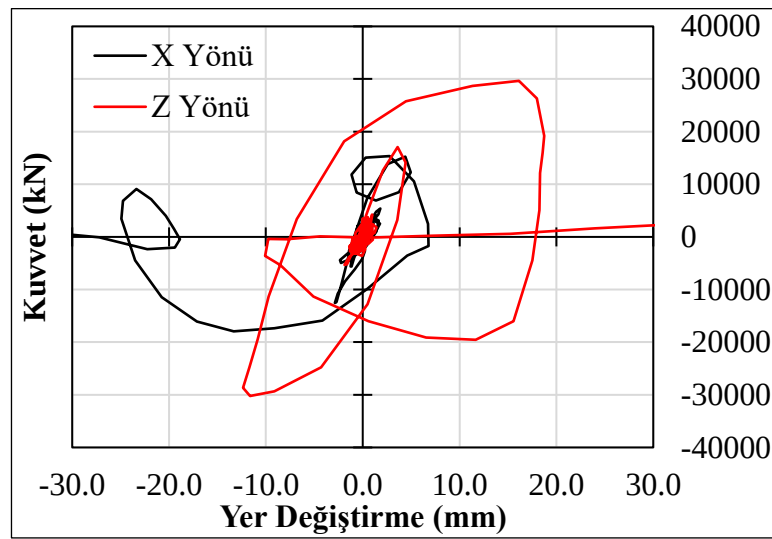
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.77’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının kubbesinin kuzey yüzünde görülmektedir. 4.40’inci saniyede yer hareketi etkisiyle çatlaklar kubbenin güney-doğu ve güney-batı köşelerinde hat olarak duvarlara doğru derinleşmektedir. Sonraki yer hareketi çevriminde bu çatlaklar kubbenin güney ve doğu yüzünde yoğunlaşmıştır. Yapının güney ve doğu duvarlarında bulunan pencerelerde kubbede oluşan bu çatların devamı görülmektedir. Yapının güney ve doğu duvarının zemine yakın kısımlarında kesme yarıkları görülmektedir. Bu durum yapının kuzey-doğu kısmına doğru göçmesine sebep olmaktadır.



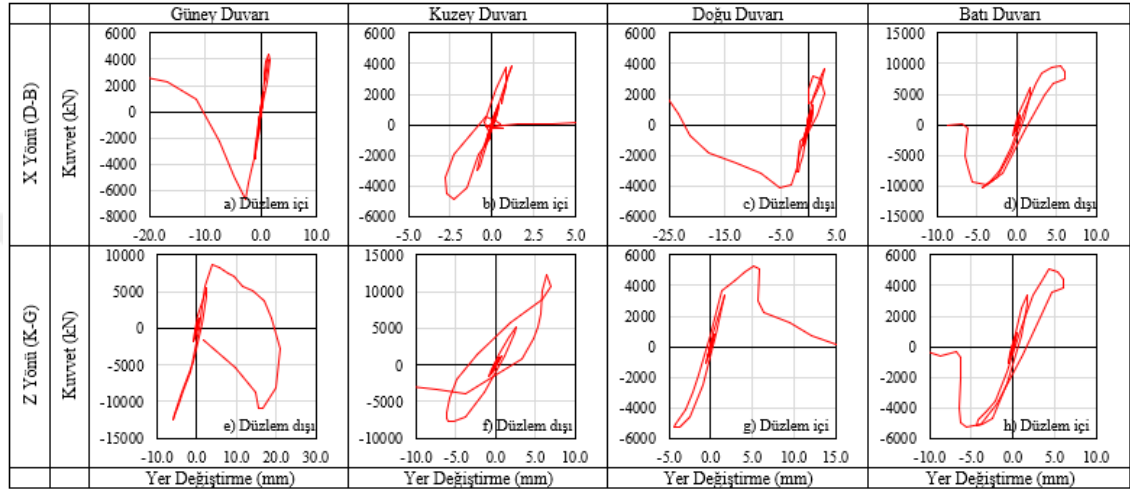
Şekil EK-1.77. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.78’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.78. Behram Paşa ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

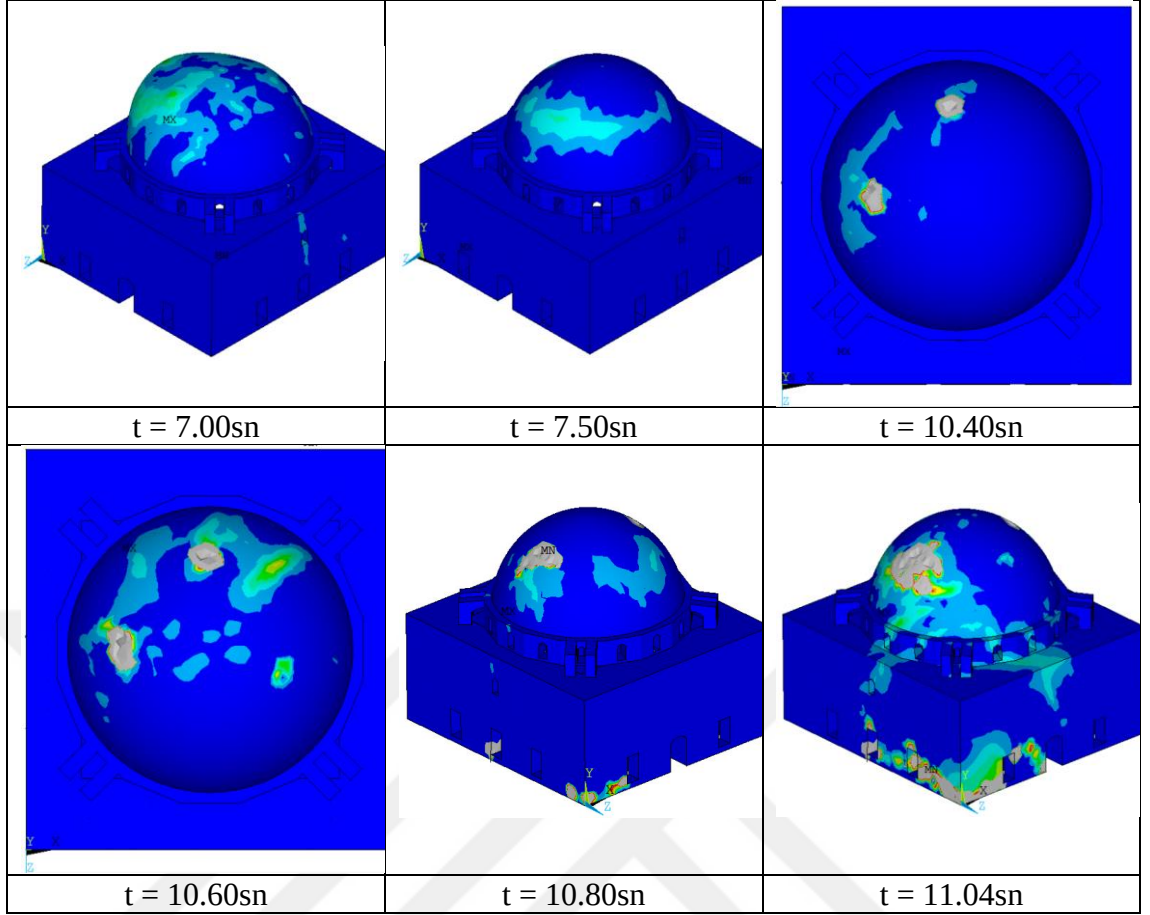
Şekil EK-1.79’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.79. Behram Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

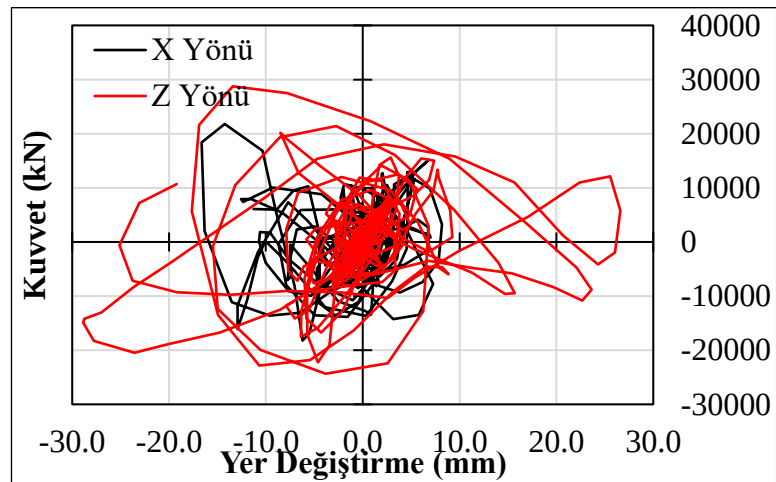
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.80’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 7.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Bu zaman adımı yapıda kubbesinde çatlaklar görülmektedir. Yapının duvarlarının rijit olduğunu önceki analiz değerlendirmelerinde de bahsedilmiştir. Bu analiz sonucunda da yapının kubbesinin kısımlar kısımlar hasarlar aldığı görülmektedir. Yer hareketine bağlı olarak farklı çevrimlerde kubbenin farklı yüzlerinde çatlak yoğunlukları oluşmaktadır. 10.80’inci saniyede yapının kuzeydoğu köşesinde çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlakları yapının önceki zaman adımlarında hasar gören kubbeden başlayarak duvarlara uzanan çatlak hatları takip etmektedir. Yapı kuzey-doğu köşesinde ağır hasar almaktadır.



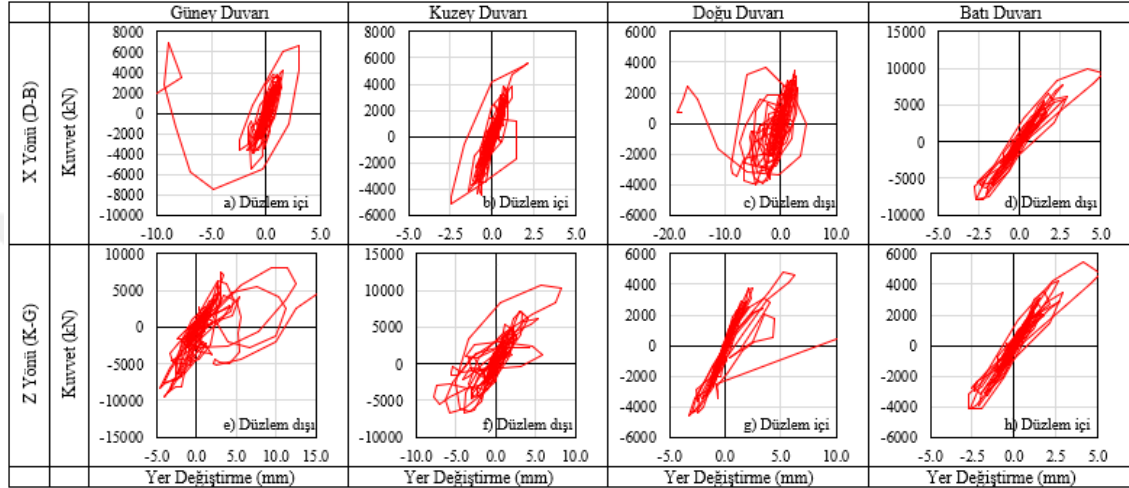
Şekil EK-1.80. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.81’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.81. Behram Paşa ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

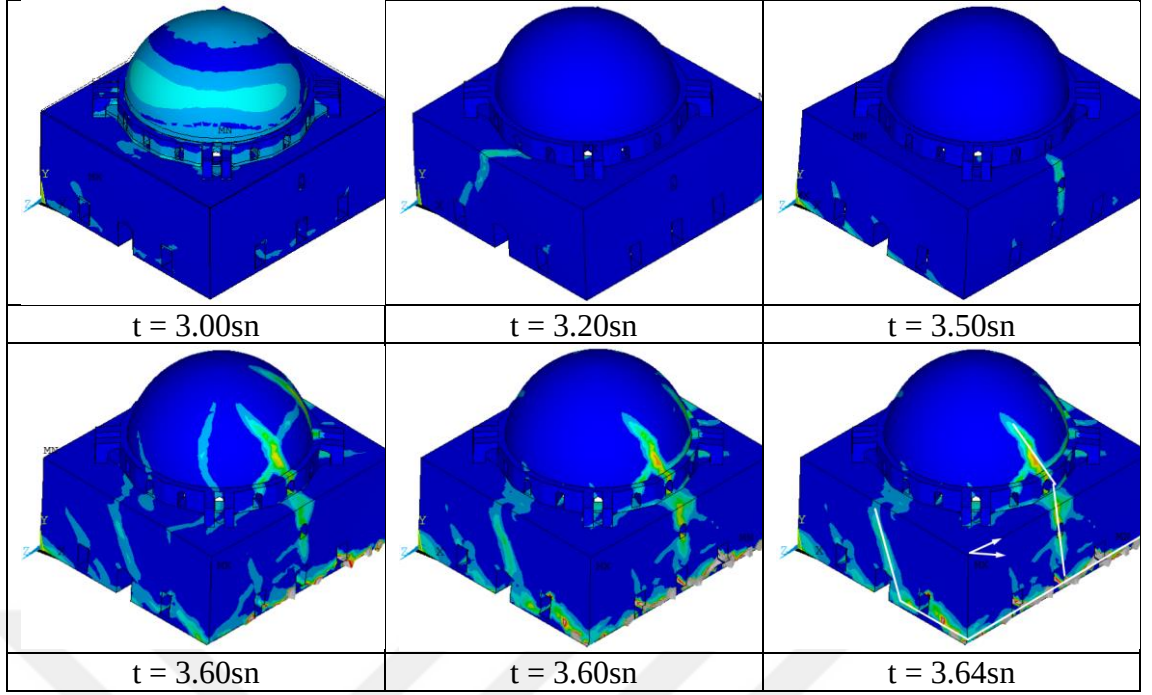
Şekil EK-1.82’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.82. Behram Paşa ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

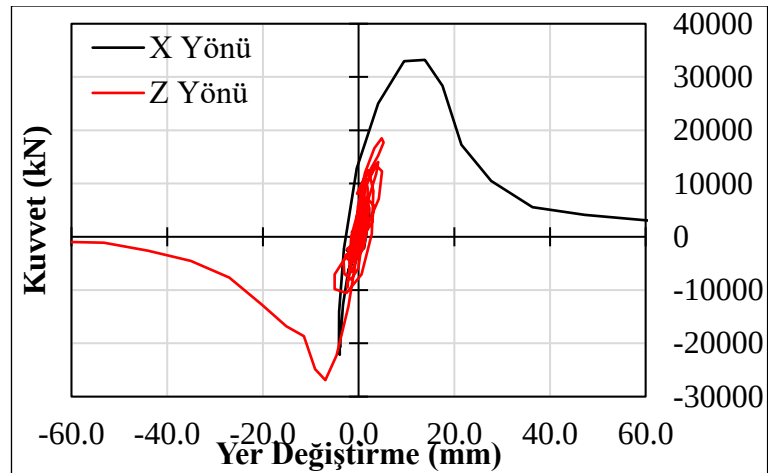
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.83’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının kuzey duvarının kubbeden alt penceresine doğru çatlak hattı görülmektedir. Sonraki zaman dilimlerinde yapının kuzey ve batı duvarlarında çatlakların yoğunlaştığı görülmektedir. Batı duvarının zemine yakın kısmında kesme çatlaklarının oluştuğu, bu çatlaklara kubbenin batı yüzünde meydana gelen yarıklarında eşlik ettiği söylenebilir. Yapı kuzey ve batı duvarlardan içe doğru yıkıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil EK-1.83. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

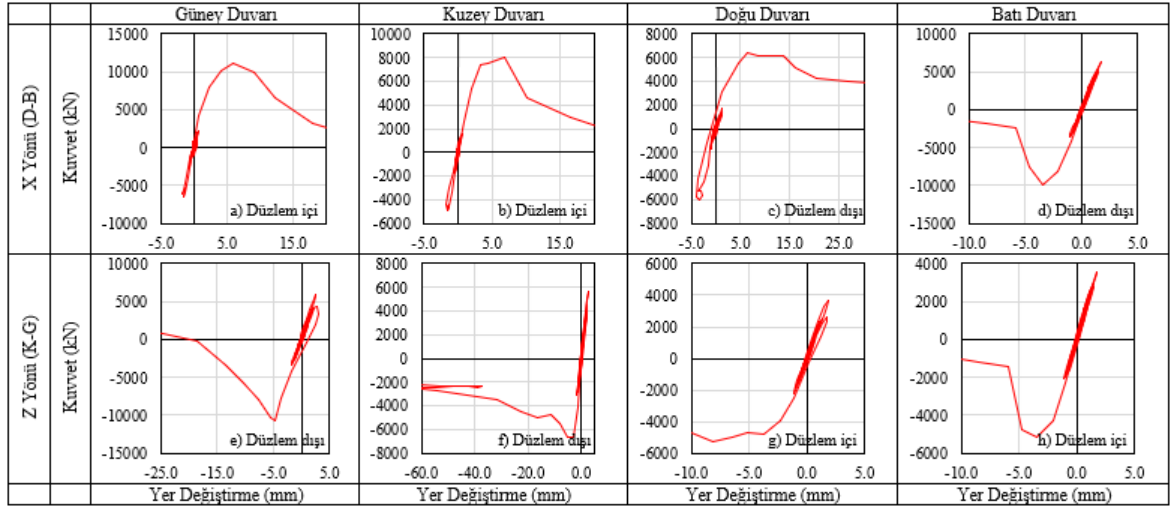
Şekil EK-1.84’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.84. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.85’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki

uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.85. Behram Paşa Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.6. Erzurum Narmanlı Cami Analizleri ($E=750f_c$)

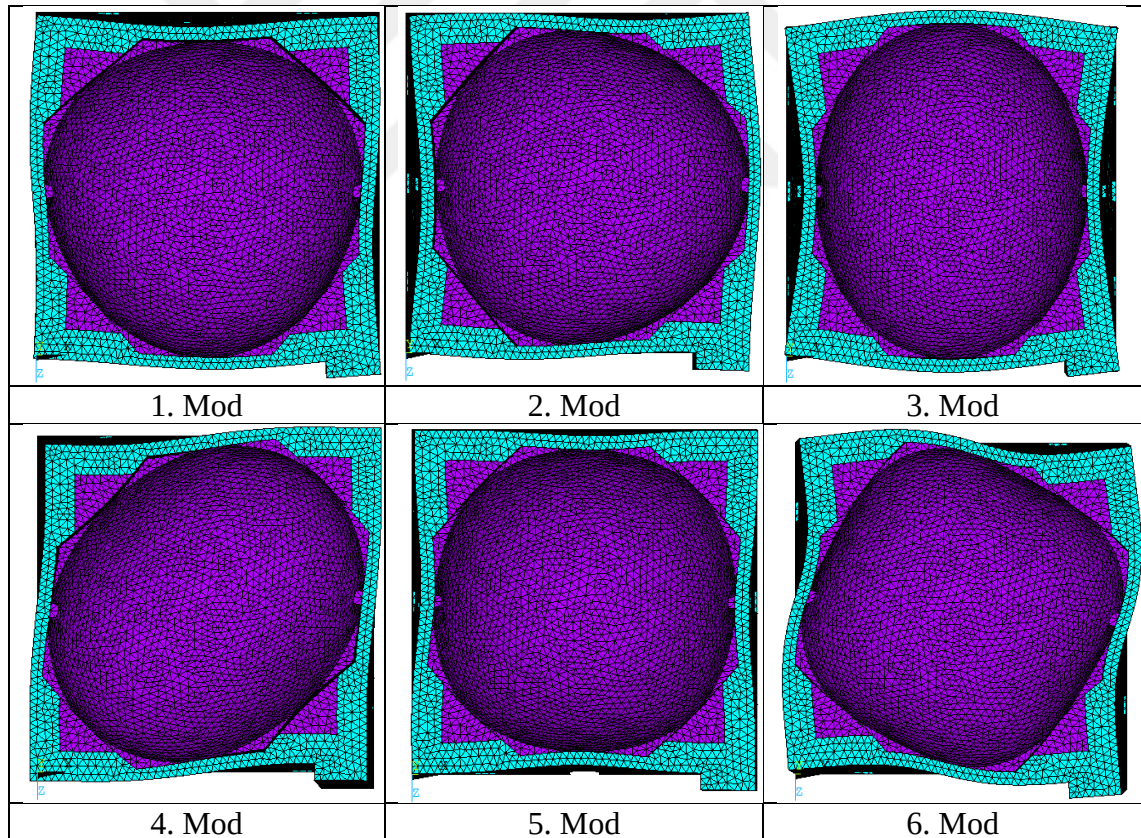
1.6.1. Modal analiz

Erzurum Narmanlı Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.6'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.6. Narmanlı Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=750f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	5.69	0.44E-01	0.90E-06	0.54	0.13
2	5.75	0.54	0.28E-05	0.43E-01	0.52
3	7.46	0.93E-07	0.52E-06	0.86E-05	0.52
4	9.82	0.26E-03	0.21E-02	0.48E-04	0.53
5	10.06	0.40E-04	0.14	0.20E-04	0.53
6	10.09	0.29E-03	0.44E-02	0.23E-04	0.76

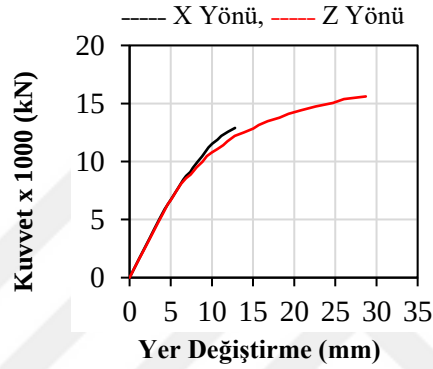
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod kuzey-güney (Z doğrultusu), 2. mod doğu-batı (X doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.86'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3371 tondur.



Şekil EK-1.86. Narmanlı Cami'nin mod şekilleri ($E=750f_c$)

1.6.2. İtme analizi

Şekil EK-1.87’de Narmanlı Cami’nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 7150 kN, 5,2 mm; Z doğrultusunda ise 6300 kN, 4,2 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 12891 kN, Z doğrultusunda 15605 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.87. Narmanlı Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=750f_c$)

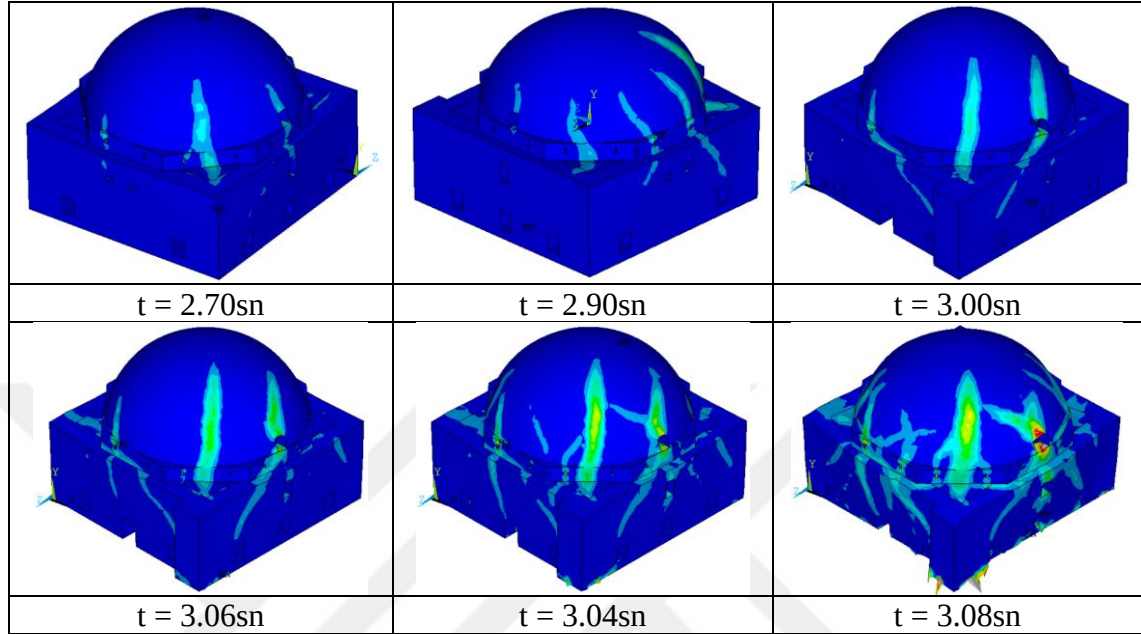
1.6.3. Dinamik analizler

Diyarbakır Narmanlı Cami’sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

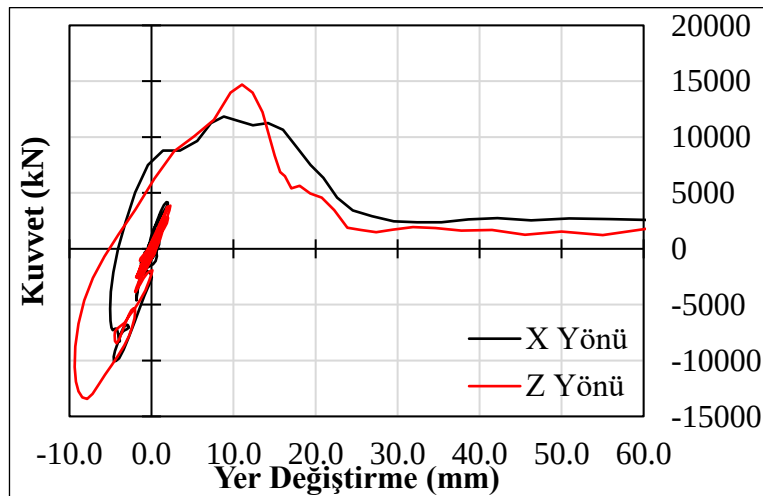
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.88’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.70’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Ancak bu saniyede kubbenin güney doğu köşesinde çatlak hatları görülmektedir. 3.00’inci saniyeye yer hareketi çevriminden kaynaklı sebeplerle, çatlak hatları kubbenin kuzey-batı köşesinde gözlemlenmektedir. Bu çatlak hatlarına kuzey ve batı duvarlarında kubbe pencerelerinden başlayarak duvarların

at kısımlarına ilerleyen diyagonal çatlaklar eşlik etmektedir. Bu üç hat, yapının yıkılma mekanizmasının temelini oluşturmaktadır. Sonraki zaman adımlarında bu hatlar yoğunlaşıp derinleşerek yapının kuzey-batı köşesinden göçmesine sebep olmaktadır.



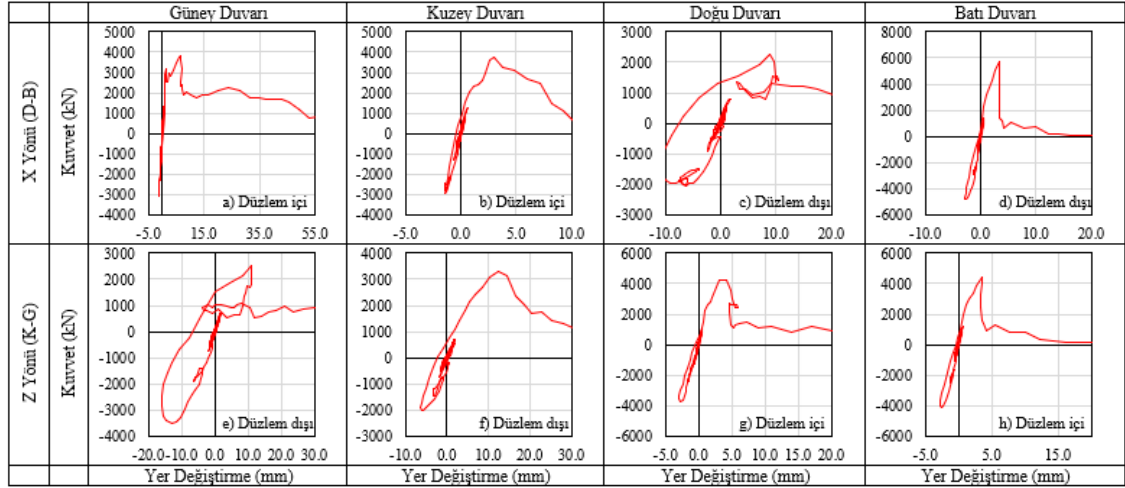
Şekil EK-1.88. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.89’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.89. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

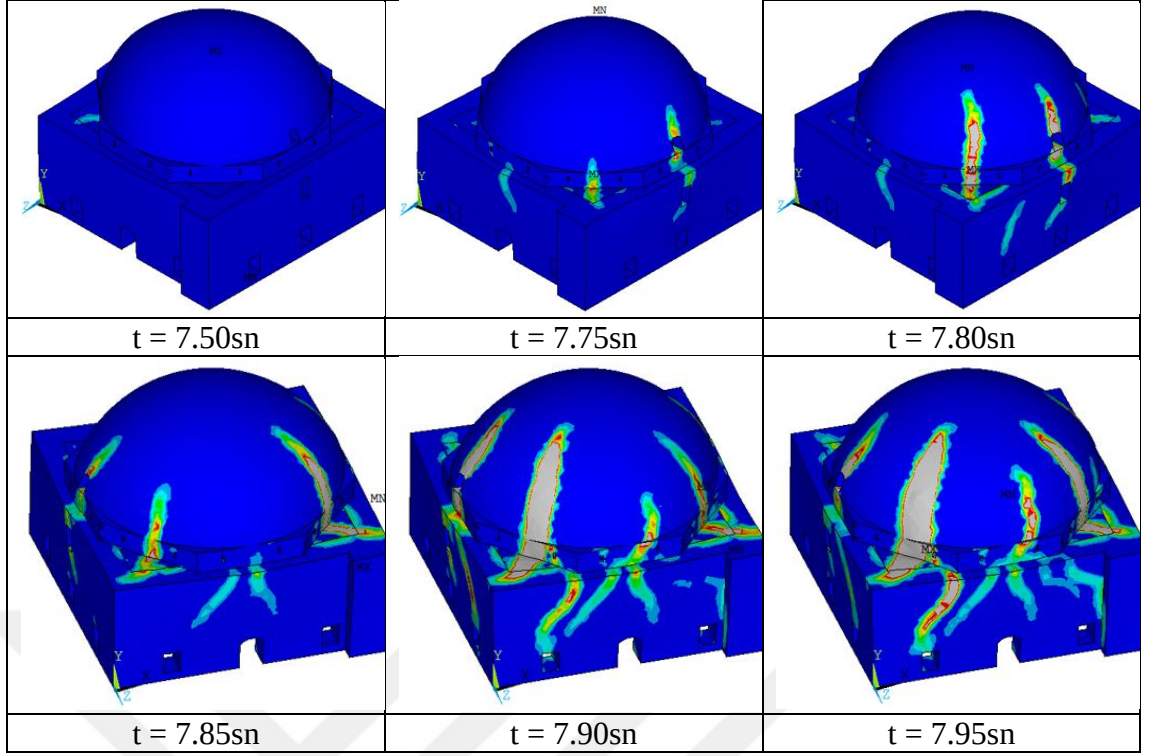
Şekil EK-1.90’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.90. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

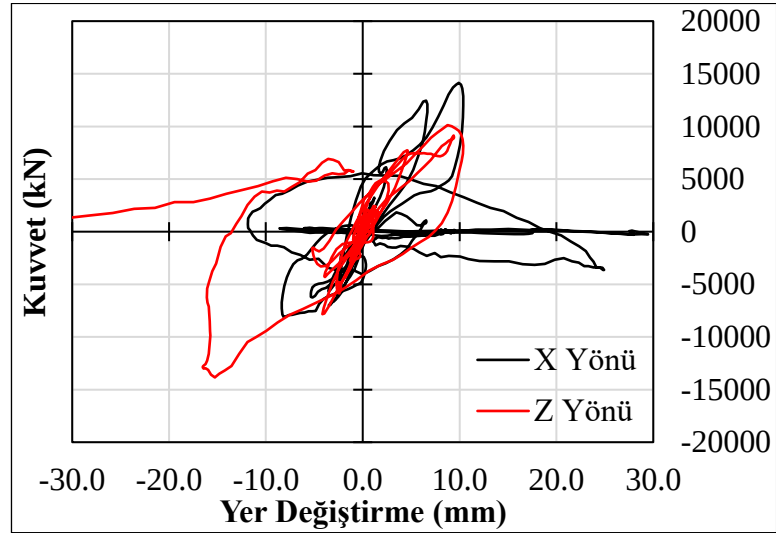
- Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.91’de verilmektedir. Caminin temel yıkılma mekanizması güney duvarının ortasından köşelerine doğru ilerleyen diyagonal çatlak hatları bu duvarın düzlem dışı devrilmesi ile tanımlanabilir. Bu yıkılma esnasında doğu ve batı duvarlarının pencere boşluklarından kırılmasına sebep olmaktadır.



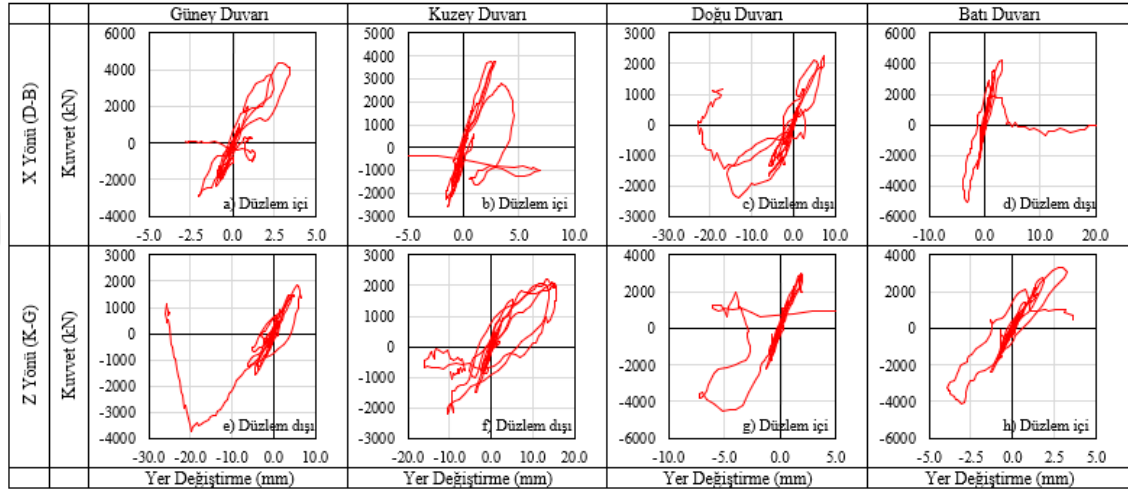
Şekil EK-1.91. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.92’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.92. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

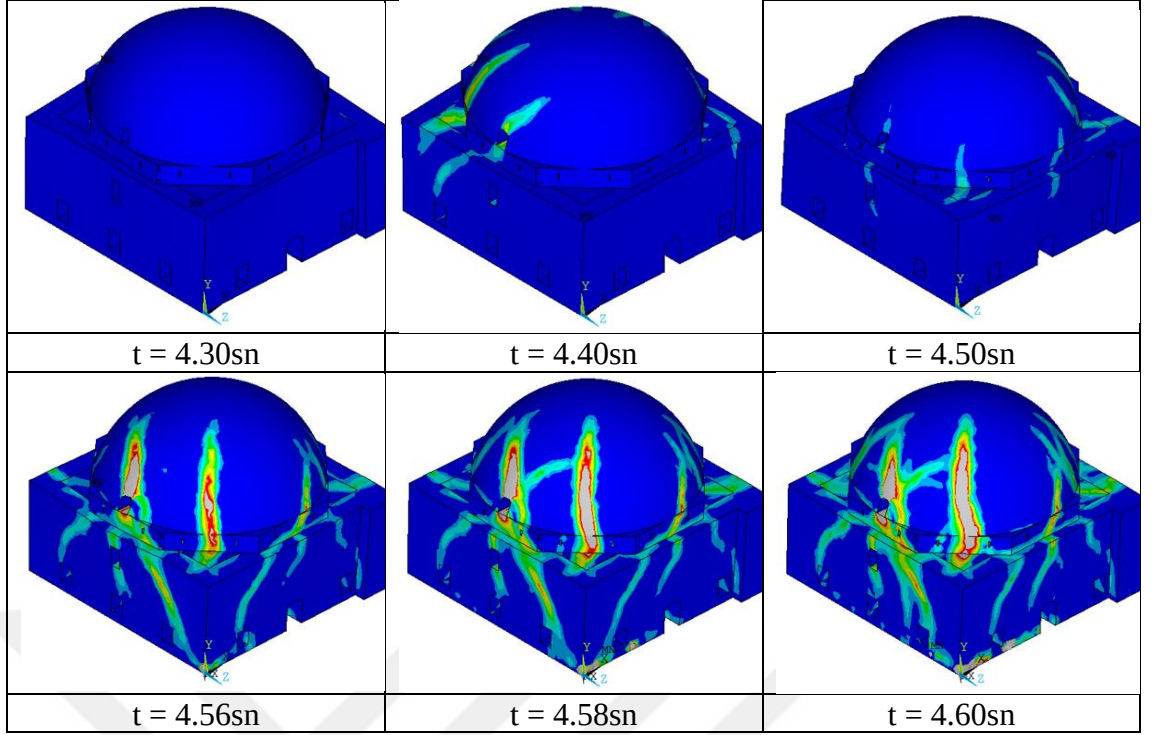
Şekil EK-1.93’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.93. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

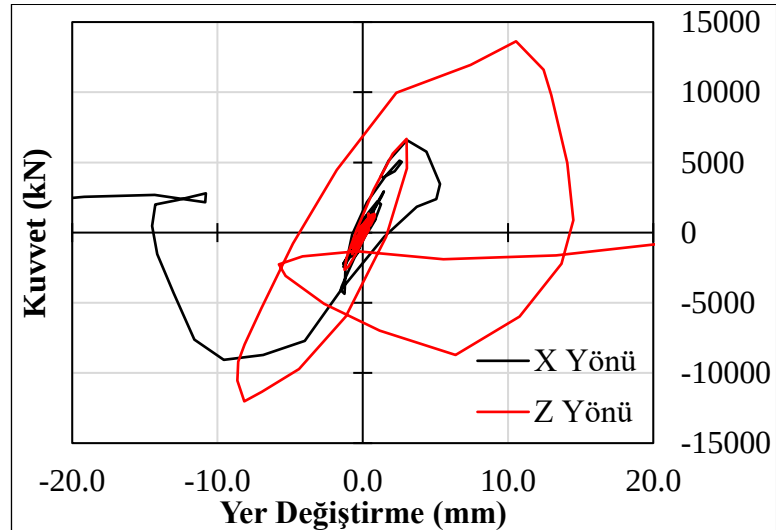
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.94’de verilmektedir. Caminin temel yıkılma mekanizması güney-doğu köşesinde V şeklinde ilerleyen çatlaklar ve bu çatlakların görüldüğü yerlerde duvarlar ile kubbenin göçmesi şeklindedir.



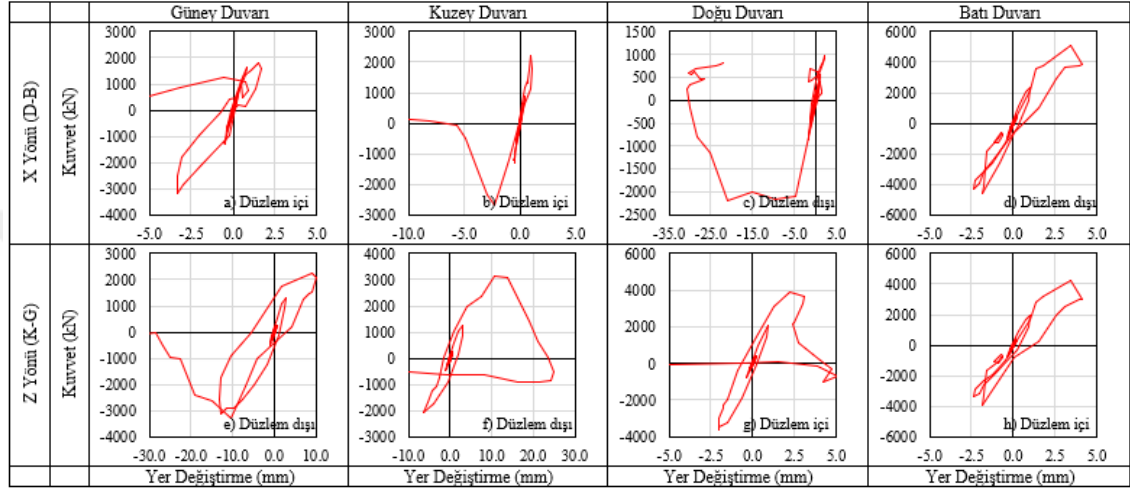
Şekil EK-1.94. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.95’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.95. Narmanlı ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

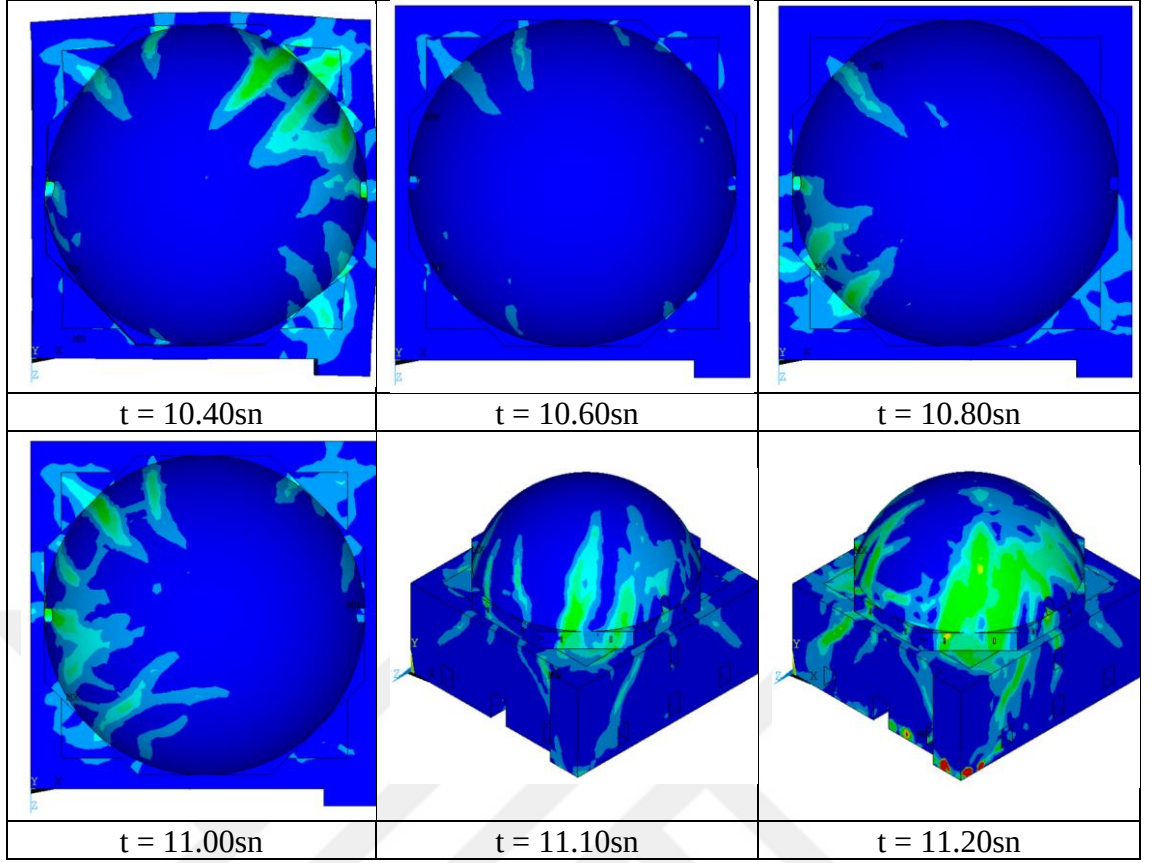
Şekil EK-1.96’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.96. Narmanlı ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

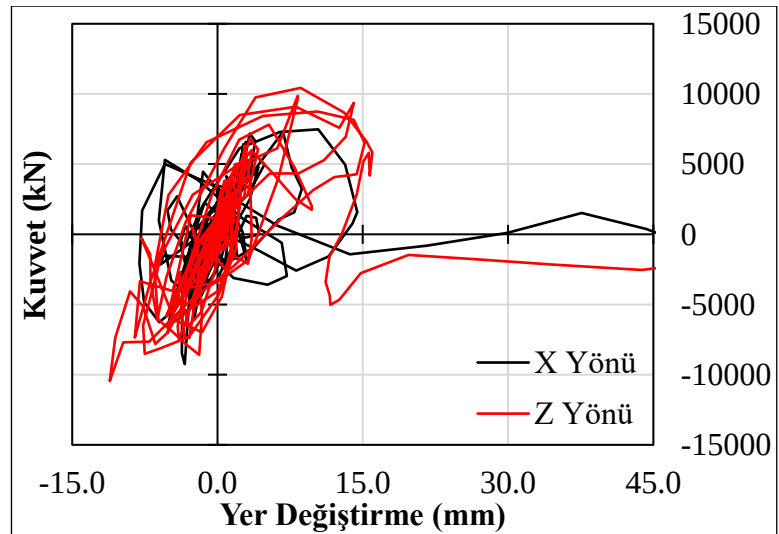
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.97’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 10.40’ıncı saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Bu zaman adımımdan sonra 11.10’ıncı saniyeye kadar yer hareketinin farklı çevrimlerinde kubbenin çatlak dağılımı net bir şekilde gözlemlenmektedir. Kubbenin güney-doğu köşesinde yoğunlaşan çatlaklar, sırasıyla güney-batı, kuzey-batı ve tüm batı cephesi olarak yer değiştirmektedir. Bu çevrimler kubbenin göçmesine neden olmasa da kalıcı kılcal hasarların meydana gelmesine neden olur. Kubbenin kuzey-batı köşesinde oluşan çatlakları kuzey-batı köşesinde duvarların kırılmasıyla beraber yapının göçtüğü söylenebilir.



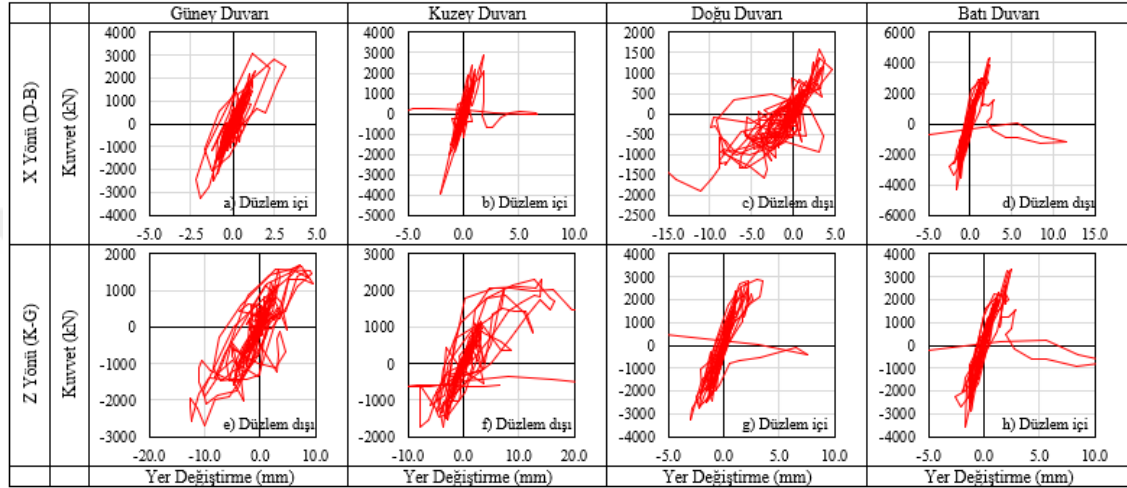
Şekil EK-1.97. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.98’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.98. Narmanlı ($E=750f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

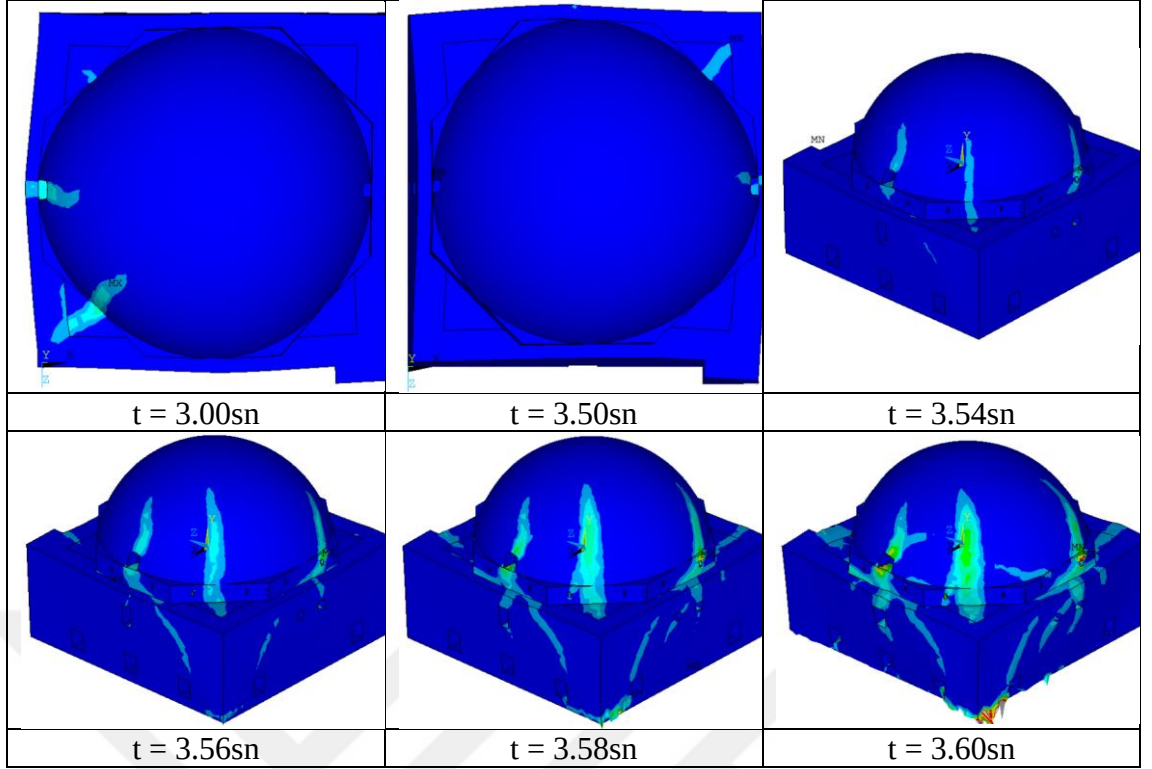
Şekil EK-1.99’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.99. Narmanlı ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

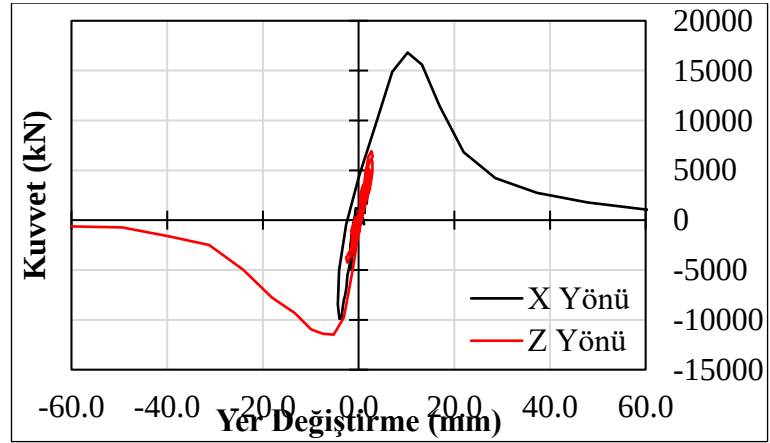
- Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.100’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.50’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyeden sonra kubbenin güney, batı ve güney-batı yüzünde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar yapının yıkılma mekanizmasının ilk adımları olarak görülmektedir. Sonraki zaman adımlarında bu çatlaklar duvarların pencerelerine ilerleyip derinleşerek yapının göçmesine sebep olmaktadır.



Şekil EK-1.100. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

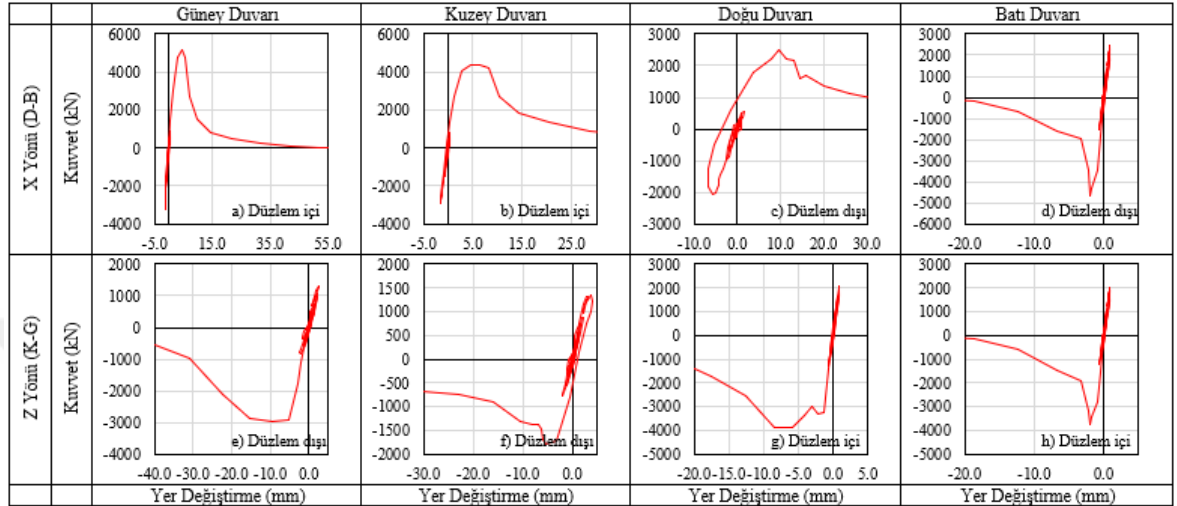
Şekil EK-1.101’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.101. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.102’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken

duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.102. Narmanlı Cami ($E=750f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.7. Konya Karapınar Sultan Selim Cami Analizleri ($E=200f_c$)

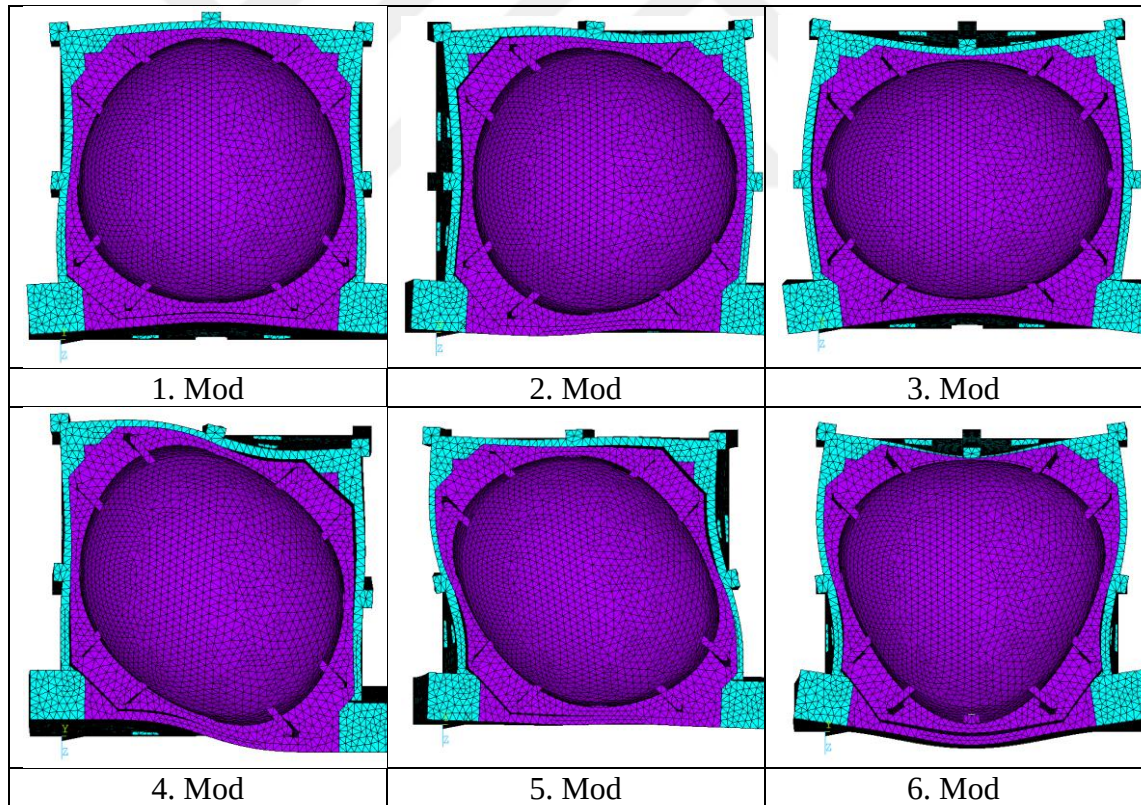
1.7.1. Modal analiz

Konya Karapınar Sultan Selim Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.7'da yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.7. Sultan Selim Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	2.33	0.11E-05	0.21E-05	0.70	0.30
2	2.48	0.70	0.89E-11	0.11E-05	0.59
3	3.31	0.18E-07	0.36E-04	0.79E-04	0.59
4	3.83	0.48E-02	0.16E-07	0.31E-07	0.88
5	4.14	0.24E-02	0.35E-08	0.15E-06	0.88
6	4.67	0.45E-10	0.46E-04	0.79E-02	0.88

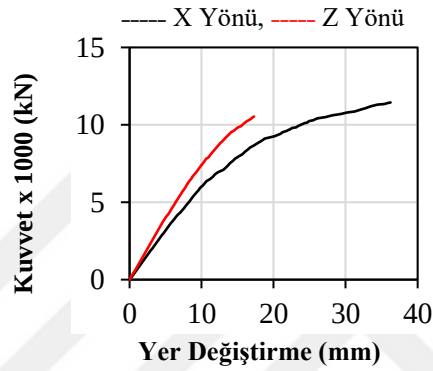
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.103'da yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3518 tondur.



Şekil EK-1.103. Sultan Selim Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$).

1.7.2. İtme analizi

Şekil EK-1.104’de Sultan Selim Cami’nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 4500 kN, 6,75 mm; Z doğrultusunda ise 5880 kN, 7,35 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 11563 kN, Z doğrultusunda 10535 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.104. Sultan Selim Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$)

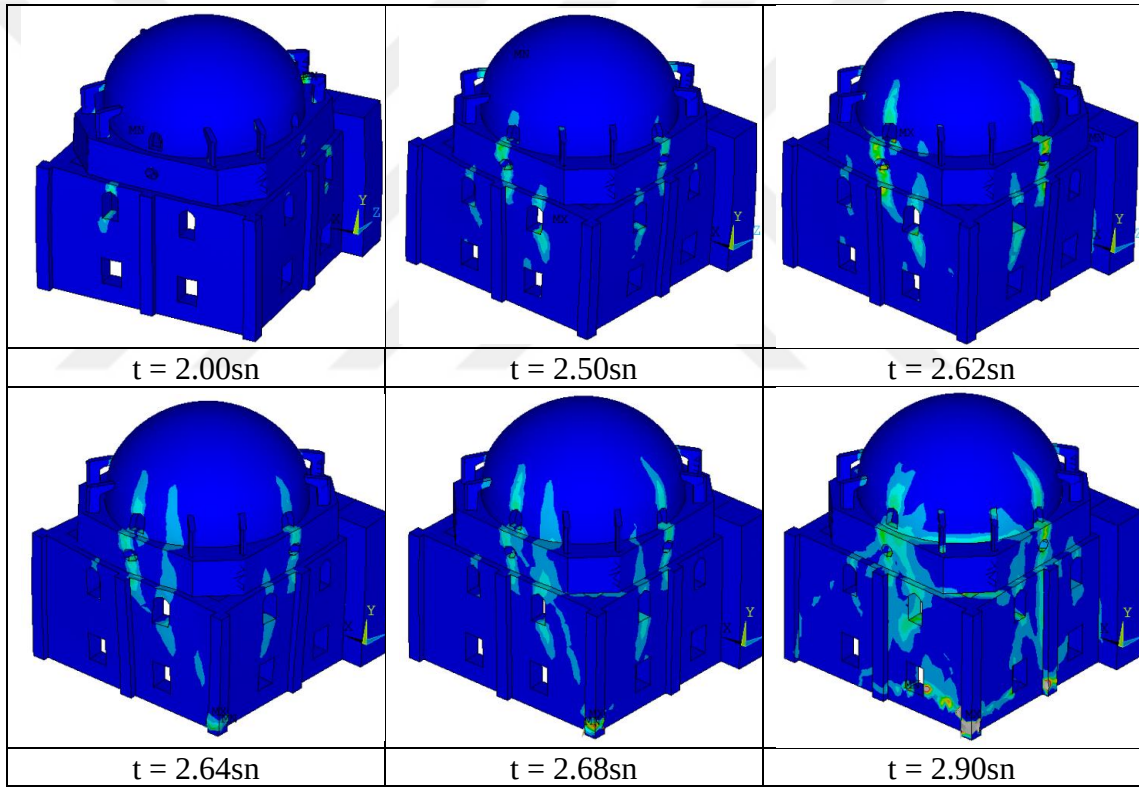
1.7.3. Dinamik analizler

Konya Karapınar Sultan Selim Cami’sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

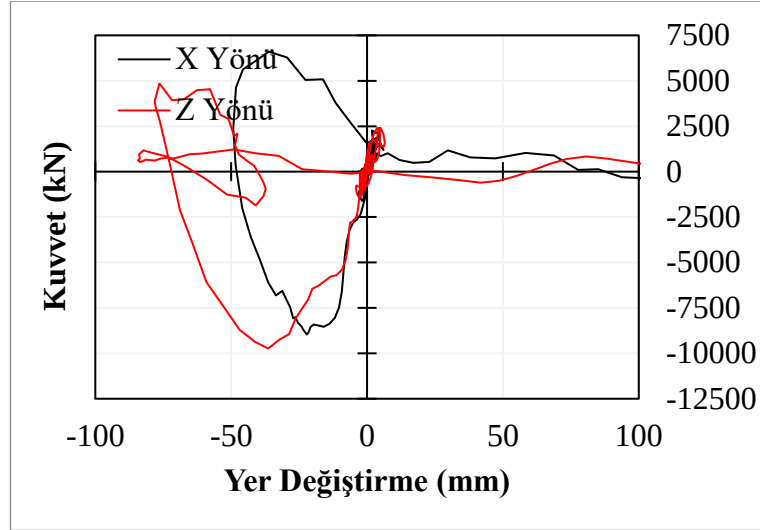
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.105’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir ancak yapının batı duvarının üst kısmında bulunan kubbe penceresinden duvar üstüne doğru bir hat boyunca çatlaklar oluşmaya başladığı görülmektedir. 2.50’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında

mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının doğu ve güney duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 5.0-5.5mm mertebelerindedir. 2.60'cı saniyede yapının doğu ve güney duvarlarındaki çatlaklar yapının güney-doğu köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 10-12mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.105'de görüldüğü üzere doğu ve güney duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının güney-doğu köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 30-35mm bir açılma gözlemlenmektedir.



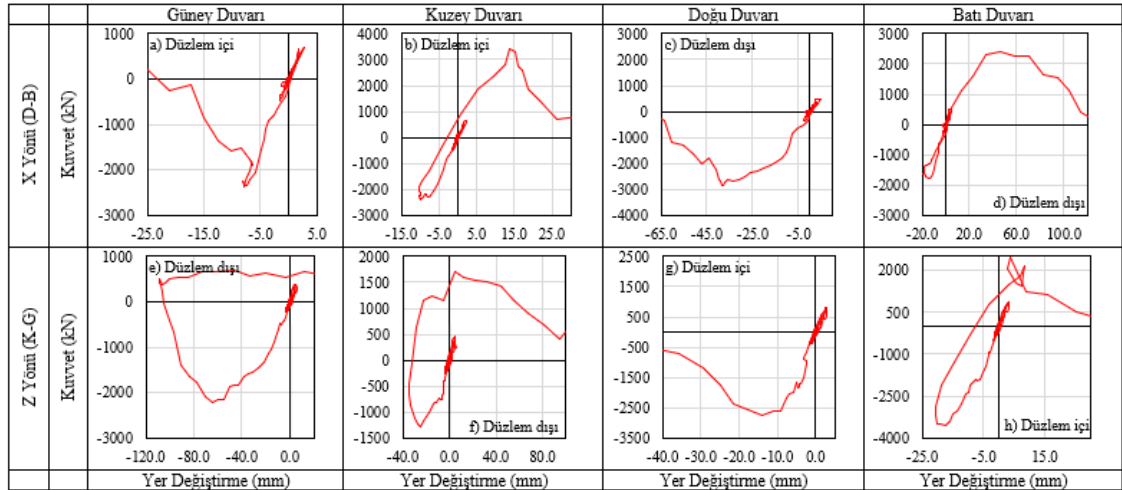
Şekil EK-1.105. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.106'da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.106. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

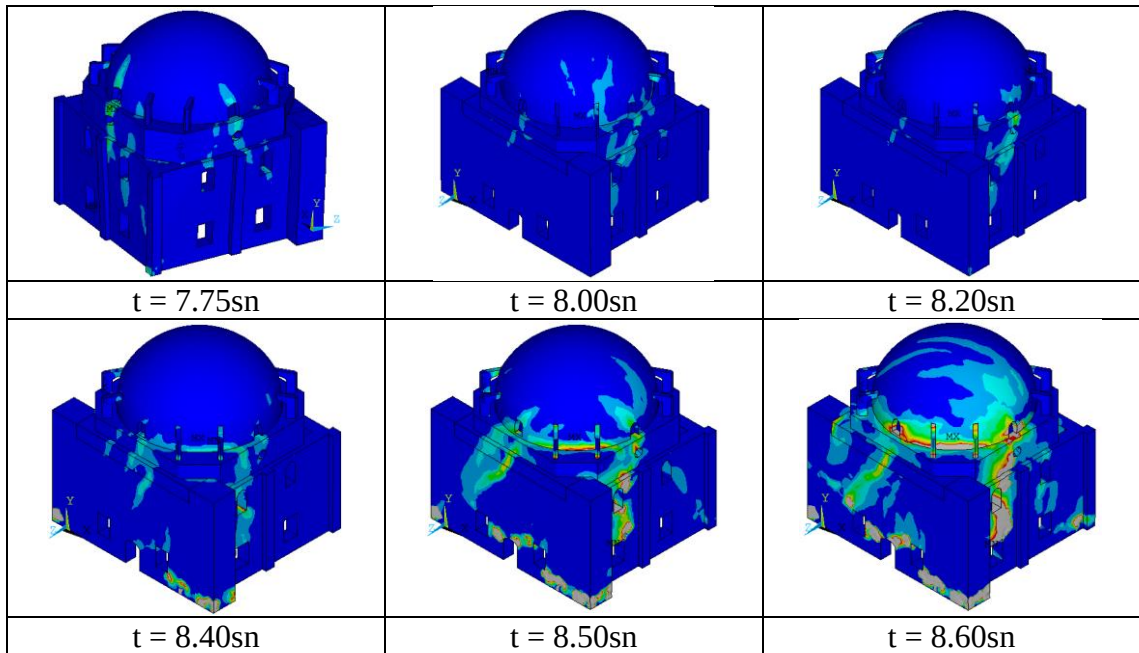
Şekil EK-1.107’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.107. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

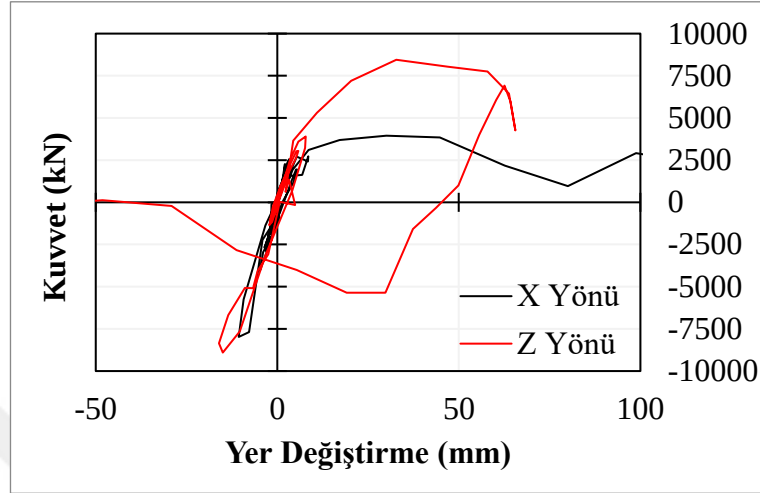
- **Duz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.108’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.75’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.00’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının batı duvarı ile kuzey duvarının birleşim yerlerinde, batı duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 3.0-3.5 mm mertebelerindedir. 3.20’inci saniyede yapının batı duvarlarındaki çatlak hattı genişlemektedir. 3.50’inci saniyede yapının kuzey batı köşesini kapsayacak V şeklinde bir çatlak hattı ile duvar hareketi açıkça görülmektedir. Yapı duvarları ile kubbe birleşim yerlerinde yoğunlaşan çatlaklar sebebiyle kubbenin bı kısmında da göçme meydana gelmektedir. Çatlaklar yaklaşık 30 mm mertebelerine çıkmaktadır. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.108’de görüldüğü üzere batı ve kuzey duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının kuzey-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 35-40mm bir açılma gözlemlenmektedir.



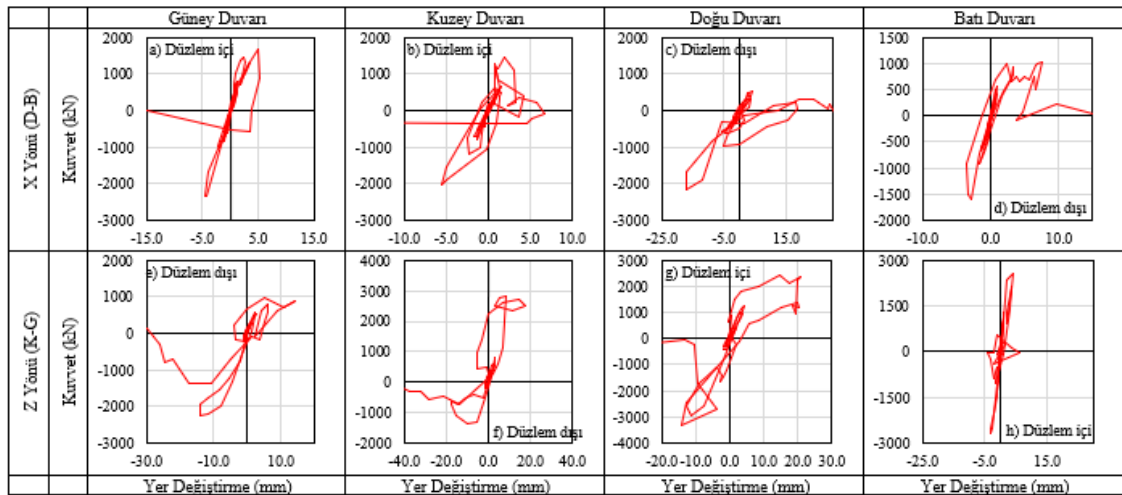
Şekil EK-1.108. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Duz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.109’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.109. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

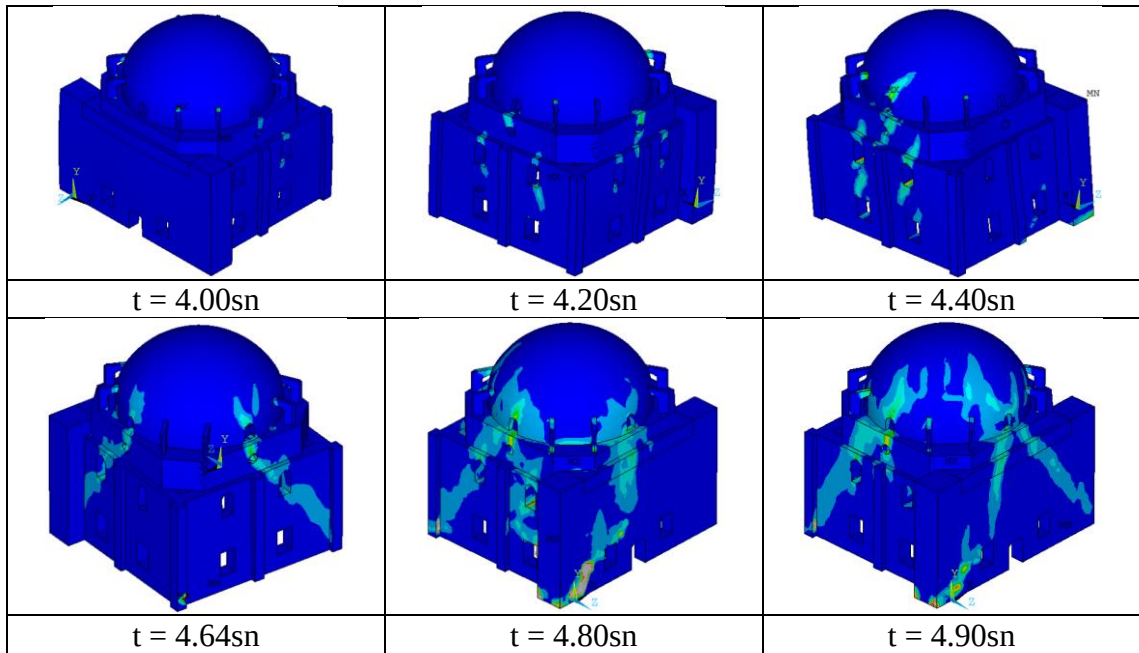
Şekil EK-1.110’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.110. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

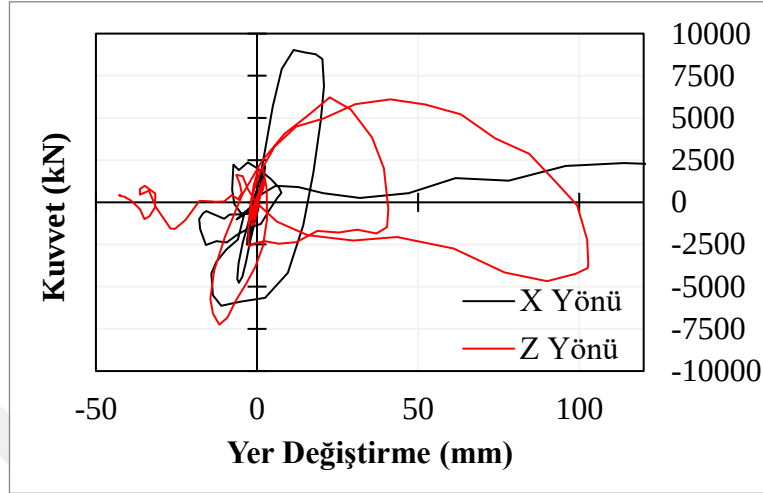
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.111’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney duvarlarında üst pencere boşluklarında ve kubbe pencerelerinde çatlak hatları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 3.0-3.5 mm mertebelerindedir. 4.40’uncu saniyede yapının güney duvarlarındaki çatlaklar yapının güney-batı köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 6.0-6.5 mm arasında olduğu görülmektedir. 4.64’uncu saniyede yapının güney ve batı duvarlarında kubbeden inen ve pencere boşluklarından geçen derin çatlak hatları gözlemlenmektedir. Yapının 4.80’inci saniyesinde yer hareketi çevrimi sebebiyle yapının kuzey duvarında derin diyagonal çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.111’de görüldüğü üzere batı ve kuzey duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının kuzey-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 20-25mm bir açılma gözlemlenmektedir.



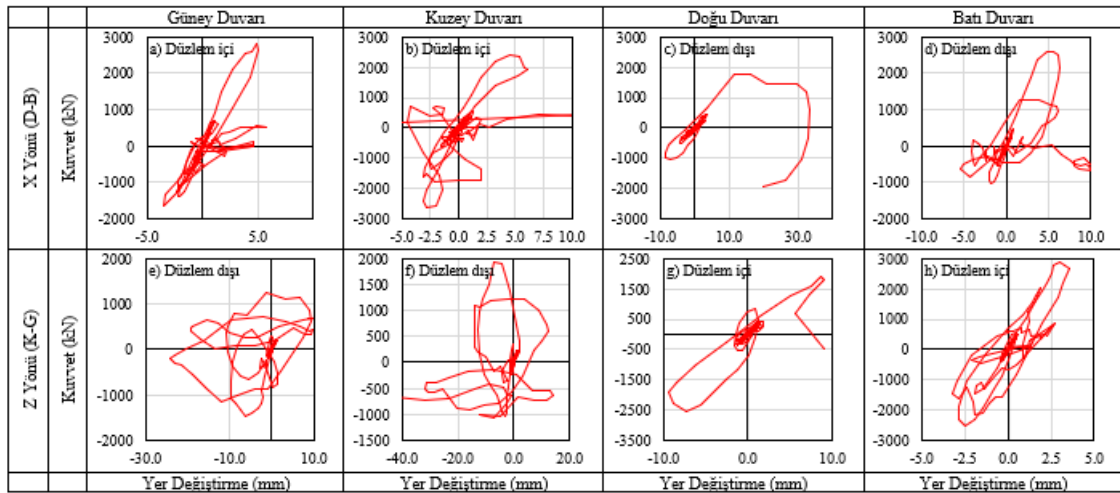
Şekil EK-1.111. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.112’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.112. Sultun Selim ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

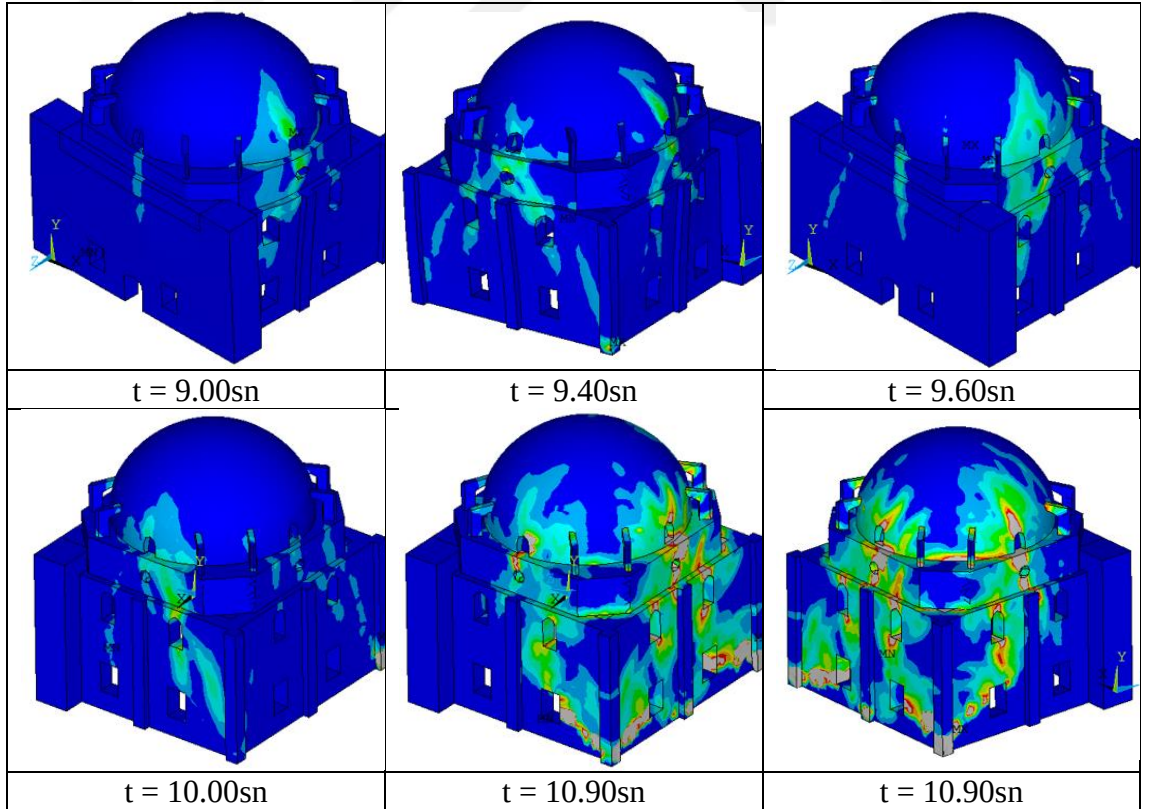
Şekil EK-1.113’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.113. Sultun Selim ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

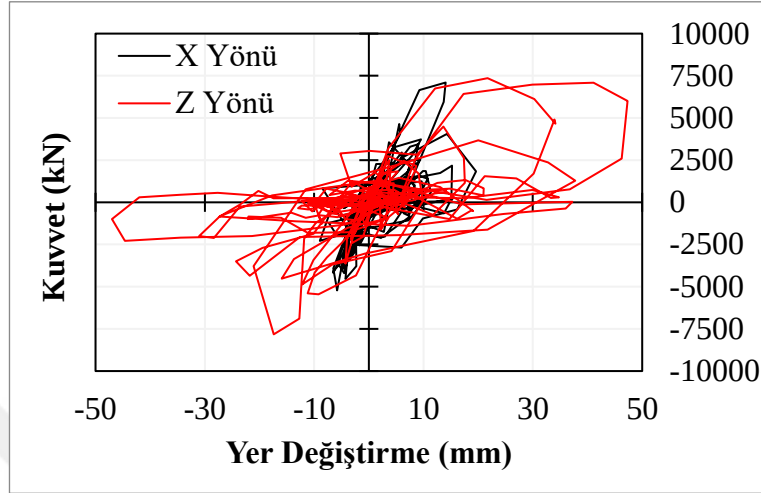
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.114’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 9.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Bu zaman diliminden sonra yer hareketinin özelliği sebebiyle yapının çeşitli yerlerinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır. 9.40’ıncı saniyede yapının güney duvarında düzlem dışı harekete bağlı olarak açılmalar ve belirgin yer değiştirmeler görülmektedir. Kubbe ile duvar birleşiminde meydana gelen yer değiştirme sebebiyle duvarın doğu ve batı duvarlarına doğru çatlak hatları gözlemlenmektedir. 10.00’ıncı saniyeden sonra caminin doğu ve batı duvarlarının orta kısımlarından güney duvarına doğru diyagonal derin çatlak hatları belirginleşmeye başlamıştır. Bu çatlak hatlarının derinleşmesiyle birlikte güney duvarında düzlem dışı hareket gözlemlenmektedir. Caminin kubbesinin güney kısmını da kapsayan bu düzlem dışı yer değiştirme caminin göçmesine sebep olmaktadır. Bu hareket esnasında çatlak genişlikleri 30-40 mm mertebelerindedir. 10.90’ıncı saniyeden sonra yer değiştirmeler ve çatlak genişlikleri ışığında yapının göçtüğü söylenebilir.



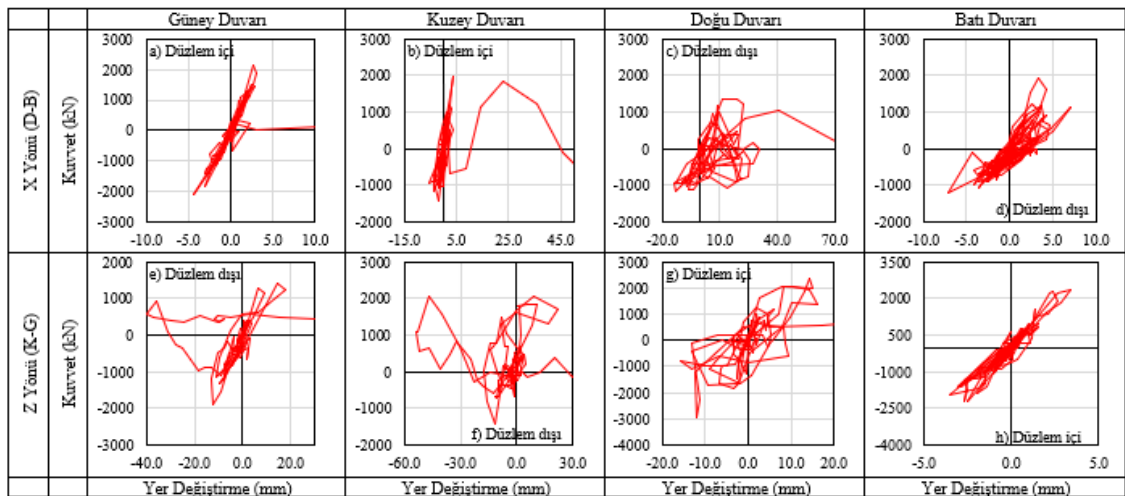
Şekil EK-1.114. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.115’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.115. Sultan Selim ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

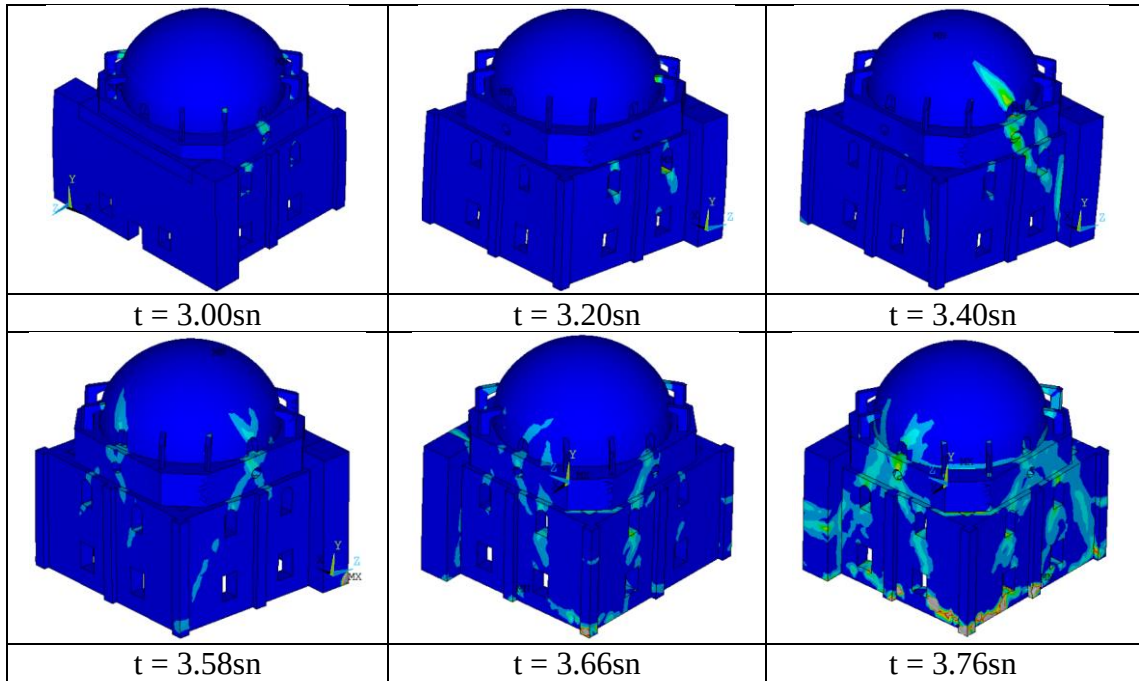
Şekil EK-1.116’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.116. Sultan Selim ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

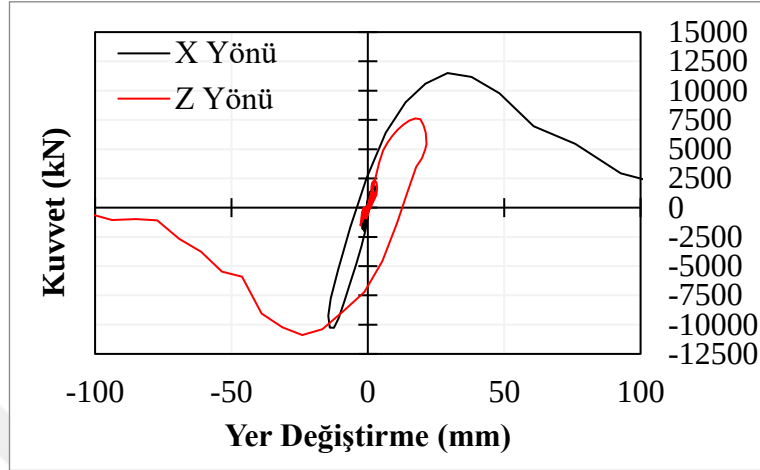
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.117’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının doğu duvarlarında üst pencere boşlukları çevresinde çatlaklar görülmeye başlamıştır. Bu çatlaklar 2.0-2.5 mm mertebelerindedir. 3.40’uncu saniyede yapının batı duvarındaki çatlaklar genişleyerek kubbeden, kuzey-doğu köşesinde doğru diyagonal olarak ilerlemektedir. 3.58’inci saniyede yer hareketi çevriminden dolayı çatlaklar yapının güney-doğu köşesinde yoğunlaşmaya başlamıştır. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.117’da görüldüğü üzere batı ve güney duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının güney-batı köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 35-40 mm bir açılma gözlemlenmektedir.



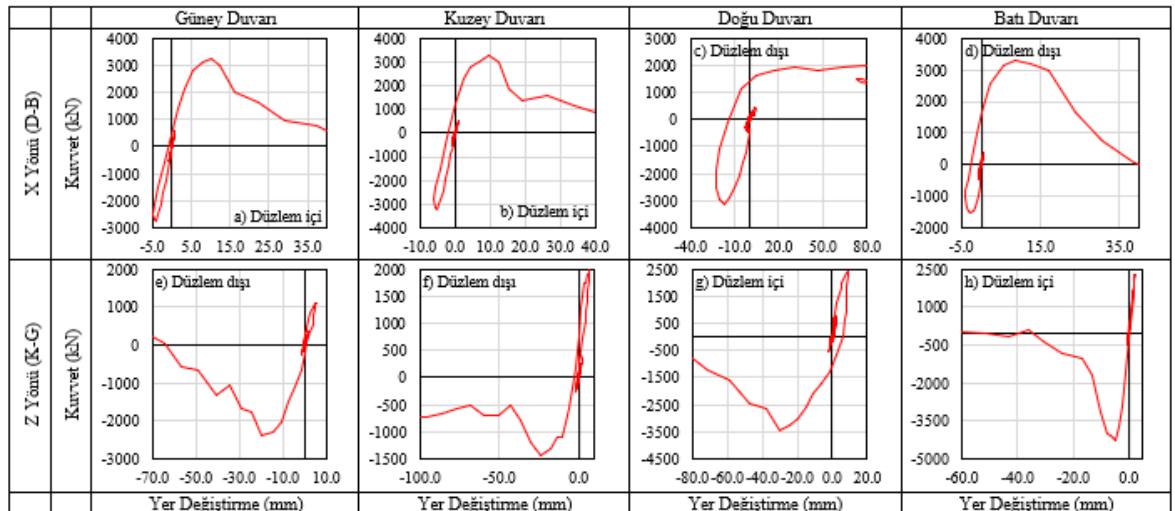
Şekil EK-1.117. Sultan Selim Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.118’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.118. Sultun Selim Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.119’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.119. Sultun Selim Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.8. Konya İlgin Lala Mustafa Paşa Cami Analizleri ($E=200f_c$)

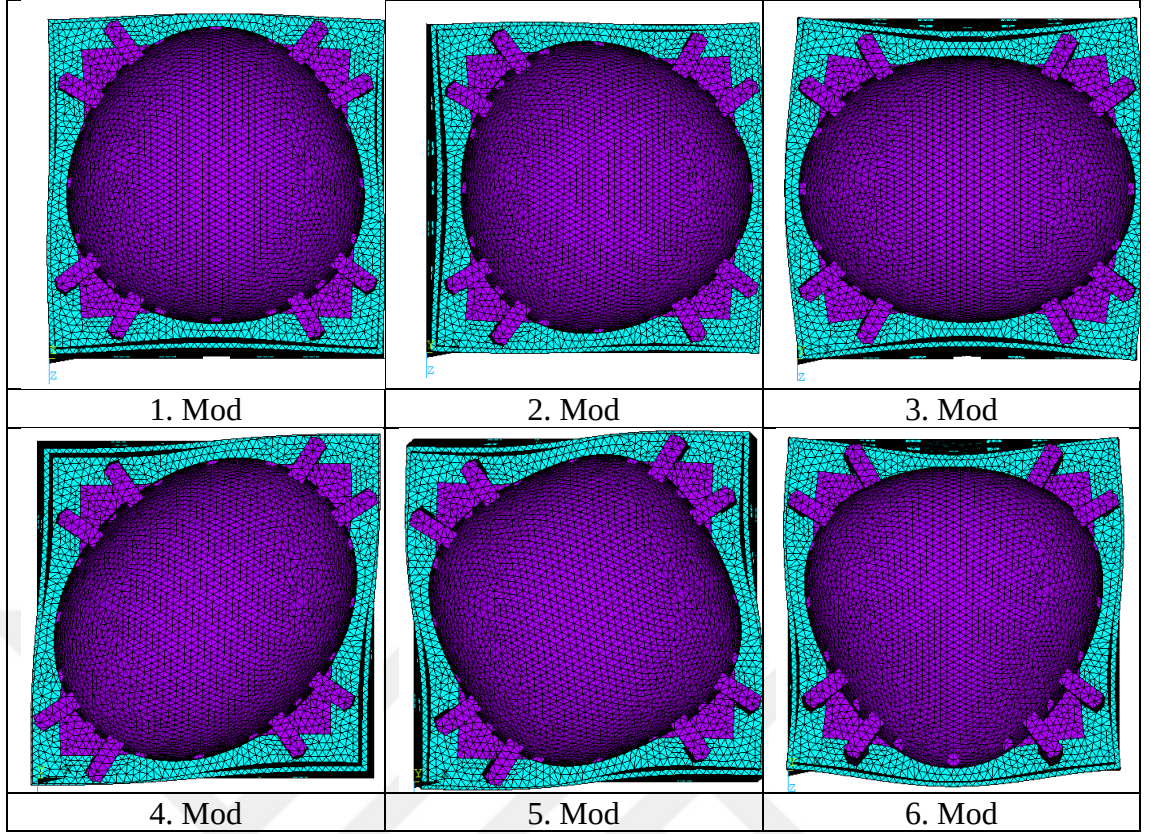
1.8.1. Modal analiz

Konya İlgin Lala Mustafa Paşa Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.8'da yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.8. İlgin Lala Mustafa Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	3.04	0.67E-06	0.22E-03	0.70	0.32
2	3.18	0.70	0.32E-08	0.85E-06	0.60
3	3.67	0.96E-06	0.18E-02	0.96E-02	0.60
4	4.20	0.59E-02	0.16E-07	0.11E-09	0.86
5	4.96	0.66E-02	0.92E-08	0.22E-08	0.86
6	5.68	0.13E-07	0.81E-02	0.46E-02	0.88

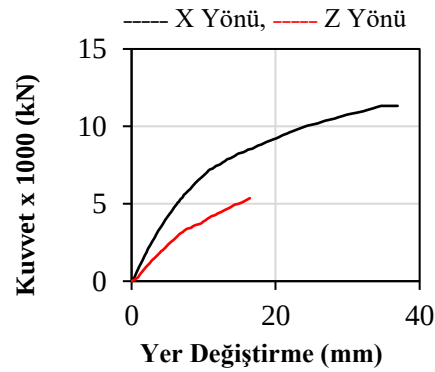
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.120'da yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3020 tondur.



Şekil EK-1.120. Iğın Lala Mustafa Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.8.2. İtme analizi

Şekil EK-1.121'de Iğın Lala Mustafa Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 3600 kN, 3,6 mm; Z doğrultusunda ise 3040 kN, 6,4 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 11323 kN, Z doğrultusunda 5362 kN olarak belirlenmiştir.



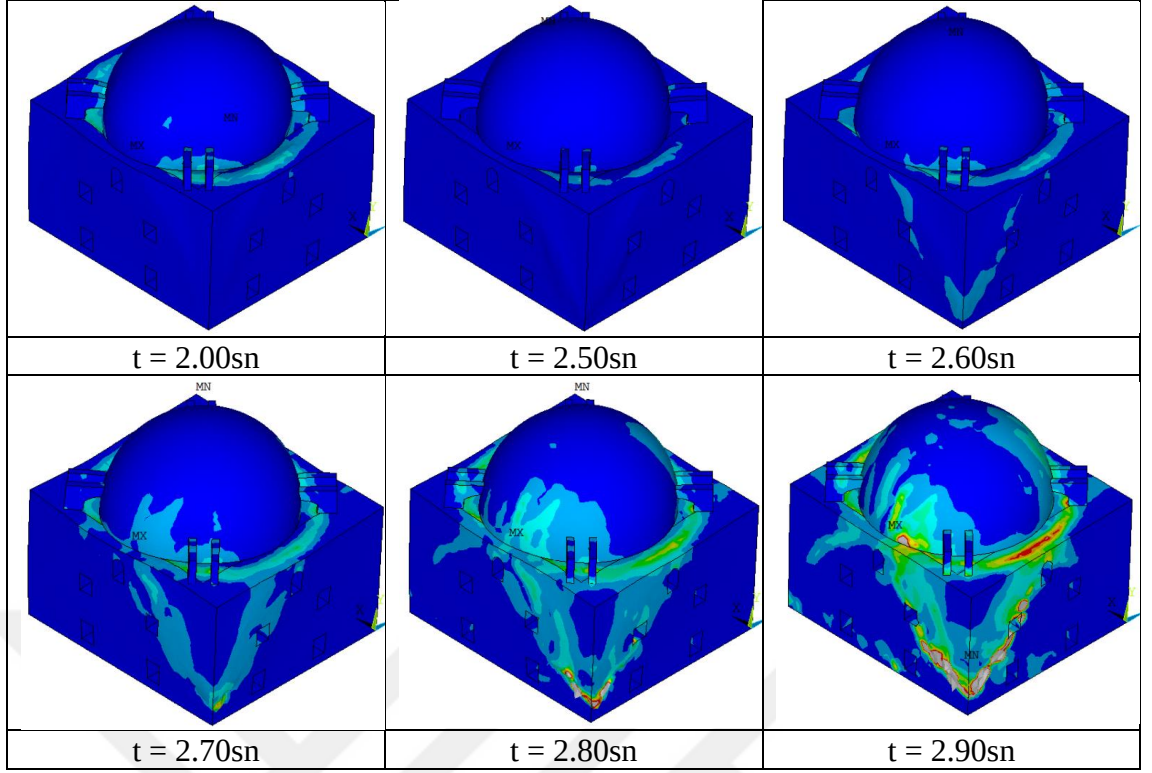
Şekil EK-1.121. Iğın Lala Mustafa Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$).

1.8.3. Dinamik analizler

Konya İlgin Lala Mustafa Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

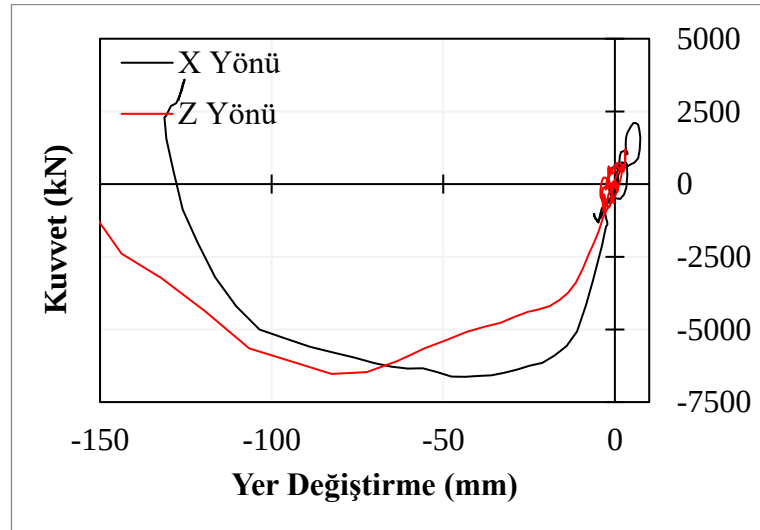
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.122'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00'inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir ancak yapının batı duvarının üst kısmında bulunan kubbe penceresinden duvar üstüne doğru bir hat boyunca çatlaklar oluşmaya başladığı görülmektedir. 2.50'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2.60'cı saniyede yapının doğu ve güney duvarlarındaki çatlaklar yapının güney-doğu köşesine doğru ilerlemekte ve yaklaşık olarak 9-11 mm arasında olduğu görülmektedir. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil EK-1.122'de görüldüğü üzere doğu ve güney duvarlarının kubbe pencerelerinden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle yapının güney-doğu köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 30-35mm bir açılma gözlemlenmektedir.



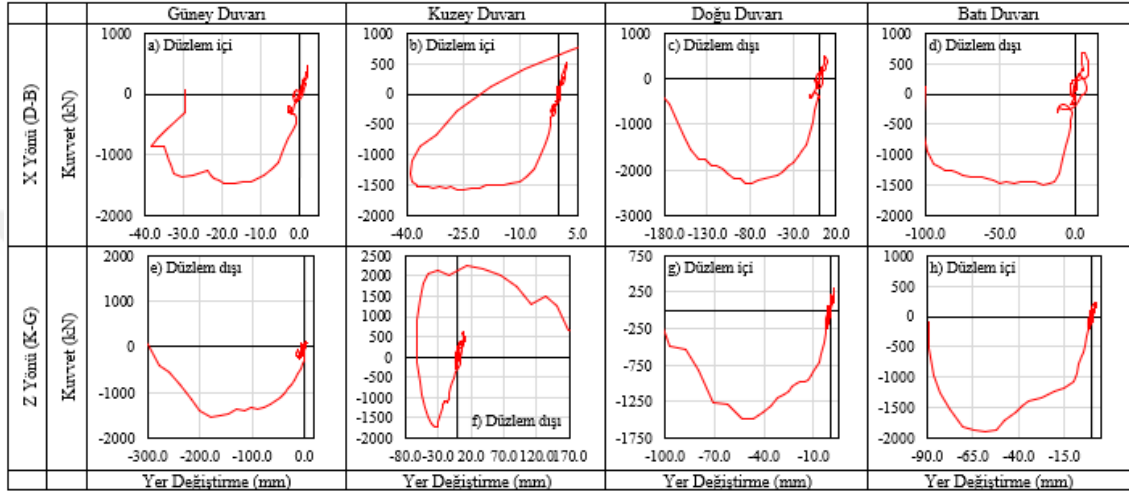
Şekil EK-1.122. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.123’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.123. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

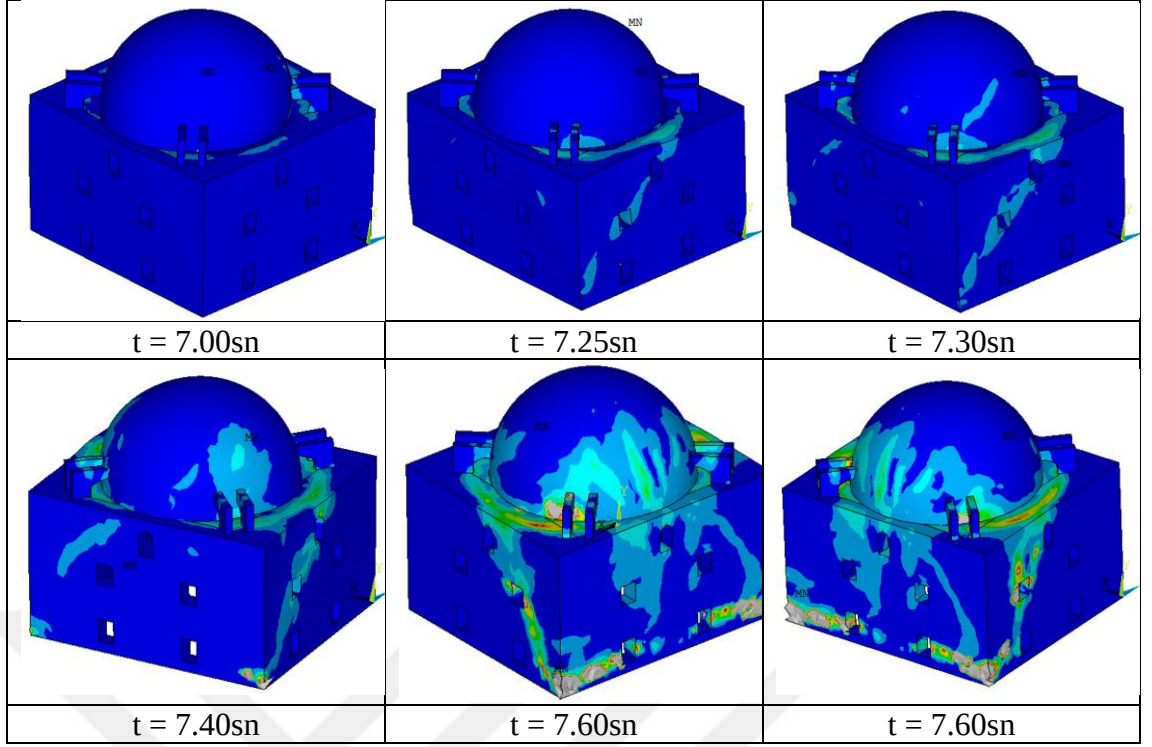
Şekil EK-1.124’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.124. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

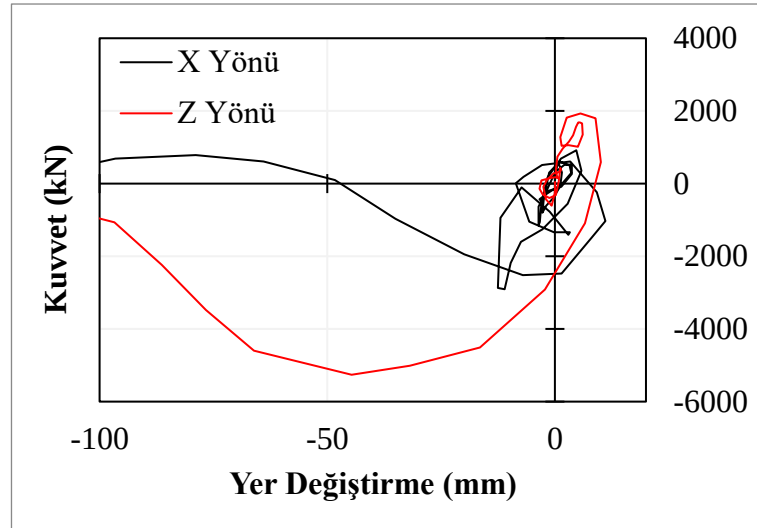
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.125’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00’inci saniyeye kadar cami elastik davranış sergilemektedir. Bu saniyeden sonra caminin doğu duvarında kubbe-duvar birleşiminden başlayarak doğu-güney duvar birleşimine doğru çatlak hattı belirlemeye başlamıştır. Yer hareketinin etkisiyle bu çatlak hattının aynısı batı duvarında da oluşmaktadır. Duvar ve kubbenin birleşim yerlerinde 15 mm mertebelerine ulaşan çatlak açıklıkları sebebiyle kubbenin güney duvarı kısmında ciddi hasarlar gözlemlenmektedir. Ayrıca doğu ve batı duvarlarının üst-orta kısmında bulunan çatlak hatları güney duvarını da kapsayacak büyük bir üçgen prizma şeklinde göçmeye sebep olmaktadır. Güney duvarının tabana yakın kısımlarında meydana gelen ezilme ve kesme hasarları bu duvarın düzlem dışı olarak devrilmesine sebep olmaktadır. 2.60’uncü saniyede 30 mm açıklıktaki çatlaklar caminin bu kısmında göçtüğünü göstermektedir.



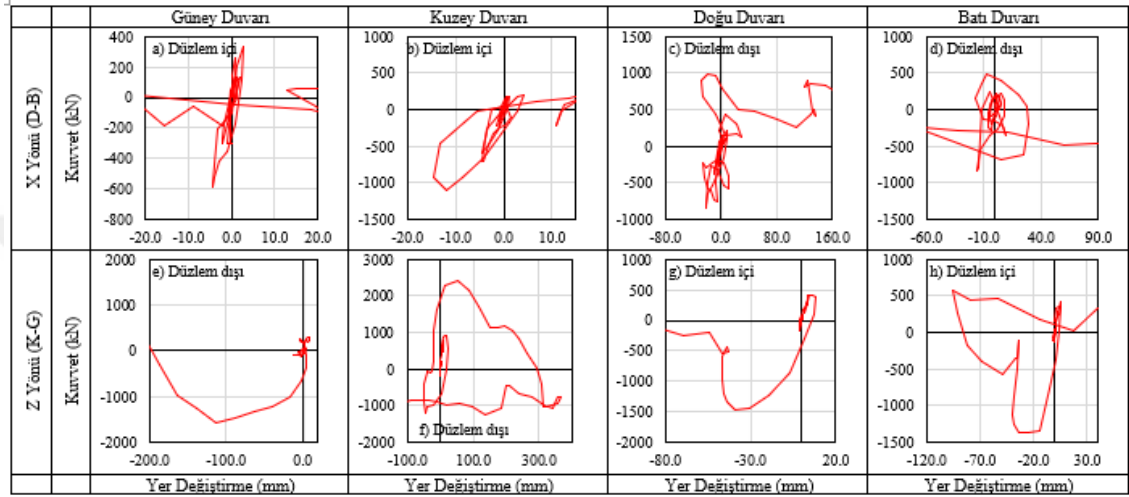
Şekil EK-1.125. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.126’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.126. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

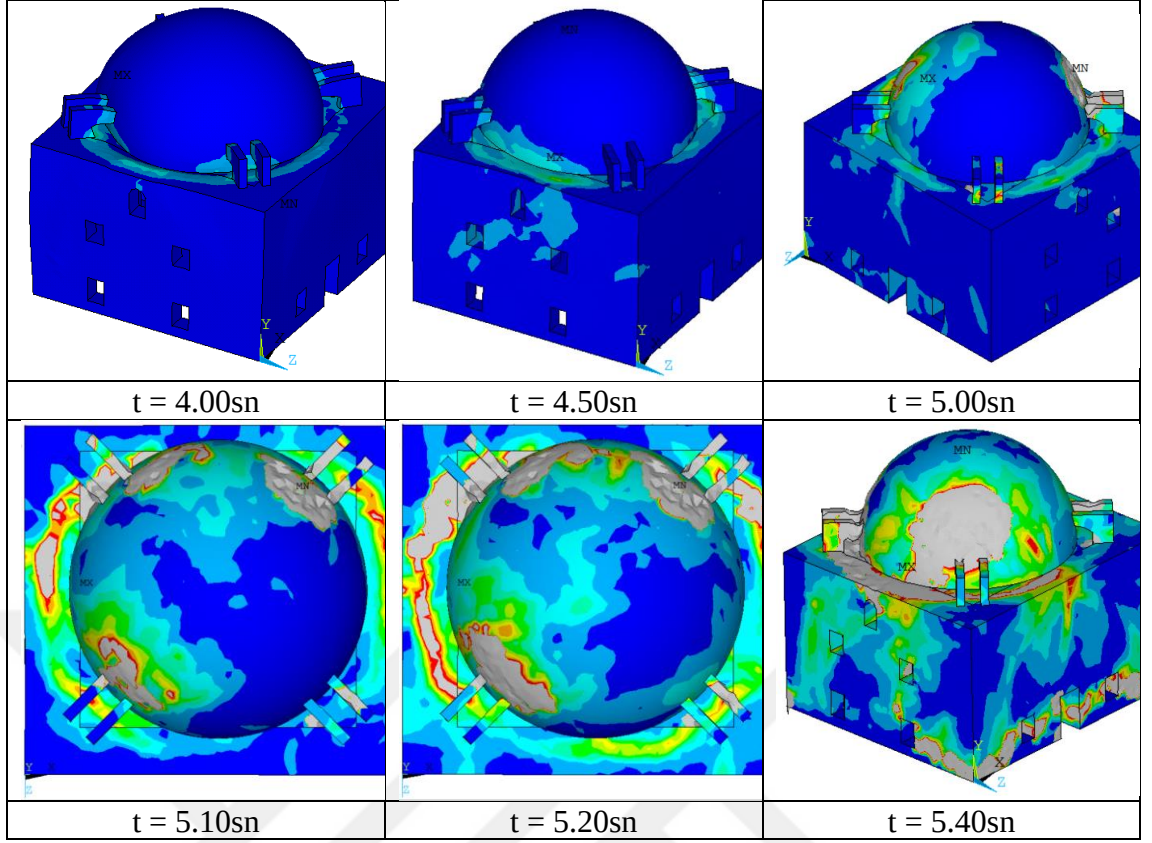
Şekil EK-1.127’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.127. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

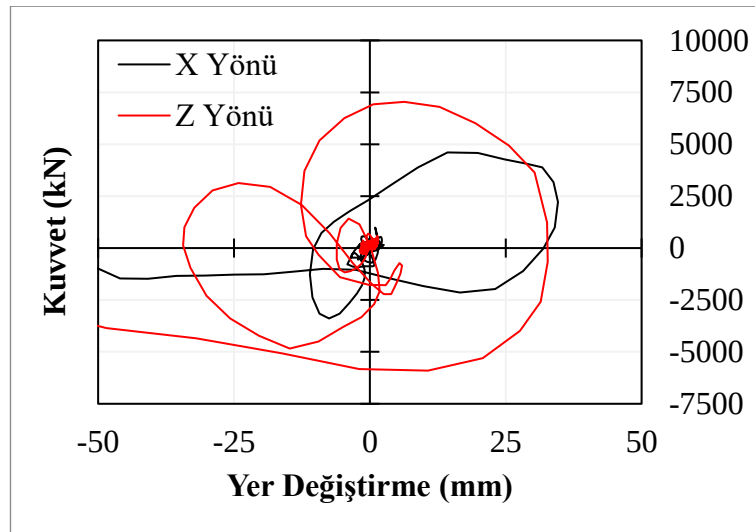
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.128’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.50’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının doğu duvarlarında kubbe çevresinden üst pencerelere doğru çatlaklar görülmektedir. 5.00’üncü saniyede yapının kubbe çevresinden ve kubbesinden kalıcı derin çatlak kümeleri gözlemlenmektedir. Bu çatlak yaklaşık olarak 20-25 mm arasında olduğu görülmektedir. Yapının yıkılma mekanizması birçok noktada hasar kümelerinin bir araya gelmesi ile topluca göçme olarak nitelendirilebilir. Bu durum yer hareketi karakteristiğinden kaynaklanmaktadır.



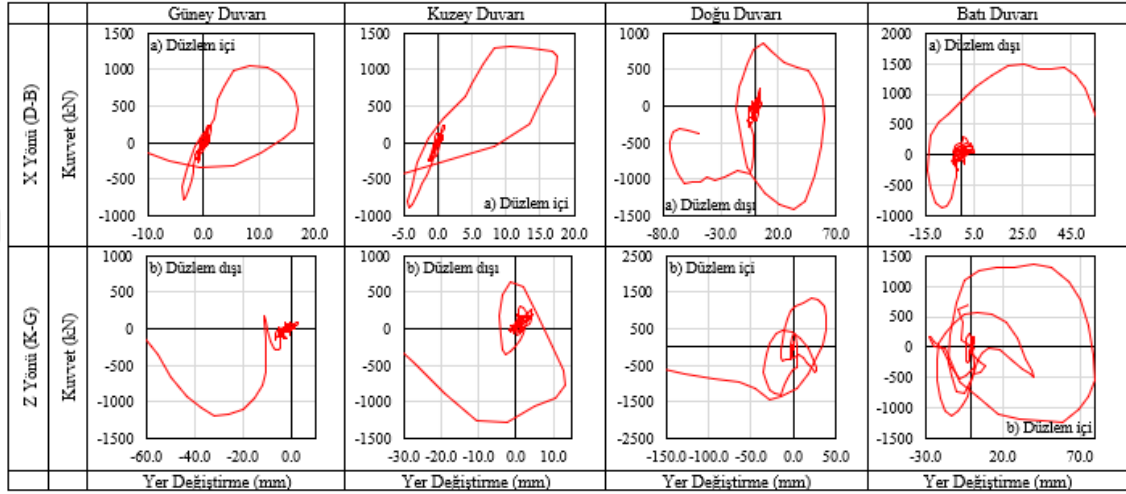
Şekil EK-1.128. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.129’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.129. Ilgın Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

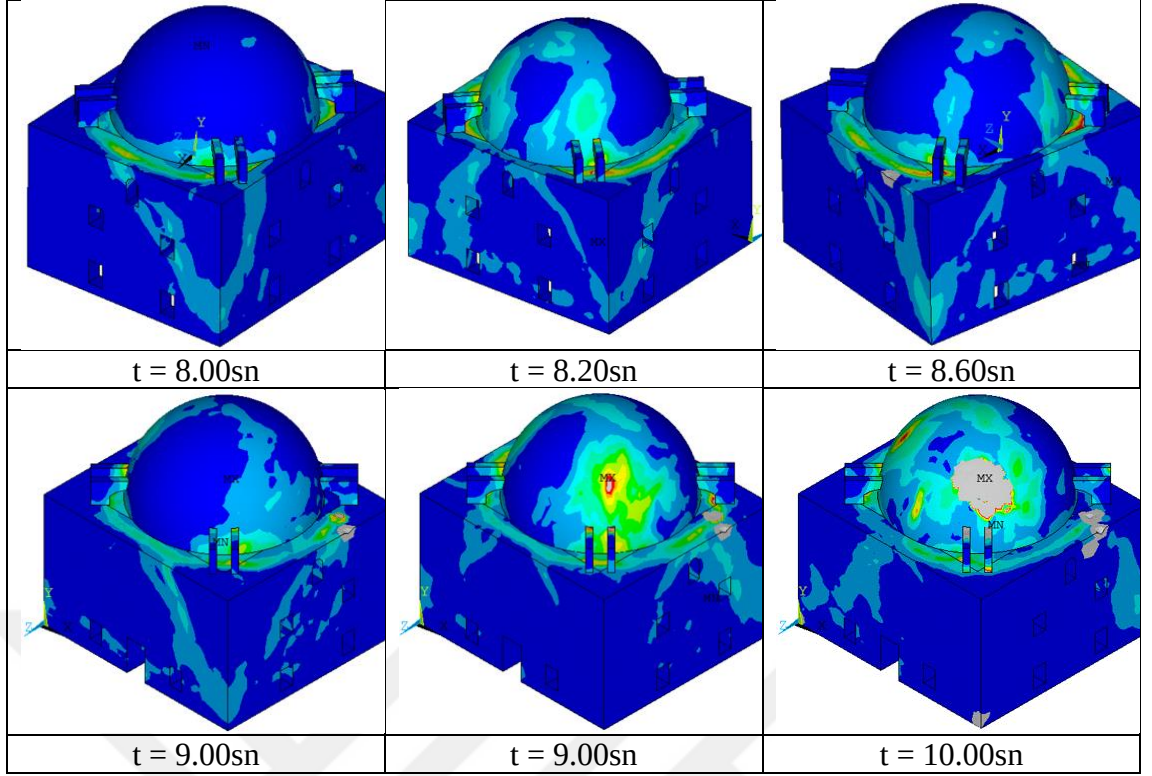
Şekil EK-1.130’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.130. Ilgın Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

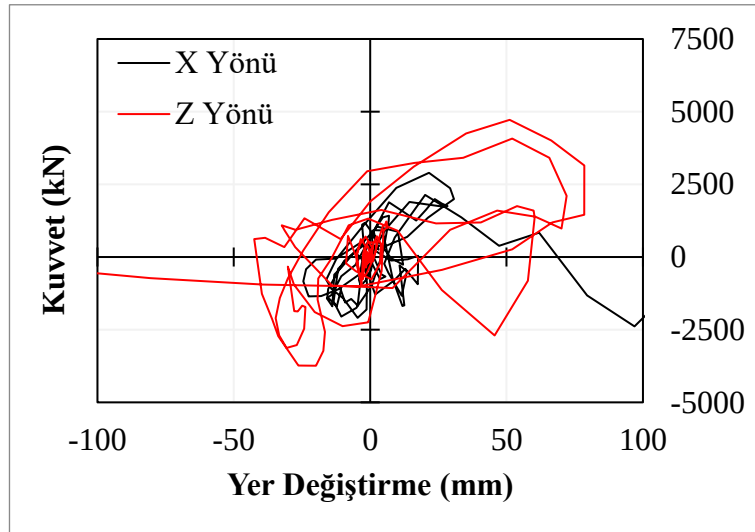
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.131’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 8.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Bu zaman diliminde caminin güney batı köşesinde V şeklinde çatlak hatları meydana gelmektedir. 3 mm mertebelerinde olan bu çatlak hatları camide yıkıcı bir hasar oluşturmamasına karşın başlangıç rijitliğini etkilediği söylenebilir. Yer hareketinin etkisi ile caminin diğer köşelerinde de benzer hasar mekanizmaları gözlemlenmektedir. Ayrıca bu hasarlar ile beraber caminin kubbesi de önemli yer değiştirmelere maruz kalmaktadır. Duvar kubbe birleşimi ve kubbe de 20 mm genişliğe ulaşan çatlaklar gözlemlenmektedir. Yer hareketi cami duvarlarında ağır hasara sebep olduğu görülmektedir. 10.00’inci saniyede caminin kubbesinde meydana gelen ağır hasar gözlemlenmektedir. Yer hareketi çevrimleri sırasında farklı yönlerde meydana gelen çatlaklar kubbenin cami içine doğru göçmesine sebep olmaktadır.



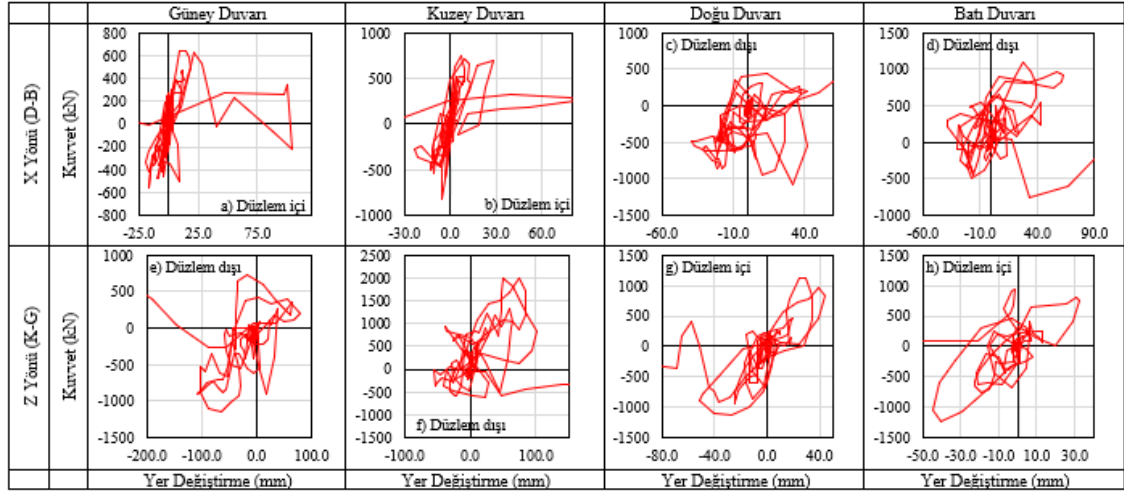
Şekil EK-1.131. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.132’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.132. Ilgın Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.133’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

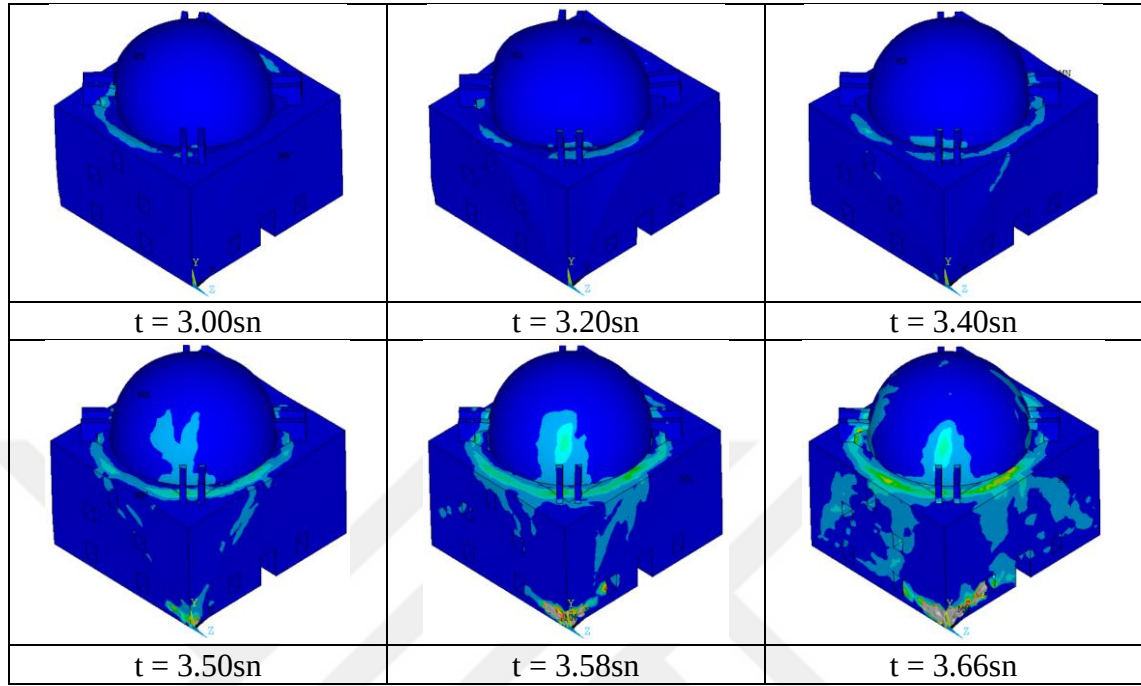


Şekil EK-1.133. Ilgın Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

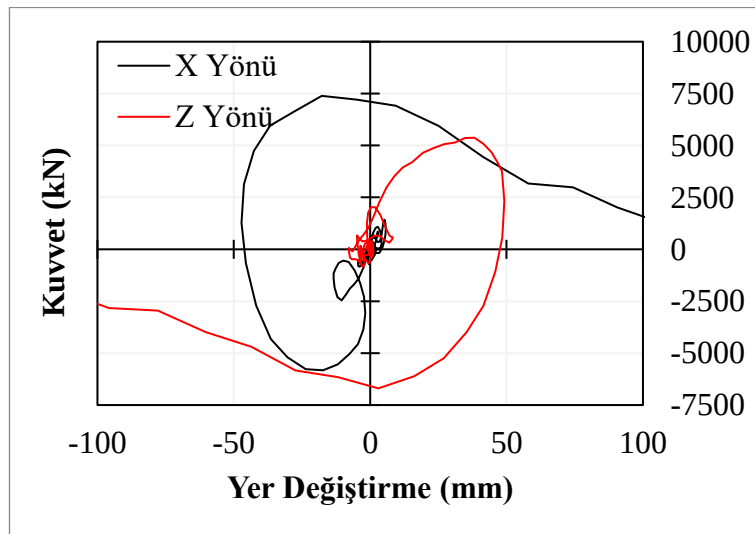
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.134’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.20’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.40’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının kuzey duvarlarında üst pencere boşlukları çevresinde çatlaklar görülmeye başlamıştır. Bu çatlaklar 2.0-2.5 mm mertebelerindedir. 3.50’üncü saniyede yapının doğu ve kuzey duvarındaki çatlaklar genişleyerek kubbeden, kuzey-doğu köşesinde doğru diyagonal olarak ilerlemektedir. 3.58’inci saniyede yer hareketi çevriminden dolayı çatlaklar yapının kuzey-doğu köşesinde yoğunlaşmaya başlamıştır. Bu zaman diliminde sonra yapı göçme mekanizmasına girmiş ve Şekil 11’de görüldüğü üzere doğu ve kuzey duvarlarının kubbeden başlayarak bu duvarların kesişim bölgelerine diyagonal olarak ilerleyen derin çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar sebebiyle

yapının kuzey-doğu köşesinde göçme meydana gelmiştir. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 45-50 mm bir açılma gözlemlenmektedir.



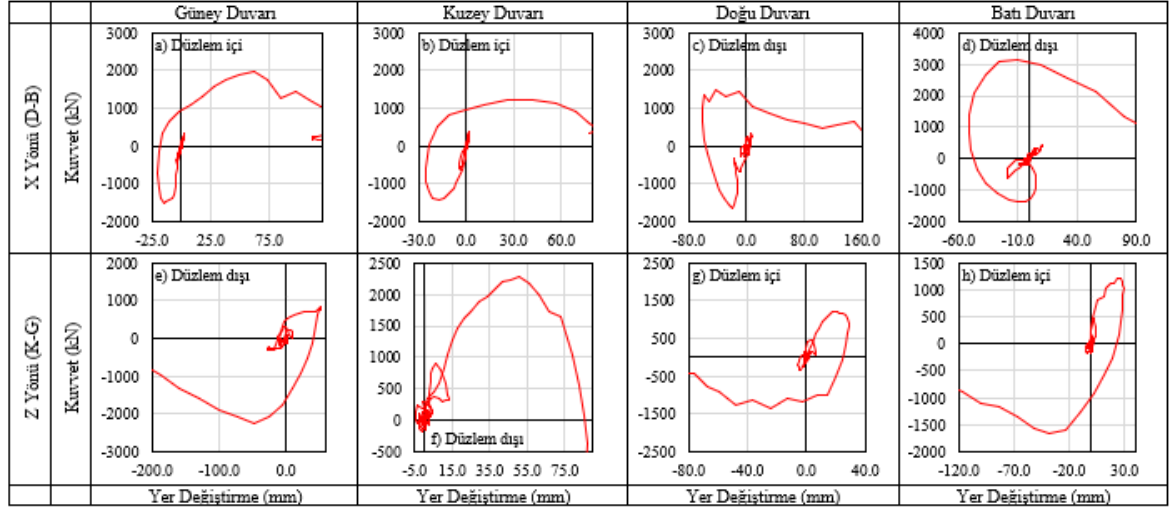
Şekil EK-1.134. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.135’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.135. Ilgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.136’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.136. İlgın Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.9. Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami Analizleri ($E=200f_c$)

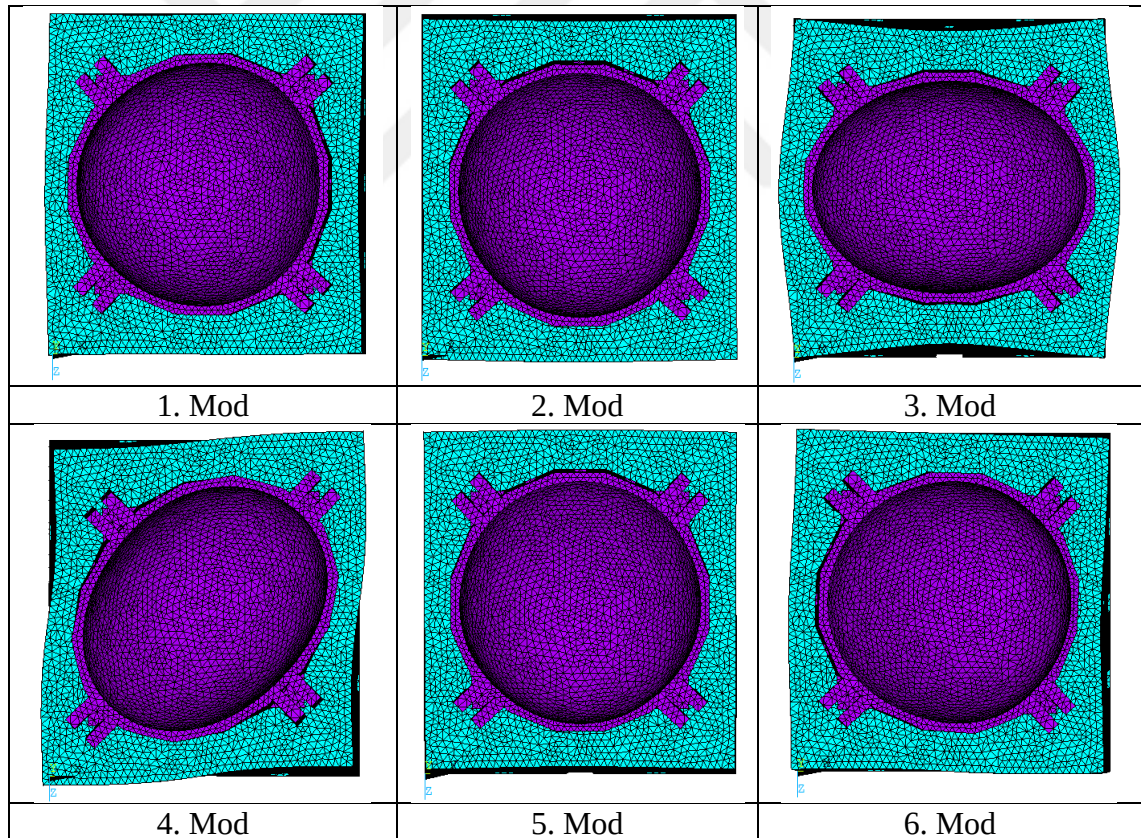
1.9.1. Modal analiz

Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami’nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.9’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.9. Cenabi Ahmet Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	2.91	0.39E-02	0.24E-06	0.67	0.32
2	2.94	0.67	0.22E-06	0.38E-02	0.60
3	3.81	0.99E-06	0.24E-05	0.37E-05	0.60
4	4.68	0.79E-04	0.66E-05	0.14E-04	0.85
5	4.8	0.38E-03	0.47E-05	0.14E-04	0.85
6	5.61	0.61E-06	0.66E-03	0.32E-02	0.86

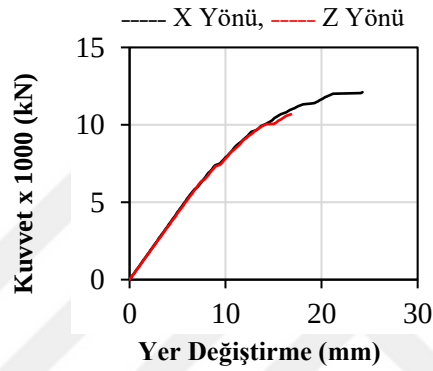
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.137'da yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3636 tondur.



Şekil EK-1.137. Cenabi Ahmet Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.9.2. İtme analizi

Şekil EK-1.138’de Cenabi Ahmet Paşa Cami’nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 7540 kN, 8,7 mm; Z doğrultusunda ise 7150 kN, 8,25 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 14766 kN, Z doğrultusunda 14171 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.138. Cenabi Ahmet Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$).

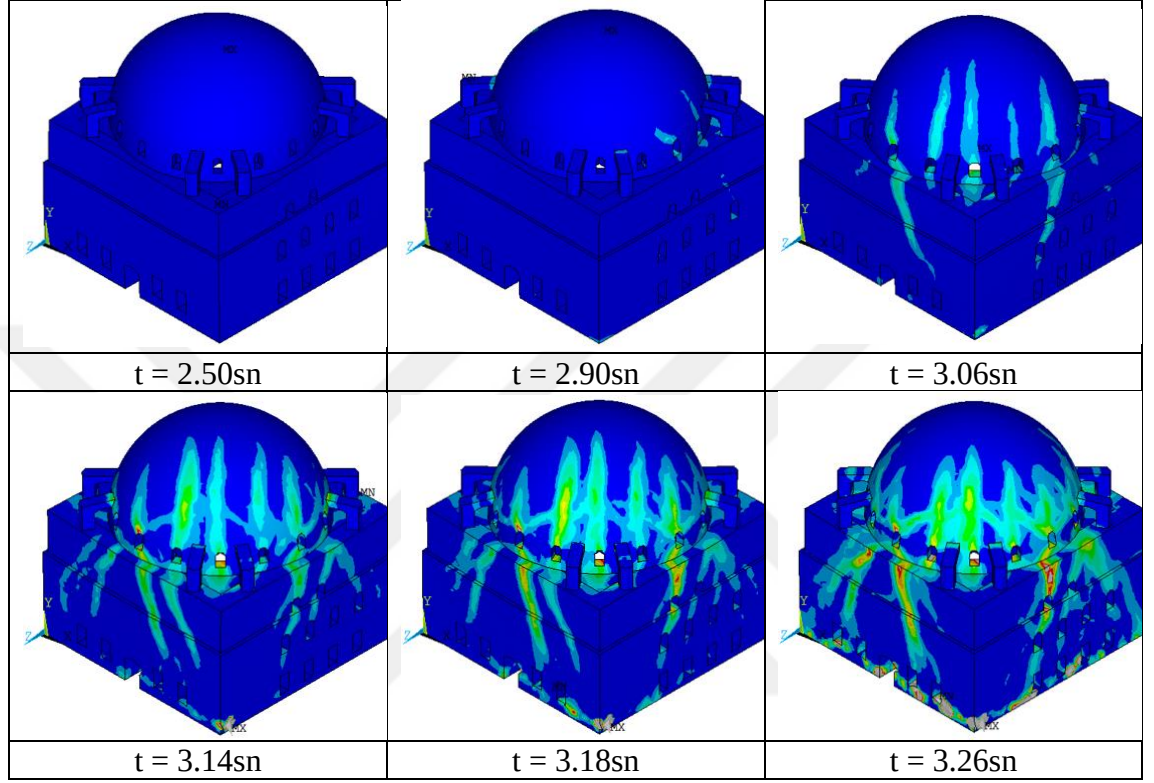
1.9.3. Dinamik analizler

Ankara Cenabi Ahmet Paşa Cami’sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

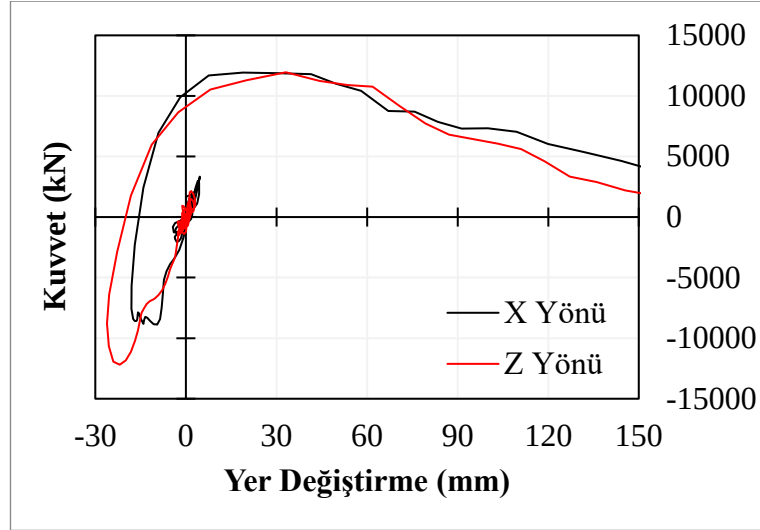
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.139’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.50’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 2.90’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumaktadır. Yer değiştirmeler yapının güney duvarında kubbe ile duvarın birleştiği bölgede yoğunlaşmaktadır. Yer hareketinin çevrimi

sonrasında yer değiştirmeler 3.06'inci saniyeden sonra yapının kuzey ve batı duvarlarında görölmektedir. Kuzey ve batı duvarlarının kubbe ile birleştiği noktalardan başlayan ve bu iki duvarların birleşimine doğru ilerleyen diyagonal yer değiştirmeler neticesinde yapı göçmüştür.



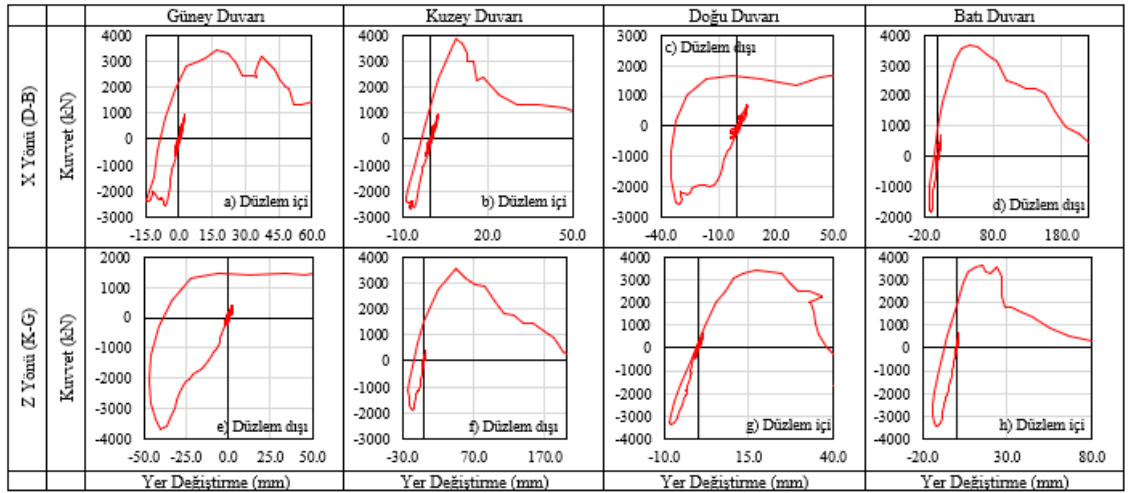
şekil EK-1.139. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

şekil EK-1.140'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.140. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

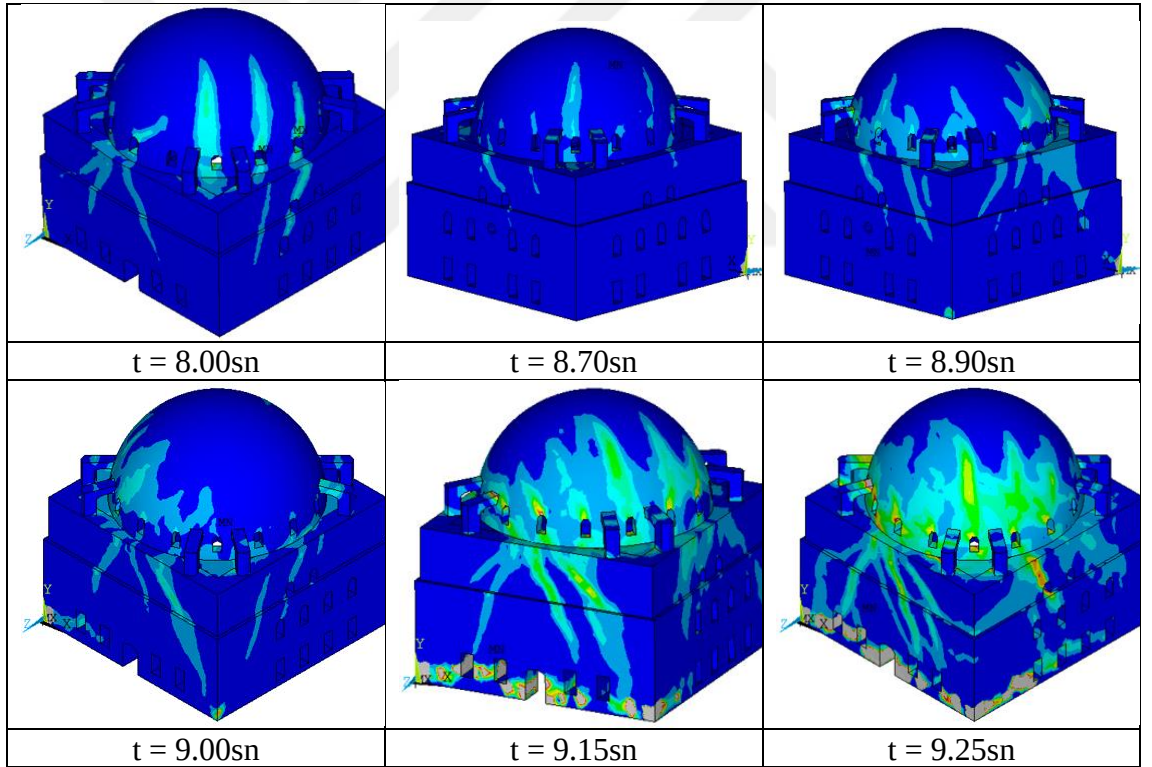
Şekil EK-1.141’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.141. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

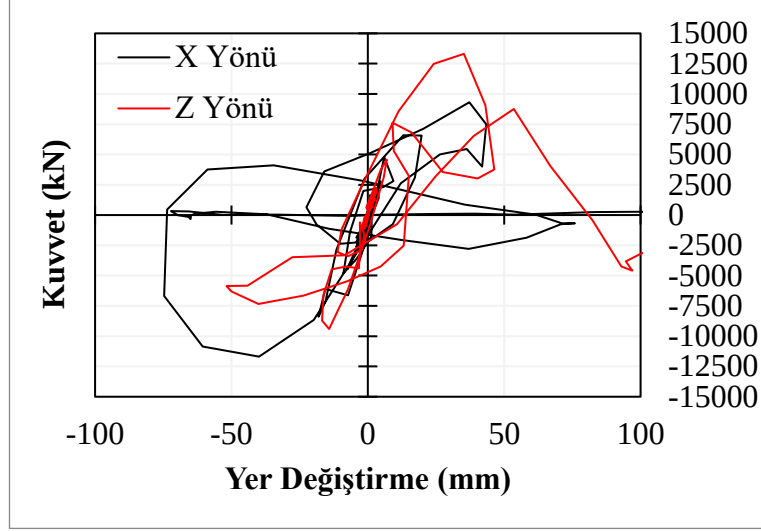
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.142’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’inci saniyeye kadar cami elastik davranış sergilemektedir. Bu saniyede caminin kubbesinde kılcal çatlak hatları görülmektedir. Yer hareketinin çevrimine bağlı olarak 3.70’inci saniyede caminin kubbesi hariç bir çatlak hattı görülmemektedir. Ancak önceki çevrimlerden kaynaklanan çatlakların olduğunu göz önüne almak gerekir. Caminin kuzey duvarında kesme gerilmesinden kaynaklı zemine yakın yerlerde meydana gelen ezilmeler ve kaymalar sebebiyle düzlem dışı davranış görülmektedir. Bu düzlem dışı davranış sırasında caminin doğu ve batı duvarlarının pencere boşlukları sırasında ağır çatlak hatları olduğu görülmektedir. Caminin güney duvarı ve kubbesinin beraber göçtüğü kabul edilebilir.



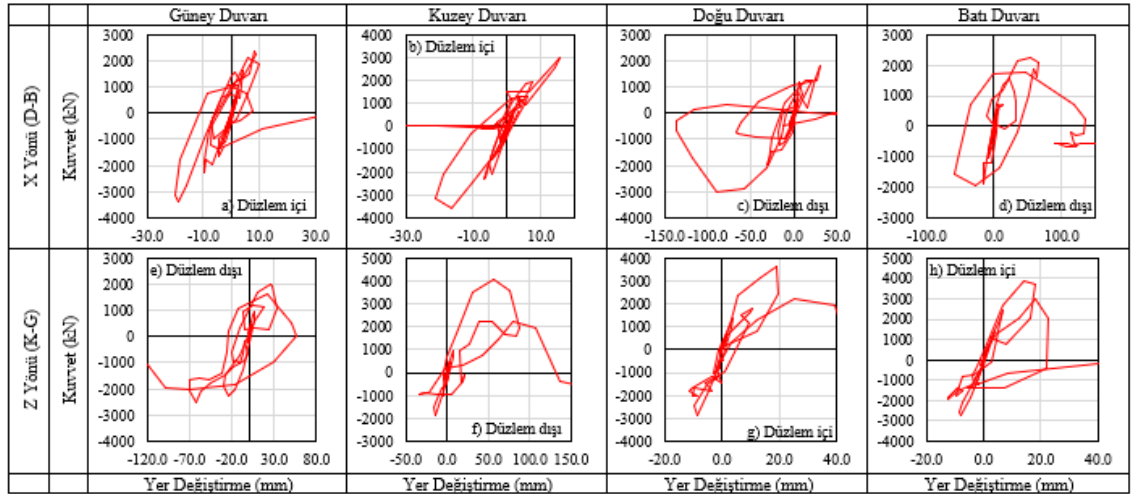
Şekil EK-1.142. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.143’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.143. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

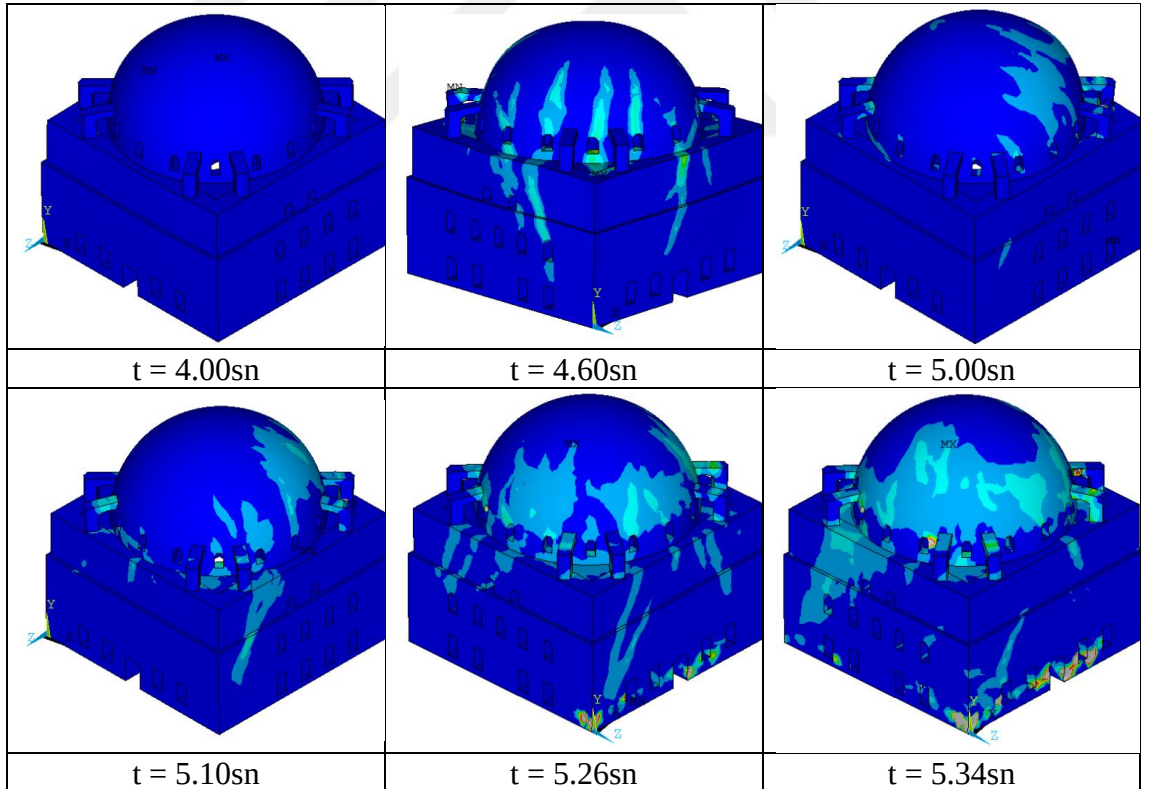
Şekil EK-1.144’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.144. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

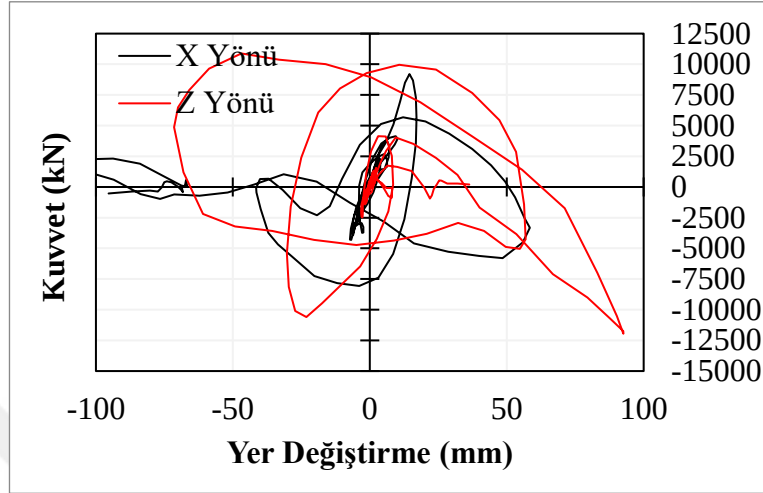
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.145’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.60’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının doğu ve kuzey duvarlarında kubbeden pencere boşluklarına doğru ilerleyen çatlak hatları görülmektedir. Bu çatlaklar 10.0 – 12.5 mm arasında olduğu görülmektedir. Yer hareketi çevriminden dolayı 5.10’inci saniyede çatlaklar batı duvarında yoğunlaşmaktadır. Ancak yer hareketi etkisiyle bu saniyeden sonra çatlak yoğunluğu doğu ve kuzey duvarları ile kubbede yoğunlaşarak yapının göçmesine sebep olmaktadır. Yapının yıkılma mekanizması birçok noktada hasar kümelerinin bir araya gelmesi ile topluca göçme olarak nitelendirilebilir. Bu durum yer hareketi karakteristiğinden kaynaklanmaktadır.



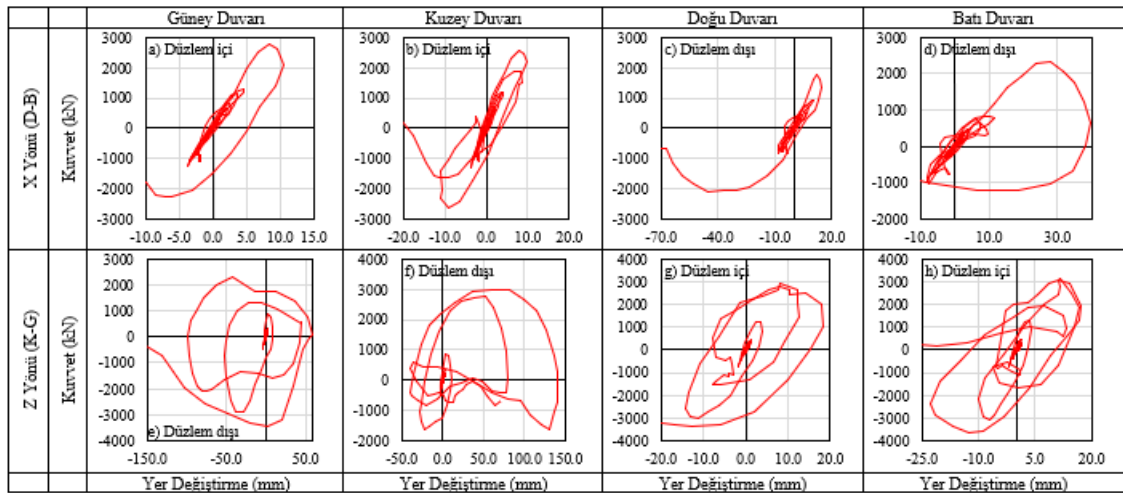
Şekil EK-1.145. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.146’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.146. Cenabi Ahmet Paşa ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

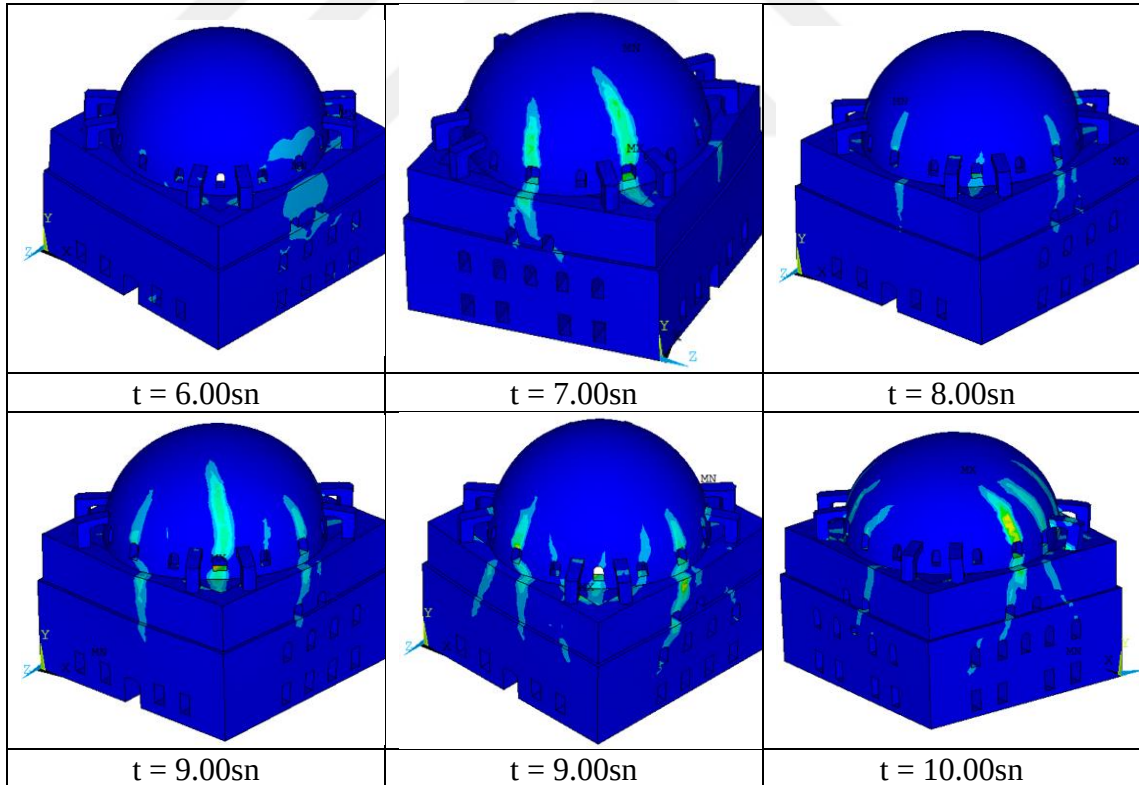
Şekil EK-1.147’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.147. Cenabi Ahmet Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

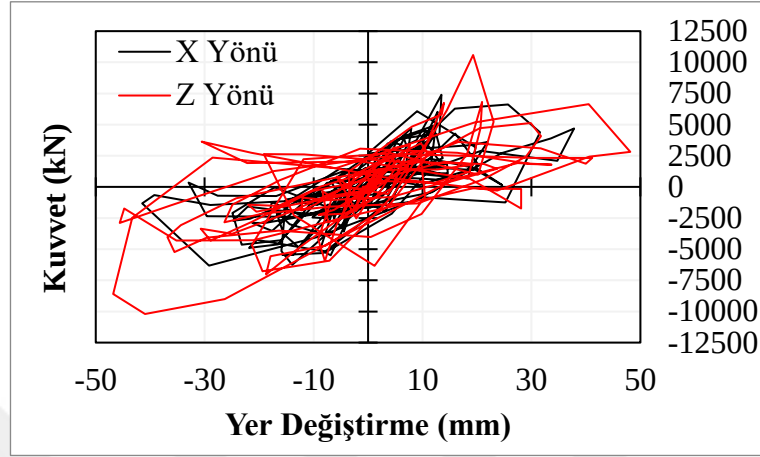
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.148’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 6.00’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. Yer hareketine bağlı olarak yapının farklı bölgelerinde çatlak hatları oluşmaktadır. 7.00’inci saniyede doğu duvarının kubbe penceresini de kapsayacak şekilde ortadan çatladığı görülmektedir. Ayrıca kubbe ile duvar birleşimlerinin de hasara uğradığı görülmektedir. Yapının duvarlar ile kubbenin birleştiği bölgede bulunan pencere boşlukları hasara oldukça müsait olduğu görülmektedir. Bu hasar hattı kubbe tepesine doğru ilerleyerek yer hareketinin sonlarına doğru kubbenin cami içine doğru göçmesine ya da ağır hasar almasına sebep olmaktadır. Yer hareketi, caminin duvarlarında göçme medyana gelmemiştir ancak oluşan çatlaklar başlangıç rijitliği önemli şekilde değiştirtmiştir. Cami duvarları tamamen göçmese de ağır hasar aldığı söylenebilir.



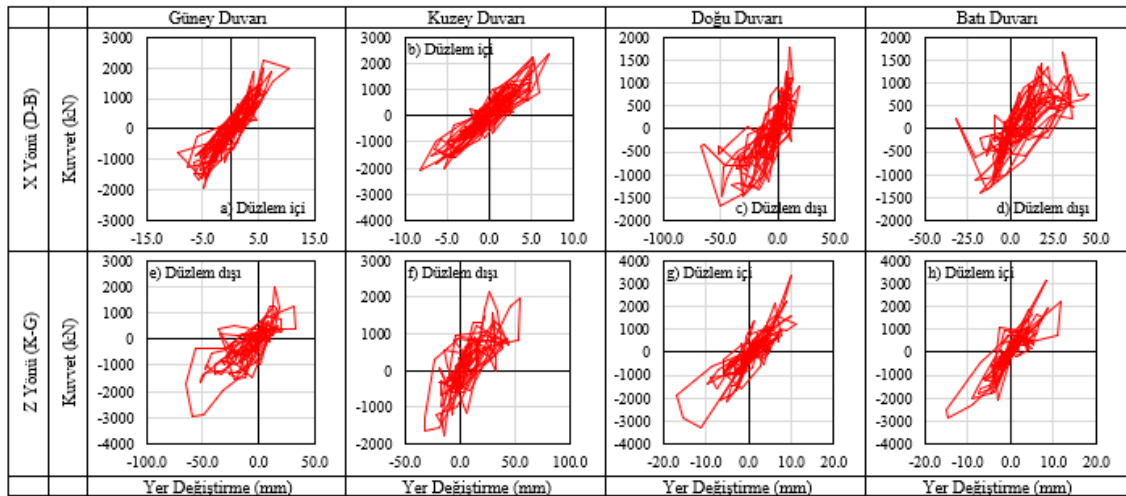
Şekil EK-1.148. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.149’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.149. Cenabi Ahmet Paşa ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

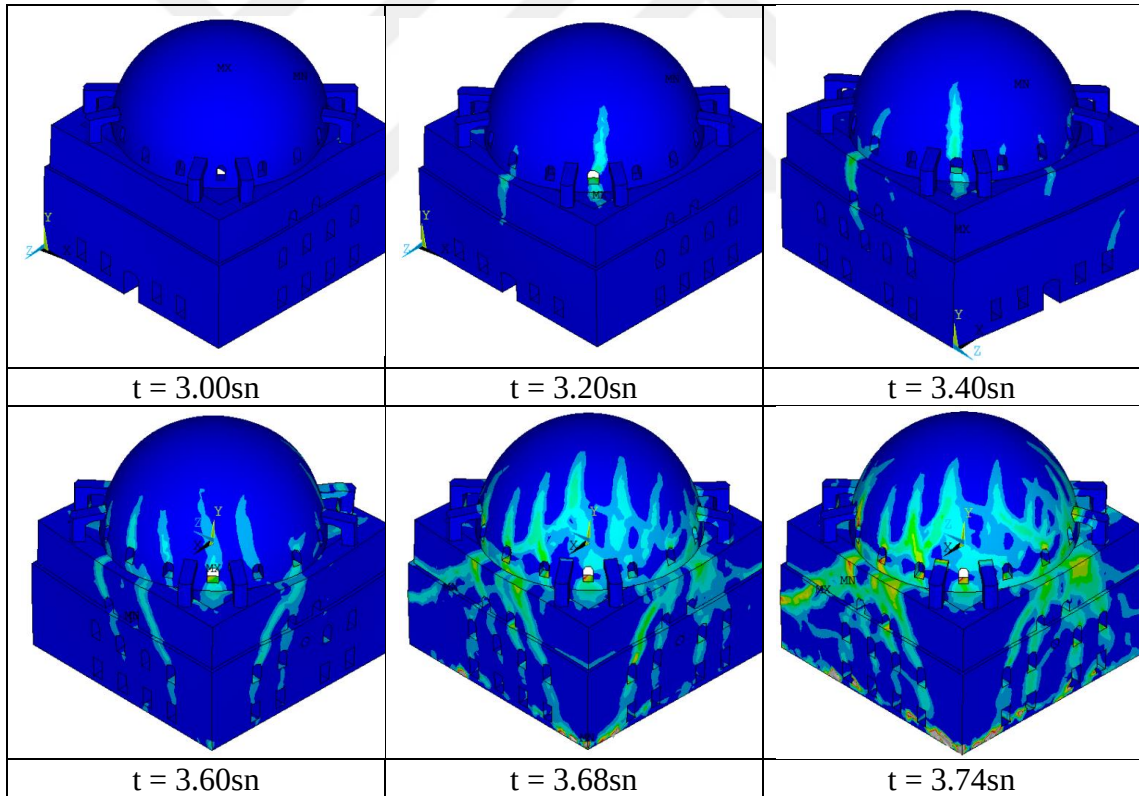
Şekil EK-1.150’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.150. Cenabi Ahmet Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

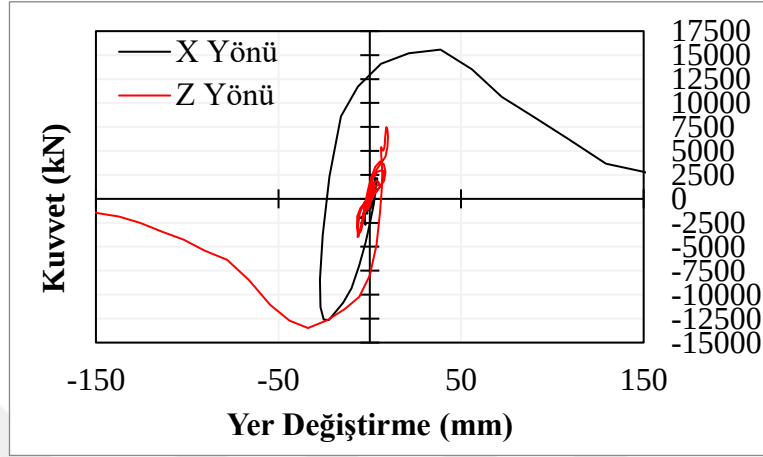
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.151’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.20’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede kubbenin kuzey-batı köşesinde çatlak hattı gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar 2.5-3.0 mm mertebelerindedir. 3.50’üncü saniyede yapının güney ve batı duvarlarında kubbe pencerelerinden duvar pencerelerine doğru uzanan diyagonal çatlak hatları gözlemlenmektedir. Bu çatlak hatlarının büyümesi ile yapı göçme mekanizmasına girmiştir. Yapının güney ve batı duvarlarında derin diyagonal çatlaklar oluşarak yapı güney-batı köşesinden göçmüştür. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 25-30 mm bir açılma gözlemlenmektedir.



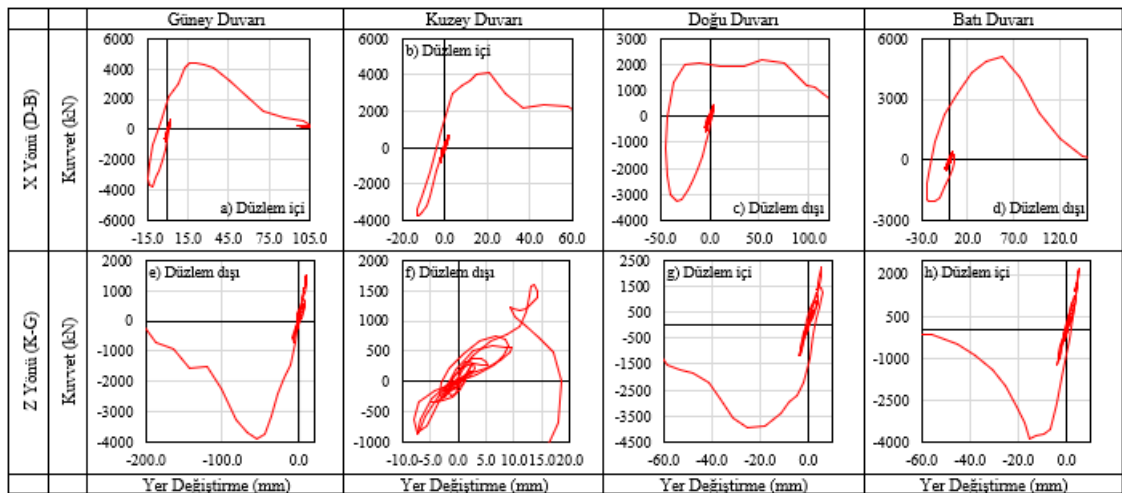
Şekil EK-1.151. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.152’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.152. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.153’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.153. Cenabi Ahmet Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.10. İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami Analizleri ($E=200f_c$)

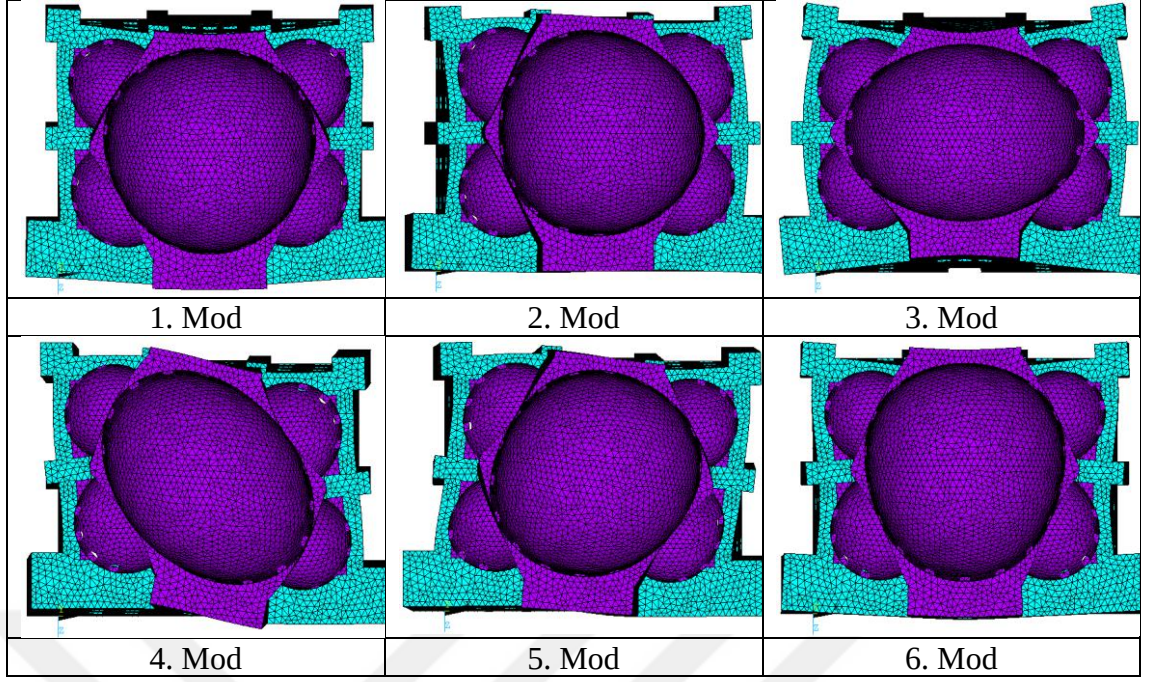
1.10.1. Modal analiz

İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.10'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.10. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	1.55	0.98E-07	0.16E-03	0.60	0.29
2	1.91	0.67	0.14E-10	0.15E-06	0.52
3	2.21	0.37E-07	0.25E-02	0.15E-02	0.57
4	2.75	0.17E-02	0.11E-07	0.36E-07	0.78
5	2.86	0.13E-02	0.97E-10	0.17E-06	0.78
6	3.34	0.13E-07	0.43E-02	0.35E-05	0.78

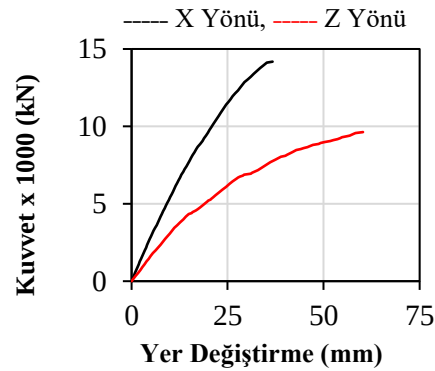
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.154'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 5088 tondur.



Şekil EK-1.154. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.10.2. İtme analizi

Şekil EK-1.155'de Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 6800 kN, 12 mm; Z doğrultusunda ise 4500 kN, 15 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 14180 kN, Z doğrultusunda 9631 kN olarak belirlenmiştir.



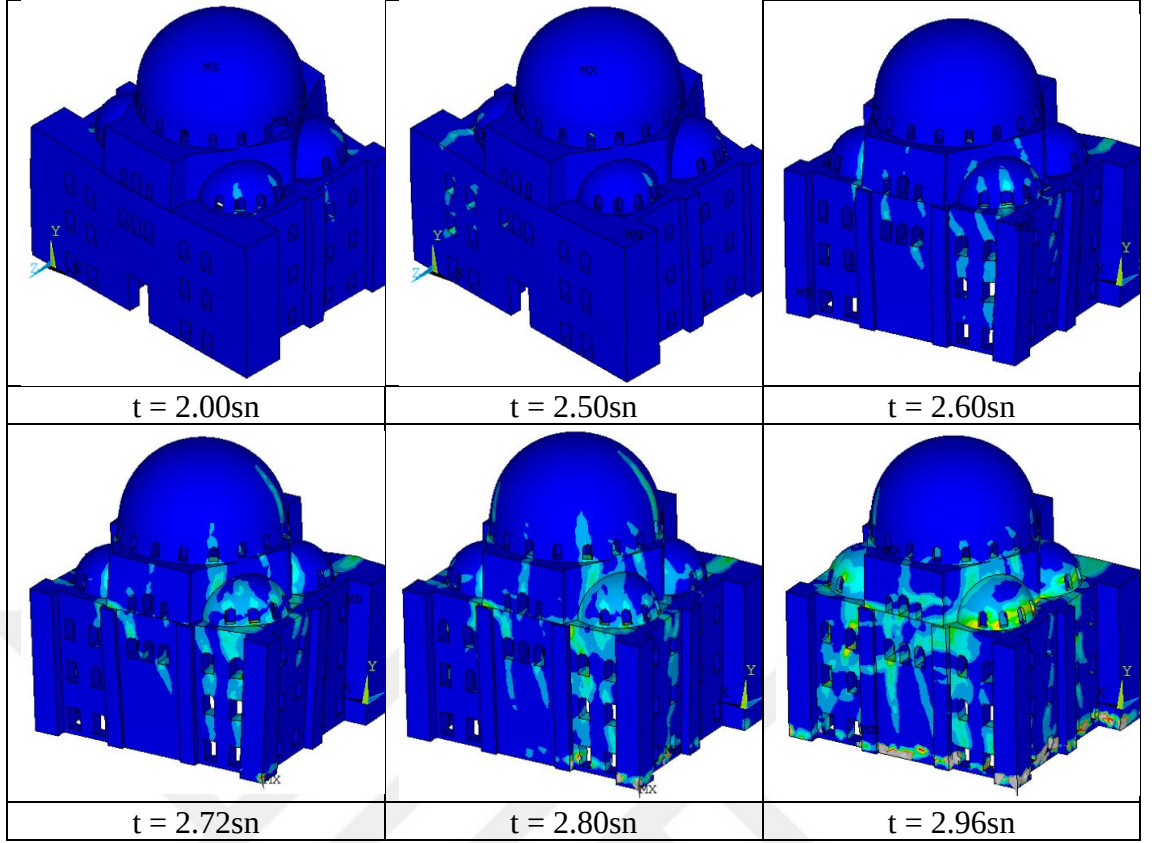
Şekil EK-1.155. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$).

1.10.3. Dinamik analizler

İstanbul Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

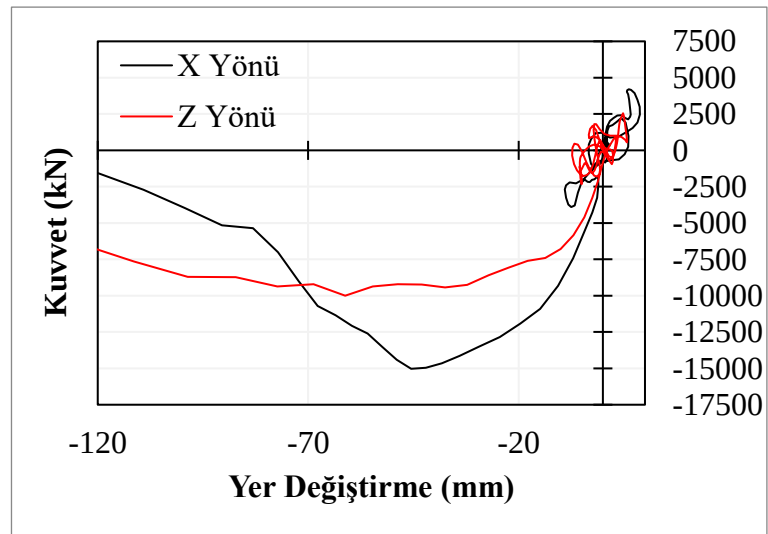
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.156'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00'inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 2.50'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 2.60'cı saniyede yapının güney duvarının batı duvarı kısmındaki pencere çevrelerinde diyagonal çatlak hatları gözlemlenmektedir. Yer hareketinin ilerleyen adımlarında güney ve batı duvarlarındaki çatlak hatlar genişleyerek yapının güney-batı köşesinden göçmesine sebep olmaktadır. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 25-30mm bir açılma gözlemlenmektedir.



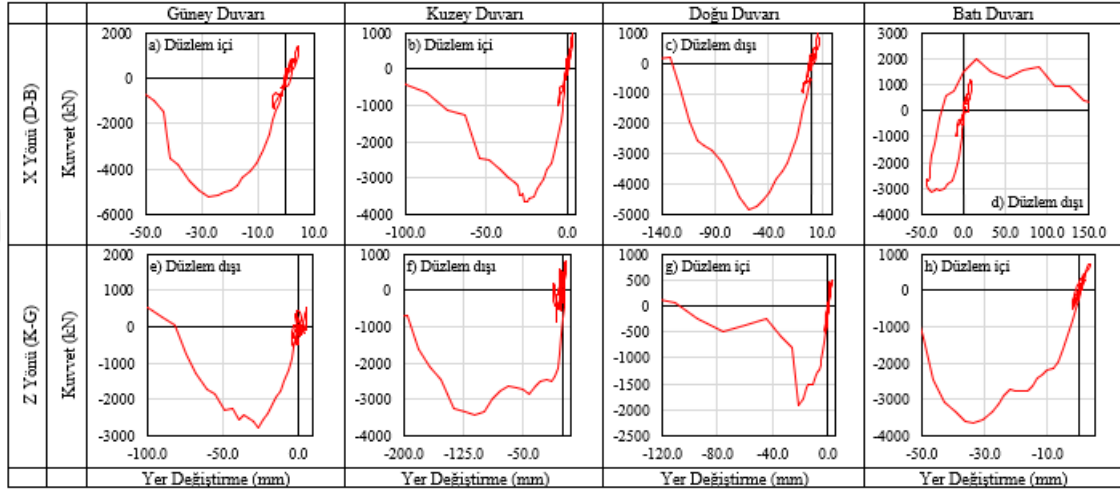
Şekil EK-1.156. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.157’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.157. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

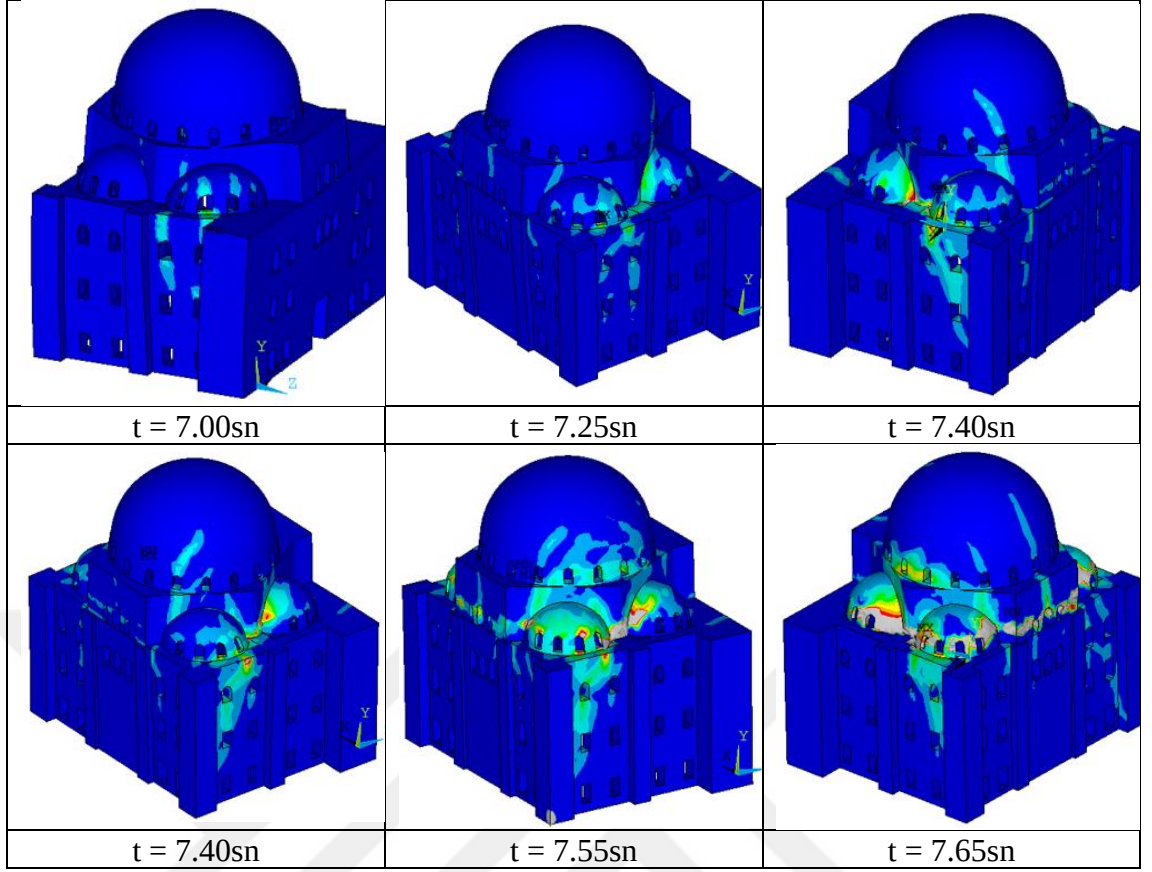
Şekil EK-1.158’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.158. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

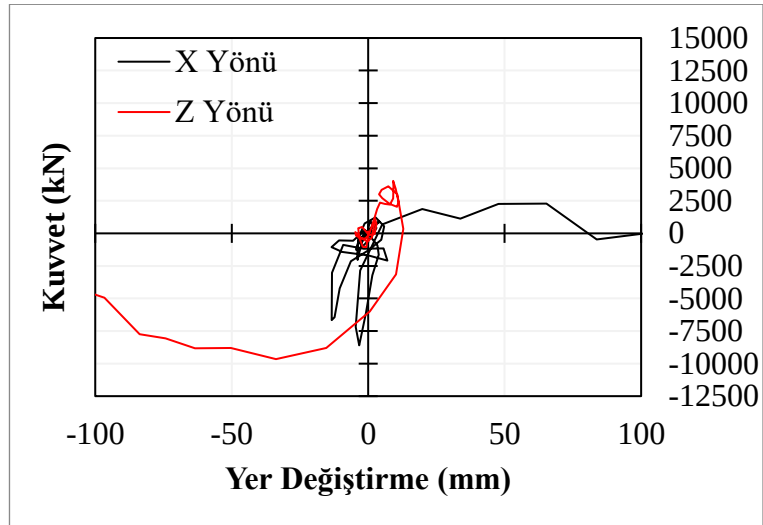
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.159’de verilmektedir. 2.40’ıncı saniyede caminin doğu ve batı duvarlarının ortasında ve kubbenin kuzey kısmını da kapsayan bir çatlak hattı görülmektedir. Bu çatlak hatları 25-30 mm mertebelerindedir. Caminin kubbe ile duvarının birleştiği kısımda doğu-batı doğrultusunda düzlem dışı davranışa bağlı olarak derin çatlaklar görülmektedir. Yapı doğu ve batı duvarlarının ortasından güney duvarının kubbe kısmını kapsayacak şekilde üçgen prizma gösteren bir yıkılmaya maruz kalmaktadır. Ayrıca yapının köşelerinde bulunan küçük yarım kubbeler de bu davranışa bağlı olarak göçtüğü söylenebilir.



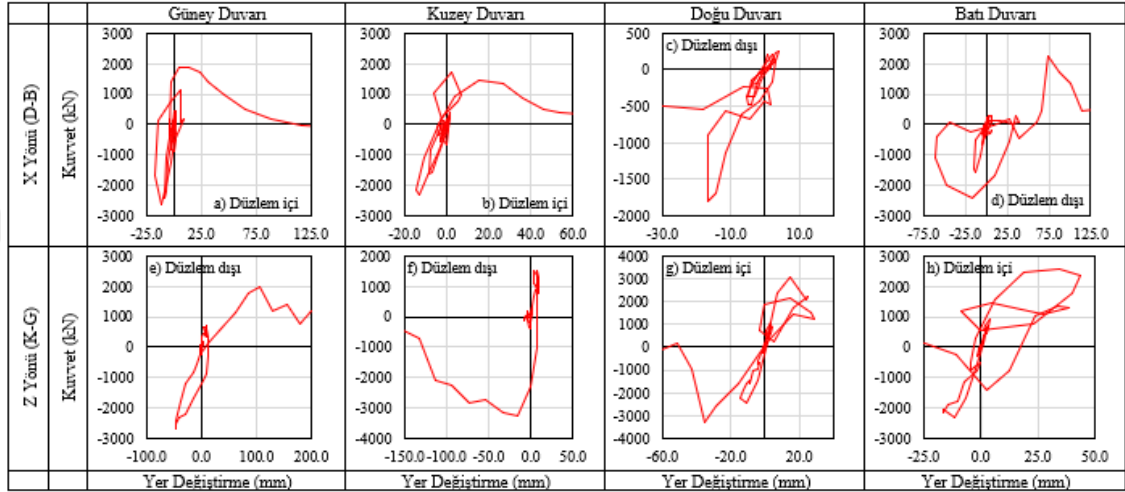
Şekil EK-1.159. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Duz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.160’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.160. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

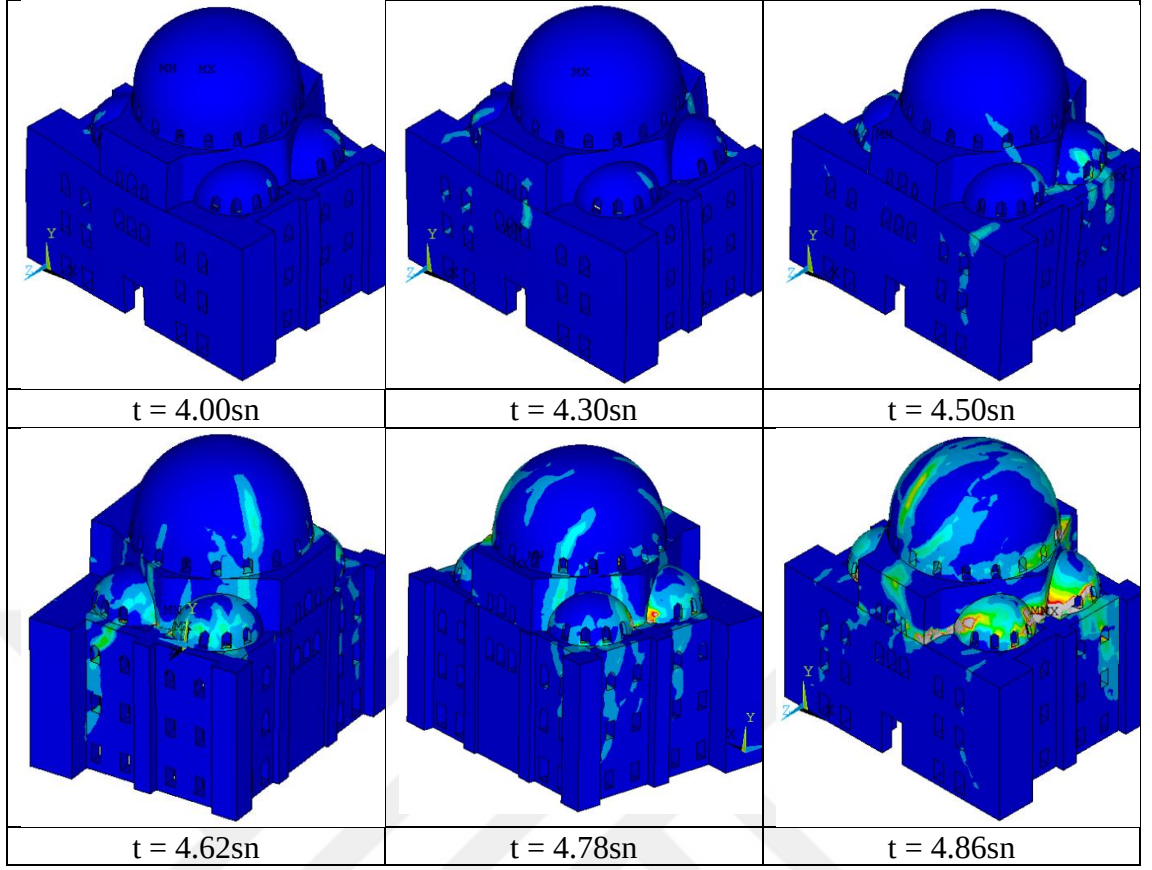
Şekil EK-1.161’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.161. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

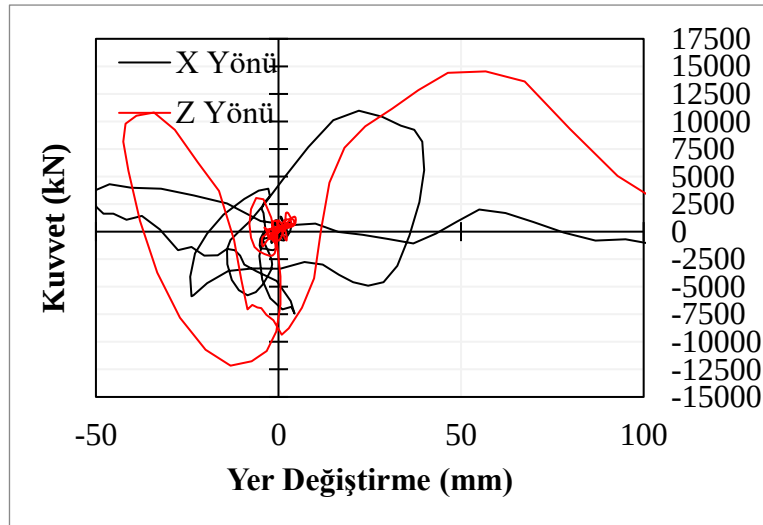
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.162’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.50’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının doğu duvarlarında kubbe çevresinden üst pencerelere doğru çatlaklar görülmektedir. 5.00’üncü saniyede yapının kubbe çevresinden ve kubbesinden kalıcı derin çatlak kümeleri gözlemlenmektedir. Bu çatlak yaklaşık olarak 20-25 mm arasında olduğu görülmektedir. Yapının yıkılma mekanizması birçok noktada hasar kümelerinin bir araya gelmesi ile topluca göçme olarak nitelendirilebilir. Bu durum yer hareketi karakteristiğinden kaynaklanmaktadır.



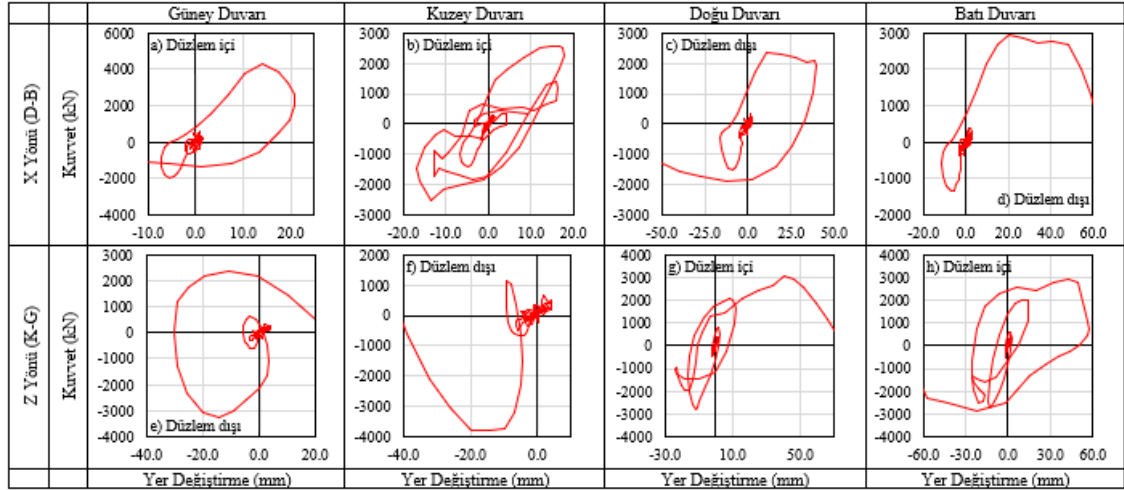
Şekil EK-1.162. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.163'da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.163. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

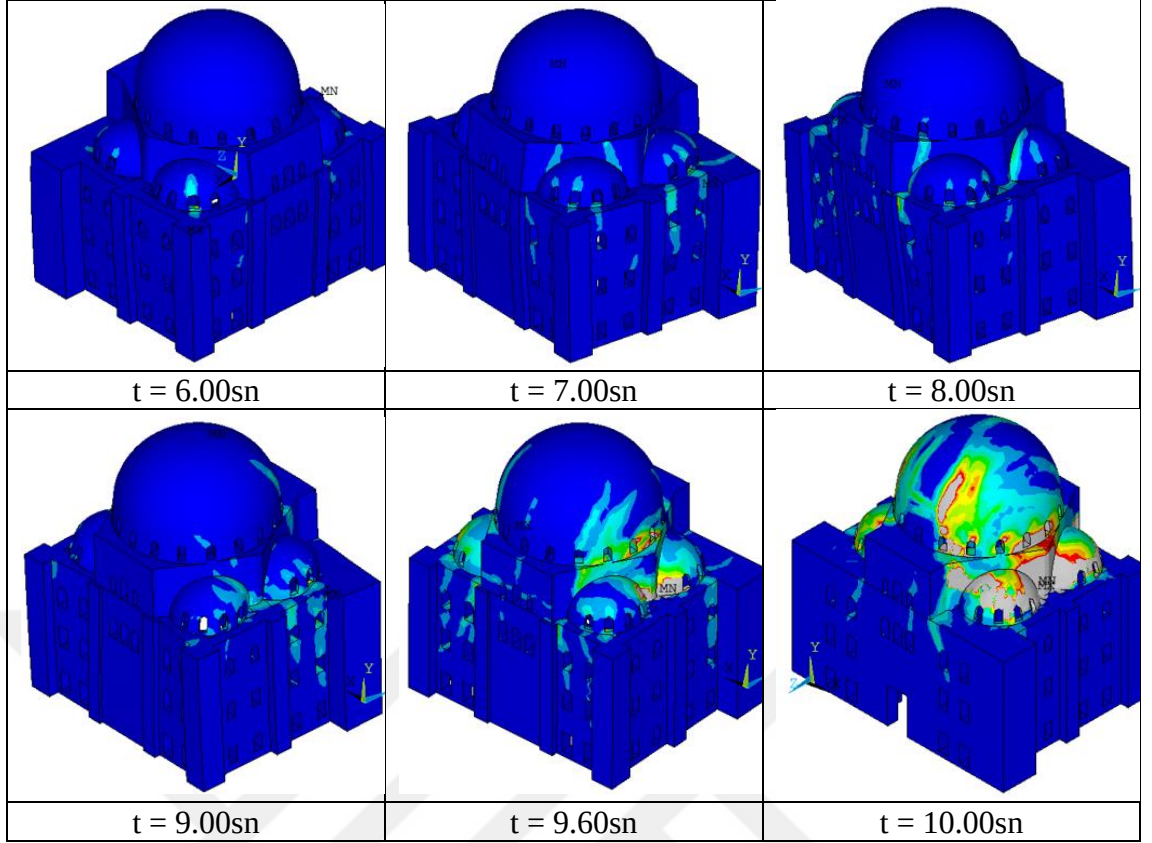
Şekil EK-1.164’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.164. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

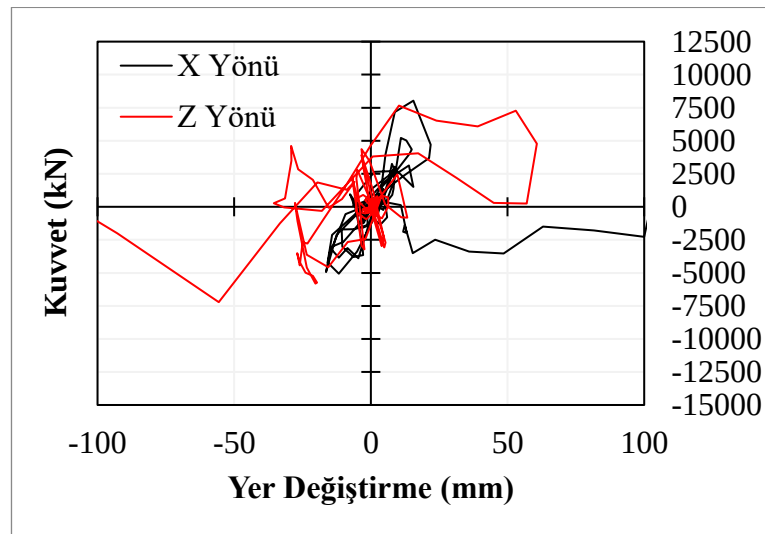
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.165’de verilmektedir. Yapı yer hareketinin özelliğine bağlı olarak farklı çevrimlerde farklı hasar mekanizmaları göstermektedir. Yapının kubbesi ile duvarlarının arasında kalan kubbe kasnağında ve kubbe pencerelerinde çatlaklar gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar yapının köşelerinde bulunan yarım kubbeleşmelerde yoğunlaşmaktadır. Yer hareketinin 10.00’inci saniyesinde yapının batı kısmında kubbenin göçtüğü görülmektedir. Farklı çevrimlerde hasar alan kubbe, çatlakların 40-50 mm genişliği ulaşmasından sonra caminin içine doğru göçtüğü söylenebilir. Cami duvarlarında net bir göçme mekanizması görünmemektedir. Ancak oluşan çatlaklar caminin başlangıç rijitliğini, belirgin şekilde değiştirdiği söylenebilir.



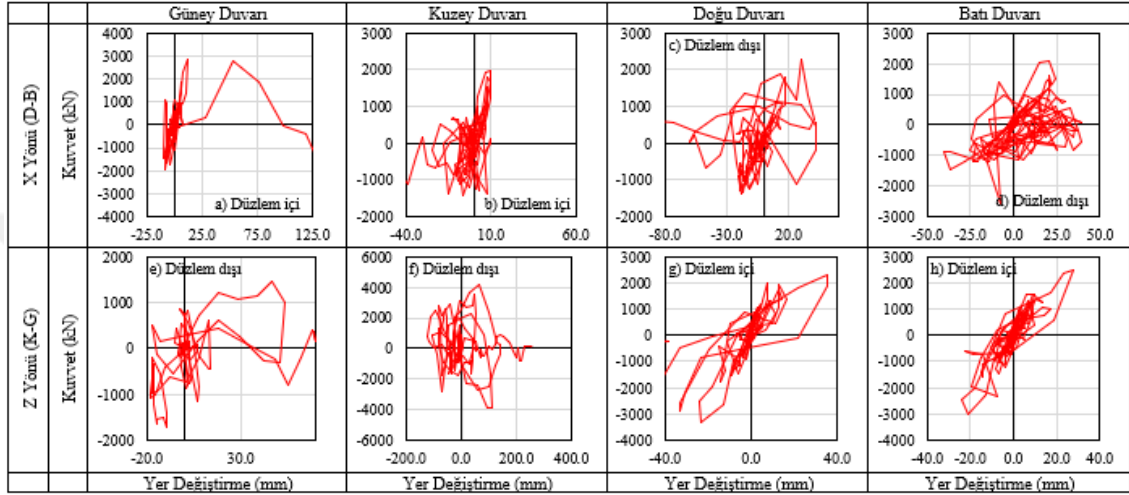
Şekil EK-1.165. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.166’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.166. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

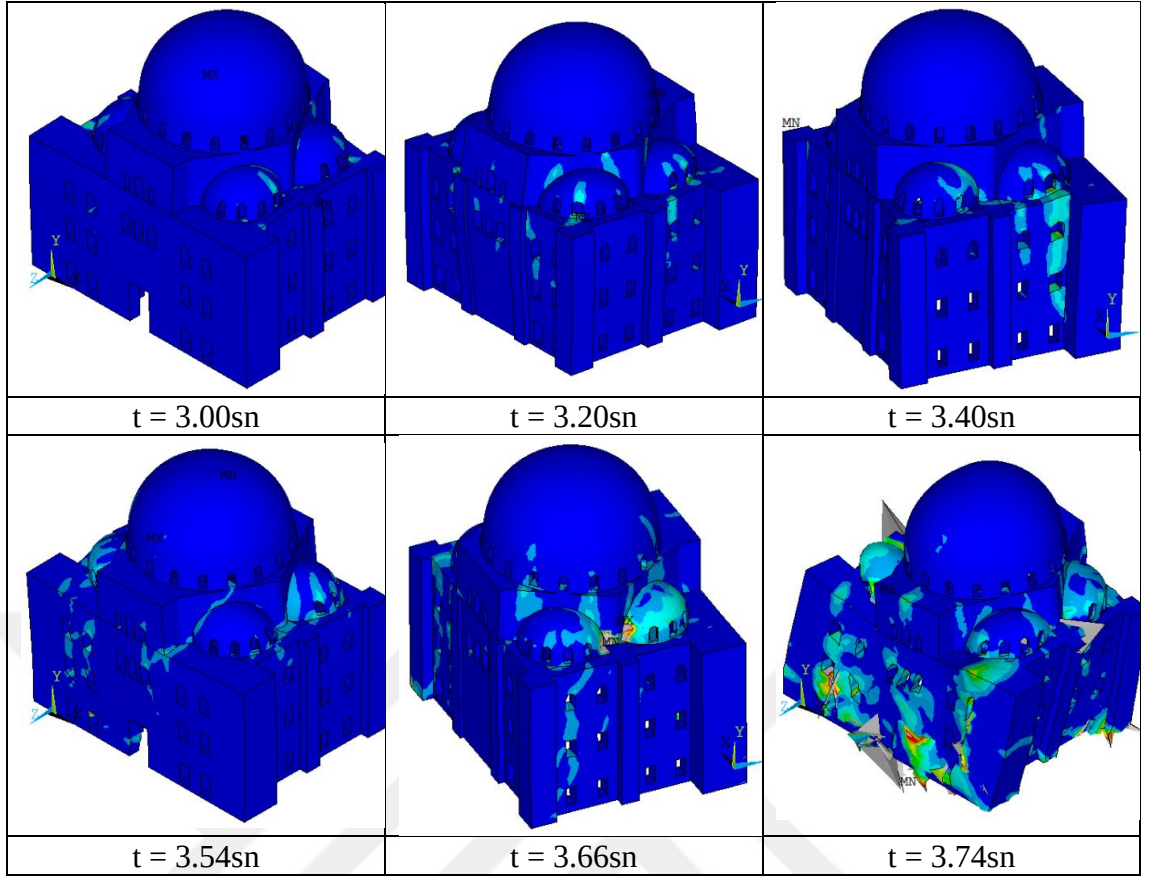
Şekil EK-1.167’da caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.167. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

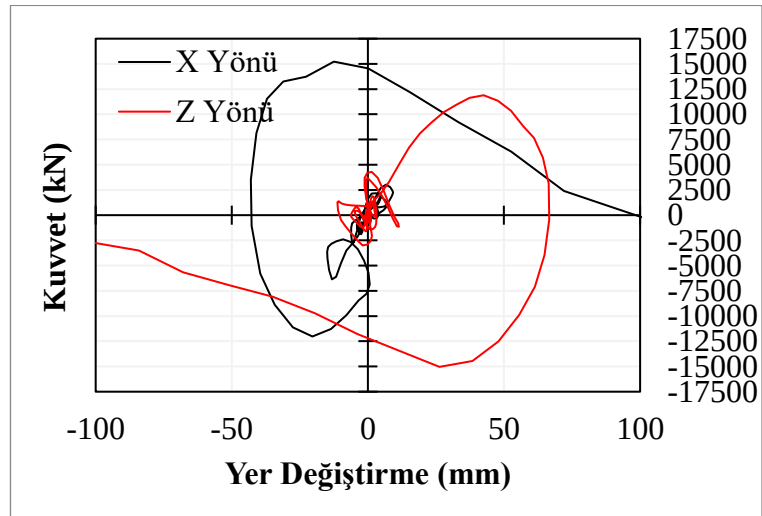
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.168’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.40’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının batı duvarlarında kuzey duvarı tarafındaki pencerelerinde 5-10 mm mertebelerinde çatlak hatları gözlemlenmektedir. Yer hareketinin ilerleyen zaman aralıklarında bu çatlak hatları binanın kuzey ve doğu duvarlarında da gözlemlenmektedir. Cami kuzey-batı köşesin ve kubbesinin içe doğru çökmesiyle göçtüğü söylenebilir. Ancak her bir yer hareketi çevrimine farklı bölgelerde ağır hasarlar gözlenmektedir.



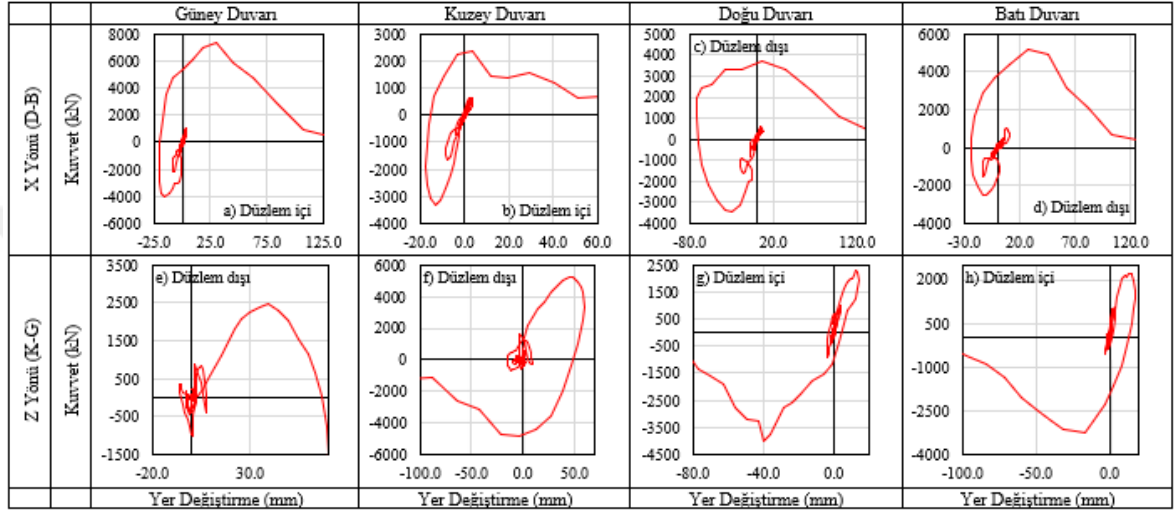
Şekil EK-1.168. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.169’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.169. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.170’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.170. Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.11. Diyarbakır Behram Paşa Cami Analizleri ($E=200f_c$)

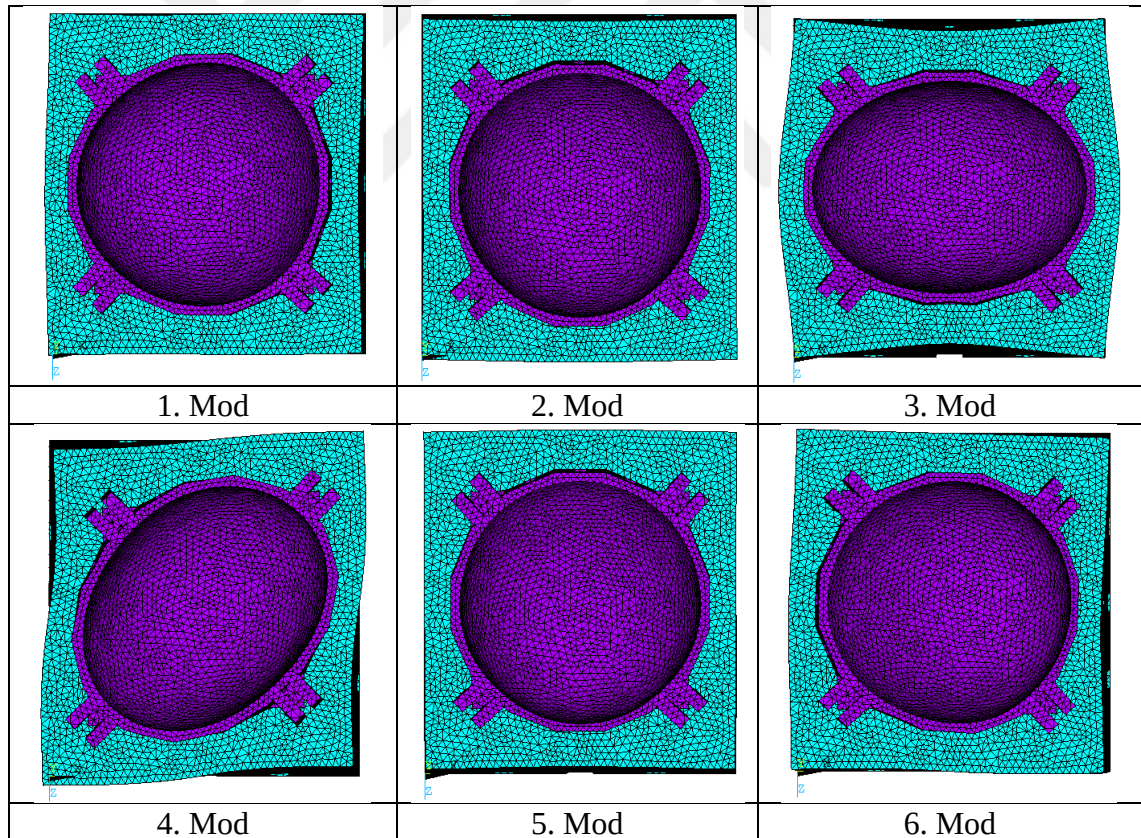
1.11.1. Modal analiz

Diyarbakır Behram Paşa Cami’nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.11’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.11. Behram Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	3.03	0.57E-05	0.88E-04	0.74	0.41
2	3.07	0.68	0.37E-08	0.65E-05	0.41
3	3.71	0.86E-08	0.20E-03	0.20E-03	0.41
4	4.00	0.21E-02	0.26E-09	0.27E-08	0.41
5	4.60	0.36E-03	0.18E-07	0.18E-07	0.41
6	5.18	0.40E-06	0.24E-02	0.69E-01	0.42

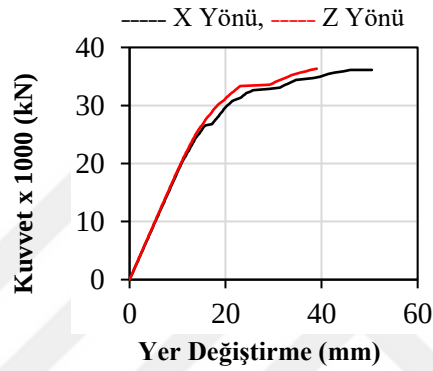
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.171'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 7764 tondur.



Şekil EK-1.171. Behram Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$).

1.11.2. İtme analizi

Şekil EK-1.172’de Behram Paşa Cami’nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 26730 kN, 14,85 mm; Z doğrultusunda ise 28800 kN, 16 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 34398 kN, Z doğrultusunda 34504 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.172. Behram Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$)

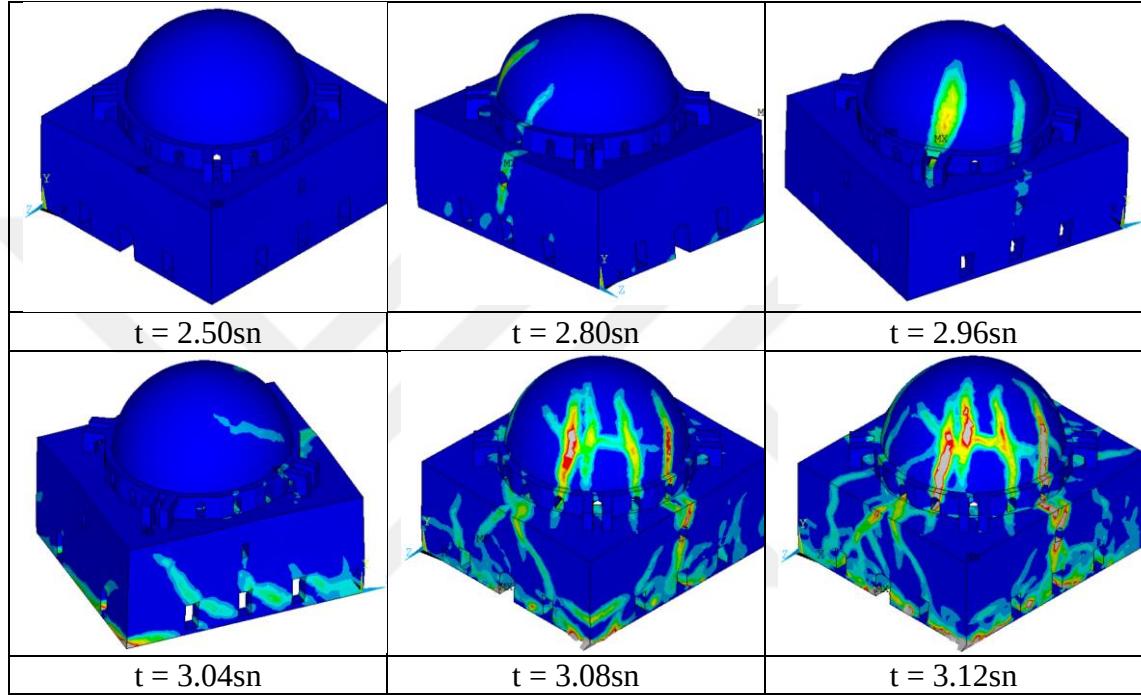
1.11.3. Dinamik analizler

Diyarbakır Behram Paşa Cami’sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

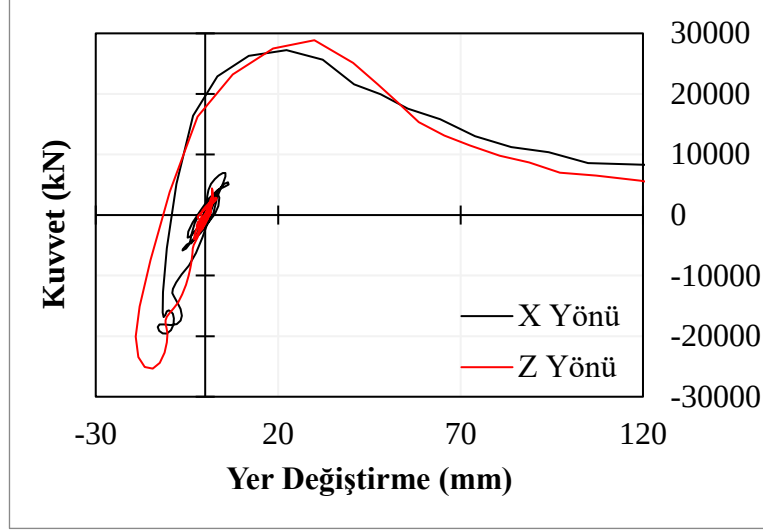
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.173’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.50’inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 2.80’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede doğu duvarının ortasından kubbeden duvarın penceresine doğru

çatlak hattı gözlemlenmektedir. Aynı zamanda kubbenin güney-doğu köşesinde çatlak hattı gözlemlenmektedir. Bu çatlak hattı sonraki zaman adımlarında daha da derinleşmektedir. 3.08'inci saniyede yapının yer hareketi etkisi ile kuzey-batı köşesi ve çevresinde çatlak hatları belirginleşmeye ve derinleşmeye başlamıştır. Yapı bu çatlaklar sebebiyle göçmüştür. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlaklarda asgari 15-20 mm bir açılma gözlemlenmektedir.



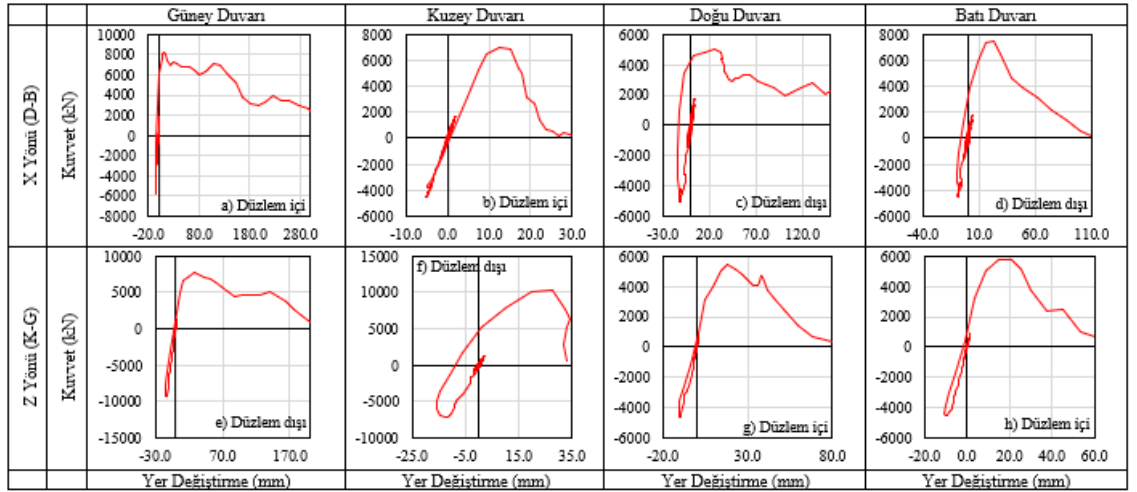
Şekil EK-1.173. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.174'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.174. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

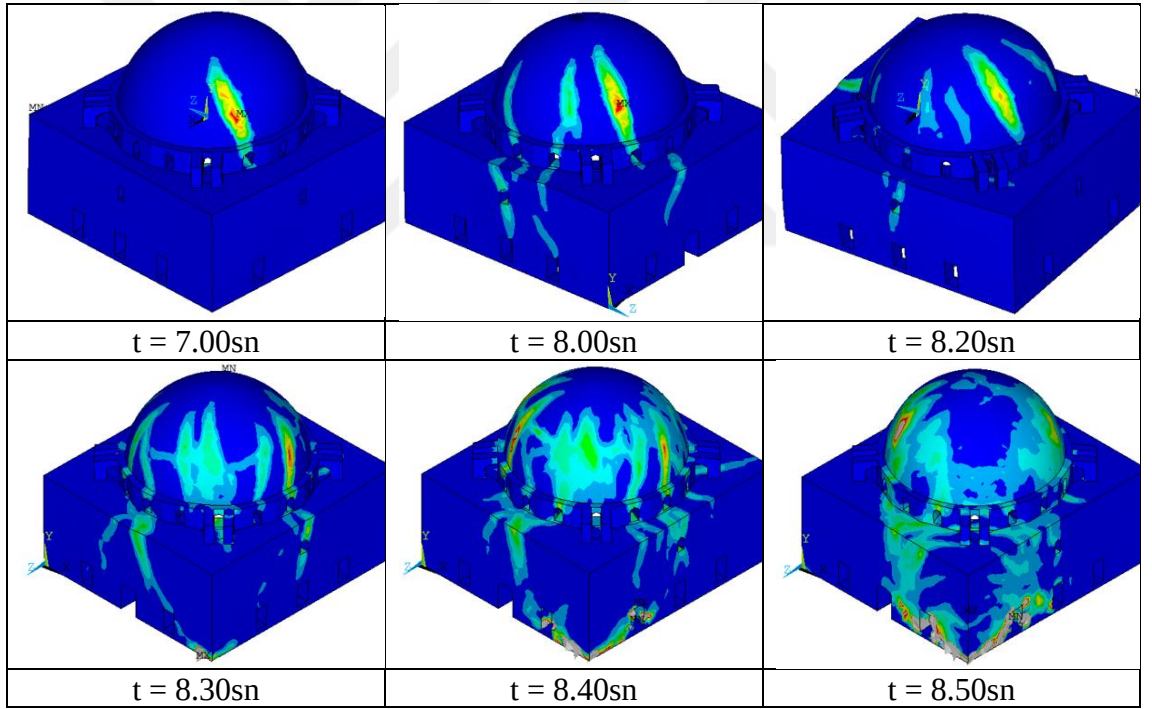
Şekil EK-1.175’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.175. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

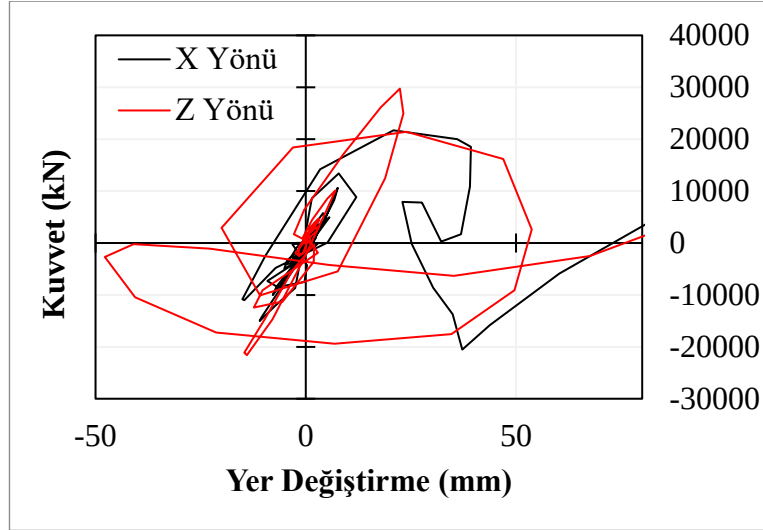
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.176'da verilmektedir. Yer hareketinin karakteristiğine bağlı olarak ilk hasar kubbede gözlemlenmektedir. Yaklaşık 35-40 mm çatlak genişliğinin olduğu bu çatlaklar kubbenin rijitliğini oldukça etkilemektedir. Cami, kuzey ve batı duvarlarının ortasında bulunan kubbe pencerelerinden başlayan diyagonal çatlakların genişlemesiyle kuzey-batı köşesinden göçmektedir. Bu V şeklindeki göçme mekanizmasına, önceki çevrimlerde hasar gören kubbede katılmaktadır. Göçmenin meydana geldiği durumda çatlak genişlikleri 70 mm'yi bulabilmektedir. V şeklindeki göçme mekanizmasında caminin kuzey-batı köşesinde bulunan taşların ezilmeye ve yer değiştirmeye maruz kaldığı söylenebilir.



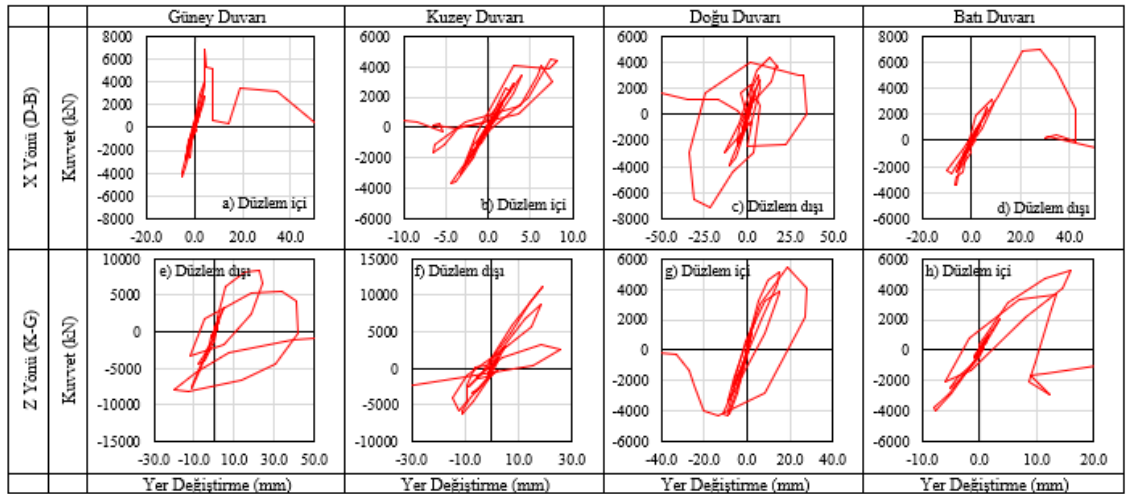
Şekil EK-1.176. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.177'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.177. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

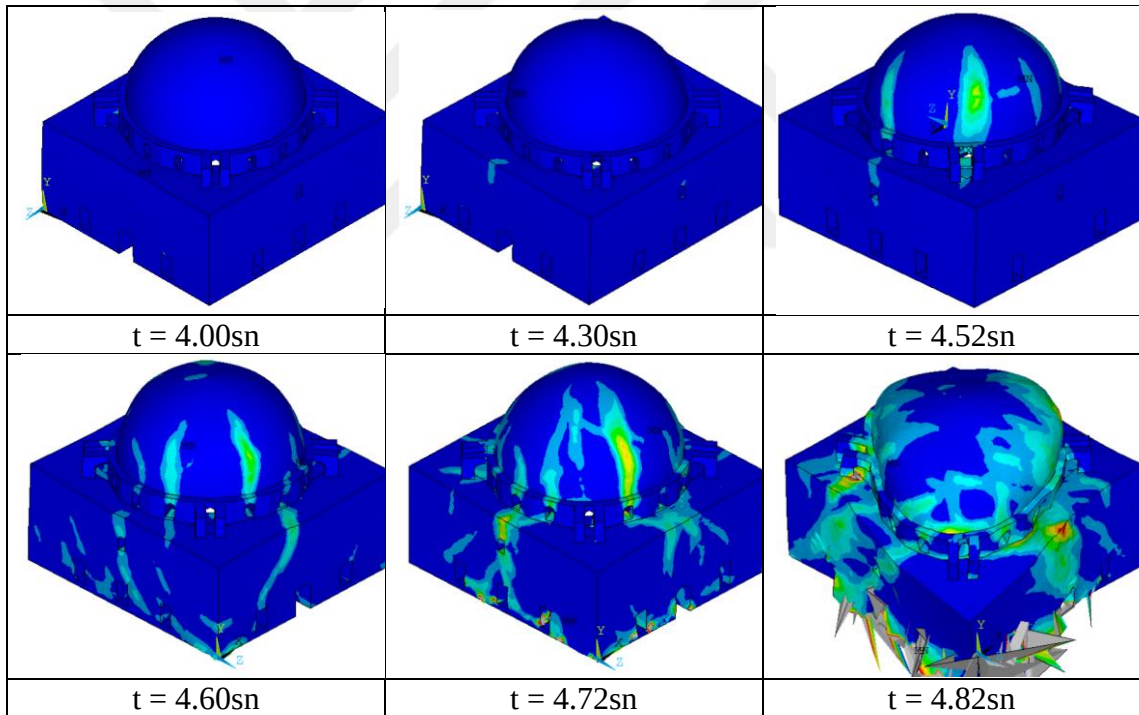
Şekil EK-1.178’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.178. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

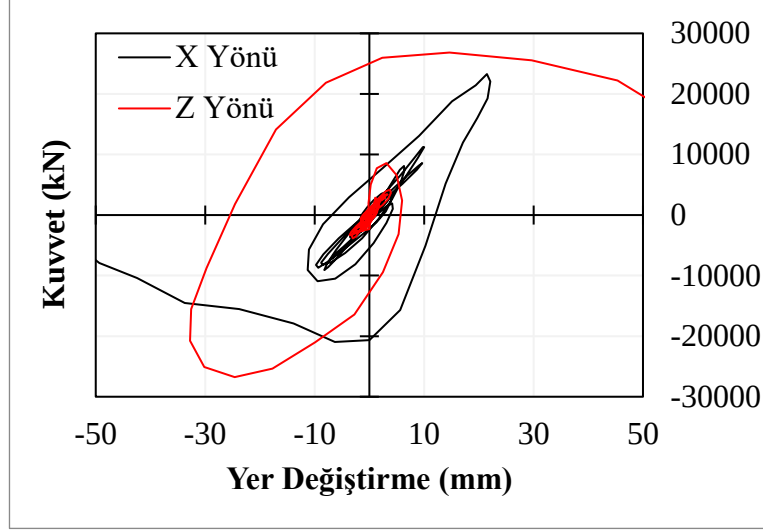
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.179’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 4.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 4.52’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede kubbenin güneybatı köşesinde çatlak hatları görülmektedir. 4.60’uncu saniyede yapının kuzey ve doğu duvarlarında ve kubbenin kuzeydoğu köşesinde 10mm mertebelerinde çatlak hatları gözlemlenmektedir. Bu hasar caminin göçme mekanizmasının başlangıcı olarak gösterilebilir. Cami kuzeybatı köşesinden göçmektedir. Göçmenin gözlemlendiği sırada duvarlardaki çatlaklar 20-25 mm mertebelerindedir.



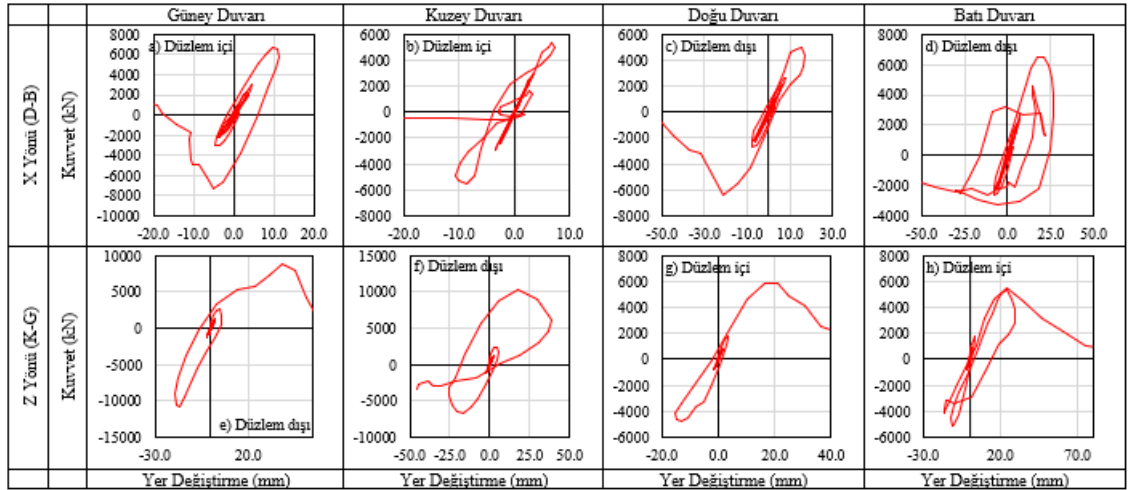
Şekil EK-1.179. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.180’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.180. Behram Paşa ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

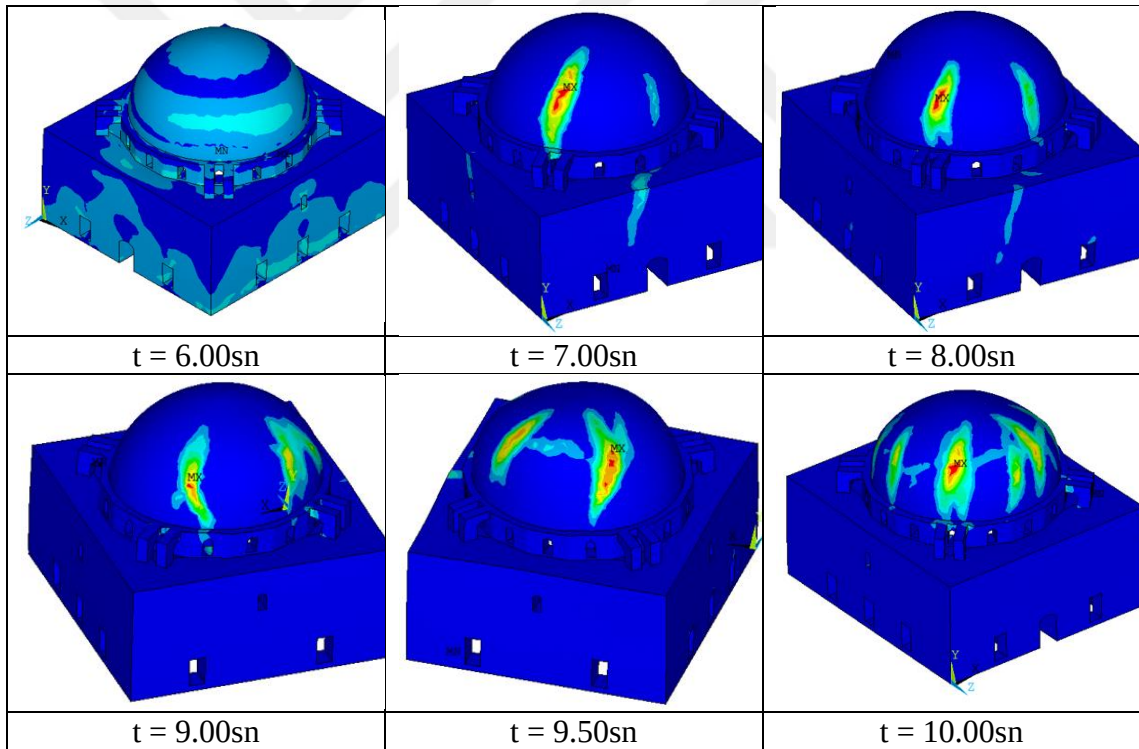
Şekil EK-1.181’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.181. Behram Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

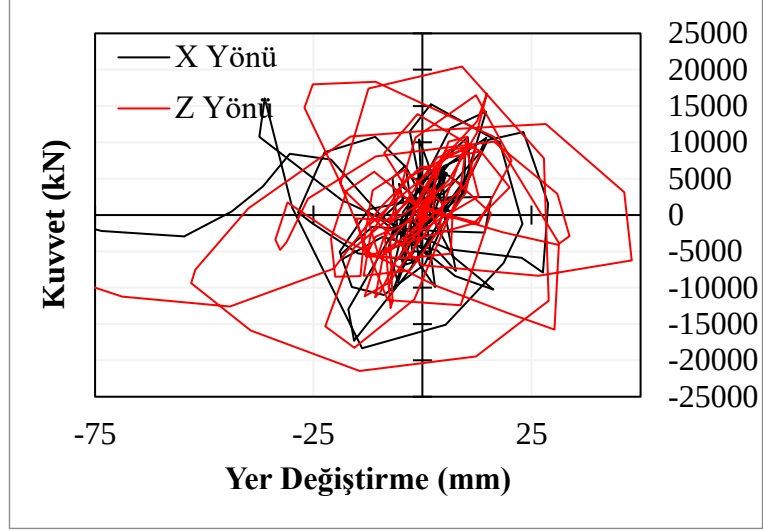
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.182’de verilmektedir. Yapı yer hareketinin özelliğine bağlı olarak farklı çevrimlerde farklı hasar mekanizmaları göstermektedir. Yapının kubbesi ile duvarlarının arasında kalan kubbe kasnağında ve kubbe pencerelerinde çatlaklar gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar yapının köşelerinde bulunan yarım kubbelerde yoğunlaşmaktadır. Yer hareketinin 10.00’inci saniyesinde yapının batı kısmında kubbenin göçtüğü görülmektedir. Farklı çevrimlerde hasar alan kubbe, çatlakların 40-50 mm genişliği ulaşmasından sonra caminin içine doğru göçtüğü söylenebilir. Cami duvarlarında net bir göçme mekanizması görünmemektedir. Ancak oluşan çatlaklar caminin başlangıç rijitliğini, belirgin şekilde değiştirdiği söylenebilir.



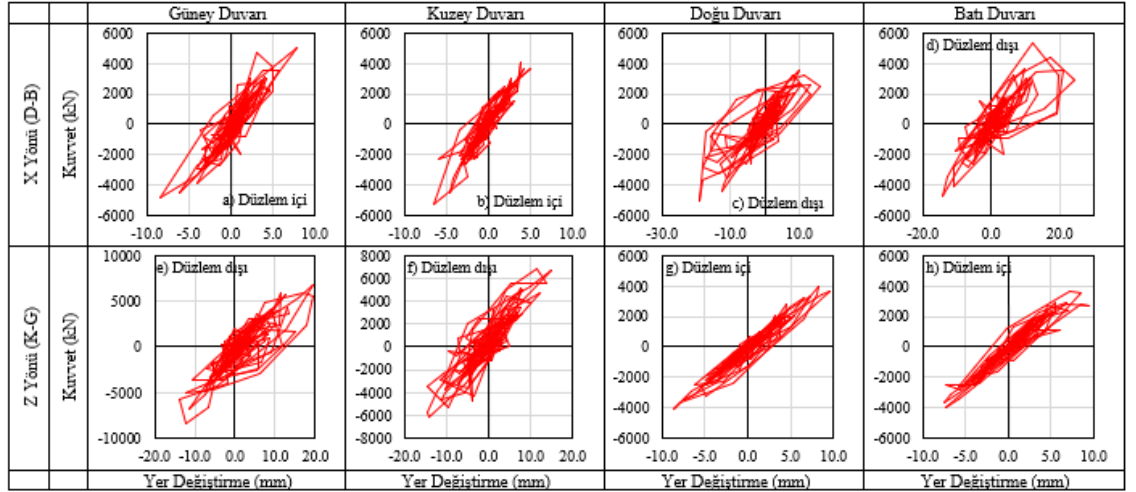
Şekil EK-1.182. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.183’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.183. Behram Paşa ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

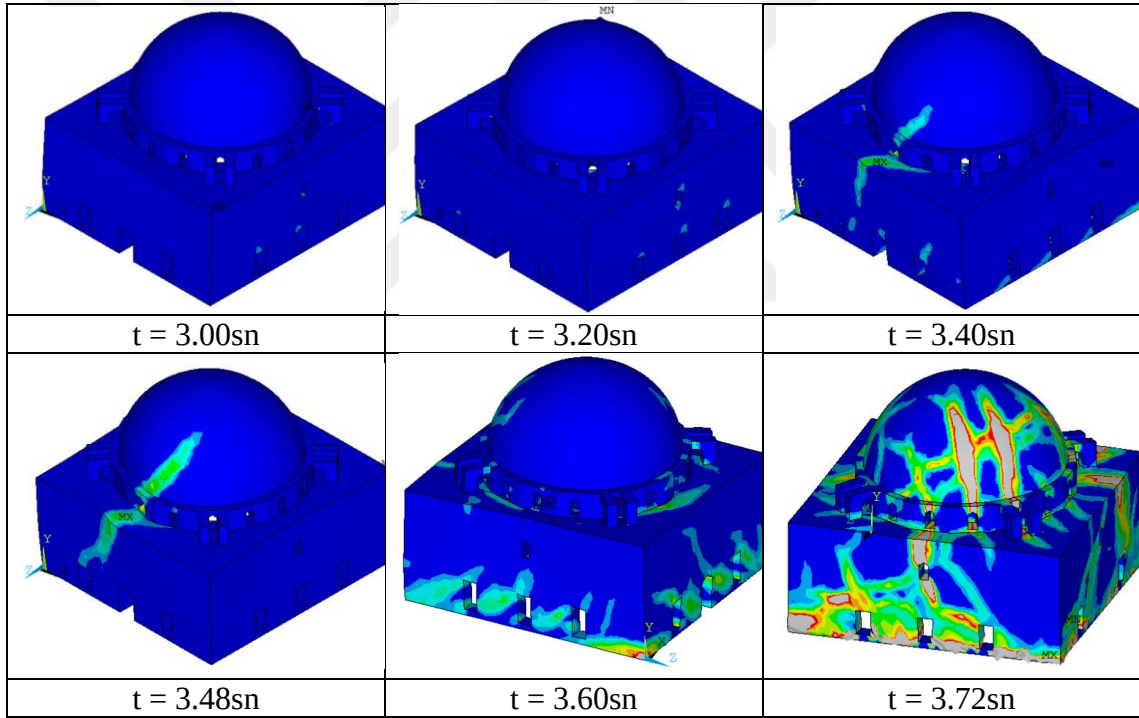
Şekil EK-1.184’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.184. Behram Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

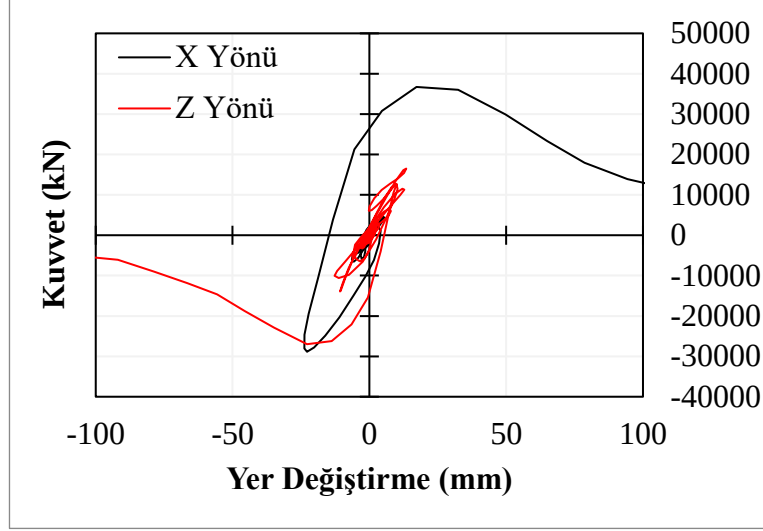
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.185’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.40’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede yapının güney duvarının ortasında kubbeden aşağıya doğru inen çatlak hattı görülmektedir. Bu çatlak hattı sonraki zaman adımlarında daha büyümesine rağmen, yer hareketinin özelliği ile çatlak yoğunlukları 3.70’inci saniyede güney ve batı duvarlarında gözlemlenmektedir. Kubbenin güneybatı köşesindeki derin çatlaklar ile cami güneybatı köşesinden göçmektedir.



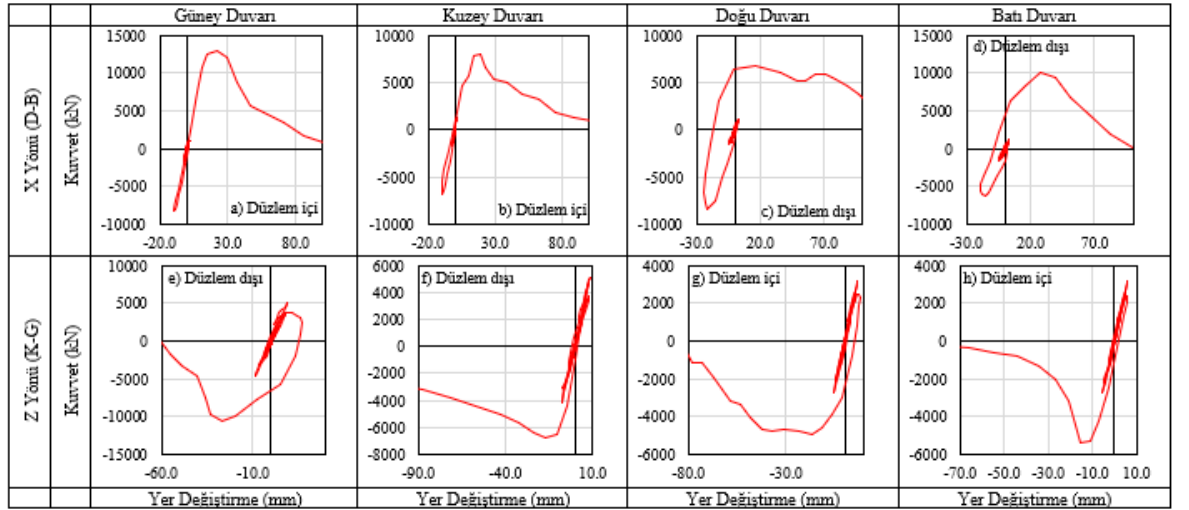
Şekil EK-1.185. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.186’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.186. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.187’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.187. Behram Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.12. Erzurum Narmanlı Cami Analizleri ($E=200f_c$)

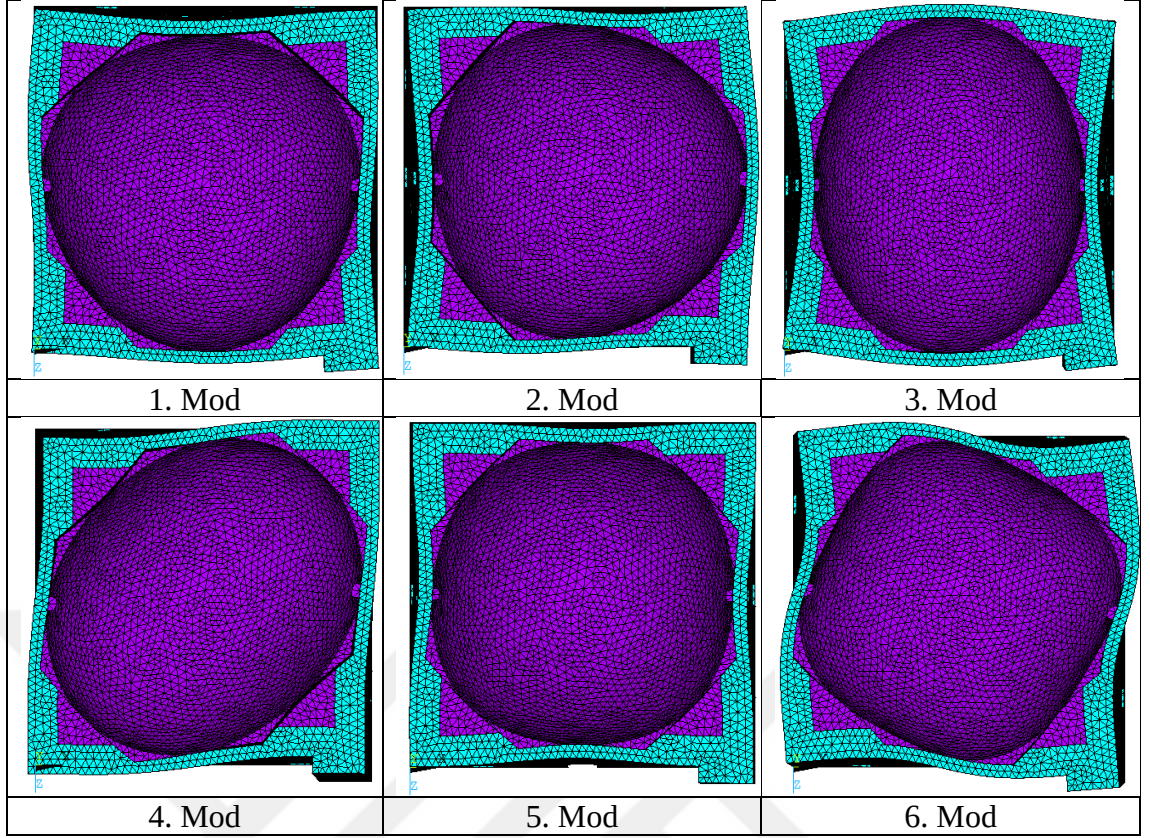
1.12.1. Modal analiz

Erzurum Narmanlı Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.12'de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.12. Narmanlı Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	3.33	0.11	0.96E-06	0.55	0.76E-01
2	3.37	0.55	0.63E-05	0.11	0.55
3	4.62	0.15E-05	0.36E-06	0.60E-07	0.55
4	5.63	0.87E-04	0.65E-04	0.94E-04	0.82
5	5.71	0.63E-03	0.25E-03	0.12E-03	0.82
6	6.20	0.40E-05	0.17	0.11E-03	0.82

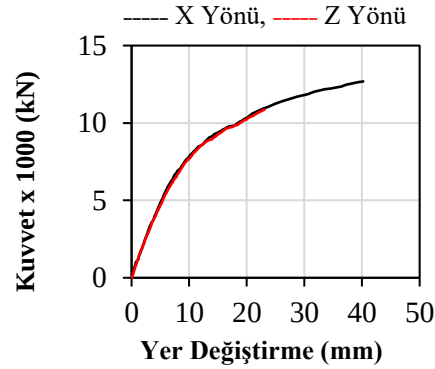
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.188'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 3371 tondur.



Şekil EK-1.188. Narmanlı Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.12.2. İtme analizi

Şekil EK-1.189'de Narmanlı Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 6750 kN, 6,75 mm; Z doğrultusunda ise 5600 kN, 6 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 12684 kN, Z doğrultusunda 10865 kN olarak belirlenmiştir.



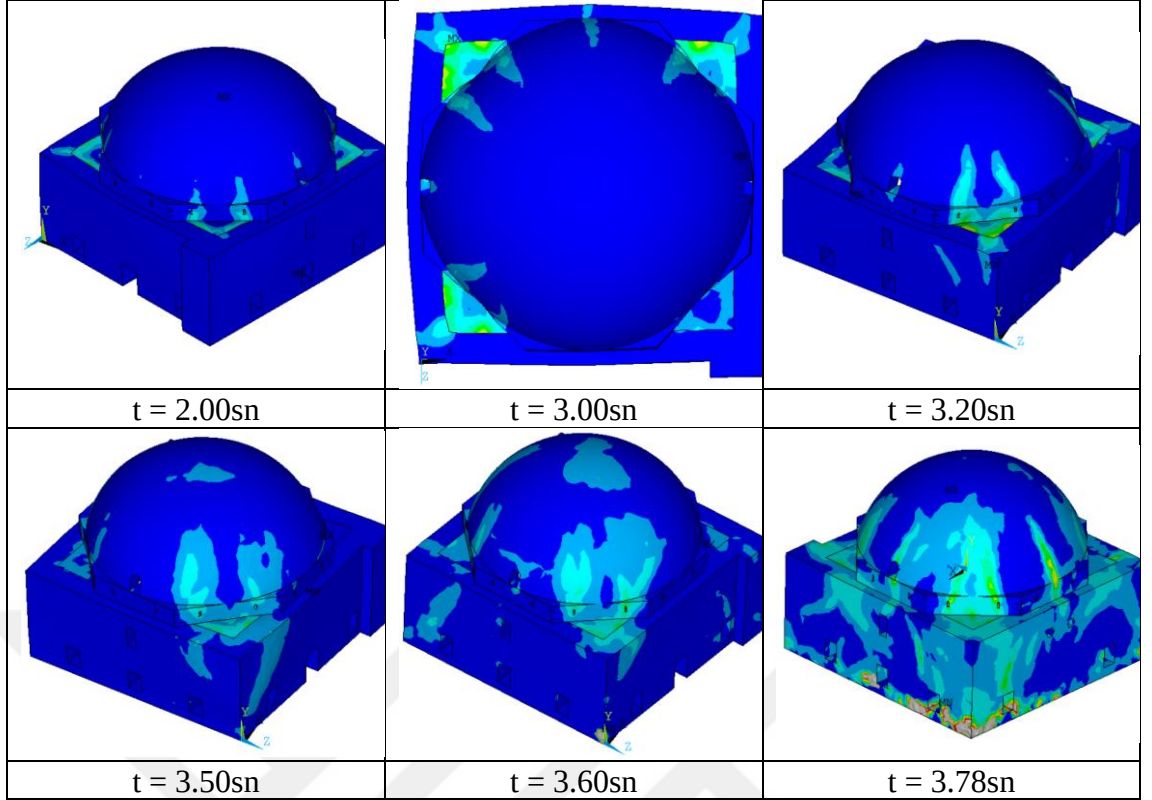
Şekil EK-1.189. Narmanlı Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$)

1.12.3. Dinamik analizler

Erzurum Narmanlı Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

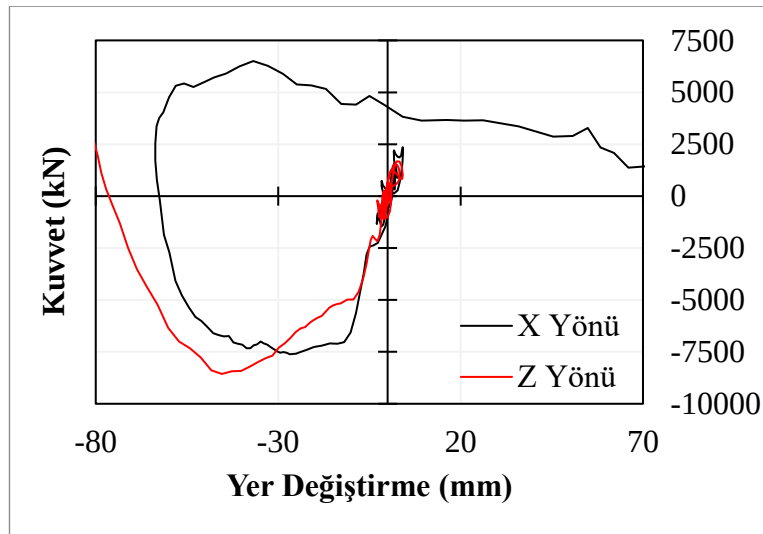
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.190'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 2.00'inci saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.00'inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. 3.20'inci saniyede yapının köşelerinde bulunan kubbe örtüsünde kılcal çatlaklar görülmektedir. Bu saniyeden sonra yapının kuzeydoğu köşesinin etrafında çatlak hatları gözlemlenmektedir. Ancak bu çatlak hatları yer hareketinin çevriminden sonra güney ve batı duvarları tarafına geçmiştir. Yapı Güney ve batı duvarlarının diyagonal çatlaklarının genişlemesi neticesinde güneybatı köşesinden göçmektedir.



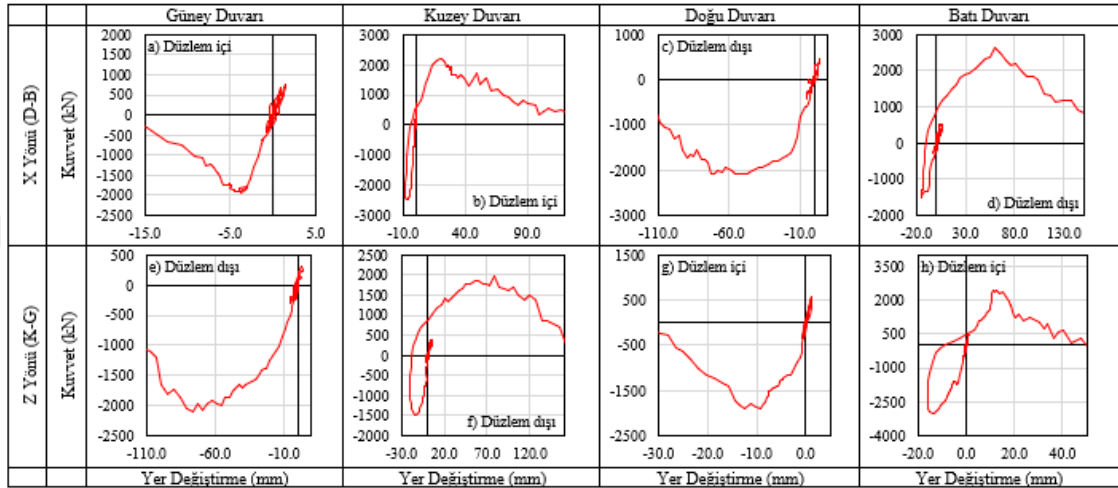
Şekil EK-1.190. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.191’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.191. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

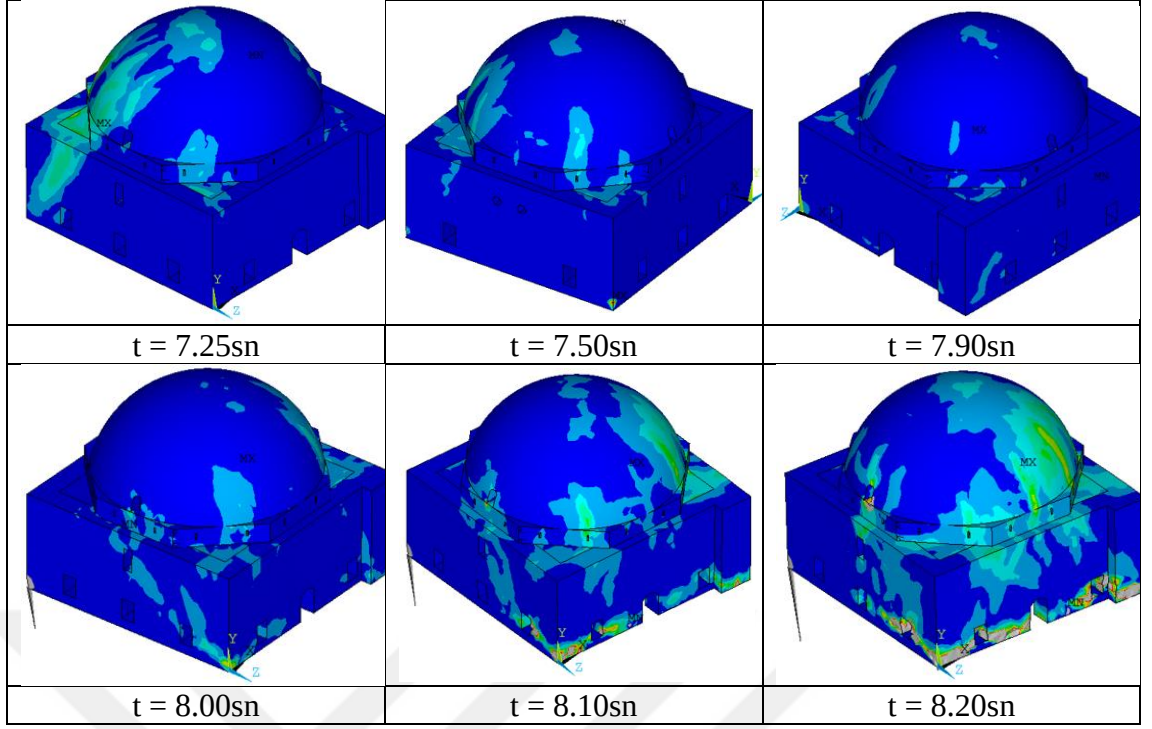
Şekil EK-1.192’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.192. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

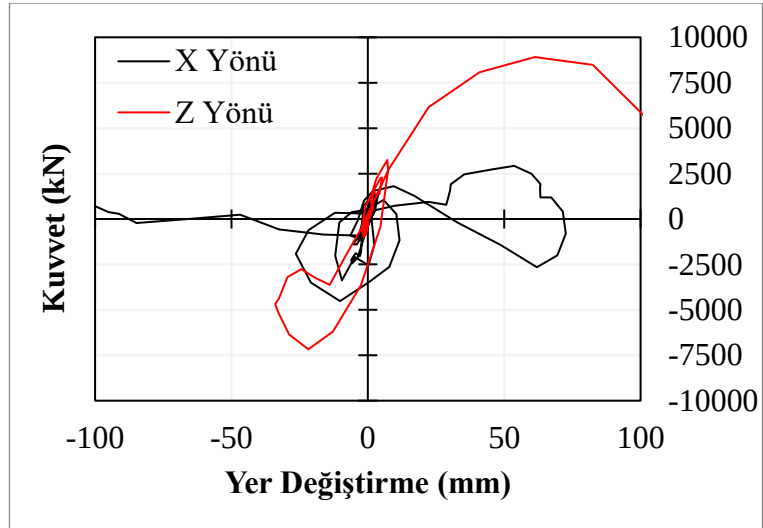
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.193’da verilmektedir. Caminin güney doğu köşesi V şeklinde yıkılma mekanizması göstermektedir. Köşe taşı ezilmelere ve çatlaklar 15 mm mertebelerine ulaşmaktadır. Ancak yer hareketi çevremi sonucu cami yıkılmamış ağır hasar görmüştür. Sonrasında caminin kuzey duvarı, mesnete yakın kısımdan kesme gerilmelerine maruz kalarak düzlem dışı davranış sergilemeye başlamıştır. Doğu ve batı duvarlarının ortasında, kubbe penceresinden başlayan çatlaklar caminin üçgen prizma şeklinde göçmesine sebep olmuştur. Cami kubbesi her tarafından ağır hasar olarak göçtüğü söylenebilir.



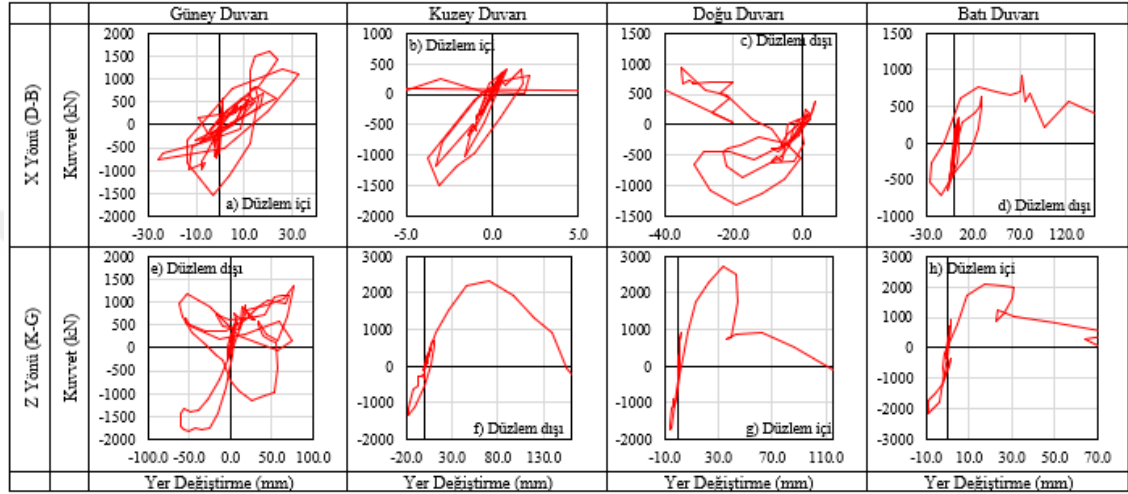
Şekil EK-1.193. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.194’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.194. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

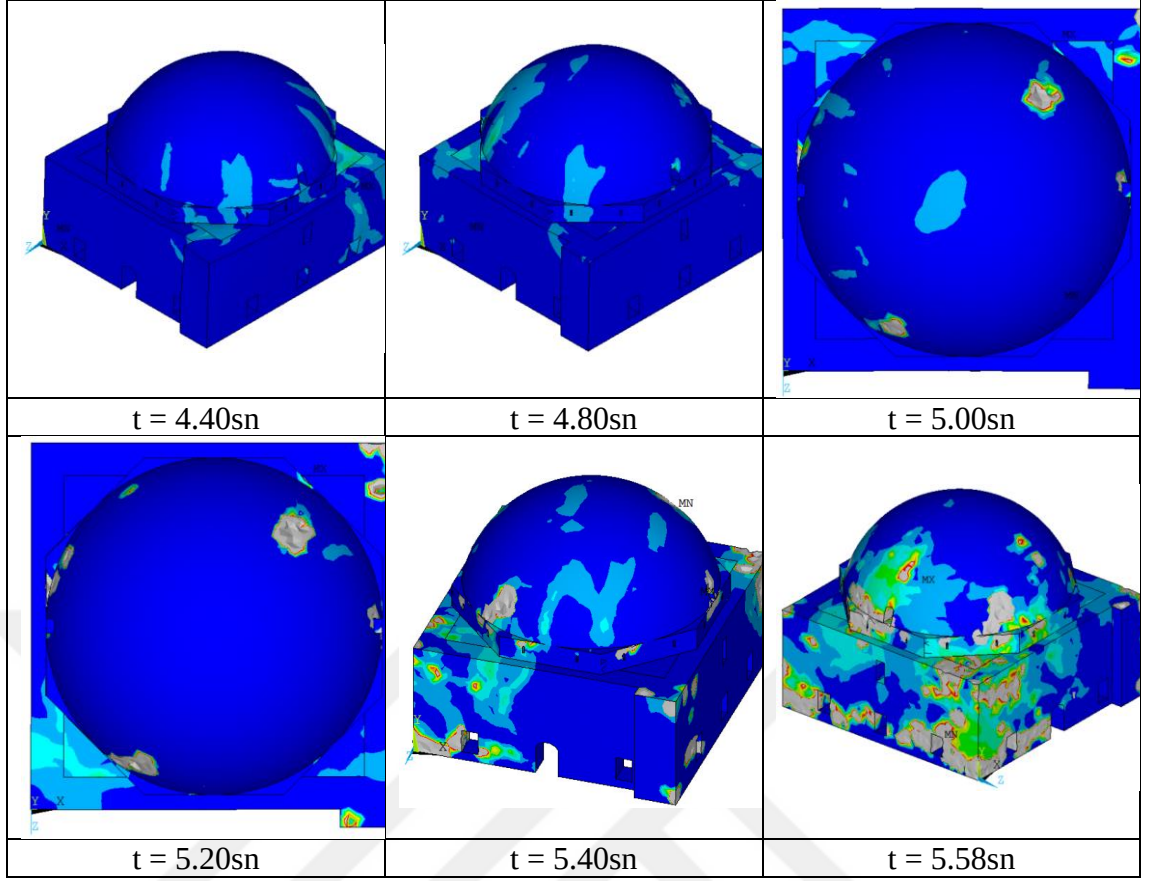
Şekil EK-1.195’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.195. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

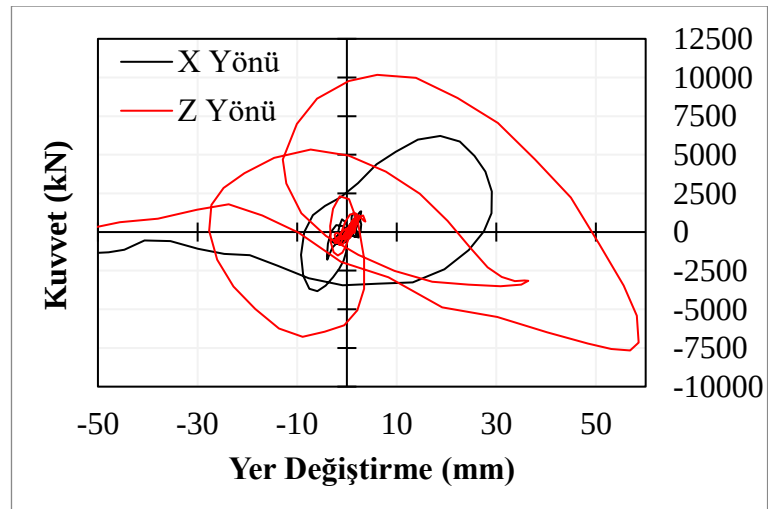
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.196’da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda yer hareketi etkisiyle farklı zaman dilimlerinde farklı bölgelerde çatlak yoğunlukları ve hatları gözlemlenmektedir. Bu durum yer hareketinin karakteristiği ile açıklanabilir. Yapının zaman adımları geçtikçe kalıcı hasarlara maruz kalsa da temel göçme mekanizması güney ve doğu duvarlarında gözlemlenmektedir. Yer hareketinin yaklaşık 5.7’inci saniyelerinde kubbe ile beraber topyekûn göçme gözlemlenmektedir. Göçme durumunda çatlaklar 45-50 mm mertebelerindedir.



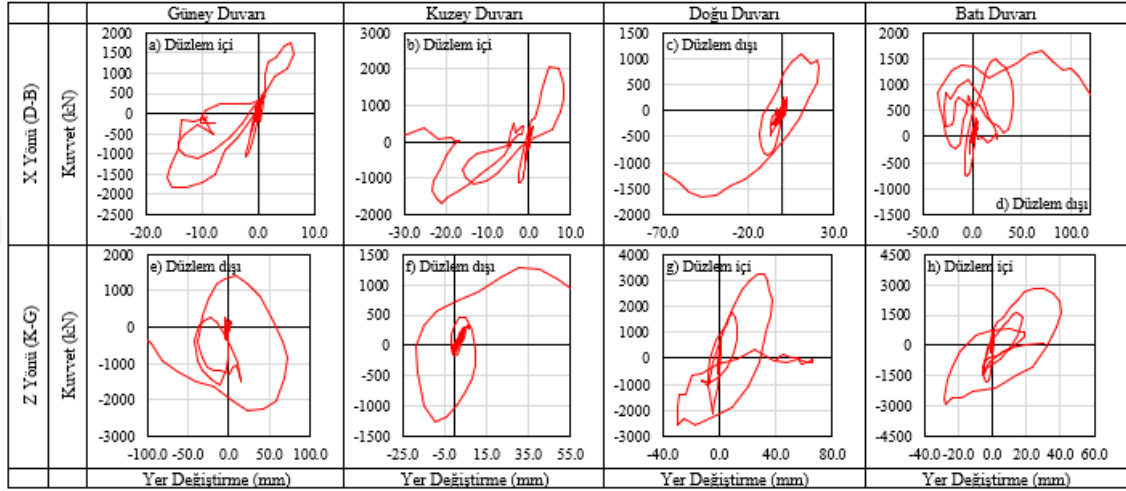
Şekil EK-1.196. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.197’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.197. Narmanlı ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

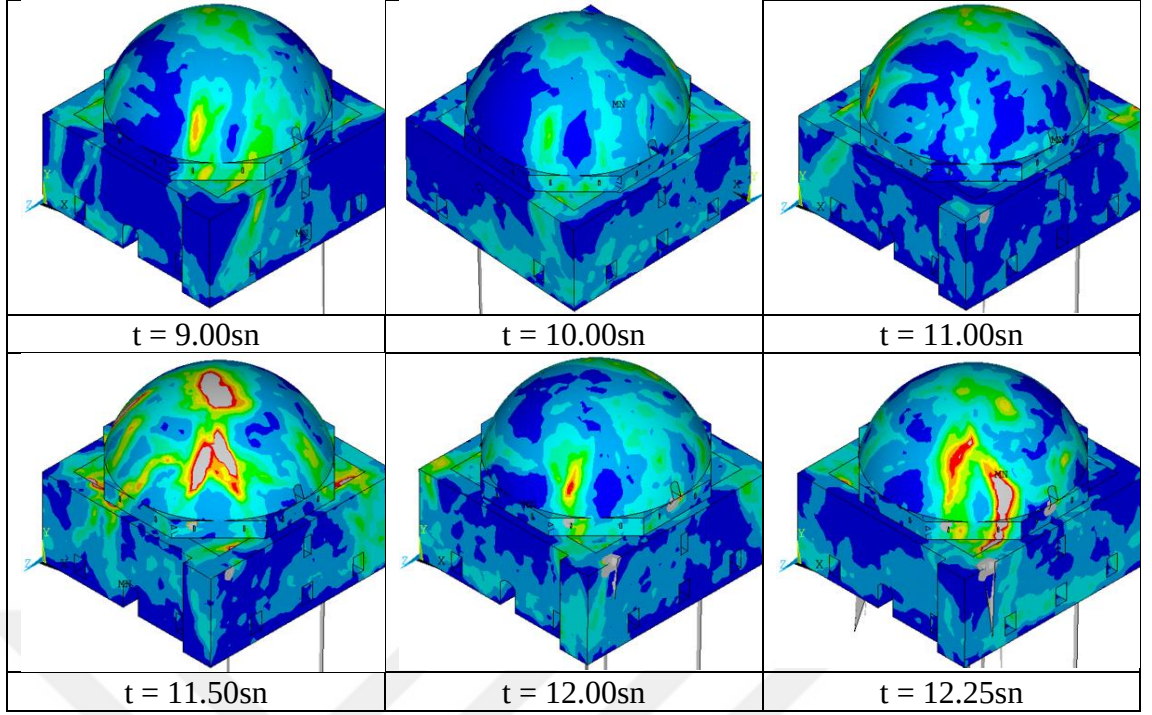
Şekil EK-1.198’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.198. Narmanlı ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

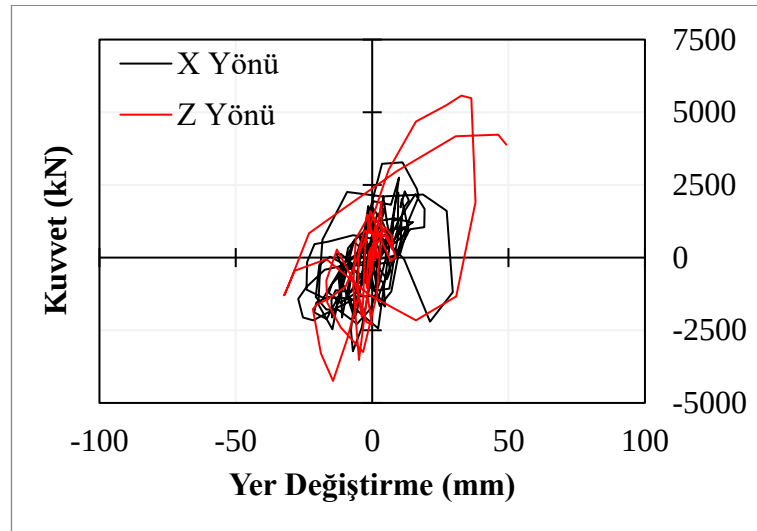
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.199’de verilmektedir. Yapı yer hareketinin özelliğine bağlı olarak farklı çevrimlerde farklı hasar mekanizmaları göstermektedir. Yapının kubbesi ile duvarlarının arasında kalan kubbe kasnağında ve kubbe pencerelerinde çatlaklar gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar yapının köşelerinde bulunan yarım kubbelerde yoğunlaşmaktadır. Yer hareketinin 12.00’uncü saniyesinde yapının batı kısmında kubbenin göçtüğü görülmektedir. Farklı çevrimlerde hasar alan kubbe, çatlakların 40-50 mm genişliği ulaşmasından sonra caminin içine doğru göçtüğü söylenebilir. Cami duvarlarında net bir göçme mekanizması görünmemektedir. Ancak oluşan çatlaklar caminin başlangıç rijitliğini, belirgin şekilde değiştirdiği söylenebilir.



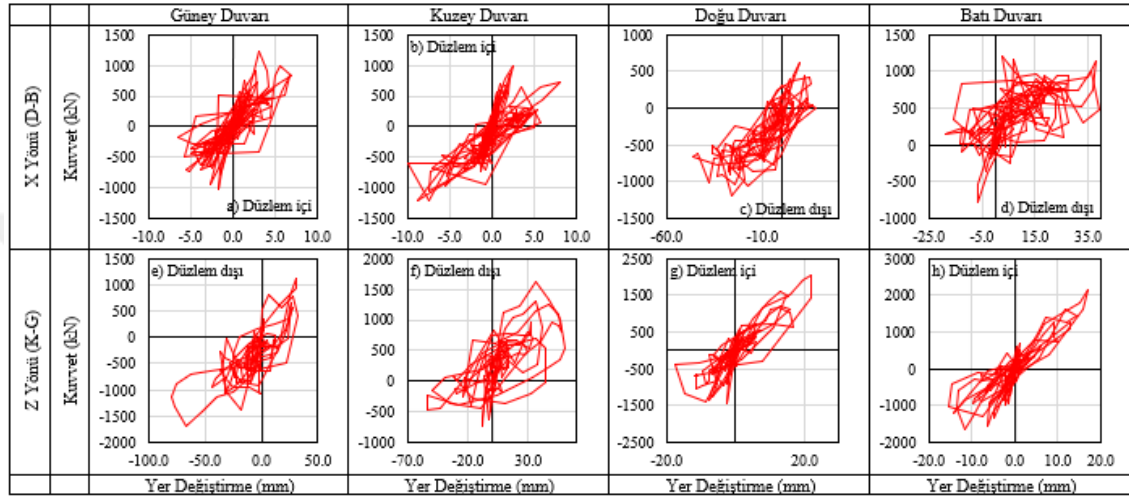
Şekil EK-1.199. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.200’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.200. Narmanlı ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

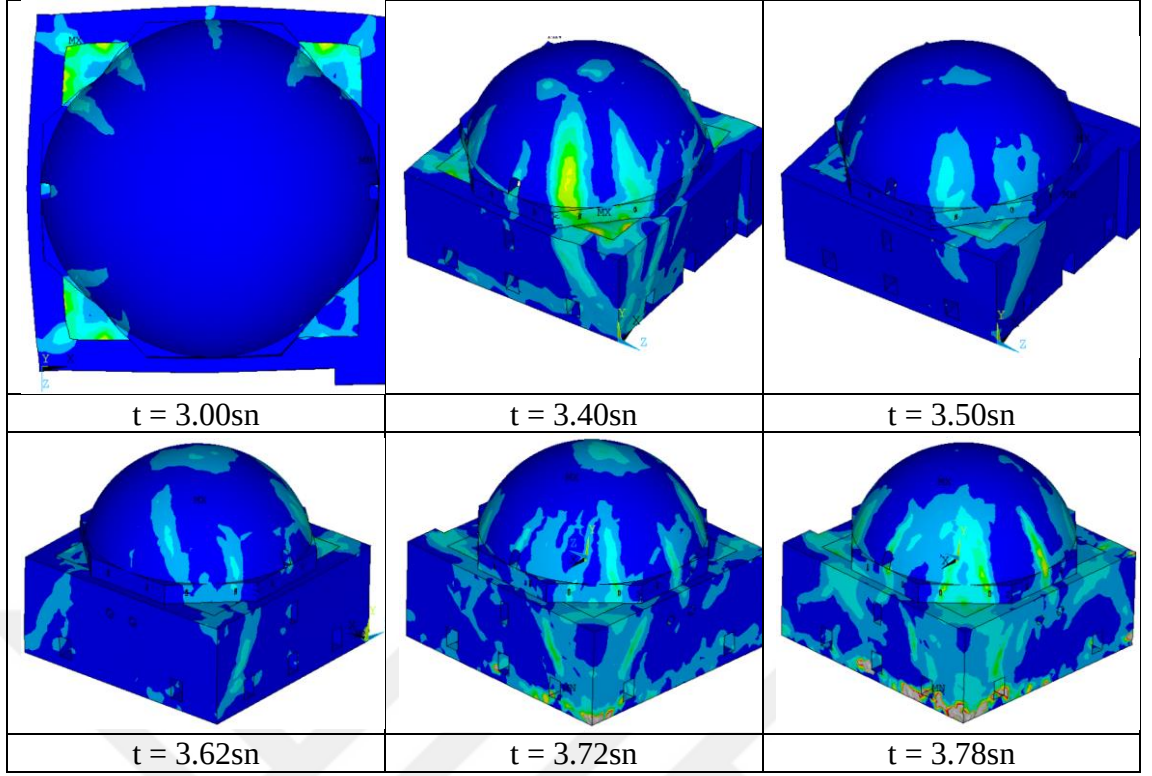
Şekil EK-1.201’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.201. Narmanlı ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

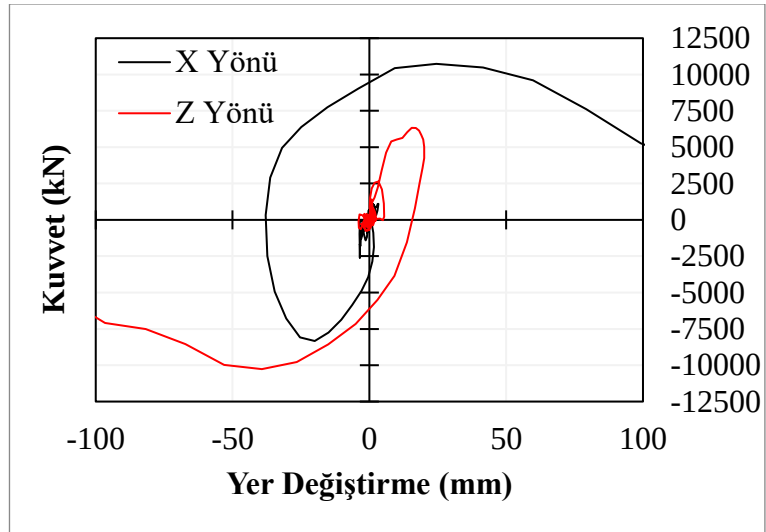
- Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.202’de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yapıda 3.00’üncü saniyeye kadar birim şekil değiştirmeler genel olarak kabul edilir seviyededir. 3.40’inci saniyede yapı, gelen dinamik yük karşısında mevcudiyetini korumakta ve elastik davranış sergilemeye devam etmektedir. Bu saniyede kubbenin kuzeydoğu köşesinde ve kuzey ve doğu duvarlarının birleştiği bölgede çatlak hatları gözlemlenmektedir. Bu çatlak hatları yer hareketinin etkisiyle yapının güney ve batı duvarlarına doğru aktarılmaktadır. Yapının ana göçme mekanizması güneybatı köşesinde oluşmaktadır. Yaklaşık 30-35 mm mertebelerinde oluşan çatlaklar yapının göçmesine sebep olmaktadır.



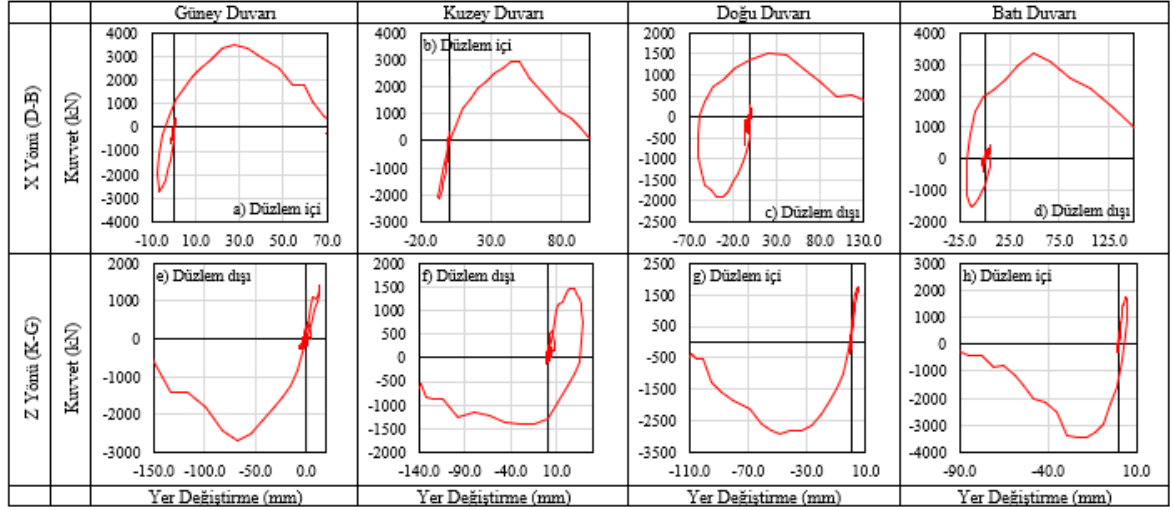
Şekil EK-1.202. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.203'da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.203. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.204’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.204. Narmanlı Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.13. Giresun Şebinkarahisar Fatih Cami Analizleri ($E=200f_c$)

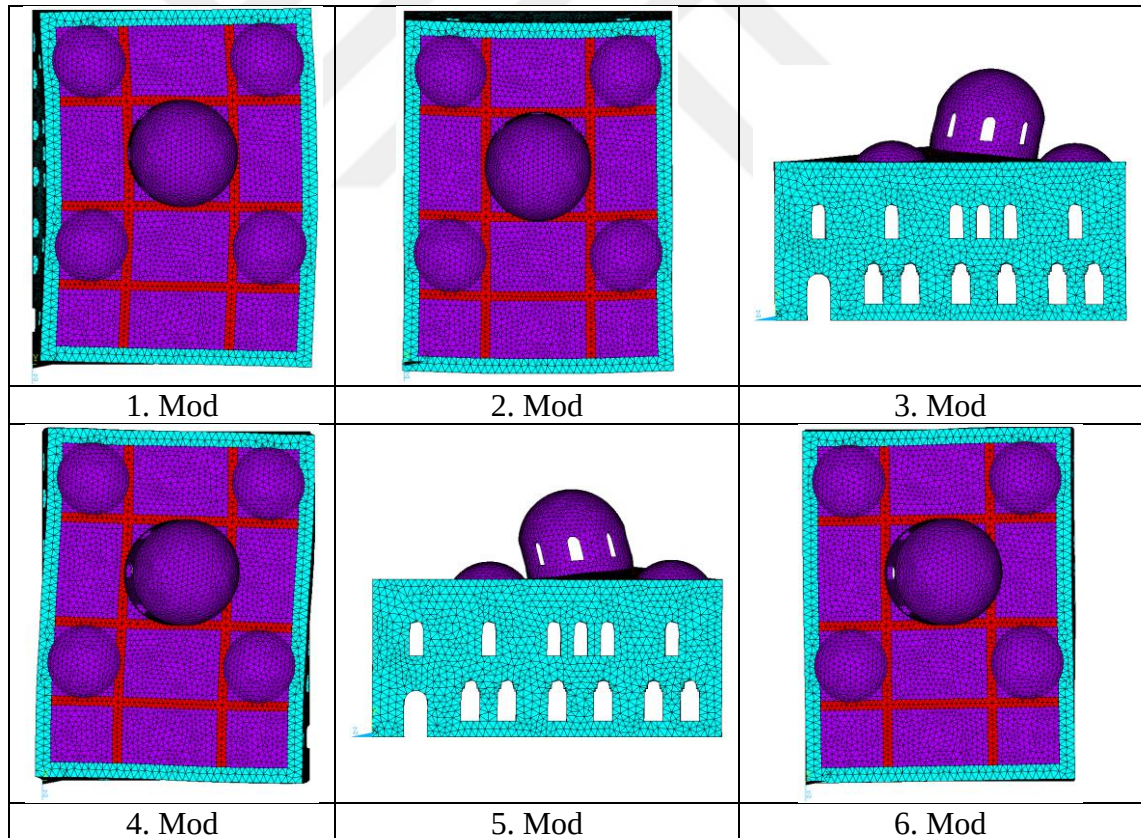
1.13.1. Modal analiz

Giresun Şebinkarahisar Fatih Cami’nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.13’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.13. Şebinkarahisar Fatih Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	2.58	0.73	0.18E-09	0.24E-05	0.31
2	2.68	0.24E-05	0.16E-04	0.80	0.20
3	4.33	0.20E-06	0.11	0.48E-02	0.12E-02
4	4.43	0.69E-02	0.45E-05	0.63E-06	0.15
5	4.52	0.29E-07	0.44E-01	0.55E-02	0.18E-02
6	4.77	0.38E-02	0.23E-07	0.39E-06	0.81E-01

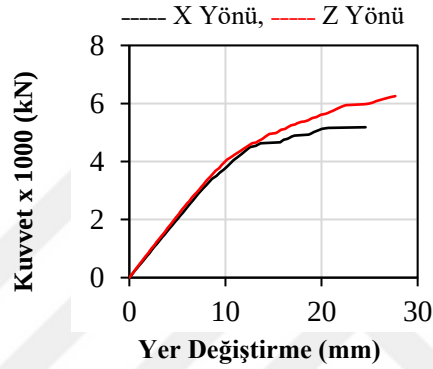
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.205'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 2363 tondur.



Şekil EK-1.205. Şebinkarahisar Fatih Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.13.2. İtme analizi

Şekil EK-1.206'da Şebinkarahisar Fatih Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 3600 kN, 9 mm; Z doğrultusunda ise 4200 kN, 10,5 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 5181 kN, Z doğrultusunda 6253 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.206. Şebinkarahisar Fatih Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$).

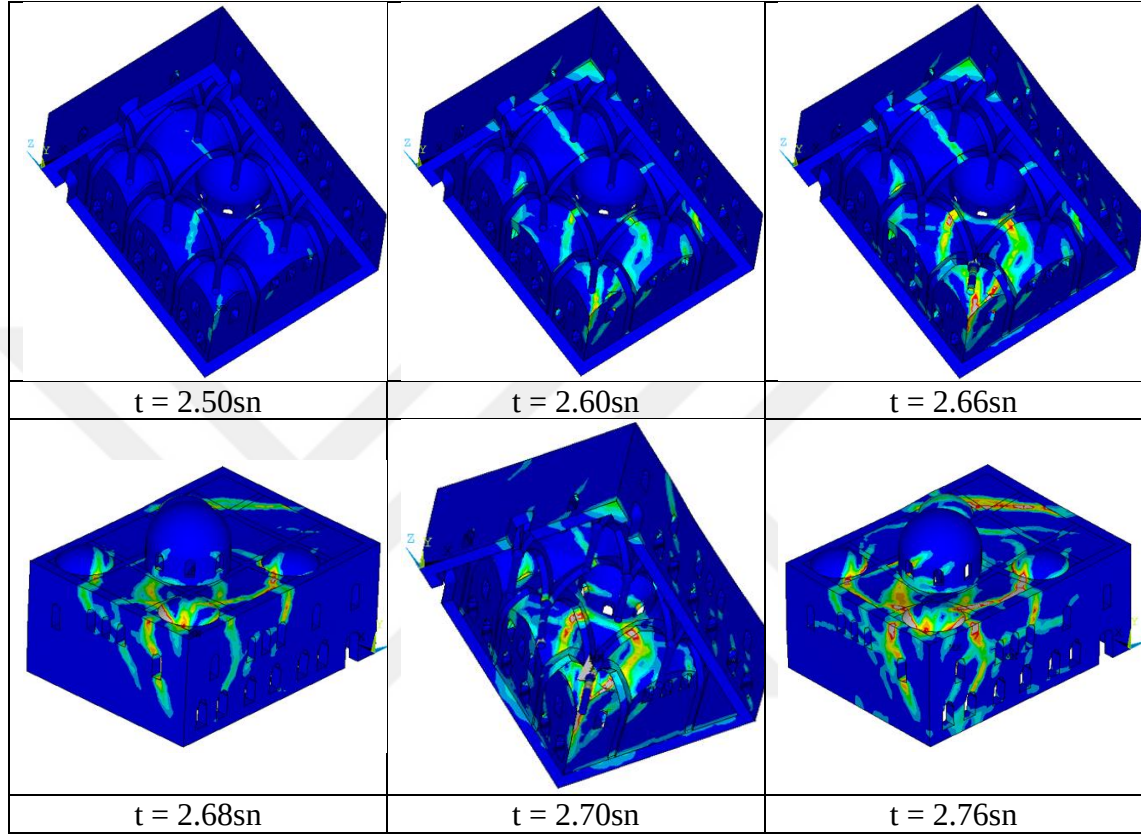
1.13.3. Dinamik analizler

Giresun Şebinkarahisar Fatih Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

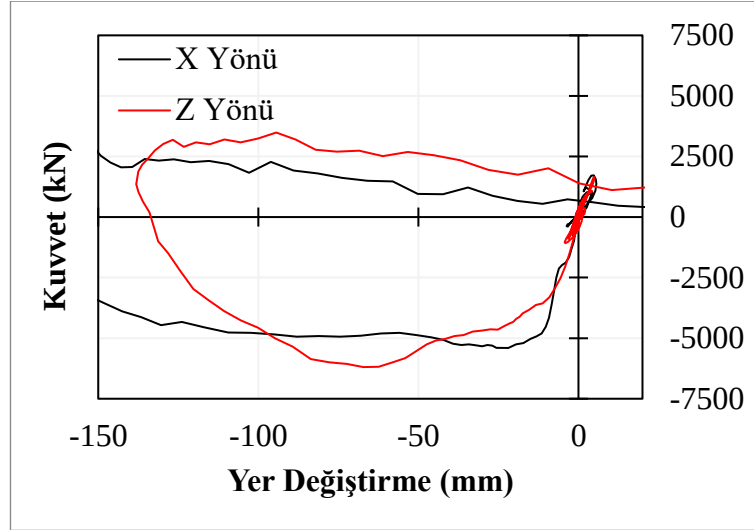
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.207'de verilmektedir. Cami ilk olarak fil ayaklarının birbirleri ile bağlantısını sağlayan kemerlerin kilit taşı bölgesinde çatlaklara maruz kalmaktadır. Bu çatlaklar yer hareketi devam ettik büyümekte ve kubbeye ilerlemektedir. Fil ayaklarının cami duvarına göre daha narin olması sebebiyle duvarlarda herhangi bir hasar gözlemlenmediği zaman

diliminde caminin kemer sistemi hasar görmektedir. Yer hareketi ilerledikçe caminin duvarları kubbe birleşiminden ve pencere boşluklarından çatlaklara maruz kalmaktadır. Caminin fil ayaklarından, kemer sisteminden ve güney doğu köşesinden göçtüğü söylenebilir.



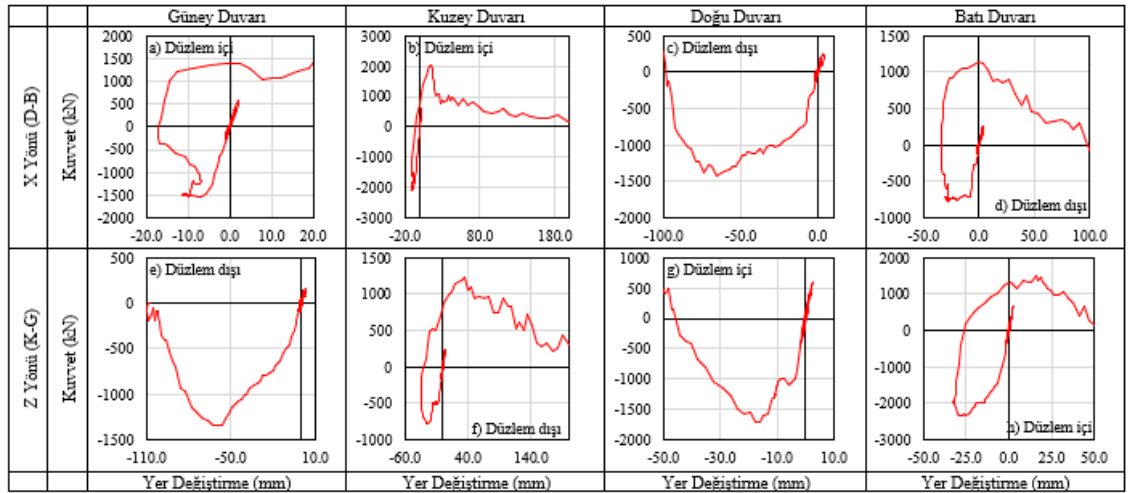
Şekil EK-1.207. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.208’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.208. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

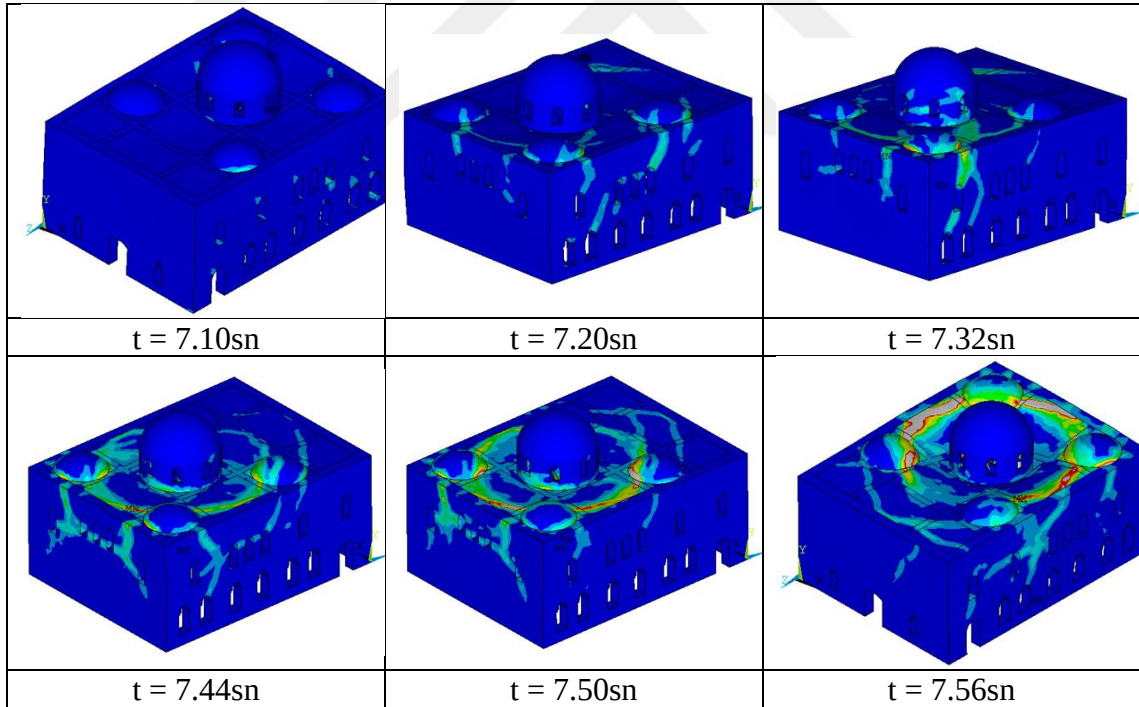
Şekil EK-1.209’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.209. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

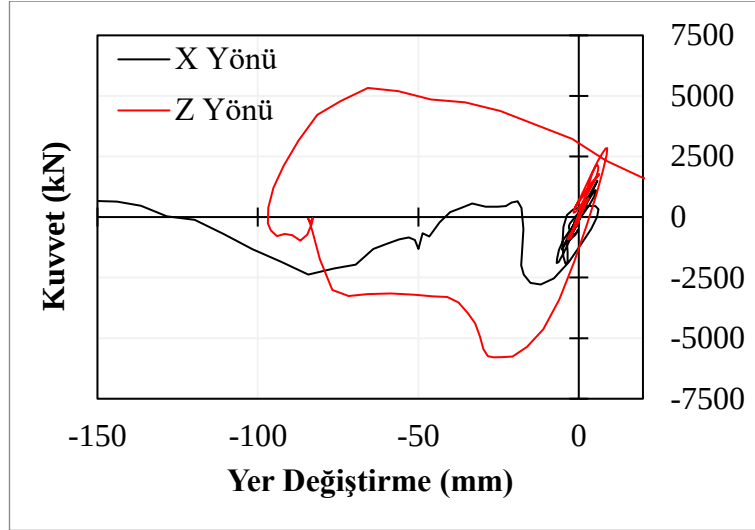
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.210’da verilmektedir. Camide ilk olarak kubbelerden başlayan ve pencere boşluklarından ilerleyen diyagonal çatlak hatları gözlemlenmektedir. Bu çatlak hatları genişlikleri ağır hasara yol açmamaktadır. Sonrasında caminin fil ayakları ve kemer sisteminde çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlakların genişlikleri 20 mm mertebelerine ulaşmaktadır. Çatlakların yeri ve genişliğine bağlı olarak caminin kemer sistemi ile duvar sistemi arasında bağlantı oldukça zayıflamaktadır. Caminin kemer sistemi ezilme ve yer değiştirmelere bağlı olarak cami içine göçmektedir. Bu göçme esnasında hem ana kubbeye daha yakın olan hem de pencere yapısından dolayı zayıf olan güney duvarının üst kısmı da düzlem dışı davranış sergileyerek göçtüğü görülmektedir. Caminin diğer duvarlarında oluşan çatlaklar kemer sisteminin yer değiştirmesi sonucunda duvar-kemer birleşimlerinde oluşarak diyagonal olarak devam etmektedir.



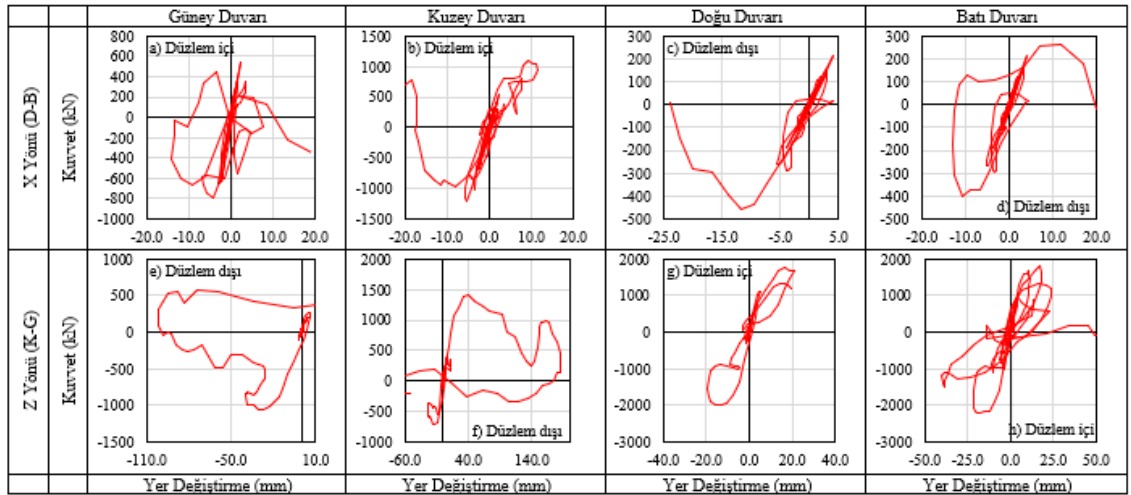
Şekil EK-1.210. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.211’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.211. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

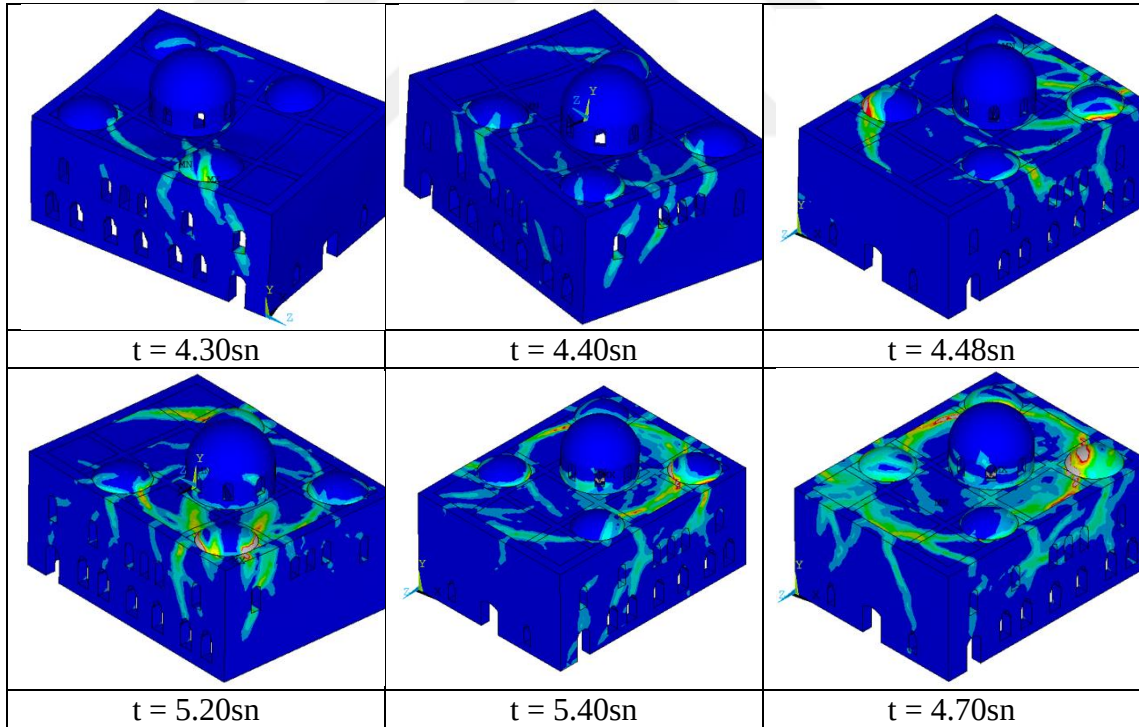
Şekil EK-1.212’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.212. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

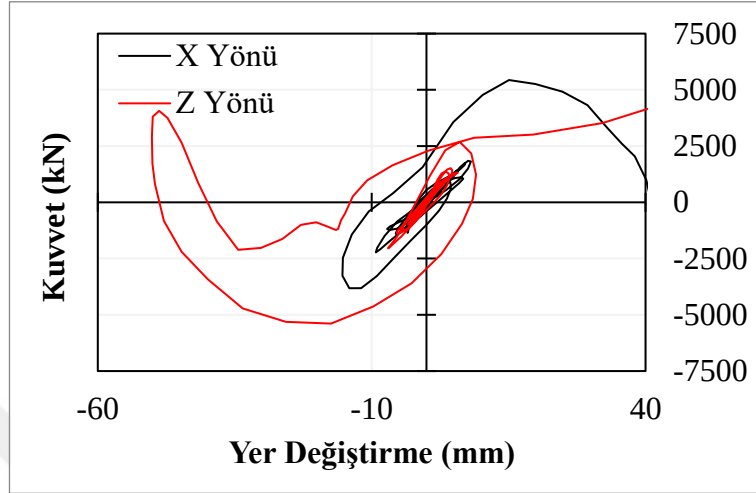
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.213’da verilmektedir. Camide ilk olarak kubbelerden başlayan ve pencere boşluklarından ilerleyen diyagonal çatlak hatları gözlemlenmektedir. Bu çatlak hatları genişlikleri ağır hasara yol açmamaktadır. Sonrasında caminin fil ayakları ve kemer sisteminde çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlakların genişlikleri 20 mm mertebelerine ulaşmaktadır. Çatlakların yeri ve genişliğine bağlı olarak caminin kemer sistemi ile duvar sistemi arasında bağlantı oldukça zayıflamaktadır. Caminin kemer sistemi ezilme ve yer değiştirmelere bağlı olarak cami içine göçmektedir. Ayrıca yer hareketinin özelliğine bağlı olarak caminin güney-batı köşesi de pencere boşluklarından zemine doğru ilerleyen V şeklindeki diyagonal çatlak hatları sebebiyle göçtüğü görülmektedir. Caminin diğer duvarının üst kısımları da kemer sistemin göçmesine bağlı olarak düzlem dışı davranış sergileyerek göçtüğü gözlemlenmektedir.



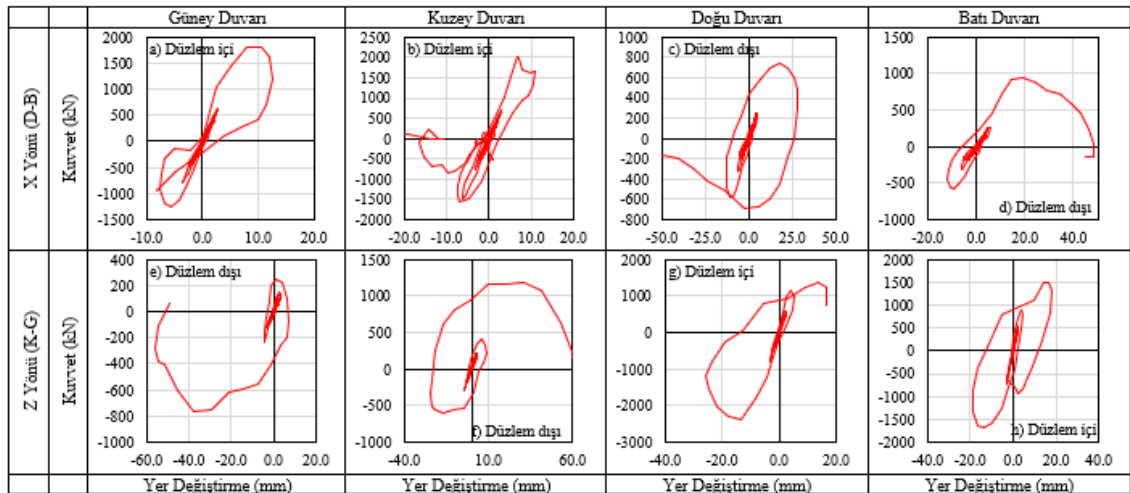
Şekil EK-1.213. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.214’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.214. Şebinkarahisar Fatih ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

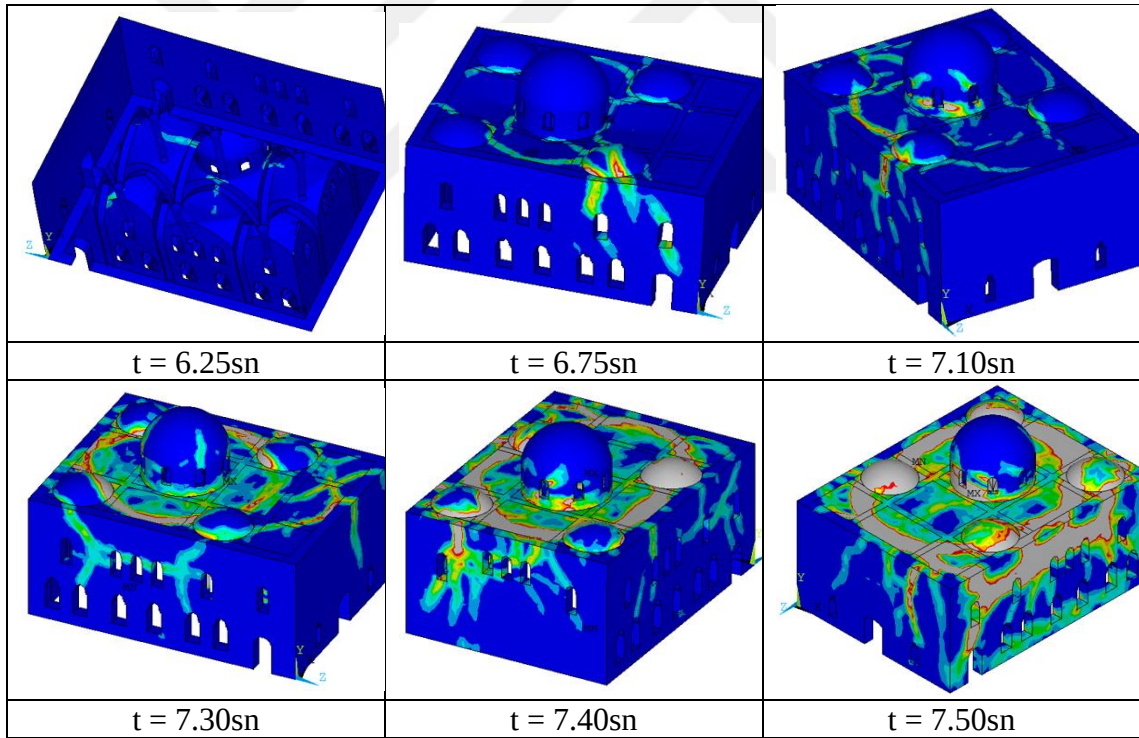
Şekil EK-1.215’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.215. Şebinkarahisar Fatih ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

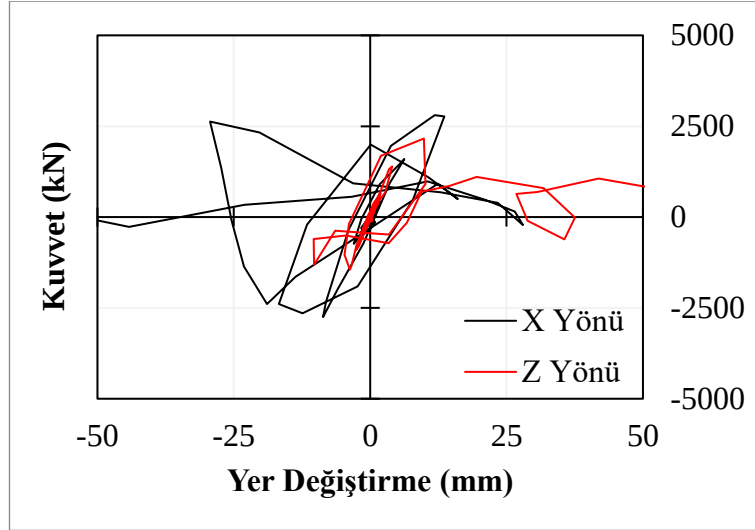
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.216'de verilmektedir. Camide ilk olarak kubbelerden başlayan ve pencere boşluklarından ilerleyen diyagonal çatlak hatları gözlemlenmektedir. Bu çatlak hatları genişlikleri ağır hasara yol açmamaktadır. Sonrasında caminin fil ayakları ve kemer sisteminde çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlakların genişlikleri 20 mm mertebelerine ulaşmaktadır. Çatlakların yeri ve genişliğine bağlı olarak caminin kemer sistemi ile duvar sistemi arasında bağlantı oldukça zayıflamaktadır. Caminin kemer sistemi ezilme ve yer değiştirmelere bağlı olarak cami içine göçmektedir. Caminin batı duvarı, kemer sistemin ile beraber üst pencere boşluklarından içe doğru devrilme hareketi yapmaktadır. Bu devrilme hareketi ile birlikte caminin kuzey ve güney duvarlarının batı duvarı tarafların da göçme meydana gelmektedir.



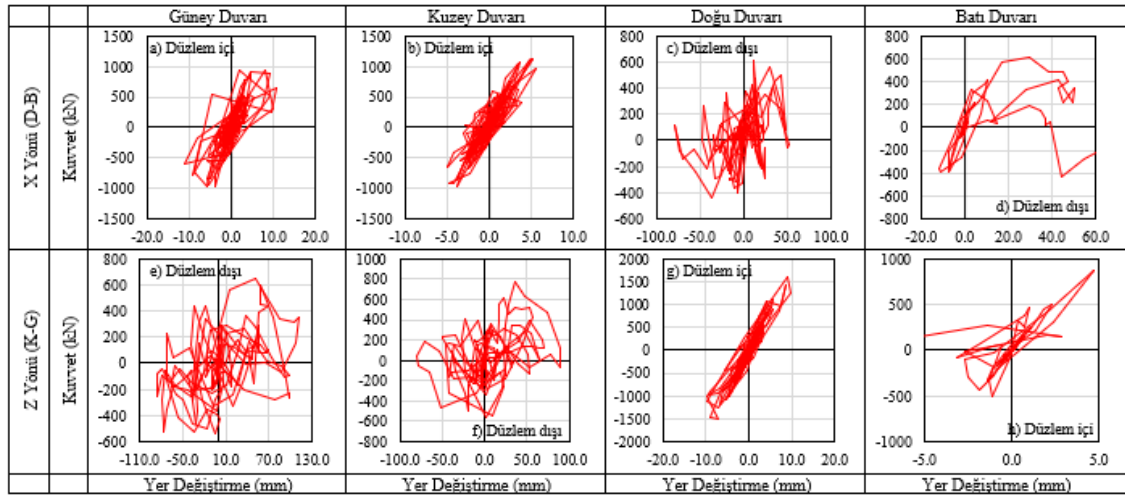
Şekil EK-1.216. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.217'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.217. Şebinkarahisar Fatih ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

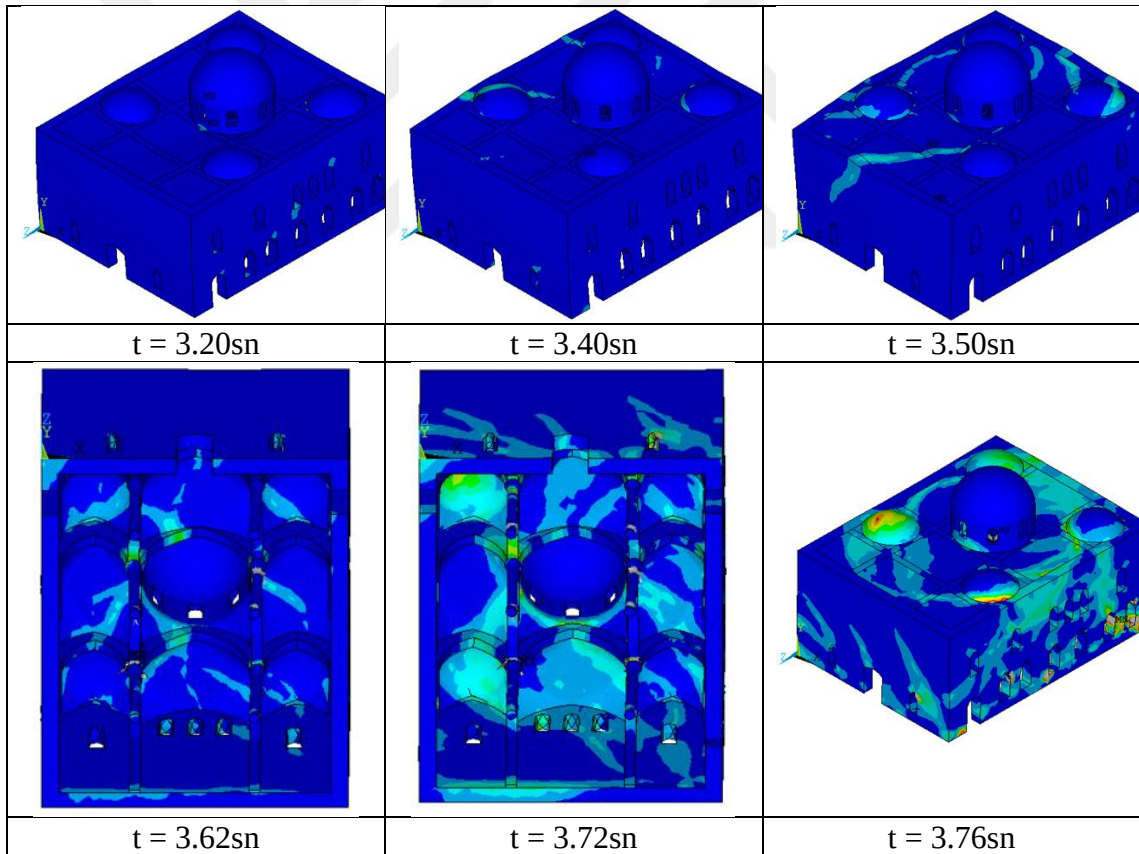
Şekil EK-1.218’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.218. Şebinkarahisar Fatih ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

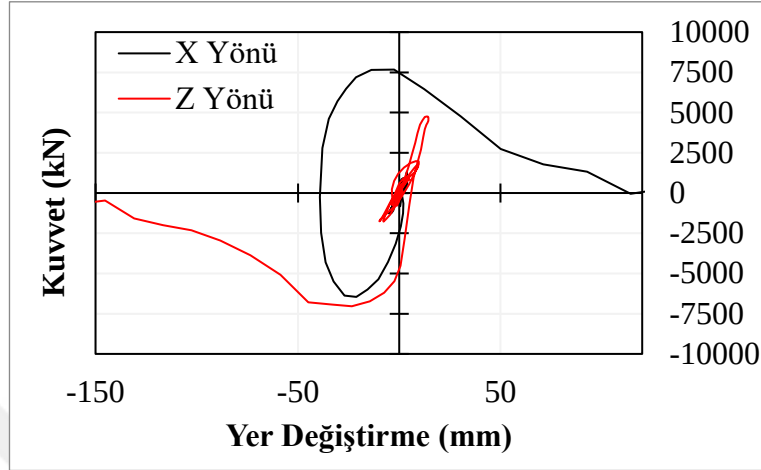
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.219’de verilmektedir. Camide ilk olarak fil ayakları ve kemer sisteminde çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Bu çatlakların genişlikleri 20 mm mertebelerine ulaşmaktadır. Çatlakların yeri ve genişliğine bağlı olarak caminin kemer sistemi ile duvar sistemi arasında bağlantı oldukça zayıflamaktadır. Caminin kemer sistemi ezilme ve yer değiştirmelere bağlı olarak cami içine göçmektedir. Bu göçme esnasında caminin güney-batı köşesinde kenara oldukça yakın olan ve zayıflık oluşturan pencere boşlukları çevresi ezilmeden dolayı göçmektedir. Bu ezilme sebebiyle üçgen prizma şeklin bir duvar göçmesi de gözlemlenmektedir. Caminin diğer duvarları hem kemer sistemin göçmesi hem de yer hareketinin kuvvetli etkisi sebebiyle ağır hasar görüldüğü gözlemlenmektedir.



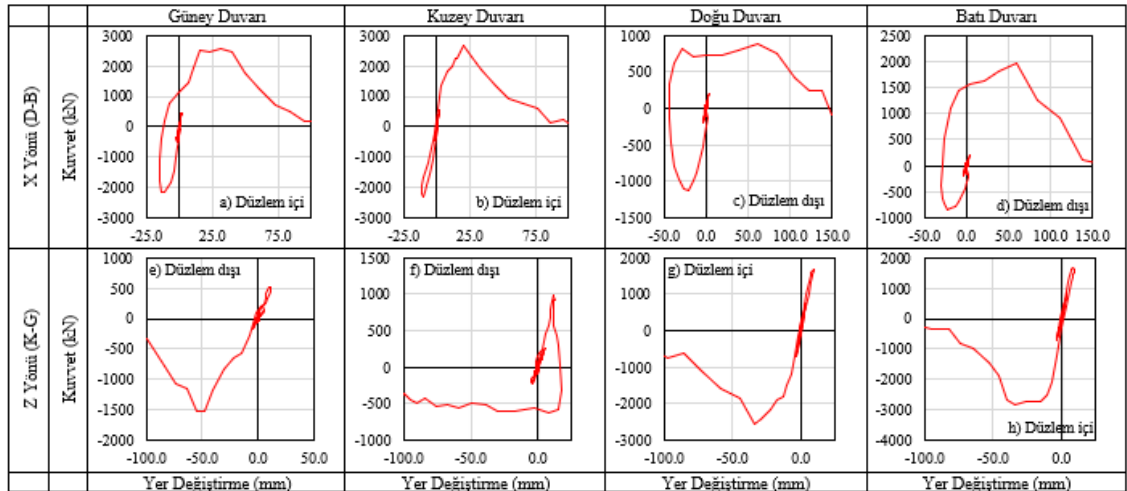
Şekil EK-1.219. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.220’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.220. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.221’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.221. Şebinkarahisar Fatih Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri

1.14. Konya Şerafettin Cami Analizleri ($E=200f_c$)

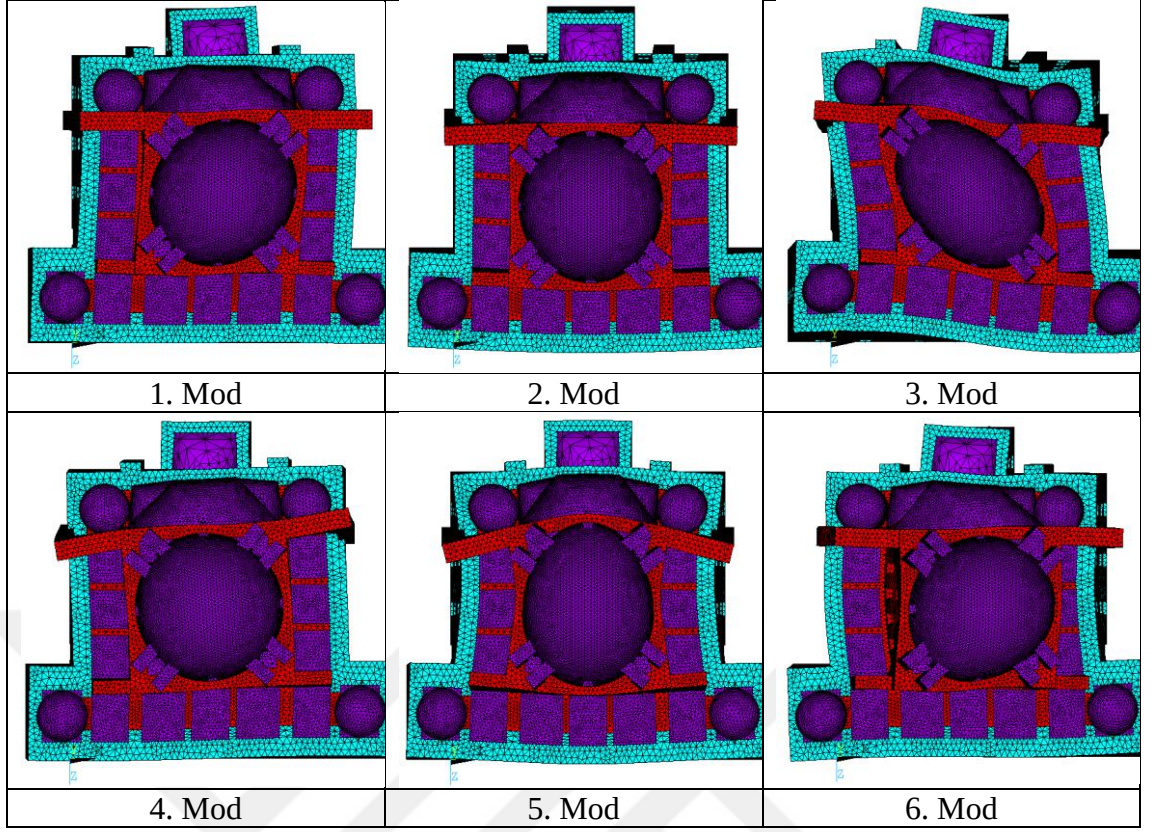
1.14.1. Modal analiz

Konya Karatay Şerafettin Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.14'da yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.14. Şerafettin Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	2.31	0.55	0.27E-08	0.32E-05	0.18E-05
2	2.33	0.30E-05	0.57E-04	0.63	0.33
3	3.51	0.36E-01	0.43E-09	0.61E-07	0.79E-08
4	3.62	0.38E-01	0.41E-08	0.42E-07	0.46E-08
5	3.68	0.44E-06	0.53E-02	0.25E-02	0.35E-04
6	4.33	0.10	0.37E-08	0.19E-05	0.22E-07

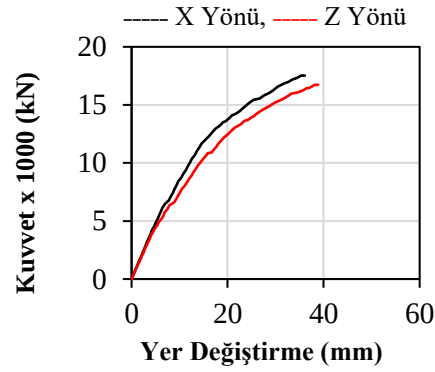
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.222'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 7192 tondur.



Şekil EK-1.222. Şerafettin Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$).

1.14.2. İtme analizi

Şekil EK-1.123'da Şerafettin Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 6750 kN, 6,75 mm; Z doğrultusunda ise 6500 kN, 7,5 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 17525 kN, Z doğrultusunda 16733 kN olarak belirlenmiştir.



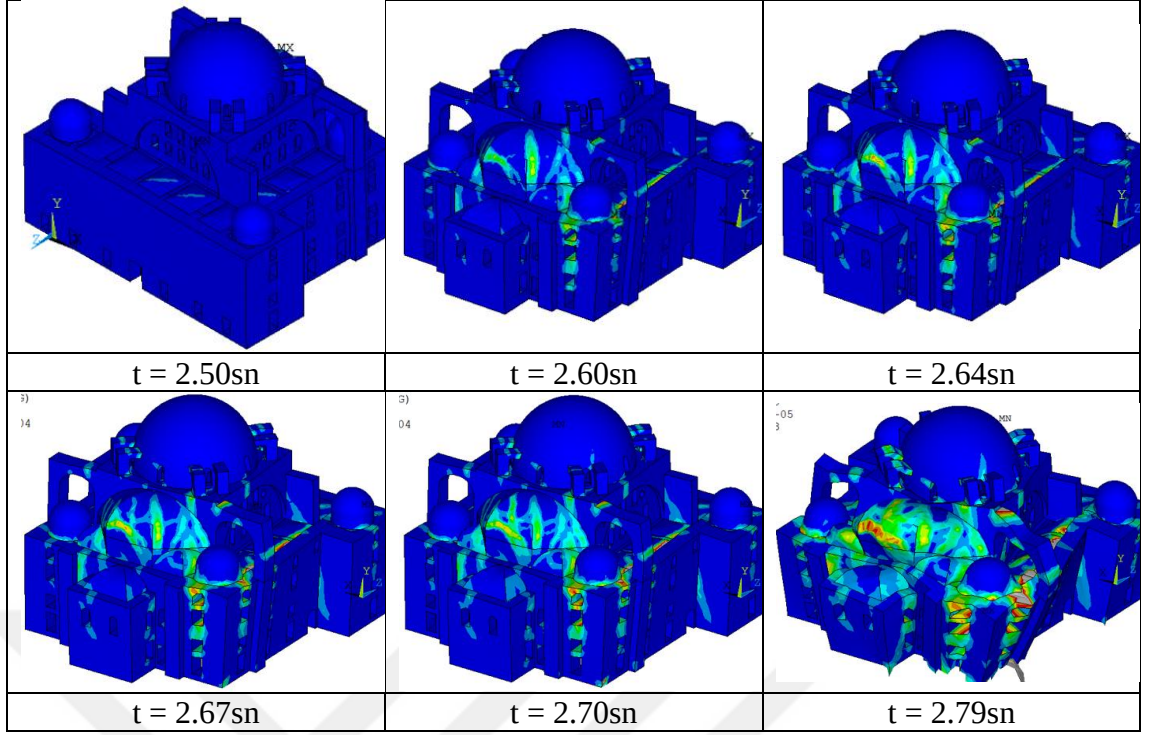
Şekil EK-1.223. Şerafettin Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$)

1.14.3. Dinamik analizler

Konya Karatay Şerafettin Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

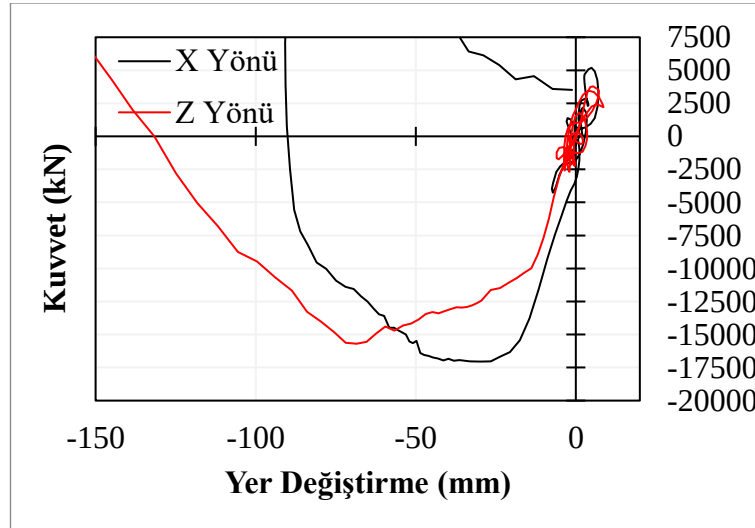
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.224'de verilmektedir. Caminin Güney-batı köşesindeki pencere boşluklarını ve küçük kubbeyi içerek üçgen V şeklindeki çatlak hatları, caminin göçmesine sebep olmaktadır. Güney kısmında bulunan yarım kubbedeki ağır hasar, caminin kemer sisteminin duvar seviyesinin üstünden çatlamasına ve güney-batı yönünde devrilmesine neden olmuştur. Yapının fil ayakları ve kemer sistemi, duvar istemine göre daha rijit olması sebebiyle herhangi bir hasar gözlemlenmemektedir. Ancak devrilmeye bağlı çatlaklar görülmektedir. Caminin yıkıldığı saniyede çatlak genişlikleri 75-80 mm mertebelerine çıkmaktadır. Caminin ana kubbesinden duvarlara yük taşımak amacıyla bulunan kemer yapıları, şekil değiştirmelere bağlı olarak hasar aldığı görülmektedir. Bu da bu sistemin çalıştığının bir göstergesidir.



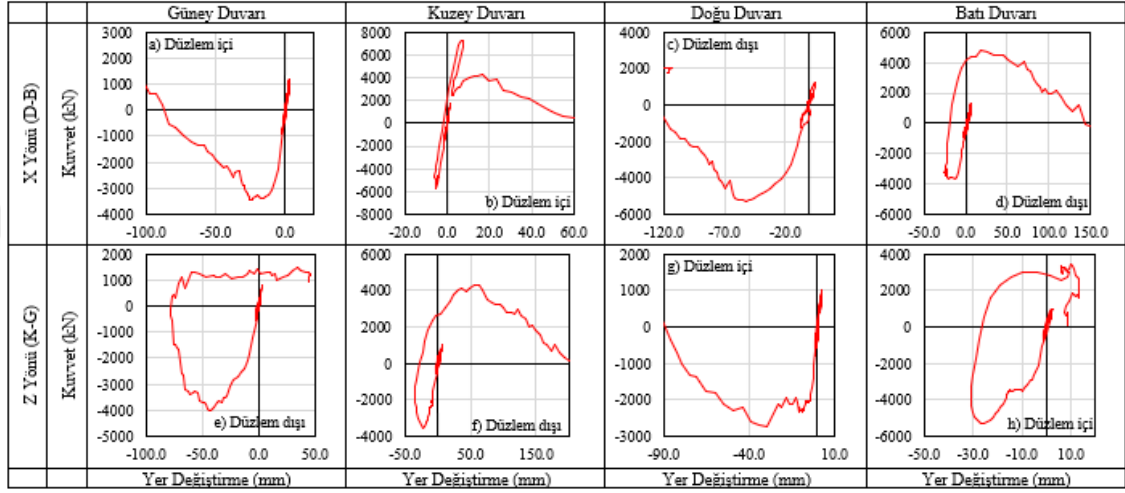
Şekil EK-1.224. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.225’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.225. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

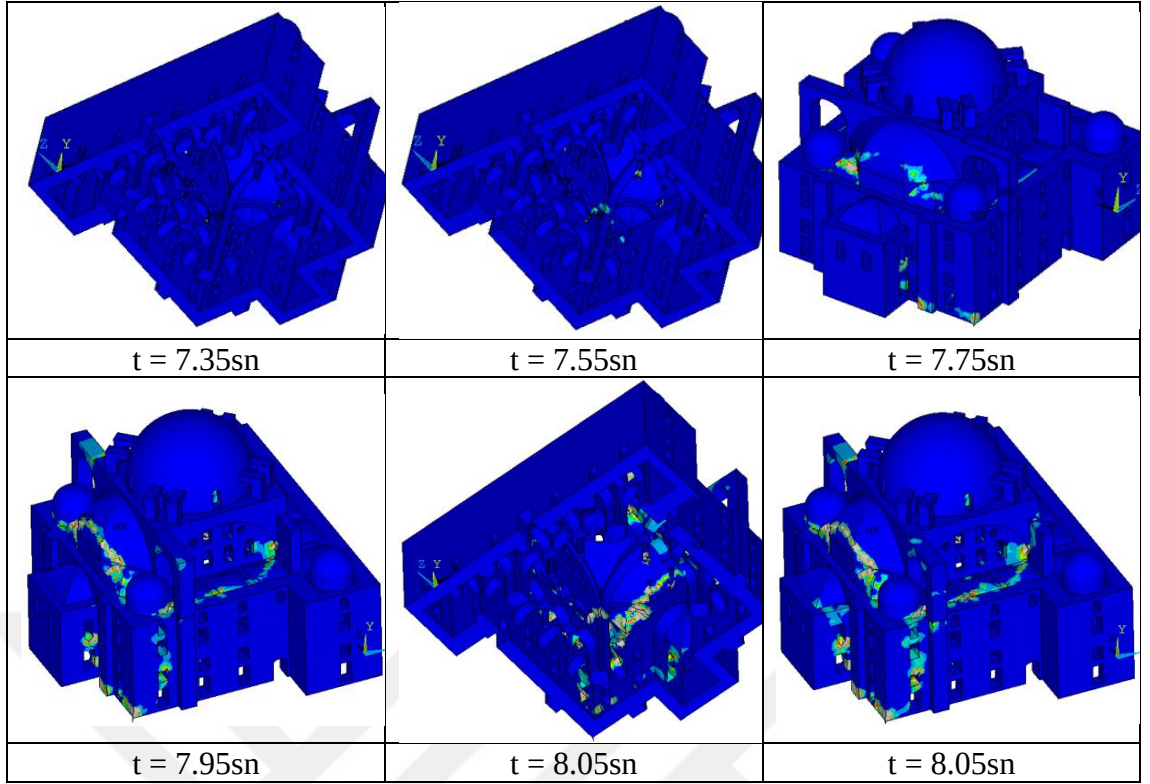
Şekil EK-1.226'de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.226. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

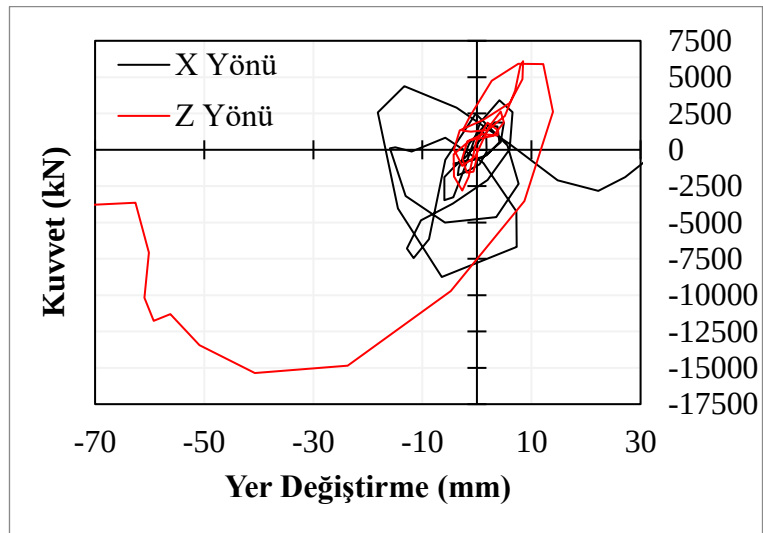
- Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.227'da verilmektedir. Caminin mahfil kısmında bulunan ve oldukça narin olan taş sütunlarda yer değiştirmeye bağlı kesme çatlakları ve ezilmeler meydana gelmektedir. Bu davranışı caminin alt kısmında, fil ayaklarına göre göreceli çok daha narin olan sütunlarda da görmek mümkündür. Bu sütunların hasar almasıyla beraber caminin güney-doğu köşesinde, doğu ve güney duvarının kubbe ile olan bağlantısını kapsayan bir göçme mekanizması kendini göstermektedir. Kubbe, duvarlar ve kemer sistemin duvar yüksekliğindeki yerleri ile bağlantısı koptuğu için göçmektedir. Caminin diğer duvarlarında çatlaklar olmasına karşın, kemer sistemin bu kısımlarda sağlam durması sebebiyle açık bir göçme gözlemlenmemektedir. Caminin güney-doğ köşesindeki taşlarında devrilme hareketi sırasında ezildiği açıkça görülmektedir.



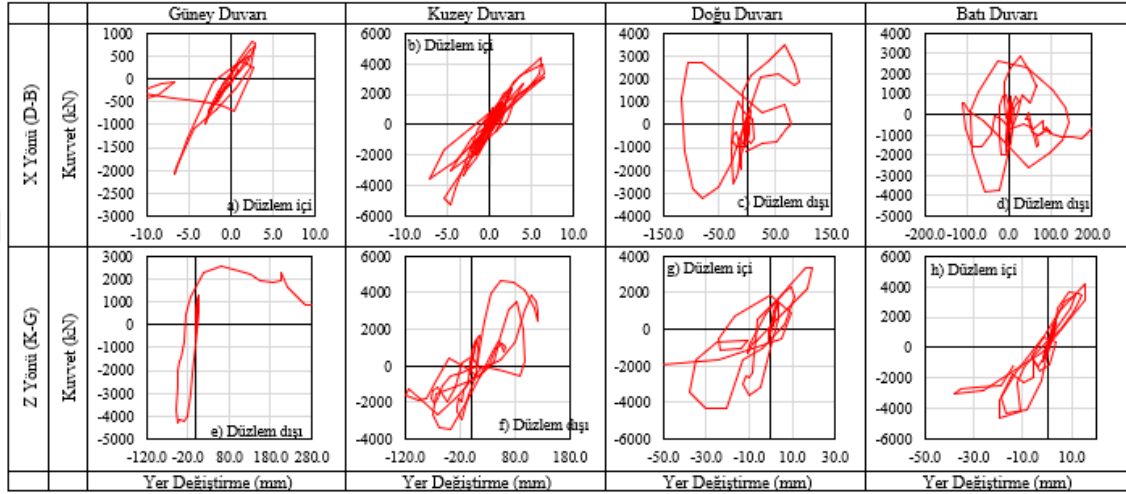
Şekil EK-1.227. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.228’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.228. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

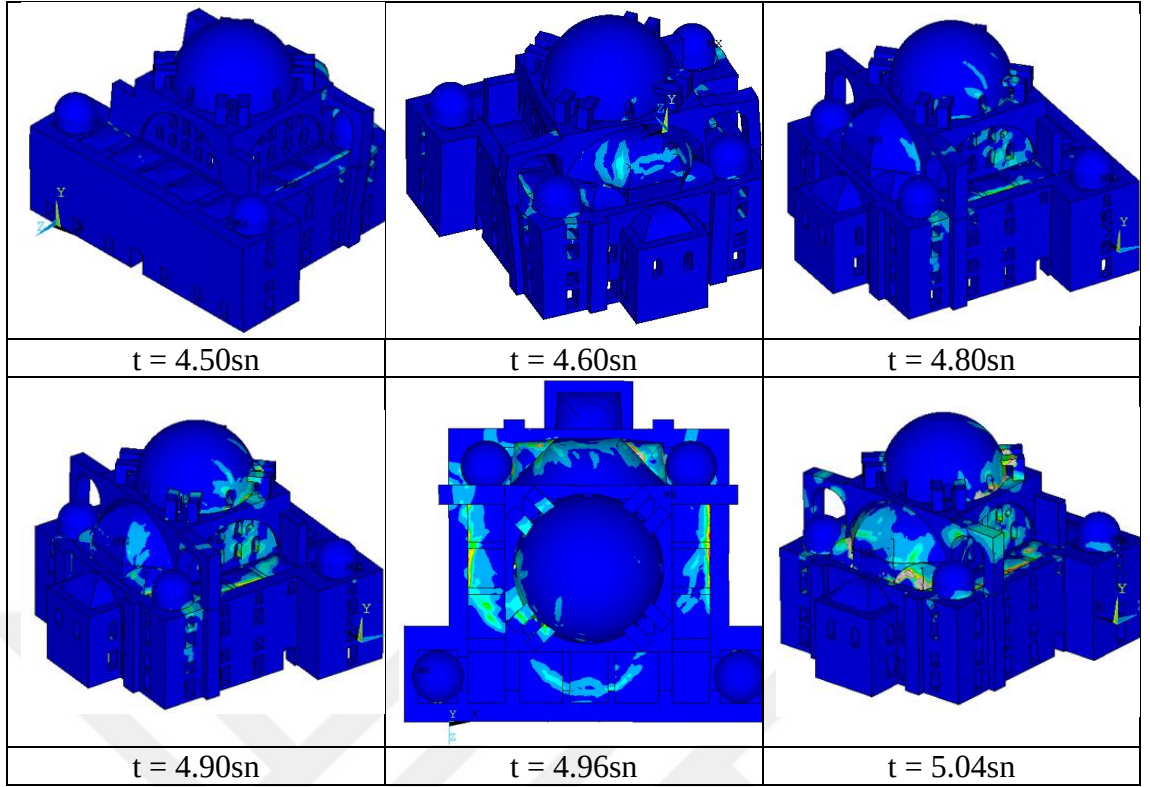
Şekil EK-1.229’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.229. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

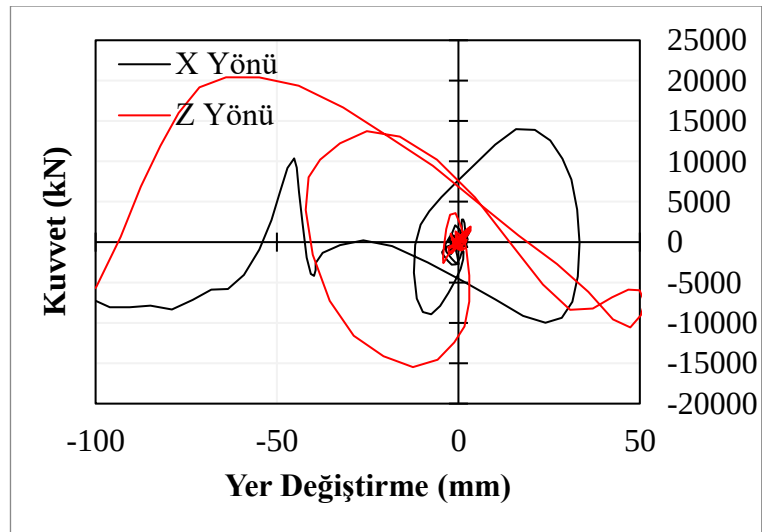
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.230’de verilmektedir. Caminin mahfil kısmında bulunan ve oldukça narin olan taş sütunlarda yer değiştirmeye bağlı kesme çatlakları ve ezilmeler meydana gelmektedir. Bu davranışı caminin alt kısmında, fil ayaklarına göre göreceli çok daha narin olan sütunlarda da görmek mümkündür. Bu sütunların hasar almasıyla beraber caminin güney duvarının kubbe ile olan bağlantısını kapsayan bir göçme mekanizması kendini göstermektedir. Yer hareketinin etkisi ile caminin dört bir köşesinde meydana gelen sütun ezilmeleri, kemer sistemin duvar seviyesinde kubbe ile bağlantısının kopmasına sebep olmaktadır. Caminin kubbesi, dört duvarın sınırından kendi içine doğru göçmektedir. Bu göçme mekanizmasında caminin güney-batı ve güney-doğu köşelerinde derin çatlaklara sebep olmaktadır. Bu göçme mekanizmasında caminin ana taşıyıcı kollar (fil ayakları) hasar görmediği söylenebilir.



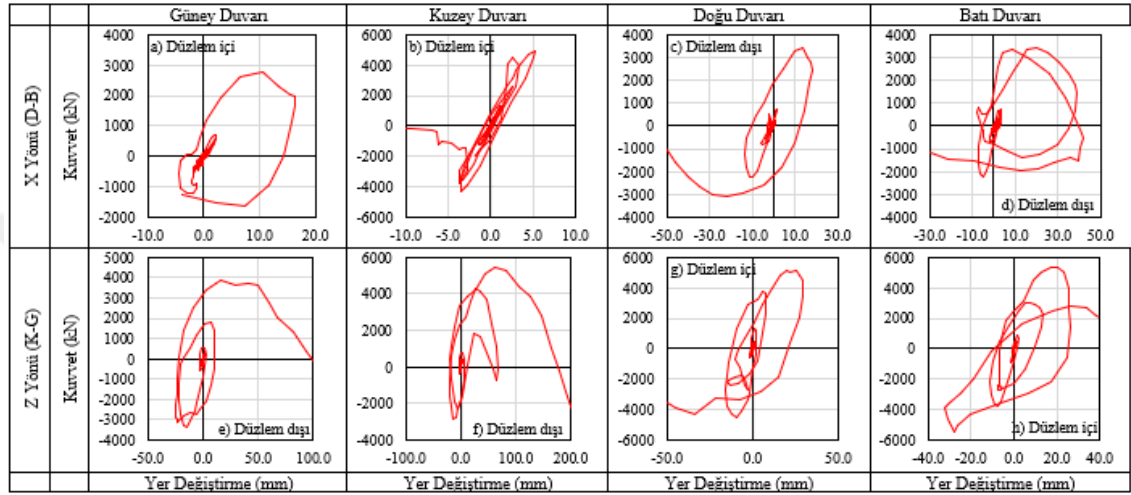
Şekil EK-1.230. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.231’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.231. Şerafettin ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

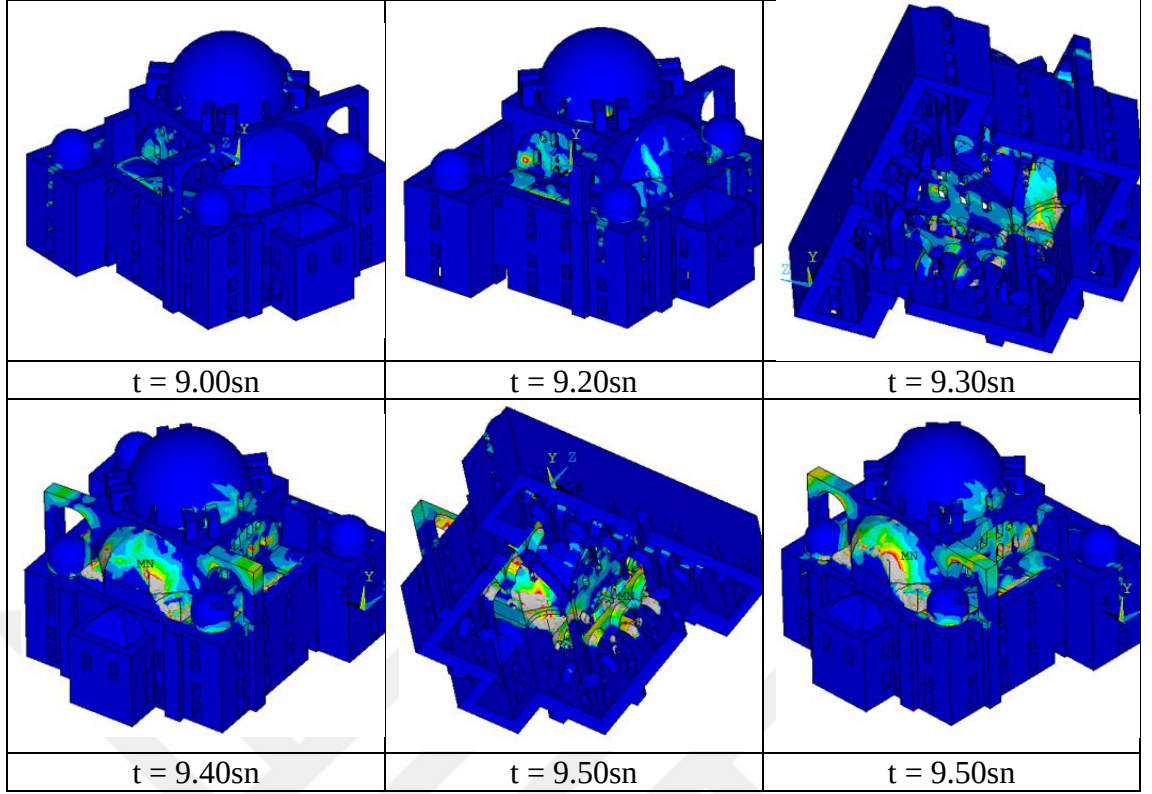
Şekil EK-1.232’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.232. Şerafettin ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

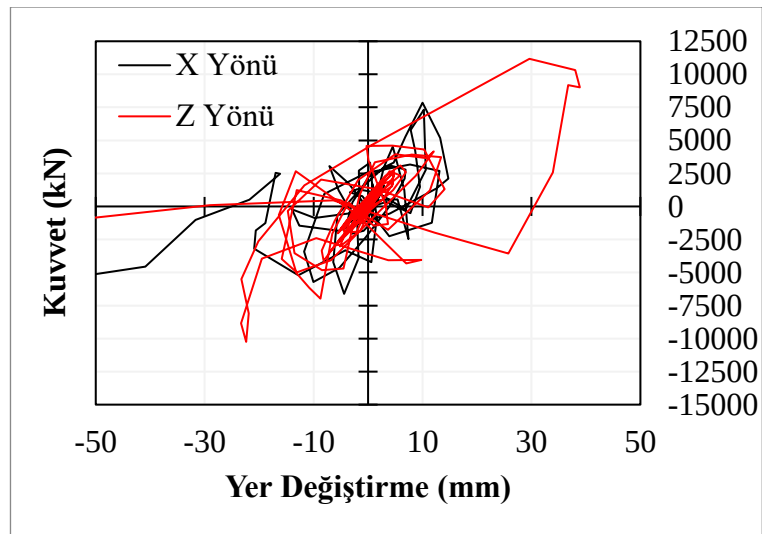
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.233’da verilmektedir. Caminin mahfil kısmında bulunan taş sütunların ezilmesi sonucu, caminin doğusunda ana kubbeye yakın kısımda göçmeler meydana gelmektedir. Yer hareketi etkisiyle kemer sisteme nüfuz eden bu çatlak hatları caminin güney kısmında bulunan yarım kubbeyi ve bu kısımdaki kemerlerin göçmesine sebep olmaktadır. Yer hareketinin 9.50’inci saniyesinde güney kısımda bulunan kemer sistemde oluşan birim şekil değiştirmeler oldukça belirgindir.



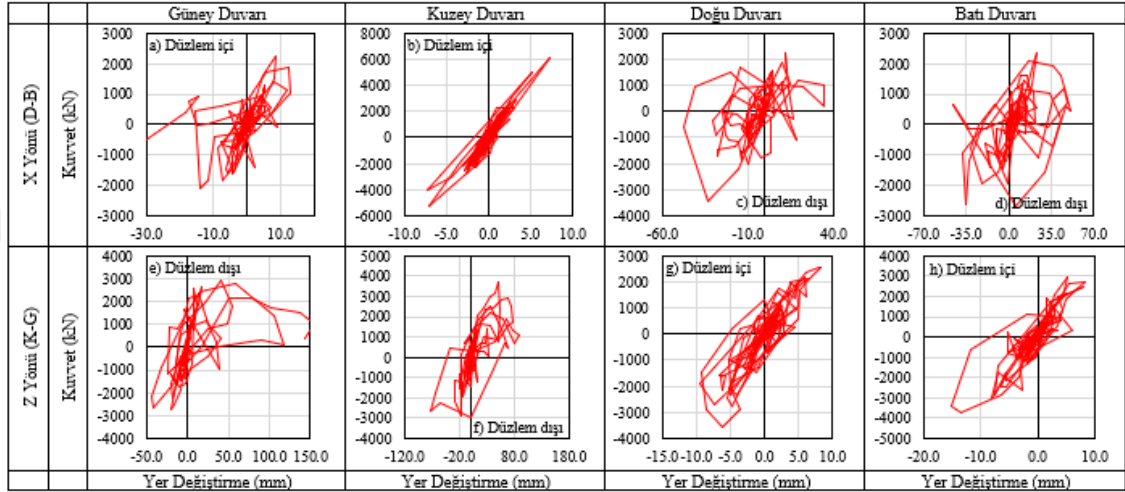
Şekil EK-1.233. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.234’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.234. Şerafettin ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

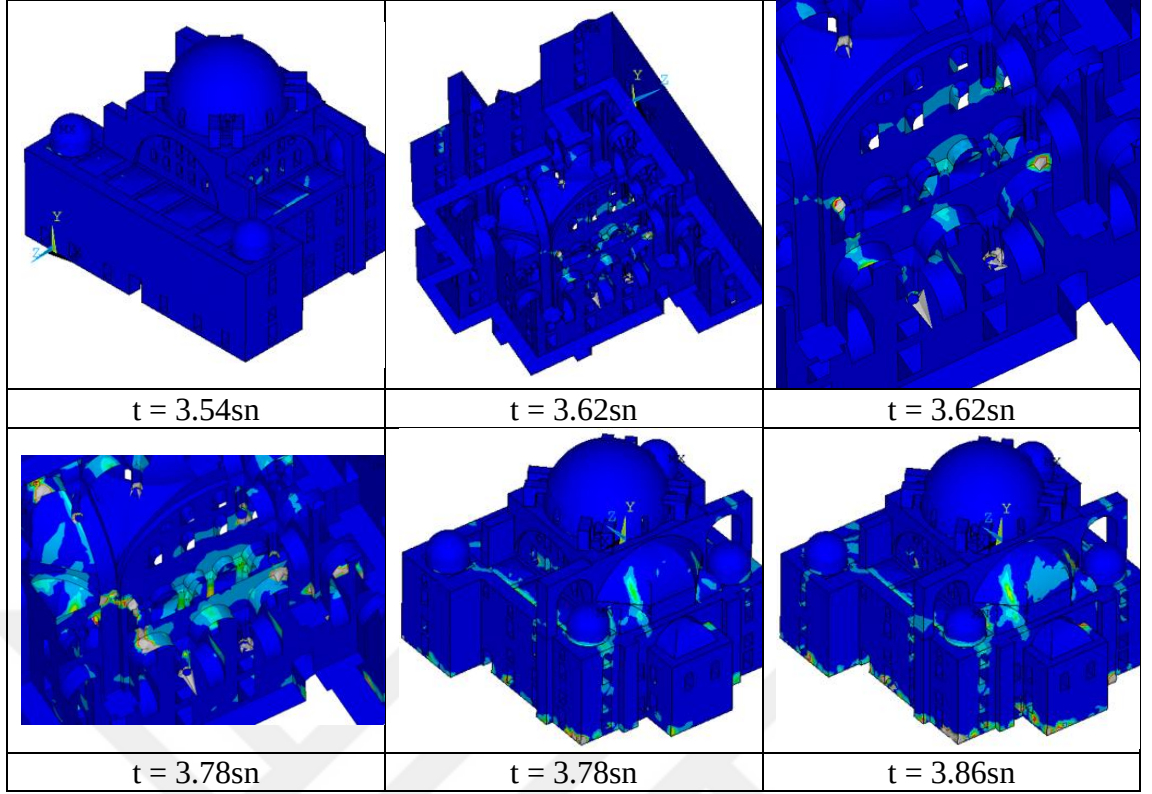
Şekil EK-1.235’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.235. Şerafettin ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

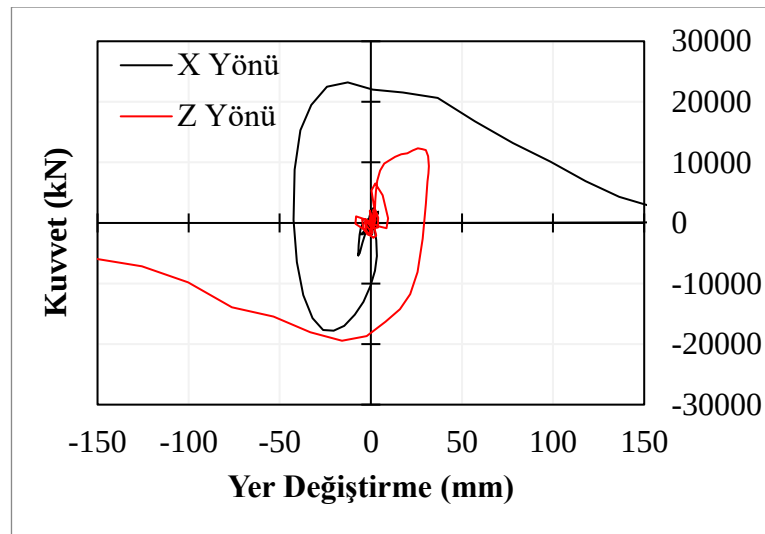
- Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.236’de verilmektedir. Caminin güney duvarının kesme gerilmeleri sonucunda mesnet kısmından kırıldığı görülmektedir. Bu kesme gerilmeleri ile yer değiştirme ve basınç yükleri eklendiğinde caminin güney, doğu ve batı duvarların beraber hareket ederek göçtüğü görülmektedir. Cami kubbesi ile kemer sistem duvar seviyesinden ayrılarak göçme mekanizmasına dahil olmaktadır. Yer hareketinin başlarında taş sütunlarda meydana gelen ezilmeler bu göçme mekanizmasının başlamasına sebep olmaktadır. Bu sütunların ezilmesiyle kemerlerde meydana gelen göçme kubbenin yıkılmasına sebep olmaktadır.



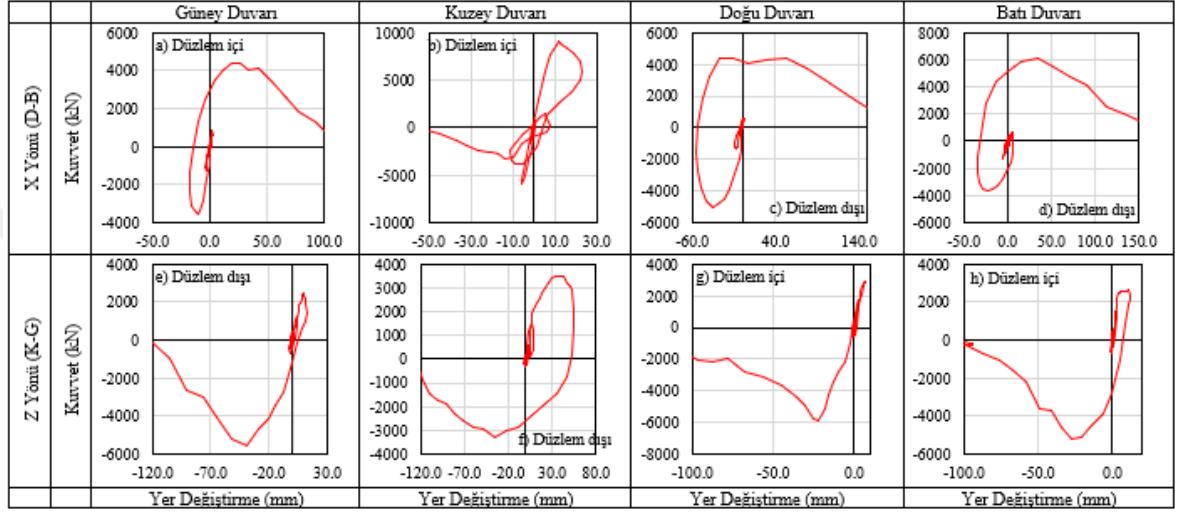
Şekil EK-1.236. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.237’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.237. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.238’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.238. Şerafettin Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.15. İstanbul Beyazıt Cami Analizleri ($E=200f_c$)

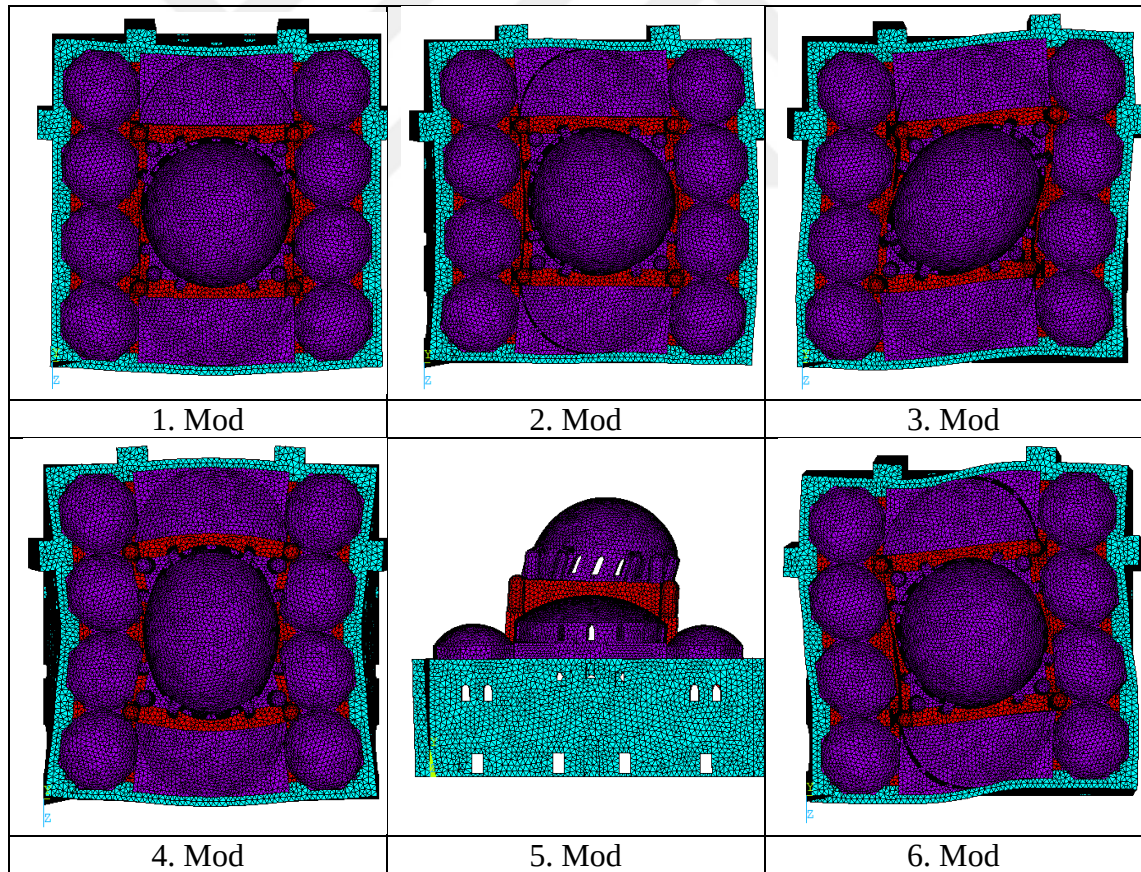
1.15.1. Modal analiz

İstanbul Beyazıt Cami’nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.15’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.15. Beyazıt Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	1.53	0.14E-06	0.12E-03	0.68	0.23
2	1.56	0.67	0.21E-09	0.16E-06	0.23
3	2.06	0.34E-02	0.85E-08	0.61E-07	0.12E-02
4	2.10	0.35E-07	0.64E-02	0.24E-04	0.85E-05
5	2.53	0.32E-01	0.54E-09	0.16E-06	0.14E-02
6	2.56	0.16E-02	0.80E-09	0.26E-07	0.19

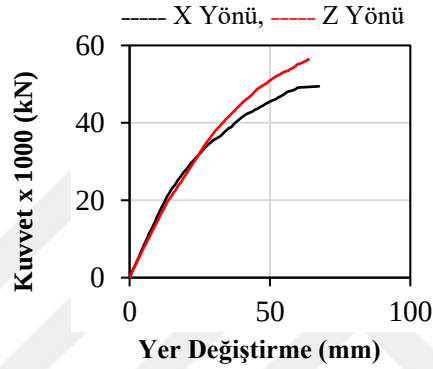
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.239'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 28221 tondur.



Şekil EK-1.239. Beyazıt Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.15.2. İtme analizi

Şekil EK-1.240'da Beyazıt Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 22800 kN, 14,25 mm; Z doğrultusunda ise 21600 kN, 13,5 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 49425 kN, Z doğrultusunda 56443 kN olarak belirlenmiştir.



Şekil EK-1.240. Beyazıt Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$)

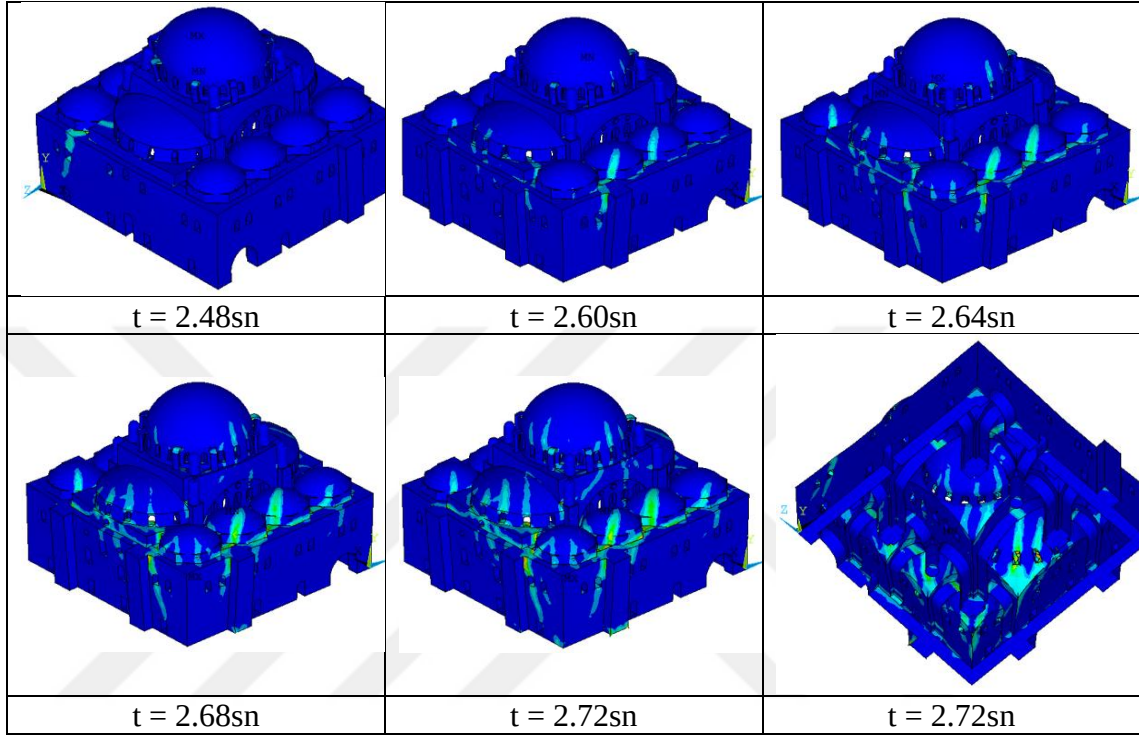
1.15.3. Dinamik analizler

İstanbul Beyazıt Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

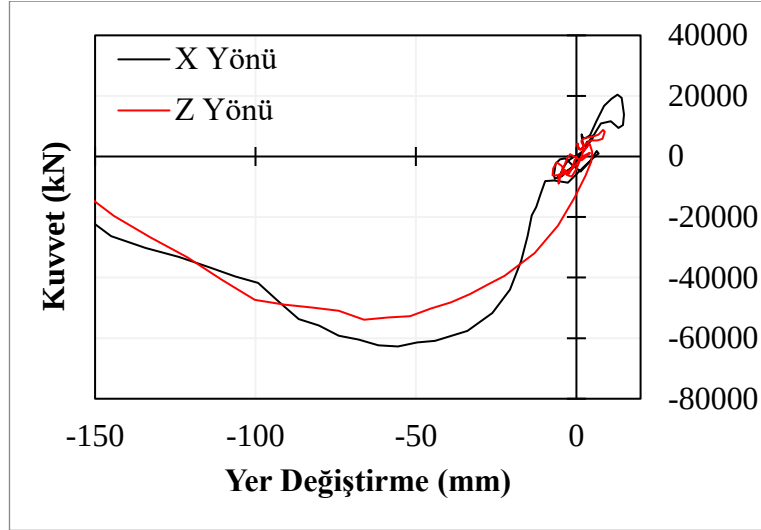
Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.241'de verilmektedir. İl hasar caminin kuzey-doğu köşesinde meydana gelmektedir. Küçük köşe kubbeden başlayan çatlak hattı, duvar köşelerinde bulunan pencere boşluklarından ilerleyerek V şeklinde devam etmektedir. Yer hareketi çevrimi sonrasında hasar Caminin güney-batı köşesine yönelmiştir. Güney-batı kısmında bulunan fil ayağının kesme gerilmeleri sebebiyle göçmesi caminin temel yıkılma sebebi olarak söylenebilir. Bu

yıkılma mekanizmasına güney-batı köşesinde oluşan çatlak hatları eşlik etmektedir. Caminin güneyinde bulunan yarım kubbeyi içeren bu göçme mekanizması sonucunda yapının göçtüğü söylenebilir. Diğer kısımlarda oluşan çatlaklar ağır hasar olarak sınıflandırılabilir.



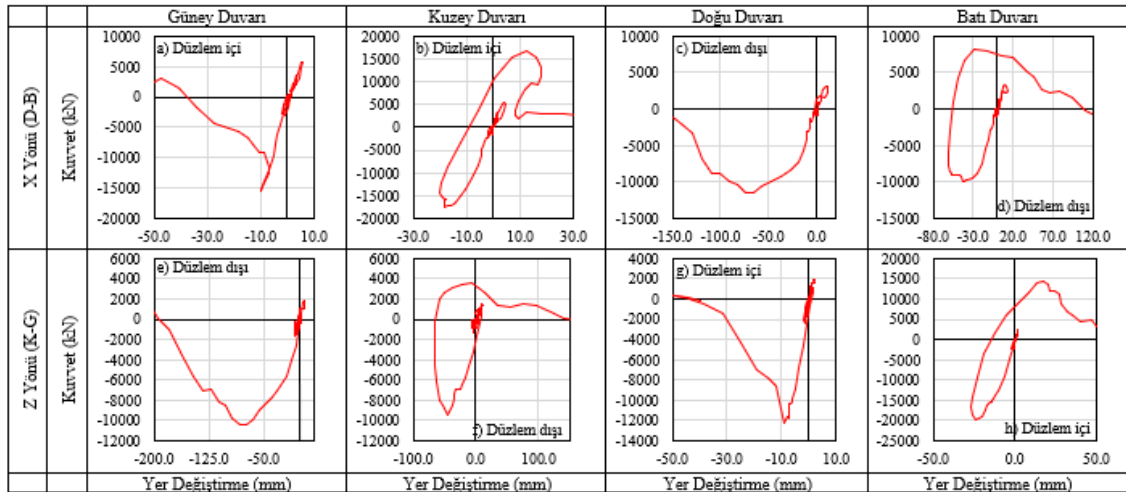
Şekil EK-1.241. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.242’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.242. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

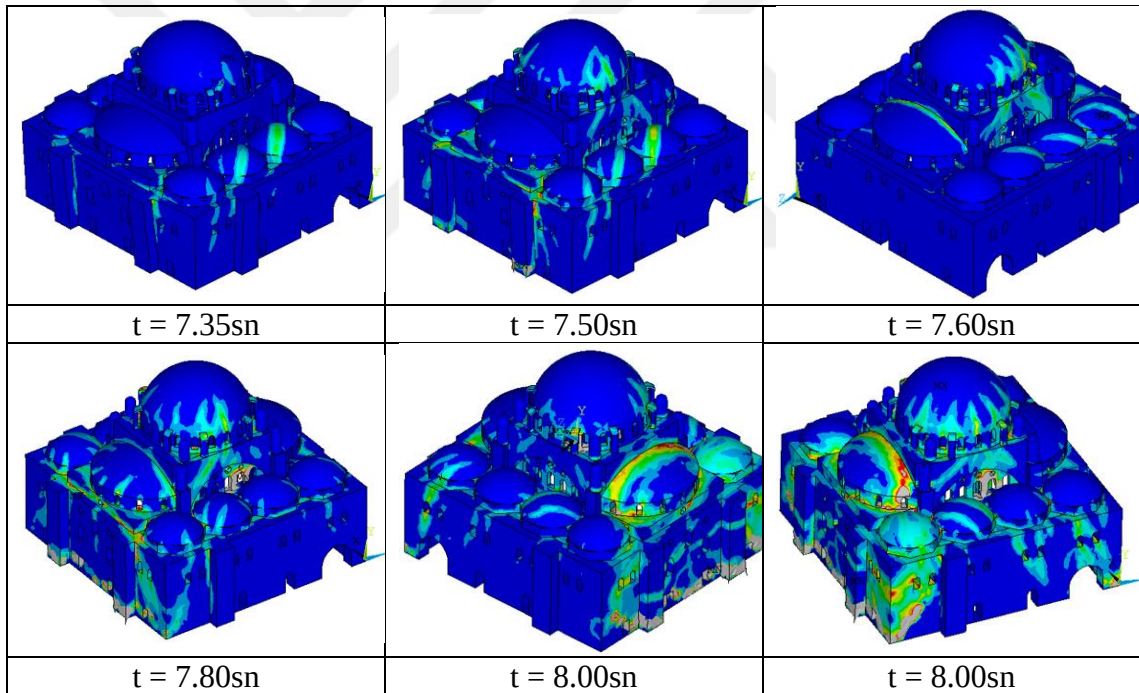
Şekil EK-1.243’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.243. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

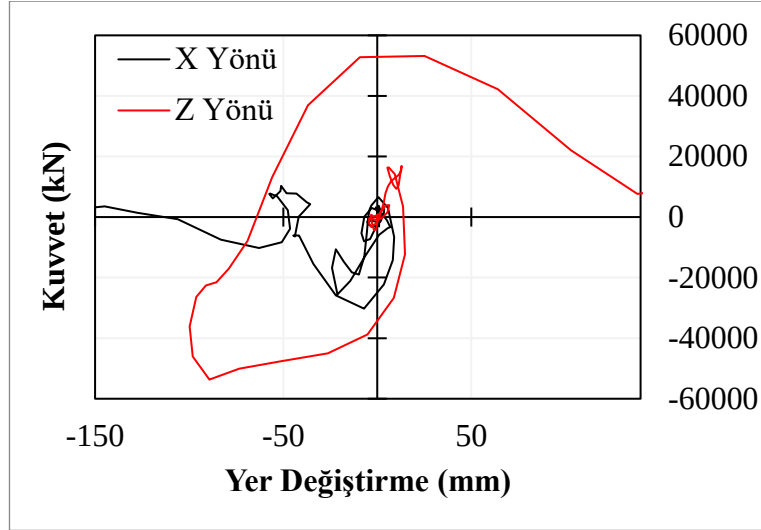
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.244'da verilmektedir. Camide ilk olarak güney duvarında ve doğu duvarının üstündeki kubbelerde hasarlar meydana gelmektedir. Güney duvarında yarım kubbenin köşelerinden başlayan çatlak hatları duvarın zeminine doğru ilerlemektedir. Yer hareketi çevrimi nedeniyle hasarlar yapının kuzey kısmına doğru kaysa da yapıda oluşan göçme güney duvarının devrilmesiyle meydana gelmektedir. Güney duvarı, duvar üstündeki kubbe ve doğu ve batı duvarının kemer sisteme kadar olan kısımları beraber devrildiği görülmektedir. Bu düzlem dışı hareket ana kubbenin de göçmesine sebep olmaktadır. Yapının fil ayaklarında ve kemer sistemin duvar seviyesine kadar olan kısımda belirgin bir göçme mekanizması görülmemektedir.



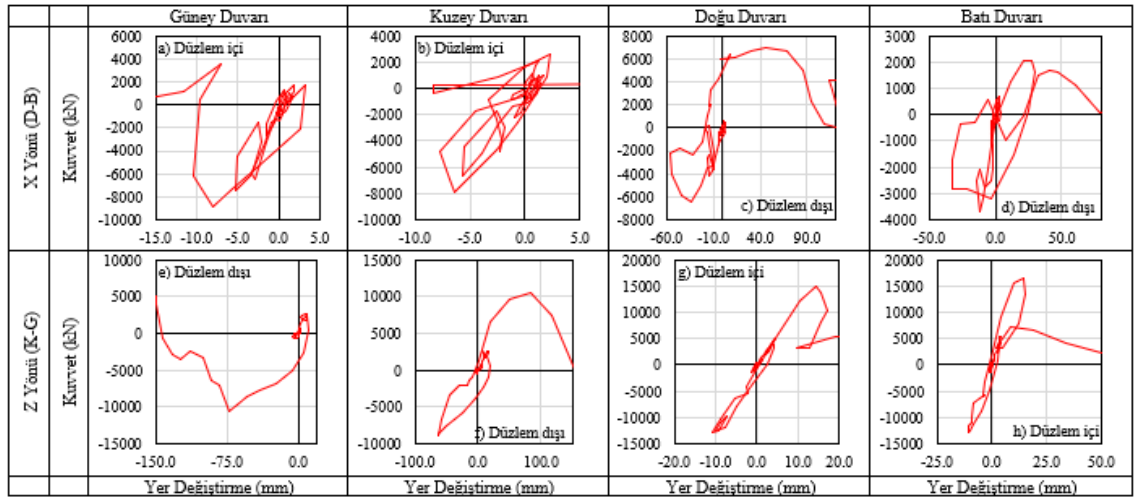
Şekil EK-1.244. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.245'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.245. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

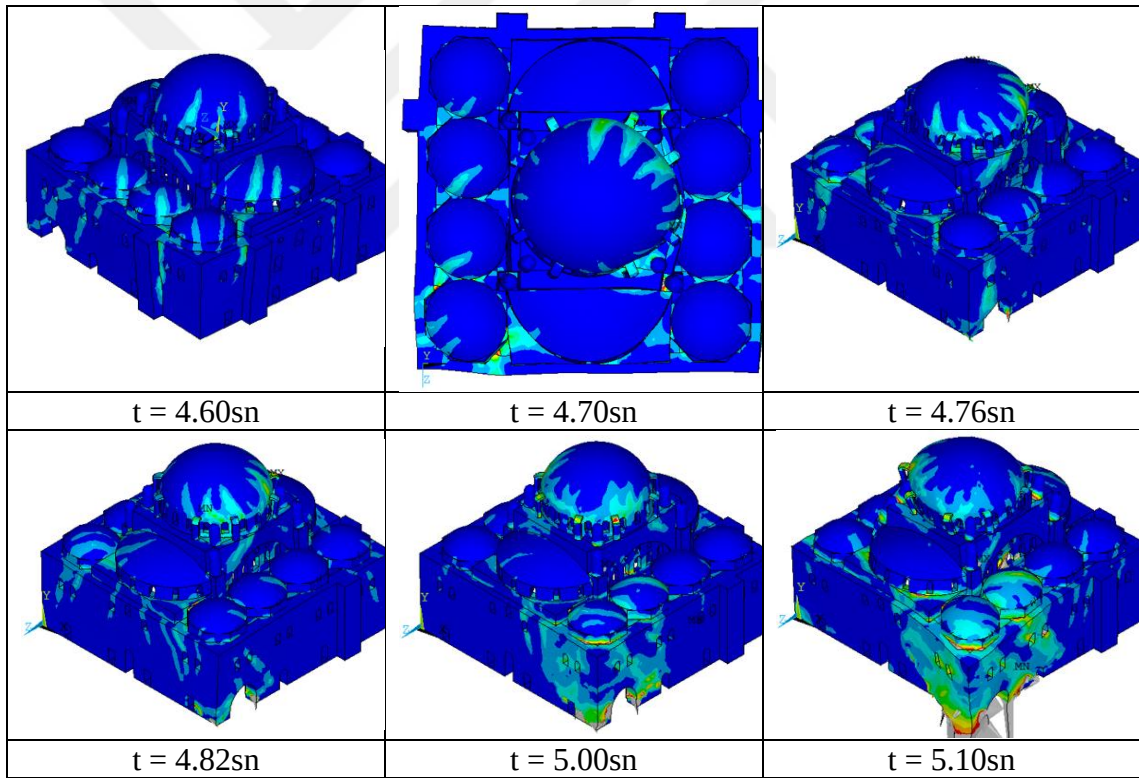
Şekil EK-1.246'de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.246. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

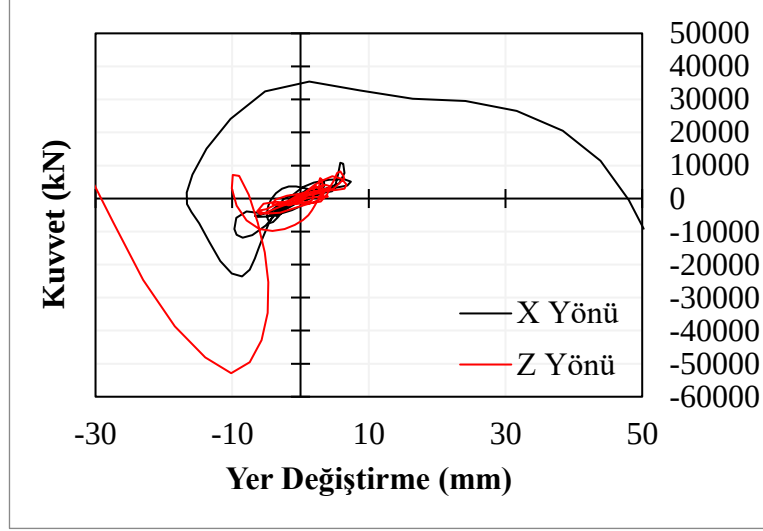
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.247’de verilmektedir. Caminin güney-batı köşesinde meydana gelen V ekindeki çatlaklar yapıda belirgin olan ilk hasardır. Bu hasar mekanizmasını yapının kubbesinde meydana gelen derin çatlaklar izlemektedir. Ancak yapının göçmesine sebep olan hasar mekanizması, kuzey-batı köşesinde meydana gelen V yıkılmasıdır. Batı kısmında iki küçük kubbeyi de kapsayan bu yıkılma ile yapının merkez kubbesi de göçmektedir. Kuzey duvarının üstünde bulunan yarım kubbenin ve ana kubbe kasnağının da göçtüğü görülmektedir. Yapının kemer sisteminde ve fil ayaklarında belirgin bir göçme gözlemlenmemektedir. Diğer duvarlarda oluşan çatlaklar yapı başlangıç rijitliğini etkilemesine rağmen ana göçmeyi tetiklememiştir.



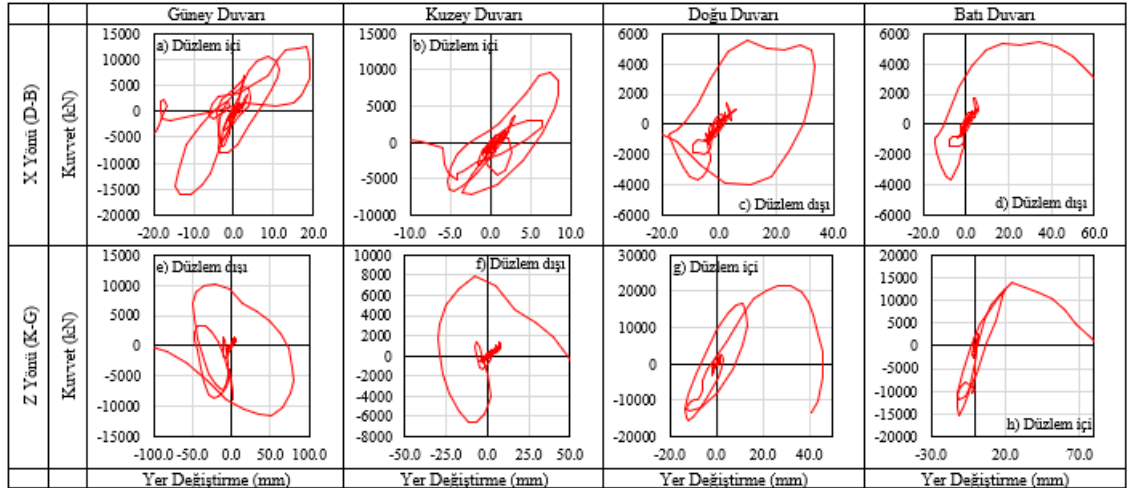
Şekil EK-1.247. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.248’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.248. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

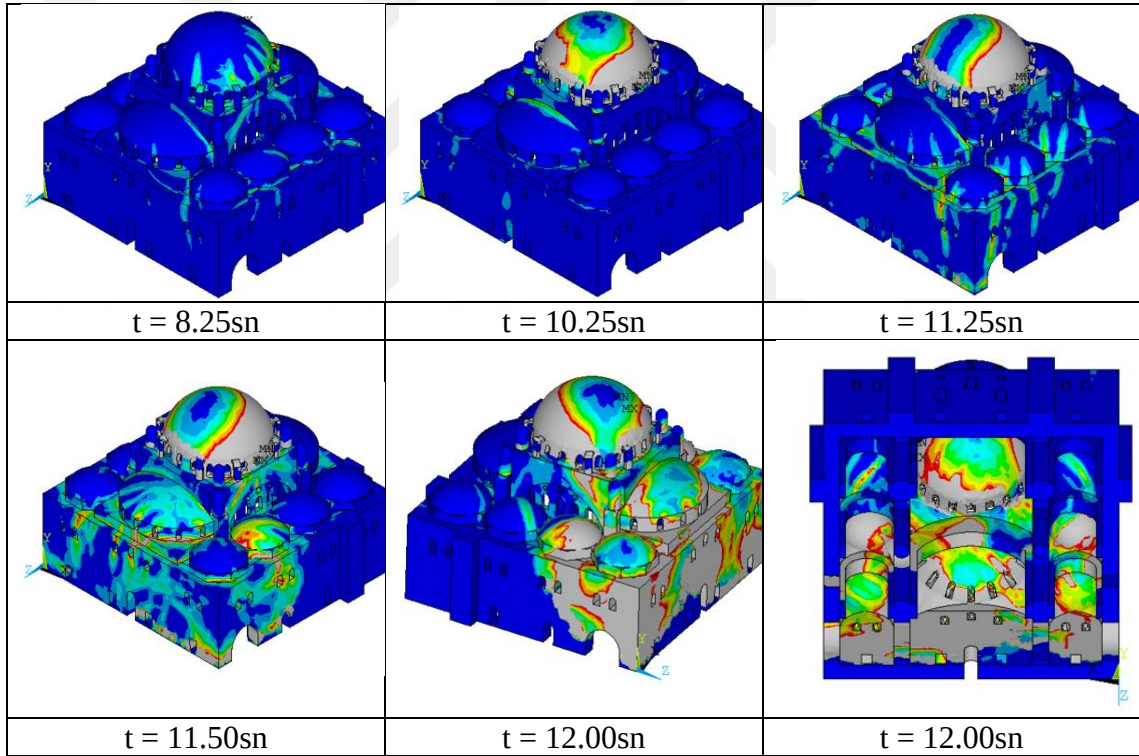
Şekil EK-1.249’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.249. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

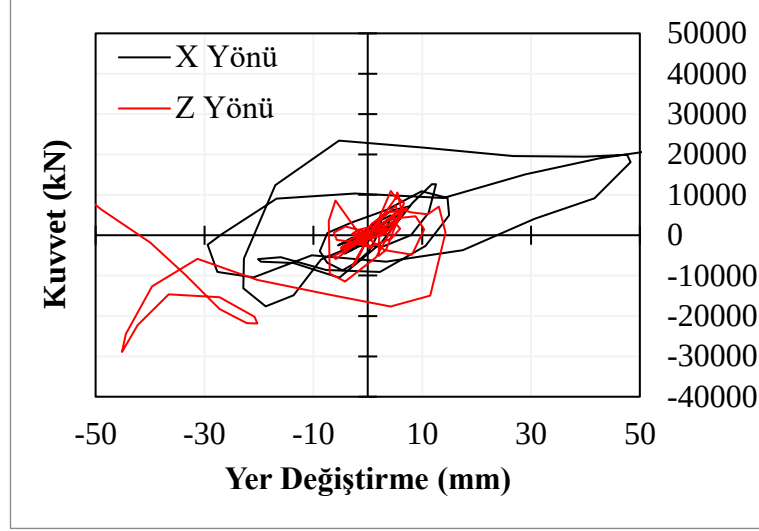
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.250’da verilmektedir. Yer hareketi başlarında yapının kubbesinin çeşitli yerlerinde oluşan çatlaklar 8.25’nci saniyede ana kubbenin göçmesine sebep olmaktadır. Ana kubbenin göçmesini, fil ayaklarının taşıdığı merkez kemerler takip etmektedir. Merkez kemerlerin yıkılması, yapının kuzey duvarının doğu ve batı duvarlarının bir kısmını da kapsayacak şekilde düzlem dışı davranış göstermesine sebep olmaktadır. Yapının ana göçme mekanizması kuzey duvarının devrilmesi olarak söylenebilir. Ancak Ana kubbenin göçmesi bu mekanizmayı tetiklemektedir. Yapının diğer duvarlarında ve fil ayakları belirgin hasarlar olmamasına karşın ağır ve orta hasarlı olarak kabul edilebilir.



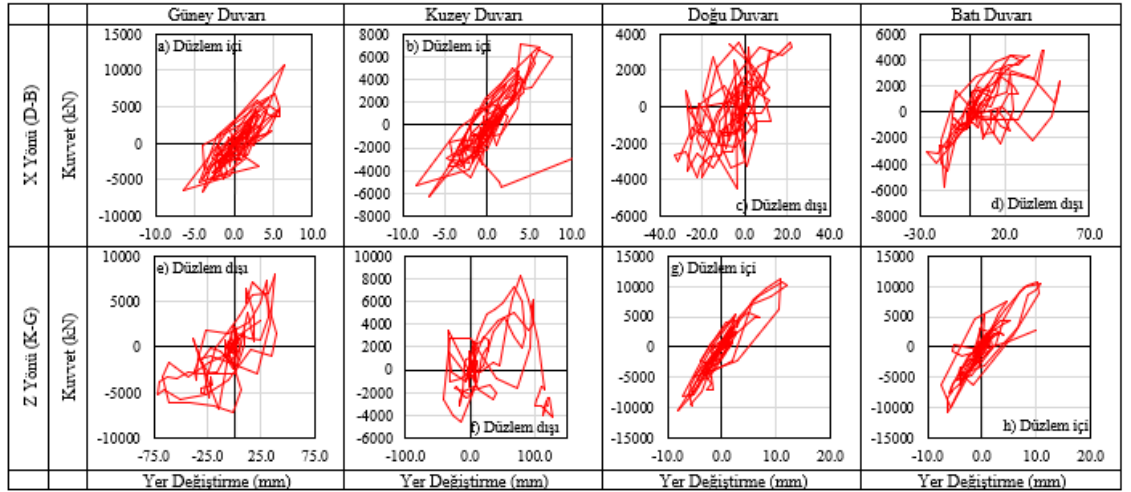
Şekil EK-1.250. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.251’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.251. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

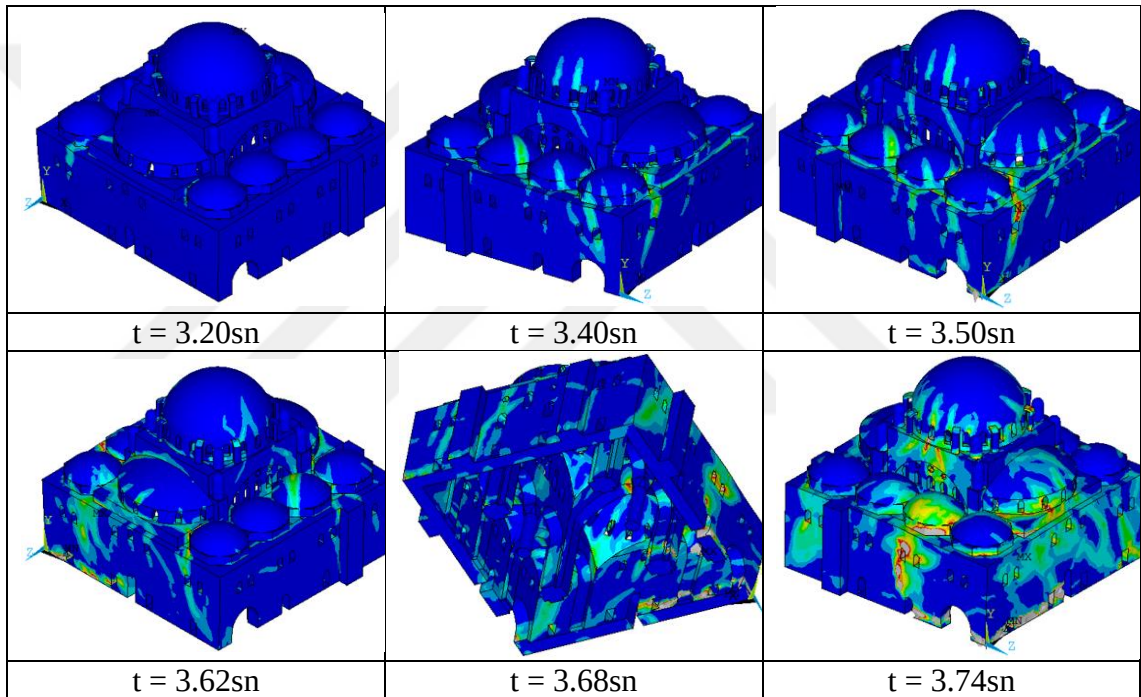
Şekil EK-1.252’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.252. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

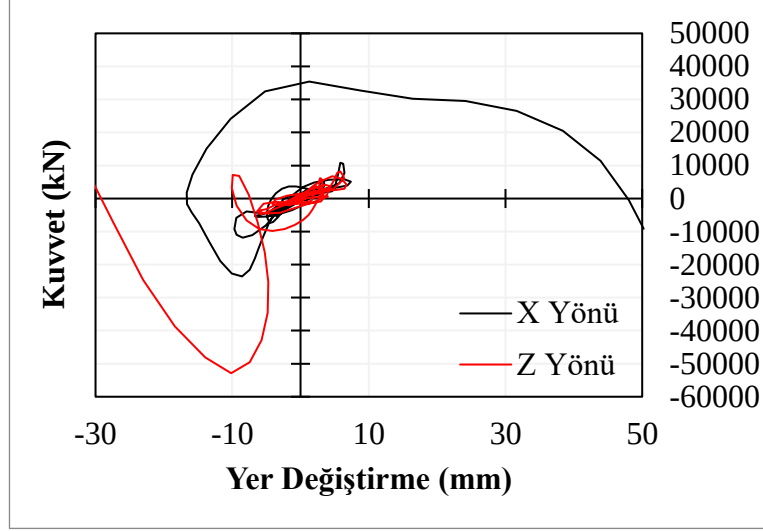
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.253’de verilmektedir. Caminin güney-doğu kısmında fil ayağının basınç kuvvetleri ve kesme gerilmeleri altında ezilmesi ve yer değiştirmesi sebebiyle cami, yıkılma mekanizmasına girmiştir. Fil ayağının hasar görmesiyle beraber kuzey-batı köşesinde oluşan V şeklindeki çatlaklar genişleyerek caminin kuzey duvarının düzlem dışı göçmesine sebep olmuştur. Bu düzlem dışı davranış esnasında caminin kemer sistemi duvar seviyesinden bu davranışa eşlik ederek ana kubbenin de göçmesi gerçekleşmiştir.



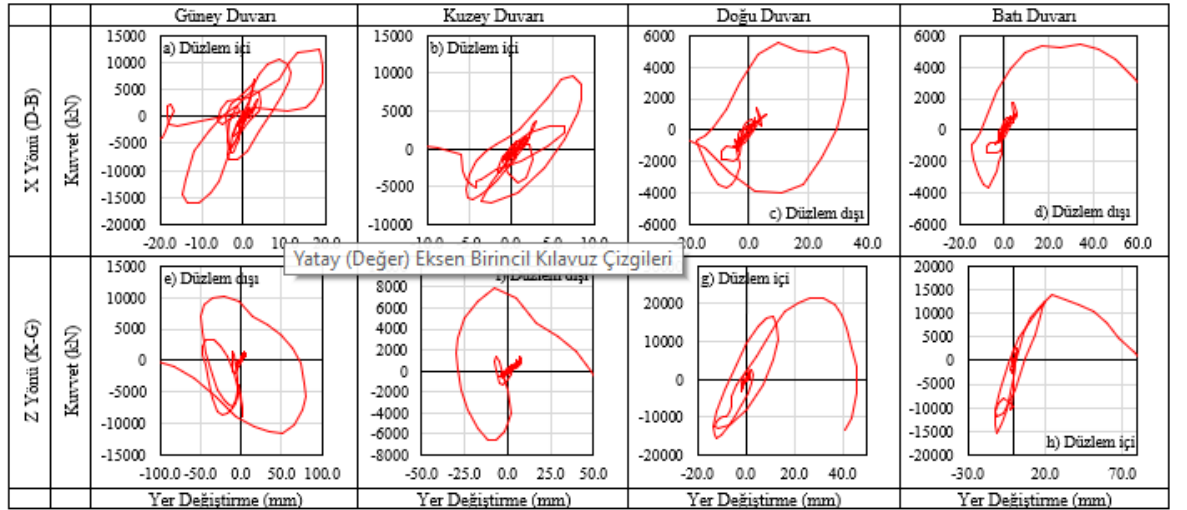
Şekil EK-1.253. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.254’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.254. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.255’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.255. Beyazıt Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.16. İstanbul Tophane Kılıç Ali Paşa Cami Analizleri ($E=200f_c$)

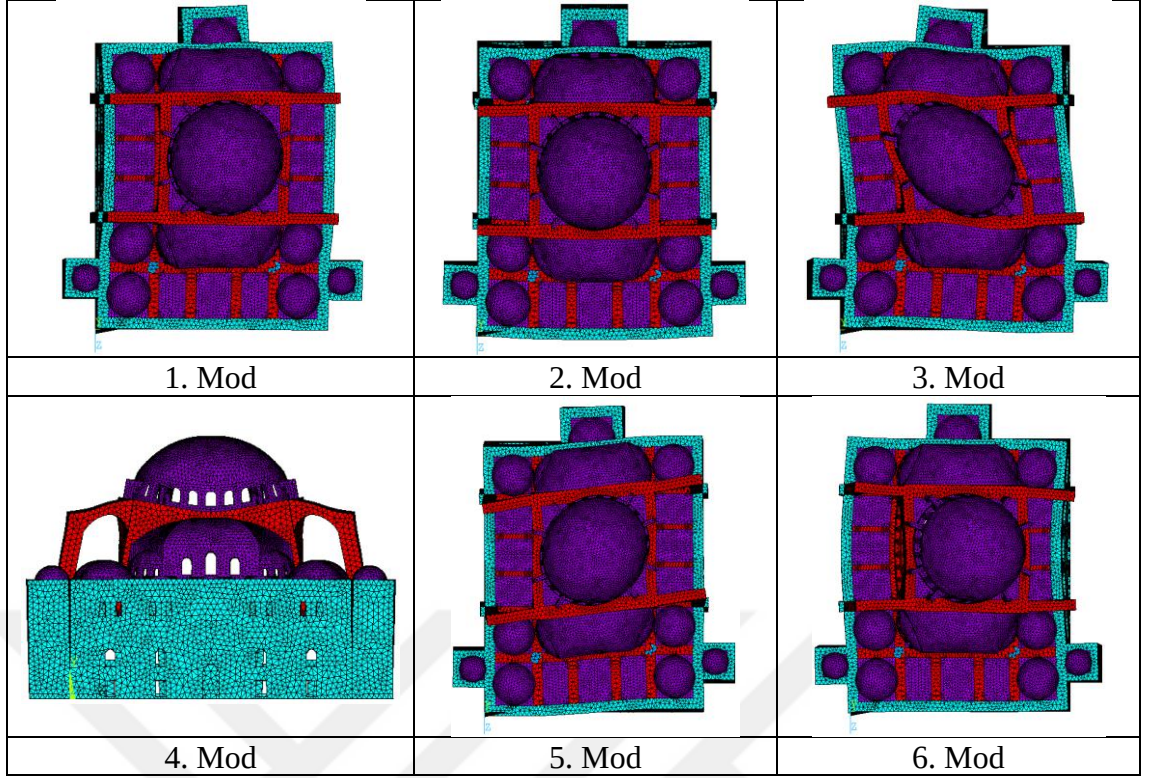
1.16.1. Modal analiz

İstanbul Tophane Kılıç Ali Paşa Cami'nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.16'da yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.16. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	1.74	0.54	0.15E-10	0.41E-07	0.34
2	2.05	0.32E-07	0.31E-04	0.62	0.17
3	2.72	0.10E-01	0.16E-07	0.11E-06	0.12E-01
4	2.78	0.18E-07	0.11E-01	0.46E-02	0.12E-02
5	3.16	0.40E-04	0.45E-07	0.22E-06	0.11
6	3.53	0.11	0.43E-08	0.92E-06	0.45E-01

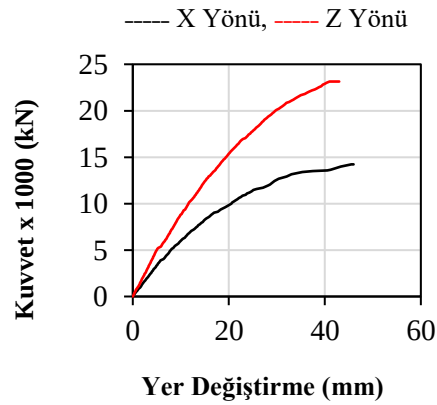
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4., 5. ve 6. modlar ise burulma modlarıdır. Şekil EK-1.256'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 7854 tondur.



Şekil EK-1.256. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.16.2. İtme analizi

Şekil EK-1.257'da Tophane Kılıç Ali Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 6840 kN, 10,8 mm; Z doğrultusunda ise 10800 kN, 12 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 14226 kN, Z doğrultusunda 23143 kN olarak belirlenmiştir.



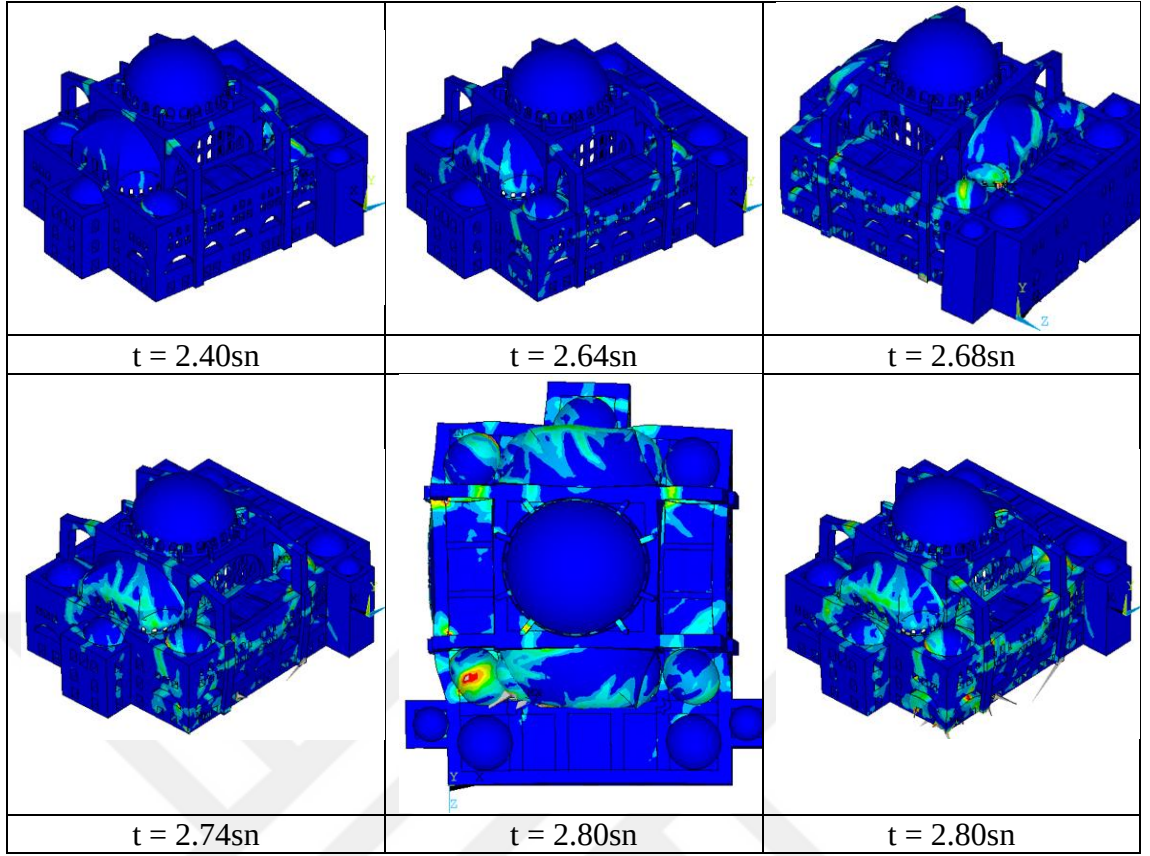
Şekil EK-1.257. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$).

1.16.3. Dinamik analizler

İstanbul Tophane Kılıç Ali Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

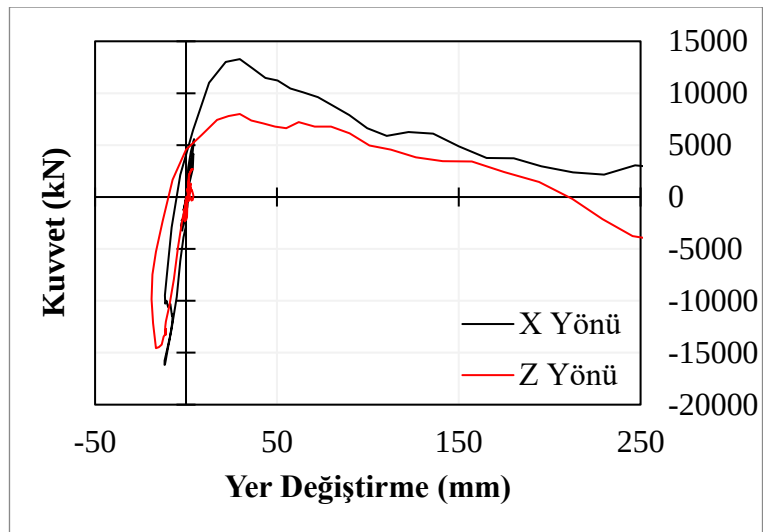
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.258'de verilmektedir. Caminin ana yıkılma mekanizması doğu duvarının düzlem dışı davranışla göçmesi olduğu söylenebilir. Bu göçme esnasında caminin kuzey ve batı duvarlarının bir kısmı ve köşe kubbelerinde devrildi söylenebilir. Ayrıca caminin kuzey ve güney kısımlarında bulunan yarım kubbeler caminin doğu yönüne doğru devrilmektedir. Cami kubbesinin bu devrilme ve hasar mekanizması içinde ayakta kalamayarak göçtüğü görülmektedir. Caminin diğer kısımlarında oluşan çatlaklar ve yer değiştirmeler temel yıkılma mekanizmasına dahil edilmeyebilir.



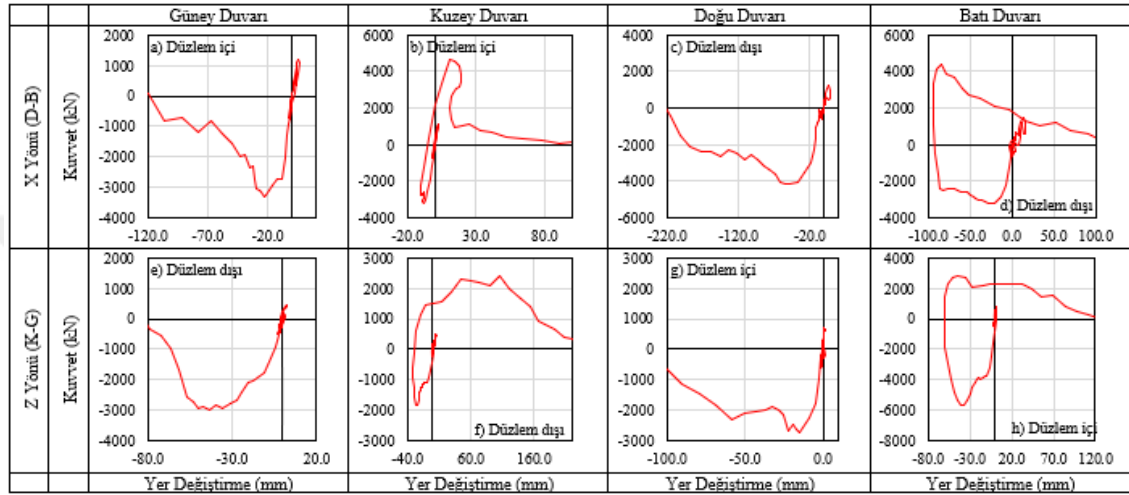
Şekil EK-1.258. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.259'de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.259. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

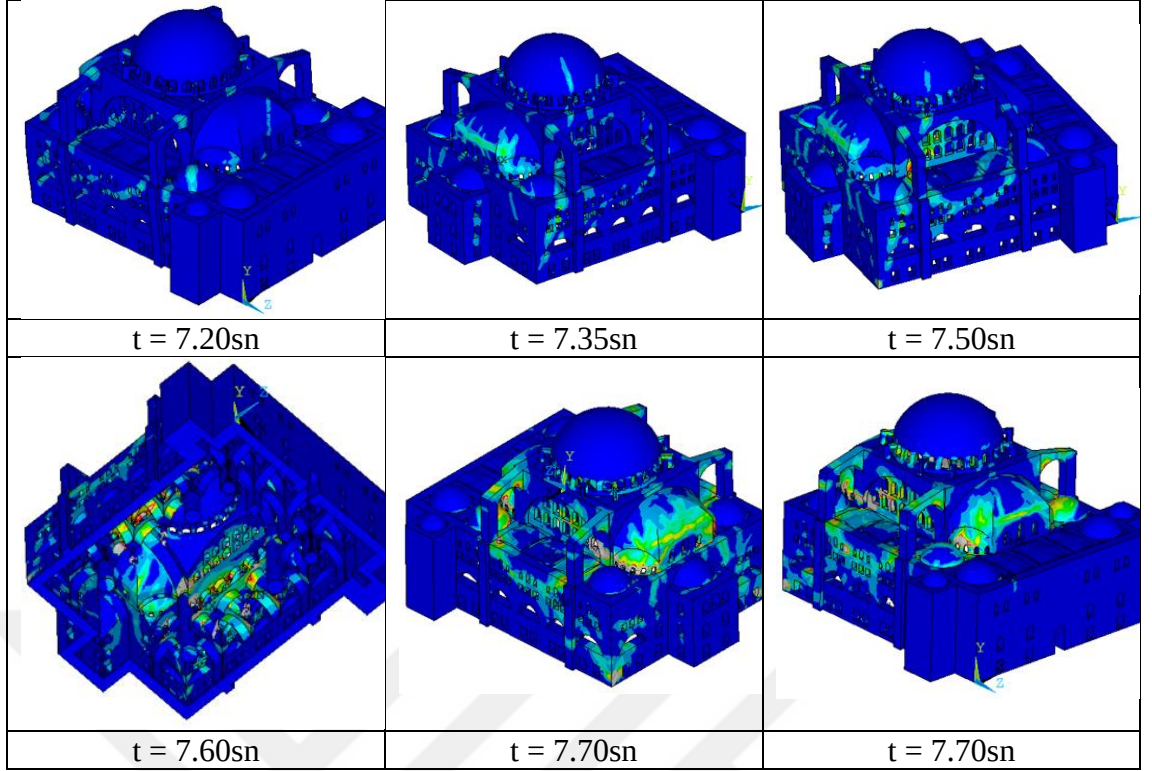
Şekil EK-1.260’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.260. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

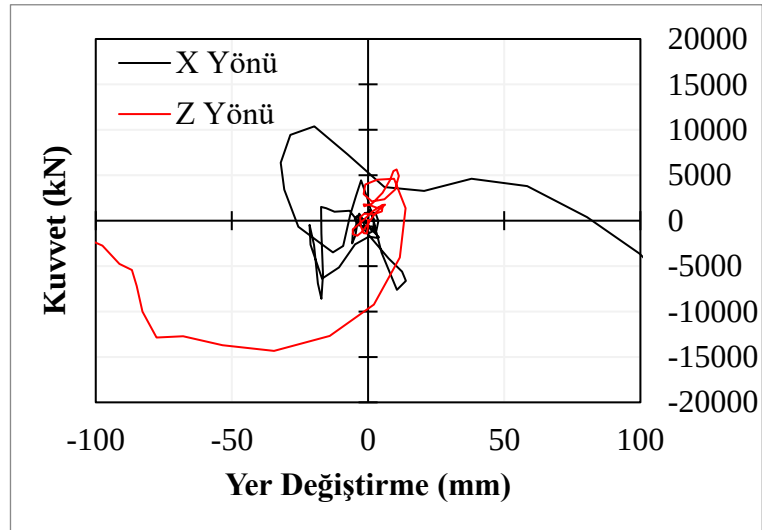
- **Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.261’da verilmektedir. Caminin temel yıkılma mekanizması, ana kubbe, yarım kubbeler ve kemer sistemin cami içine doğru göçmesi olarak tanımlanabilir. Yer hareketinin etkisiyle duvarlar ile kemer sistemin birleştiği yerlerde meydana gelen çatlaklar küçük kubbelerle doğru ilerlemektedir. Bu kubbelerde çatlakların fazla olması ve ana kubbeyi taşıyan kemer sisteminin duvar seviyesinden kopması göçmeyi tanımlamaktadır. Göçme esnasında doğu ve batı duvarlarının üst pencerelerden koptuğu ve cami içine doğru kubbeler ile göçtüğü gözlemlenmektedir.



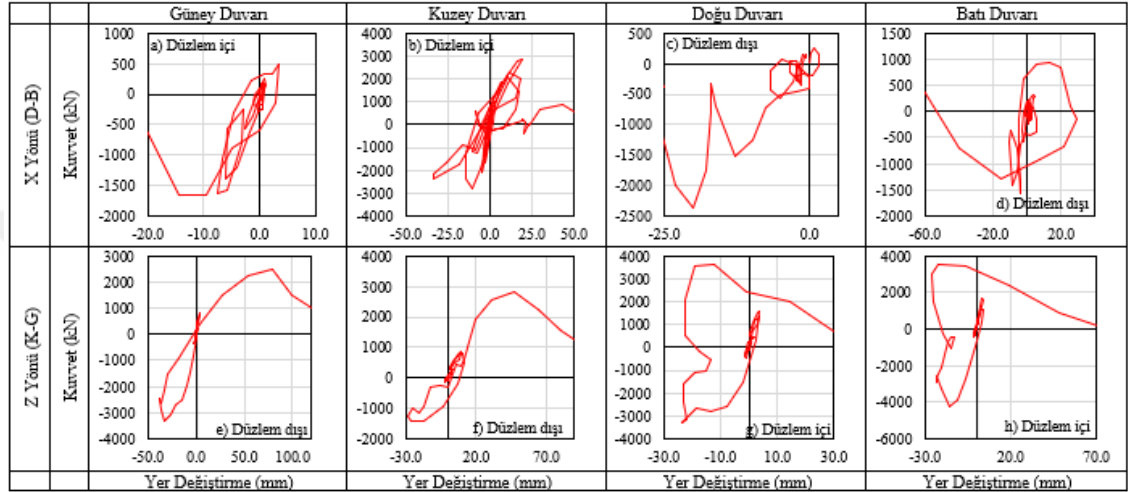
Şekil EK-1.261. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Duz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.262’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.262. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

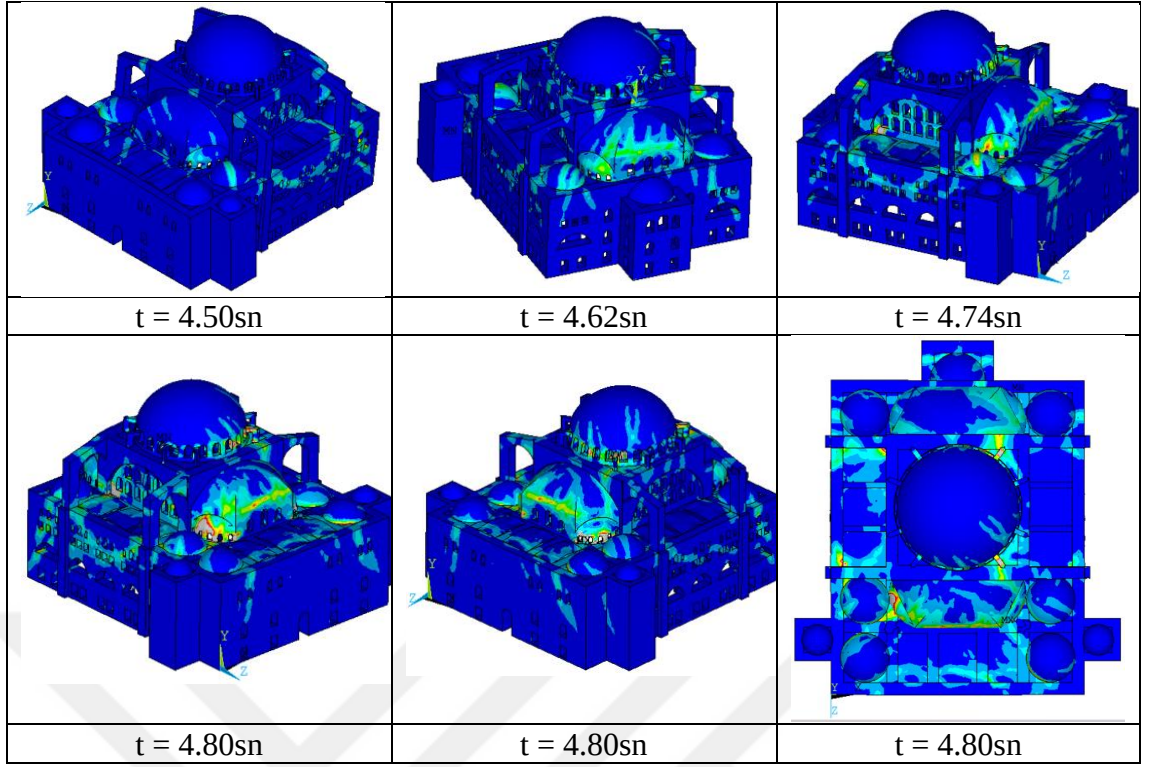
Şekil EK-1.263’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.263. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

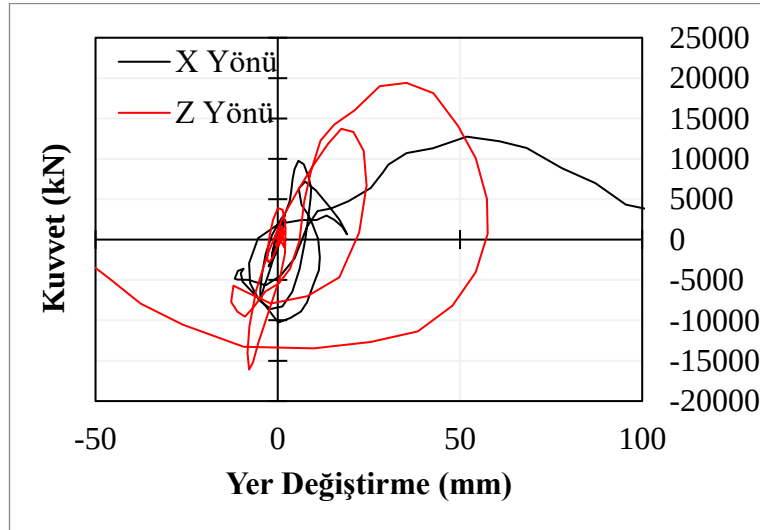
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.264’de verilmektedir. Caminin temel yıkılma mekanizması, ana kubbe, yarım kubbeler ve kemer sistemin cami içine doğru göçmesi olarak tanımlanabilir. Yer hareketinin etkisiyle duvarlar ile kemer sistemin birleştiği yerlerde meydana gelen çatlaklar küçük kubbelerle doğru ilerlemektedir. Bu kubbelerde çatlakların fazla olması ve ana kubbeyi taşıyan kemer sisteminin duvar seviyesinden kopması göçmeyi tanımlamaktadır. Göçme esnasında doğu ve batı duvarlarının üst pencerelerden koptuğu ve cami içine doğru kubbeler ile göçtüğü gözlemlenmektedir.



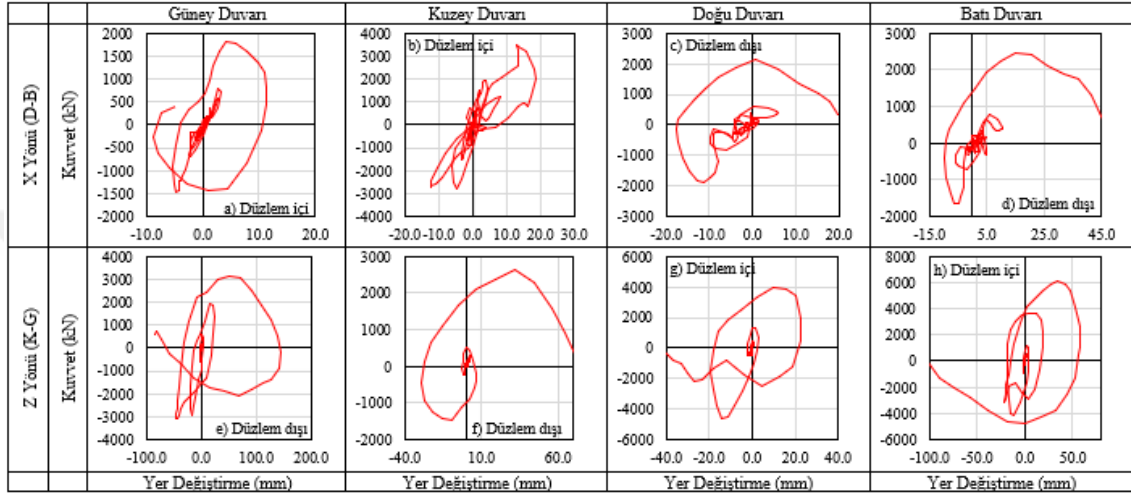
Şekil EK-1.264. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.265’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.265. Tophane Kılıç Ali Paşa ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

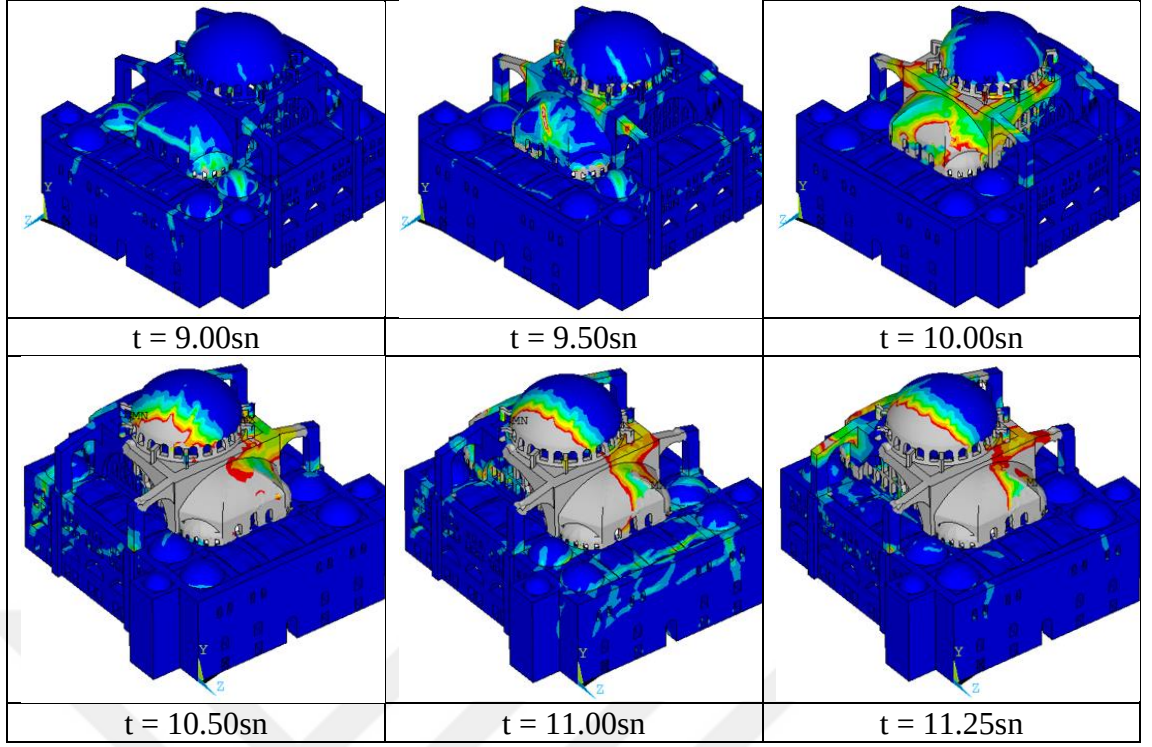
Şekil EK-1.266'de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.266. Tophane Kılıç Ali Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

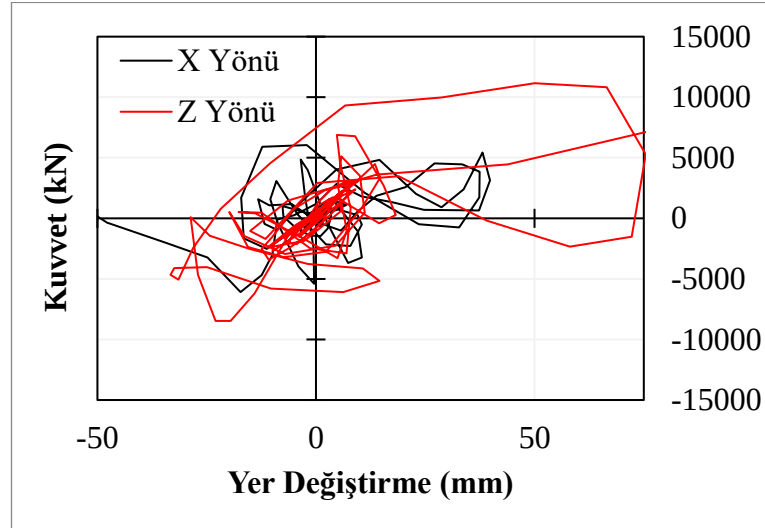
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.267'da verilmektedir. Caminin temel yıkılma mekanizması, ana kubbe, yarım kubbeler ve kemer sistemin cami içine doğru göçmesi olarak tanımlanabilir. Yer hareketinin etkisiyle duvarlar ile kemer sistemin birleştiği yerlerde meydana gelen çatlaklar küçük kubbelerle doğru ilerlemektedir. Bu kubbelerde çatlakların fazla olması ve ana kubbeyi taşıyan kemer sisteminin duvar seviyesinden kopması göçmeyi tanımlamaktadır. Göçme esnasında doğu ve batı duvarlarının üst pencerelerden koptuğu ve cami içine doğru kubbeler ile göçtüğü gözlemlenmektedir.



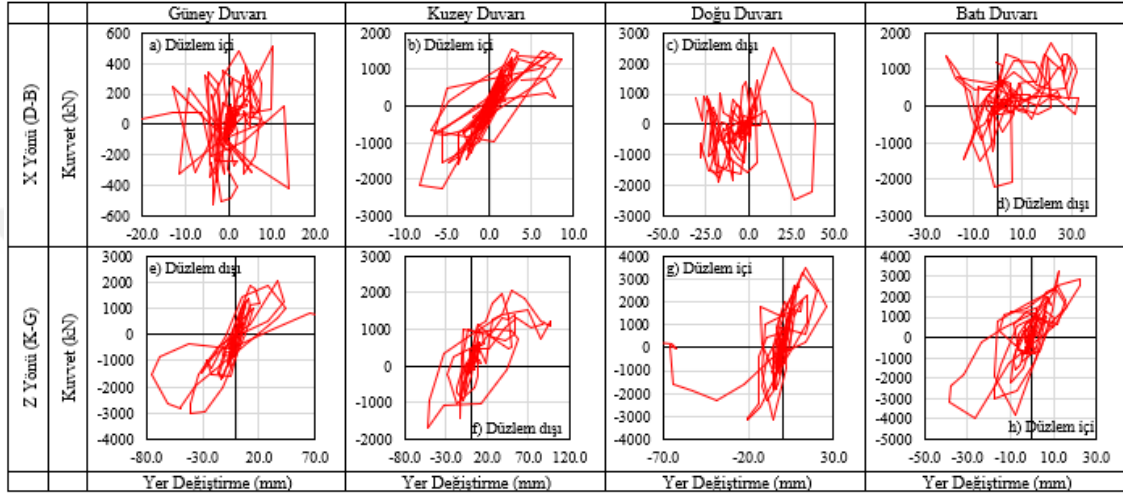
Şekil EK-1.267. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.268’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.268. Tophane Kılıç Ali Paşa ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

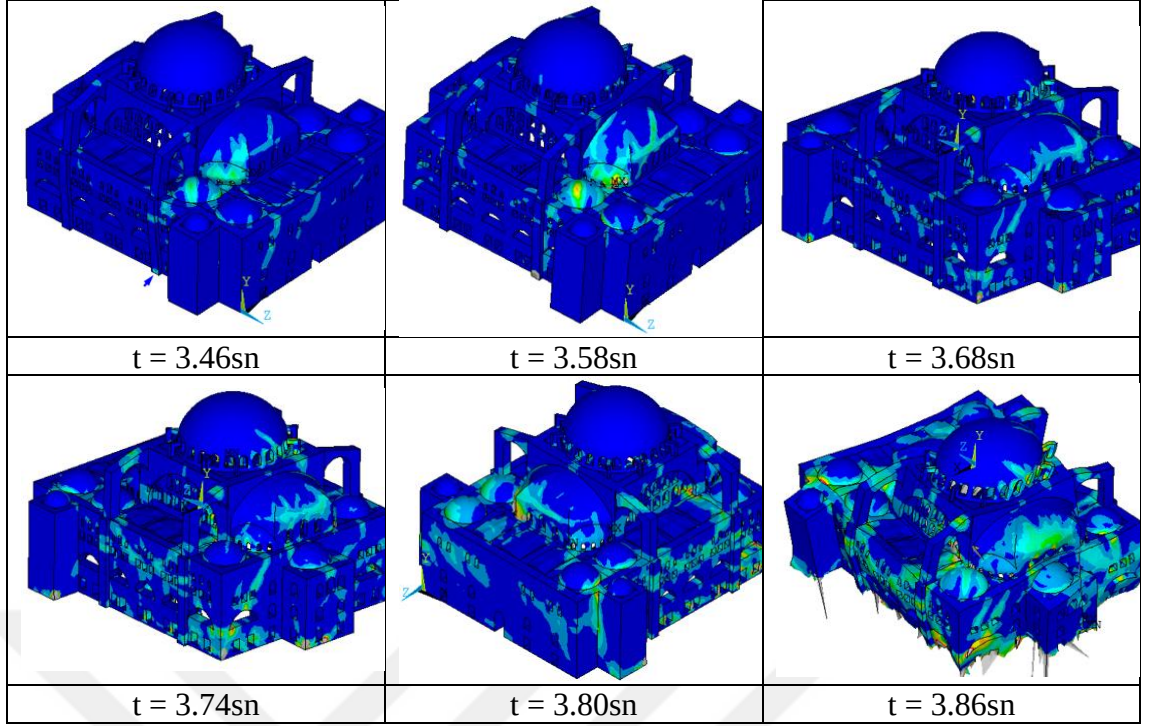
Şekil EK-1.269’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.269. Tophane Kılıç Ali Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

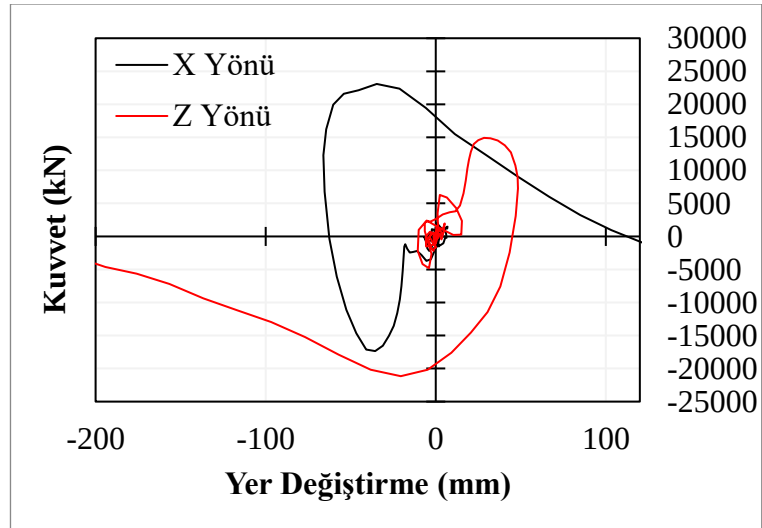
- **Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.270’de verilmektedir. Caminin güney-doğu kısmında fil ayağının basınç kuvvetleri ve kesme gerilmeleri altında ezilmesi ve yer değiştirmesi sebebiyle cami, yıkılma mekanizmasına girmiştir. Fil ayağının hasar görmesiyle beraber kuzey-batı köşesinde oluşan V şeklindeki çatlaklar genişleyerek caminin kuzey duvarının düzlem dışı göçmesine sebep olmuştur. Bu düzlem dışı davranış esnasında caminin kemer sistemi duvar seviyesinden bu davranışa eşlik ederek ana kubbenin de göçmesi gerçekleşmiştir.



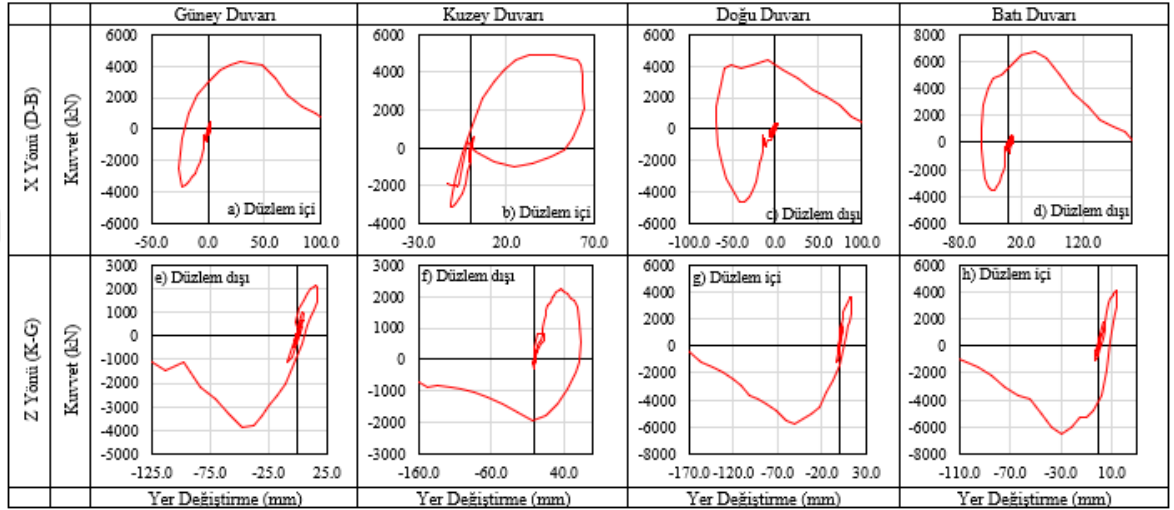
Şekil EK-1.270. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.271’da yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.271. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.272’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.272. Tophane Kılıç Ali Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

1.17. Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami Analizleri ($E=200f_c$)

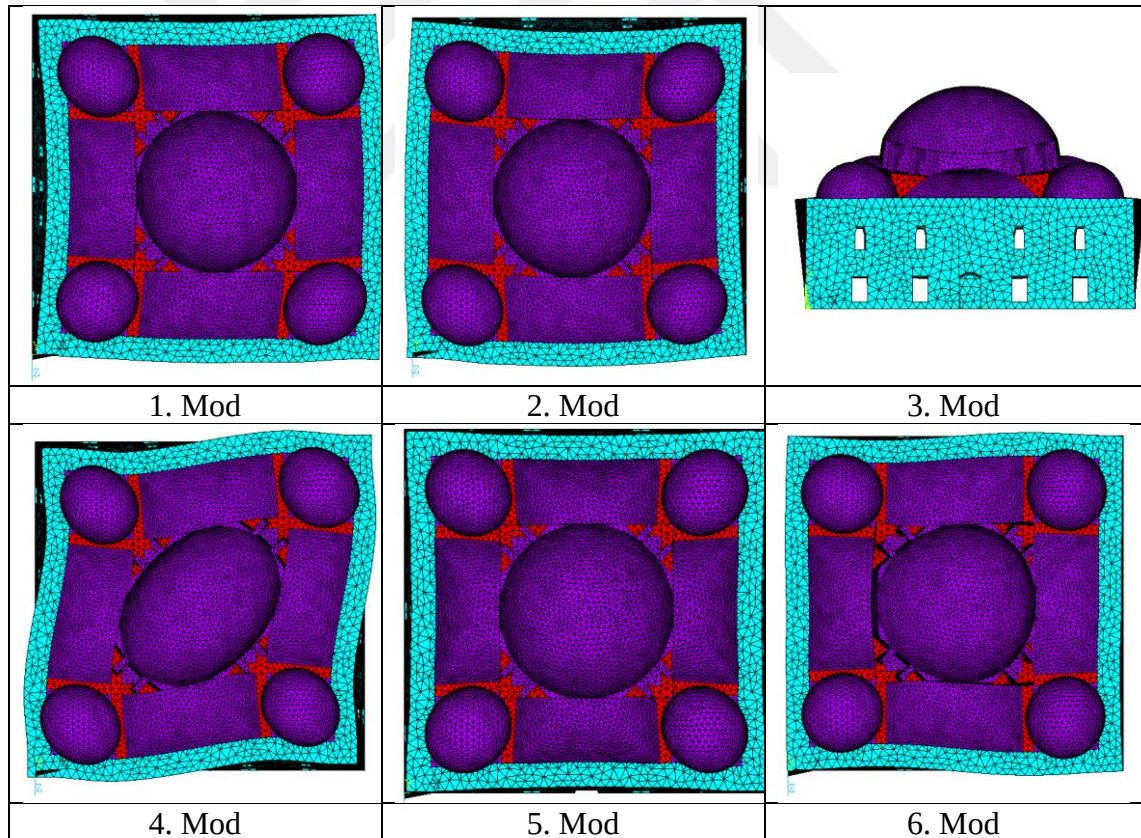
1.17.1. Modal analiz

Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami’nin modal analizi gerçekleştirilmiş ve titreşim periyotları ve kütle katılım oranları elde edilmiştir. Analiz 20 modda yapılmış ve ilk altı modu üzerinde durulmuştur. Çizelge EK-1.17’de yapının yatay ve düşeyde davranışını belirleyen ilk altı moda ait kütle katılım oranları ve frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge EK-1.17. Lala Mustafa Paşa Cami'nin ilk altı moduna ait frekans ve kütle katılım oranı (KKO) değerleri ($E=200f_c$).

Mod	Frekans (Hz)	KKO (X doğ. yatay)	KKO (Y doğ. düşey)	KKO (Z doğ. yatay)	KKO (y dönme)
1	3.03	0.52	0.18E-06	0.15	0.42
2	3.04	0.15	0.43E-06	0.51	0.39E-01
3	3.81	0.39E-06	0.35E-04	0.51E-04	0.20E-04
4	4.42	0.10E-04	0.35E-04	0.35E-06	0.41E-03
5	4.63	0.14E-04	0.18	0.68E-05	0.40E-05
6	5.18	0.32E-02	0.97E-07	0.77E-04	0.31E-04

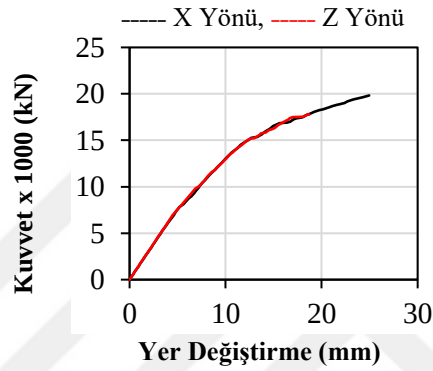
Modelin mod şekillerine bakıldığında 1. mod doğu-batı (X doğrultusu), 2. mod kuzey-güney (Z doğrultusu) doğrultusunda eninedir. 3., 4. ve 6. modlar burulma, 5. Mod ise düşey (Y doğrultusu) doğrultusundadır. Şekil EK-1.273'de yapının mod şekilleri verilmektedir. Yapının toplam kütlesi 5797 tondur.



Şekil EK-1.273. Lala Mustafa Paşa Cami'nin mod şekilleri ($E=200f_c$)

1.17.2. İtme analizi

Şekil EK-1.274'da Lala Mustafa Paşa Cami'nin itme analizinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Caminin başlangıç rijitliği X doğrultusunda 8325 kN, 5,55 mm; Z doğrultusunda ise 9750 kN, 6,5 mm; mertebelerinde değiştiği görülmektedir. Yapının yanal yük kapasitesi ise X doğrultusunda 19826 kN, Z doğrultusunda 17779 kN olarak belirlenmiştir.



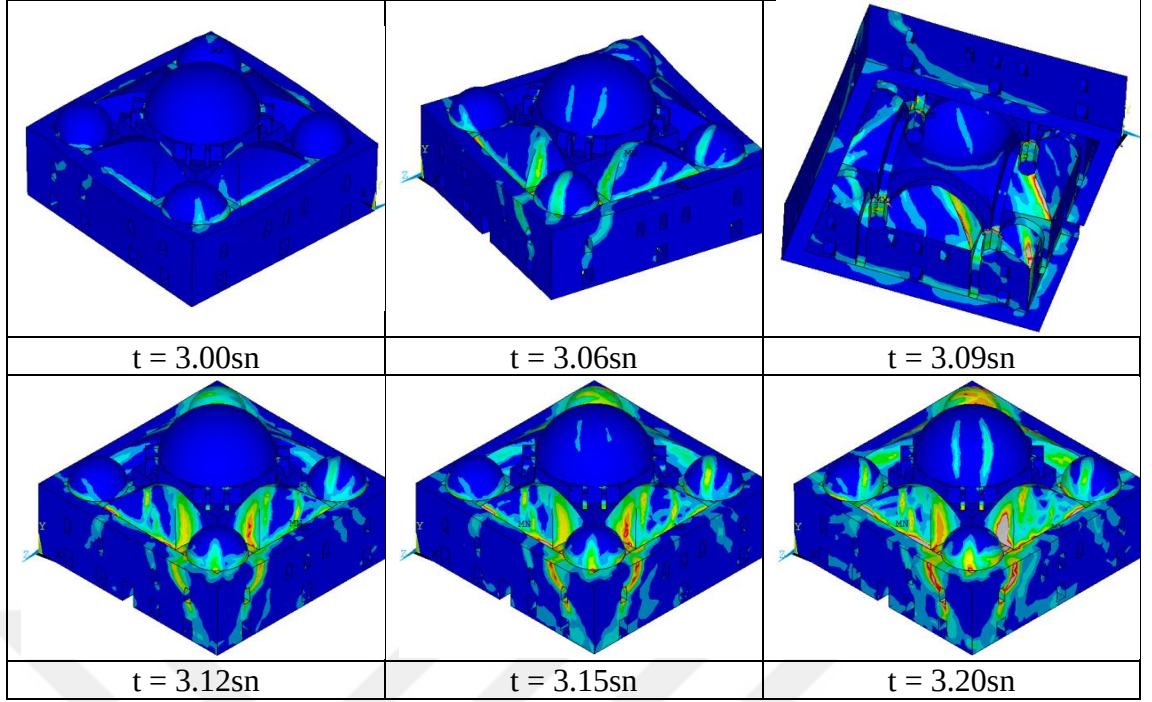
Şekil EK-1.274. Lala Mustafa Paşa Cami itme analizi kuvvet-yer değiştirme eğrileri ($E=200f_c$).

1.17.3. Dinamik analizler

Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami'sinin önceki bölümde verilen 5 yer hareketi altında zaman tanım alanında hesap yöntemiyle (dinamik analiz) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlık altında caminin her bir dinamik analizden elde edilen tepe yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti ilişkisi ve her bir duvar için düzlem içi ve düzlem dışı davranışları irdelenecektir.

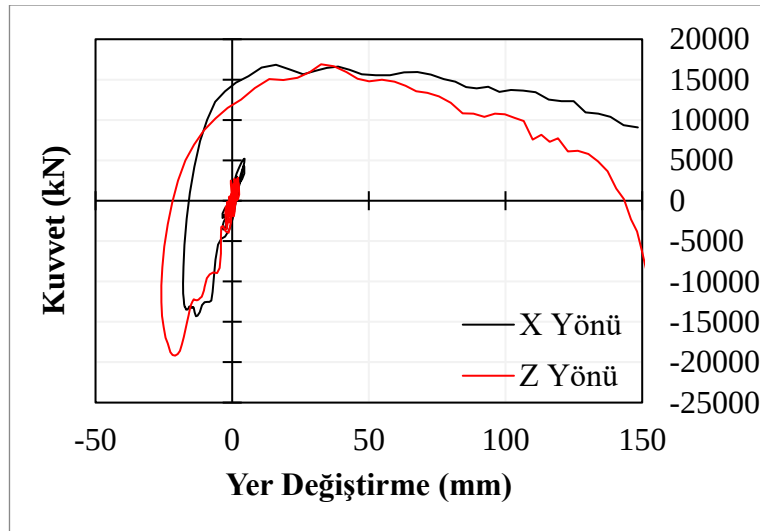
- **Erz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.275'de verilmektedir. Caminin fil ayaklarını birbirine bağlayan kemer sistemi, duvar seviyesinden kırılmıştır. Camide meydana gelen kubbenin içe doğru göçme mekanizması bu hasara bağlanabilir. Kubbe içe doğru çökerken caminin güney-batı ve kuzey-doğu köşelerinde V şeklinde hasarlar meydana gelmesine sebep olmaktadır.



Şekil EK-1.275. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

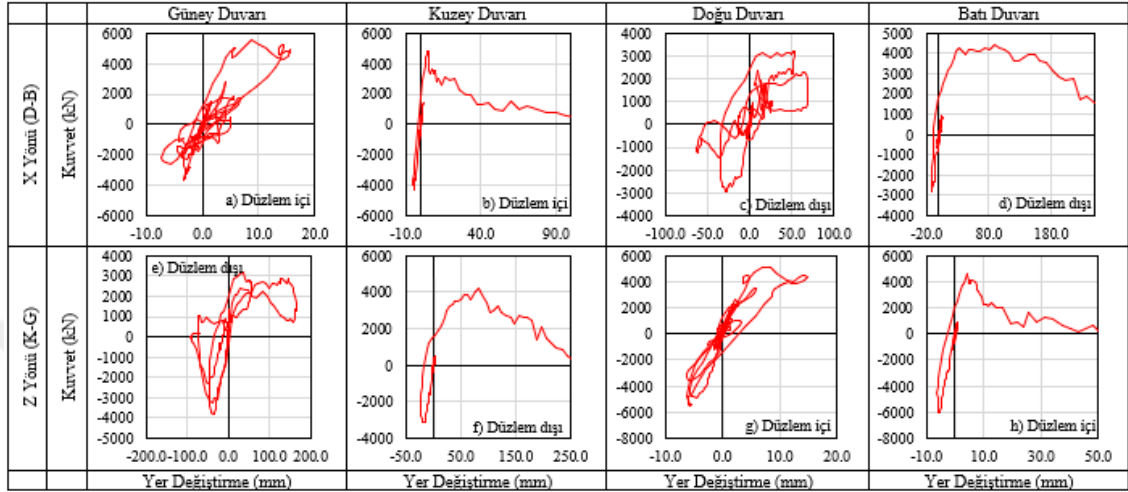
Şekil EK-1.276’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.276. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.277’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken

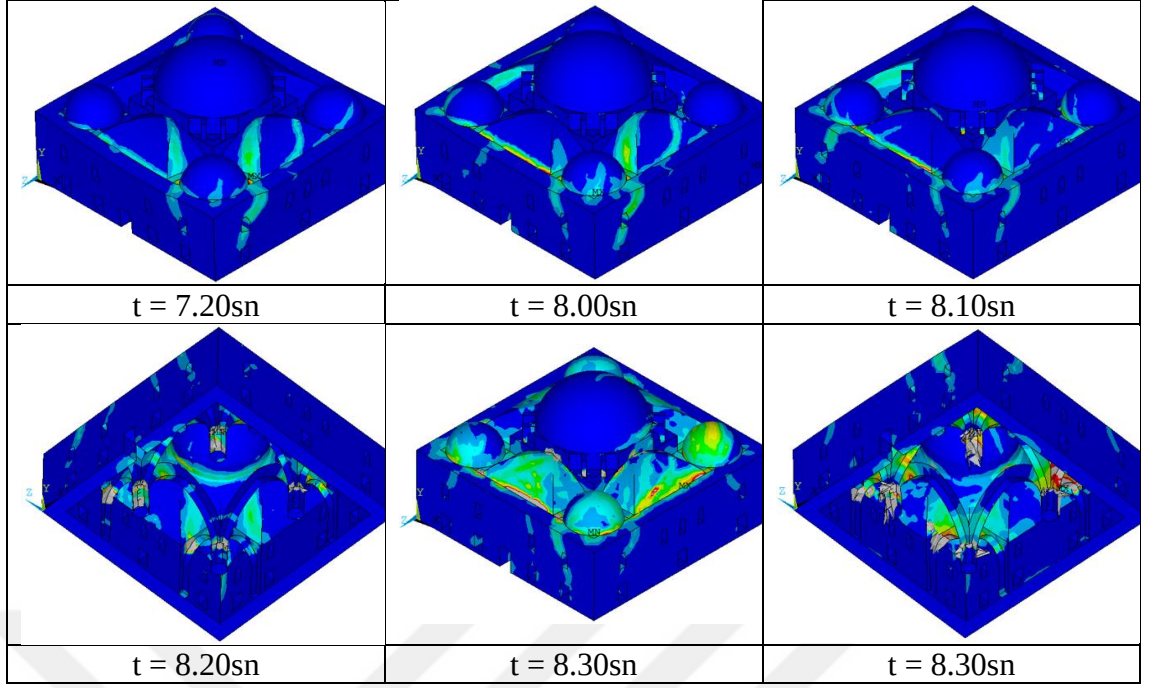
duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.277. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Erz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

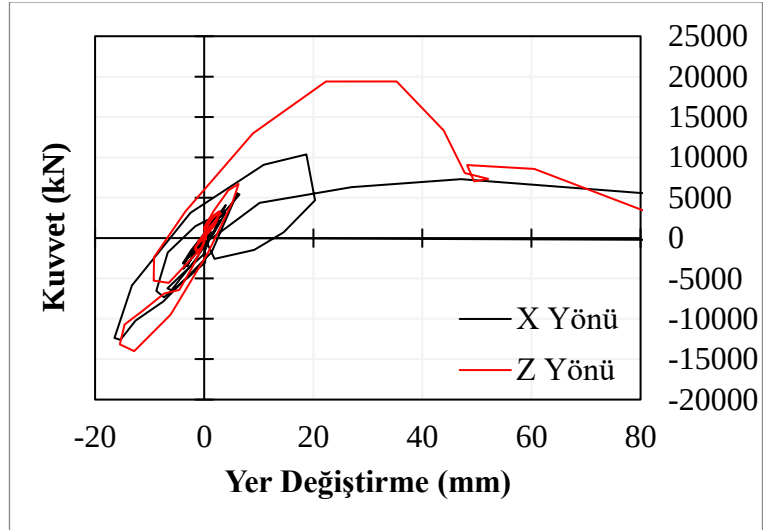
- Düz yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.278’da verilmektedir. Camide ilk olarak kuzey-batı köşesinde, kemer sistem ile duvarların birleştiği noktalardan pencere boşluklarına doğru ilerleyen çatlak hatları görülmektedir. Caminin fil ayaklarını birbirine bağlayan kemer sistemi, duvar seviyesinden kırılmıştır. Camide meydana gelen kubbenin içe doğru göçme mekanizması bu hasara bağlanabilir.



Şekil EK-1.278. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

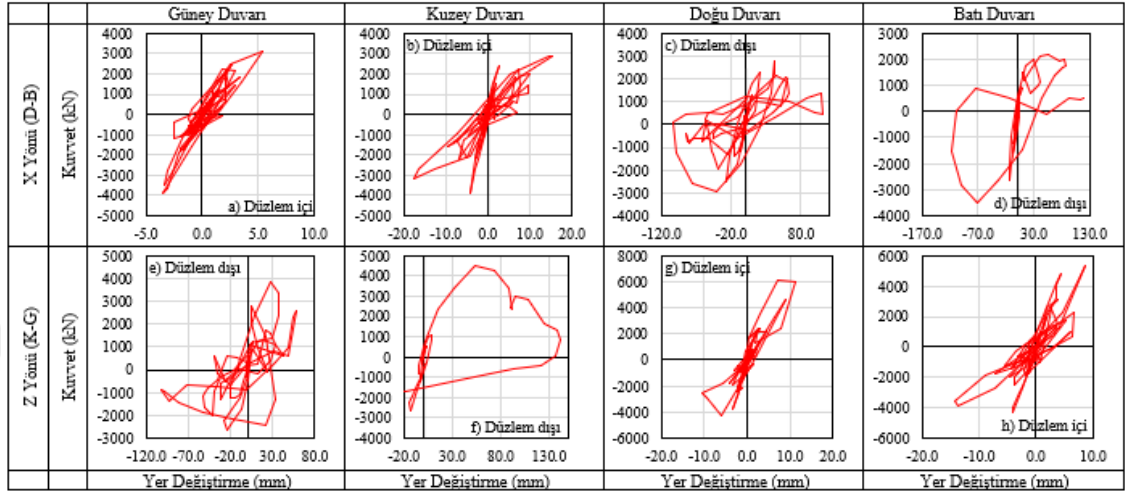
Şekil EK-1.279’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.279. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Düz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.280’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken

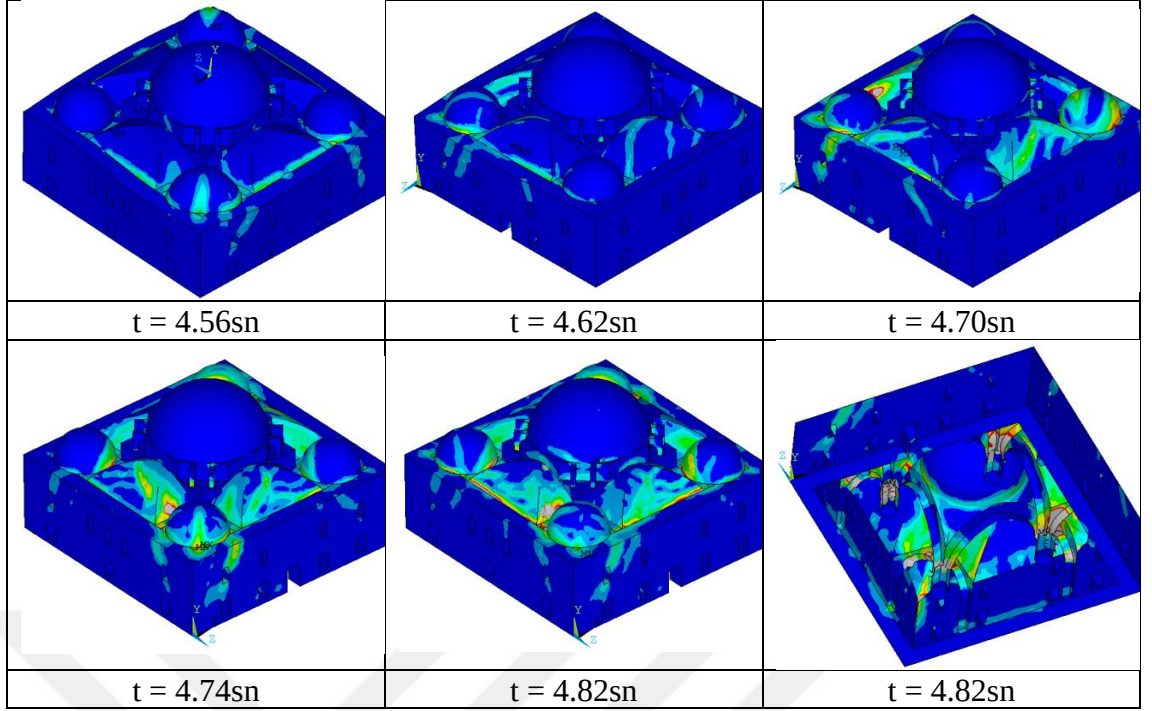
duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.280. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Duz yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

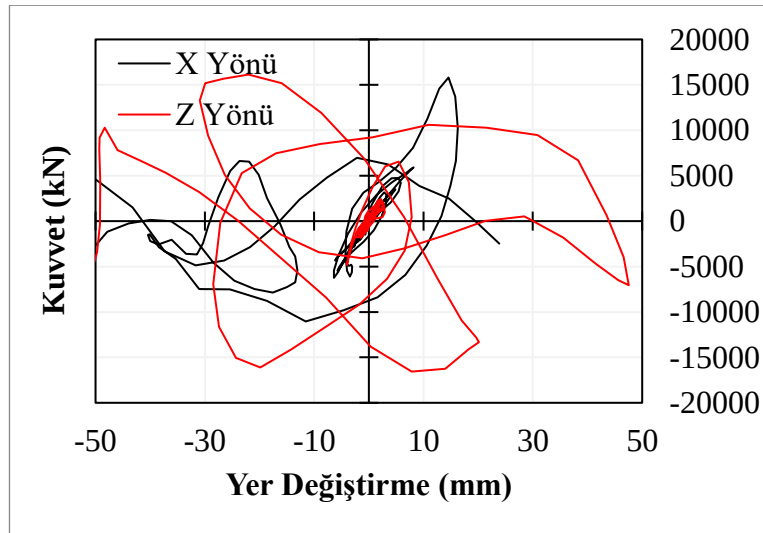
- **Cap yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.281’de verilmektedir. Camide ilk olarak kuzey-doğu köşesinde, kemer sistem ile duvarların birleştiği noktalardan pencere boşluklarına doğru ilerleyen çatlak hatları görülmektedir. Caminin fil ayaklarını birbirine bağlayan kemer sistemi, duvar seviyesinden kırılmıştır. Camide meydana gelen kubbenin içe doğru göçme mekanizması bu hasara bağlanabilir.



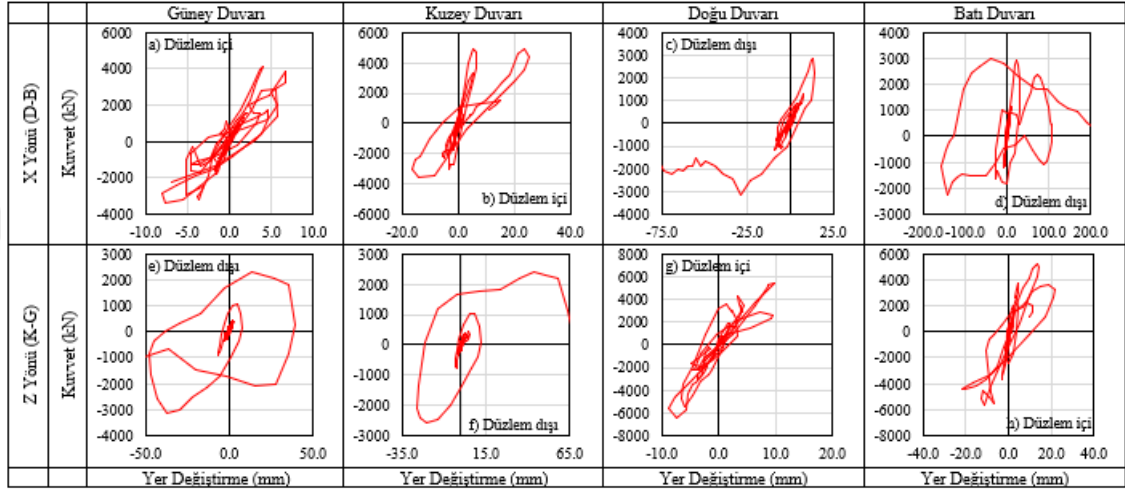
Şekil EK-1.281. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.282’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.282. Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

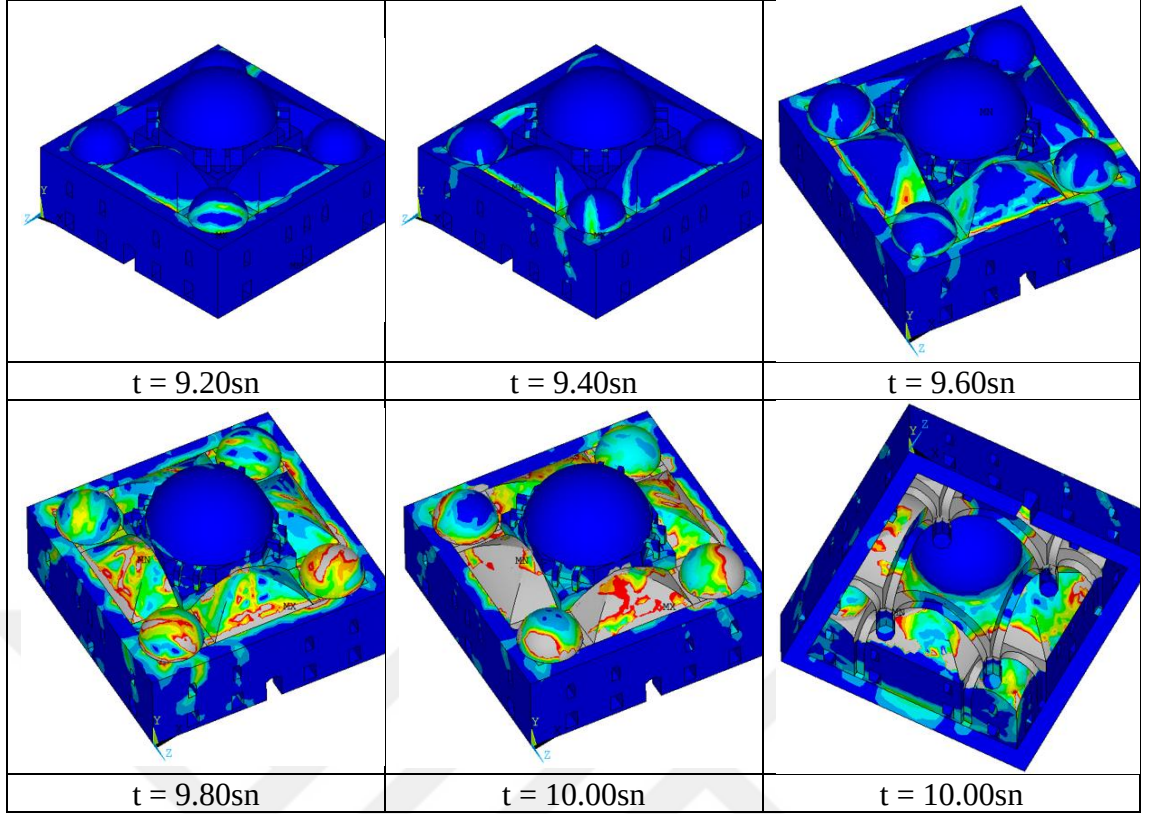
Şekil EK-1.283’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.283. Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Cap yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

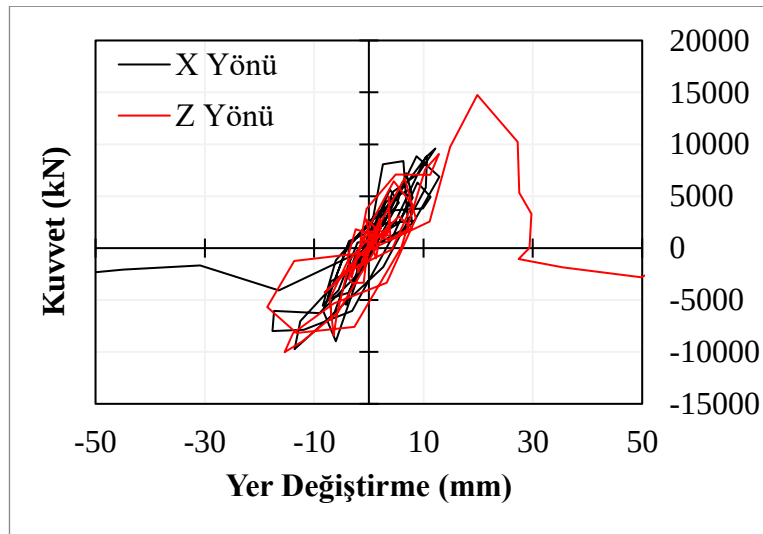
- **Imp_Val yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.284’de verilmektedir. Camide yer hareketi özelliği sebebiyle çeşitli bölgelerde çatlaklar gözlemlenmektedir. Bu çatlaklar büyüklüğü kemer sistemde fazlaştığında cami göçme mekanizmasına girmektedir. Caminin fil ayaklarını birbirine bağlayan kemer sistemi, duvar seviyesinden kırılmıştır. Camide meydana gelen kubbenin içe doğru göçme mekanizması bu hasara bağlanabilir.



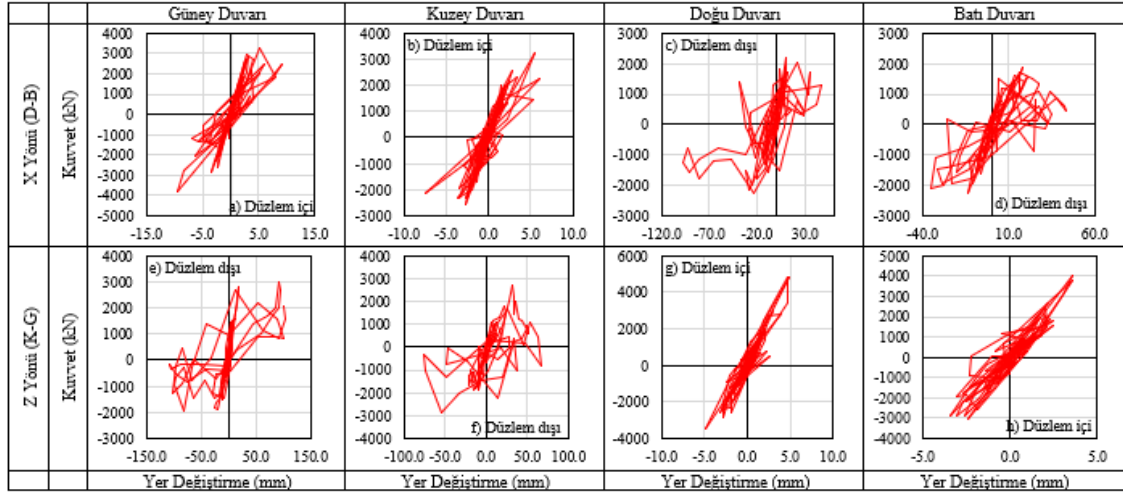
Şekil EK-1.284. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

Şekil EK-1.285’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.285. Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

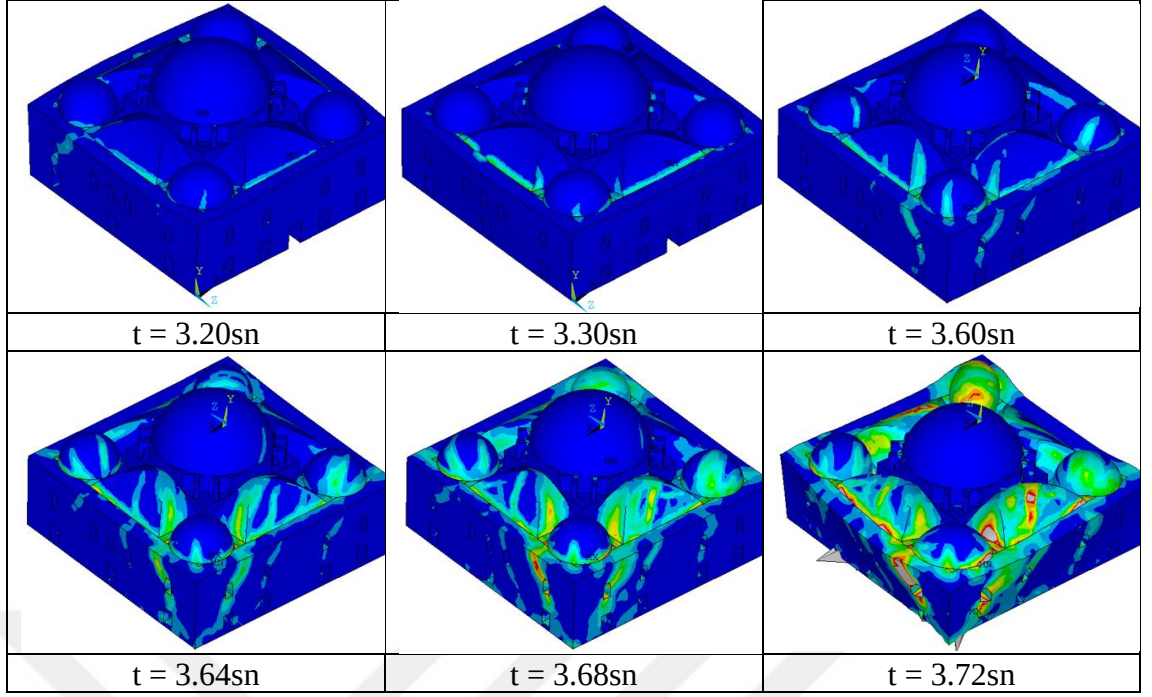
Şekil EK-1.286’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.286. Lala Mustafa Paşa ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Imp_Val yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri.

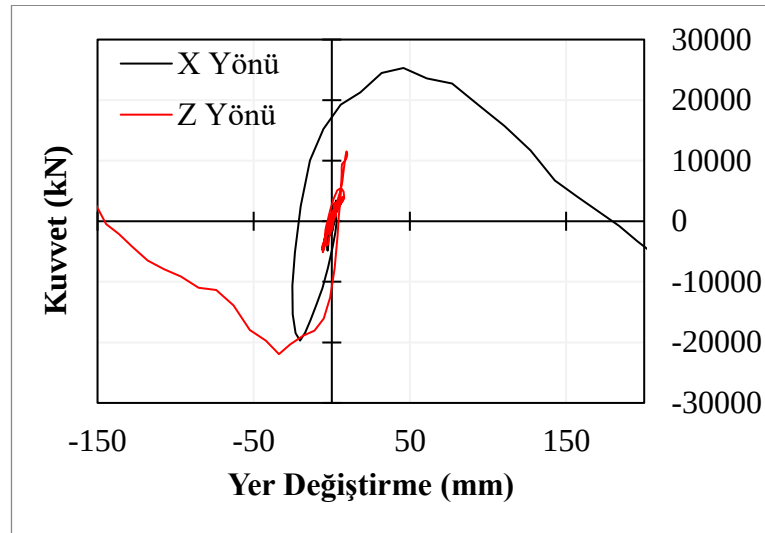
- Kobe yer hareketi altında dinamik analiz**

Analiz sonucunda yapıda oluşan birim şekil değiştirmeler Şekil EK-1.287’de verilmektedir. Caminin fil ayaklarını birbirine bağlayan kemer sistemi, duvar seviyesinden kırılmıştır. Camide meydana gelen kubbenin içe doğru göçme mekanizması bu hasara bağlanabilir. Kubbe içe doğru çökerken caminin güney-batı ve kuzey-doğu köşelerinde V şeklinde hasarlar meydana gelmesine sebep olmaktadır.



Şekil EK-1.287. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Cap yer hareketi ile oluşan yıkılma mekanizması.

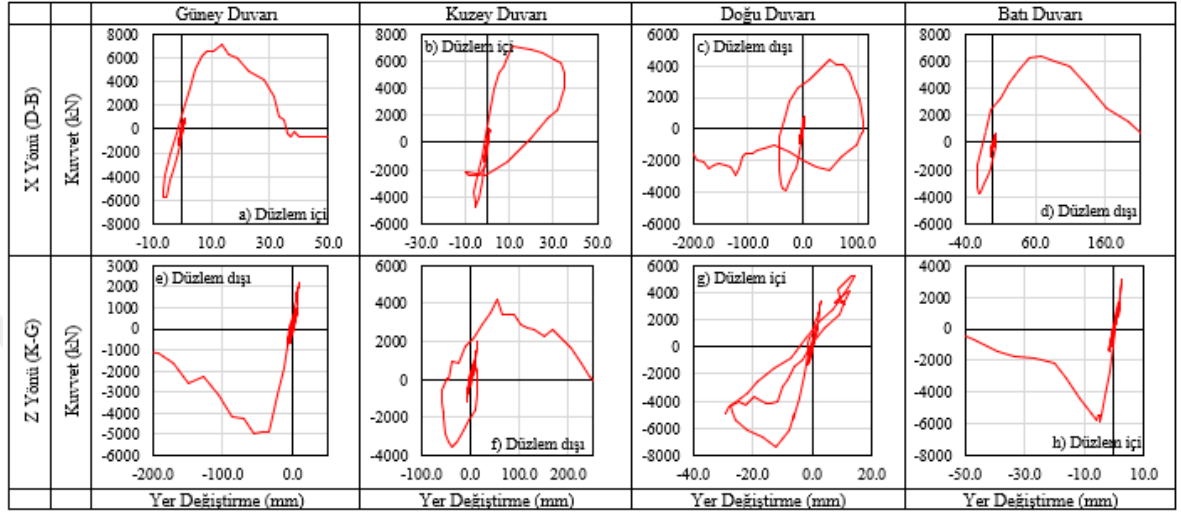
Şekil EK-1.288’de yapının ortasında bulunan kubbenin tepe noktasındaki X ve Z doğrultularında yer değiştirmeler dikkate alınarak çizilmiş dinamik taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi verilmektedir.



Şekil EK-1.288. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrisi.

Şekil EK-1.289’de caminin dört duvarının taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğrileri verilmektedir. Bütün duvarlarda düzlem içi kuvvetler alınırken

duvarların kesişim bölgeleri dikkate alınmamıştır. Düzlem dışı kuvvet kapasiteleri, ele alınan duvarın her iki uçta diğer duvarla kesiştiği bölgeleri de dahil edilerek hesaplanmıştır. Eğriler oluşturulurken duvarların en yüksek noktasında kalınlığının ortasına tekabül eden noktadan yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.



Şekil EK-1.289. Lala Mustafa Paşa Cami ($E=200f_c$) taşıyıcı duvarlarının Kobe yer hareketi ile elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme eğriler.

2. EK-2

Çizelge Ek-2.1. Dinamik analizlerde kullanılan yer hareketlerine ait bazı özellikler

	Erz_X	Erz_Z	Duz_X	Duz_Z	Cap_X	Cap_Z	Imp_Val_X	Imp_Val_Z	Kobe_X	Kobe_Z
En büyük ivme (m/sn ²)	3.82	4.60	3.74	3.15	3.78	5.39	3.65	3.09	8.06	5.87
En büyük ivme zamanı (sn)	2.98	3.41	9.14	8.73	5.60	5.20	11.38	10.06	4.52	4.44
En büyük hız (cm/sn)	101.38	94.61	52.64	59.53	45.55	43.99	32.73	33.70	81.36	74.26
En büyük hızın zamanı (sn)	2.88	2.88	8.29	12.77	5.38	5.10	9.00	8.58	4.30	4.54
En büyük yer değiştirme (cm)	26.18	74.53	86.60	63.35	31.36	28.89	150.99	39.42	17.58	20.37
En büyük yer değiştirme zamanı (sn)	3.24	28.18	19.30	11.66	5.60	5.22	39.64	34.88	4.50	4.36
V _{max} /A _{max} (sn)	0.27	0.21	0.14	0.19	0.12	0.08	0.09	0.11	0.10	0.13
İvme RMS (m/sn ²)	0.68	0.69	0.57	0.51	0.40	0.51	0.40	0.45	1.09	0.88
Hız RMS (cm/sn)	17.52	15.74	13.52	17.09	5.25	4.76	7.78	7.10	13.14	10.73
Yer değiştirme RMS (cm)	8.46	40.73	59.78	30.27	11.42	8.94	78.23	21.56	3.81	4.04
Alan şiddeti (m/sn)	1.57	2.13	1.41	1.14	1.53	2.50	0.99	1.27	8.39	5.43
Karakteristik şiddet (I _c)	2.58	3.02	2.23	1.90	1.95	2.82	1.57	1.89	7.56	5.46
Özgül Enerji Yoğunluğu (cm ² /sn)	6513	6981	4968	7936	1650	1358	2397	1996	7590	5061
Birikimli mutlak hız (cm/sn)	820	1036	853	881	1101	1148	817	911	2091	1783
İvme spektrum şiddeti (m/sn)	2.82	3.86	3.65	2.83	3.13	5.70	2.71	3.25	7.06	5.29
Hız spektrum şiddeti (cm)	303.21	258.21	238.43	164.35	148.52	167.20	61.24	139.40	417.36	292.52
Sönümsüz en büyük ivme (m/sn ²)	1.94	3.68	3.20	1.99	2.33	1.59	1.84	2.22	6.04	5.46
Sönümsüz en büyük hız (cm/sn)	30.58	45.35	39.00	48.93	19.50	26.79	17.92	21.88	54.99	38.85
Etkili tasarım ivmesi (m/sn ²)	3.79	4.52	3.64	3.11	3.69	5.48	3.89	3.16	7.96	5.83
Baskın periyot (sn)	0.94	0.30	0.28	0.38	0.24	0.42	0.14	0.14	0.34	0.38
Ortalama periyot (sn)	1.38	0.91	0.88	0.99	0.55	0.44	0.34	0.49	0.65	0.66

“”