

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN DEPREM
ETKİLERİ ALTINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

SİNEM AYAZ AKASLAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

GEBZE

2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN DEPREM
ETKİLERİ ALTINDA
DEĞERLENDİRİLMESİ

SİNEM AYAZ AKASLAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM VE YAPI MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

DANIŞMANI
PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ
II. DANIŞMAN
DOÇ. DR. FERİT ÇAKIR

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**EVALUATION OF HISTORICAL
BUILDINGS UNDER EARTHQUAKE**

SINEM AYAZ AKASLAN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
EARTHQUAKE AND STRUCTURAL PROGRAM

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. BULENT AKBAS
II. THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. FERIT CAKIR

GEBZE
2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 24/07/2019 tarih ve 2019/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15/10/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Sinem AYAZ AKASLAN'ın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. BÜLENT AKBAŞ

[Signature]

ÜYE

: PROF. DR. BİLGE DORAN

[Signature]

ÜYE

: DR. ÖĞR. ÜYESİ ÜLGEN MERT TUĞSAL

[Signature]

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Kültürel ve tarihi mirasımızı oluşturan tarihi yapıların sayısı oldukça fazla olmasına karşın sahip çıkma, koruma ve muhafaza etme, gelecek nesillere ulaştırılma bilincinin oluşması yakın zamanlarda başladığı için tarihi yapıların birçoğu zarar görmüş haldedir. Tarihi yapıların ömürlerini belirleyen insan faktörünün dışında iki ana etken bulunmaktadır. Bunlar; zemin problemleri ve depremlerdir. Yüzlerce senedir ayakta durmayı başaran tarihi yapılar düşey yükleri taşıma konusunda bir sorun teşkil etmemektedir. Ancak deprem nedeniyle ortaya çıkan yatay yüklerin aktarılması esnasında oluşan çekme gerilmeleri çoğunlukla yığma yapılarda ağır hasarlar oluşturmaktadır. Yığma yapı elemanları çekme gerilmelerini karşılayamaz ve çekme çatlakları oluşması sonucunda hasar(lar) meydana gelir. Deprem hareketleriyle beraber bu çatlakların yönleri, şekilleri, açıları ve büyüklükleri yapının işçiliğine, kullanılan malzemeye ve duvarlarda mevcut olan boşluk alanları ile de alakalı olarak farklılıklar göstermektedir.

Türkiye'deki aktif deprem bölgesi olması nedeniyle ülkemiz yapılarının depremlere karşı ne kadar dayanıklı olduğunun bilinmesi ve ne kadar güvenli olduklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu yapıların, deprem etkisi altında yapıların değerlendirilmesi ve ihtiyaç duyulduğu takdirde önlemlerin alınması hem insan can ve mal güvenliği açısından hem de kültürel mirasımızın bir sonraki nesillere aktarılması için mecburidir. Tarihi yapıların modelinin doğru biçimde kurulması, sonuçların doğru şekilde değerlendirilmesinde ve çözümünde büyük öneme sahiptir.

Bu çalışmada, statik ve dinamik yükler etkisindeki tarihi yapı değerlendirilmiş ve Erzurum İli Uzundere İlçesi'ne bağlı Çamlıyamaç Köyü'nde bulunan Öski Kilisesi örneği ele alınmıştır.

Makro modelleme tekniği seçilerek Öski Kilisesi'nin deprem etkisi altındaki davranışı irdelenmiştir. Yapının düzlem dışı davranışta bulunan yığma duvarı çelik iskele sistemi ile güçlendirilerek duvar davranışı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Öski Kilisesi, Yığma Yapı, Deprem Analizi, Güçlendirme, Sonlu Eleman Metodu, Düzlem Dışı Davranış.

SUMMARY

Although the number of historical buildings that make up our cultural and historical heritage is quite high, many of the historical buildings have been damaged due to the lack of awareness of ownership, preservation, and conveying to the next generations. There are two main historical building that determines the lifetime of factors outside of the human factor. These are ground problems and earthquakes. Historical buildings, which have survived for hundreds of years, do not pose a problem in terms of transporting vertical loads. However, tensile stresses during the transfer of horizontal loads caused by earthquakes often cause heavy damages in masonry structures. Masonry structures elements cannot withstand tensile stresses and damage (s) result from tensile cracks. The directions, shapes, angles, and sizes of these cracks along with the earthquake movements vary depending on the craftsmanship of the structure, the material used, as well as the cavities in the walls.

Because of the active earthquake zone, it is necessary for our country to know how resistant the structures are to earthquakes and to determine how safe they are. Evaluation of these structures under the influence of earthquakes and taking precautions if it is need are necessary both in terms of human life and property safety and to transfer our cultural heritage to the next generations. Correctly modeling of historical buildings has great importance in the proper evaluation and solution of the results.

In this study, the historical structure under the influence of static and dynamic loads was evaluated and the example of Öski Church in Çamlıyamaç Village of Uzundere District of Erzurum Province was examined.

Macro modeling technique was selected and the behavior of Öski Church under the influence of earthquake was examined. The masonry wall of the structure, which is out of plane behavior, was strengthened with steel scaffolding system and the wall behavior was examined.

Keywords: Öski Church, Masonry Structures, Earthquake Analysis, Retrofit, Finite Element Method, Out of Plane Behavior.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesi ile bu çalışmanın oluşmasına yardımcı olan tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Bülent AKBAŞ' a ve eş danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Ferit ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Katkılarından dolayı Kültür ve Turizm Bakanlığı'na, malzeme deneyleri ile tezimde ilerlememe katkıda bulunan İstanbul Aydın Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Yüksek lisans süreci boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bana güvenen değerli arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Burak BAYRAKTARGİL'e, Fahriye KAYMAZ'a, İnş. Müh. Hülya YÜKSEL'e, İnş. Yük. Müh. Selçuk ZENGİN'e, İnş. Yük. Müh. Yasemin ÖZAYDIN'a teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her aşamasında her zaman yanımda olan ve bana güç veren babaannem Asiye AYAZ, dedem Mahmut AYAZ, annem Nezahat AYAZ, babam Fatih AYAZ, kardeşim Nezih AYAZ ve Çağla AYAZ'a sonsuz sevgiler ve teşekkürler.

Tez çalışmam boyunca göstermiş olduğu sevgi, sabır, anlayış, özveri ve desteğiyle bana kuvvet veren sevgili eşim Turgut AKASLAN' a müteşekkir olduğumu belirtirim.

Tez çalışmamı, rahmetli babaannem ve dedeme ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	3
1.2. Tezin Amaç ve Kapsamı	5
2. TARİHİ MİRASIN KORUNMASI	7
2.1. Yığma Yapılar ve Tarihi Yığma Yapıları Oluşturan Taşıyıcı Sistemler	8
2.1.1. Sütunlar ve Ayaklar	9
2.1.2. Duvarlar	10
2.1.3. Kemerler	12
2.1.4. Kubbeler	13
2.1.5. TonoZ	14
2.2. Yığma Yapıların Deprem Karşısındaki Davranışları ve Hasar Nedenleri	15
2.3. Yığma Yapılarda Oluşan Hasar Türleri	21
2.3.1. Temel Oturmalarından Kaynaklanan Hasarlar	21
2.3.2. Depreme Bağlı Hasarlar	21
2.4. Taşıyıcı Yığma Duvar Davranışı ve Hasarları	22
2.5. Yığma Yapılarda Duvarların Düzlem Dışı Davranışı ve Duvarların Güçlendirilmesi	25
3. YIĞMA YAPI ELEMANLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ	32
3.1. Basınç Dayanımı	32
3.2. Kayma Dayanımı	34
3.3. Çekme Dayanımı	34

4. YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ	36
4.1. Makro Modelleme	37
4.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme	38
4.3. Mikro Modelleme	38
5. ÖRNEK ÇALIŞMA: TARİHİ YIĞMA YAPI OLAN ÖŞKİ KİLİSESİ’NİN ANALİZİ	39
5.1. Genel Bilgiler	39
5.1.1. Öşki Kilisesi Tarihçesi	39
5.1.2. Mimari ve Geometrik Özellikleri	41
5.1.3. Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özellikleri	43
5.2. Öşki Kilisesi Yapım Teknikleri	45
5.2.1. Kubbe ve Tonozlar	45
5.2.2. Geçiş Öğeleri	46
5.2.3. Kemerler	46
5.2.4. Ayak, Sütun ve Paye	48
5.2.5. Duvarlar	48
5.3. Yapının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi	50
5.3.1. Model Özellikleri	50
5.3.2. Sayısal Model Oluşturulması	53
5.4. Yapısal Analiz Bilgileri	60
5.5. Düşey Yükler Altında Statik Analiz	62
5.6. Dinamik Analiz	65
5.7. Çelik İskele Sistemi İle Güçlendirilen Öşki Kilisesi	86
5.7.1. Güçlendirilmiş Model	86
6. SONUÇ	94
KAYNAKLAR	96
ÖZGEÇMİŞ	102

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kisaltmalar

E	: Elastisite Modülü
f_b	: Normalize edilmiş basınç dayanımı (MPa)
f'_{bl}	: Blok mukavemeti
f_m	: Harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)
f'_m	: Yığma prizma mukavemeti
f'_{mr}	: Harç mukavemeti
f_n	: Duvara etki eden düşey basınç dayanımı (MPa)
f_{rt}	: Yığma birimler ve harç arasındaki yapışma dayanımı
I	: Bina önem katsayısı
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
τ_0	: Çatlama emniyet gerilmesi
μ	: Sürtünme katsayısı
w	: Çatlak genişliği
$AFAD$	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Sütun görünümü.	9
2.2: Ayak görünümü.	10
2.3: Taş duvar örgüleri.	11
2.4: Kemerin zincir eğrisi formu.	12
2.5: Kubbelerde yük taşıma mekanizması.	14
2.6: Tonoz çeşitleri.	14
2.7: Yapıların deprem kuvveti etkisinde davranışlarının şematik açıklaması.	16
2.8: Kemer davranışı.	17
2.9: İtke çizgisi- Kemerlerde göçme mekanizması ilişkisi.	18
2.10: Kubbe üzerinde gerilme dağılımı ve kemer dilimi.	18
2.11: Yığma yapı köşe hasar biçimleri.	22
2.12: Taşıyıcı duvarların, düşey ve yatay yükler nedeniyle oluşan çatlak tipleri.	23
2.13: Harç ve tuğladan oluşan duvarda göçme biçimleri.	24
2.14: Duvarlarda oluşan çatlaklar.	24
2.15: Betonarme çerçeveli yapının dolgu duvarlarının düzlem dışı hareketi sonucu göçmesi.	26
2.16: Betonarme çerçeveli yapının dolgu duvarlarının düzlem dışı hareketi sonucu göçmesi.	26
2.17: Deprem etkisi altında yığma yapı duvarlarının düzlem içi ve düzlem dışı yükler altında davranışı.	27
2.18: Yığma duvarlarda düzlem dışı etkiler.	28
2.19: Gergi elemanlar ile pencere boşlukları arasındaki duvarların güçlendirilmesi.	29
2.20: Hasarlı boşluklu duvar bölümünün çelik elemanlar ile güçlendirilmesi.	30
2.21: Yığma duvarların köşe birleşimlerinde ayrılmalarının ankraj plakaları ile onarılması.	30
3.1: Yığma prizmanın gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	34
3.2: Çekme etkisine maruz kalan yığma duvarda yapışma dayanımı-çatlak genişliği bağıntısı.	35

3.3:	Yığma elemanlarda çekme kırılmasının oluşumu.	35
4.1:	Yığma duvarları modelleme teknikleri.	36
4.2:	Homojenleştirme işlemi.	37
4.3:	Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği.	38
5.1:	Öşki Kilisesi'nin mimari planı.	40
5.2:	Öşki Kilisesi plan ve kesit.	41
5.3:	Öşki Kilisesi güney ve batı cephesi görünüşü.	42
5.4:	Öşki Kilisesi kuzey cephesi görünüşü.	42
5.5:	Tonoz ve kubbelerde göçmeler.	45
5.6:	Pendantiflerde çatlaklar ve delikler.	46
5.7:	Duvarlarda kullanılan kemerler.	47
5.8:	Kemerlerin taşıyıcılığını koruması.	47
5.9:	Sonradan eklenen ağaç destek.	48
5.10:	İnsanlar tarafından duvarlarda açılan oyuklar ve delikler.	49
5.11:	Kilisenin duvarlarının görünüşü.	49
5.12:	Batı cephesinin düzlem dışı davranış yapan duvarı.	50
5.13:	Sonlu elemanlar modelin 3 boyutlu görünüşleri.	51
5.14:	Düzlem kabuk elemanda iç kuvvetler.	52
5.15:	Düzlem kabuk elemanda global koordinatlar ve gerilmeler.	52
5.16:	Sap2000 programında çubuk eleman eksenleri.	53
5.17:	3D Sonlu elemanlar modeli farklı kotlardan planları.	54
5.18:	Öşki Kilisesi'nin modelleme aşamaları 1 ve 2.	55
5.19:	Öşki Kilisesi'nin modelleme aşamaları 3 ve 4.	56
5.20:	Öşki Kilisesi'nin modelleme aşamaları 5 ve 6.	57
5.21:	Öşki Kilisesi'nin modelleme aşamaları 7 ve 8.	58
5.22:	Öşki Kilisesi'nin modelleme aşamaları 9 ve 10.	59
5.23:	DD-1 için spektrum eğrisi.	61
5.24:	DD-2 için spektrum eğrisi.	61
5.25:	G yüklemesi S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı.	62
5.26:	G yüklemesi S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı.	63
5.27:	G yüklemesi S12 gerilme dağılımı.	63
5.28:	G yüklemesi altında deplasman.	64
5.29:	G yüklemesi altında deplasman.	65

5.30: Mod 1.	67
5.31: Mod 2.	67
5.32: Mod 3.	67
5.33: Mod 4.	68
5.34: Mod 5.	68
5.35: Mod 6.	68
5.36: Mod 7.	69
5.37: Mod 8.	69
5.38: Mod 9.	69
5.39: Mod 10.	70
5.40: Mod 5, Y doğrultusunda hareket.	70
5.41: Mod 9, X doğrultusunda hareket.	71
5.42: (D+EX) DD-1 için X yönü deplasmanı.	72
5.43: (D+EY) DD-1 için Y yönü deplasmanı.	72
5.44: (D+EX) DD-2 için X yönü deplasmanı.	73
5.45: (D+EY) DD-2 için Y yönü deplasmanı.	73
5.46: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi.	74
5.47: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	74
5.48: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi.	75
5.49: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	75
5.50: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi.	76
5.51: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	76
5.52: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi.	77
5.53: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	77
5.54: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi.	78
5.55: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi 0-5 N/mm ² aralığı.	78
5.56: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi.	79
5.57: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi 0-5 N/mm ² aralığı.	79
5.58: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi.	80
5.59: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi -0,45 N/mm ² -3 N/mm ² aralığı.	80
5.60: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi.	81
5.61: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	81

5.62:	(D+EX) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi.	82
5.63:	(D+EX) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-3 N/mm ² aralığı.	82
5.64:	(D+EY) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi.	83
5.65:	(D+EY) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	83
5.66:	(D+EX) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi.	84
5.67:	(D+EX) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-2 N/mm ² aralığı.	84
5.68:	(D+EY) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi.	85
5.69:	(D+EY) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-4 N/mm ² aralığı.	85
5.70:	Öski Kilisesi'nin düzlem dışı davranış yapan duvarının çelik iskele sistemi ile güçlendirilmesi.	88
5.71:	Öski Kilisesi ve çelik iskele sisteminin kesiti.	88
5.72:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında S11 gerilmesi.	89
5.73:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında S22 gerilmesi.	89
5.74:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında S12 gerilmesi.	90
5.75:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EY) DD-1 altında S11 gerilmesi.	90
5.76:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EY) DD-1 altında S22 gerilmesi.	91
5.77:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EY) DD-1 altında S12 gerilmesi.	91
5.78:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında X doğrultusu deplasmanı.	92
5.79:	Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-2 altında X doğrultusu deplasmanı.	92
5.80:	Çelik iskele sisteminde oluşan aksenal kuvvetler.	93

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Yığma yapılarda çatlak düzeyleri.	20
5.1: Öşki Kilisesi'nden alınan taş numunesinin deney sonuçlarından elde edilen malzeme özellikleri.	43
5.2: Analizde kullanılan malzemeler ve özellikleri.	44
5.3: Sismik tehlike haritası raporu çıktıları.	61
5.4: Modlara ait periyotlar ve kütle katılım oranları.	66
5.5: Güçlendirme öncesi ve sonrası için modlara göre periyotlar ve kütle katılım oranları.	87

1. GİRİŞ

Kültürel mirasımızın en önemli parçalarından biri olan tarihi yapılar insanlığın ortak mirası olarak bir sonraki nesillere aktarılmak üzere korunmalıdır. Günümüze ulaşmış özgün nitelikleri ile geleceğe aktarılması gerekmektedir.

Tarihi yapılar, birer kültür varlığı olduğundan dolayı tarihi dönemlere dair kültür, ulaşım, bilim, sanat, din vs gibi konularda günümüze kadar bilgi verebilmektedir. Bu yapılarda çeşitli geleneksel malzemeler (ahşap, taş, tuğla, kerpiç vs.) kullanılmaktadır. Evler, camiler, köprüler, kaleler, kervansaraylar, tekkeler vs. gibi tarihi kentleri, şehirleri oluşturan benzer yapılar, tarihi yapı kapsamındadır.

Taş, tuğla gibi malzemeden faydalanılarak yapılan yığma yapı tekniğine ile kurgulanmış ve inşa edilmiş tarihi yapıların taşıyıcı sistemini kemer, kubbe, ayak-sütun, döşeme, pandantif, duvar, tonoz ve temel oluşturmaktadır. Bahsedilen elemanlar büyük ölçüde yapının genel formunu ortaya koymaktadır. Bünyesinde tarihi ve kültürel çok fazla zenginliği barındıran ülkemiz aktif fay hatları üzerinde yer almaktadır. Bundan dolayıdır ki ülkemizde bulunan tarihi yapıları tehdit eden en önemli faktör depremdir. Depremler, eski çağlardan günümüze kadar, insanların canına ve malına zarar veren, yapıları yıkan felaketlerin en tehlikelisi olarak düşünülmüştür ve görülmüştür. Dolayısıyla ülkemizdeki tarihi yapıların depreme karşı korunması büyük önem ifade etmektedir. Malzeme fark etmeksizin yapılmış olan tarihi bir yapının depreme karşı ne kadar güvenli olduğunu ya da ne kadar güvensiz olduğunu öğrenmek için iyi hazırlanmış bir analiz modeliyle deprem analizi yapılmalıdır. Ancak yığma yapıların günümüzde yapılan yapılardan farklı olan özellikleri nedeniyle yapısal analizi zorlaştırmaktadır. Yapı elemanlarının (harç, taş ve tuğla) değişik fiziksel ve mekanik özellikler göstermesinden dolayı analiz esnasında gerçek malzeme özelliklerinin tanımlanmasını güçleştirmektedir.

Tarihi yapıların ömürlerini belirleyen iki ana etken bulunmaktadır. İki ana etken; zemin problemleri ve depremlerdir. Bunların yanı sıra çevre-doğa şartları, insanlardan kaynaklı hasarlar, bu süreci ikinci derecede etkileyen etkenlerin başında gelmektedir. Uzun yıllar ayakta kalabilmiş bir yapı için, genellikle zemin-yapı etkileşiminin belli bir dengeye ulaştığı düşünülmektedir.

Yığma yapıların mevcut yüklere, ileride her yükleme durumunda oluşabilecek zorlanmalara karşı yapısal davranışlarının belirlenmesi, korunması, güçlendirilmesi, restorasyon ve mühendislik açısından önem arz etmektedir.

Bu muhteviyattan dolayı, tarihi yapılar çeşitli bilgisayar programları yardımıyla modellenerek analizleri yapılmakta ve davranışları incelenmektedir. İncelemeler sonucunda gerekli olduğu durumlar da tarihi yapılarda çeşitli güçlendirmelere gidilmektedir.

Sonlu elemanlar yöntem ile yapıların statik ve dinamik yükler altındaki davranışının tespiti, yapıların tasarımında kullanılmaktadır. Günümüzde yapıların statik-dinamik analizleri profesyonel yazılımlar eşliğinde çözülmektedir. Yığma yapıların, mevcut yapısal performansını saptamak için yapılan hesaplar arasında en uygun metot sayısal çözümlemelerdir. Yapıya etkiyen deprem yükünü belirleyebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Etkiyen deprem yükünün hesabını ve elemanlar içerisinde dağılımını sağlıklı bir şekilde elde edebilmemiz için o yöntemin gerektirdiği şekilde ilerlenmelidir.

1.1. Literatür Özeti

Günümüze kadar konu ile alakalı çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Bilgin [1] Mimar Sinan'ın hala mevcut olan camilerinin kubbe sistemlerinin yapısal davranışlarını irdelenmiştir. Sinan'ın 8 farklı camisini kubbelerini Sap2000 de kabuk eleman olarak modelleyerek yapıda ortaya çıkan gerilmelerin yapı stabilitesine uygunluğunu incelemiştir.

Savaşır [2] Kubbelerin taşıyıcı sistem ve malzeme açısından kubbe çeşitlerini incelemiştir. Kubbelerdeki gerilmelerin yapım sistemlerine ve malzeme değişimine bağlı olarak değişiklik gösterdiği ve yedi farklı yapım sistemiyle oluşturulan kubbelerin yük aktarımının da farklı olduğunu göz önüne koymuştur.

Aslan [3] Mimar Sinan eseri olan Süleymaniye Cami'nin sonlu elemanlar yöntemi kullanarak Sap2000 programında statik ve dinamik analizlerini yapmıştır. Yapının zayıf ve kuvvetli olduğu bölümler belirlenmiştir. Önleme ihtiyaç olan riskli bölümlerin tespiti amaçlanmıştır. Bu aşamaları da yaşanmış farklı deprem kayıtları yapıya etki ettirilerek sismik davranışının değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Chamaky [4] Üç farklı tarihi yığma yapının sonlu elemanlar yöntemi kullanarak Sap2000 programı ile yapılan analizlerinin sonucunda gerekli görülen yerlerde yapılara farklı şekillerde uygulanan güçlendirmeler irdelenmiştir. Bu güçlendirmelere örnek: duvar, temel, minare, kubbe vs. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin dışında deneylerde yapılmıştır.

Öztaş [5] Deprem hareketine bağlı olarak oluşan çatlakların veya hasarların mevcut bir yığma yapı incelenerek analiz yapılmıştır. Mevcut yığma yapının üç durum için de deprem yükleri hesaplanmıştır. Mevcut hali, lifli polimerle (GFRP) güçlendirilmiş hali ve son olarak betonarme perde ile güçlendirilmiş hali olarak ayrı ayrı irdelenmiştir.

Aydoğmuş ve Aksoy [6] Düzensiz geometriye ve çok çeşit yapı malzeme kullanılarak yapılmış olan Kargı Han üzerinde çalışmıştır. Analiz sonucunda yapının dinamik etkiler altında yapacağı davranışa ulaşılmıştır. Bu sonuca ulaşırken yapılan malzeme kabullerinden dolayı gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Yapıda elde edilen gerilmelerin sonuçlarının kabul edilebilirliği sınır değerlerini aşma durumları belirtilmiştir. Analiz sonuçlarının daha gerçekçi olması için doğrusal olmayan yöntemlerle ve deneysel çalışmalar desteklenerek değerlendirilmesi gerektiği kanısına varılmıştır.

Şeker [7] 28 adet Mimar Sinan camilerinin üç boyutlu modellerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak Ansys programında modellemiş ve statik, dinamik analizler yapmıştır. Çeşitli oranlara bağlı olarak parametre değerleri belirleyerek davranış üzerindeki etkilerini irdelenmiştir. Statik durumda yük dağılımlarının ve gerilme oranlarının taşıyıcı sistemlere göre tipleştirilmiştir. Şekil değiştirmelerin artış gösterdiği veya göstermediği noktalar üzerinde durulmuştur. Mod Birleştirme Yöntemi analizlerinde gerilmelerin ana kubbeyi taşıyan askı kemer sistemi, yalnızca masif duvarlardan oluşan camilerde pencere boşlukları çevresinde yoğunlaştığı görülmüştür. Bu çalışma ile camilerin gerilme değerleri ve camilerde meydana gelebilecek gerilmelerin düzeyleri hakkında bilgi vermektedir.

Düzgün, Hatipoğlu, Artar, Yurdakul, Öner [8] Zahit Efendi Camisi'nin çeşitli depremler altında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Sap 2000 programında yapının basınç gerilmeleri ve yer değiştirmeleri elde edilmiştir. Bayburt'a en yakın yerlerde (Erzincan, Erciş) meydana gelen depremlerde emniyet gerilmelerini aşmadığı görülse de Düzce depremi etkisinde emniyet gerilmelerinin üzerinde çıktığı gözlemlenmiştir.

Korkmaz, Zabin, Çarhoğlu, Nuhoglu [9] Tipik kesme taş camilere örnek olan Rize Kurşunlu Cami'nin deprem etkisi altındaki davranışı irdelenmiştir. Sap 2000 kullanılarak zaman tanım alanında deprem ivme kayıtları uygulanmış ve deprem etkisinde yapısal analiz yapılmıştır. Doğrusal analizler sonucunda elde edilen gerilme ve yer değiştirme sonuçları değerlendirilmiştir. Düzce depremi sonuçlarının diğer deprem kayıtlarından gelen sonuçlara göre daha büyük çıktığı görülmüştür. Deprem etkisi altındaki tarihi yapıların stabilite problemi yaşamasının en önemli nedeni taşlar arasında kullanılan ve bütünlüğü sağlamaya çalışan harç ve metal kenetlerin bağlayıcı dayanımlarının taşın malzeme dayanım değerlerinden fazlasıyla küçük olmasıdır. Özellikle bahsettiğimiz bağlayıcı malzemelerin kayma ve çekme dayanımları yapı stabilitesini belirlemektedir. Yığma yapılarda büyük yer değiştirme kabiliyeti yoktur. Betonarme ve çelik yapılar bu konuda daha elverişlidir. Deprem etkisi altında bu yapıda hasarların meydana gelebileceği görülmektedir. Yapının duvarlarında ve minaresinde büyük gerilmeler meydana gelmektedir.

Dabanlı [10] Yığma yapı davranışı ve analiz yöntemleri örnek yapı Hırka-i Şerif Cami üzerinde irdelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi Sap2000 kullanılarak katı eleman olarak modellenmiştir. Düşey yükler altında statik analiz, davranış spektrumu analizi ve modal analizler ile yapının performansı, yer değiştirmeleri ve gerilmeleri

irdelenmiştir. Kütle katılım oranı yüksek modlarda yakalandığı görülmektedir. Analiz sonucunda güçlendirme önerisi sunulmuştur.

Erdik [11] Aya İrini Kilisesi'nin deprem performansının ve güçlendirilmesi çalışmalarında doğrusal olmayan analizler, sarsma masası deneyleri ve çevrel titreşim ölçümleri, artımsal itme analizi ile performans elde etme edilmesiyle mevcut olan yapı incelenerek değerlendirilmiş ve güçlendirme projesi önerisinde bulunulmuştur.

Döndüren, Şişil ve Demiröz [12] Tarihi yapılarda görülen hasar türleri nedenleri ile birlikte incelenmiştir.

Çöğürücü ve Kamanlı [13] Düzlem dışı tersinir yüklerle yüklenen yığma duvarın sismik davranışın yanı sıra kırılma davranışı da irdelenmiştir. Bu inceleme de gerçekçi boyuta sahip prototip ile deneysel ve analitik olarak araştırma yapılmıştır. Düzlem dışı yüklemeler ile karşılaşan duvarlarda oluşan kırılma şekilleri, hasara ve çökmeye çok müsait olduğunu gözler önüne koymaktadır.

Kanıt [14] Düzlem dışı yüklere maruz kalan yığma duvarın kırılma davranışı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Düzlem dışı yüklerle yüklenen gerçekçi ebatlar sahip olan prototip duvar deneysel olarak irdelenmiştir. Yığma duvar bu tersinir yükler altında, betonarme döşemede meydana gelen akma çizgilerine benzeyen kırılma çizgileri ile kırılır. Gevrek kırılma türü görülür.

1.2. Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmada Erzurum ili Uzundere İlçesi Çamlıyamaç Köyü sınırlarında bulunan Öşki Kilisesi'nin, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak SAP 2000 programı ile statik ve dinamik etkiler altında analizleri yapılmıştır. Yapının kendi ağırlığı ve deprem yükleri altında davranışı belirlenmiştir. Düzlem dışı yüklere maruz kalan duvarın düzlem dışı davranışını engellemek için çelik iskele sistemi ile güçlendirilmesi irdelenmiştir. Bu çalışmanın ana hedefini oluşturmaktadır.

Düzlem dışı davranışta bulunan yapı duvarının, yapının tarihi dokusuna minimum seviyede zarar verecek şekilde düzlem dışı davranışını engelleyecek bir güçlendirme sistemi tasarlanması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra:

- Tarihi yığma yapıların modellenmesinde kullanılan yöntemlerin irdelenmesi,
- Tarihi yığma yapıları oluşturan taşıyıcı sistemlerin incelenmesi,
- Yığma yapıların deprem karşısındaki davranışlarının irdelenmesi,

- Yığma yapılarda oluşan hasar türleri incelenmesi,
- Taşıyıcı yığma duvar davranışı ve hasarlarının irdelenmesi,
- Yığma yapılarda duvarların düzlem dışı davranışının incelenmesi,
- Yığma yapı duvarlarının güçlendirilmesinin irdelenmesi,
- Tarihi yığma yapıların analiz yöntemlerinin incelenmesi konuları bu çalışmanın ikincil amaçları arasında yer almaktadır.

2. TARİHİ MİRASIN KORUNMASI

Yüzyıllarca, çeşitli afetler, savaşlar, olumsuz çevre koşulları, yangınlar ile büyük bir kısmını kaybettiğimiz tarihi yapıların geri kalan kısmını ise gerekli şekilde korumayı ve muhafaza etmeyi başardığımız söylenememektedir.

Ülkemizdeki tarihi yapıların küçük bir kısmı, iyi durumda bulunmaktadır. Deprem, sel, zemin kaynaklı problem, yangın, çevre faktörlerden dolayı oluşan fiziksel ve kimyasal bozulmalar olabilmektedir. Bunlar tarihi yapıların taşıyıcı sistem özelliklerini olumsuz etkileyen faktörlerdendir. Taşıyıcı sistemin yanı sıra görüntülerine de olumsuz şekilde tesir etmiştir. Bunun yanı sıra taşıyıcı sistemde mevcut olan düzensizlik ve süreksizlikler sebebiyle pek çok tarihi yapıda çatlaklar oluşmuştur. Bunlar neticesinde tarihi yapıda kısmen veya tamamen yıkılma gibi sonuçlar meydana gelmiştir. Hasarların nedenleri araştırılmadan çatlaklara ve taşıyıcı sisteme yapılan bilinçsiz müdahaleler ve yanlış güçlendirme girişimlerin neticesinde olumlu sonuç elde edilmeyecektir. Hasar görmüş tarihi bir yapıyı güçlendirmeden önce, yapının bulunduğu zemin özellikleri, yapının mevcut durumu, taşıyıcı sistemi, kullanılan malzemeler detaylı incelenmelidir. Detaylı çalışmaların, değerlendirilmesi sonucunda yapılacak onarım, müdahale veya güçlendirmeye karar kılınmalıdır.

19.yy sonuna kadar olan süreçte yapılmış olan yapılar tarihi olarak kabul edilmektedir ve koruma altına alınabilmektedir. 20. yy ait olan seçkin, özgün örnekler, özel tasarımlarda dönemin yaşamına ve kültürüne ayna tutmasından dolayı tescil edilebilmektedir. Basit onarım, restorasyon ve güçlendirme kavramları arasında farklılıklar mevcuttur.

Restorasyon, yani basit onarımı (Tescilli yapının bozulma sonucu eksilen mimari öğelerinin, özgünlüğü muhafaza edilerek aynı malzeme ile değiştirilmesi, dökülen veya zedelenen sıvaların, kaplamaların yenilenmesi) aşan durumlarda tarihi yapının hasarlarının giderilmesi, daha uzun süre ayakta kalabilmesi için, tarihi özellikleri mümkün olabildiğince muhafaza edilerek gelenekselin yanı sıra ileri tekniklerden de faydalanılarak yapılan müdahaleyi kapsamaktadır. Kapsamlı onarım olarak da değerlendirilebilir. Restorasyonun başlangıç noktası malzeme, strüktür veya zeminin güçlendirilmesi olabilir. Restorasyon geniş yelpazeye sahiptir. Kopmuş bölümlerin bütünlüğünün tekrardan sağlanması, eskimiş ve işlevini yapamayan parçaların değiştirilmesi, yok olmuş kısımların veya kullanılamaz hale gelmiş

yapıların yeniden yapımı gibi alanları kapsar. Restorasyonda tercih edilen, tarihi yapıları mümkün olduğunca az müdahaleyle ayakta tutmayı başarmak ve özgünlüğünü korumaktır.

Güçlendirme, mevcut olan taşıyıcı sistemin yetersiz olması halinde, gelecekte olması ihtimal depremlere karşı önlemler alınmasıdır. Kesit genişletme, gergilerle bağlama, mevcut taşıyıcı sistemin desteklenmesi vs gibi öngörülerde bulunulabilir.

Yapılarda çeşitli depremler geçirdikten sonra hasar olabildiği gibi ilk tasarımdan gelen hasarlarda olabilir. Yığma yapıların değerlendirilmesinde ve güçlendirilmesinde iyi analiz yapılması gerekmektedir. Tarihi dokuya müdahalelerle, büyük değişimlere neden olacak dokunuşlardan kaçınılmalıdır. Bu ifade Venedik Tüzüğü'nün 10. Maddesinde "Geleneksel tekniklerin yetersiz kaldığı yerlerde, koruma ve inşa için bilimsel verilerle ve deneylerle geçerliliği saptanmış herhangi çağdaş bir teknik kullanılarak anıt sağlamlaştırılabilir." olarak yer almaktadır.

Yığma yapıların sayısal modellemesi, yapısal analizi, güçlendirilmesi ile ilgili son yıllarda bilimsel araştırmalarda artış görülmektedir.

2.1. Yığma Yapılar ve Tarihi Yığma Yapıları Oluşturan Taşıyıcı Sistemler

İnsanoğlunun kullanmış olduğu en ilkel yapı malzemelerinden en son teknolojiye kadar tüm yapı malzemeleri tabiattaki ham maddelerden meydana gelmektedir. Tabiatın elde edilmesi kolay yapı malzemeleri arasında taş, kerpiç, ahşap, tuğla yer almaktadır. Bu yapı malzemeleri, yapıların davranışlarında belirleyici role sahiptir. Barınma fiilini gerçekleştirmek isteyen insanların tercihleri arasında taş kullanımının özel bir yeri bulunmaktadır. Anadolu, Bizans, Roma, Mısır'da bulunan pek çok tarihi eserin malzemesi olarak taş kullanılmıştır.

Yığma yapılar; yapılacağı coğrafyadaki doğal malzemelerle düşük maliyet, ısıya dayanıklılık ve kolay olarak imal edilmesinden dolayı çok tercih edilen yapı türlerinden biridir.

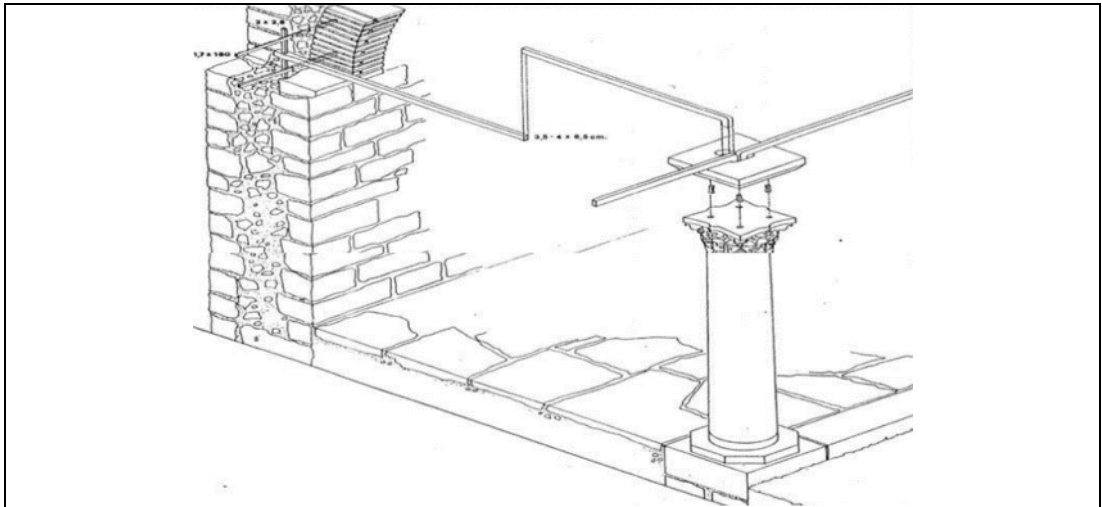
Tarih boyunca, yığma yapılarda çok çeşitli yapım tekniklerinden faydalanılmıştır. Yığma yapılar teşkil edilirken, taşları veya tuğlaları, taşıyıcı oluşturacak biçimde, üst üste koyarak harçla bağlanmıştır.

Yığma yapılar, tuğla veya taş malzemeyi harç kullanarak bağlamasından dolayı heterojen bir yapım tekniğine sahiptir. Yapım tekniği açısından yığma yapıları basitçe sınıflandırmak gerekirse moloz taş, kesme taş ve iri kesme taşdır.

Yığma yapılar çok eski tarihlerden günümüze kadar kullanılan bir tekniktir. Büyük açıklıklı yapıların tavanlarını örtmek için kemer, tonoz, kubbe gibi ögeler geliştirilmiştir. Tuğla ve(ya) taşın harçlarla bir araya getirildiği ve bazen dolgu malzemeleri, kenetler veya gergiler kullanılarak inşa edilen çeşitli yapı örnekleri yüzlerce yıldır hala ayakta durmayı başarmıştır. Bunun yanı sıra yönetmeliklerin yetersizlikleri nedeniyle denetimsiz uygulamalar sonucunda çok fazla depremde can ve mal kaybına neden olmasından dolayı son yıllarda, Avrupa’da, teknolojik ve mekanik açılardan yığma yapıları kapsayan Eurocode 6 – Design of Masonry Structures ve Eurocode 8 – Earthquake Resistant Design of Structures yönetmelikleri oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra ülkemizde de 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) Bölüm 11 içerisinde irdelenmiştir.

2.1.1. Sütunlar ve Ayaklar

Mekânların örtü yüklerinin, tekil noktalardan iletildiği düşey taşıyıcı elemanlardır. Bu elemanlar, sütun ve ayaklardan oluşmaktadır. Şekil 2.1’de [15] görüldüğü üzere sütunlar; tek bir bütün ya da birkaç blok taştan meydana gelir. Sütunun birkaç bloktan oluşması durumunda, bronz veya ağaç kenetlerin yardımıyla birleştirilir.



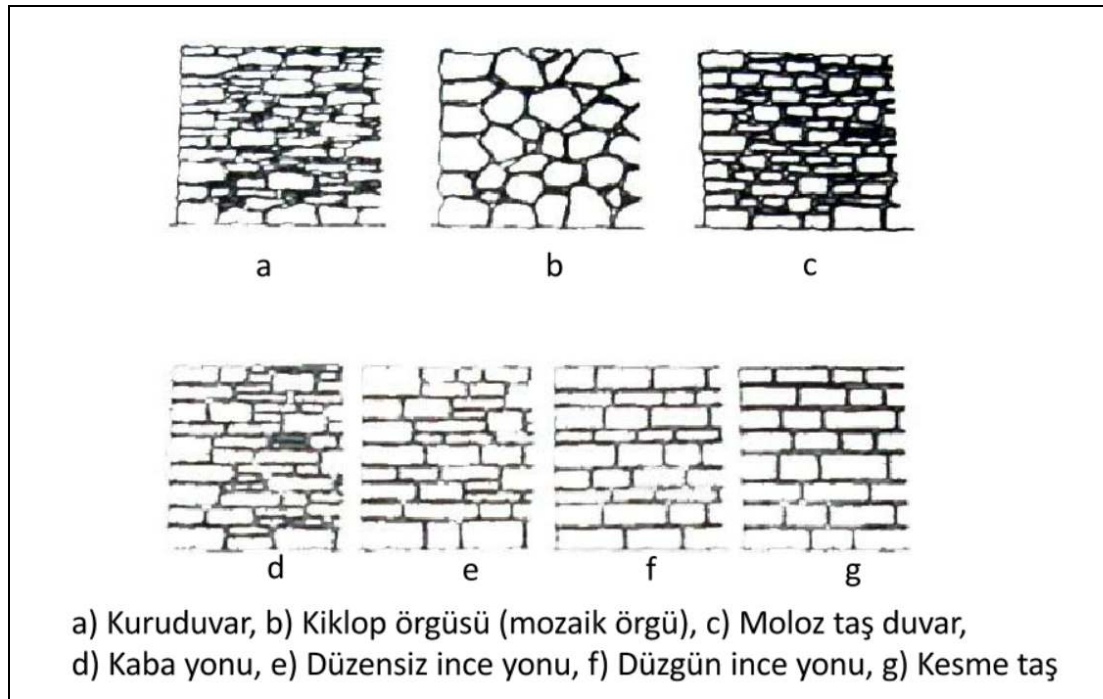
Şekil 2.1: Sütun görünümü.

Yığma yapılar, taş veya tuğla gibi yapı birimlerinden ve taş veya tuğlanın birbirine bağlantısını sağlayan harcın kullanımı sonucunda oluşan, heterojen bir yapım tekniğine sahiptir.

Duvar örgüsünde düşey derslerin üst üste gelmemesine özen gösterilmelidir. Şaşırtmalı duvarda yükler yayılarak aşağı doğru aktarılır. Bu şekilde yapılması duvarın doğru yük dağılımına yardımcı olur. Aksi takdirde örgünün zayıf noktasını oluşturan düşey harç çizgisinin çatlamasına neden olur. Şekil 2.3’de farklı duvar örgüleri görülmektedir [17].

Basınç dayanımlarının yüksek olmasına rağmen içerisinde donatı bulunmamasından dolayı çekme kuvvetlerine karşı dayanım gösteremezler ve hasarlar meydana gelebilir.

Duvar boyutlarını belirleyen etkiler yanal deprem yükleri ve duvarlara mekan örtüsünden gelen eğik yüklerdir. Bundan dolayı geleneksel yapılarda duvar genişlikleri artırılmıştır [18].

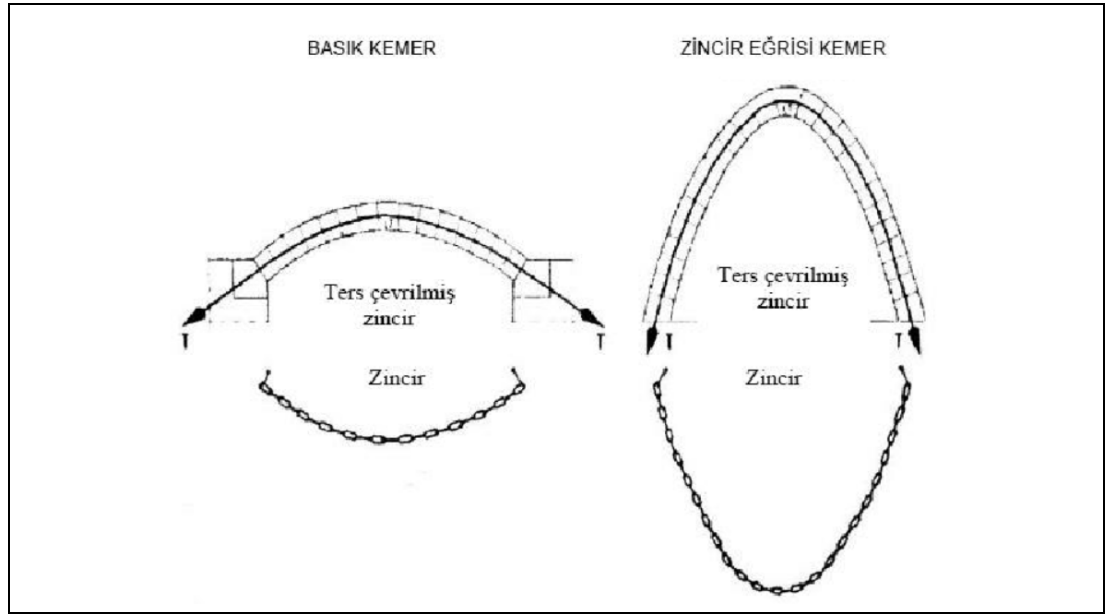


Şekil 2.3: Taş duvar örgüleri.

2.1.3. Kemerler

İki ayak veya iki sütun arasında bulunan açıklığı geçmek için yay şeklindeki inşa edilen yapı elemanlarıdır. Düşey ve yatay yükleri taşıyan kemerin uçları, iki sütun ya da ayakların üzerine oturarak yükleri belli noktalara aktarırlar. Kemerlerin esas görevleri arasında kubbeyi taşımak, yükü ana ayaklara ve duvarlara aktarmak yer alır.

Geometrik olarak zincir eğriliği kemerin çıkışı olmuştur. Şekil 2.4’de [15] görüldüğü gibi iki ucundan mesnetlenen zincir sarkar ve bir eğri oluşturur. Bu formda duran zincirde sadece çekme gerilmesi vardır. Bu zincir, aynı geometrisi korunarak etki eden yük doğrultusunda muhafaza edilerek ters döndürülürse kullanılan malzemenin esnek bir zincir yerine basınca dayanıklı rijit malzeme kullanıldığında kemerde sadece basınç gerilmeleri görülür.



Şekil 2.4: Kemerin Zincir Eğrisi Formu.

Kemerlerin statik özellikleri, kemer yüksekliğine ve geçtikleri açıklığa endekslidir. Şekil 1.4’de görüldüğü üzere kemerin orta çizgisine teğet olduğu varsayılan tepki kuvvetinin düşey ve yatay olmak üzere iki bileşeni vardır. Bu bileşenlerin yatayı, kemer yüksekliğindeki artış ile ters orantılı değişir. Yani kemer yüksekliğinin artması yatay itki kuvvetini azaltır. Basık kemerler bundan dolayı çekme elemanları (gergi) ya da ağır blok temellerle dengelenir [19].

Kemerlerin herhangi bir bölümünde oluşan çekme kuvveti kemerde çatlağa neden olabilir. Oluşabilecek bu çatlaklar, her zaman kemer stabilitesinin bozulmasına neden olmayabilir. Mesnetlerin açıklık istikametinde açılması, kemer stabilitesinin bozulmasına neden olan en büyük etkidir.

2.1.4. Kubbeler

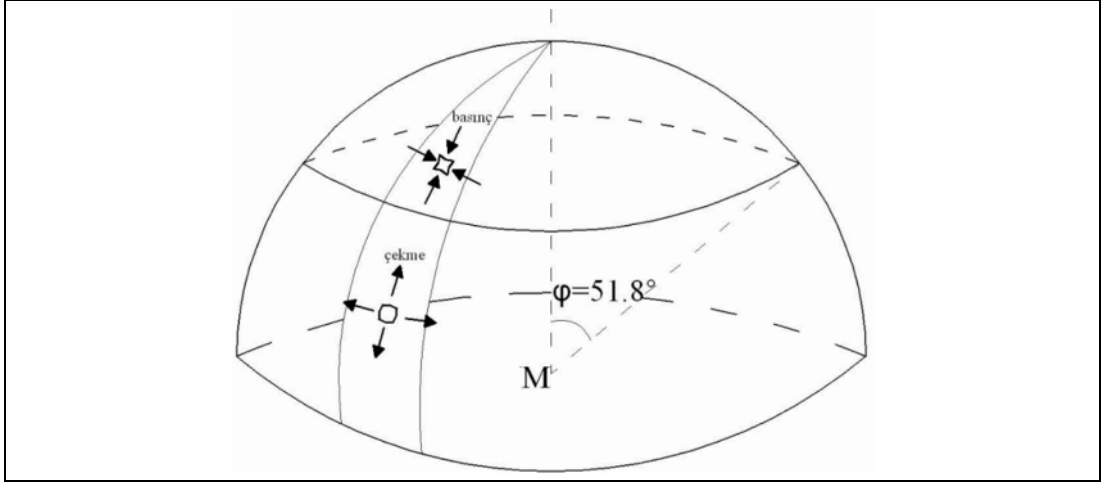
Kubbeler, düşey kuvvetleri yüzeyleri boyunca aktaran, eğri yüzeyli taşıyıcı elemanlardır. Kare, silindir ve çokgen plana sahip yapıları örtmek için tercih edilir.

Bir kemerin simetri eksenini etrafında döndürülmesiyle elde edilir. Şekil 2.5’ de görüldüğü üzere yığma kubbeler küre parçasına benzemektedir. Bunun nedeni de basınca çalışan malzeme olan taş ve tuğla gibi malzemelerden yapılması sonucu çekmeye karşı göstermiş olduğu olumsuz performanstır. Yığma kubbelerde yük aktarımı meridyenler doğrultusundadır. En tepedeki kilit taşından başlayarak yük, komşu taşlara aktararak kubbenin tabanına iletilmesi hedeflenir. Kubbe tabanına ulaşan yük dikey ve yatay bileşene sahip olmaktadır. Dikey bileşen, duvar, kubbeyi tutan kemer gibi elemanlar vasıtasıyla zemine aktarımı sağlanır. Yatay bileşenleri ise kemer düzlemine dik doğrultuda inşa edilen yarım kemerler, gergiler veya payandalarla aktarılır. Kubbede hasara neden olan genellikle bu yatay kuvvettir.

Kubbenin alt bölgesi çekmeye, üst bölgesi ise basınca çalışmaktadır. Basınç ve çekmenin olmadığı bölge ise sınır çizgisidir. Bu sebepten dolayı, genellikle kubbeler bu sınır çizgisinde mesnetlendirilir [20].

Kubbenin oturduğu duvar bölümüne kasnak denilmektedir. Kubbeye mesnetlik yapan kasnak, duvar basıncını devamlı kılmasından dolayı önemli bir topuk elemanı olarak yer almaktadır. Kubbede devamlı basınç varken, kasnakta bu durum farklılık göstermektedir. Kasnakta, düşey doğrultuda kayma, yatay doğrultuda çekme gerilmeleri oluşur (Şekil 2.5) [21].

Kubbeli mekan örtüsünde geçit elemanları olarak en sık kullanılan formlar Türk üçgeni, pandantif ve trompdur [22].



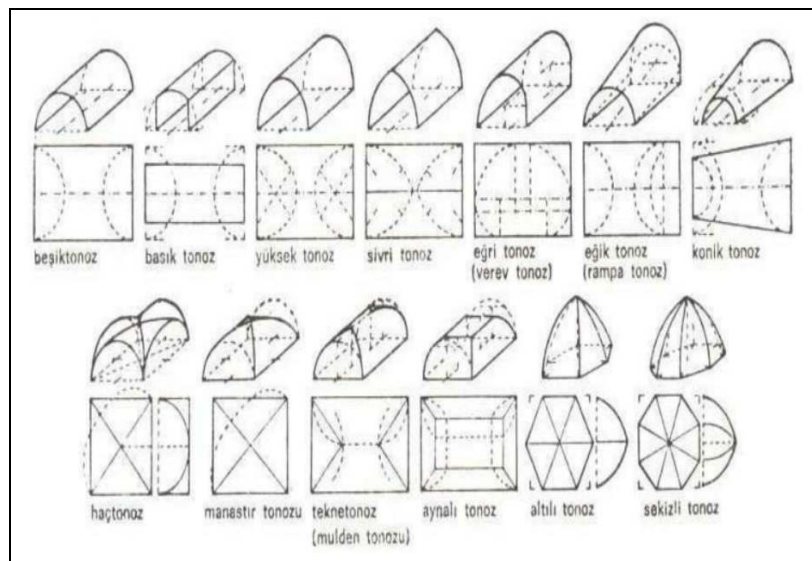
Şekil 2.5: Kubbelerde yük taşıma mekanizması.

2.1.5. Tonoz

Tonoz, kemerin kendi düzleminde, dik doğrultusunda ötelenmesiyle oluşur. Yük taşıma prensibi kemerin yük taşıma prensibine benzemenin dışında kabuk özelliğine sahip olan tek eğrilikli yapı elemanıdır. Tonoz, kendi ağırlığı ve üzerindeki kaplama yüklerini taşır. Basınç kuvvetlerinden dolayı basınç gerilmeleri meydana gelir.

Bir tonozun kesiti, aynı eğrilikteki bir kemerin eşdeğeridir. Tonoz mesnetlerinde meydana gelen yanal kuvvetler, kemerlerde uygulandığı gibi gergiler veya payandalarla, temellere doğru kalınlığı artırılan duvarlarla taşınır [23].

Tonoz çeşitleri Şekil 2.6' da [16] verilmiştir.



Şekil 2.6: Tonoz çeşitleri.

Bünyesinde çekme gerilmelerini barındıran tonoz ve kubbelerde, çekme bölgesindeki kalınlaştırma yani ağırlık azaldığında çekme bölgesi aktifleşmiş olur. Bu elemanlar mesnetleri dışı doğru iterek kubbelerde mesnetlere dik çatlaklar, tonozlarda ise mesnetlere paralel çatlaklar meydana getirir.

Yığma duvarlar basınç dayanımına sahip olmasına rağmen çekme kuvvetleri altında herhangi bir dayanımı gösteremeyip hasara uğramalarından dolayı eğilme etkisinde çalışacak elemanlar (döşeme, çatı vs) kubbe, kemer veya tonoz gibi eğrisel formlu elemanlar olarak tasarlanır. Bu yapıların üzerindeki yüklemeler simetrik olması durumunda muntazam bir çalışma sistemi vardır. Ancak yüklemelerin simetrik olmadığı zaman, farklı oturmaların ve deprem etkilerinin görülmesi söz konusu olduğu durumunda bu taşıyıcı elemanlarda çekme gerilmelerinin artışı ve yoğunlaşmasına sebep olur. Çekme gerilmelerinin artması, yoğunlaşması yığma yapıların çekme dayanımına karşı koyacak bir malzeme olmamasından dolayı bu noktalarda çekme gerilmelerine dik doğrultuda çatlakları oluşturur. Bu şekilde yük aktarımındaki süreklilik kaybedilir. Bölgesel olarak çatlamların, göçmelerin görülmesinin yanı sıra dökülmeler gözlenir. Bilhassa taşıyıcı elemanlarda oluşacak dönmeler veya oturmalar tehlikelidir. Bu sebeplerden dolayı oluşan hasarlar kalıcı hasarın dışında göçmelere kadar ulaşabilir [16].

2.2. Yığma Yapıların Deprem Karşısındaki Davranışları ve Hasar Nedenleri

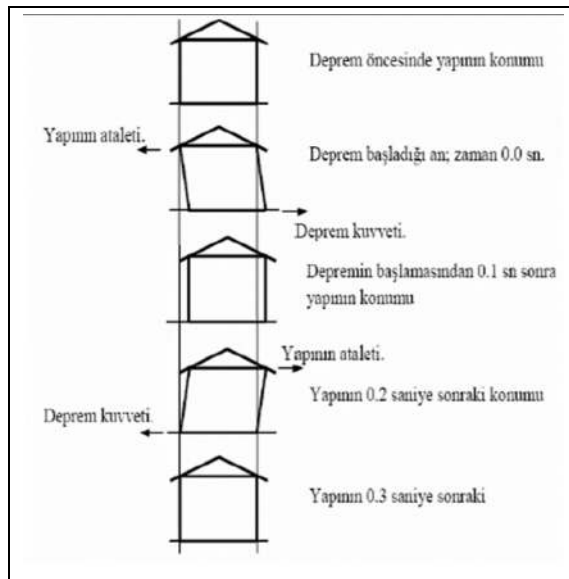
Deprem etkisini, düşey yüklerden ayıran en önemli fark, düşey kuvvetlerin beraberinde yatay kuvvetleri de oluşturmasıdır. Yapının sadece düşey yükler etkisinde stabilitesini koruması yapının depreme karşı yeterli güvenliğinin olduğu anlamına gelmez. Özellikle yığma yapıların kütesinin büyük olması dolayısıyla depremlerde büyük etkiler ortaya çıkartır. Ekseri olarak basınç altında bulunan yığma elemanlarda çekme gerilmeleri ve çatlaklar oluşabilir. Büyük ivme değerleri (seyrek olarak gerçekleşme olasılığı olan) oluşturan depremlerde yapıların hasar görmesi kaçınılmaz olabilir. Sık karşılaşılan ve ivme değeri daha küçük olan depremlerde ise hasarlar daha sınırlıdır.

Yığma yapılar, taş ve(ya) tuğla gibi malzemelerin arasına harç konularak bağlayıcılık elde edilerek yapılan yapılardır. Duvarların tümü taşıyıcılığa sahip

olmasından dolayı yığma yapılar rijit davranış sergilemektedirler. Bazı açılardan üstünlükleri olmasına karşın ağırlığının çok fazla olması ve deprem gibi yatay yüklere karşı dayanımlarının düşük olması nedeniyle depreme dayanıklı olduğu söylenemez.

Gevrek davranış sergileyen yığma yapılar deprem esnasında esnek davranış gösteremediğinden ve yeterli seviyede yer değiştirme yapamadığından hasar görür [24].

Eylemsizlik kanununda yer aldığı gibi hareket eden veya durağanlığına devam eden bir cisme, dışarıdan herhangi bir kuvvet etki etmesi durumunda cisim bu kuvvete karşı bir direnç gösterir. Şekil 2.7’de [25] yapıların deprem kuvveti etkisindeki davranışı gösterilmiştir. Deprem kuvveti etkisiyle zemindeki hareket yapıyı bir tarafa doğru çekmeye başlar. Ancak yapı konumunu stabil tutmak için ters yönde atalet kuvveti oluşturmaktadır. Yapı ağırlığı ile bu harekete karşı koyar ve eski haline geri dönmesini ister. Yapı deprem sırasında hareket etmeye (sallanmaya) başladığında atalet ve deprem kuvvetleri de yapıyı Şekil 2.7’de gibi iki ucundan çekmeye başlar. Bu durum neticesinde yapı elemanlarında iç kuvvet meydana gelir. Yapıyı oluşturan elemanlar arasında önemli bir direnç mevcutsa yapıda oluşan iç kuvvetler sönümlenir. Buda yapının çatlamadan ayakta kalmasını sağlar. Şayet iç kuvvetleri sönümleyecek parçaları bir arada tutabilme gücüne sahip değilse yapı elemanlarında çatlaklar meydana gelmeye başlar. Depremi durmaması halinde çatlaklarda açılmalar, genişlemeler, uzamalar oluştukça yapı hasarı önemli bir limite gelmesi durumunda yıkılmaların, çökmelerin gerçekleşmesi kaçınılmazdır.



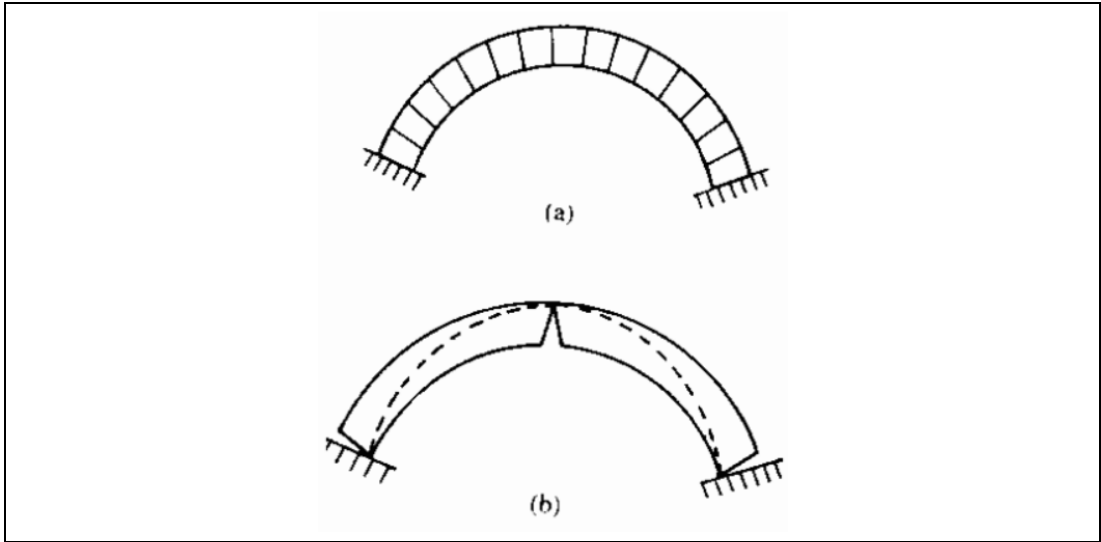
Şekil 2.7: Yapıların deprem kuvveti etkisinde davranışlarının şematik açıklaması.

Kemerin bir düzlem elemanı olarak varsayıldığı durumda, tek yönlü olarak kemerlerin dizilmesiyle tonozlar, düşey eksen etrafında döndürülmesiyle kubbeler meydana gelir. Kubbe ve tonozların davranışlarının temelini kemer davranışı oluşturmaktadır.

Kilit taşı yerleşene kadar kemerler geçici bir iskele ile desteklenir. Kilit taşının yerleşmesinden sonra kemer desteksiz ayakta durabilir. Desteğin kaldırılmasıyla kemer mesnetlerini itmeye başlar. Kemer mesnetlerin bu itkiye izin vermesiyle kemerde hafif bir yayılma ve açılma meydana gelir (Şekil 2.8) [26].

İtki çizgisinin kemerin merkezine yakın olduğu durumda kemer sadece basınç gerilmesini maruz kalmaktadır. Bundan dolayı itki çizgisi merkeze mümkün mertebe yakınlştırılmaktadır. İtki çizgisi, dış yükler ile iç kuvvetlerin dengede olduğu zaman yığma elemanın içerisinde kalıyorsa yapı yıkılmaz. Kemer kalınlığını azaltmak için itki çizgisini kemerin ana ekseninde tutulması gerekmektedir.

Sehimi açıklığa göre çok olan sivri kemerlerin, itme kuvvetleri düşeye yakındır. Bundan dolayı tam ve sivri kemerlerin taşıma güçleri fazladır. Basık kemerlerin ise itme kuvvetleri yataya yakındır. Yatay kuvvetlerin karşılanması zor olduğundan dolayı ayaklar çok kalın olur [27].

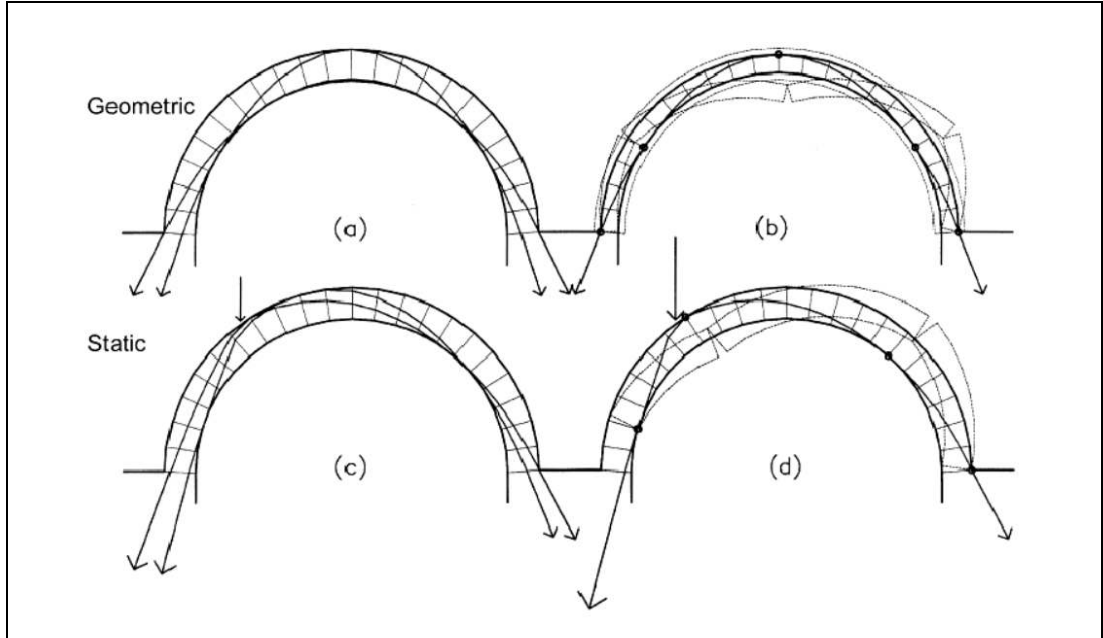


Şekil 2.8: Kemer davranışı a) Yeni yapılan kemer b) Oturan 3 mafsallı kemer.

Şekil 2.9'da [15] kemerlerin göçme mekanizması, itki çizgisi ile ilişkisi gösterilmiştir. Şekil a ve Şekil b kemerler (geometrik olarak inşasının doğru olmadığı takdirde) itki çizgisinin kesit içerisinde kalmamasından dolayı göçecektir. İtki

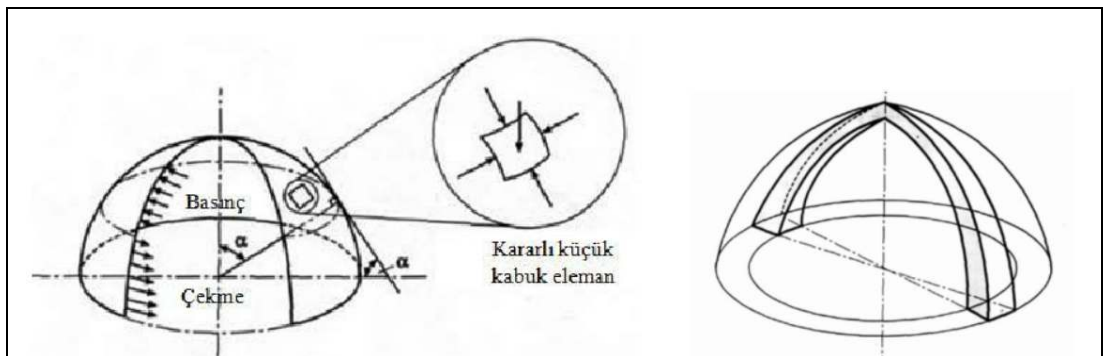
çizgisinin kesitin dışına çıktığı zaman, kesitin içinde kalmadığı bölgelerde çatlaklar meydana gelir. Bu çatlakların artması sonucunda göçme durumu beklenir.

Kemer tasarımında, iki şart sağlanıyorsa kemerler yıkılmayacaktır. Yükleme durumu ve buna karşılık gelen kapasite şartı ve geometrik uygunluk şartı.



Şekil 2.9: İtke çizgisi- Kemerlerde göçme mekanizması ilişkisi.

Kemerin düşey eksen etrafında döndürülmesiyle kubbe ortaya çıkar. (Şekil 2.10) [28] Kubbelerin geometrik tasarım ilkeleri kemerlerle benzerlik gösterir. Çift yönlü eğrilikten dolayı, bir yöndeki davranış diğer yöndeki gerilmeleri etkiler.



Şekil 2.10: Kubbe üzerinde gerilme dağılımı ve kemer dilimi.

Kasnağa yakın lokasyonlarda derin olmayan çekme gerilmeleri oluşabilir. Kubbe eteğine yakın olan bu çatlaklar düşey şekildedir. Kubbe tabanında toplanan yükler

yatay ve düşey iki bileşene sahiptir. Kubbe hasarlarına genel olarak yatay bileşen neden olur.

Kubbenin kesilmesiyle elde edilen kemer dilimi, itki çizgisi üzerinde bulunan yüklerin etkisinde iç ve dış hatta çok yakın olarak tasarlanmaması durumunda kemer kararlı yapıya sahiptir.

Kemer dilimi güçlü ve kararlı bir yapıya sahipse kubbe eteklerinde çatlakların görünmesi durumunda dahi bu kemerlerden elde edilen kubbe de kararlı bir yapı ortaya koyacaktır (Şekil 2.10).

Tarihi yapılara değer katan zaman diğer yandan da tarihi yapının düşmanıdır. Malzemelerde zaman içerisinde yaşlanmalar, bozulmalar ve tahribat, kullanım amacının zamanla değişikliğe uğraması, orijinal tasarımda yetersizlikler tarihi yapıların müşterek sorunları arasında yer alır. Bunların yanı sıra yapısal müdahaleler veya zorlanmalar, büyük afetler sonrasında meydana gelen hasarlarda görülmektedir.

Yığma yapıların ana taşıyıcı elemanı duvarlar olmasından dolayı bu elemanlarda oluşacak hasarlar doğrudan taşıyıcı sisteme tesir eder. Taşıyıcı sistemi yığma duvarlardan oluşan yapılarda çeşitli olumsuz özellikler mevcuttur. Deformasyon kabiliyetinin az olması, gevrek kırılmaya yatkın olması ve zayıf sünekliliği olması bu kapsamda yer almaktadır [18].

Yığma yapılarda duvarlar, elastik deformasyon yapamadıkları için temel oturmalarını tolere edemezler. Bu uyumun sağlanamaması durumunda gerilmeler oluşur. Duvarlarda çatlak oluşumu, deprem gibi yatay yüklerin sonucunda da meydana gelir. Belli bir noktadan sonra yük taşıma aşırıya kaçarsa göçmeler oluşur.

Yapılarda deprem hasarları farklı nedenlerden dolayı olabilmektedir. Yığma yapılarda hasarlar ekseri olarak aşağıdaki nedenlerden dolayıdır [29] [30].

- Yapıda çekme mukavemeti düşük harç kullanılması,
- Yapının basit ve simetrik şekilde olmaması,
- Yapının ağırlığının fazla olması nedeniyle yatay yükün de buna bağlı olarak fazla olması,
- Yapının rijitlik merkezi ile kütle merkezinin çakışmaması, bu farktan dolayı burulma etkisinin oluşması,
- Duvar birleşimlerinde detayların iyi yapılmaması, duvar köşelerinin iyi oluşturulmaması,

- Temel oturumalarının olması,
- Yapı elemanının mukavemetinin yeterli olmaması,
- Duvarları oluştururken kullanılan harcın, yapı elemanları arasındaki boşluklara tamamen doldurulmaması,
- Malzeme ve işçilik alanlarında kötü olunması, kontrolün olmaması, yapım kalitesinin yetersiz olmasıdır.

Taşıyıcı duvarlarda oluşan çatlaklar, yığma yapılarda deprem hasarlarının belirtileridir. Yığma yapılar çeşitli nedenlerden dolayı hasara uğrar ve elemanlarda çatlak(lar) meydana gelir.

Oluşan çatlakların oluşum şekli, yeri, biçimi, derinliği, biçimi ve miktarına göre yapıya uygun gerekli müdahale yöntemleri tayin edilir. Çatlağın boyutu, yeri, biçimi çatlağın yapı için önemli ya da önemsiz olduğunu belirtir. Tablo 2.1’de [31] yığma duvarlar için çatlak genişliğine bağlı hasar durumları irdelenmiştir.

Çatlağın genişliği, çatlağın meydana gelmesinin akabinde depremde meydana gelen kayma gerilmelerinin etkiye süresine ve ara yüzeydeki sürtünme kuvvetlerine bağlıdır [29] [30].

Tablo 2.1: Yığma yapılarda çatlak düzeyleri.

Çatlak genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
0.1’den az	Önemsiz	Yapıya ve kullanıma etkisi yoktur
0.1-0.3 mm	Önemsiz, az	Taşıyıcı sisteme ve yapının kullanımına bir etkisi yoktur
0.3-1.0 mm	Az	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir.Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır.
Buraya kadar olan çatlaklar kılcal çatlaklardır. Çoğu zaman gözden kaçabilir. 1 mm yakın çatlarda duvar kağıtlarında buruşukluklar gözlemlenebilir.		
Çatlak genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
1.0-2.0 mm	Orta	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır.Bu düzeydeki çatlaklar ve briketleri, pencere kapı lentolarını çatlatabilir.Birkaç metre uzaktan fark edilebilirler. Bu düzeyden daha ileri düzeydeki çatlaklar yapıda oturanları önlem alınması için harekete geçebilir.
2-5 mm	Orta	Taşıyıcı sistemi etkilemeye başlar.Dış duvarlardan içeriye hava akımları duyumsanmaya başlar, pencere ve kapılar sıkışır ve kapanmamaya başlar. Yapının kullanımı eklenmeye başlar.
5.0-15.0 mm	Orta-Ağır	Kapı ve pencereler sıkışabilir.Su ve kanal bağlantıları kırılabilir.Binaya su ve soğuk hava girer. Pencere camları çatlar ve kırılabilir, sıvılar dökmeye başlar. Tuğla duvarlar parçalanır. Yığma kemerler çökebilir.Bu boyutlardaki çatlaklar kabul edilemez çatlak sınırı oluşturur.
15.0-25.0 mm	Ağır	Ciddi onarım ve güçlendirme gerektirir.Yapının stabilitesi çok büyük bir tehlike altındadır.
25.0mm’den çok	Çok ağır ve çok tehlikeli	Yapıda ağır hasar,ciddi onarım ya da yeniden yapım gerekir

2.3. Yığma Yapılarda Oluşan Hasar Türleri

2.3.1. Temel Oturmalarından Kaynaklanan Hasarlar

Yığma duvarlar gevrek malzemeden meydana gelmesi ve malzemenin çatlamadan dayanabileceği elastik gerilmenin çok düşük olmasından dolayı temel oturmalarına karşı hassastırlar. Temel oturmaları duvardaki çatlaklara sebep olur. Duvarda ortaya çıkan çatlaklarda taşıyıcı sisteme etki eder [32].

Farklı oturma şekillerine bağlı olarak farklı çatlaklar meydana gelir. Çatlakların yerlerini ve şekillerini temel oturmasının olduğu bölge tayin eder.

Temel oturmaları, yeraltı sularının etkisiyle zemin parametrelerinin azalması ve temel zemininin taşıma gücünün azalması sonucunda oluşur.

Killi zeminin kohezyonunun azalması sonucunda oturma hasarlarına neden olmaktadır. Özellikle yüksek plastisiteli geçirimsiz olan killerde uzun süre sonra oturma oluşabilmektedir. Oturmaya neden olan yer altı suyunun kurumasından sonra kuruyan kilin büzülmesiyle oturmalar bir müddet daha devam eder. Zeminin su içeriğinin azaldığı kurak dönemlerin sonuna doğru suyun azalması ile artan rötre sonucunda oturma çatlaklarının boyutu artar. Pek çok yapıda çatlakların mevsimsel olarak açılıp kapandığı gözlemlenebilir. Gevşek zemine inşa edilen yığma yapılarda ise deprem etkisi altında oturmalar hızlı bir şekilde meydana gelir. Bunun neticesinde duvarlarda göçmeler oluşabilmektedir.

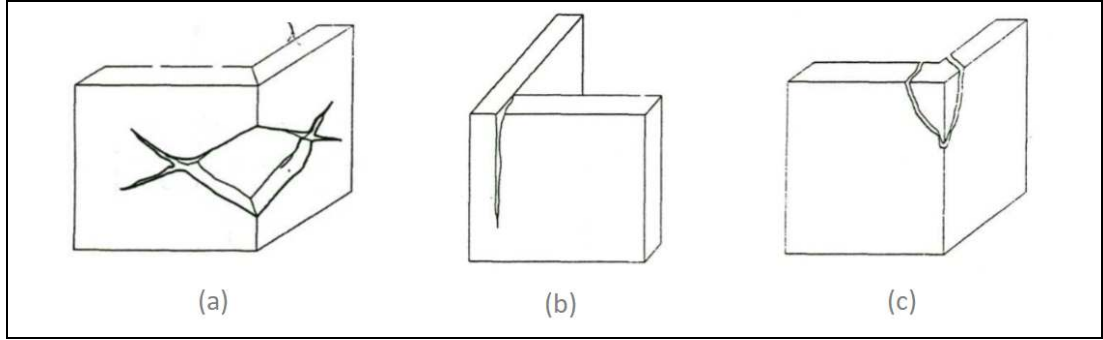
2.3.2. Depreme Bağlı Hasarlar

Yığma yapılarda, deprem etkisinde kuvvetin aktarılmasında kenar duvarlar çatıdan ve temelden oluşan etkiler altında kesme kuvvetlerinden dolayı zorlanmaktadır. Bunun sonucunda boşlukların bulunduğu duvarlar arasında 45^0 açı ile eğik çatlaklar meydana gelir. Deprem yükünün tersinir yük olmasından dolayı ilk oluşan çatlaklara dik yönde çatlaklarda görülür. Bu hareket sonucunda X şeklinde eğik çatlaklar oluşur. Duvarda mevcut olan boşluğun miktarına, şekline ve yerleşimine göre çatlakların yeri ve açısında değişiklikler görülür.

Şekil 2.11’de yığma yapıların köşe hasar biçimleri görülmektedir. Köşe hasarları yığma yapılarda üç nedenden ötürü meydana gelir.

- (a) Kesişen duvarlara depremde gelen büyük kuvvetler,
- (b) Duvarların köşe(ler)de yetersiz örgü düzeni ile bağlanması,
- (c) Yüksek, uzun duvarların yetersiz rijitliği olan çatı ile bağlanmasıdır.

Şekil 2.11’de görülen yığma yapı hasar örnekleri çatlakların oluşmaya başladığı ilk aşamayı temsil etmektedir. Sonraki aşamalarda çatlaklar genişler ve bütün duvara yayıldığı görülür. Çatlaklarda oluşan genişlemeler ve ilerlemelerle yığma duvar düşey yükleri taşıyamaz bir hale gelir ve ezilen duvar yıkılır.



Şekil 2.11: Yığma yapı köşe hasar biçimleri.

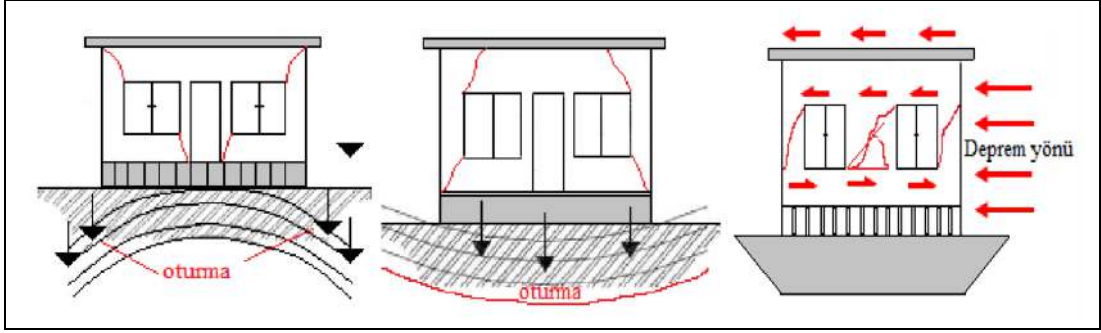
2.4. Taşıyıcı Yığma Duvar Davranışı ve Hasarları

Deprem yüklerini ve düşey yükleri yığma yapılarda duvarlar karşılar. Çatı ve döşemelerden aktarılan yatay ve düşey yükleri taşır. Yığma yapılarda kullanılan duvar malzemesinin çoğunlukla çekme dayanımı düşüktür.

Taşıyıcı sistem boyutlandırmasında yapılan hatalar ciddi sorunlara neden olabilir. Bu da ilk tasarım aşaması sorunlarından. Duvar kesitlerinin yetersiz olması halinde elemanlarda büyük sorunlar teşkil eder. Örneğin; zaman içerisinde duvar bel verebilir. Payandalarda bu sorun oluşursa desteklediği kemer, tonoz ve kubbe gibi taşıyıcı elemanlarda açılmalar ve yıkılmalar olabilir.

Yığma yapılarda oluşan sorunları işaret eden gösterge duvarlarda oluşan çatlaklardır. Çatlakların boyutları, hareketlerinin aktiflik durumu bize yapıda hareketin sürüp sürmediğine dair ipuçları verir.

Taşıyıcı duvarlar için yatay ve düşey yüklerden kaynaklı çatlak tipleri Şekil 2.12’de [33] verilmiştir.



Şekil 2.12: Taşıyıcı duvarların, düşey ve yatay yükler nedeniyle oluşan çatlak tipleri.

Yığma yapılarda duvarların taşıyıcı olmayan bir bölümü yoktur. Betonarme yapılardaki taşıyıcı ve(ya) taşıyıcı olmayan bölüm hasarları gibi bir ayırım yığma yapılarda yapılamaz.

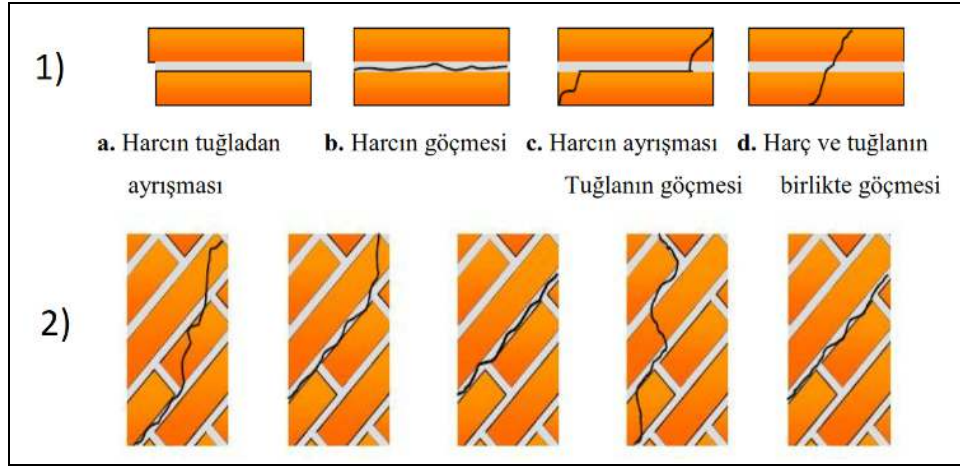
Deprem sırasında yığma yapılarda çeşitli hasarlar oluşabilir. Başlıca hasarlar, duvarlarda düzlem içi kesme çatlakları meydana gelmesi, düzlem dışı hareketi sonucunda devrilmesi, döşemelerin duvarlardan ayrılması veya duvarların köşelerden ayrılmasıdır.

Duvarda düzlem içi hareket yani düzlemi doğrultusundaki yer değiştirmeler yapı stabilitesini tehlikeye atmaz. Duvar düzlemi yönünde etkiyen kuvvetler, çatlakları büyütür. Kapı ve pencere boşluğu olmayan duvarlarda diyagonal çatlaklar meydana gelir. Yapı titreşimini oluşturan kuvvetler, çatlakları meydana getirdikçe yapıdaki dinamik karakteristikler de değişime uğrar. Yer değiştirmeler de artış olur, doğal frekans da ise azalma olur. Bu yanal hareketin sürmesi durumunda düşey yükün ve sürtünmenin etkisiyle çatlaklar birbirini keser. Bu kesişmeler, duvar yüzeylerinde bağımsız duvar blokları meydana getirir. Titreşim periyodunda artış gösteren yapının rijitliği azalır. İnce duvarlarda, diyagonal çatlakların meydana getirdiği bloklar kayarak duvar dışına düşebilir [34].

Yığma duvarlar genel olarak kayma etkileri ve düzlem dışı etkilerle güç tükenmesi oluşur. Büyük en kesitleri olan duvarların normal gerilmelerin neden olduğu hasar tiplerine pek fazla rastlanmaz. Yığma duvarlar genellikle, normal gerilmeleri kapasitelerinin çok küçük bir kısmıyla taşırlar.

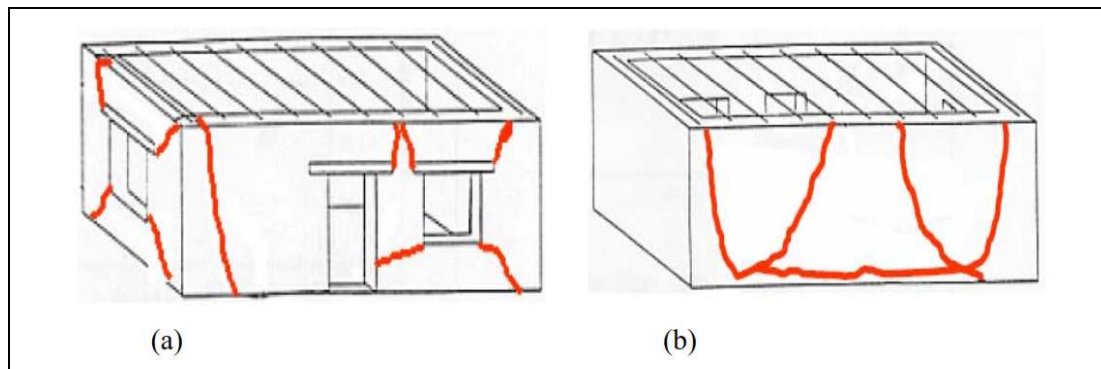
En önemli hasar nedenleri arasında, deprem etkisinden dolayı meydana gelen kayma gerilmeleri dolayısıyla çekme gerilmelerinin oluşturduğu çatlak, ayrılma ve dağılmalar yer alır. Tuğla ve harçtan oluşturulan bir yığma duvarda çekme ve kayma gerilmeleri nedeniyle ortaya çıkabilecek göçme biçimleri Şekil 2.13'de [35]

gösterilmiştir. Şekil 1-a bölümü tuğla ve harç ayrışmasını, 1-b bölümü harç göçmesini, 1-c bölümü tuğlanın göçmesiyle birlikte harçla ayrışmasını, 1-d ise harç ve tuğlanın çapraz olarak göçmesini temsil etmektedir. Şeklin bölüm 2 ise duvar yüzeyindeki göçme biçimlerinin birlikte meydana geldiği çeşitli durumları ifade etmektedir.



Şekil 2.13: Harç ve tuğladan oluşan duvarda göçme biçimleri.

Tarih boyunca, yapı duvarlarında kapı veya pencere boşlukları oluşturulmuştur. Açılan boşluk üzerindeki duvarın desteklenme şekli ve açılan boşluğun büyüklüğü ile endekslidir. Duvarın desteklenmesi için ahşap lento, taş blok veya kemer kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemlerin hepsinin davranış şekli farklıdır. Tüm yapının davranışına da tesir etmektedir.



Şekil 2.14: Duvarlarda oluşan çatlaklar.

Duvarlarda meydana gelen çatlaklar, gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde görülür. Pencere veya kapı kenarlarında meydana gelen çatlaklar, duvar

düzlemi doğrultusunda oluşan kayma gerilmeleri veya duvar düzlemine dik eğilmelerden dolayı ortaya çıkar. Şekil 2.14.a’da duvarların birleşim yerlerinden düşey veya diyagonal çatlaklar şeklinde ayrılması, duvarların düzlemi doğrultusunda ve düzlemine dik doğrultuda oluşan kuvvetlerin birleşik etkisi gösterilmiştir. Şekil 2.14.b’de uzun duvarlarda kapı ve pencere boşluğunun olmaması durumunda, duvar düzlemine dik kuvvetlerin duvar birleşimlerinde düşey veya diyagonal çatlaklarla birlikte alt bölgede yatay çatlakları oluşturduğu gösterilmiştir [36].

Lento kullanıldığı durumda, pencere ve kapı boşluklarının üzerindeki duvarların kemer etkisinden dolayı lentonun kenarından 45^0 açı içinde duvar alanında kalan kısmının yükü taşıdığı kabul edilir. Duvara oturan lento kısımlarının uzunlukları bu yükü taşıyabilecek biçimde düzenlenir. Tarihi yapılarda, lentoya etki eden duvar ağırlığını azaltmak amacıyla hafifletme kemeri denilen kemerler kullanılmıştır.

2.5. Yığma Yapılarda Duvarların Düzlem Dışı Davranışı ve Duvarların Güçlendirilmesi

Yığma duvarlar, deprem yükleriyle karşılaştığında düzlem içi ve(ya) düzlem dışı zorlanmalar meydana gelir. Deprem etkisinde kalan yığma yapılarda, düzlem dışı yüklenen duvar davranışı ile düzlem içi yüklenen duvarın davranışı farklıdır.

Zorlanmaların düzlem içi olan kısmı en fazla zemin kat duvarlarında olurken, düzlem dışı zorlanmalar ise çatı katı seviyesindeki duvarlarda olur.

Etkin yer ivmesi zemin düzeyinden etkili kütle merkezine taşınırken büyüme gösterir. Çatı katı düzeyindeki duvara etkiyen ivme, duvarın ve duvarın mesnetlendiği döşemenin doğal periyotlarının oranına göre, bir büyüme daha gösterir. Bunun sonucu olarak, düzlem dışı yüklenen çatı katı duvarın ivmesi, düzlem içi yüklenen duvarın ivmesinden çok daha büyük olur. Böylece, yığma binanın çökmesi, genellikle, çatı katı düzeyindeki duvarın düzlem dışı kırılmasıyla başlar [37].

Yığma yapıların duvarlarının üst kısmında döşeme, lento bağlantısı yeterli rijitlikte yapılırsa hasar görme olasılığı azalır. Buda günümüzde kullandığımız rijit döşeme davranışı tanımını desteklemektedir.

Güçlendirme veya iyileştirme işlemleri öncesinde deprem etkisindeki yığma yapının deprem davranışı, göçme mekanizması iyi bir şekilde irdelenmelidir. Yığma yapılar, günümüzde kullanılan betonarme yapılardan farklılık göstermektedir.

Bu farkın en belirginleri arasında betonarme yapılarda düzlem dışı kırılmalar olduğu görülür. Bu durum Şekil 2.15’de [38] görülmektedir. Betonarme yapılarda, dolgu duvarların taşıyıcılığı olmamasından dolayı düzlem dışı davranış veya herhangi bir sebepten dolayı dolgu duvarların yıkılmasında yapıda çökmeye neden olmaz. Yığma yapılarda ise durum bu şekilde değildir. Şekil 2.16’da [39] görüldüğü üzere yığma yapı duvarları düzlem dışı hareket sonucunda hasar oluşursa bu yapının taşıyıcı sistemini etkiler.



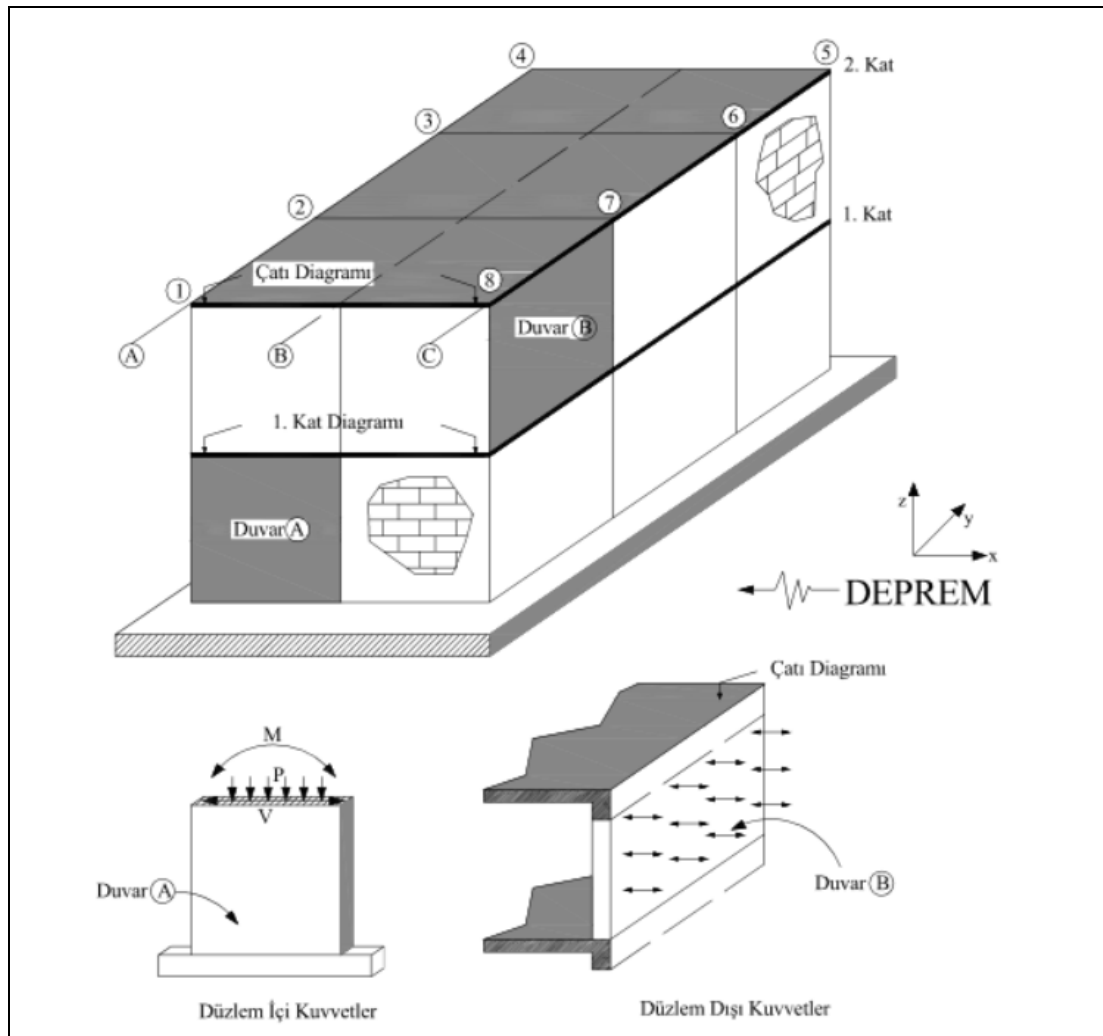
Şekil 2.15: Betonarme çerçeveli yapının dolgu duvarlarının düzlem dışı hareketi sonucu göçmesi.



Şekil 2.16: Betonarme çerçeveli yapının dolgu duvarlarının düzlem dışı hareketi sonucu göçmesi.

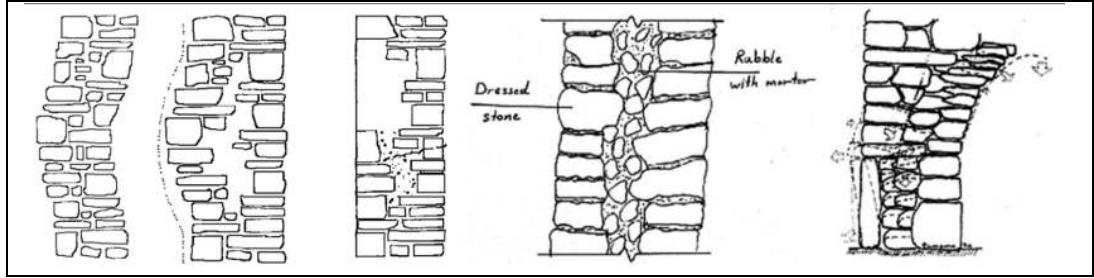
Deprem etkisi altında yığma bir yapı Şekil 2.17’de [40] görülmektedir. Deprem x doğrultusundan gelmesi sonucunda x yönünde ivme oluşur. Bu ivmelerden dolayı gene x yönünde kuvvetler meydana gelir. Bu durumda A duvarında, tersinir düzlem içi kesme kuvvetleri (V) ve momentler (M) oluşur. Bunun yanı sıra hareketli yükler, ölü yükler ve devrilme momentlerinden dolayı eksenel yüke (P) maruz kalır.

B duvarına x doğrultusundan etkiyen deprem, duvar düzlemine dik yönde kuvvetler meydana getirir. Bu şekilde etkiyen deprem kuvvetleri B duvarının düzlem dışı hareketi sonucunda sehim yapmaya zorlar. Deprem kuvvetleri belirli bir seviyeye ulaştığında duvar hasar alarak kırılır veya göçer. Duvar yük taşıma yeteneğini kaybeder. Çatı seviyesindeki bazı duvarların düzlem dışı kırılmasıyla çatı katı döşemesi yükü taşıyamaz ve yapı çöker. Duvarın üzerine farklı formda bir örtü elemanı oturması durumunda da hasarlar oluşur [40].



Şekil 2.17: Deprem etkisi altında yığma yapı duvarlarının düzlem içi ve düzlem dışı yükler altında davranışı.

Duvar kesitlerinin geniş olmasından dolayı en kesitte oluşabilecek ayrılmalar da hasara neden olmaktadır. Genellikle düzlem dışı etkiler yığma duvarlar için karşı konulması zor etkilerdir. Bu etkiler altındaki duvarlar, diğer yöndeki duvarlara iyi mesnetlenmediği durumda yatay harekete direnemez. Şekil 2.18’de [23] [28] yığma duvarlarda düzlem dışı etkiler altında meydana gelen hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 2.18: Yığma duvarlarda düzlem dışı etkiler.

Tarihi yapı onarım veya güçlendirmelerinde üzerinde muhafaza ettiği tarihsel dönemlere ait verilerin yok olmadan, kaybedilmeden güçlendirilmesi önemlidir. Bundan dolayı tarihi yapıların güçlendirmelerinde genellikle yapının özgün malzemesine uyumlu malzemeler kullanılmaktadır. Fakat bu özgün malzemenin elde edilememesi durumunda ya da çeşitli yapısal sorunların olduğu durumlarda, tarihi yapıların güçlendirilmesinde modern malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus tercih edilen uygulama fark etmeksizin yapının özgün malzeme özelliklerine olumsuz etkilemeden veya zarar vermeden uygulanmasıdır.

Tarihi yığma duvarlarının güçlendirilmesi, duvar çatlaklarının onarımı veya duvarın güçlendirilmesi ile mümkündür.

Küçük çatlakların onarımları (derine inmeyen küçük ve 2mm kadar olan çatlaklar) için üzerindeki bulunan sıva kaldırılarak dökülür. Çimento şerbeti, epoksi reçineleri, özel katkı maddeli harçlar vs ile çatlaklar doldurulur.

Onarılabilecek seviyede olmayan çatlakların bulunduğu yığma duvarlarda güçlendirmeye gidilir. Taşıyıcı yığma duvarların güçlendirilmesinde,

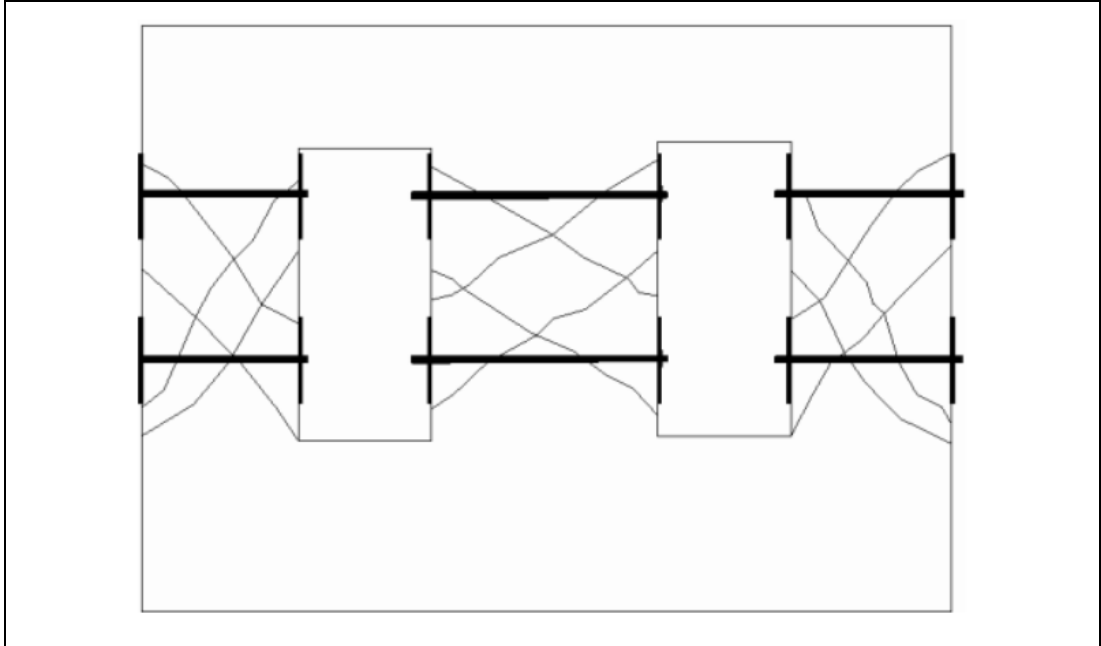
- Püskürtme beton ile güçlendirme,
- Çelik elemanlar ile güçlendirme,
- Kendiliğinden yerleşen beton ile güçlendirme,

- FRP (Fiber takviyeli plastik) kompozitler ile güçlendirme,
- Beton paneller ile güçlendirme yöntemleri kullanılır.

Yığma yapılarda uygulanan bu yöntemler tarihi yığma yapılar da her zaman uygulanamaya bilindir. Burada dikkat edilmesi gereken husus güçlendirildikten sonra elde edilen yapının hala eski eser sınıfına dahil olmasıdır. Tarihi eser ile uyumlu güçlendirme yöntemleri tercih edilir.

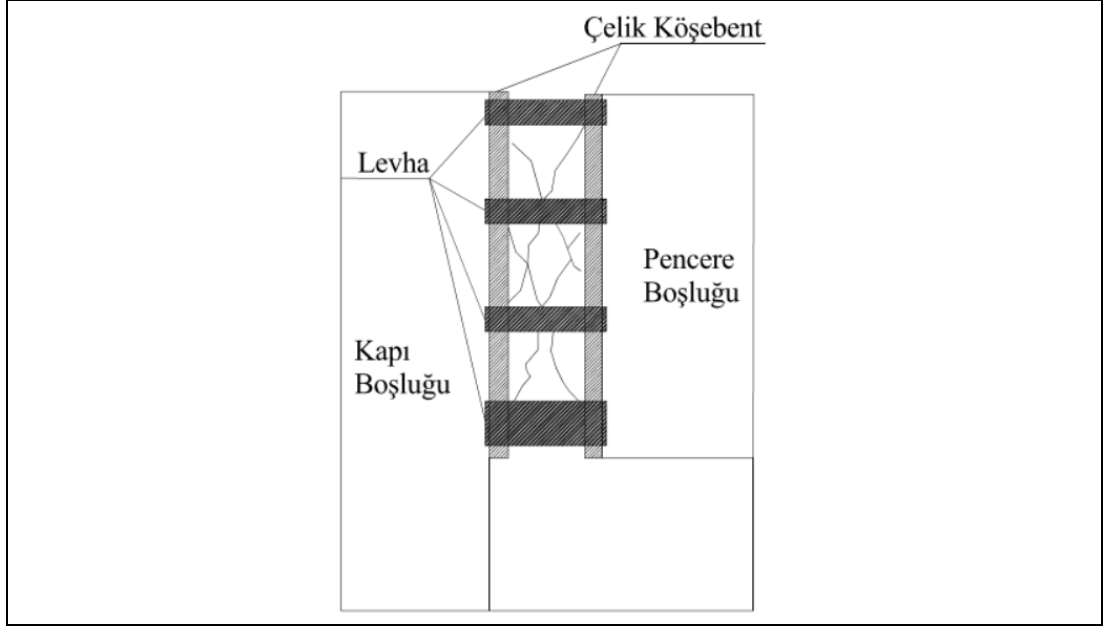
Çelik elemanlar ile güçlendirmede, duvarlar kuşaklanarak veya duvarın her yüzünde çatıya veya döşeme diyaframlarına monte edilerek kullanılan çelik levhalarla güçlendirilir [41].

Yığma yapılarda düzlem içi veya düzlem dışı davranışı engellemek için çeşitli çelik elemanlar kullanılır. Çatlakların büyümesini önleyebilmek için çatlakları kesen donatılar eklenir. Şekil 2.19’da [42] pencere boşlukları arasında meydana gelen eğik çekme çatlaklarını kesmek için konulan donatılar görülmektedir.



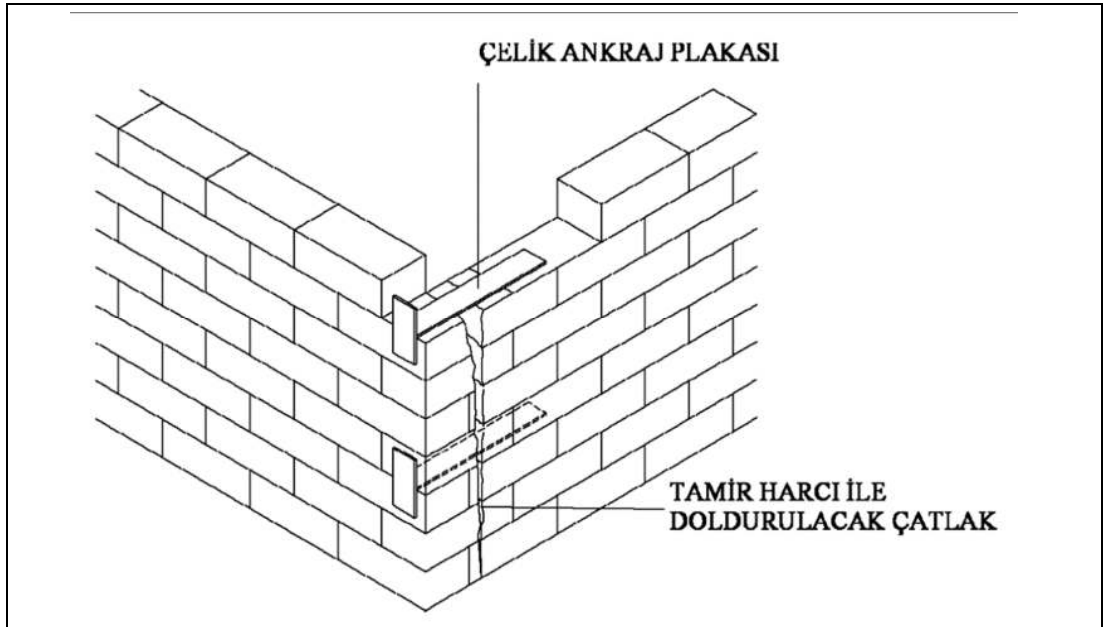
Şekil 2.19: Gergi elemanlar ile pencere boşlukları arasındaki duvarların güçlendirilmesi.

Şekil 2.20’de [41] ki gibi boşluğu bulunan duvar çelik köşebentlerle veya uygun elemanlarla çerçeve oluşturularak çatlakların büyümesi engellenir.



Şekil 2.20: Hasarlı boşluklu duvar bölümünün çelik elemanlar ile güçlendirilmesi.

Yapının dayanımı açısından, yığma duvarların köşelerde birbiriyle bütünleşmesi ve kenetlenmesi önemlidir. Köşe birleşim bölgelerinden ayrılmış olan duvarlar çelik ankraj plakaları kullanılarak birleştirilir. Bu kenetlenme uygulamalarının amacı duvarların birbirine mesnetlenmesidir. Duvarların köşe birleşimlerinden ayrılmaları sonucunda ankraj plakaları ile onarılması Şekil 2.21’de [43] gösterilmiştir.



Şekil 2.21: Yığma duvarların köşe birleşimlerinde ayrılmalarının ankraj plakaları ile onarılması.

Yığma yapılarda düzlem dışı davranışını engellemek için çelik kolon, kiriş veya payandalar ile de güçlendirilebilir.

Yığma yapıların çelik ile güçlendirildiğinde iki farklı malzemenin birlikte sağlıklı olarak çözümlenerek çalışması gereklidir. İki farklı malzemenin malzeme özellikleri ve mekanik davranışları birbirinden çok farklıdır. Yığma yapılar, modern malzemeler olan betonarme ve çeliğe kıyaslandığı zaman daha büyük kesitlere ve daha az kat sayısına sahiptir. Bunun yanı sıra yatay yükler tesirinde kısa periyotlar görülür. Yüksek elastisite modülüne sahip olan çelik yapılarda ince kesitler kullanılır. Bu imkan nedeniyle çelik yapılarda periyotlar yüksek değerlere ulaşabilir. Birbirinden tamamen farklı (davranış karakteristikleri) olan iki yapıyı bir araya getiren projelerde yapıların analizlerinin çok düzgün ve iyi yapılması gerekir. Birleşimlerin detaylarının titizlikle detaylandırılması ve çözümlenmesi önemlidir.

3. YIĞMA YAPI ELEMANLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Yapı elemanlarının ve malzemelerinin temel gereksinimi yeterli rijitliğe ve dayanıma sahip olmalarıdır. Malzemelerin bu özellikleri karşı koyabileceği en yüksek gerilme değeri ve uygulanan deformasyon sonucu meydana gelen gerilme değeriyle ölçülür. Birçok malzeme için dayanım ve rijitlik yüklemenin şekline göre değişir. Gerilmeler çekme ve basınç gerilmeleri olarak eleman içinde birçok yönde değişir. Deformasyonlar sabit oranda artmaz. Bundan dolayı, yığma yapı elemanında rijitlik ve gerilme, deformasyonun oranına göre değişir. Malzeme özelliklerindeki bu değişim gerilme-birim deformasyon eğrileri ile gösterilir. Malzemenin genel karakteristik özellikleri ve davranışı bu eğriler incelenerek araştırılır [44].

3.1. Basınç Dayanımı

Yığma yapı elemanları bileşik malzeme olarak göz önüne alınır. Yığma duvarlar blok ve blokları birbirine bağlamak için harç kullanımı, yığma duvarların basınca karşı davranışını beraber etkilemektedir. Yığma yapıların basınç dayanımını etkileyen faktörler, geometrik özellikleri, biçimi, dayanımı, tipi, birim elemanın su emme kapasitesi, harç kalınlığı ve deformasyon özelliği, nem miktarı, harcın karışım oranıdır.

Basınç dayanımının belirlenmesi için literatürde ve yönetmeliklerde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur.

Yığma yapı elemanının dayanım özelliklerini belirlenebilmesi için eğer özgün malzemeden elde edilen test sonuçları yoksa deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen veriler kullanılabilir. Bu verilerin malzemelerinin benzer özelliğe sahip olmasına dikkat edilerek deneylere bağlı denklemler irdelenebilir.

Dünyanın çeşitli noktalarında, yığma yapı elemanlarını araştırmak amacıyla çeşitli özellikler ve tipler üzerine yapılmış olan deneysel çalışmaların neticesinde sayısız veri ve sonuç elde edilmiştir. Yığma yapının özgün malzemesi üzerinde test yapılmaması durumunda yapı elemanının dayanım özelliklerini elde edebilmek için malzemenin benzer özelliğe sahip olması hususuna dikkat edilerek deneylere dayalı denklemler kullanılabilir. Bu denklemlerde birim eleman ile harcın basınç dayanımlarının ortalamasına bağlı olarak hesaplanabilir.

Taş veya tuğladan yapılmış harçlı donatısız kagir elemanlar için taşın ve harcın dayanımı bilinmesi durumunda Denklem 3.1 önerilmektedir. Elastisite modülü için ise Denklem 3.2 önerilmektedir [45].

$$f_k = 0.5 f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (3.1)$$

$$E = 1000 f_k \quad (3.2)$$

Burada f_b taş veya tuğla malzemenin basınç dayanımı, f_m ise kullanılan bağlayıcı malzemenin basınç dayanımını ifade etmektedir.

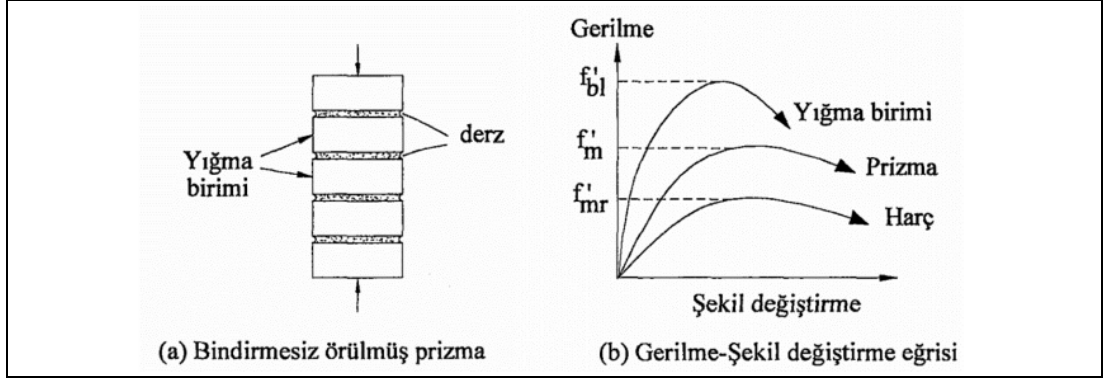
Eurocode 6 (EC6)'da yığma yapı elemanlarının karakteristik basınç dayanımı Denklem 4 ile hesaplanmaktadır.

$$f_k = K f_b^\alpha f_m^\beta \quad (3.3)$$

- f_k Yığma yapı elemanın karakteristik basınç dayanımı (MPa)
- f_b Normalize edilmiş basınç dayanımı (MPa)
- f_m Harcın ortalama basınç dayanımı (MPa)

α , β ve K sabit değerlerdir. α ve β sabit değerleri için düzgün şekilli yığma yapılarda 0,7 ve 0,3, kaba örülmüş yığma yapılarda 0,65 ve 0,25 değerleri önerilmektedir. K sabiti ise yığma sistemin morfolojik yapısına bağlı olarak 0,4 ile 0,6 arasında değerler almaktadır [45].

Şekil 3.1'de [46] yığma birimi, harç ve prizmanın eksenel basınç altındaki davranışı ifade gösterilmiştir. Hesap yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu başlıca parametreler, başlangıç elastisite modülü E_m ve basınç mukavemeti f_m olduğundan dolayı, basınç deneylerinin çoğunluğu bu değerleri ölçmek için tasarlanmıştır [46].



Şekil 3.1: Yığma prizmanın gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

- f'_{bl} Blok mukavemeti
- f'_m Yığma prizma mukavemeti
- f'_{mr} Harç mukavemeti

3.2. Kayma Dayanımı

Yığma duvarların aynı ekseninde birbirine ters yönde yüklemelere maruz kalması durumunda kayma etkisinde çeşitli deformasyonlar oluşur.

Yığma yapı elemanları çekme ve basınç kırılmalarının yanı sıra kayma kırılmalarının da tehlikesi altındadır. Bundan dolayı, taş ve tuğladan meydana gelen yığma yapı elemanlarının kayma dayanımı birçok deney ile araştırılmış ve Denklem 3.4 [47] elde edilmiştir.

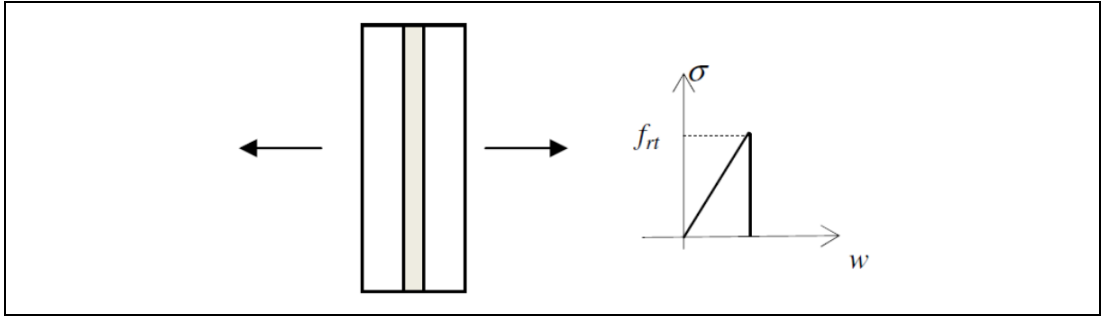
$$\tau = \tau_0 + \mu f_n \quad (3.4)$$

- τ_0 Çatlama emniyet gerilmesi
- f_n Duvara etki eden düşey basınç dayanımı (MPa)
- μ Sürtünme katsayısı

3.3. Çekme Dayanımı

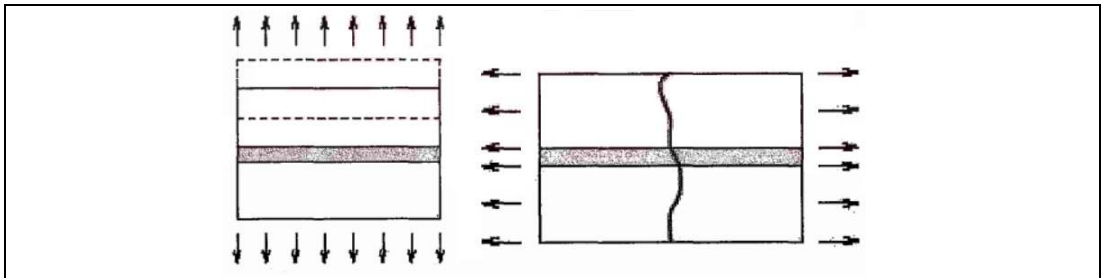
Yığma duvarların çekme davranışı, basınç davranışına kıyasla ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Çekme etkisindeki duvarlarda kırılma genellikle harç ve yığma blokların birleşim yüzeylerinde ayrılma şeklinde oluşur.

Yığma yapı elemanı gevrek bir malzemedir. Bunun neticesinde genellikle ani çekme kırılmalarına karşı büyük risk taşır. Şekil 3.2’de [48] yığma duvarların çekme kuvveti altında davranışı gösterilmiştir. Yığma duvarlara çekme kuvveti uygulanmasıyla yığma birimler ve harç arasında çatlak meydana gelmeye başlar. Yapışma direncinin artışı çatlak genişliğinin artışıyla doğru orantılıdır. Çatlak genişliğinin maksimum seviyeye ulaşması durumunda yığma birimler birbirinden ayrılır. Harç ve yığma birimler arasında yapışma dayanımı sıfırlanmış olur.



Şekil 3.2: Çekme etkisine maruz kalan yığma duvarda yapışma dayanımı-çatlak genişliği bağıntısı.

- f_n Yığma birimler ve harç arasındaki yapışma dayanımı
- w Çatlak genişliği



Şekil 3.3: Yığma elemanlarda çekme kırılmasının oluşumu.

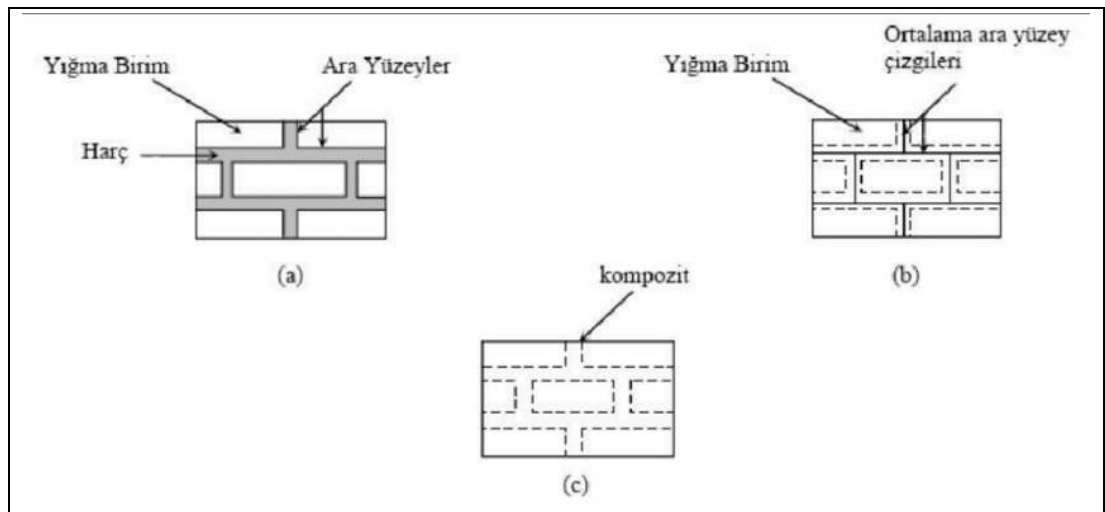
Şekil 3.3’de [49] çek kırılmasının derze dik ve paralel olarak kırılma ihtimalleri gösterilmiştir.

Derze dik kuvvet uygulanması durumunda tuğla ile harç arasındaki aderans önemlidir, derze paralel kuvvet uygulanması durumunda ise tuğlanın çekme dayanımı daha önemlidir. Yığma duvarlar için çekme dayanımı, basınç dayanımının 1/10’u alınabilir [50].

4. YIĞMA YAPILARIN MODELLENMESİ

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yığma bir yapının modellenmesi ile betonarme bir yapının modellenmesi çok farklıdır. Yapılan kabullerle, betonarme yapının (heterojen malzeme) yapısal elemanlarını aynı çeşit sonlu elemanlı elde etmek mümkündür. Yığma elemanlarda kullanılan malzemelerin ve örgü biçimlerinin çok fazla çeşitliliği olmasından dolayı bunların tek tip sonlu elemanla oluşturulması gerçekten uzak bir sonlu eleman modelinin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Gerçeğe daha yakın bir yığma yapı modelinin oluşturulması için kabullere daha uygun bir modelleme tekniği geliştirilmiştir. Modelleme tekniğinin dışında yığma yapı elemanlarını meydana getiren taş, tuğla vs. (yığma yapı birimleri) ve farklı karakterlere sahip olan harç (ara yüz) ayrı ayrı modellenmesiyle de meydana getirilebilmektedir. Bu modellemede her yapı biriminin ayrı arı elde edilmesinden dolayı çok sayıda bilinmeyen oluşur. Bu durum özellikle büyük ölçekli yapılar için çok zaman almaktadır. Yığma yapı modellenmesi için seçilen yapının büyüklüğüne bağlı olarak modelleme teknikleri değişmektedir. Modelleme teknikleri için makro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve mikro modelleme tekniği olarak üç farklı modelleme tekniğinin kullanıldığı literatür çalışmalarının incelenmesinde görülmektedir [51].

Şekil 4.1’de [51] modelleme teknikleri görülmektedir.



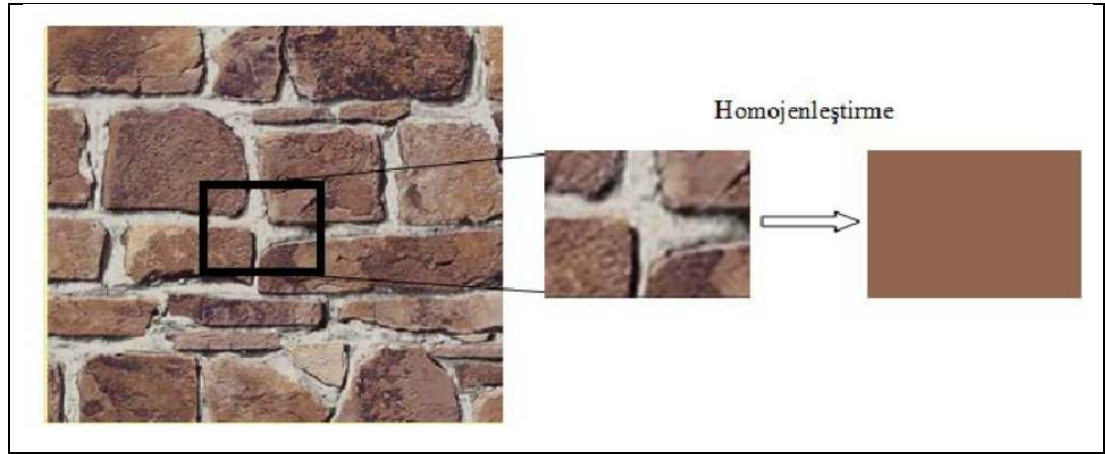
Şekil 4.1: Yığma duvarları modelleme teknikleri a) Mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme c) Makro modelleme

4.1. Makro Modelleme

Homojenleştirme işlemi uygulanan yığma yapı elemanı, makro modelleme tekniğinde kompozit malzeme olarak düşünülmektedir [52].

Malzeme özelliklerinin yanı sıra mekaniksel özellikler de homojenleştirme işlemi sonucunda elde edilen değerleri almaktadır. Tuğla ve harçtan oluşan duvar veya herhangi bir yapı elemanı için tek bir malzeme özelliği homojenleştirme işleminden sonra elde edilebilmektedir [53].

Şekil 4.2’de [54] tuğla duvar örgüsünden alınan basit bir hücre, harç ve tuğlanın katılım oranları göz önünde bulundurularak tek bir malzeme olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2: Homojenleştirme işlemi.

Makro modelleme yönteminde, yığma birimlerin arasında harç olmadan homojen bir yapı olarak modellenmektedir. Tuğla ve harç beraber modellenmesinden dolayı malzeme parametreleri farklı bir teknikle birleştirilerek dikkate alınmaktadır [55].

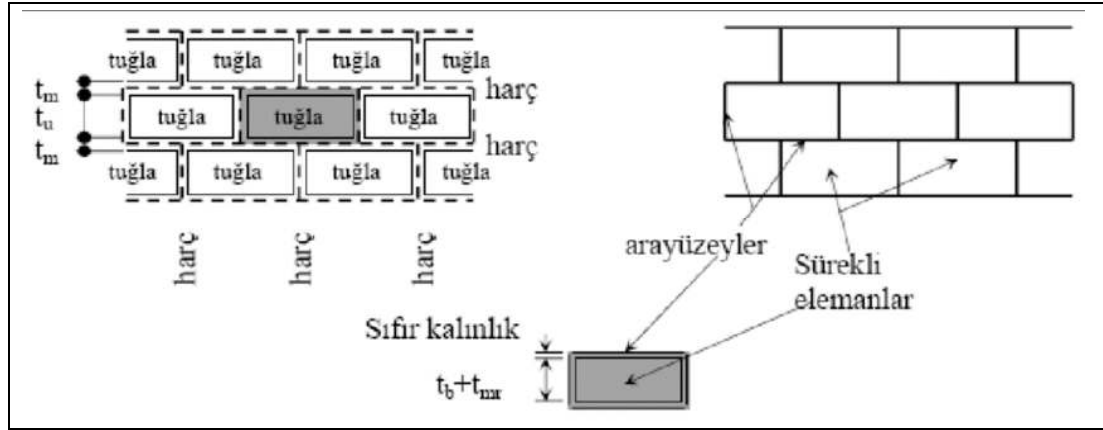
Makro modelleme, yüksek gerilim değerlerinde fazla gerilme dağılımları meydana geldiği için yetersiz kalmaktadır. Bunun yanı sıra düşük gerilme değerlerinde şekil değiştirmeleri yeterli seviyede tahmin etmektedir [56] [57].

Hassasiyet ve verim kavramlarının ortak bir payda da kesiştiği diğer yöntemlere göre daha pratik bir yöntemdir.

4.2. Basitleştirilmiş Mikro Modelleme

Basitleştirilmiş mikro modelleme yığma blok ve düğümlerden meydana gelir. Bu yöntemde, harç tabakasının kalınlığının yarısı yığma birimlerin boyutlarına ilave edilerek genişletilir. Şekil 4.3’de [58] görüldüğü üzere, yığma birimler ortalama ara yüzey çizgileriyle birbirinden ayrılır ve harç tabakası ihmal edilmektedir. Oluşması muhtemel çatlakların bu ortalama ara yüzey çizgisinde meydana geleceği kabul edilmektedir. Harcın poisson etkisi göz ardı edilmesinden dolayı doğruluk payı düşüktür [59].

Harç derzleri ve tuğla- harç ara yüzeyleri bütün olarak süreksiz elemanlarla modellenir. Tuğla- taş birimler ise sürekli elemanlarla modellenir [51].



Şekil 4.3: Basitleştirilmiş mikro modelleme tekniği.

4.3. Mikro Modelleme

Mikro modelleme, harç, harç-blok ve blok arasında mevcut olan ara yüz süreksiz düğüm noktalarının ayrı ayrı modellenerek detaylı bir şekilde analiz edilmesidir. Bu yöntem kullanılırken harç ve elemanlar arasındaki ilişki iyi araştırılması ve tanımlanmalıdır. Bu yöntemde blok ve harç için Poisson oranı, elastisite modülü ve bunların yanı sıra diğer elastik olmayan malzeme özellikleri hesaba katılır [59].

Mikro modelleme, basitleştirilmiş modelleme tekniğine göre daha karmaşıktır. Hesaplarda ve sayısal değerlerde önemli oranda değişiklik olmadan modelde geometrik karışıklığı azaltmaktadır. Her bir derz elemanı hem iki tane tuğla- harç arasındaki yüzeyi hem de bir derz elemanını içermektedir. Bu elemanlar, potansiyel çatlak, kırılma ve kayma düzlemlerini yansıtmaktadır [60].

5. ÖRNEK ÇALIŞMA: TARİHİ YIĞMA YAPI OLAN ÖŞKİ KİLİSESİ'NİN ANALİZİ

5.1. Genel Bilgiler

5.1.1. Öşki Kilisesi Tarihçesi

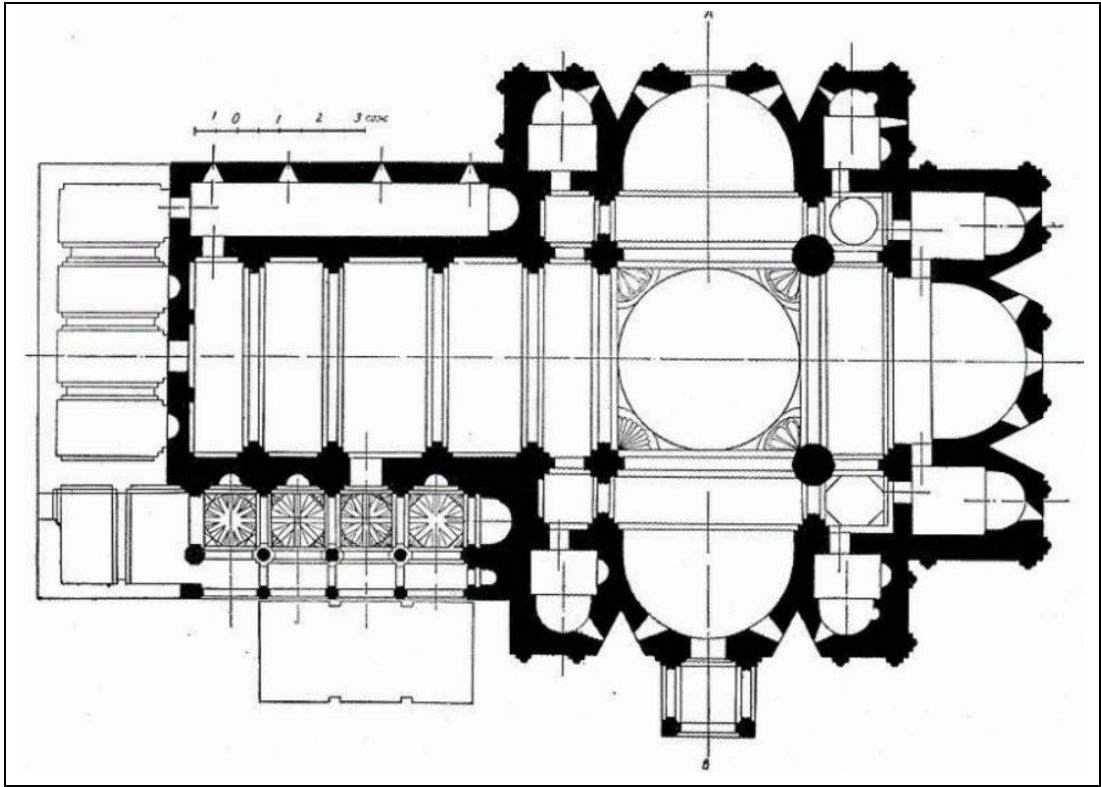
Erzurum Öşki Manastırı, Erzurum'un Uzundere İlçesi'ne bağlı (eski adı Öşvank) Çamlıyamaç Köyü'nde bulunmaktadır. Tortum ilçesinin 50 km kuzeyinde ve Erzurum-Artvin karayolunun 13 km'sinde yer alan manastır kilise, kütüphane ve yemekhaneden oluşmaktadır.

Bizans'ın doğudaki en önemli merkezlerinden biri Theodosiopolis (Erzurum) teması (idari bölge) dır. İslam kaynaklarında Theodosiopolis'den sürekli olarak Kalikala olarak söz edilmektedir. Tortum Vadisinde yaşayan halka da o dönemde İberyalılar denilmektedir. Anadolu'dan giderek Kafkas Dağlarına yerleşmiş olan İberyalılar, bir süre sonra yeniden geldikleri yere (Anadolu'ya) göç etmişler ve bugünkü Tortum-Oltu çayları arasındaki vadiyi iskan etmişlerdir. Çoruh ve Kura vadisinde MÖ. IV. yy.'da kurulan krallık Klardjethie bölgesi üzerinde yaşayan halkın ismini almıştır. Gürcülerce "Tao", Ermenilerce "Tayk" denilen bölgenin en önemli eyaletleri Tao ve Klardjethie olduğu için tüm vadiye "Tao-Klardjethie" denilmiştir. Vadi, Penek(Bana) yöresinden geçen Oltu çayı tarafından Aşağı ve Yukarı Tao diye ikiye ayrılır. Bu vadiye pek çok kilise yaptırılmıştır. Bunlardan en önemlisi Öşki Kilisesi'dir. Yapının güney girişi üzerindeki kitabeyi değerlendiren Takaichvili Kilisenin 958-966 yıllarında "Öşklü Grigor" adlı bir mimar tarafından yapıldığını tespit etmiştir. Kitabeye göre kilisenin yapımını III. Ademese başlatmış, bu şahsın 96 yılında ölümü üzerine yerine geçen oğlu Magistros Bagrat (96 -966) tamamlamıştır. Kilisenin ilk kuruluşunda kütüphane ve yemekhaneden oluşan bir manastır topluluğu şeklinde inşa edildiğini Takaichvili bildirmektedir. Ancak bugün bunlardan yalnızca kilise ayakta kalabilmiştir. Diğer bölümlerin izleri dahi mevcut değildir.

Öşki Kilisesi kapalı Yunan haçı, triconkhos ve bazilikal planın birleşmesi ile oluşan karma bir plana sahip olup, naos bölümü kapalı Yunan haçı biçimindedir. Batı kolu dışındaki üç kol, yarımşar kubbe ile genişletilerek triconkhos plan elde edilmiştir. Batı haç kolu ise dikdörtgen şeklindeki uzantısı ile bazilikal bir özelliği gösterir. Kilisenin asıl ibadet alanını oluşturan naos bölümü ve haçın kolları, tek katlı olarak

düzenlenmiştir. Apsisin yanlarındaki pastaphorion hücreleri ile kuzey ve güney eksedraların iki yanındaki mekânlar ve batı haç kolunun kuzeyinde bulunan bölümü ise iki katlıdır. Kilisenin batı cephesi dışında kalan cephelerde aynı özelliklerin çok küçük değişikliklerle tekrarlandığı bir mimari düzen sergilenmiştir. Bu cepheler sütunceyi andıran iri silmelerden oluşan beş kemer ile hareketlendirilmiştir. Ortadaki kemer, diğerlerinden daha yüksek tutularak, cepheye her iki yandan aşağı doğru küçülen kademeli bir görünüm kazandırmıştır [61].

Kapalı Yunan haçı planı özellikleri; planı dikdörtgen olan zemin üzerinde inşa edilir. Kubbe ortada dört destek üzerine oturur. Bu bölüme dik eksenlerde tonoz veya kubbenin örttüğü haç kolları bulunur. Çapraz doğrultularında bulunan köşe odaları kubbe veya tonoz ile örtülüdür. Yüksek kasnaklar üzerine oturtulan kubbelerde pencereler kullanılmıştır. Bu tipik plan Orta Bizans döneminde daha çok kullanılmıştır. Bu planın kullanıldığı yapıların karakteristik özelliği küçük olmalarıdır fakat Öşki Kilisesi bu genellemenin dışında yer almaktadır. Sütunlar ve payeler destek olarak kullanılır. Bu özellikleri ile Öşki Kilisesi Kapalı Yunan haçı plan tanımına uyduğu görülür (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Öşki Kilisesi'nin mimari planı.

5.1.2. Mimari ve Geometrik Özellikleri

Bu çalışma, Erzurum ili Uzundere İlçesi Çamlıyamaç Köyü 107 ada 12 parselde bulunan Öski Kilisesi rölövesi dikkate alınarak yapılmıştır.

Öski Kilisesi apsis, naos, portiko, apsidal, narteks, batı haç kolu, doğu haç kolu, güney haç kolu ve irili ufaklı odalardan oluşmaktadır.

Kilisenin kuzey ve güney cephe uzunluğu takribi 49 m, doğu ve batı uzunluğu ise yaklaşık olarak 27,5 m'dir.

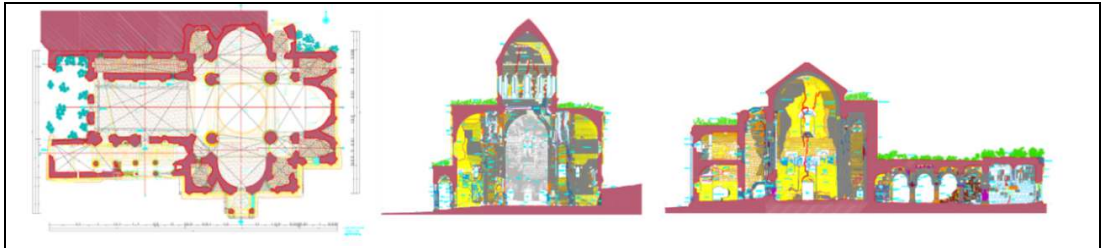
Yapıda güney ve batı cephelerinde olmak üzere 4 adet giriş kapısı vardır. Bu kapıların yanı sıra duvarlara kapı büyüklüğünde yapıya duvarlarına sonradan açılmış olan çeşitli delikler de mevcuttur. Yapıda mevcut olan pencere ve kapıların ölçüleri birbirinden farklıdır.

Yapının en yüksek noktası, silindir üzerine oturan üst kotu 36 m olan sivri kubbedir. Duvar kalınlıkları aşınmalardan, yıkılmalardan dolayı incelmışlerdir. Yaklaşık duvar kalınlığı aralığı 35-140cm'dir.

Narteksin bulunduğu bölgedeki kemerlerde burkulmalar mevcut yapıda görülmüştür. Narteks üzeri haçvari tonoz ile örtülmüştür.

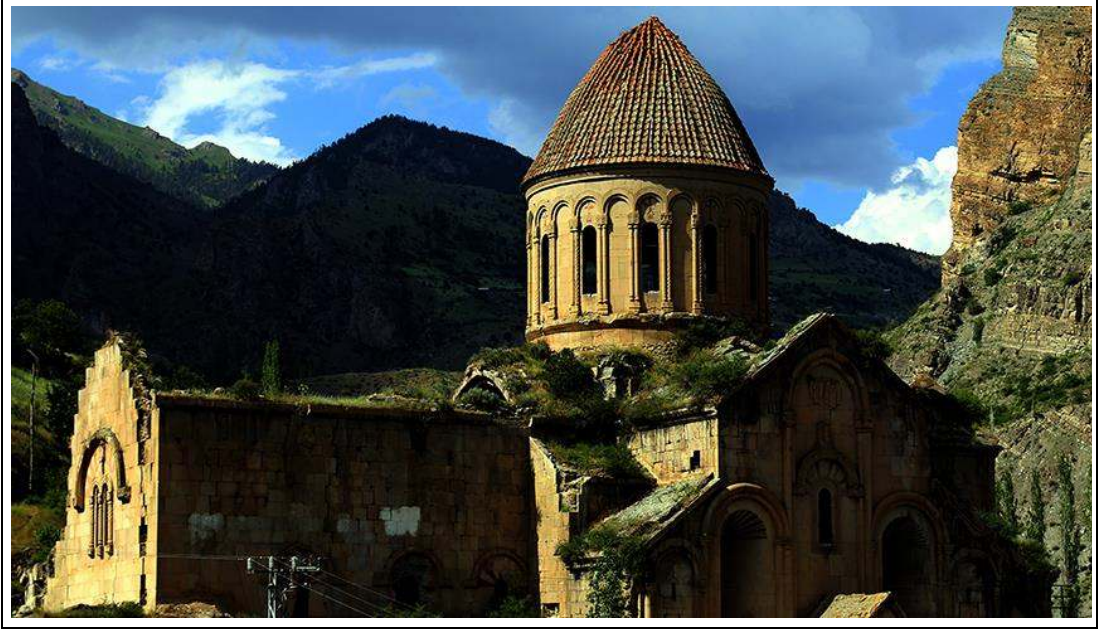
Yapı günümüze olumsuz doğal koşullar, bakımsızlık vs. nedenlerinden dolayı belli bir kısmı yıkılmış olarak ulaşmıştır.

Yapının plan, kesit örnekleri Şekil 5.2'de verilmiştir.

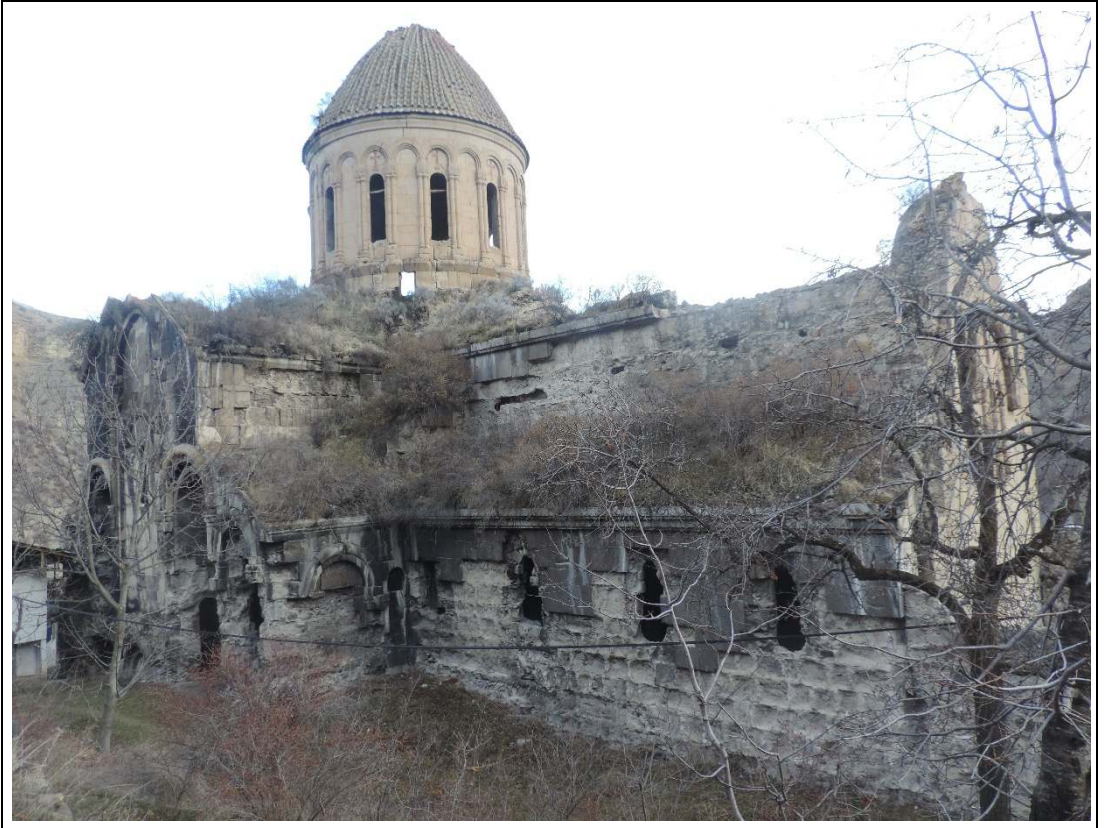


Şekil 5.2: Öski Kilisesi plan ve kesit.

Öski Kilisesi'nin güney-batı, kuzey cephelerinin görünüşleri Şekil 5.3 [62] ve Şekil 5.4 de verilmiştir.



Şekil 5.3: Öski Kilisesi güney ve batı cephesi görünüşü.



Şekil 5.4: Öski Kilisesi kuzey cephesi görünüşü.

5.1.3. Taşıyıcı Sistem ve Malzeme Özellikleri

Kilise, plan olarak kapalı Yunan hacı şeklindedir. Yığma taşıyıcı sistem ile inşa edilmiştir. Yapıda her iki doğrultuda da simetriklik yoktur.

Yapı genel hatlarıyla naosu örten bir büyük kubbenin silindir yapıya oturması ve bu silindir yapının kemerlerce taşınması ve batı haç kolunu örten bir büyük tonozun duvarlara oturması ile ana yapı oluşmaktadır. Bu ana yapıyı destekleyen apsisi oluşturan yarım silindir, odaları örten küçük kubbeler, yarım silindir yapıları örten yarım kubbeler, sütunlara ve ayaklara aktarılan yükleri taşıyan kemerler ve kubbelerin açılmasını engellemek amacıyla kullanılan yardımcı kemerlerden oluşmaktadır. Silindirin oturduğu kemere geçişler pandantiflerle sağlanmıştır.

Tarihi yapılar üzerinde analiz yapılırken malzeme değerleri kullanımı olarak 2 seçenek bulunur. Analiz yapılan yapıdan numune alınarak analizlerden çıkan veriler ya da literatürde kullanılan malzeme değerleridir. İlgili çalışma kapsamında malzeme deneyleri taş için yapılmıştır. Harç deneyi için deneye uygun boyutta numune alınamamasından dolayı harç özelliklerinin elde edilmesinde literatürde yer alan malzeme özellikleri dikkate alınmıştır.

Tablo 5.1: Öşki Kilisesi’nden alınan taş numunesinin deney sonuçlarından elde edilen malzeme özellikleri.

EĞİLMEDE ÇEKME VE BASINÇ DENEY SONUÇ TABLOSU												
Numune No	Numune Yaşı	Numune Ağırlığı	Numune Boyutları			Birim Hacim Ağ.	Mesnetler Arası Mesafe	Eğilme Kırılma Yükü	Eğilme Dayanımı	Basınç Kırılma Yükü	Basınç Dayanımı	Ortlama
	Gün	gr	b	h	L					mm	kN	
						mm	mm	mm	gr/cm3			mm
EB N1	800 +	644,04	42,3	41,4	163,9	2,25	100	6,25	12,93	121,47	75,92	75,92
EB N2	800 +	558,56	38,1	40,1	161,2	2,27	100	4,22	10,34	146,95	91,84	
										130,93	81,83	86,84
EB N3	800 +	626,15	41,6	40,6	160,8	2,31	100	6,11	13,39	116,99	73,12	
										135,04	84,40	
EB N4	800 +	623,41	42,9	41,1	160,4	2,20	100	6,07	12,54	-	-	86,74
										138,78	86,74	
EB N5	800 +	583,75	43,0	40,7	155,8	2,14	100	3,51	7,40	157,46	98,41	89,25
										128,15	80,09	
EB N6	800 +	527,18	43,1	40,4	139	2,18	100	4,53	9,67	110,37	68,98	68,98
										-	-	
Ortalama =									11,04	Ortalama =		81,08

Harç özellikleri alınırken aşağıdaki literatür çalışmalarından faydalanılmıştır.

- “Erken Bizans Dönemi Horasan Harçlarının İncelenmesi” yüksek lisans tezinde yer alan tabloda, 7 farklı yapı grubuna dair 22 farklı yapıdan alınan harç

numunelerinin analiz sonuçlarında maksimum basınç dayanımının 8 MPa, minimum basınç dayanımının ise 3 MPa olduğu görülmüştür.

- “İstanbul’daki Roma Dönemi Saray Yapılarındaki Horasan Harçlarının İncelenmesi” adlı makalede yer alan harç örneklerinin basınç dayanımının 6-8 MPa aralığında olduğu görülmektedir.
- “Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi’nin Yapısal Davranışının İncelenmesi” makalesinde ise harç dayanımı 5,5 MPa olarak yer almaktadır.

Literatürdeki bu değerlere bağlı olarak harç basınç dayanımı 5 MPa olarak alınmıştır.

Ercan, E.’nin “Tarihi Yığma Yapıların Güvenliklerinin Analitik ve deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi” adlı doktora tezi ve Kocaman İ. vs.’nin “Tarihi Erzurum Yakutiye Medresesi’nin Yapısal Davranışının İncelenmesi” adlı çalışmasında kullandığı Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 dikkate alınmıştır.

Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak duvar basınç dayanımı (Denklem 5.1) ve elastisite modülü (Denklem 5.2) elde edilmektedir.

$$f_k = 0.5 \times 81.08^{0.65} \times 5^{0.25} = 13 \text{ MPa} \quad (5.1)$$

$$E = 1000 \times 13 = 13000 \text{ MPa} \quad (5.2)$$

Çekme dayanımı 1,3 MPa olarak alınmıştır.

Analizde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: Analizde kullanılan malzemeler ve özellikleri.

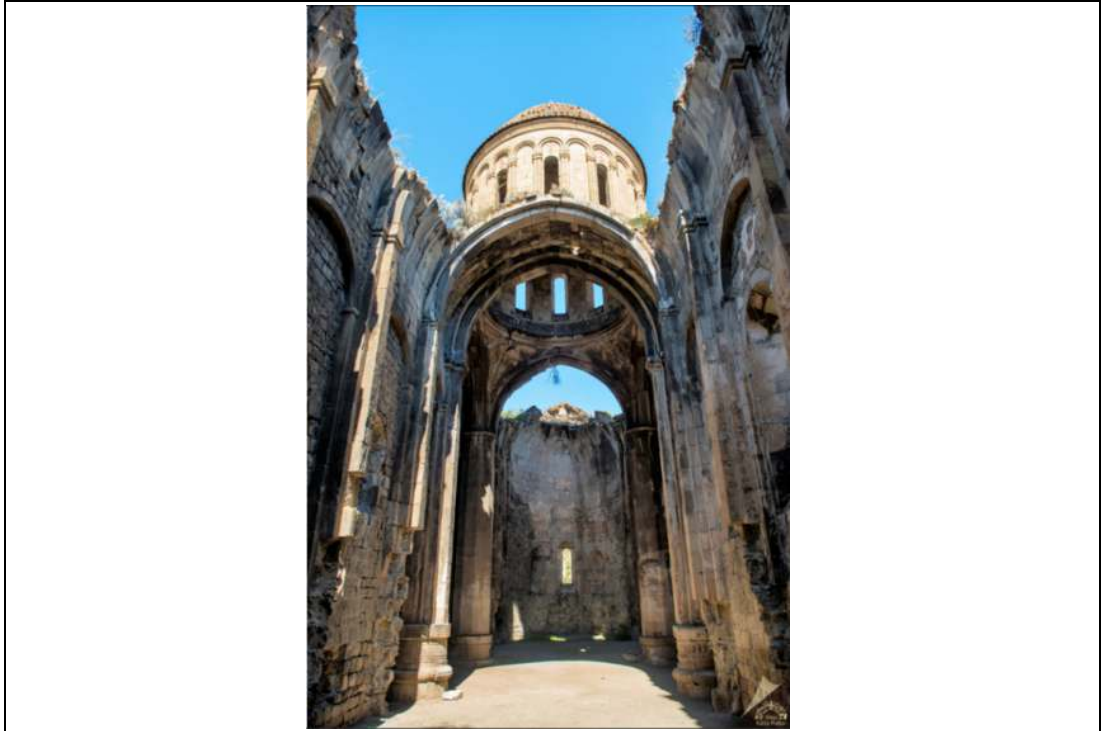
	Elastisite Modülü (N/mm ²)	Poisson Oranı	Birim Hacim Ağırlığı (kgf /m ³)
Yığma Yapı Ana Taşıyıcı Malzemesi	13000	0.17	2225
Çelik (S235)	2.00E+5	0.3	7849

5.2. Öşki Kilisesi Yapım Teknikleri

Öşki Kilisesi'nin yapım tekniği geleneksel yığma yapı yapım tekniğinin izlerini taşır.

5.2.1. Kubbe ve Tonozlar

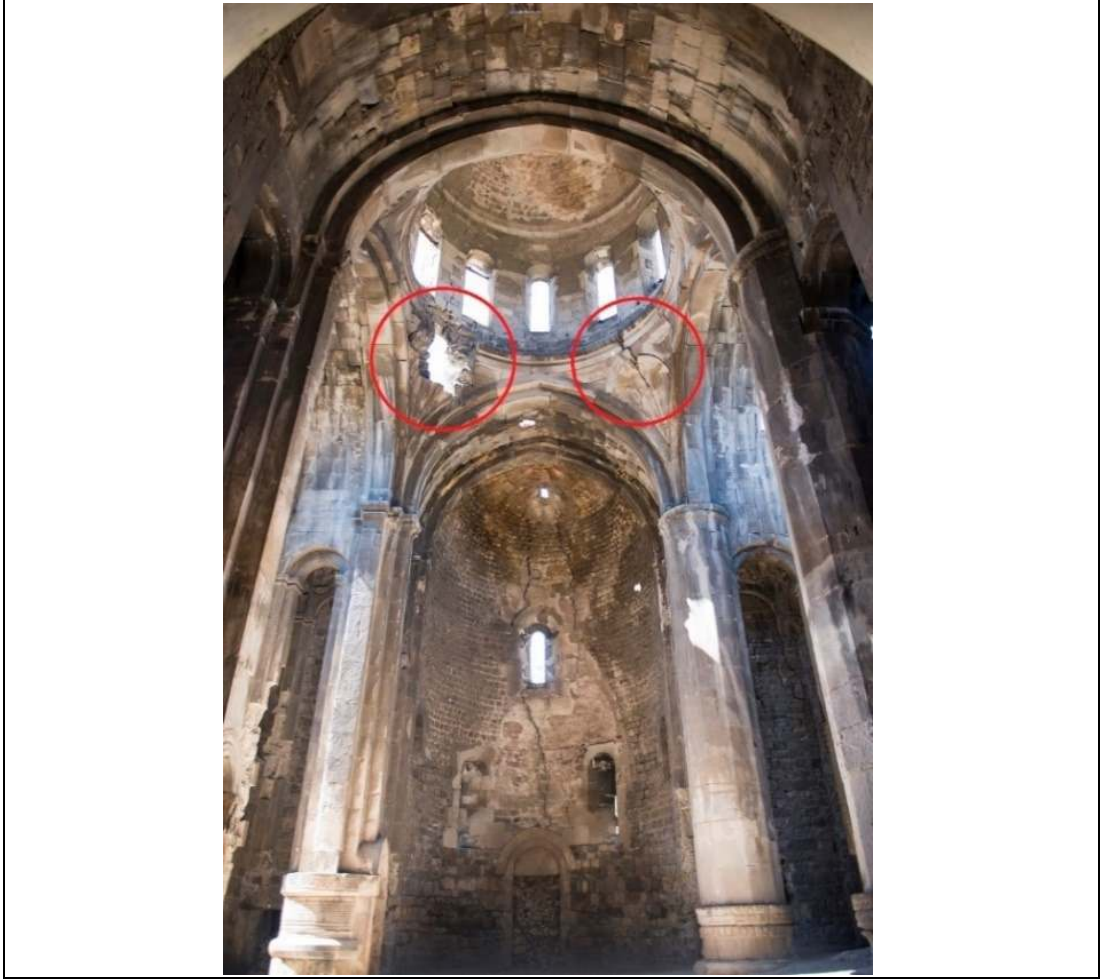
Kubbeler büyük mekanları örten yapı elemanları olup yapının ilk ağırlık merkezini oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı kubbeli yapılarda yapının tüm taşıyıcı sistemi kubbenin desteklenmesi ve mesnetlenmesi yönünde biçimlenmiştir. Dolayısıyla kubbe yükünün etkisi, kubbe kasnağında göstereceğinden bu bölgelerin güçlendirmesi için taş kiriş kuşaklama elemanları olarak kullanılmıştır. Bu şekilde büyük tonoz ve kubbenin alt kısımlarında açılmaya çalışan bölümler engellenmiştir. Kubbe ve tonozda malzeme olarak taş kullanılmıştır. Açıklığa göre kalınları değişiklik gösterir. Ana örtü elemanı olan yapılarda kubbe formu sivri kubbe, tonoz formu ise sivri tonozdur. Şekil 5.5' de [63] görüldüğü gibi büyük açıklık örten tonoz ve kubbelerde çökmeler, yıkılmalar sonunda büyük hasarlar mevcuttur. Küçük kubbe ve tonozların bazılarında ise yer yer çatlaklar ve taşlarda eksilmeler görülmektedir.



Şekil 5.5: Tonoz ve kubbelerde göçmeler.

5.2.2. Geçiş Öğeleri

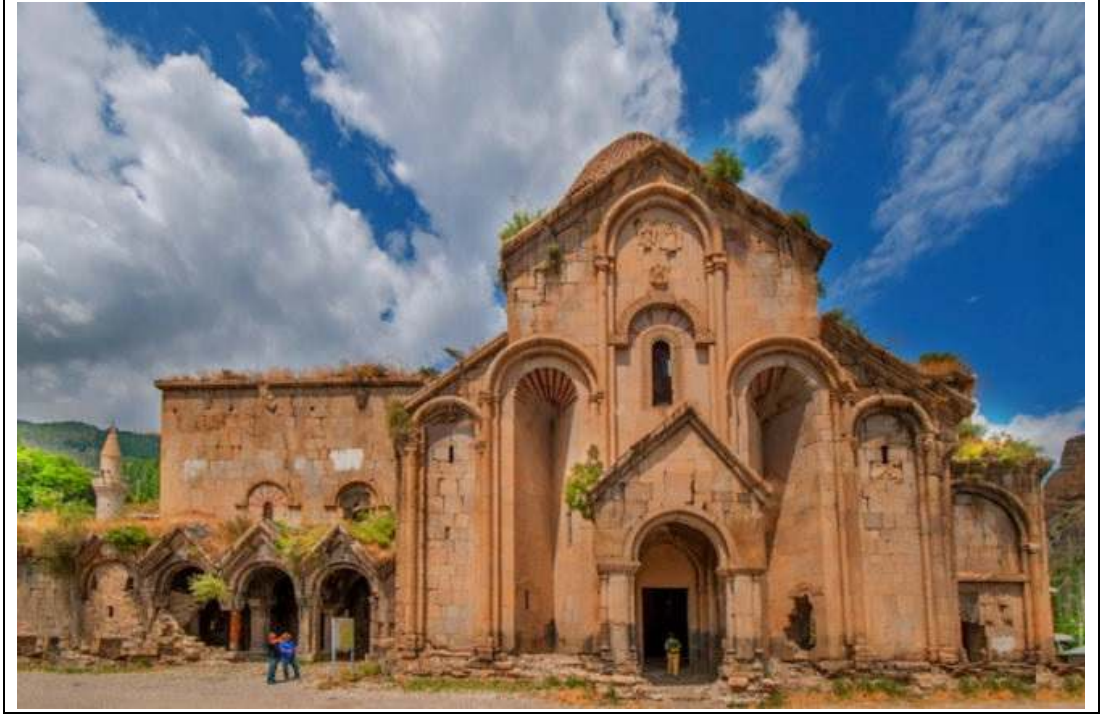
Şekil 5.6’da [64] ana kubbenin oturduğu kemer ile kubbenin yük akışının kolaylaştırılması için kullanılan pandantiflerde yer yer çatlaklar ve delikler mevcuttur.



Şekil 5.6: Pandantiflerde çatlaklar ve delikler.

5.2.3. Kemerler

Kubbe ve tonozları taşımak için yapılan kemerler taştan inşa edilmiştir. Bunun yanı sıra Şekil 5.7’de [65] ki gibi duvarlarda da çeşitli nedenlerden dolayı kullanılan kemerler mevcuttur. Büyük kemerlerde kullanılan kemer tipi sivri formdur. Kubbenin oturduğu kemerlerin açılmasını engellemek için yarım kubbelerle, tonozlarla, yarım silindir şeklindeki elemanlarla desteklenmiştir. Şekil 5.8’de [66] yapıda mevcut olan kemerler genel olarak taşıyıcı özelliğini koruduğu görülmektedir.



Şekil 5.7: Duvarlarda kullanılan kemerler.



Şekil 5.8: Kemerlerin taşıyıcılığını koruması.

5.2.4. Ayak, Sütun ve Paye

Ana kubbenin oturduğu kemerlerin devamında dört büyük taş ayak mevcuttur. Taş ayakların alt kısımlarında taş kaideler bulunur.

Yapıda yedi adet sütun bulunmaktadır. Bunlardan 6 tanesi taş 1 tanesi ağaçtan yapılmıştır. Taş sütunlardan birinin yerine ağaç sütun ile destek yapılmıştır. Şekil 5.9'da [67] ki ağaçtan yapılan sütun, kiliseye sonradan eklenmiştir. Bu ağaç sütunun konulma tarihi tam olarak belli değildir.

Payeler taş malzemeden yapılmıştır. Belirli kotlara kadar paye taşlarında yok olmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9: Sonradan eklenen ağaç destek.

5.2.5. Duvarlar

Duvar kalınlıkları çeşitlilik gösterir. Duvar kaplama taşlarının belli bölgelerinde yok olmalar ve yıkılmalar mevcuttur.

Şekil 5.10'da [68] duvarlarda insanlar tarafından sonradan açılan delikler, geçişler, oyuklar veya sonradan kapatılan kapılar görülmektedir. Pencere ve kapı deliklerinde deformasyonlar meydana gelmiştir.

Şekil 5.11' de [69] duvarların bazı bölgelerinde işlemeli kemerler, freskler, kabartma figürler görülmektedir.



Şekil 5.10: İnsanlar tarafından duvarlarda açılan oyuklar ve delikler.



Şekil 5.11: Kilisenin duvarlarının görünüşü.

Batı cephesindeki duvarda ciddi çatlak mevcuttur. Şekilde 5.12’de [70] düzlemine dik doğrultudaki duvardan ayrıldığı görülmektedir. Tonozun yıkılması sonucu duvarı tutan bir rijitliğin olmamasından dolayı bu bölümde duvar düzlem dışı davranış yapmaktadır.



Şekil 5.12: Batı cephesinin düzlem dışı davranış yapan duvarı.

5.3. Yapının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

5.3.1. Model Özellikleri

Tarihi yapıların, farklı yük etkileri altında davranışlarının doğru tahmin edilebilmesi için sayısal modelleme aşamasında sınır şartları ve malzeme özellikleri oldukça önemlidir.

Öşki Kilisesi'nin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. [71] Analizde 2 tip elemandan yararlanılmıştır. Sütunlar, ayaklar ve paye çubuk eleman olarak sisteme girilmiştir. Duvarlar, tonoz, kubbe ise kabul eleman olarak tercih edilmiştir. Malzeme özellikleri, literatürde yer alan malzeme tanımlarına göre yapılmıştır.

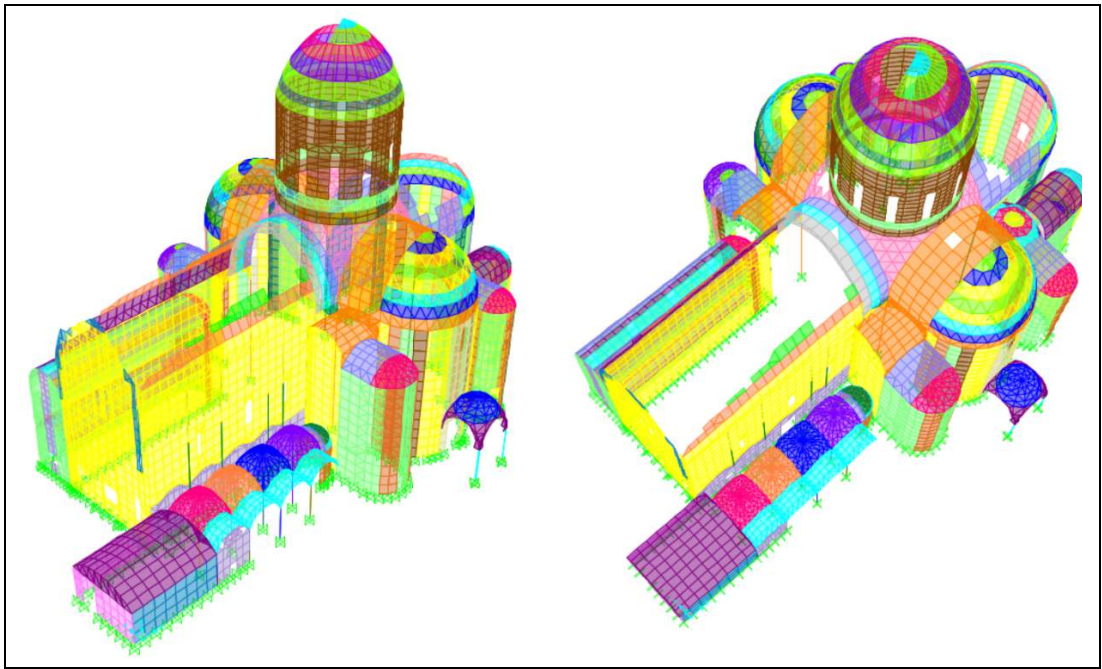
Tonozlar, kubbeler, yarım kubbeler, kemerler, duvarlar, yarım silindir duvarları ve ayaklar taş ve harç olmak üzere iki farklı malzemeden oluşmaktadır. Modelleme yönteminde makro modelleme tekniği seçilmesinden dolayı bu taşıyıcı elemanlar tek bir malzemeden oluştuğu kabul edilmiştir. Modelde yapısal çözüm iki kere yapılmıştır. İlk modelde yapının deprem etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. İkinci modelde ise yapının düzlem dışı davranışta bulunan yığma duvarı çelik iskele sistemi ile

güçlendirilmiş. Bu güçlendirme müdahalesinin etkisini belirlenmek için ikinci model yapılmıştır.

Yığma yapının sütun ve ayakları çubuk elemandan, ayak ve sütun dışında kalan elemanlar (Duvar, mekan örtüleri vs.) ise kabuk eleman olarak tanımlanmıştır. Çelik iskele sisteminin ise tüm elemanları çubuk eleman olarak modellenmiştir.

Hazırlanmış olan yapı modeli 9792 adet kabuk eleman, 45 adet çubuk eleman, 7661 adet düğüm noktasından oluşmuştur. 379 adet ankastre mesnet tanımlanmıştır.

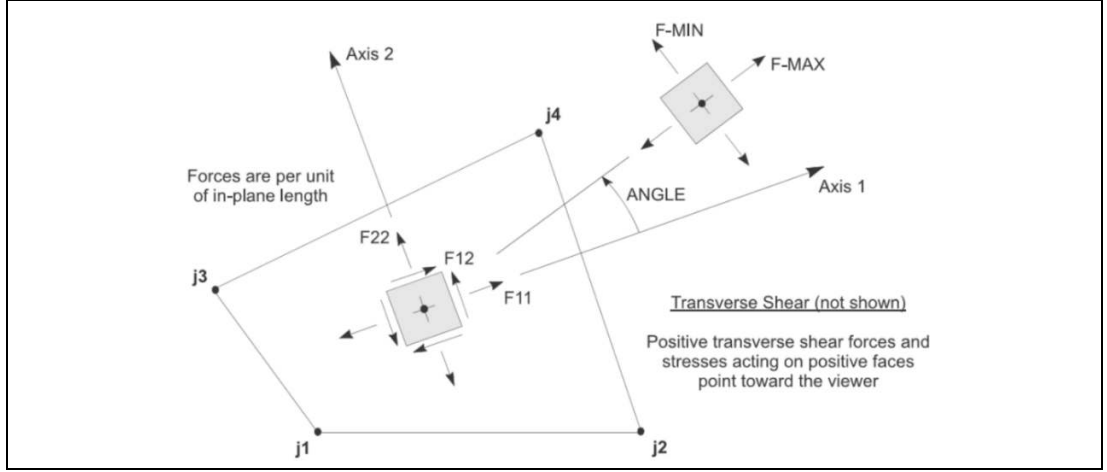
Genel model yapısında homojen eleman büyüklüğü dağılımı oluşturulmaya çaba sarf edilmiştir. Öşki Kilisesi'nin sonlu elemanlar modeli Şekil 5.13'de verilmiştir.



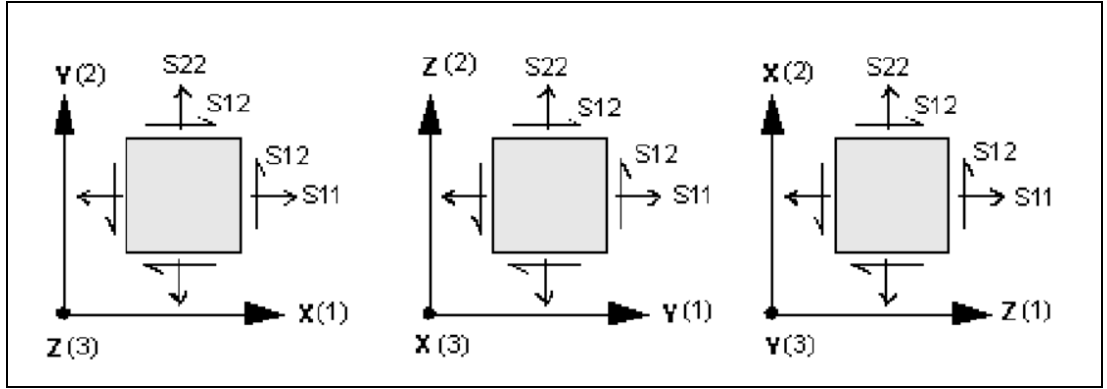
Şekil 5.13: Sonlu elemanlar modelin 3 boyutlu görünüşleri.

Elde edilen analiz sonuçlarının her bir elemanda ve her bir düğüm noktasında verilmesi oldukça zor olmasından dolayı sonuçlar grafikler ve renkli gerilme dağılımları ile verilmiştir.

Kabuk elemanlara ait iç kuvvetler Şekil 5.14'de [72] gösterilmiştir. Yapı modelinde kullanılan kabuk elemanların global koordinatları ve gerilme yönleri (pozitif) Şekil 5.15'de ki gibidir.



Şekil 5.14: Düzlem kabuk elemanda iç kuvvetler.

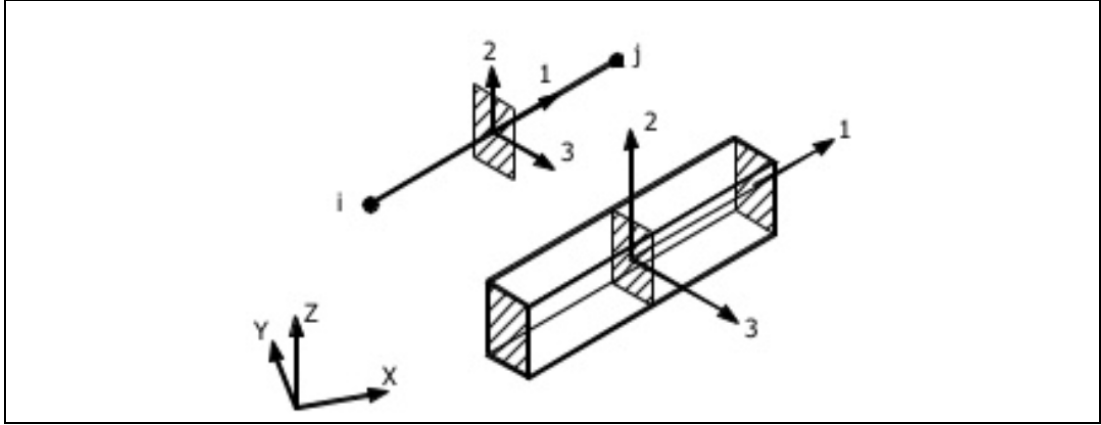


Şekil 5.15: Düzlem kabuk elemanda global koordinatlar ve gerilmeler.

Sonlu elemanlar programı SAP2000' de oluşacak gerilme çeşitleri aşağıda özetlenmiştir.

- S11 : (x) yönünde gerilme
- S22 : (y) yönünde gerilme
- S33 : (z) yönünde gerilme
- S12 : (x-y) düzleminde kayma gerilmesi
- S13 : (x-z) düzleminde kayma gerilmesi
- S23 : (y-z) düzleminde kayma gerilmesi

Yapının modellenmesinde kullanılan çubuk elemanların sonlu eleman programı SAP2000'de ki eksenleri Şekil 5.16'da görülmektedir.



Şekil 5.16: Sonlu elemanlar programı SAP2000'nin eleman eksenleri.

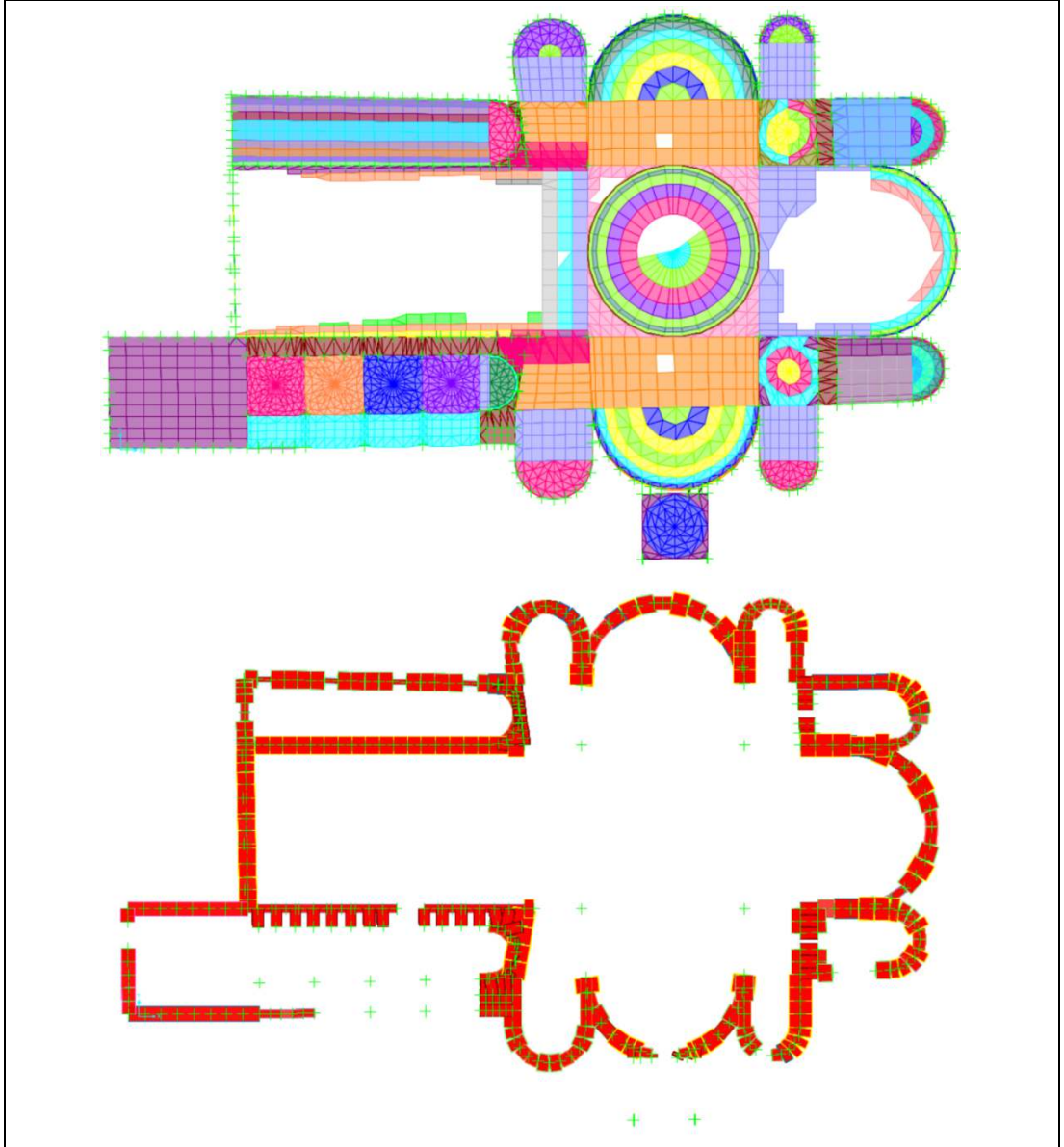
5.3.2. Sayısal Model Oluşturulması

Tarihi yapıların taşıyıcı sistemi çok karmaşıktır. Bundan dolayı yapının modellenmesi için birçok sadeleştirmeye ihtiyaç duyulur.

Yapının modellenmesi sırasında, Şekil 5.17'de görüldüğü üzere duvarlar ve diğer taşıyıcı elemanlarda geometrik olarak düzenlemelere ve sadeleştirmelere, basitleştirmelere gerek duyulmuştur. İdealleştirme yapmak modelleme sürecinde kolaylık sağlamıştır. Modellerin hiçbiri gerçeği tamamıyla yansıtamayacağı için gerçeğe en yakın sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

Malzeme: Yığma yapı elemanlarının harç ile yekpare bir malzeme özelliği gösterdiği ve tüm doğrultularda aynı davranışı sergilediği kabul edilmiştir. İnşa safhalarında sürekli malzeme bulamama durumundan dolayı farklı türden malzemelerde kullanılma ihtimali olabilir. Bu tip bir durumun oluşma ihtimalinde farklı mekanik davranış gözlemlenmediği varsayılmıştır.

Duvarlar: Yapının duvarlarında yer yer kalınlıklarında değişimler gözlenmesinden dolayı kabuk elemanlar küçük parçalara ayrılmıştır. Kalınlık değişimleri bu şekilde modele etki ettirilmiştir.



Şekil 5.17: 3D Sonlu elemanlar modeli farklı kotlardan planları.

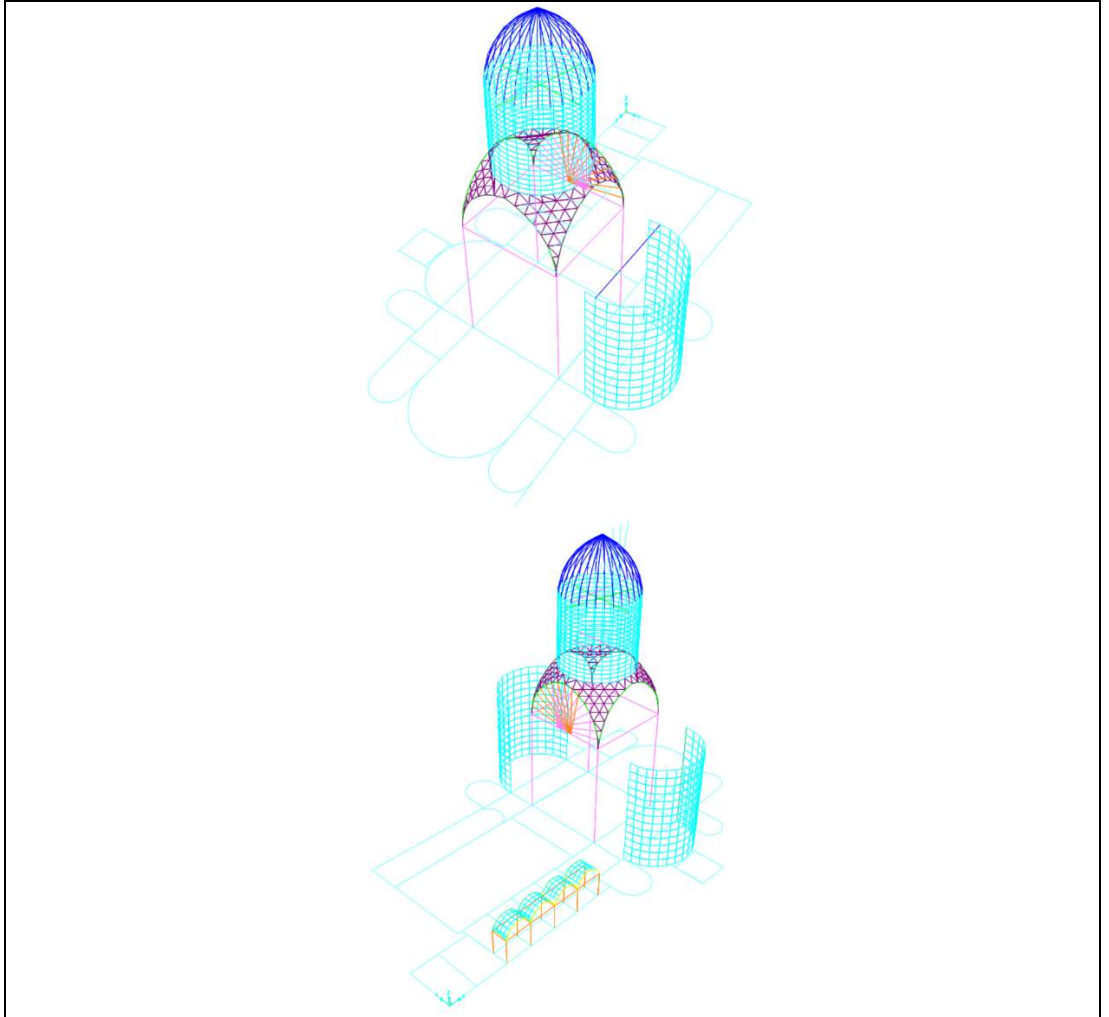
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılacak analizde sırasıyla izlenecek aşamalar,

- Mevcut durumun incelenmesi
- Modelin oluşturulması
- Analiz yapılması
- Kesit tahkiki
- Güçlendirme

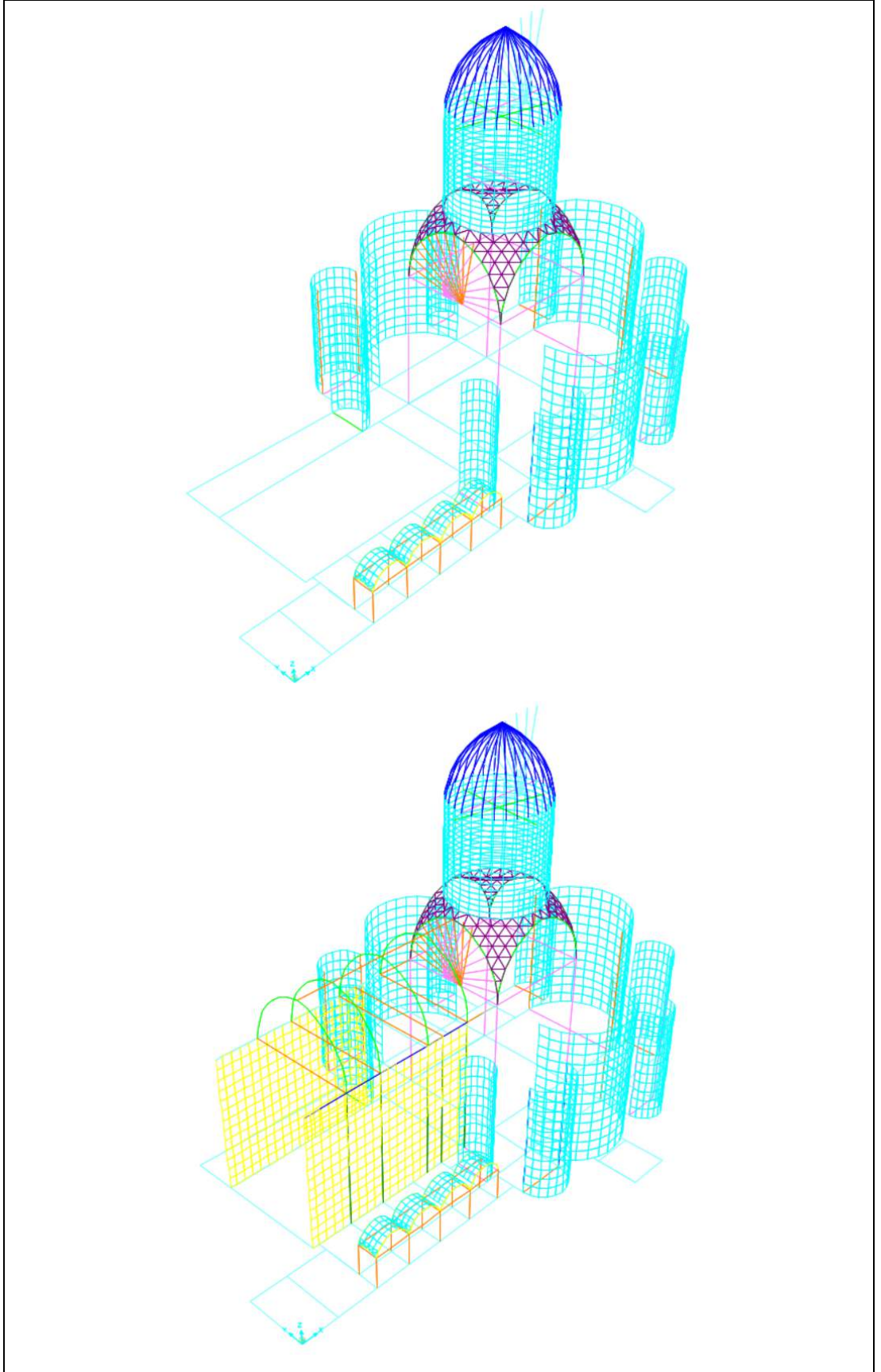
Öşki Kilisesi bilgisayar ortamında SAP2000 programında sonlu elemanlar yöntemine uygun olarak modellenmiştir. Modelin taban planı için yardımcı çizgiler (ana hatlar) Autocad ile çizilmiştir. Bu çizimlerin SAP2000 programına aktarılmasından sonra modelin tamamı SAP 2000 programı üzerinde yapılmıştır. Model için yerinde röleve çalışmasından elde edilen boyutlar kullanılmıştır.

Tarihi yapı, kabuk ve çubuk elemanlar kullanılarak makro modelleme yöntemiyle modellenmiştir.

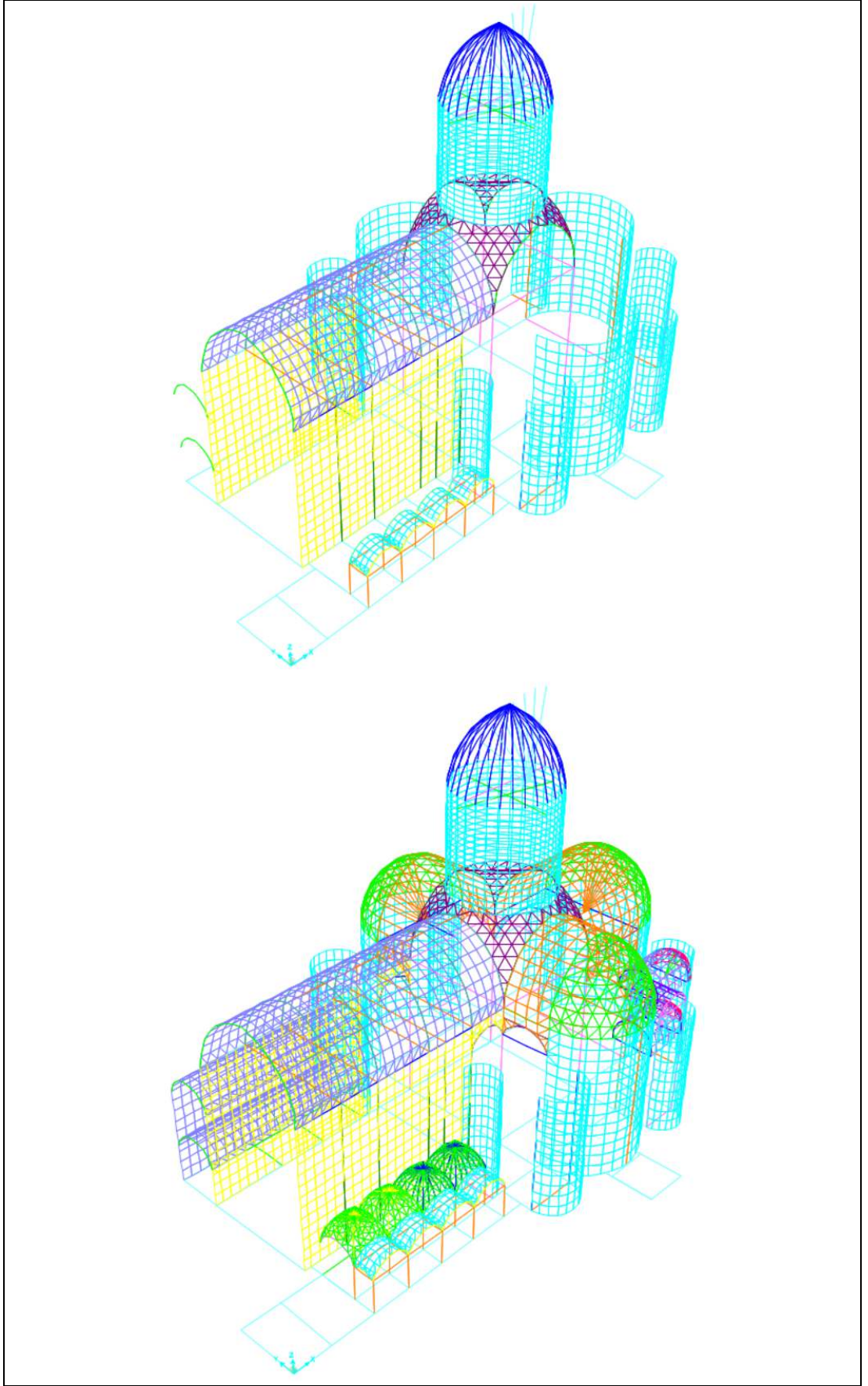
Şekil 5.18-6.22’de yapının modellenme aşamaları görülmektedir. Yapıda simetrikliğin olmaması, elemanların düzlem dışında deformasyonları, aksların hizalı olmaması gibi çizimsel nedenlerden dolayı model oluşturmak için uzun süreye ihtiyaç duyulmuştur. Bunların dışında, yapıda kullanılan kubbe ve tonozların tamamına yakınının sivri formda olması ve yarım silindir şeklindeki duvarlar yapıların üç boyutlu olarak modellenmesi sürecinde oldukça zahmet çekilmesine sebep olmuştur.



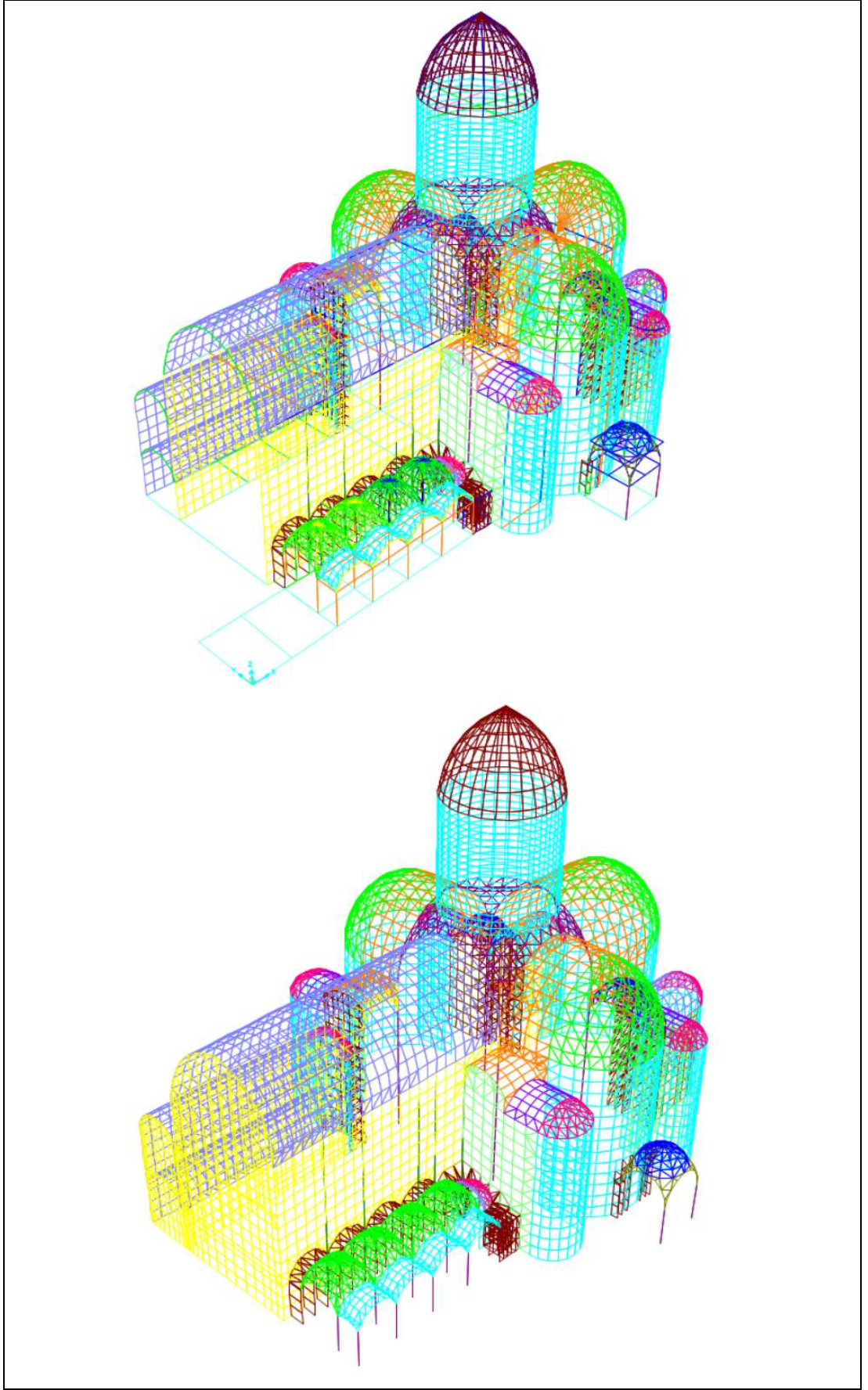
Şekil 5.18: Öşki Kilisesi’nin modelleme aşamaları 1 ve 2.



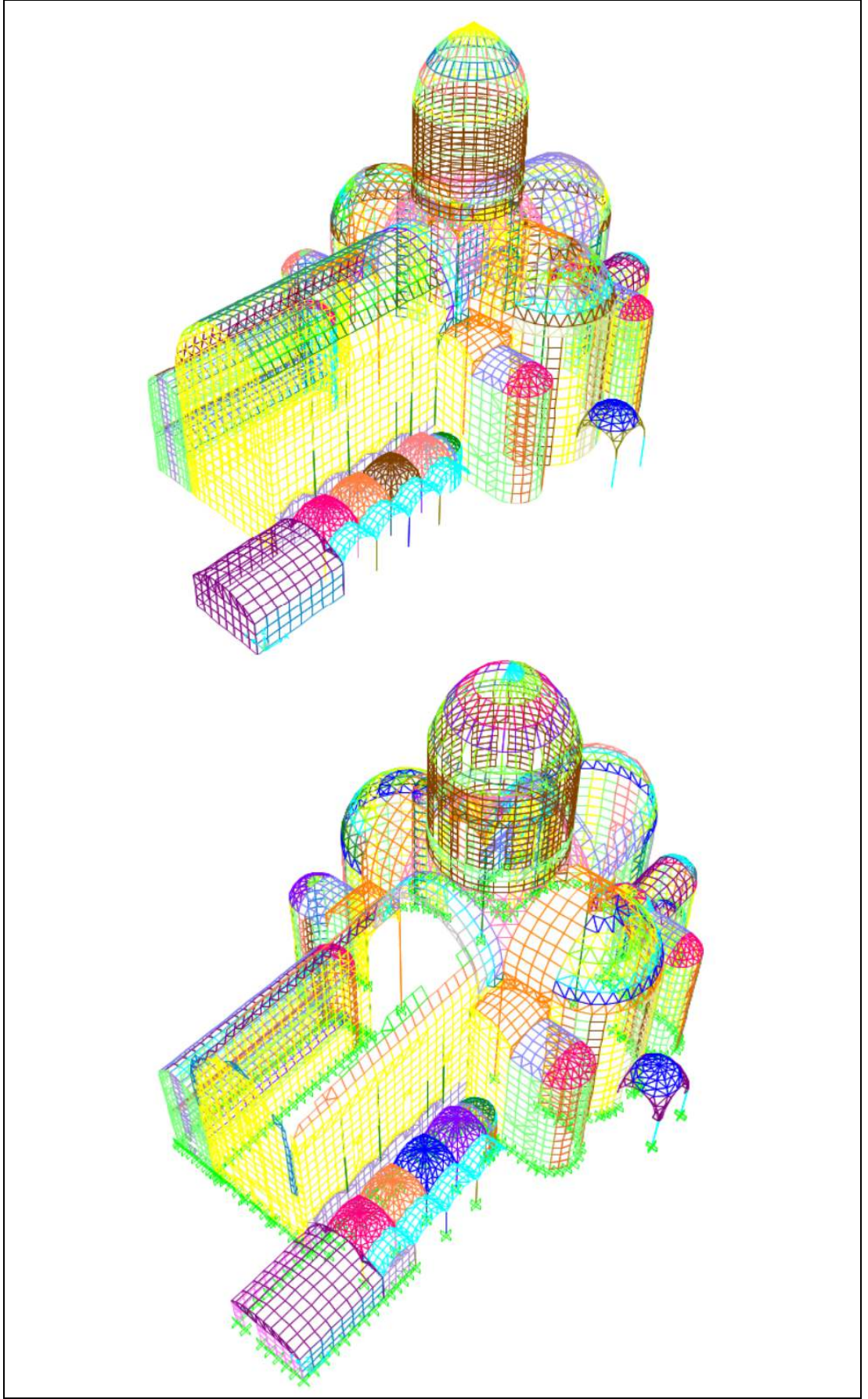
Şekil 5.19: Öski Kilisesi'nin modelleme aşamaları 3 ve 4.



Şekil 5.20: Öski Kilisesi'nin modelleme aşamaları 5 ve 6.



Şekil 5.21: Öski Kilisesi'nin modelleme aşamaları 7 ve 8.



Şekil 5.22: Öşki Kilisesi'nin modelleme aşamaları 9 ve 10.

5.4. Yapısal Analiz Bilgileri

Yığma yapı analizinde, düşey ve deprem etkileri altında yapının elastik davranışını elde etmek hedeflenmiştir.

Deprem etkilerinin belirlenmesinde mod birleştirme yöntemi ve modların süperpozisyonu gerçekleştirilirken istatistiksel yöntem olarak Karelerinin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemi kullanılmıştır.

Modelde mesnetlenme koşulu olarak tüm temel mesnetlerinin serbestlikleri tutulu olduğu kabul edilmiştir.

Hazırlanan modelde sabit yükler ve deprem spektrumu ile tanımlanmış olan yer hareketinin neden olduğu zorlanmalar dört ayrı yükleme durumu için etki ettirilmiştir. Spektrum, EX-DD1, EY-DD1, EX-DD2, EY-DD2 yüklemeleri olarak tanımlanmıştır. Bu ifadeler iki ayrı doğrultuda deprem yüklemesi yapıldığını ve iki farklı deprem yer hareketi düzeyi baz alınarak hesaplandığını göstermektedir. Deprem yer hareketi düzeyi-1 (spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %2 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu çok seyrek deprem yer hareketidir. Standart tasarım deprem yer hareketi denmektedir) ve deprem yer hareketi düzeyi-2 (spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketidir) olarak kabul edilmiştir.

Öski Kilisesi için yapılmış olan zemin etüd raporunda mevcut olan zemin grubu C ve yerel zemin sınıfı Z2 olarak verilmiştir. Bu veriler eski yönetmeliğe göre olduğu için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine uygun hangi yerel zemin sınıfına girdiği bulunmuştur. Raporda V_{s30} hızı 410-419 m/sn aralığında verilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde bu değerin karşılık geldiği yerel zemin sınıfı ZC olarak elde edilmiştir.

Öski Kilisesi'nin koordinatlarına, yerel zemin sınıfına ve deprem yer hareketi düzeyine göre AFAD'ın sitesinden elde ettiğimiz sismik tehlike haritası raporunun çıktıları Tablo 5.3' de görülmektedir.

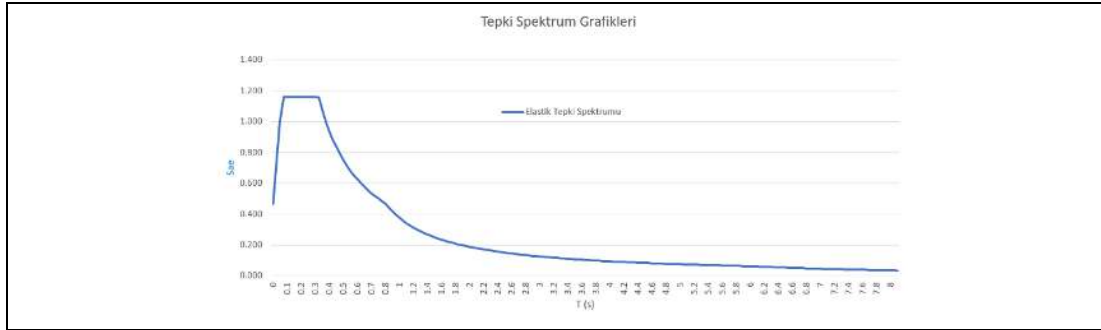
Tablo 5.3: Sismik tehlike haritası raporu çıktıları.

	DD-1	DD-2
S _s	0.968	0.478
S ₁	0.251	0.139
F _s	1.2	1.3
F ₁	1.5	1.5

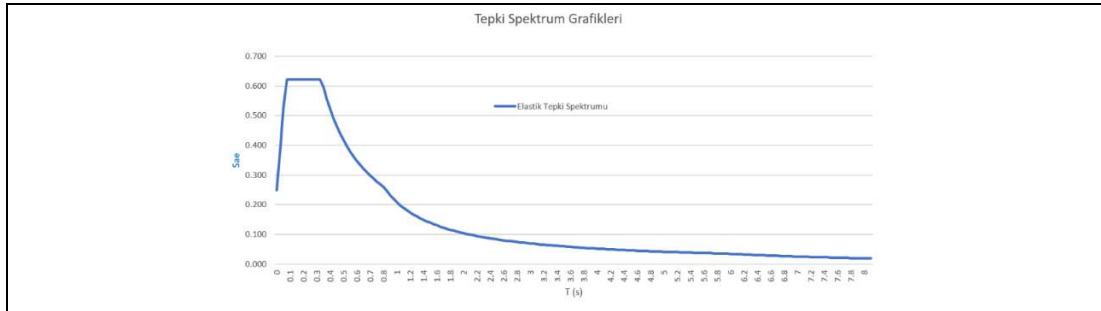
Bina önem katsayısı $I=1,5$ olarak alınmıştır. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=2,5$ kullanılmıştır.

Depreme dayanıklı yapı çerçevesinde TBDY 2018'e göre yapıların dinamik analizi için hesaba katılacak olan yeterli titreşim mod sayısı, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütlelerinin %95' inden daha fazla olması kuralına göre belirlenmiştir. Bu durumun sağlanabilmesi için 400 mod şekli gerekli olduğu görülmüştür.

Bu bilgiler dahilinde DD-1 için Şekil 5.23'de görülen spektrum ve DD-2 için Şekil 5.24'de görülen spektrum elde edilmiştir.



Şekil 5.23: DD-1 için spektrum eğrisi.

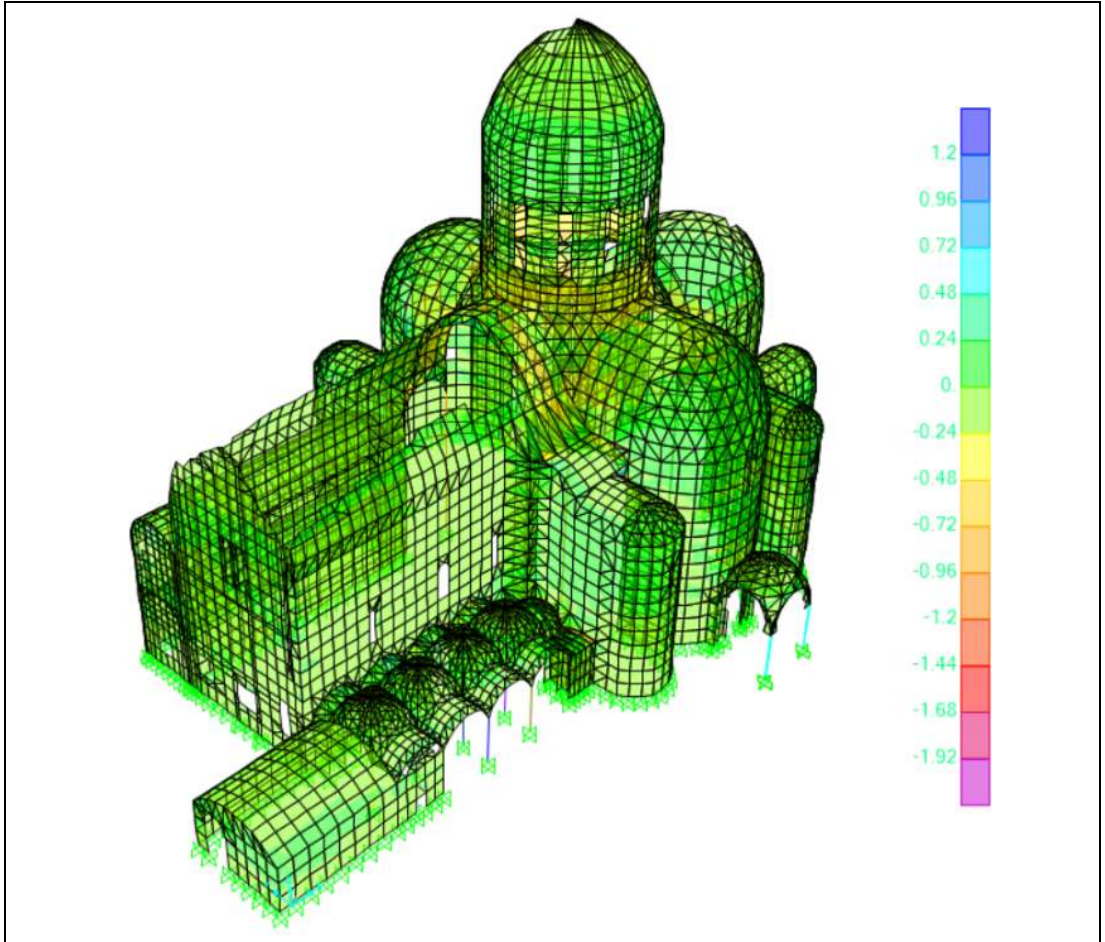


Şekil 5.24: DD-2 için spektrum eğrisi.

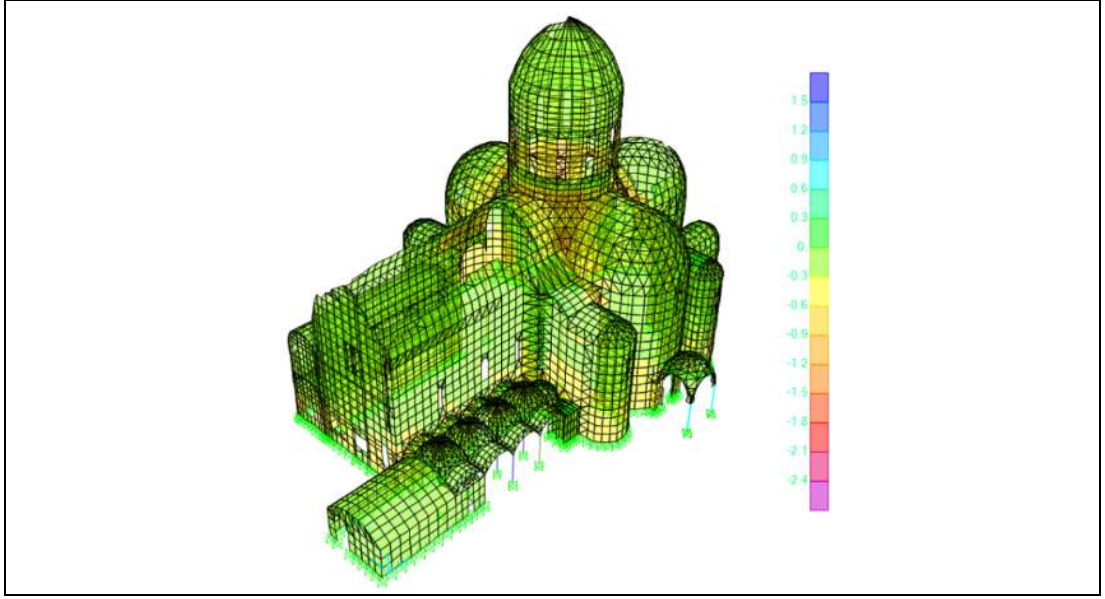
5.5. Düşey Yükler Altında Statik Analiz

Yapıda, düşey yükler altında statik analiz ile düşey yükler etkisinde oluşan gerilme dağılımı ve yer değiştirmeleri görebilmek için önemlidir. Bu analizde, düşey yüklerden meydana gelen sorunlar görülmektedir. Yapının her zaman üzerinde bulunan yükler altında davranışdır. Diğer etkilerden bağımsızdır. Bu yükleri yapı devamlı olarak taşıdığı için bu analizde genel olarak bir sorun beklenmez.

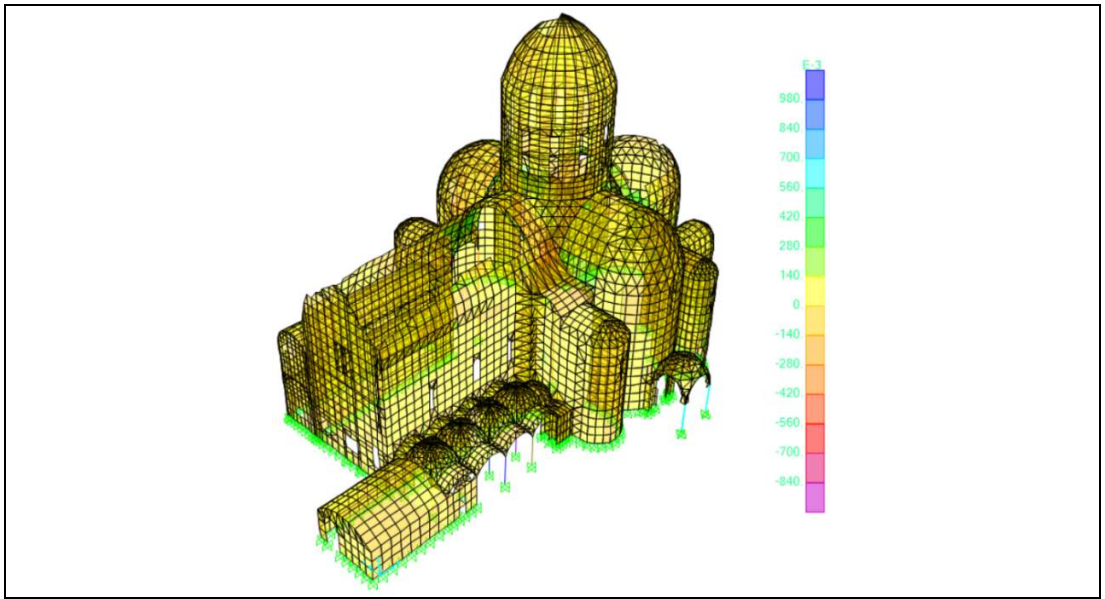
Tarihi yapıların en önemli yüklerinden biri kendi ağırlıklarıdır. Özellikle yığma yapılarda kalınlık ve kesitlerin büyük olması sebebiyle zati ağırlık diğer yüklere göre daha önemlidir.



Şekil 5.25: G yüklemesi S11 (X doğrultusu) gerilme dağılımı (N/mm²).



Şekil 5.26: G yüklemesi S22 (Y doğrultusu) gerilme dağılımı (N/mm²).



Şekil 5.27: G yüklemesi S12 gerilme dağılımı (N/mm²).

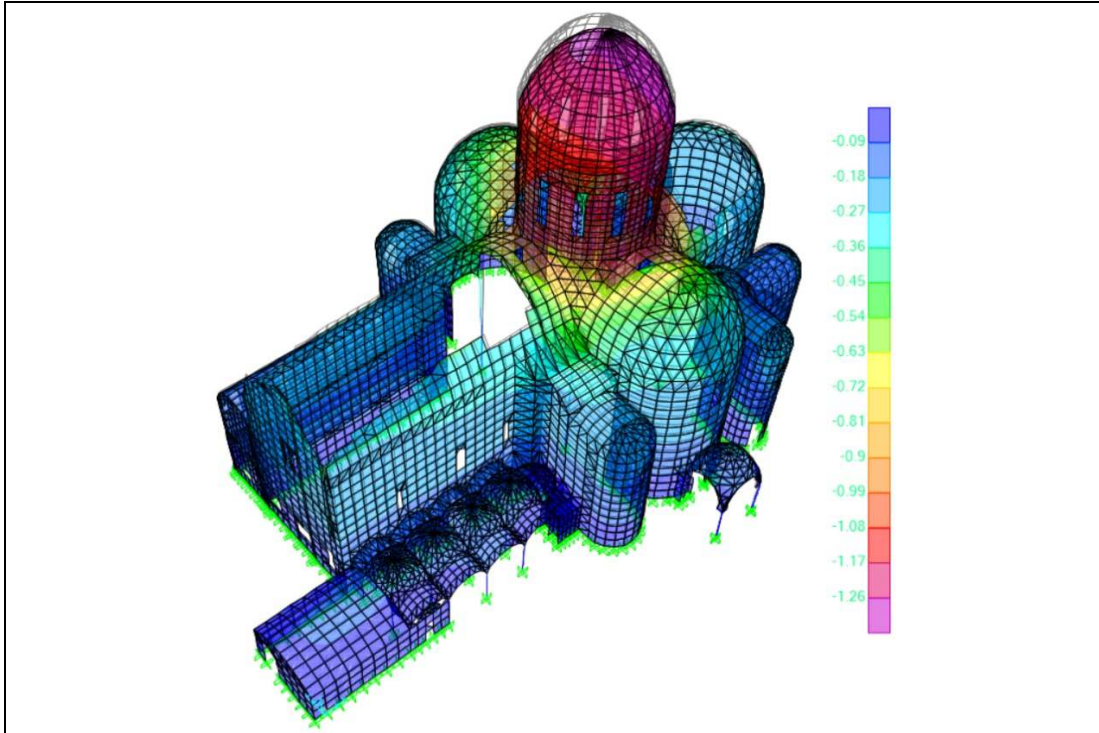
Yapının, kendi ağırlığı altındaki yüküne göre S11 gerilme değerleri Şekil 5.25’de, S22’ye ait gerilme değerleri Şekil 5.26’da, S12 ait kayma gerilme değerleri ise Şekil 5.27’de verilmiştir.

Hesaplanan en elverişsiz basınç gerilmesi S22 grafiğinde 2,4 MPa, en elverişsiz çekme gerilmesi ise 1,5 MPa olarak bulunmuştur. Kayma gerilmesi ise S12 grafiğinde maksimum değer 0,98 MPa olduğu görülmüştür.

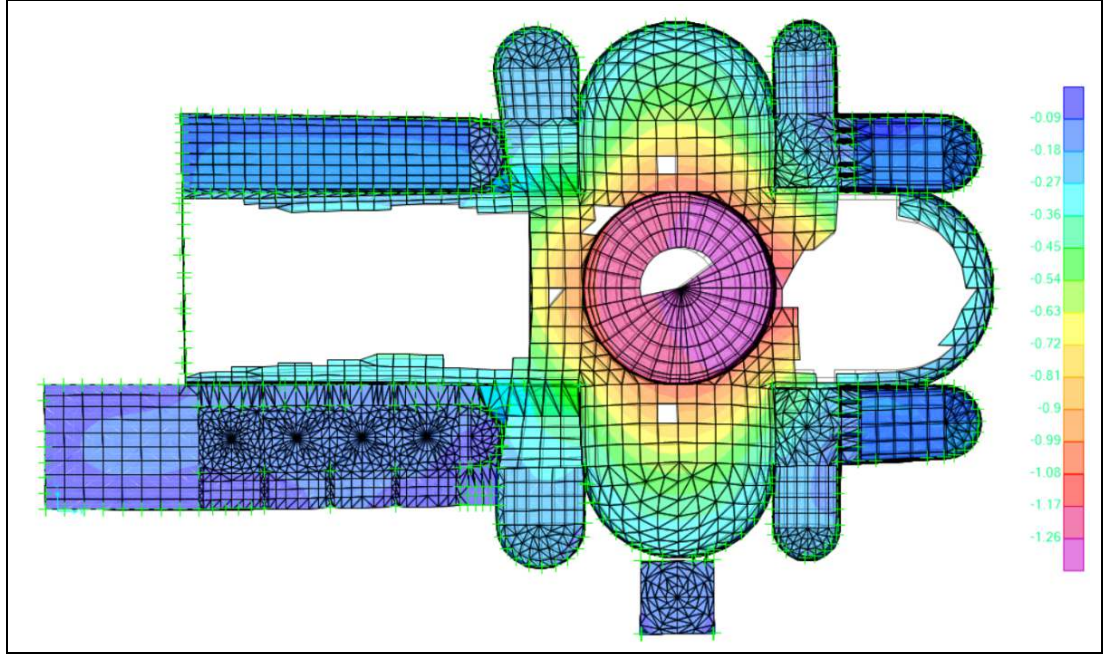
S11 ve S22 gerilmelerinde maksimum değerleri oluşturan kabuk eleman adeti 5 tanedir. Bu elemanlar yapının hasarlı olduğu bölgelerde görülmektedir. Bu kabuk elemanlar dışında en elverişsiz basınç gerilmesi S22 grafiğinde 1,7 MPa, çekme gerilmesi S22 grafiğinde 1,3 MPa olarak tespit edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda bulunan basınç gerilme değerleri, taş malzeme için basınç dayanım değeri olan 13 MPa'dan oldukça küçüktür. Gerilmelerin daha çok ana kubbeyi taşıyan elemanların çevresinde (kasnak, pendentif, kemerler) ve duvarların alt bölümlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun yanı sıra şki Kilisesi genel olarak basınç gerilmeleri altında olduğu şekil 5.28-5.29'da gözlenmektedir. Çekme gerilmelerinin oluştuğu bölgeler, kuzey ve güney haç kolunu örten yarım kubbenin kemere bağlantısını sağlayan tonoz ile yandaki odaları örten küçük kubbe ve tonozların bağlantı bölgelerinde maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca çok küçük değerler olmakla birlikte küçük odaların yıkılan ana tonozu taşıyan duvarlara birleşim bölgelerinde, yıkılan kubbe ve tonoz çevrelerinde ve küçük odaların üzerini örten diğer tonozlara nazaran daha basık olan tonozlarda çekme gerilmeleri görülmektedir.

Maksimum çekme gerilmelerinin görüldüğü lokal bölgeler dışında çekme gerilmeleri malzemenin çekme dayanımı olan 1,3 MPa'dan oldukça küçüktür.



şekil 5.28: G yüklemesi altında deplasman (mm).



Şekil 5.29: G yüklemesi altında deplasman (mm).

Deplasmanları irdelendiğinde, ana kubbe tepe noktasının maksimum deplasman olduğu ve bu deplasman değerinin 1,26 mm mertebesinde olduğu görülmektedir.

Yapılan statik analizler neticesinde Öşki Kilisesi'nin ölü yükler etkisinde güvenlik sınırları içerisinde olduğu ve yapının statik açıdan güvende olduğu belirlenmiştir.

5.6. Dinamik Analiz

Eşdeğer deprem yükü yönteminde, yapının birinci modu göz önünde bulundurulmaktadır. Katlara etkiyen deprem kuvvetleri, kat yükseklikleri ve kat kütleleri ile orantılıdır. Mod birleştirme yönteminde, toplam deprem kuvvetini bulurken her bir serbest titreşim modunun deprem hareketine katkısı dikkate alınır. Bu toplam kuvvetin katlara dağıtılması sırasında ilgili olan mod şekilleri esastır.

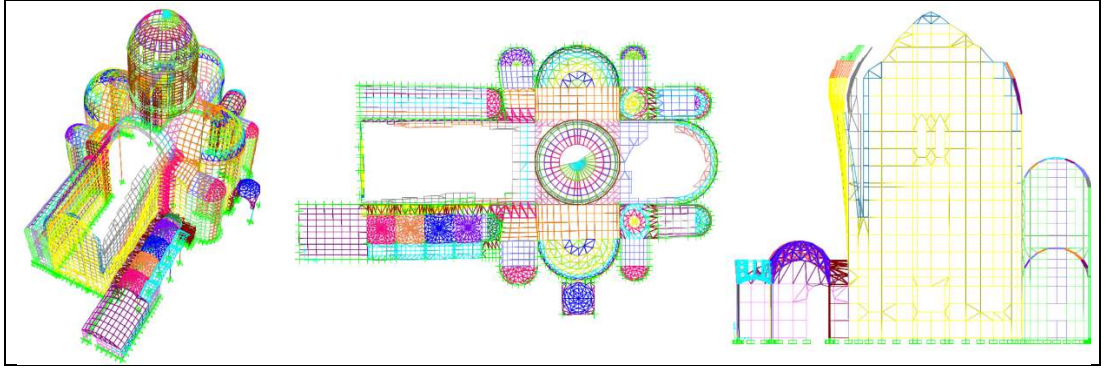
Kütle katılım oranı, yapının toplam kütlelerinin hangi oranlarda hesaba katılarak salınım hareketine ne kadarının dahil edilebileceğini anlatmaktadır. Bu da serbest titreşim periyoduna sahip mod şeklindeki titreşimle olur. Türk Deprem Yönetmeliği'nde etkin kütle olarak tarif edilen modal kütlelerin toplamı için asgari bir değer belirtilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) kütle katılım oranının % 95'i geçmesi istenmiştir.

Deprem hesabı için ilk olarak yapıda mod birleştirme yöntemiyle analizler yapılmıştır. Karelerin toplamının karekökü yönteminde (SRSS) 400 mod göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ilk 10 mod şekilleri Şekil 5.30-5.41’de verilmiştir. Tablo 5.4’de modlara ait periyotlar ve kütle katılım oranları görülmektedir.

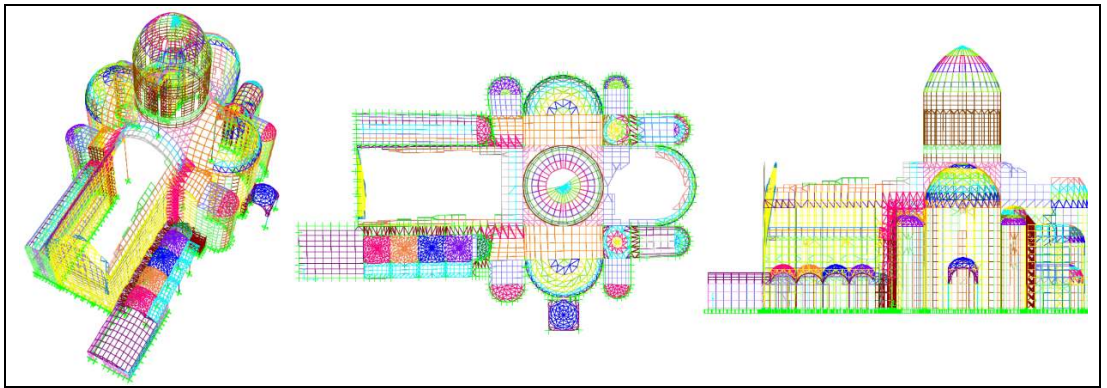
Kütle katılım oranı, ilk 20 modda %70’ e ulaşmıştır. X yönü hakim periyot 9. mod, Y yönlü hakim periyot ise 5. moddur.

Tablo 5.4: Modlara ait periyotlar ve kütle katılım oranları.

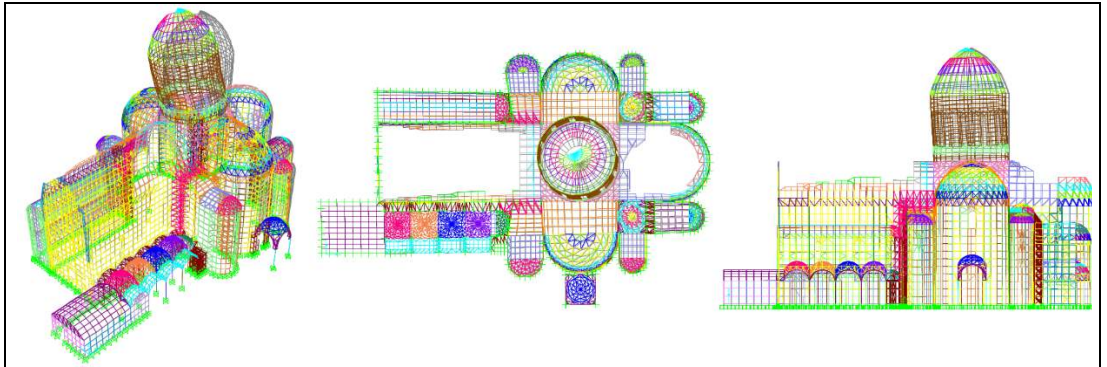
MOD	PERİYOT	X DOĞRULTUSU TOPLAM KÜTLE KATILIM ORANI	Y DOĞRULTUSU TOPLAM KÜTLE KATILIM ORANI
1	0.185434	0.0006063	0.06437
2	0.174539	0.02385	0.06967
3	0.156246	0.04851	0.25
4	0.152802	0.15	0.29
5	0.107793	0.15	0.55
6	0.09242	0.16	0.55
7	0.090707	0.16	0.55
8	0.085571	0.28	0.58
9	0.084954	0.55	0.6
10	0.081157	0.55	0.61
11	0.075257	0.57	0.61
12	0.072299	0.59	0.63
13	0.068545	0.59	0.64
14	0.065351	0.6	0.64
15	0.062028	0.6	0.64
16	0.061595	0.62	0.64
17	0.060486	0.63	0.67
18	0.0595	0.65	0.67
19	0.05785	0.65	0.7
20	0.056555	0.65	0.7
50	0.032504	0.76	0.8
100	0.022134	0.86	0.88
150	0.017753	0.9	0.91
200	0.014827	0.92	0.92
250	0.012635	0.93	0.93
300	0.011314	0.94	0.93
350	0.010219	0.94	0.94
400	0.009407	0.95	0.95



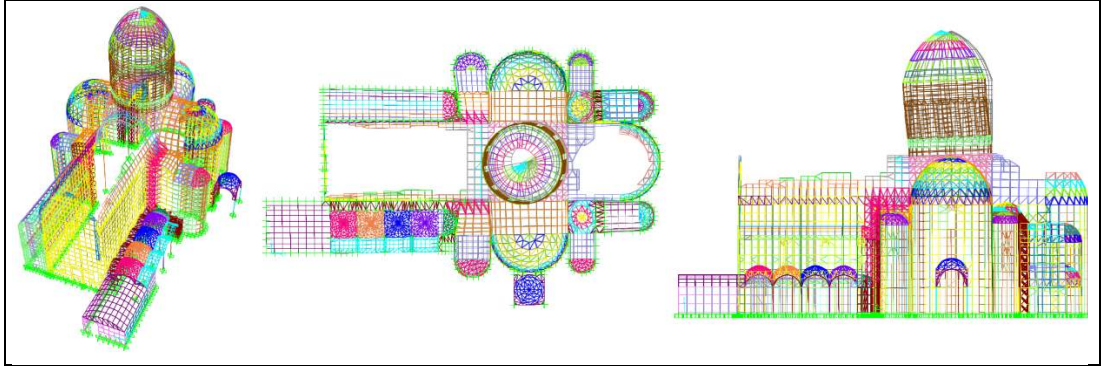
Şekil 5.30: Mod 1.



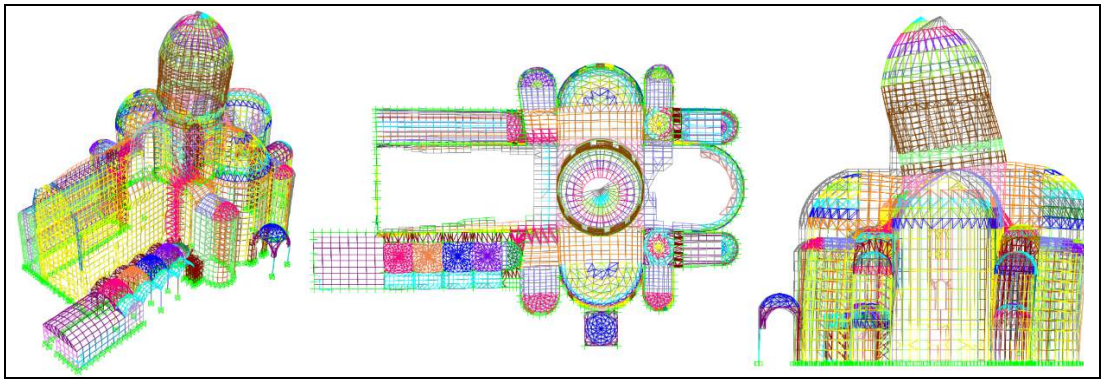
Şekil 5.31: Mod 2.



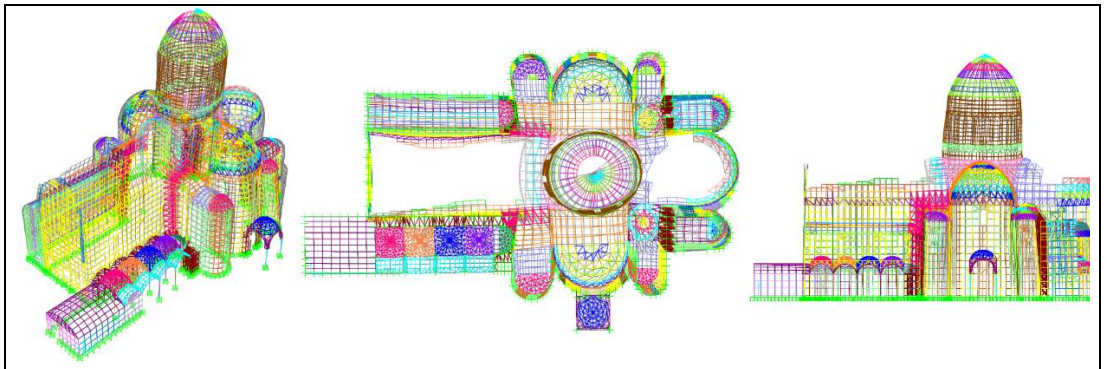
Şekil 5.32: Mod 3.



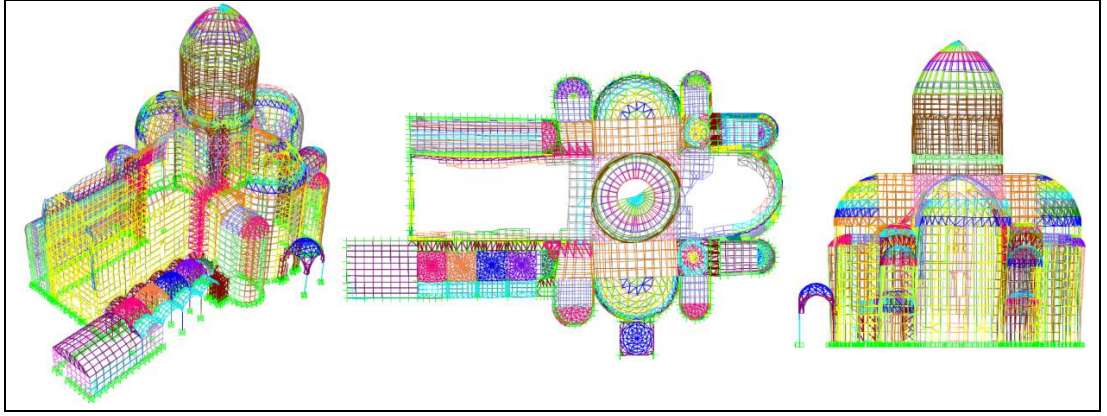
Şekil 5.33: Mod 4.



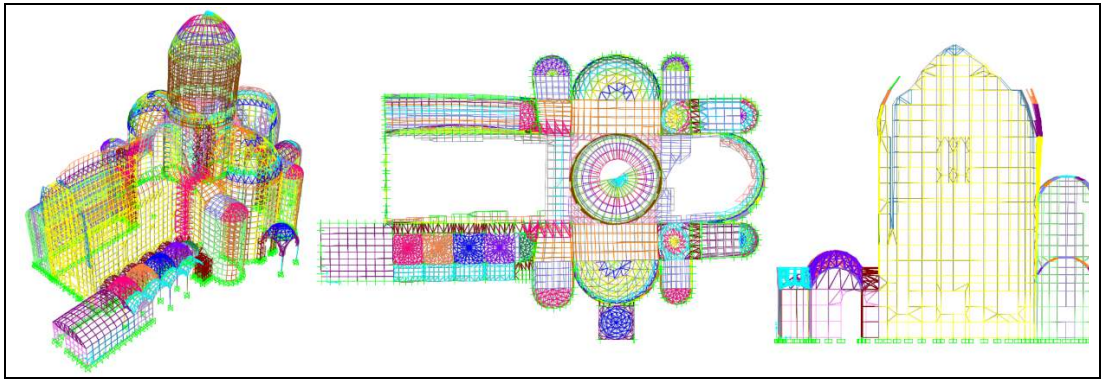
Şekil 5.34: Mod 5.



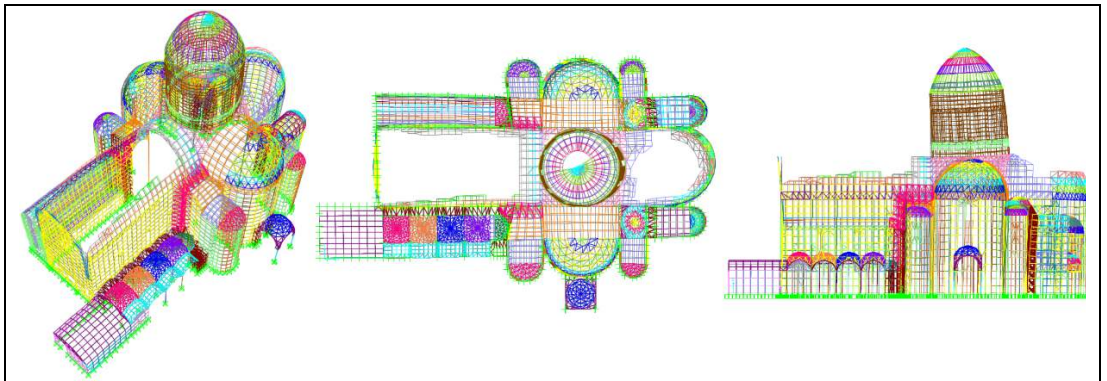
Şekil 5.35: Mod 6.



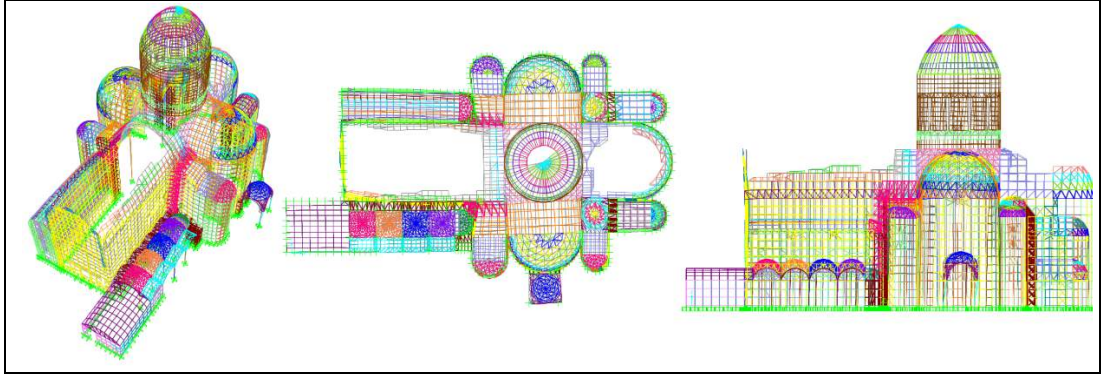
Şekil 5.36: Mod 7.



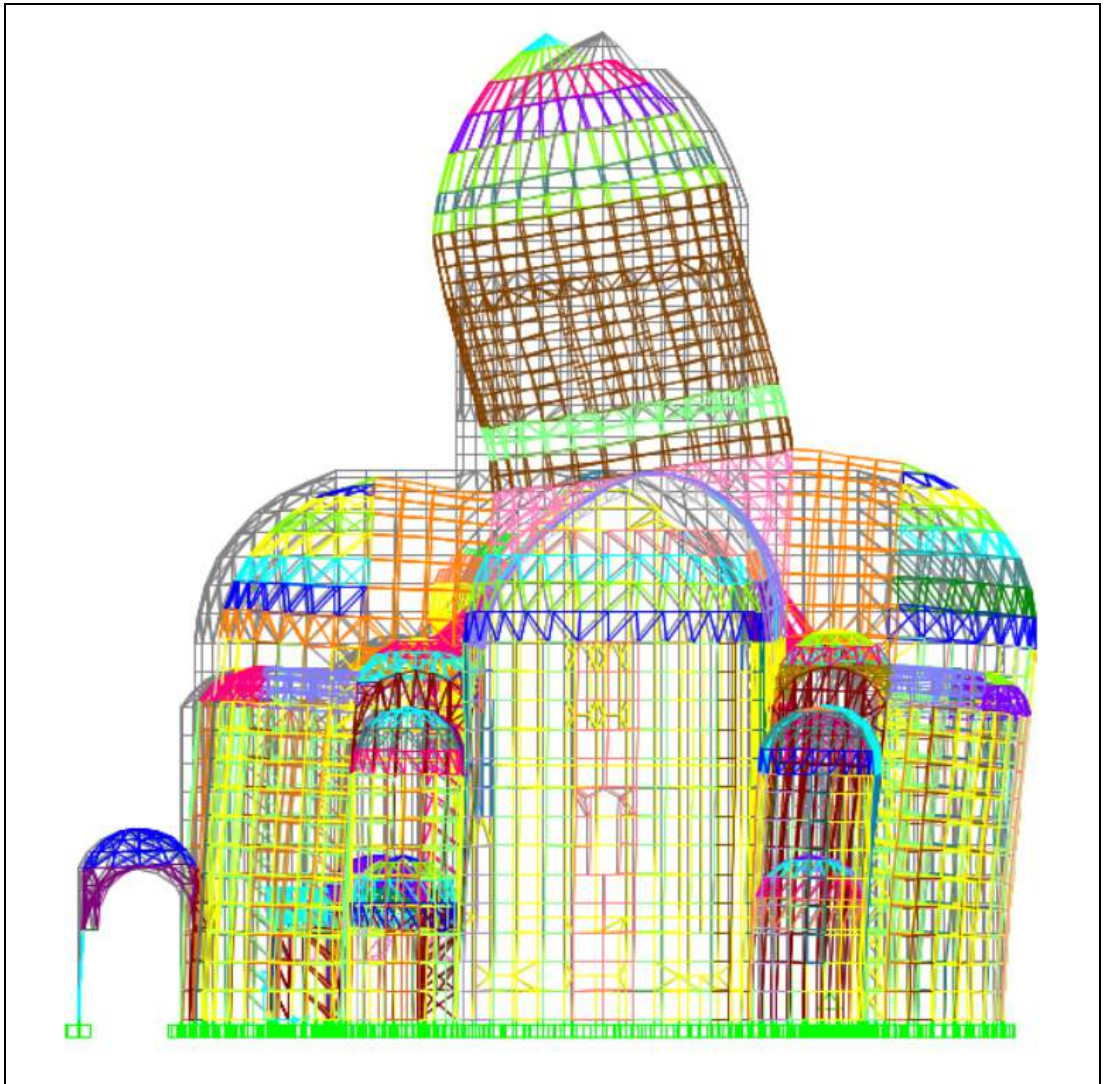
Şekil 5.37: Mod 8.



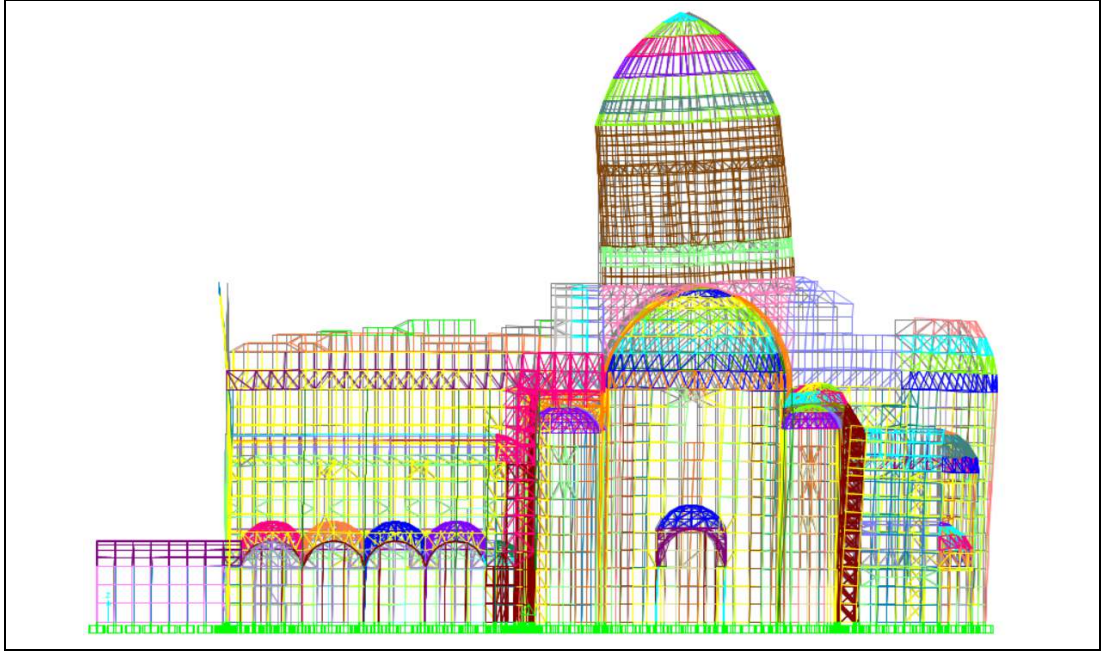
Şekil 5.38: Mod 9.



Şekil 5.39: Mod 10.



Şekil 5.40: Mod 5, Y doğrultusunda hareket (1. hakim periyot).

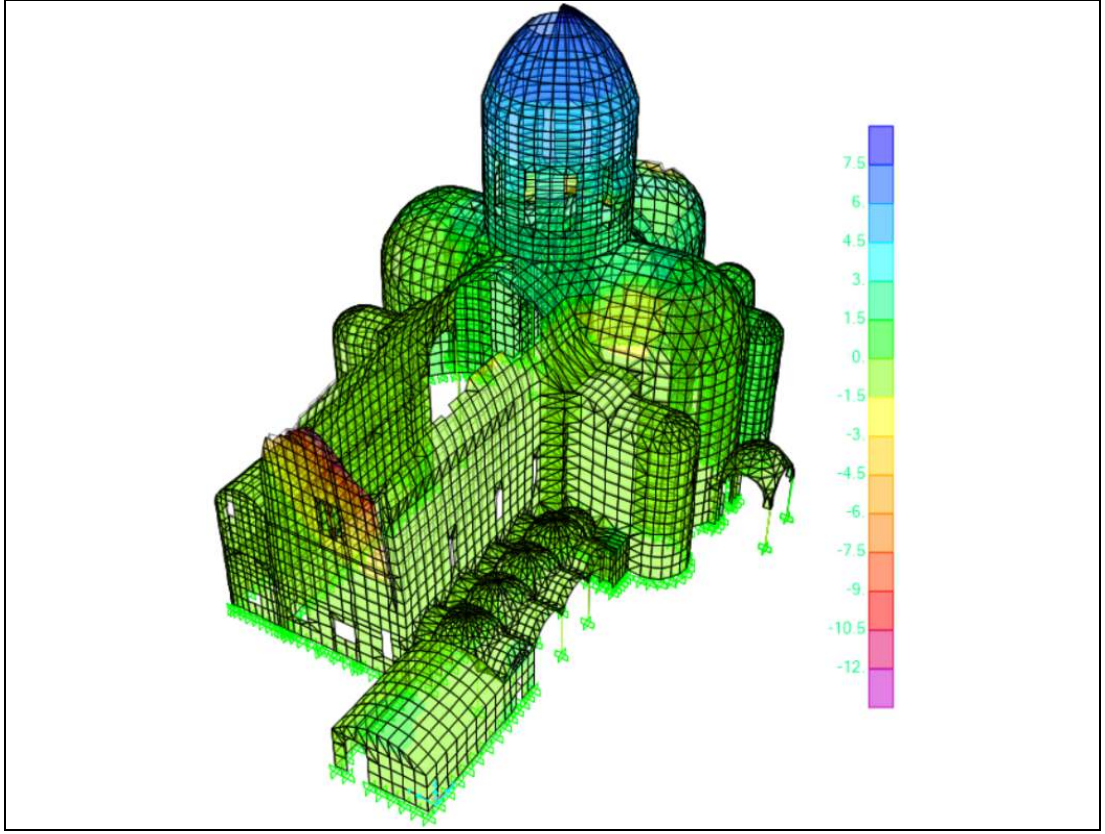


Şekil 5.41: Mod 9, X doğrultusunda hareket (2. hakim periyot).

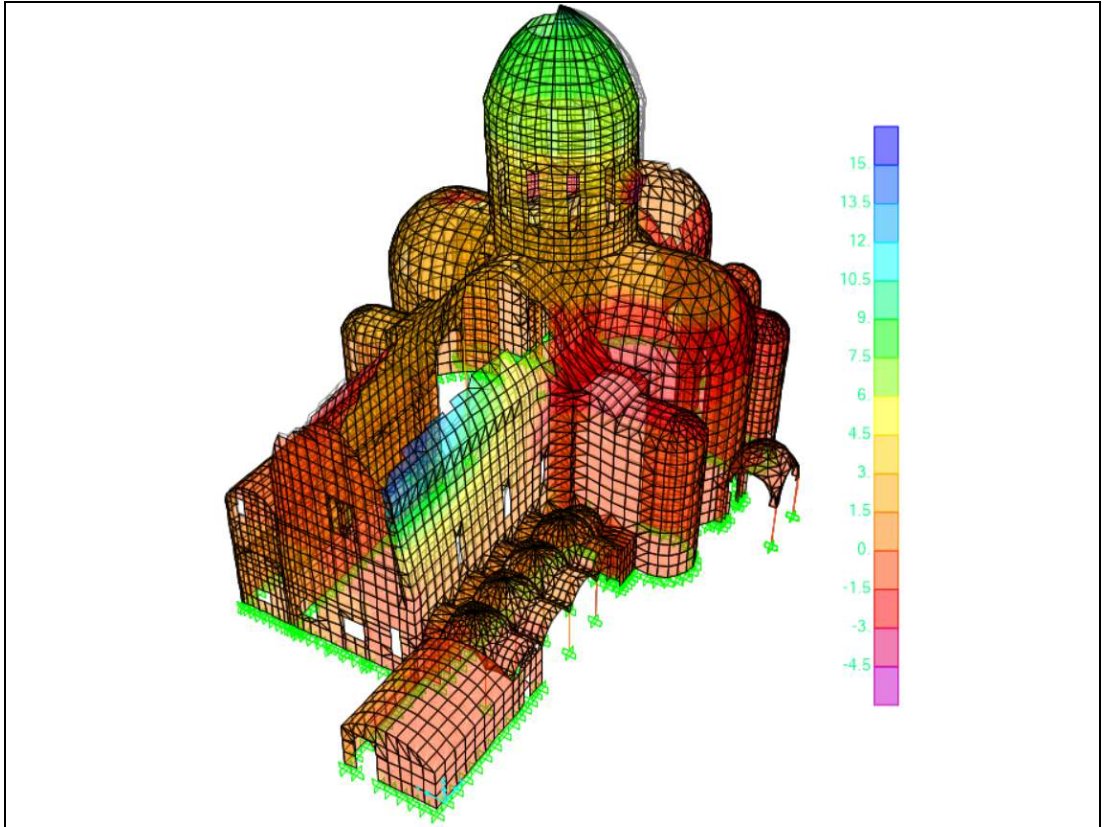
Analiz neticesinde zati yük ve X doğrultusundaki deprem yükü altında X yönündeki maksimum deplasman kubbe tepe noktası ve düzlem dışı hareket yapan duvarın üst noktasında görülmüştür. D+EX-DD1 yüklemesi altındaki X yönü deplasmanları Şekil 5.42’de verilmiştir. Kubbe tepe noktası maksimum deplasmanı 7,6mm, duvar tepe noktası maksimum deplasmanı ise 12,2mm’ dir.

Şekil 5.46-5.69’da D+EX-DD1, D+EY-DD1, D+EX-DD2, D+EY-DD2 kombinasyonları için çekme, basınç ve kayma gerilme dağılımları ayrı ayrı verilmiştir. Bazı şekillerde gerilme oranlarının belli aralıklarda sınırlandırılmasının nedeni, yapının yıkılmış olan bölümlerinden dolayı bölgesel olarak yüksek çıkan gerilmeleri renk konturlerinin dışında bırakmak istenmesidir. Bu şekilde yapının genelinin gerilme dağılımı daha kolay incelenmesi sağlanmıştır.

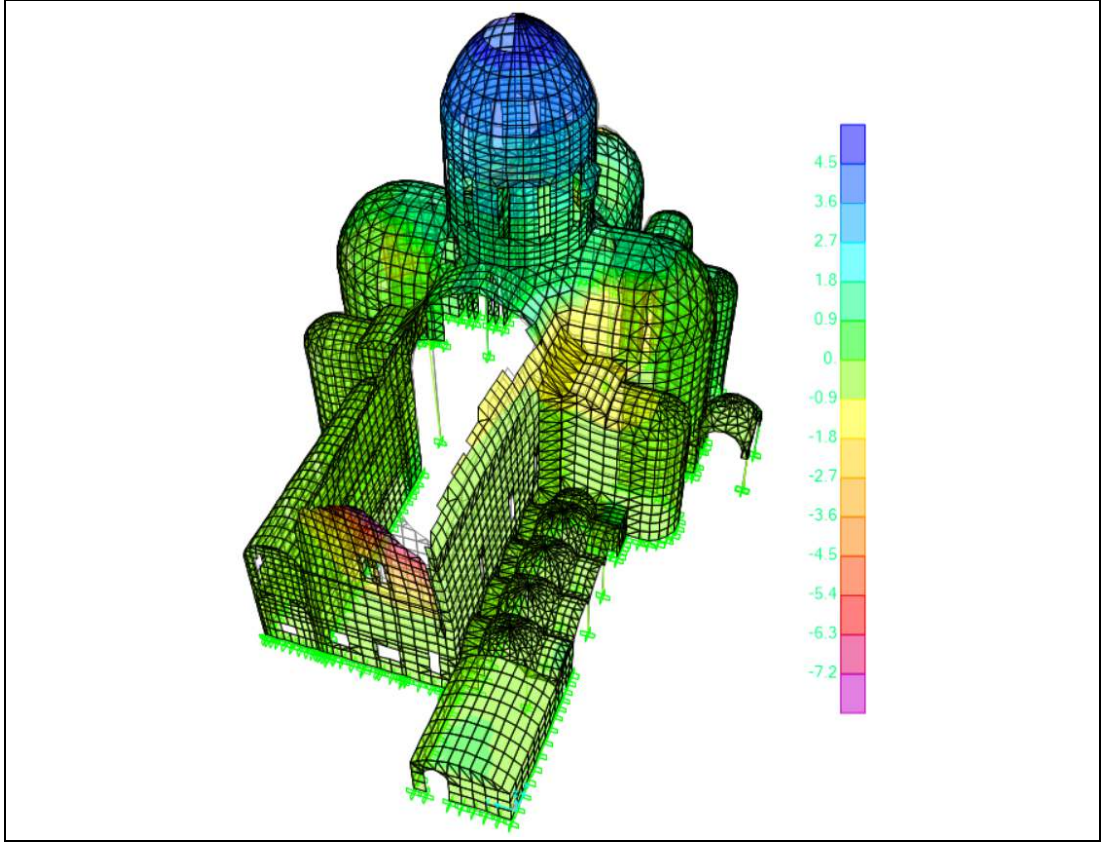
Öşki Kilisesi’nde oluşan maksimum gerilmeler yıkılan bölgelerinde veya çevrelerinde olduğu görülmektedir. Bu gerilmelerin olduğu eleman sayısı, yapının genel eleman sayısı ile kıyaslandığı zaman çok azdır. Lokal olarak oluşan maksimum basınç gerilmesi 9,6 MPa, maksimum çekme gerilmesi 8,6 MPa, maksimum kayma gerilmesi ise 8,8 MPa’dır. Bu lokal bölgeler göz ardı edildiği durumda ise yapının maksimum basınç gerilmesi 6 MPa, maksimum çekme gerilmesi 5,6 MPa, maksimum kayma gerilmesi ise 0,9 MPa’dır. Hesaplanan değerlerden çekme ve kayma gerilmeleri dayanımı aştığı saptanmıştır.



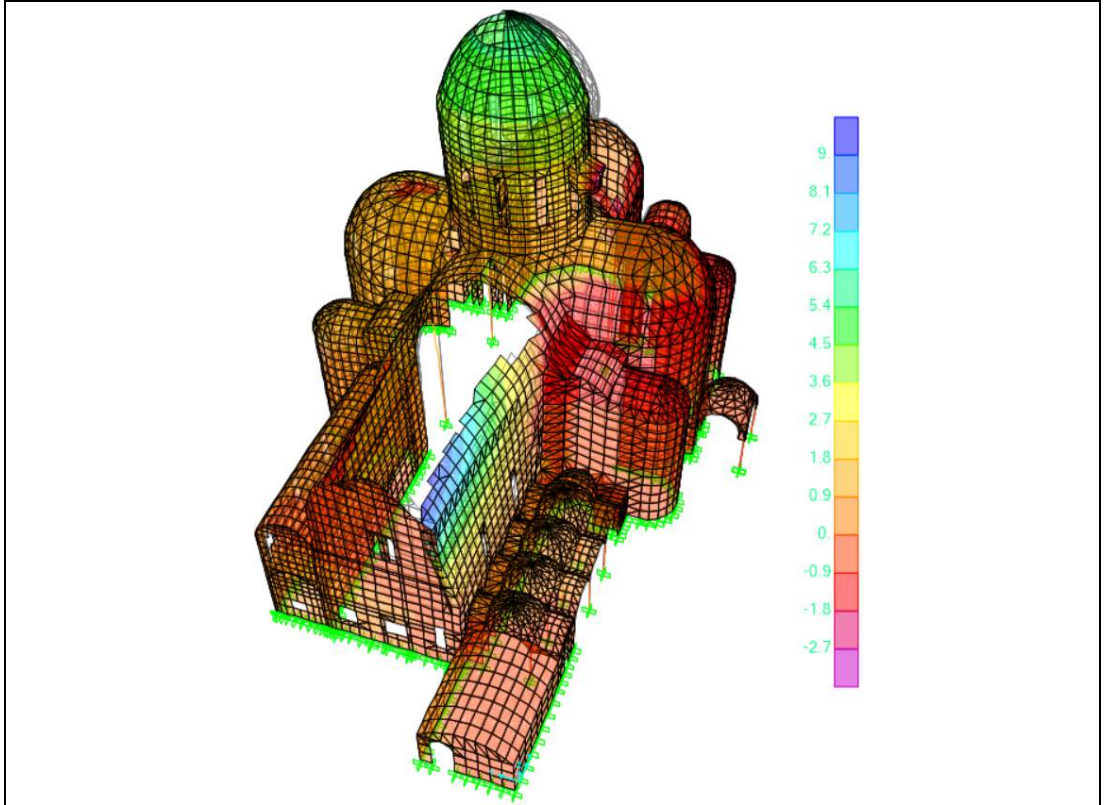
Şekil 5.42: (D+EX) DD-1 için X yönü deplasmanı (mm).



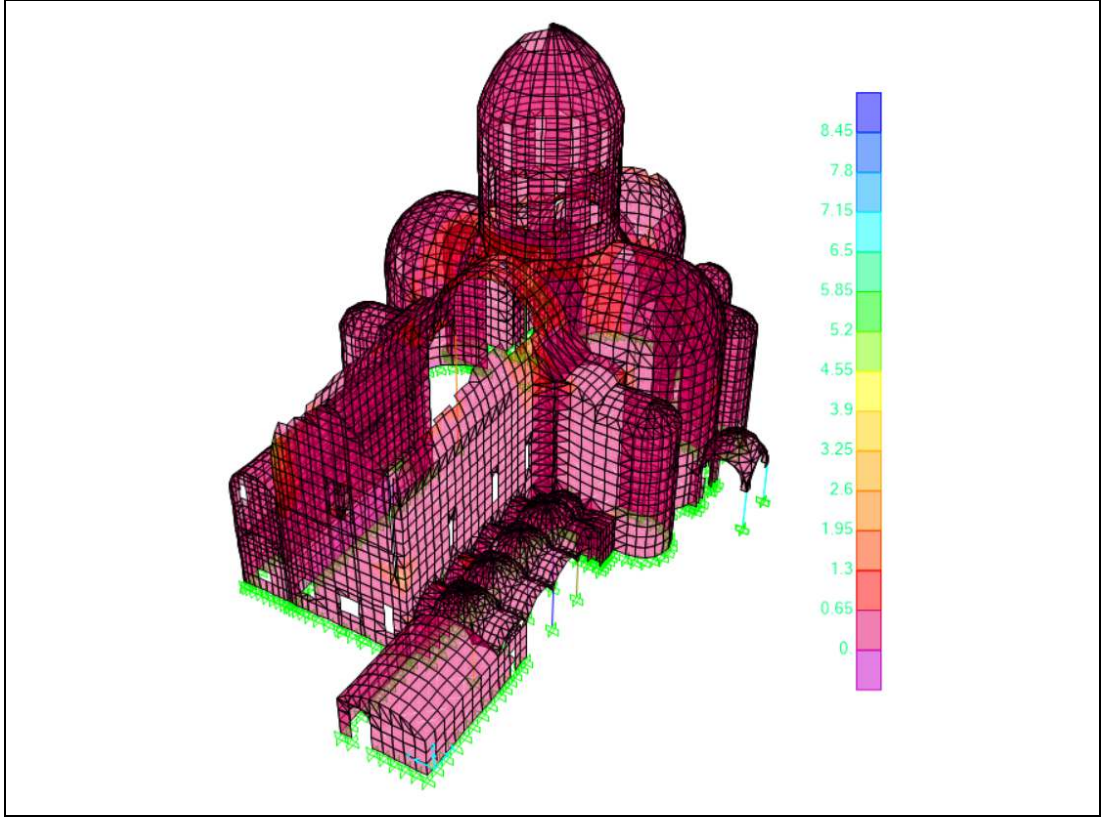
Şekil 5.43: (D+EY) DD-1 için Y yönü deplasmanı (mm).



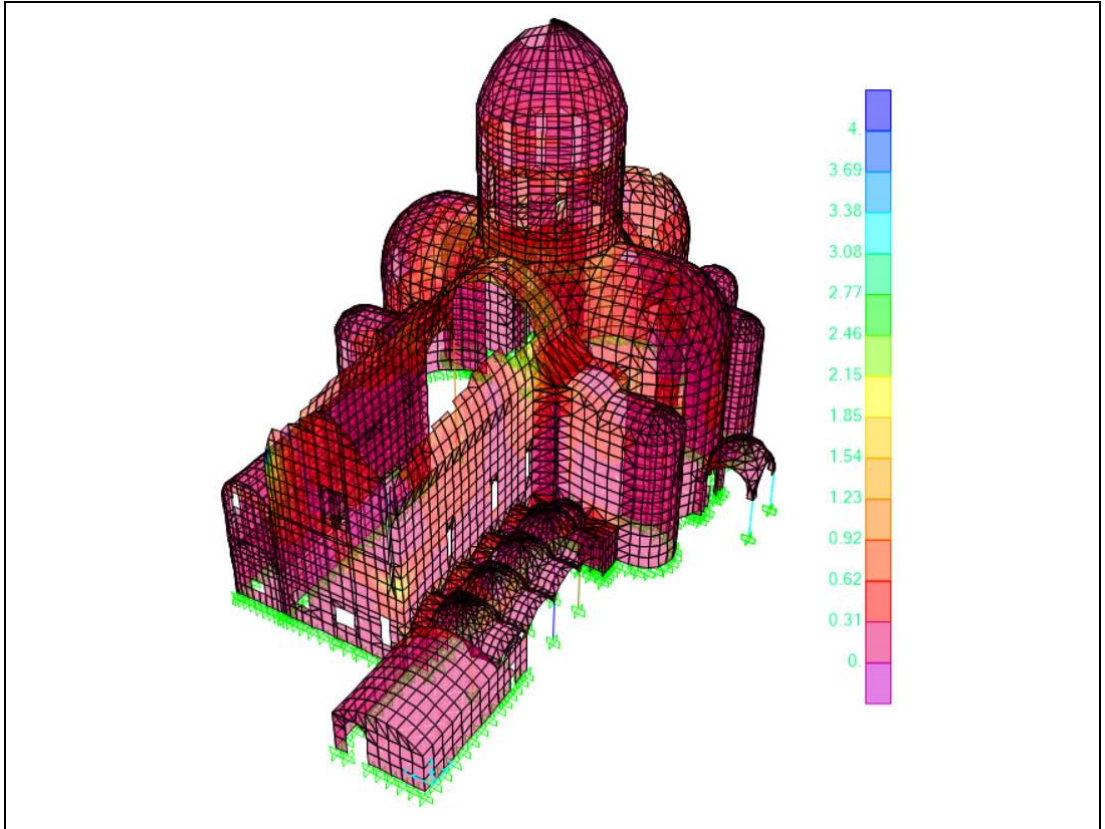
Şekil 5.44: (D+EX) DD-2 için X yönü deplasmanı (mm).



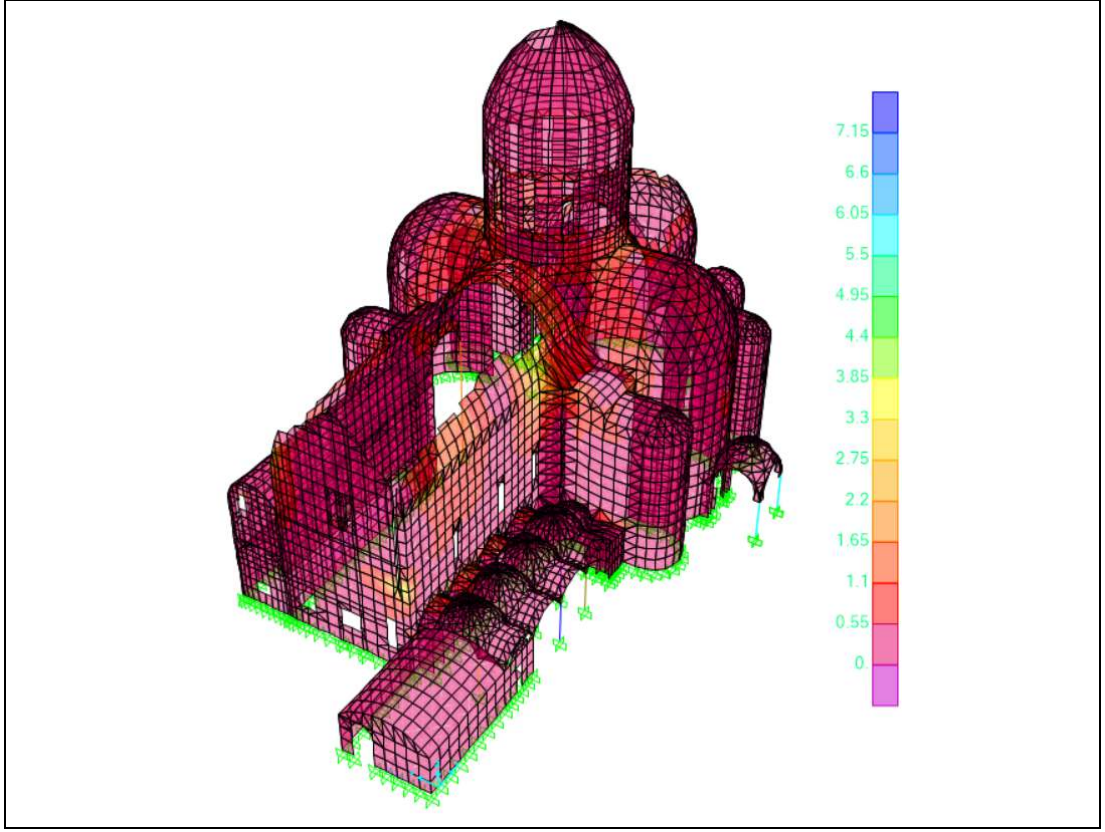
Şekil 5.45: (D+EY) DD-2 için Y yönü deplasmanı (mm).



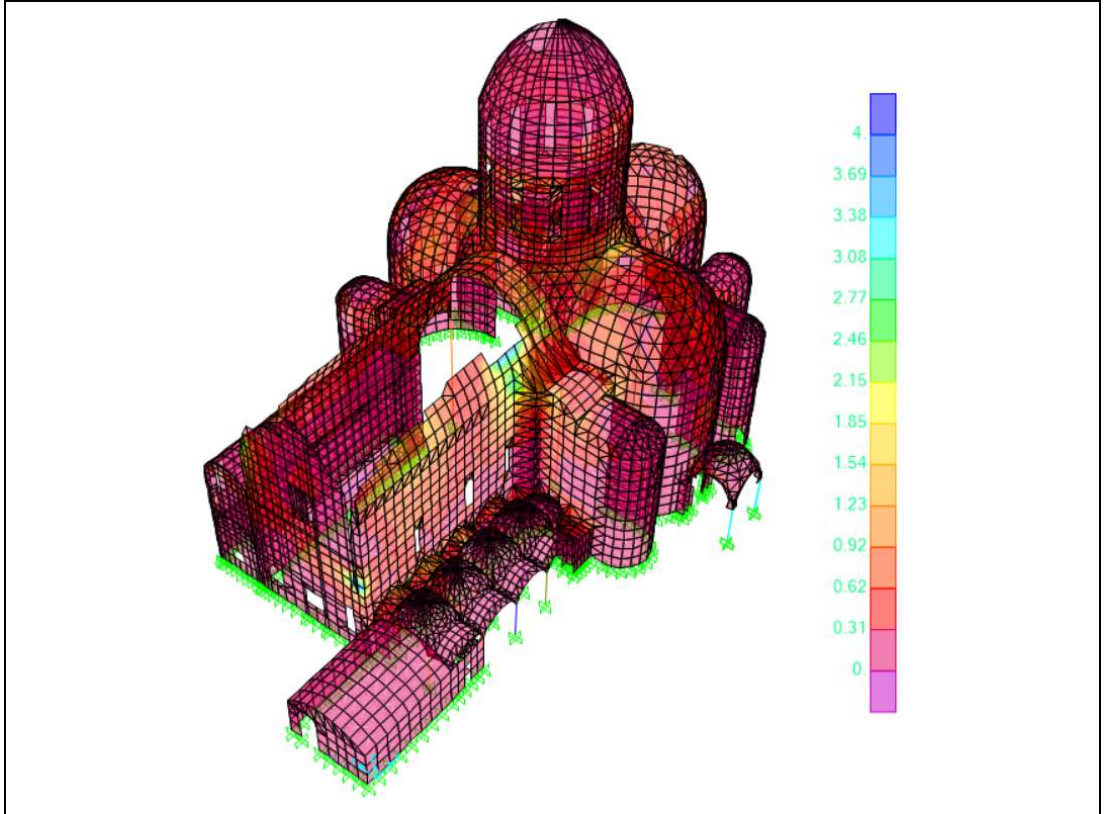
Şekil 5.46: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi (N/mm²).



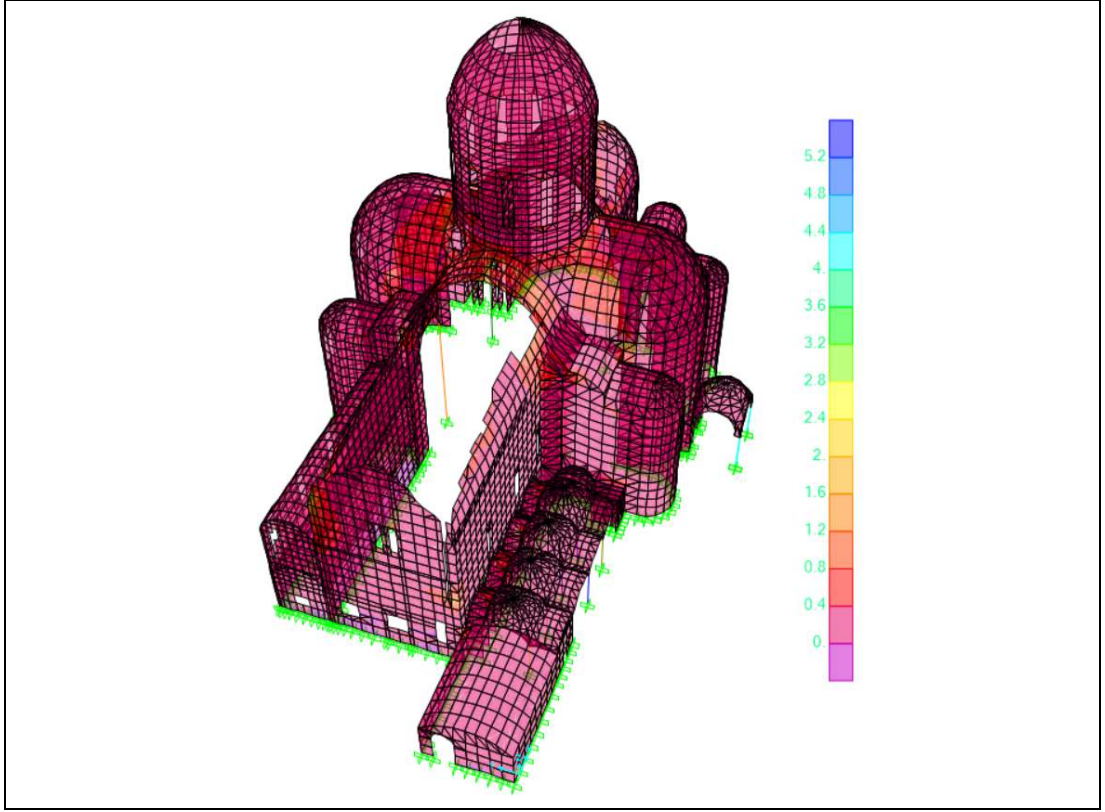
Şekil 5.47: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.



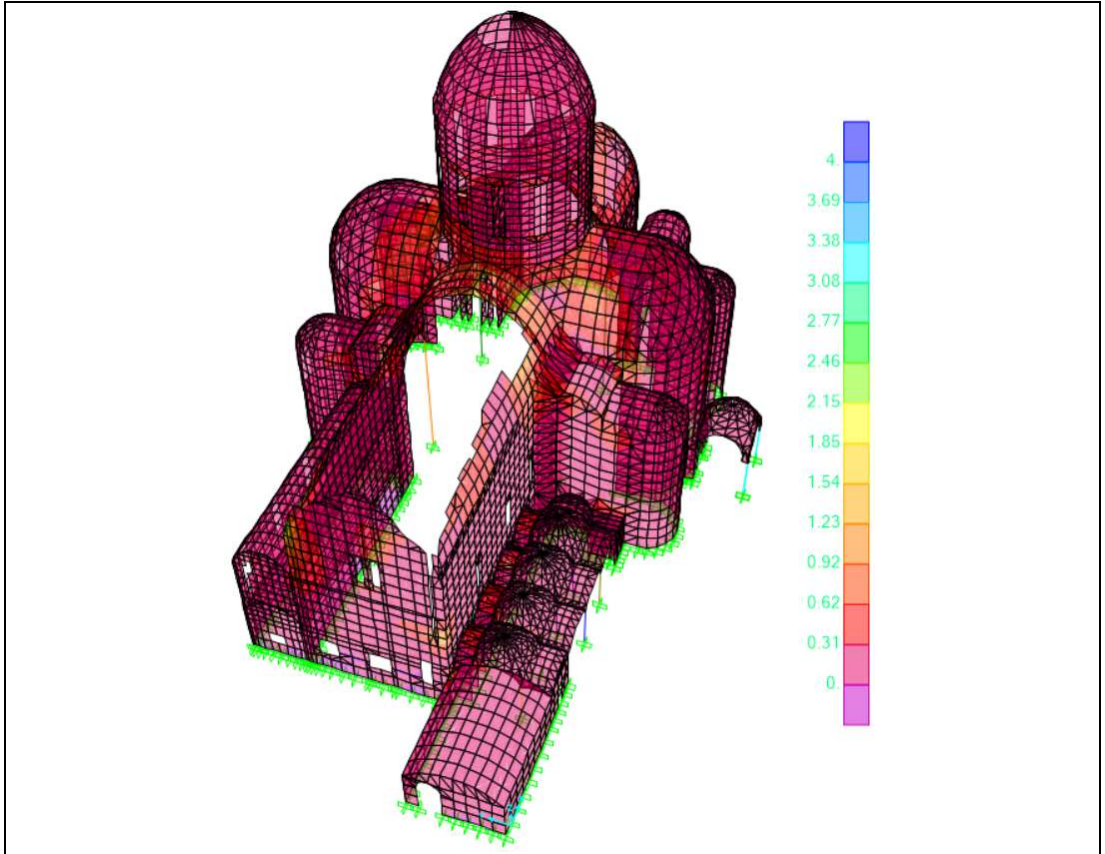
Şekil 5.48: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi (N/mm²).



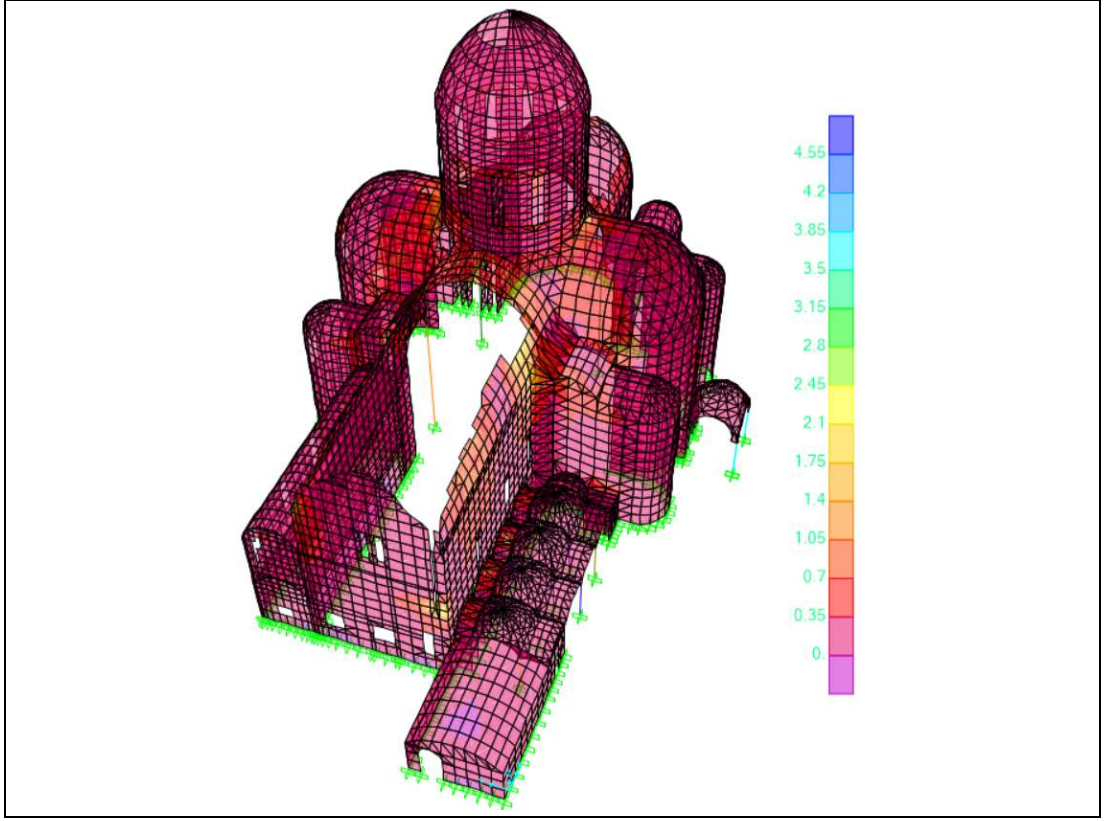
Şekil 5.49: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.



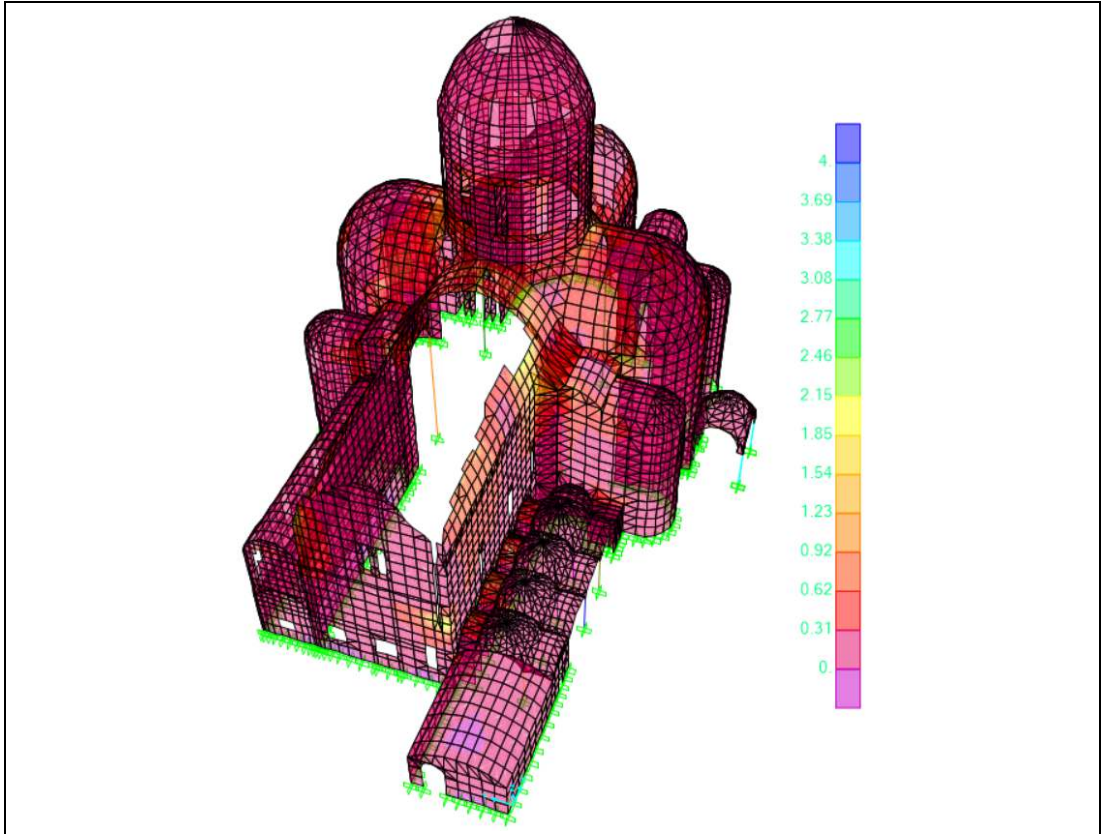
Şekil 5.50: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi (N/mm²).



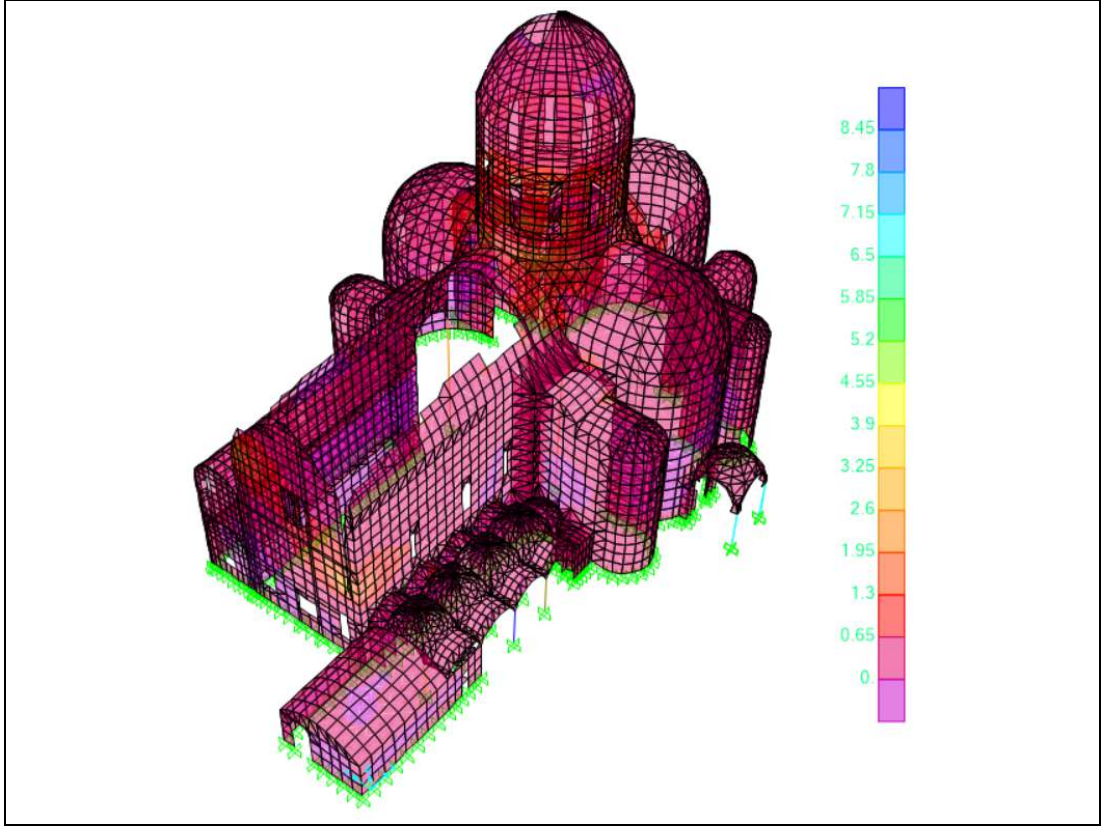
Şekil 5.51: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.



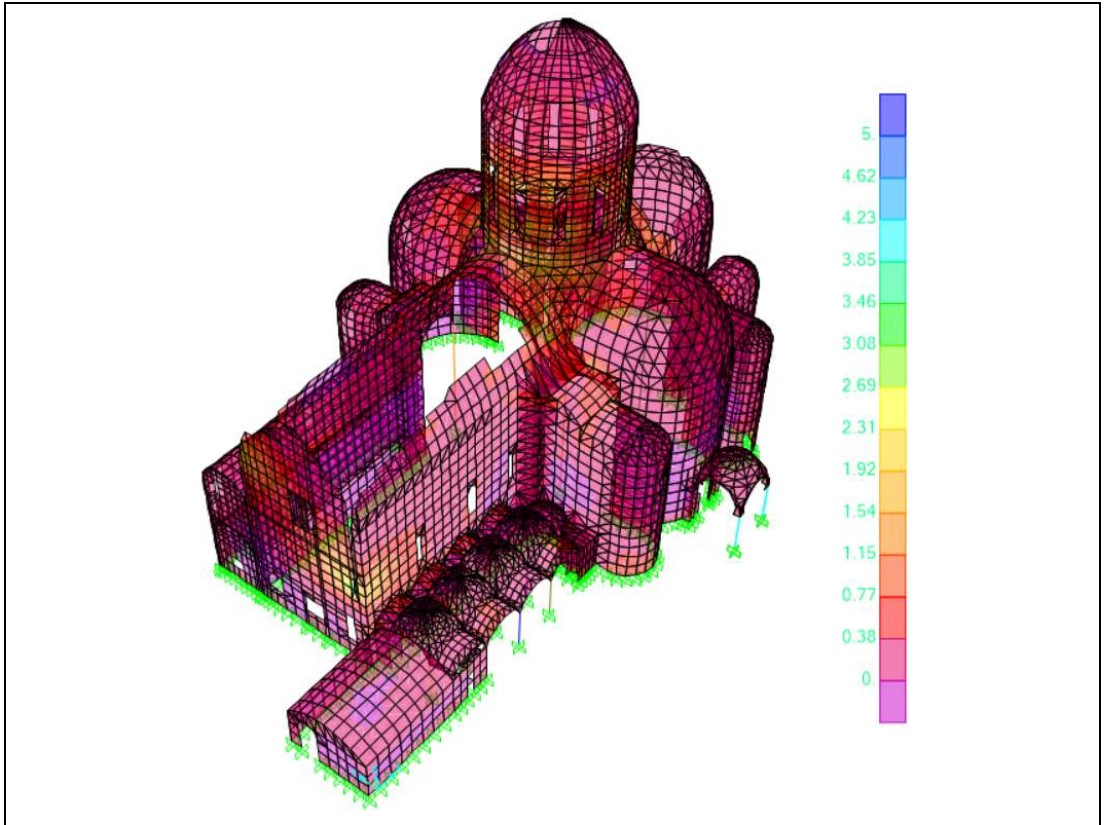
Şekil 5.52: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi (N/mm²).



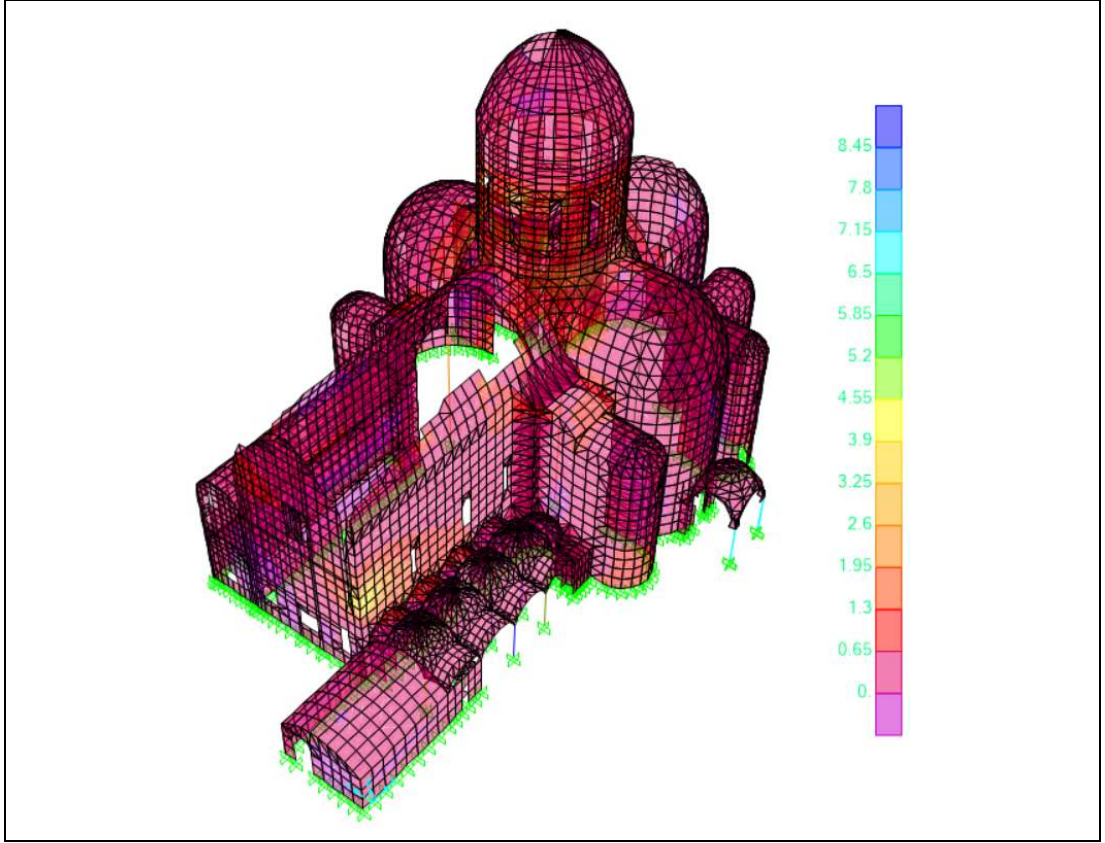
Şekil 5.53: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S11 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.



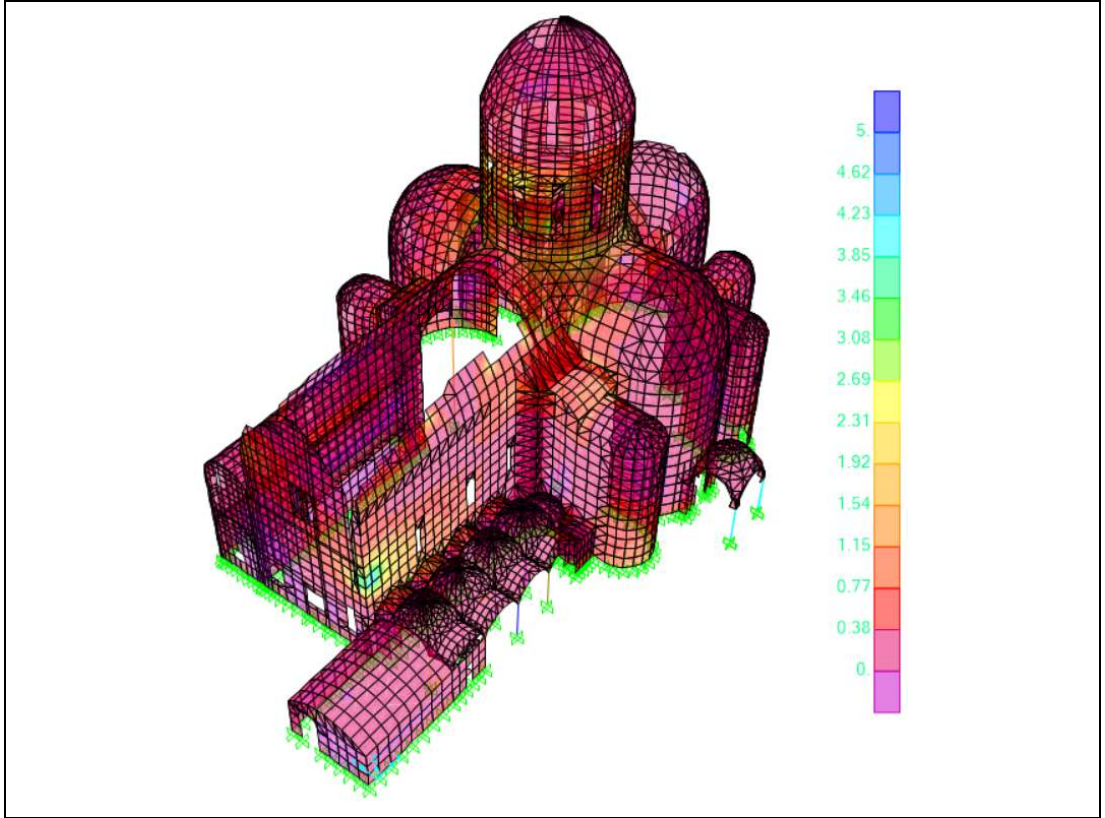
Şekil 5.54: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi (N/mm²).



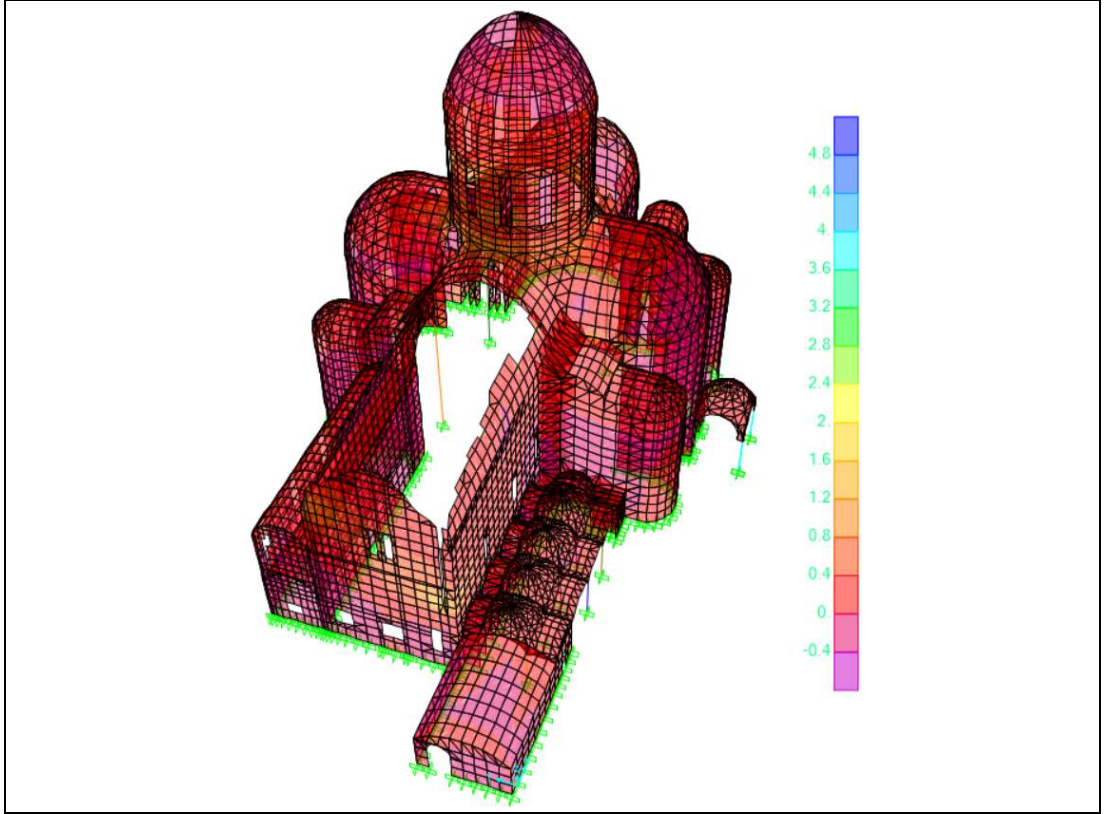
Şekil 5.55: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi 0-5 N/mm² aralığı.



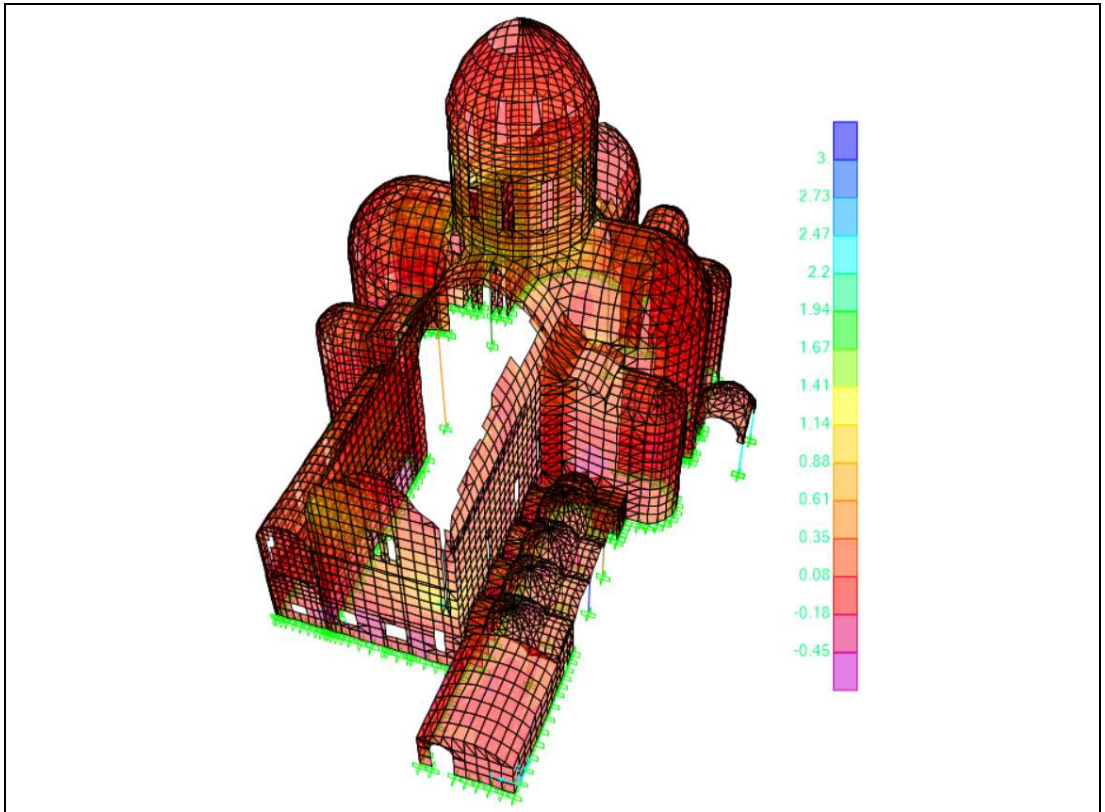
Şekil 5.56: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi (N/mm²).



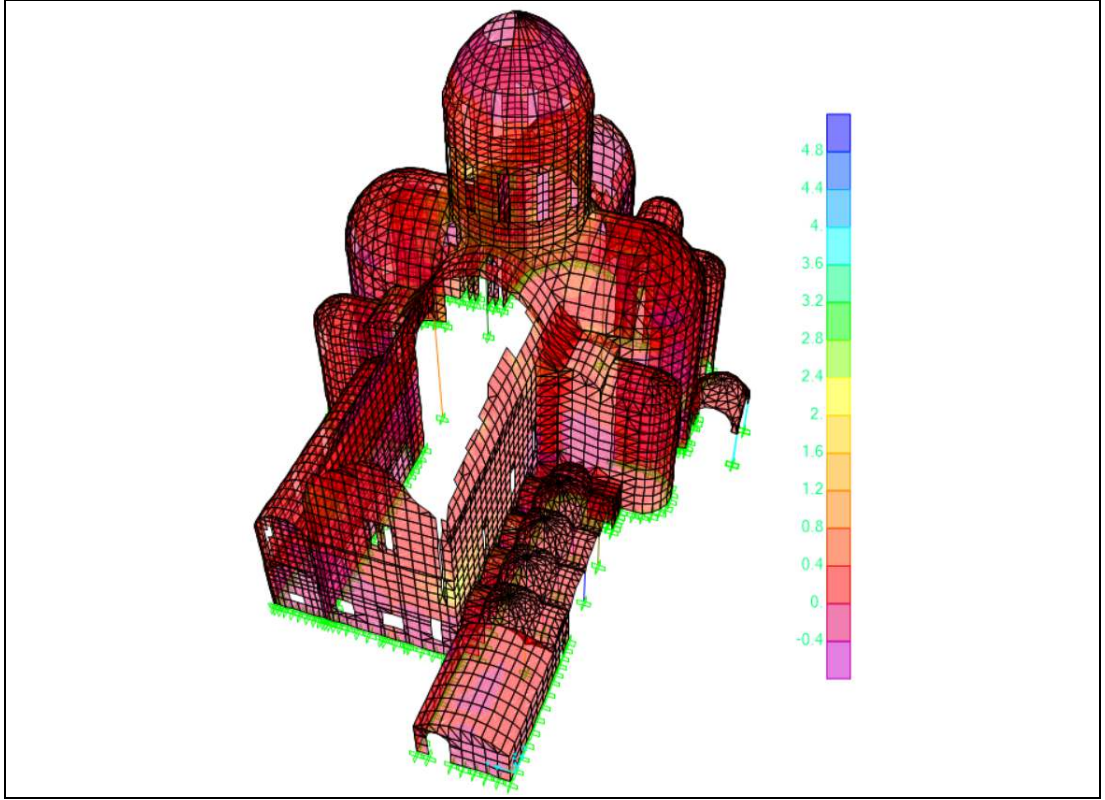
Şekil 5.57: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S22 gerilmesi 0-5 N/mm² aralığı.



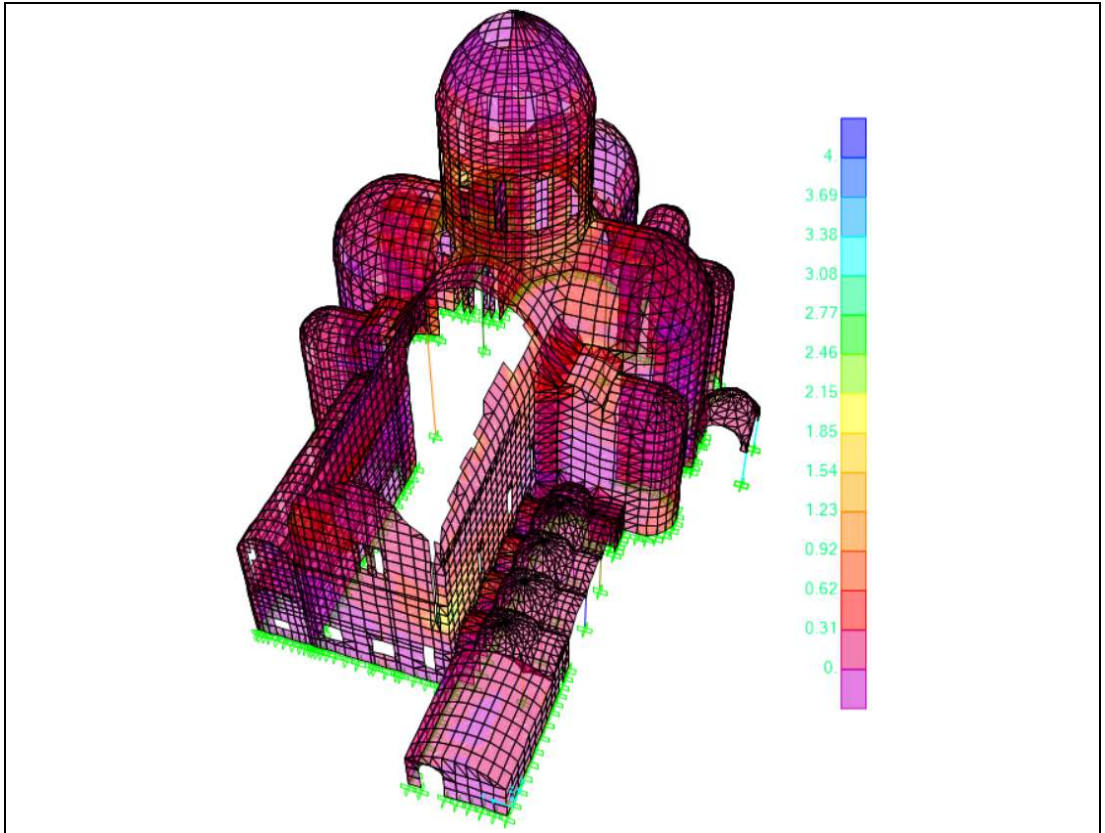
Şekil 5.58: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi (N/mm^2).



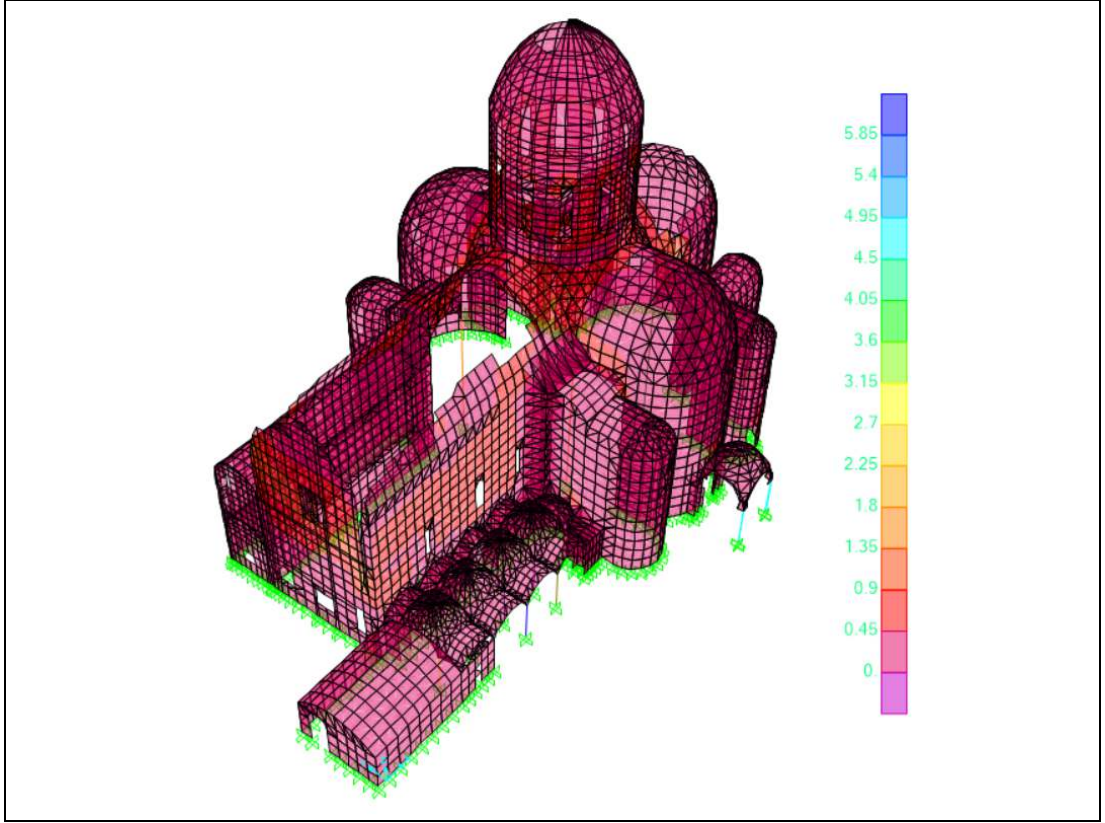
Şekil 5.59: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi $-0,45 \text{ N/mm}^2$ - 3 N/mm^2 aralığı (N/mm^2).



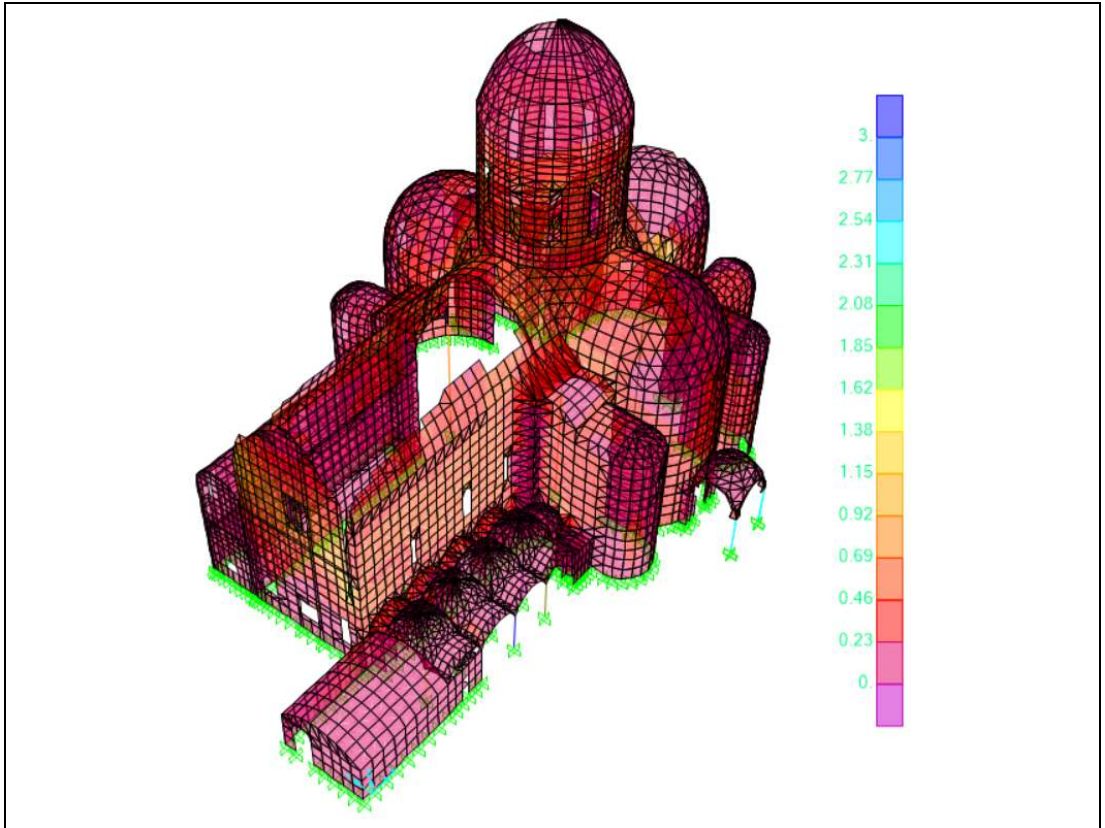
Şekil 5.60: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi (N/mm²).



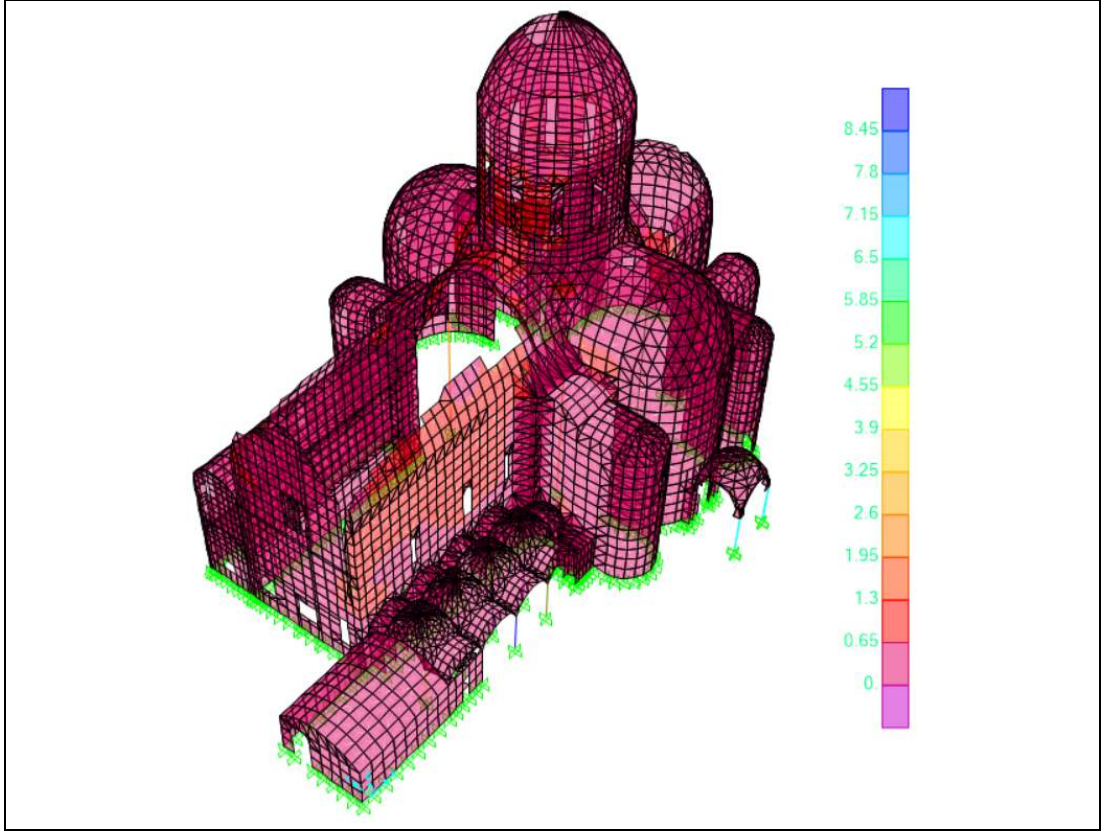
Şekil 5.61: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S22 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.



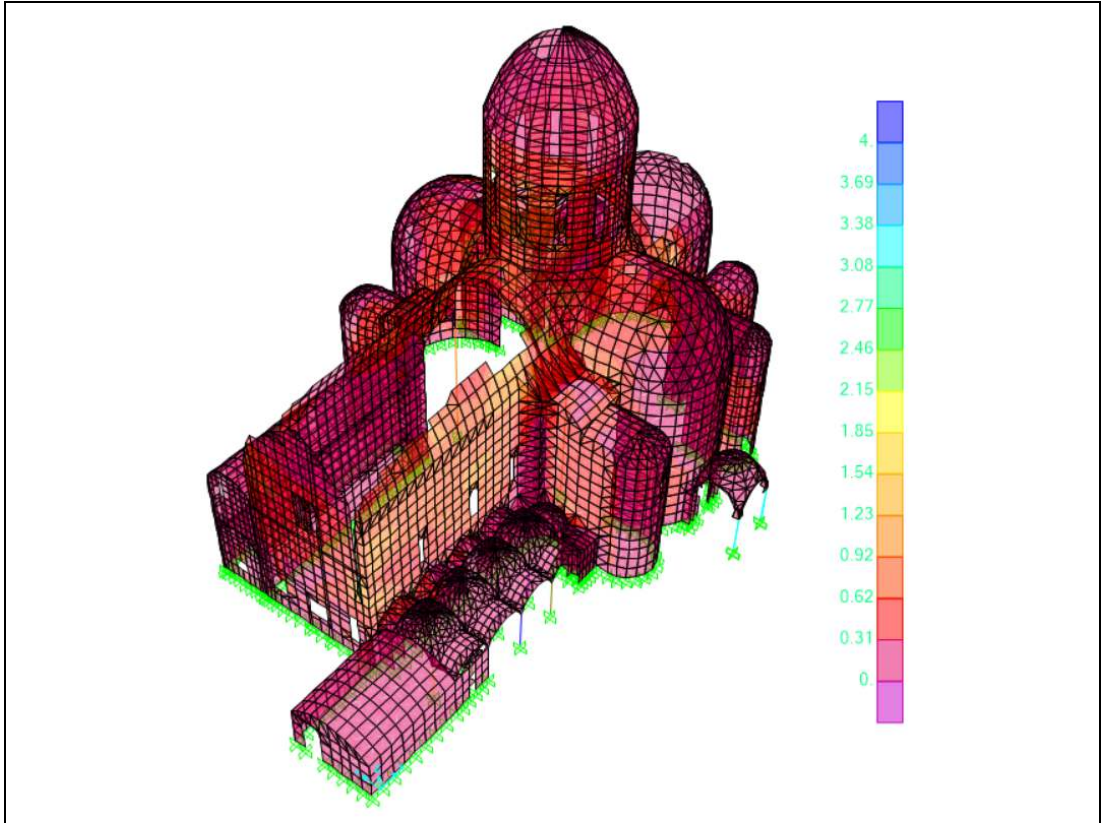
Şekil 5.62: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi (N/mm²).



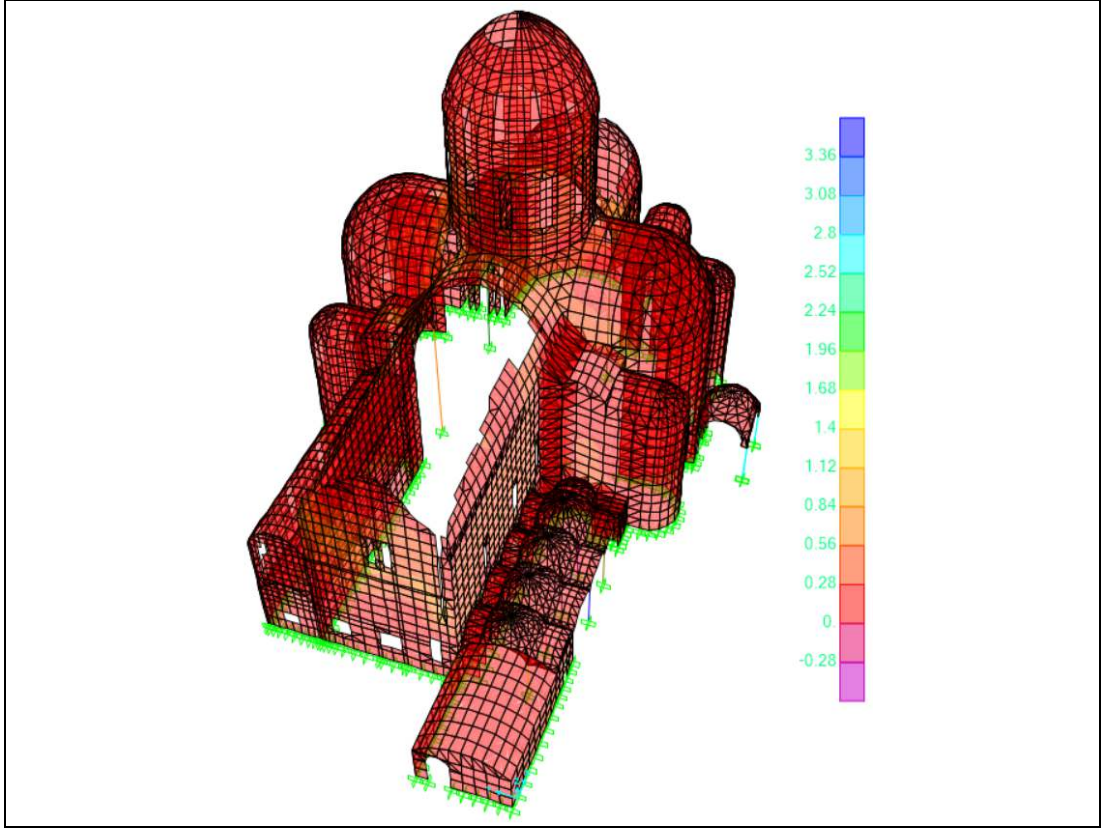
Şekil 5.63: (D+EX) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-3 N/mm² aralığı.



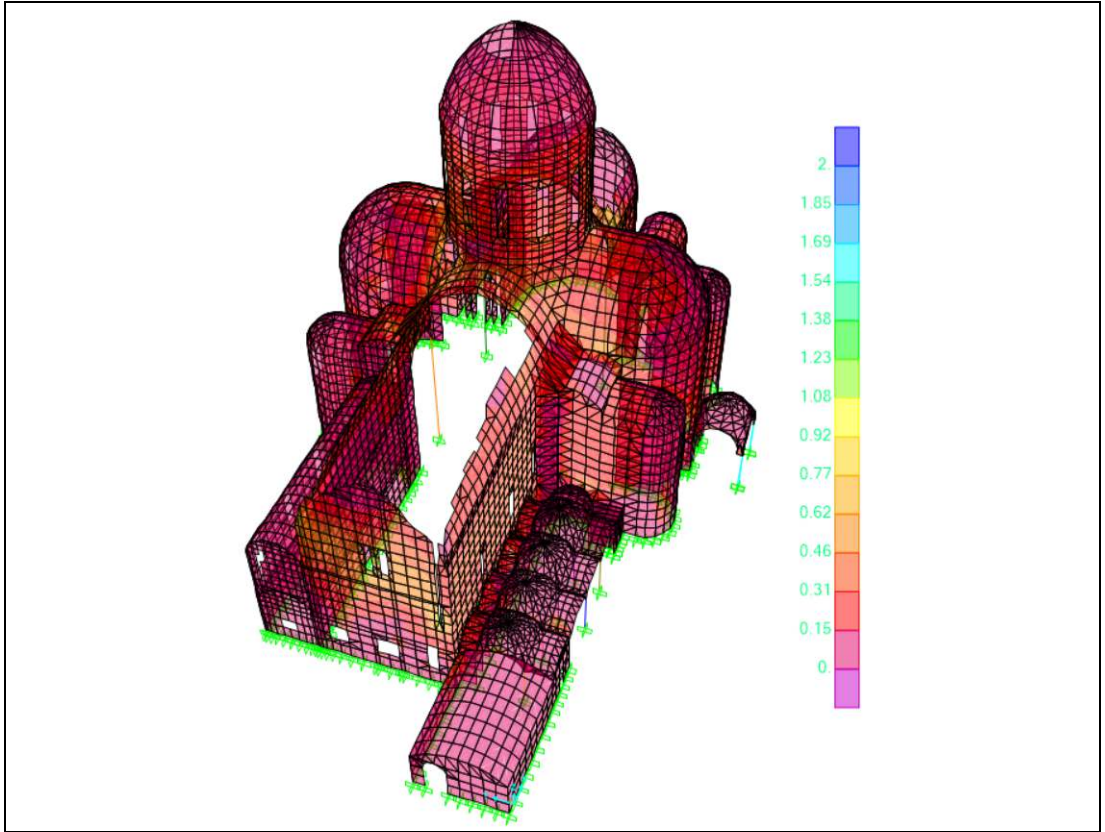
Şekil 5.64: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi (N/mm²).



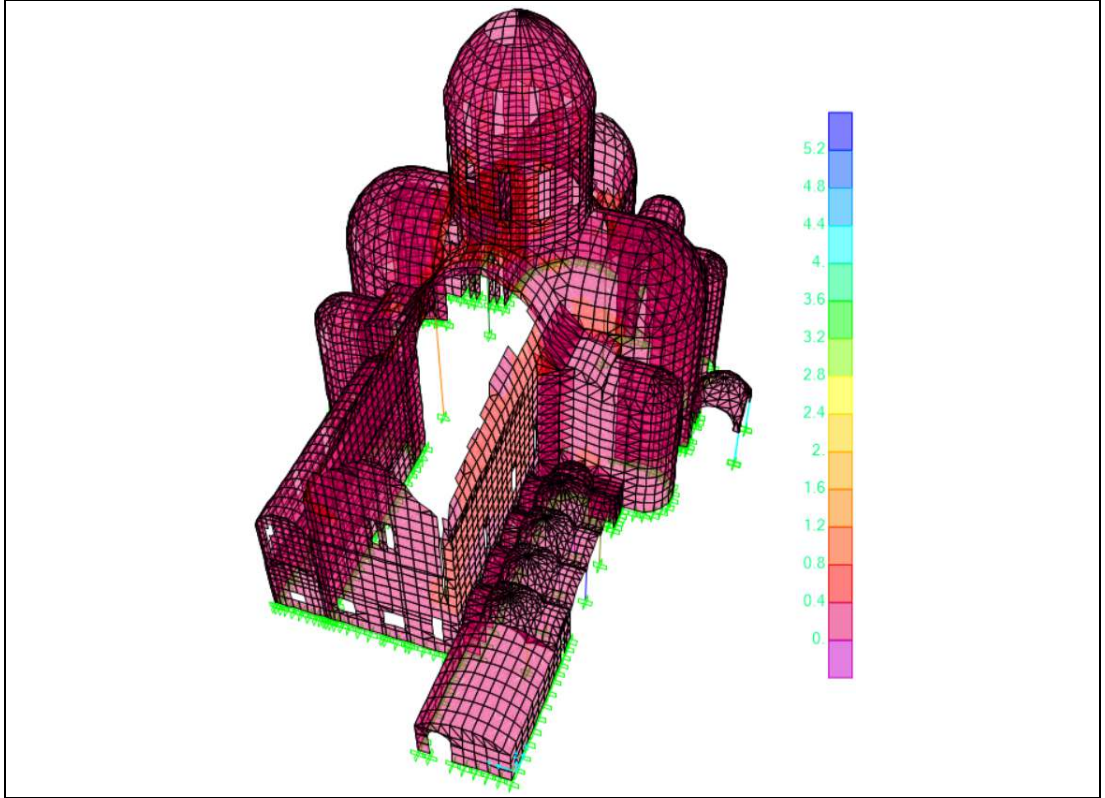
Şekil 5.65: (D+EY) DD-1 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.



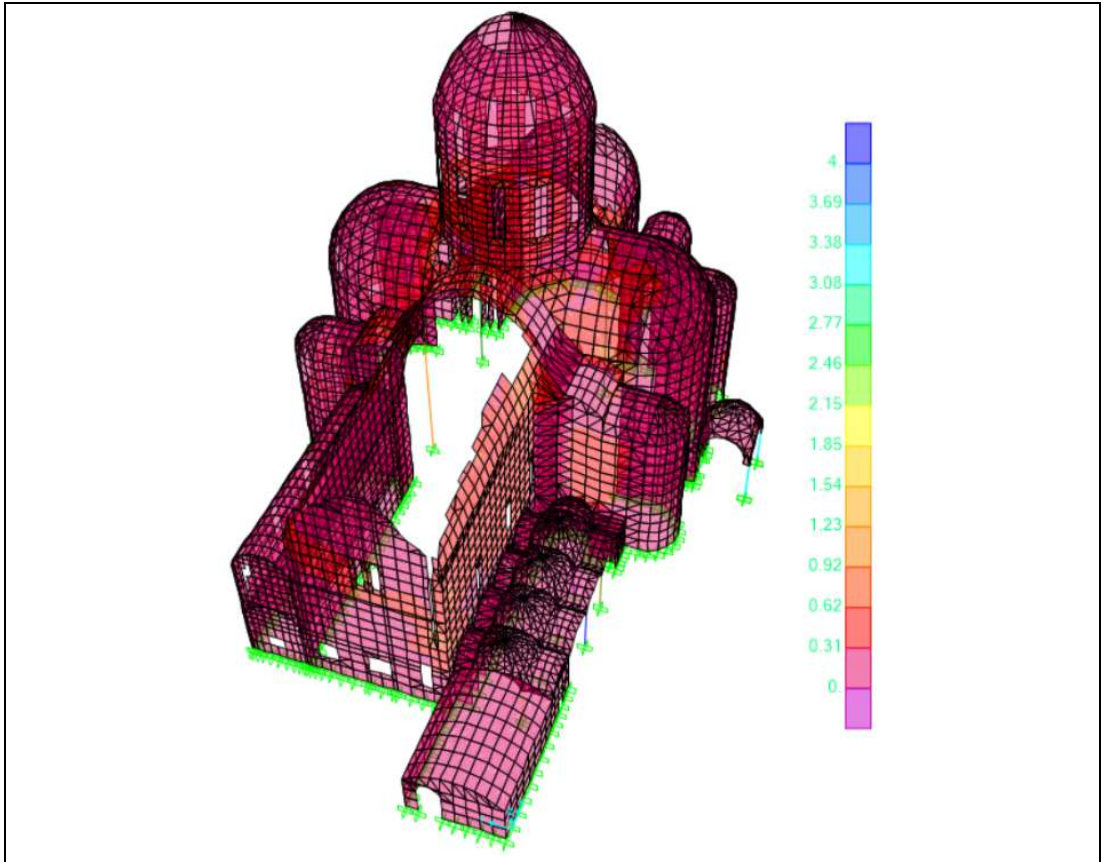
Şekil 5.66: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi (N/mm^2).



Şekil 5.67: (D+EX) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-2 N/mm^2 aralığı.



Şekil 5.68: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi (N/mm²).



Şekil 5.69: (D+EY) DD-2 yüklemesi altında S12 gerilmesi 0-4 N/mm² aralığı.

5.7. Çelik İskele Sistemi İle Güçlendirilen Öşki Kilisesi

Tarihi yapı elemanlarında, düşmeler, yana yatmalar, eğilmeler veya devrilmelerin olduğu elemanlar için geçici destek veya payandalar destek sağlarlar. İskelelerin ve duvarların birbirlerinin üzerine düşmemesi veya devrilmemesi için bu durumların söz konusu olduğu bölgelerde geçici bağlantılar kullanılır.

Tarihi yapının bir kısmında ya da tamamında stabilite bozukluğu veya göçme durumu varsa acil müdahale gerektirir. Geçici müdahalenin, az düzeyde tutulmasının önemi vardır. Aksi takdirde geçici müdahale, sürekli müdahaleye dönüşme riski artmaktadır.

Tarihi yapının taşıyıcı sisteminde, geçici güçlendirme yapılma durumunda yanal kuvvetler payandalarla veya bir gergi sistemiyle desteklenir. Yapı elemanları bir kalıp-iskele sistemi ile askıya alınarak düşey kuvvetler taşınır.

Geçici payanda ve destekler için ahşaptan sonra en kullanışlı malzeme çeliktir. Ahşabın dezavantajı yangın tehlikesi, çeliğin dezavantajı ise korozyondur.

5.7.1. Güçlendirilmiş Model

Yapıya etki etmesi beklenen deprem kuvvetleri altında yapılan analizler neticesinde duvarlarda meydana gelen gerilmeler ve yapı davranışı irdelenmiştir. Yapının mevcut durumunda düzlem dışı yapmış olduğu deformasyon ve analizler sonucunda düzlem dışı harekette bulunan duvarın geçici takviye ihtiyacı saptanmıştır.

Şekil 5.70’de çelik iskele sistemi ile güçlendirilen Öşki Kilisesi görülmektedir.

Yapılan analizler sonucunda çapraz elemanlar ve yığma duvara bağlanan elemanlar boru 133x6, geri kalan tüm elemanlar boru 177.8x10 olarak kullanılmıştır. Tüm çelik elemanların malzeme sınıfı S235’dir.

Çelik iskele sistemi yapıya iki yönde kayıcı mesnet ile bağlanmıştır. Kullanılacak detaylar ile tarihi yapıdan, çelik iskele sistemine sadece eksenel kuvvet gelmesi ön görülmüştür. Çelik sisteminin yere mesnetlendiği noktalarda moment aktarmayan, sabit mesnet olarak tanımlanmıştır.

Çelik iskele sisteminin yüzey alanı kadar elemanlara rüzgâr kuvveti etki edilmiştir. Yüksekliğe bağlı değişen rüzgâr yükü 114 kg/m – 121 kg/m arasındadır.

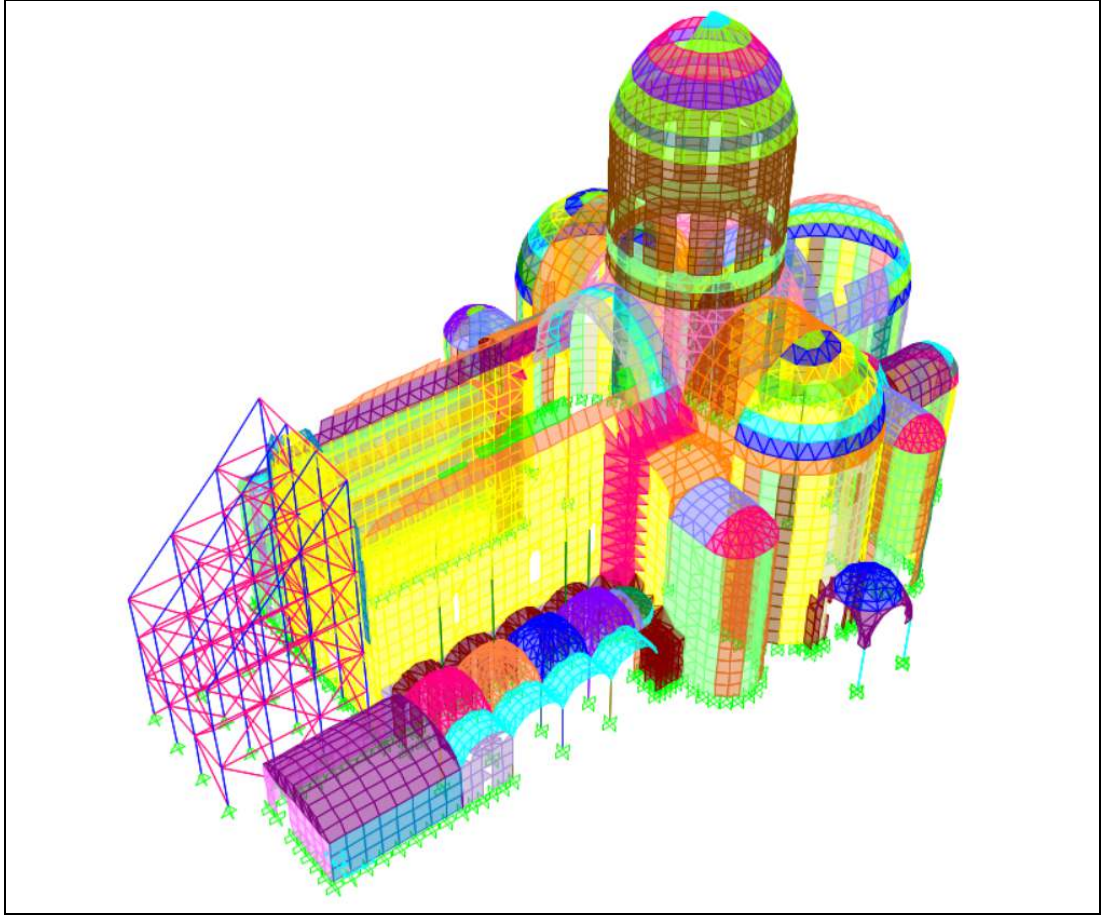
İskele yatayda 280 cm ve 300cm aralıklarla oluşturulmuştur. Düşeyde ise bu uzunluk 300cm’dir. Şekil 5.72’de Öşki Kilise’si ve çelik iskele sisteminin kesiti

verilmiştir. Yığma yapıya sırası ile 6m, 12m ve 15m kotlarında mesnetlenmiştir. En üst nokta olan 18m de ise tek bir mesnet bulunmaktadır.

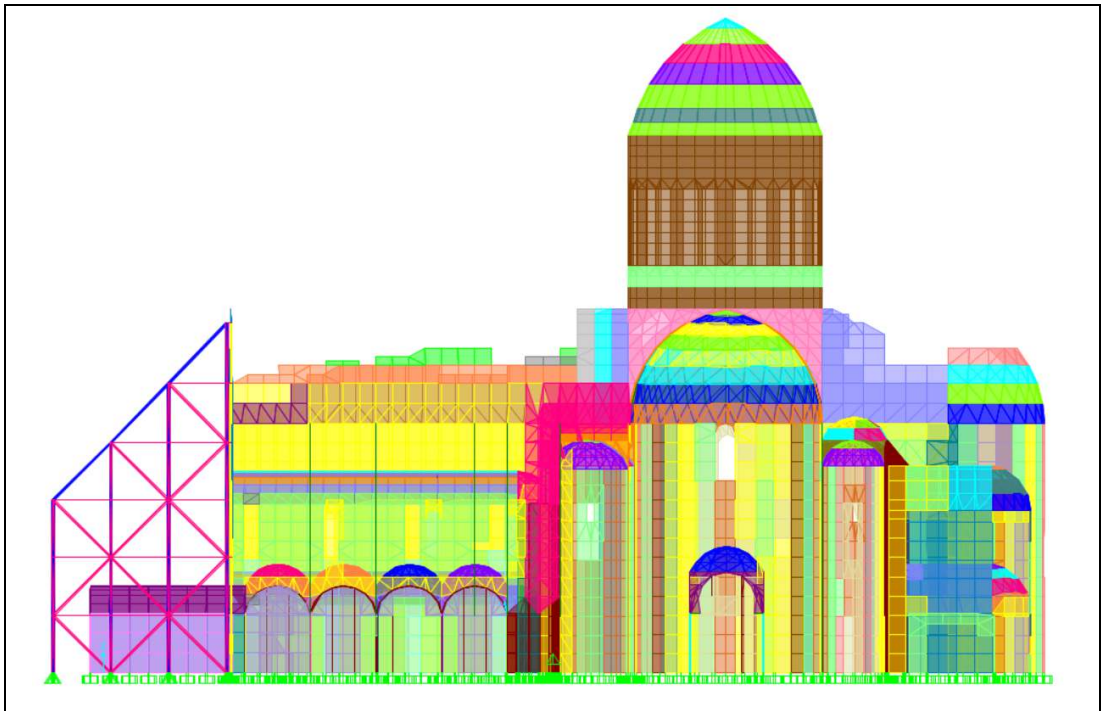
Tablo 5.5: Güçlendirme öncesi ve sonrası için modlara göre periyotlar ve kütle katılım oranları.

Mod	Periyot (s)		X Doğrultusunda Toplam Kütle Katılım Oranı		Y Doğrultusunda Toplam Kütle Katılım Oranı	
	Güçlendirme- den önce	Güçlendirme- den sonra	Güçlendirme- den önce	Güçlendirme- den sonra	Güçlendirme- den önce	Güçlendirme- den sonra
1	0.185434	0.186468	0.0006063	0.001535	0.06437	0.0679
2	0.174539	0.157146	0.02385	0.00636	0.06967	0.2
3	0.156246	0.156715	0.04851	0.0412	0.25	0.24
4	0.152802	0.153984	0.15	0.14	0.29	0.29
5	0.107793	0.147066	0.15	0.15	0.55	0.29
6	0.09242	0.112359	0.16	0.15	0.55	0.29
7	0.090707	0.110487	0.16	0.15	0.55	0.54
8	0.085571	0.103781	0.28	0.15	0.58	0.54
9	0.084954	0.094044	0.55	0.16	0.6	0.54
10	0.081157	0.091987	0.55	0.16	0.61	0.54
11	0.075257	0.086917	0.57	0.5	0.61	0.55
12	0.072299	0.08646	0.59	0.5	0.63	0.55
50	0.032504	0.036658	0.76	0.75	0.8	0.8
100	0.022134	0.023682	0.86	0.84	0.88	0.87
150	0.017753	0.019301	0.9	0.89	0.91	0.9
200	0.014827	0.016084	0.92	0.91	0.92	0.91
250	0.012635	0.013988	0.93	0.93	0.93	0.92
300	0.011314	0.012308	0.94	0.94	0.93	0.93
350	0.010219	0.011258	0.94	0.94	0.94	0.93
400	0.009407	0.010305	0.95	0.94	0.95	0.94

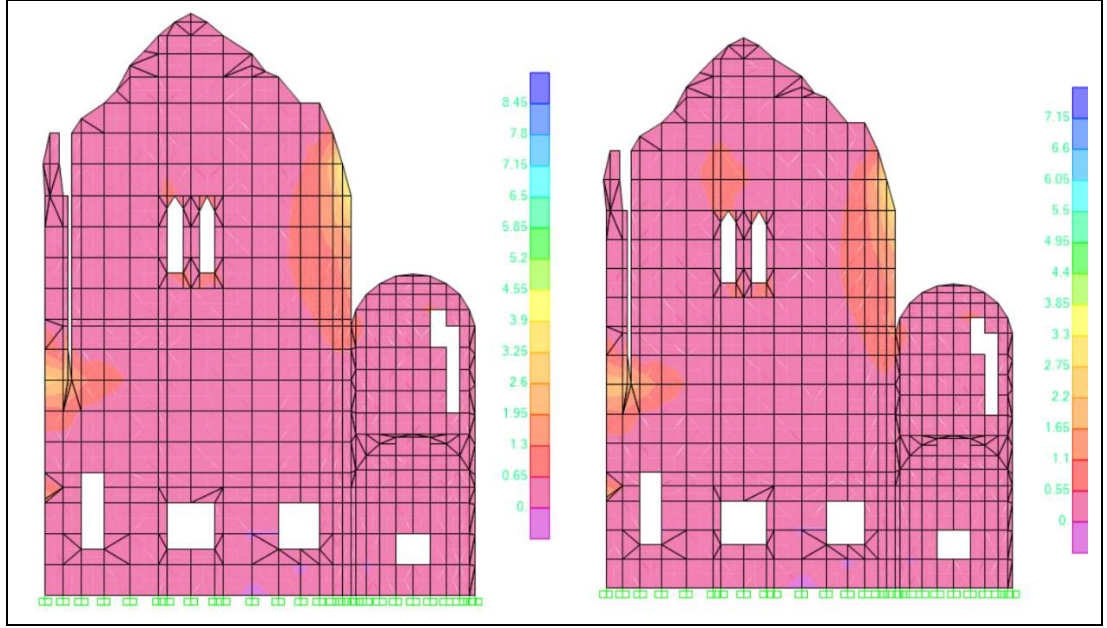
Tablo 5.5’de verilen modal analiz sonuçları incelendiğinde, çelik iskele sisteminin yapının periyoduna azalmasına etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra x ve y yönü deprem etkilerinde toplam kütle katılım oranlarında çelik iskele sisteminin kayda değer katkısının olmadığı sonucuna varılmıştır.



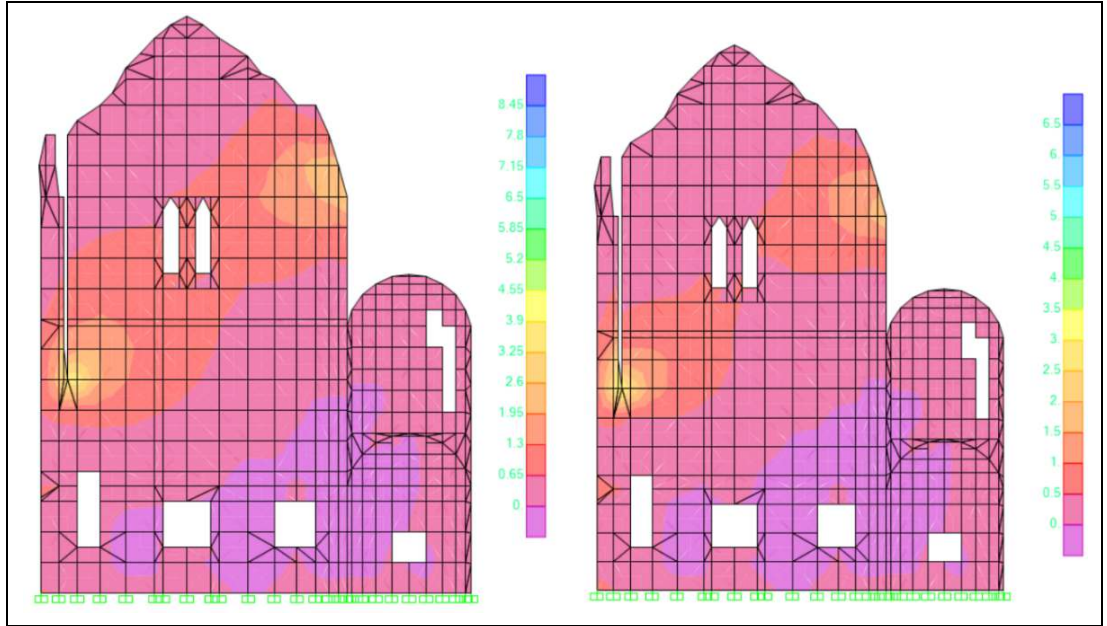
Şekil 5.70: Öski Kilisesi'nin düzlem dışı davranış yapan duvarının çelik iskele sistemi ile güçlendirilmesi.



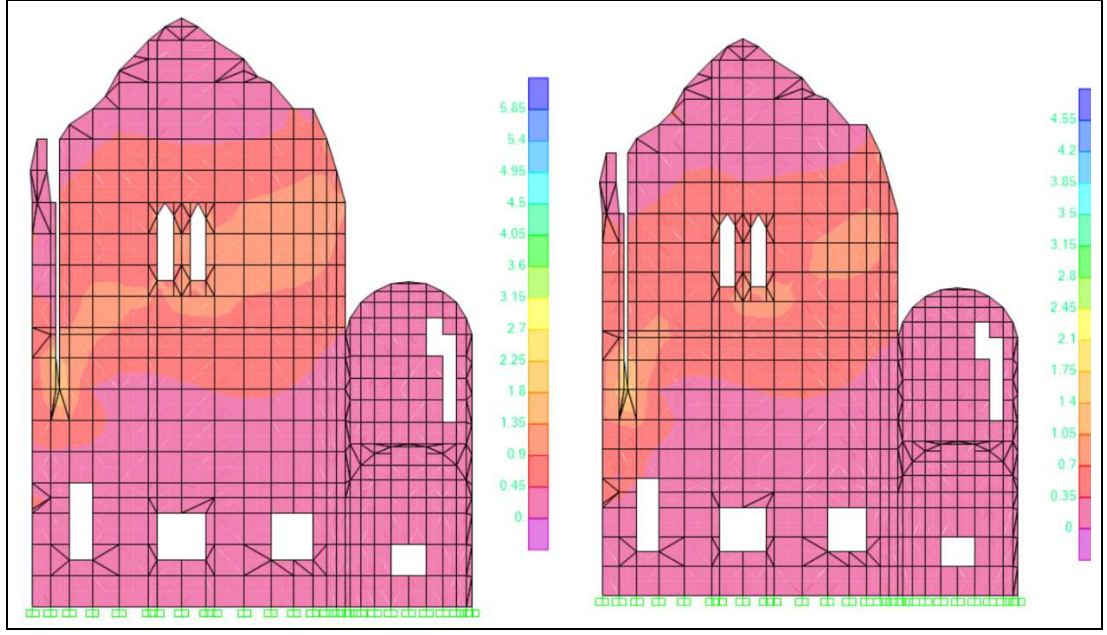
Şekil 5.71: Öski Kilisesi ve çelik iskele sisteminin kesiti.



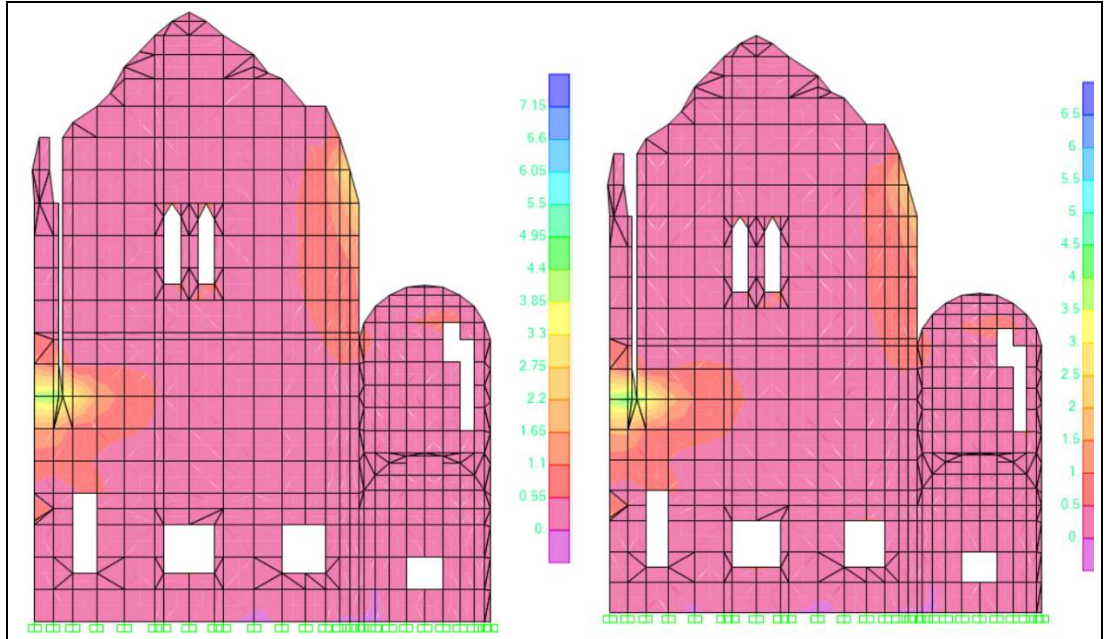
Şekil 5.72: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında S11 gerilmesi.



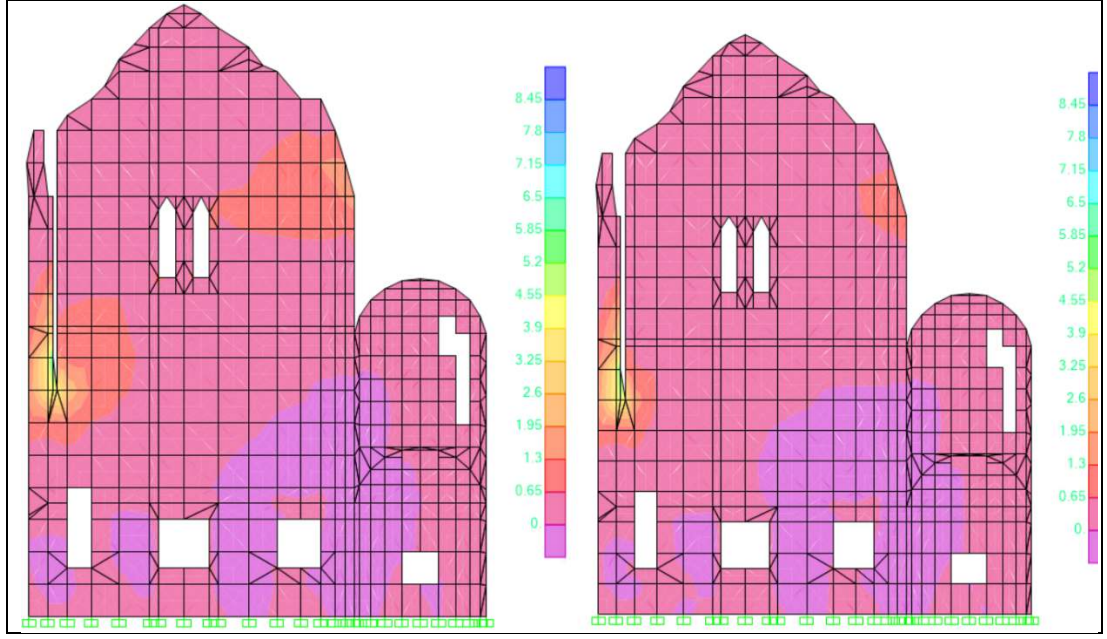
Şekil 5.73: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında S22 gerilmesi.



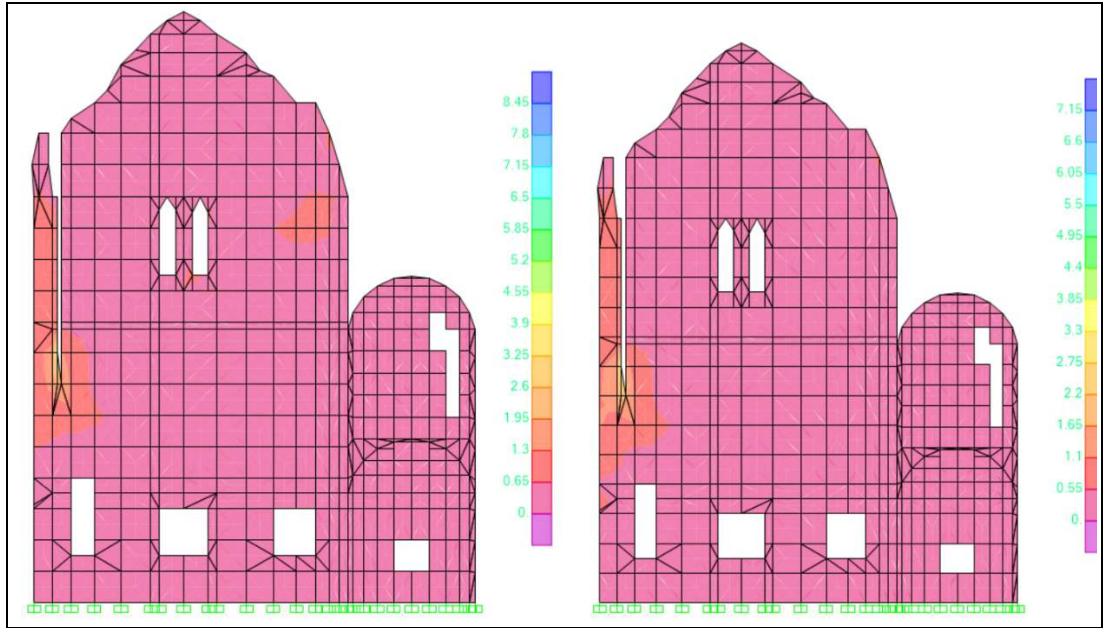
Şekil 5.74: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında S12 gerilmesi.



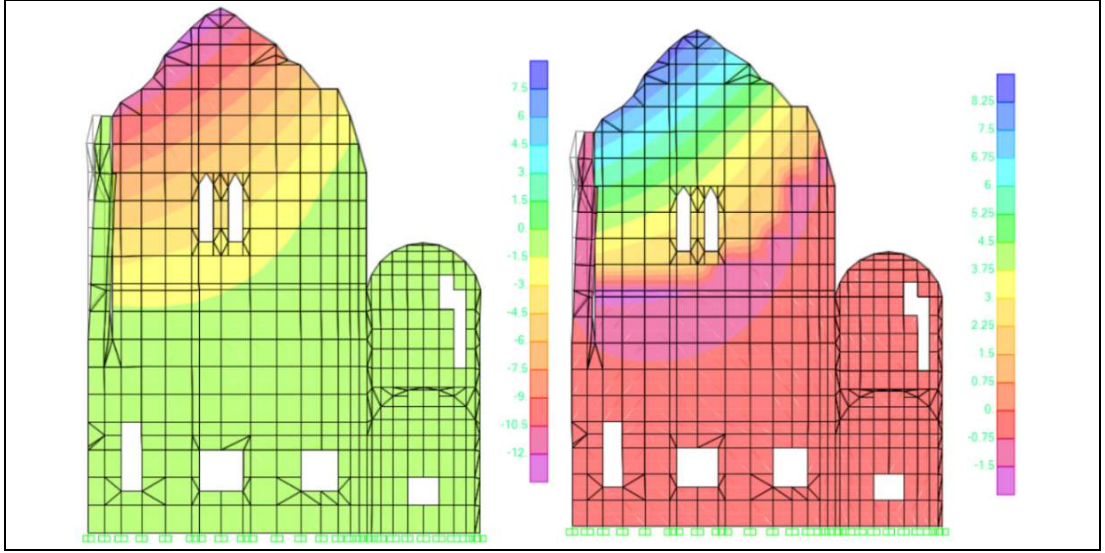
Şekil 5.75: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EY) DD-1 altında S11 gerilmesi.



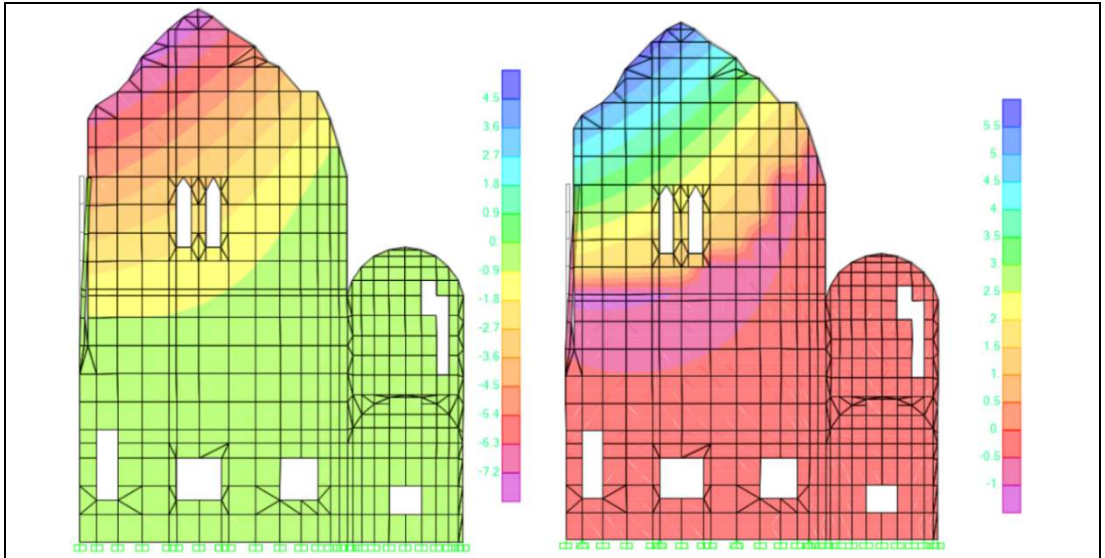
Şekil 5.76: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EY) DD-1 altında S22 gerilmesi.



Şekil 5.77: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EY) DD-1 altında S12 gerilmesi.



Şekil 5.78: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-1 altında X doğrultusu deplasmanı.



Şekil 5.79: Güçlendirme öncesi ve sonrası (D+EX) DD-2 altında X doğrultusu deplasmanı.

Şekil 5.72-5.77’de güçlendirilmiş duvarın gerilme dağılımları, Şekil 5.78-5.79’da ise duvarın X doğrultusundaki deplasmanları verilmiştir.

Gerilme dağılımları incelendiğinde, çelik iskele sistemi ile güçlendirilmiş model ile güçlendirilmemiş model için meydana gelen maksimum gerilmeler arasında önemli bir farkın oluşmadığı gözlemlenmektedir.

Maksimum gerilmeler yapının genelinde incelendiğinde;

Maksimum basınç gerilmesi güçlendirilmemiş modelde 9,6 MPa, güçlendirilmiş modelde 9,5 MPa, maksimum çekme gerilmesi güçlendirilmemiş modelde 8,6 MPa, güçlendirilmiş modelde 8,5 MPa, maksimum kayma gerilmesi ise güçlendirilmemiş modelde 8,8 MPa, güçlendirilmiş modelde 8,2 MPa olarak görülmektedir.

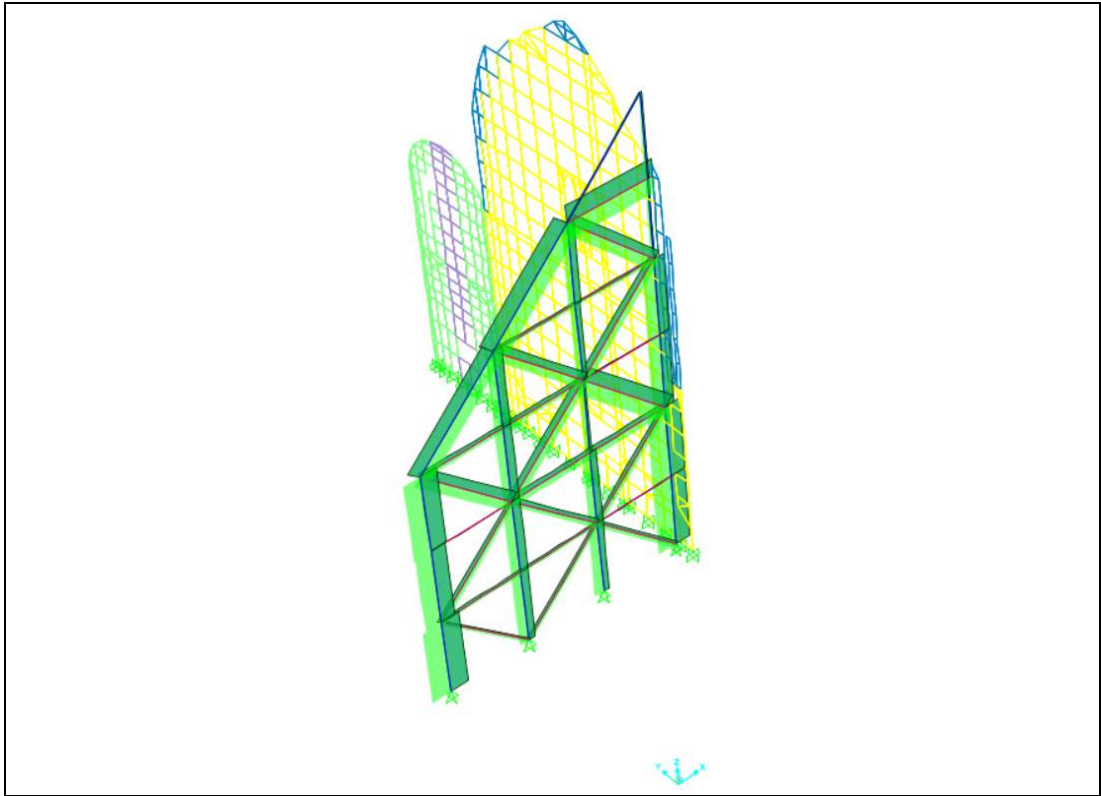
Yapının güçlendirilen duvarda meydana gelen maksimum gerilmeleri incelendiğinde;

Maksimum basınç gerilmesi güçlendirilmemiş modelde 9,2 MPa, güçlendirilmiş modelde 9,1 MPa, maksimum çekme gerilmesi güçlendirilmemiş modelde 8,6 MPa, güçlendirilmiş modelde 8,6 MPa olarak görülmektedir.

Maksimum kayma gerilmesi ise güçlendirilmemiş modelde 8,8 MPa, güçlendirilmiş modelde 8,2 MPa olarak görülmektedir.

Duvarın tepe noktasının x doğrultusundaki ötelenmesi incelendiğinde ise güçlendirilmemiş modelde (D+EX) DD-1 kombinasyonu etkisinde 12,6mm, güçlendirilmiş modelde 8,5mm olarak altında bulunmuştur.

(D+EX) DD-1 yüklemesi altında oluşan aksenal kuvvetlerin en fazla zorladığı (dış diyagonal) elemanlar Şekil 5.80’de verilmiştir.



Şekil 5.80: Çelik iskele sisteminde oluşan aksenal kuvvetler.

6. SONUÇ

Öşki Kilisesi'nin tamamı ve düzlem dışı hareket yapan duvarı çelik iskele sistemiyle ve iskele systemsiz olarak modellenmiştir. Analizler, ölü yükler altında ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin önerdiği şekilde spektrum eğrisi tanımlanarak yapılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde çelik, ahşap ve kagir kısımlar için doğrusal elastik malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Ayrıntılı olarak yapılan hesaplar neticesinde her iki model için de yığma yapıdaki ve çelik iskele sistemindeki kuvvet, deformasyon ve gerilme etkileri irdelenmiştir. Buna göre;

- Analiz sonuçlarında güçlendirilmemiş modelin ilk mod şekli için periyot 0.185434 s, güçlendirilmiş modelde ise ilk mod şekli için periyot 0,186468 s olarak bulunmuştur. Diğer mod şekilleri için periyot değerleri incelendiğinde iki model arasındaki farkın ilk moddaki gibi küçük olduğu belirlenmiştir. Bu değerlere göre, çelik iskele sistemi yapı periyodunun azalmasına çok az etkisinin olduğu görülmüştür.
- Duvarın tepe noktası, x doğrultusunda ötelenmeleri güçlendirilmemiş modelde 12,6mm, güçlendirilmiş modelde 8,5mm olarak bulunmuştur. Çelik iskele sisteminin, tarihi yığma yapının düzlem dışı deformasyonu üzerine kayda değer bir etkisinin olmadığı aşıkardır.
- Yapının düzlem dışı davranışta bulunan duvarında meydana gelen maksimum normal gerilme güçlendirilmemiş yapı için 9,2 MPa, güçlendirilmiş yapı için 9,1 MPa olarak hesaplanmıştır. Her iki model irdelendiğinde meydana gelen en büyük gerilmelerde oluşan farkın çok küçük olmasından dolayı çelik iskele sisteminin yapıya önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.
- Yapıdaki en büyük kayma gerilmeleri incelendiğinde güçlendirilmemiş modelde 8,8 MPa, güçlendirilmiş modelde 8,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Çelik iskele sisteminin, düzlem dışı davranışta bulunan duvar için beklendiği gibi bir etkisi olmamıştır. Çelik iskele sisteminin, kayma gerilmelerini azaltma konusunda etkisinin çok az olduğu hatta etkisinin olmadığı söylenebilir.
- Yığma yapı duvarında mevcut olan geometrik süreksizliklerden dolayı sayısal modelde ideal olarak tasarlanan bağlantı elemanlarının gerçek şartlarda bu şekilde imal edilebilmesi mümkün değildir.

Bu değerler irdelenirken, spektrum eğrileri etki ettirilerek oluşturulan kombinasyonlar altında elde edilen sonuçlar olduğunu, zaman tanım alanında hesap yapılması durumunda elde edilen sonuçların güvenli tarafta kalma payının azalma ihtimalinin olduğunu söylenebilir.

Sonuç olarak, uygulama bu hali ile şki Kilisesi’ni olası bir deprem durumunda hasardan korumasının beklenemeyeceği, ancak mevcut yapının duvarın olan düzlem dışı kalıcı deformasyonun artmasını ve duvarın olası bir yıkılma sonucu devrilmesini önlemeye bir katkı sağlayabileceği kanaatine varılmıştır. Bu tür bir elik iskele sistemi ile güçlendirme uygulamasından önce mevcut yapı ile olan etkileşiminin iyi irdelenmesi gerekmektedir. Gerekliliği yeterince tartışılmalıdır. Bunun yanı sıra bu çalışmada irdelenen uygulamanın farklı strüktüre sahip tarihi yığma yapılar için uygun olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Bilgin H., (2006), “Mimar Sinan Yapılarında Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Analizi”, Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 3-4, 21.
- [2] Savaşır K., (2016), “Kubbelerin Yapım Sistemlerinin Yük Aktarım Prensiplerine Göre İrdelenmesi”, 8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, 2-7, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi. 2-3 Haziran.
- [3] Aslan A., (2016), “Süleymaniye Cami’nin Yerel Zemin Koşullarına Bağlı Deprem Performansının Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [4] Chamaky R. Y., (2014), “Tarihi Yığma Yapıların Deprem Analizi ve Uygun Güçlendirme Teknikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [5] Öztaş V., (2009), “Yığma Yapıların Güçlendirilmesi ve Bir Yığma Yapı Örneğinde Güçlendirme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [6] Aksoy E., Aydoğmuş F., (2017), “Tarihi yapıların deprem analizi ve Kargı Han örneği”, 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, 2-4 Kasım.
- [7] Şeker B. Ş., (2011), “Mimar Sinan Camilerinin Statik ve Dinamik Yükler Etkisinde Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [8] Düzgün O. A., Hatipoğlu Y. S., Artar M., Yurdakul M., Öner E., (2014), “Zahit Efendi Camisi’nin Sonlu Elemanlar Analizi İle Taşıyıcı Sistem Performansının Belirlenmesi”, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 1-3 Ekim.
- [9] Korkmaz K. A., Zabin P., Çarhoğlu A. I., Nuhoğlu A., (2014), “Rize Merkez Kurşunlu Camisi’nin deprem davranışının incelenmesi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 18. 149-156.
- [10] Dabanlı Ö., (2008), “Tarihi Yığma Yapıların Deprem Performansının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [11] Erdik M., (2013), “Aya İrini Kilisesi Deprem Performans Değerlendirmesi ve Güçlendirme Projesi Hazırlanması”, 4. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Trabzon, 27-29 Eylül.
- [12] Döndüren S., Demiröz A., (2017), “Tarihi yapılarda görülen hasar türleri”, Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 45-48.

- [13] Çoğurcu M. T., Kamanlı M., (2007), “Yığma yapıların dinamik ve mühendislik davranışının düzlem dışı kuvvetler altında deneysel olarak incelenmesi”, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi, 83-108.
- [14] Kanıt R., (2007), “Düzlem dışı yüklere maruz yığma duvarların deprem davranışlarının analitik ve deneysel değerlendirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 441-449.
- [15] Çoşkun E., (2012), “Geleneksel Strüktürel Sistemler ve Sorunları”, Ders Notları.
- [16] Şişik Ö., (2017), “Edirne'de Bulunan 15.YY ve 16YY'da İnşaa Edilmiş Tarihi Cami ve Türbelerin Taşıyıcı Sistem Analizi ve Çözüm Önerileri”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 13.
- [17] Hasol D., (1998), “Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü”, 450-457.
- [18] Çamlıbeş N., (2000), “Geleneksel Yapılarda Stabilitenin İyileştirilmesi Temellerin Takviyesi”, 165.
- [19] Web 1, (2016), <https://docplayer.biz.tr/21217640-Kemer-kopru-tasiyici-sistemi.html>, (Erişim Tarihi: 14/08/2019).
- [20] Yavuz U. C., (2012), “Tarihi Yapılarda Statik Güçlendirme Teknikleri”, Kültür ve Turizm Bakanlığı Kültür Varlıkları ve Müzeler Genel Müdürlüğü.
- [21] Bayraktar A., (2006), “Tarihi Yapıların Analitik İncelenmesi ve Sismik Güçlendirme”, İstanbul Teknik Üniversitesi, 145.
- [22] Kuban D., (2018), “Mimarlık Kavramları”, Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, 107.
- [23] Saraç M. M., (2003), “Tarihi Yığma Kargir Yapıların Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [24] Uzun M., (2017), “Yığma Yapıların Deprem Performansının Değerlendirilmesi ve Bir Güçlendirme Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 12.
- [25] Bayülke N., (1978), “Tuğla Yığma Yapıların Depremdeki Davranışları”, Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, 26-42.
- [26] Heyman J., (2006), “The science of structural engineering”, Imperial College Press, London.
- [27] Kara H. G., (2009), “Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri, güvenliğinin incelenmesi, onarımı ve güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [28] Cultural Heritage without Borders, “Proceedings of International Seminar on Earthquake Protection in Historic”, 2005, Kotor, 16-18 Eylül.
- [29] Öz Saraç S., (2009), “Yığma Yapılarda Taşıyıcı Tuğla Duvarların GFRP ile Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [30] Bayülke N., (2001), “Depremde Hasar Gören Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi”, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, İzmir.
- [31] Bayülke N., (1999), “Yapıların Onarımı ve Güçlendirilmesi”, İnşaat Mühendisliği Odası.
- [32] Bayülke N., (1980), “Yığma Yapılar”, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü.
- [33] Arun G., (2005), “Yığma Kagir Yapı Davranışı”, Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, ODTÜ, 17 Şubat.
- [34] Arun G., (2005), “Yığma Kagir Yapı Davranışı”, Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı”, ODTÜ, 17 Şubat.
- [35] Armağan K., (2012), “Tarihi Yapılarında Kullanılan Fonksiyonelliğin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 97.
- [36] Mahrebel H. A., (2006), “Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Sistem Özellikleri, Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Teknikleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 37.
- [37] Kanıt R., (2007), “Düzlem dışı yüklere maruz yığma duvarların deprem davranışlarının analitik ve deneysel değerlendirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 441-449.
- [38] Web 2, (2017), <http://www.etkihaber.com/depremin-yarattigi-felaket-ortaya-cikti-248859h.htm>, (Erişim Tarihi: 17/04/2019).
- [39] Web 3, (2015), <http://www.ruhanews.com/haber/2794/tescilli-yapi-yagan-yagmurdan-coktu.html>, (Erişim Tarihi: 21/05/2019).
- [40] Çöğür M., Kamanlı M., (2007), “Yığma Yapıların Dinamik ve Mühendislik Davranışının Düzlem Dışı Kuvvetler Altında Deneysel Olarak İncelenmesi”, Selçuk-Teknik Dergisi, 89.
- [41] Öz Saraç S., (2009), “Yığma Yapılarda Taşıyıcı Tuğla Duvarların GFRP ile Güçlendirilmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [42] Öztaş V., (2009), “Yığma Yapıların Güçlendirilmesi ve Bir Yığma Yapı Örneğinde Güçlendirme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [43] Aköz A. H., (2008), “Deprem Etkisi Altındaki Tarihi Yığma Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [44] Ünay A. İ., (2002), “Tarihi Yapıların Depreme Dayanımı”, ODTÜ Mimarlık Fakültesi Basım İşbirliği.
- [45] EUROCODE, (1996), European Committee for Standardization, Brussels.
- [46] Köksal O., Karakoç C. Yıldırım H., (2003), “Compressive Strength of Concrete Hollow Block Prisms”, *Studi e Ricerche*, 151-180.
- [47] Paulay T., Priestley M. J. N., (1992), “Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings”, New York.
- [48] Kömürcü S., (2017), “Yığma Duvarların Düzlem İçi Davranışlarının Modellenmesi ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [49] Lourenço P., (1994), “Analysis of Masonry Structures With Interface Elements-Theory And Applications”, Delf University of Technology, Faculty of Civil Engineering: TNO Building and Construction Research Computational Mechanics.
- [50] Kuruşcu A. O., (2005), “Yığma Yapıların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [51] Lourenço P., (1996), Computational Strategies for Masonry Structures.
- [52] Anthoine A., (1997), “Homogenization of Periodic Masonry: Plane Stress, Generalized Plane Strain or 3d Modeling”, *International Journal of Solids and Structures*.
- [53] Zucchini A., Lourenço P., (2002), “A Micro-Mechanical Model for the Homogenisation of Masonry”, *International Journal of Solids and Structures*.
- [54] Zucchini A., Lourenço P., (2006), “Homogenization of Masonry Using A Micromechanical Model: Compressive Behaviour”, III European Conference on Computational Mechanics Solids, Structures and Couple Problems in Engineering, Lisbon.
- [55] Doran B., Aktan S., (2017), “Hava Kireci Harcı Kullanılarak Üretilen Tarihi Yığma Duvarlarda Bünyesel Modelleme”, *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 56.
- [56] Ghosh A. K., (1994), “Finite Element Modelling of Unreinforced Masonry”, 10th International Brick/Block Masonry Conference, Canada.
- [57] Page A. W., (1978), “Finite Element Model for Masonry, Journal of Structural Division”, *Journal of Structural Division*, 1267-1285.

- [58] Ural A., (2009), “Yığma Yapıların Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 40.
- [59] Lourenço P., (2002), “Computations on Historic Masonry Structures, Progress in Structural Engineering and Materials”, 301-319.
- [60] Şen B., (2006), “Modeling and Analysis of the Historical Masonry Structures”, Boğaziçi University Institute of Natural and Applied Science, 19-21.
- [61] Web 4, (2017), H. Özkan. <https://www.erzurumoskimanastiri.com/tarihce>, (Erişim Tarihi: 19/07/2019).
- [62] Web 5, (2016), <https://www.aa.com.tr/tr/kultur-sanat/dogunun-ayasofyasi-osvank/607226>, (Erişim Tarihi: 11/04/2019).
- [63] Web6,(2017),<https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/erzurum/gezilecekyer/osvank-kilisesi>. (Erişim Tarihi: 01/04/2019).
- [64] Web7,(2017),<https://www.kulturportali.gov.tr/turkiye/erzurum/gezilecekyer/osvank-kilisesi>, (Erişim Tarihi: 01/04/2019).
- [65] Web 8, (2018), <https://www.gezilesiye.com/osvank-kilisesi-tanitimi-nerede-nasil-gidilir.html>, (Erişim Tarihi: 01/04/2019).
- [66] Web 9, (2011), <https://www.flickr.com/photos/ricci-armani/6389405135/>, (Erişim Tarihi: 05/07/2019).
- [67] Web 10, (2013), <http://www.radikal.com.tr/turkiye/1100-yillik-kiliseye-krikolu-destek-1135005/>, (Erişim Tarihi: 16/05/2019).
- [68] Web 11, (2017), <https://mapio.net/pic/p-122367702/>, (Erişim Tarihi: 22/07/2019).
- [69] Web 12, (2018), <https://www.gezilesiye.com/erzurumda-gezilecek-yerler.html>, (Erişim Tarihi: 27/05/2019).
- [70] Web 13, (2017), https://www.google.com.tr/imgres?imgurl=https://scontent-den41.cdninstagram.com/vp/11f5b4db88e5adcef2a96149070c0a72/5DFE6B68/t51.288515/e35/33931765_177250462957965_7509489672670674944_n.jpg%3F_nc_ht%3Dscontent-den4-1.cdninstagram.com&imgrefurl=https://, (Erişim Tarihi: 28/05/2019).
- [71] SAP 2000 V20, Computer Program, Computers and Structures, Berkeley, USA, 2000
- [72] Manuel S., (2005), “Integrated structural analysis and design software”, Computer and Structures Inc.

- [73] Uçak Ş., (2012), “Tarihi Yığma Kubbelerin Dinamik Davranışlarının Operasyonel Modal Analiz Yöntemiyle Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [74] (2018), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.
- [75] Tomazevic M., (1993), “Earthquake Resistant Design of Masonry Buildings”, Imperial College Press, 268.
- [76] Öztaş V., (2009), “Yığma Yapıların Güçlendirilmesi ve Bir Yığma Yapı Örneğinde Güçlendirme Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [77] Coşkun E., “Geleneksel Strüktürel Sistemler ve Sorunları”, Ders Notları.
- [78] Bayülke N., (1978) “Tuğla Yığma Yapıların Depremdeki Davranışları”, Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni.

ÖZGEÇMİŞ

Sinem Ayaz Akaslan 1990 yılında İstanbul’da doğdu. 2008 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2013 yılında başarıyla tamamladı. Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) Fen Bilimler Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Deprem ve Yapı Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimi görmeye başladı. Mesleki hayatında tasarım mühendisi olarak çalışmıştır. Yurt dışında dil eğitimi almaktadır.