



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİFT CİDARLI KUBBELERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN
YAPISAL DAVRANIŞA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ülkücan SÜTBAŞ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ali URAL

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212303402 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Ülkücan SÜTBAŞ tarafından hazırlanan “ÇİFT CİDARLI KUBBELERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN YAPISAL DAVRANIŞA ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali URAL

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Uludağ Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 28/06/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Ülkücan SÜTBAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmamda bana yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, tarihi yapılara olan tutkum konusunda beni her zaman motive eden, kendisiyle tanıştığım için şanslı hissettiğim değerli danışman hocam Prof. Dr. Ali URAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çift cidarlı kubbeler hakkındaki bilgi ve dokümanlarını benimle paylaşan, çalışmama değerli tecrübeleriyle katkıda bulunan sayın İnş. Müh. Abdulkadir PEKŞEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Dünyaya bir mühendis gözüyle bakmama katkıda bulunan, hayata ve mesleğe dair tecrübelerini paylaşmaktan gocunmayan, tarihi yapılar alanını keşfetmemi sağlayan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ'e şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca kendisini her anlamda örnek aldığım meslektaşım ve babam Cemil SÜTBAŞ'a, azmine ve çalışkanlığına hayran olduğum annem Sevgi SÜTBAŞ'a ve tez hazırlama sürecinde desteklerini esirgemeyen kardeşim Bedirhan SÜTBAŞ'a tüm kalbimle şükranlarımı sunarım.

Ülkücan SÜTBAŞ
AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KUBBELER	3
2.1 Kubbelerin Kabuk Sayısına Göre Sınıflandırılması	5
2.2 Çift Cidarlı Kubbeler	8
2.2.1 Çift cidarlı kubbelerin sistem elemanları	13
2.2.1.1 İç ve dış kubbeler	13
2.2.1.2 İç payandalar	15
2.2.1.3 Ahşap elemanlar	17
2.2.1.4 Kubbe kasnağı	18
2.3 Kubbelerin Yapısal Davranışı	19
2.3.1 Yığma kemer teorileri	19
2.3.2 Yığma kubbe teorileri	20
2.3.3 Kubbelerin yük aktarım prensipleri	22
3. ZEYNELBEY TÜRBESİ	24
3.1 Zeynel Bey Türbesi Hakkında Genel Bilgiler	24
3.2 Materyal ve Yöntem	26
3.3 Spektral Analiz	27
3.3.1 Deplasmanlar	28
3.3.2 Çekme gerilmesi	30
3.3.3 Basınç gerilmesi	31
3.3.4 Kayma gerilmesi	32
3.3.5 Birim şekil değiştirmeler	33
3.3.6 Değerlendirme	35
4. PARAMETRİK ÇALIŞMA	36
4.2 Model-0 için Analiz Sonuçları	40
4.2.1 Deplasmanlar	40
4.2.2 Çekme gerilmesi	41
4.2.3 Basınç gerilmesi	42
4.2.4 Kayma gerilmesi	42
4.2.5 Birim şekil değiştirmeler	43
4.3 Model-15-4 için Analiz Sonuçları	44
4.3.1 Deplasmanlar	44
4.3.2 Çekme gerilmesi	45
4.3.3 Basınç gerilmesi	45
4.3.4 Kayma gerilmesi	46
4.3.5 Birim şekil değiştirmeler	46
4.4 Model-15-8 için Analiz Sonuçları	47
4.4.1 Deplasmanlar	48
4.4.2 Çekme gerilmesi	49
4.4.3 Basınç gerilmesi	49

4.4.4 Kayma gerilmesi.....	50
4.4.5 Birim şekil değiştirmeler	50
4.5 Model-15-12 için Analiz Sonuçları	51
4.5.1 Deplasmanlar	52
4.5.2 Çekme gerilmesi	53
4.5.3 Basınç gerilmesi.....	53
4.5.4 Kayma gerilmesi.....	54
4.5.5 Birim şekil değiştirmeler	54
4.6 Model-7,5-4 için Analiz Sonuçları	55
4.6.1 Deplasmanlar	56
4.6.2 Çekme gerilmesi	57
4.6.3 Basınç gerilmesi.....	57
4.6.4 Kayma gerilmesi.....	58
4.6.5 Birim şekil değiştirmeler	58
4.7 Model-7,5-8 için Analiz Sonuçları	59
4.7.1 Deplasmanlar	60
4.7.2 Çekme gerilmesi	61
4.7.3 Basınç gerilmesi.....	61
4.7.4 Kayma gerilmesi.....	62
4.7.5 Birim şekil değiştirmeler	62
4.8 Model-7,5-12 için Analiz Sonuçları	63
4.8.1 Deplasmanlar	64
4.8.2 Çekme gerilmesi	65
4.8.3 Basınç gerilmesi.....	65
4.8.4 Kayma gerilmesi.....	66
4.8.5 Birim şekil değiştirmeler	66
5. SONUÇ.....	68
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	75

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇİFT CİDARLI KUBBELERİN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN
YAPISAL DAVRANIŞA ETKİSİ

Ülkücan SÜTBAŞ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali URAL

ÖZET

Kubbeler tarih boyunca yapılarda örtü sistemi olarak kullanılan yapısal elemanlardır. Bu örtü sistemlerinin çeşitli ihtiyaçlar sonucunda zamanla kabuk sayılarında artışlar olmuştur. Böylece ortaya “Çift Cidarlı Kubbeler” kavramı çıkmıştır. Çalışmanın amacı ülkemizde ve dünyada önemli yapılarda bulunan ve hakkında az sayıda çalışma olan çift cidarlı kubbeler hakkında bilgi vermek ve çift cidarlı kubbeye sahip olan Zeynel Bey Türbesinin yapısal davranışını analitik olarak incelemektir. Analizler sonucunda yapının en fazla çekme gerilmesi kaide kısmında meydana gelmiştir. En fazla basınç gerilmesi ise kapıların üst noktalarında olmuştur.

Çalışmanın bir diğer amacı çift cidarlı kubbelerin sistem elemanı olan iç payandaların sayısının ve kalınlığının deprem davranışına etkisini araştırmaktır. Bu amaçla 7 adet model oluşturularak modeller üzerinde spektral analiz uygulanmıştır. En iyi performansı gösteren model 12 payandalı Model-7,5-12 olmuştur. Payandalar uygun sayıda ve konumda kullanılması durumunda yapısal davranışa olumlu anlamda etkisi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift Cidarlı Kubbeler, İç Payanda, Sonlu Elemanlar Metodu, Yığma Kubbe, LUSAS.

Haziran, 2024; 75 sayfa

M.Sc. THESIS

**THE EFFECT OF GEOMETRICAL PROPERTIES OF DOUBLE-SHELL
DOMES ON STRUCTURAL BEHAVIOR**

Ülkücan SÜTBAŞ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Ali URAL

ABSTRACT

Domes are structural elements used as cover systems in buildings throughout history. As a result of various needs, the number of shells of these cover systems has increased over time. Therefore, the concept of “Double Shell Domes” has emerged. The aim of this study is to give information about double shell domes, which are found in important buildings in our country and in the world and about which there are few studies, and to examine the structural behavior of Zeynel Bey Tomb, which has a double shell dome. As a result of the analysis, the highest tensile stress occurred at the base of the structure and the highest compressive stress occurred at the top points of the doors.

Another aim of the study is to investigate the effect of the number and thickness of the stiffeners, which are the system elements of double-shell domes, on the earthquake behavior. For this purpose, 7 models were created and spectral analysis applied on the models. The best performing model was Model-7,5-12 with 12 stiffeners. It was determined that if the stiffeners are used in appropriate number and position, they have a positive effect on the structural behavior.

Keywords: Double Shell Domes, Stiffener, Finite Element Method, Masonry Dome, LUSAS.

June, 2024; 75 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Pantheon (URL-1).	3
Şekil 2.2. Kubbeye geçiş elemanları.	4
Şekil 2.3. Kubbelerin sınıflandırılması (Hejazi ve Pourabedin, 2021). a) Tek cidarlı kubbe b) Sürekli çift cidarlı kubbe c) Radyal duvarları olmayan süreksiz çift cidarlı kubbe d) Radyal duvarları olan süreksiz çift cidarlı kubbe e) Üç cidarlı kubbe.	6
Şekil 2.4. Karahan ikiz türbeleri (URL-5).	7
Şekil 2.5. Aziz Paul Katedrali'nin üç cidarlı kubbesi (URL-6).	7
Şekil 2.6. Yıldız Hamidiye Cami'nin kubbesi (Alkan, 2019).	8
Şekil 2.7. Çift cidarlı kubbe örnekleri.	9
Şekil 2.8. a) Sultaniye Kubbesi b) iç kubbe c) kubbeler arası bağlantı elemanları d) iç kubbe + bağlantı elemanları e) iç kubbe + bağlantı elemanları + dış kubbe (Feizolahbeigi vd., 2024).	9
Şekil 2.9. Mardin Ulu Cami'nin kubbesi (URL-10, Ali Şahin Aytek).	11
Şekil 2.10. Kanuni Sultan Süleyman Türbesi'nin kesiti (Abdulkadir Pekşen'in kütüphanesi).	12
Şekil 2.11. II. Selim Türbesinin iç ve dış kubbesi (URL-11, Seda Özen Bilgili).	12
Şekil 2.12. II. Selim Türbesinin kesiti (Abdulkadir Pekşen'in kütüphanesi).	13
Şekil 2.13. Kanuni Sultan Süleyman Türbesi'nin iç ve dış kubbesi (URL-12).	14
Şekil 2.14. Farklı dış kubbe formları. a) Yakutiye Medresesi'nin konik kubbesi (URL-13) b) Zinciriye Medresesi'nin sivri kubbesi (URL-14) c) Zeynelbey Türbesi'nin soğanlı kubbesi (URL-15).	14
Şekil 2.15. Divriği Ulu Cami'nin kubbe kesiti (URL-16).	15
Şekil 2.16. Abbasi Ulu Cami'nin iç payandaları (URL-17, Fariborz Alaghband).	16
Şekil 2.17. Abdulkadir Geylani Türbesi'nin iç payandaları (Abdulkadir Pekşen kütüphanesi).	16
Şekil 2.18. Kabuklar arasında bulunan ahşap elemanlar (URL-17).	17
Şekil 2.19. Kubbe kasnağı örneği (URL-18).	18
Şekil 2.20. Zincir-kemer sistemi.	19
Şekil 2.21. Aziz Petrus Katedrali'nin çatlıkları hakkında yapılan çalışma (Le Seur, 1742).	21
Şekil 2.22. Poleni'nin portakal dilimi (Heyman, 1987).	22
Şekil 2.23. Kubbe üzerindeki meridyenel ve dairesel kuvvetler (Lau, 2006).	22
Şekil 2.24. Kubbe kesitinde çekme bölgesinden basınç bölgesine geçiş.	23
Şekil 3.1. Türkiye haritasında Batman ilinin yeri (URL-19).	24
Şekil 3.2. Zeynel Bey Türbesi'nin harita konumu.	25
Şekil 3.3. Zeynel Bey Türbesi kuzey cephesi (URL-20).	25
Şekil 3.4. Zeynel Bey türbesinin iç payandaları.	26
Şekil 3.5. Zeynel Bey Türbesi'nin sonlu elemanlar modeli.	27
Şekil 3.6. Periyot-spektral ivme grafiği (AFAD, 2024).	28

Şekil 3.7. Zeynel Bey Türbesinin deforme olmuş hâli.	28
Şekil 3.8. Y doğrultusundaki deplasman dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	29
Şekil 3.9. X doğrultusundaki deplasman dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	29
Şekil 3.10. Z doğrultusundaki deplasman dağılımı. a) Türbenin doğu cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	30
Şekil 3.11. Çekme gerilmesi dağılımı. a) Türbenin doğu cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	31
Şekil 3.12. Basınç gerilmesi dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	31
Şekil 3.13. Kayma gerilmesi dağılımı. a) Türbenin batı cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	32
Şekil 3.14. Çekme birim şekil değiştirme dağılımı. a) Türbenin batı cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	33
Şekil 3.15. Basınç birim şekil değiştirme dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	34
Şekil 3.16. Kayma birim şekil değiştirme dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.	34
Şekil 4.1. Parametrik çalışmada kullanılan referans geometri.	36
Şekil 4.2. Model-15-8'in üstten görünüşü.	36
Şekil 4.3. Deprem tehlike haritasına girilen veriler (AFAD, 2024).	37
Şekil 4.4. Periyot-spektral ivme grafiği (AFAD, 2024).	37
Şekil 4.5. Parametrik çalışma için oluşturulan modeller.	39
Şekil 4.6. Model-0 için x yönündeki deplasman dağılımı.	40
Şekil 4.7. Model-0 için y yönündeki deplasman dağılımı.	41
Şekil 4.8. Model-0 için z yönündeki deplasman dağılımı.	41
Şekil 4.9. Model-0 için çekme gerilmesi dağılımı.	41
Şekil 4.10. Model-0 için basınç gerilmesi dağılımı.	42
Şekil 4.11. Model-0 için kayma gerilmesi dağılımı.	42
Şekil 4.12. Model-0 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	43
Şekil 4.13. Model-0 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	43
Şekil 4.14. Model-0 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	43
Şekil 4.15. Model-15-4 için y yönündeki deplasman dağılımı.	44
Şekil 4.16. Model-15-4 için x yönündeki deplasman dağılımı.	44
Şekil 4.17. Model-15-4 için z yönündeki deplasman dağılımı.	45
Şekil 4.18. Model-15-4 için çekme gerilmesi dağılımı.	45
Şekil 4.19. Model-15-4 için basınç gerilmesi dağılımı.	46
Şekil 4.20. Model-15-4 için kayma gerilmesi dağılımı.	46
Şekil 4.21. Model-15-4 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	47
Şekil 4.22. Model-15-4 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	47
Şekil 4.23. Model-15-4 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	47
Şekil 4.24. Model-15-8 için y yönündeki deplasman dağılımı.	48
Şekil 4.25. Model-15-8 için x yönündeki deplasman dağılımı.	48
Şekil 4.26. Model-15-8 için z yönündeki deplasman dağılımı.	49
Şekil 4.27. Model-15-8 için çekme gerilmesi dağılımı.	49
Şekil 4.28. Model-15-8 için basınç gerilmesi dağılımı.	50
Şekil 4.29. Model-15-8 için kayma gerilmesi dağılımı.	50
Şekil 4.30. Model-15-8 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	51
Şekil 4.31. Model-15-8 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	51

Şekil 4.32. Model-15-8 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	51
Şekil 4.33. Model-15-12 için x yönündeki deplasman dağılımı.	52
Şekil 4.34. Model-15-12 için y yönündeki deplasman dağılımı.	52
Şekil 4.35. Model-15-8 için z yönündeki deplasman dağılımı.	53
Şekil 4.36. Model-15-12 için çekme gerilmesi dağılımı.	53
Şekil 4.37. Model-15-12 için basınç gerilmesi dağılımı.	54
Şekil 4.38. Model-15-12 için kayma gerilmesi dağılımı.	54
Şekil 4.39. Model-15-12 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	55
Şekil 4.40. Model-15-12 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	55
Şekil 4.41. Model-15-12 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	55
Şekil 4.42. Model-7,5-4 için x yönündeki deplasman dağılımı.	56
Şekil 4.43. Model-7,5-4 için y yönündeki deplasman dağılımı.	56
Şekil 4.44. Model-7,5-4 için z yönündeki deplasman dağılımı.	57
Şekil 4.45. Model-7,5-4 için çekme gerilmesi dağılımı.	57
Şekil 4.46. Model-7,5-4 için basınç gerilmesi dağılımı.	58
Şekil 4.47. Model-7,5-4 için kayma gerilmesi dağılımı.	58
Şekil 4.48. Model-7,5-4 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	59
Şekil 4.49. Model-7,5-4 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	59
Şekil 4.50. Model-7,5-4 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	59
Şekil 4.51. Model-7,5-8 için x yönündeki deplasman dağılımı.	60
Şekil 4.52. Model-7,5-8 için y yönündeki deplasman dağılımı.	60
Şekil 4.53. Model-7,5-8 için z yönündeki deplasman dağılımı.	61
Şekil 4.54. Model-7,5-8 için çekme gerilmesi dağılımı.	61
Şekil 4.55. Model-7,5-8 için basınç gerilmesi dağılımı.	62
Şekil 4.56. Model-7,5-8 için kayma gerilmesi dağılımı.	62
Şekil 4.57. Model-7,5-8 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	63
Şekil 4.58. Model-7,5-8 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	63
Şekil 4.59. Model-7,5-8 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	63
Şekil 4.60. Model-7,5-12 için y yönündeki deplasman dağılımı.	64
Şekil 4.61. Model-7,5-12 için x yönündeki deplasman dağılımı.	64
Şekil 4.62. Model-7,5-12 için z yönündeki deplasman dağılımı.	65
Şekil 4.63. Model-7,5-12 için çekme gerilmesi dağılımı.	65
Şekil 4.64. Model-7,5-12 için basınç gerilmesi dağılımı.	66
Şekil 4.65. Model-7,5-12 için kayma gerilmesi dağılımı.	66
Şekil 4.66. Model-7,5-12 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.	67
Şekil 4.67. Model-7,5-12 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.	67
Şekil 4.68. Model-7,5-12 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.	67
Şekil 5.1. Modellerde çekme gerilmesi dağılımı. a) Model-7,5-12 için çekme gerilmesi dağılımı b) Model-0 için çekme gerilmesi dağılımı.	69
Şekil 5.2. Modellerde basınç gerilmesi dağılımı. a) Model-15-12 için basınç gerilmesi dağılımı b) Model-0 için basınç gerilmesi dağılımı.	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ülkemizde bulunan bazı çift cidarlı kubbeler.....	10
Çizelge 3.1. Zeynel Bey Türbesi'ne ait malzeme özellikleri.....	26
Çizelge 3.2. Zeynel Bey Türbesinde gerçekleştirilen spektral analizin sonuçları.	35
Çizelge 4.1. Modellerin eleman ve düğüm noktası sayısı.	40
Çizelge 5.1. Parametrik çalışmaya ait analizlerin sonuçları.	68



SİMGELER VE KISALTMALAR

cm³	santimetreküp
DD2	50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi düzeyi
g	gram
km	kilometre
m	metre
mm	milimetre
MPa	megapascal
s	saniye
S_{D1}	1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
S_{DS}	kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
T	periyot
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar insanlığın kültürünü en somut biçimde yansıtan sanat eserleridir. İlk çağlarda insanlar yapıları barınma ve ulaşım gibi ihtiyaçlarını karşılamak için kullansa da büyük devletler kuruldukça yapılar bir otorite ve güç göstergesi hâline gelmiştir. Aynı zamanda insanın doğası gereği estetiğe duyduğu ihtiyaç neticesinde yapıların görsel bir şölen sergilemesi istenmiştir. Asırlara meydan okuyan bu yapıların stabilitesini ve estetiğini sağlamak da dönemin mühendislerine düşmüştür. İnsanın ruhuna seslenen yapıların korunması ve geleceğe güvenle taşınması tarihe yakından temas etmek açısından oldukça önemlidir. Nitekim Fransız yazar Victor Hugo (2019) Notre Dame'ın Kamburu isimli eserinde şöyle demiştir: “Bakmasını bilenler, bir yüzyılın ruhunu ve bir kralın yüz ifadesini bir kapının tokmağında bile fark edebilirler.” (s.144)

Tarih boyunca yapılarda örtü sistemi olarak kubbeler kullanılmış olup bu kubbelere çeşitli anlamlar yüklenmiştir. Kubbelere bazen cennetin bir simgesi hâline gelirken bazen de mavi çinileriyle gökyüzünü temsil etmiştir. Kimi zaman yüksek kubbe devletin otoritesini gösterdiği düşünülmüştür. Böylece tasarımcıların en büyük ve stabil yığma kubbeyi yapma yarışları uluslararası bir mesele hâline gelmiştir. Bu nedenlerden dolayı Sultaniye, Ayasofya, Pantheon, Kubbetü's Sahra ve Florensa Katedrali gibi eşsiz eserler meydana gelmiştir.

Kubbelerin taşıyıcı sistemdeki görevi yüklerini diğer taşıyıcı elemanlara güvenli bir biçimde aktarmaktır. Bu aktarımı meridyenel ve dairesel kuvvetler vasıtasıyla gerçekleştirirler. Meridyenel kuvvetler kubbenin en tepesinden kasnağa kadar yükü aktaran basınç kuvvetleridir. Dairesel kuvvetlerse üst kısımda basınç olarak çalışırken kasnağa doğru gelindikçe çekme kuvveti olarak çalışan iç kuvvetlerdir. Bazen tasarımcılar yük aktarımını devam ettirmek ve dairesel kesitten çokgensel gövde kesitine geçişi rahatlatmak için pandantif, tromp ve Türk üçgeni gibi yapısal elemanlardan yardım almışlardır.

İlerleyen çağlarda mimarlar farklı kubbe formları deneyerek kubbe geleneğini çeşitlendirmişlerdir. Bazen kubbenin doğrudan geometrisini, bazen yapım şeklini bazen de kabuk sayısını değiştirmişlerdir. Böylece çift cidarlı kubbe kavramı meydana gelmiştir.

Genellikle büyük bir dış kubbe ve daha mütevazı bir iç kubbe ile mekâna estetik açıdan değer katmıştır. Mühendisler çift cidarlı kubbeler kadar yaygın olmasa da bazen ihtiyaçtan dolayı üç cidar kullanmışlardır.

Ülkemiz birçok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Bu bağlamda ülkemizde tarihi yapıların korunması ve geleceğe sağlıklı biçimde aktarması için mühendislik hizmeti alması gerekmektedir. Söz konusu yüksek lisans tezi ülkemizde de varlığını sürdüren çift cidarlı kubbelere odaklanılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde kubbeler hakkında genel bilgi verildikten sonra kubbeler cidar sayısına göre sınıflandırılmıştır. Çift cidarlı kubbelerin kendi içerisinde sınıflandırılması ve çift cidarlı kubbelerde kullanılan sistem elemanları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Ayrıca ülkemizde ve dünyada bulunan çift cidarlı kubbelere örnekler verilmiştir. Bunun yanında kubbelerle ilgili geçmişte yapılan stabilite çalışmaları ve yük aktarımının nasıl sağlandığıyla ilgili bilgiler bu bölümde yer verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde Hasankeyf'te bulunan ve çift cidarlı kubbeye sahip olan Zeynel Bey Türbesi hakkında genel bilgiler yer almaktadır. Bununla birlikte türbenin sonlu elemanlar modeli oluşturularak sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde mevcut türbede oluşan gerilmeler ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Dördüncü bölümde Zeynel Bey Türbesi'nin çift cidarlı ve sekiz iç payandalı kubbesinin geometrisi ve malzeme özellikleri kullanılarak iç payandaların çift cidarlı kubbelerin yapısal davranışa nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Bunun için payanda sayısının ve kalınlığının değiştiği modeller oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modeller üzerinde yapısal analiz gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde, dördüncü bölümde gerçekleştirilen analizlerin değerlendirilmesi yapılarak bazı çıkarımlarda bulunulmuştur. Payanda sayısının ve konumunun uygun olarak kullanılmasının yapısal davranışa katkısı olduğu gözlemlenmiştir.

2. KUBBELER

Kubbe basit tanımıyla bir kemerin simetri eksenini etrafında 180° döndürülmesiyle oluşturulan pozitif Gauss eğrilikli örtü sistemidir. Kubbelerin yapısal işlevi gelen yükleri diğer yapı elemanlarına güvenli bir biçimde aktarmaktır. Yük aktarımının sağlıklı bir biçimde devam etmesini ve tarihi yapıların korunmasını sağlamak yapısal davranışa hâkim olmayı gerektirir.

Kubbeler ilk olarak Mezopotamya mimarisinde kullanılmıştır. Daha sonra farklı coğrafyalarda kullanımı sürdürülmüştür. Pantheon güneş saati vazifesi gören delikli kubbesiyle Antik Roma'nın sembol yapılarından birisi olmuştur (Şekil 2.1).

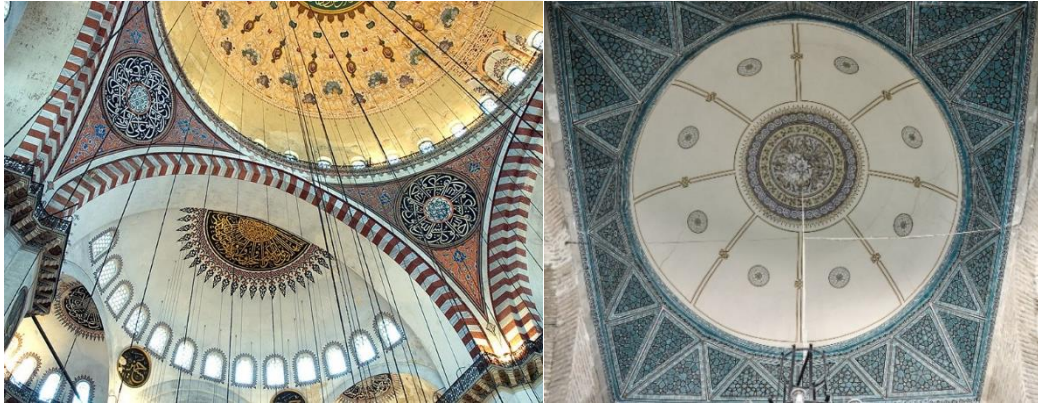


Şekil 2.1. Pantheon (URL-1).

Türk mimarisinde kubbeler otağ formundan başlayarak kurgan mezarları da içerecek biçimde birçok mekânda örtü sistemi olarak kullanılmıştır. Daha sonra yüzyıllar boyunca gelişim göstermiş, devletler kuruldukça kubbeler merkezî otoritenin bir sembolü haline gelmiştir. Bununla beraber Türklerde kubbe göğü sembolize etme ve aynı gök kubbe altında tüm cemaati toplama düşünceleriyle de kullanılmıştır (Şahin, 2013). Cami mimarisinde tüm evreni birleşimini sembolize eden kubbe Ortodoks kilisesinde cenneti temsil etmektedir (Altın, 2010).

Tasarımcıların düşey taşıyıcı olmaksızın geniş açıklıkları geçme istekleri yeni kubbe kombinasyonları ve geçiş elemanlarının üretilmesine neden olmuştur. Kubbeye geçiş elemanlarının temel işlevi dairesel bir kesitten çokgensel kesite geçerken yük aktarımını güvenli alanda tutmaktır. Bu bağlamda kullanılan kubbeye geçiş elemanları pandantif, tromp ve Türk üçgeni olarak sayılabilir.

Mimar Sinan eserlerinde büyük bir ana kubbe ve yarım kubbelerin çeşitli kombinasyonlarını kullanmıştır. Bunu yaparken kubbeden çokgensel plana geçmeyi sağlayan pandantif adı verilen küresel üçgenlerden destek almıştır. Şekil 2.2.(a)'da Süleymaniye Camisi'nin kubbesi ve pandantifler gösterilmektedir. Tromp ise yapının köşe kısımlarına inşa edilen küçük tonozlar olarak ifade edilebilir. Şekil 2.2.(c)'de Yağıbasan Medresesi'nin trompları verilmiştir. Bir diğer geçiş elemanı olan Türk üçgeni bir ters bir düz şekilde teşkil edilen üçgen kuşakları olarak tanımlanır. Şekil 2.2.(b) Konya Alâeddin Cami'nin Türk üçgeni dizilimini göstermektedir.



(a) Pandantif örneği (URL-2).

(b) Türk üçgeni örneği (URL-3).



(c) Tromp örneği (URL-4).

Şekil 2.2. Kubbeye geçiş elemanları.

2.1 Kubbelerin Kabuk Sayısına Göre Sınıflandırılması

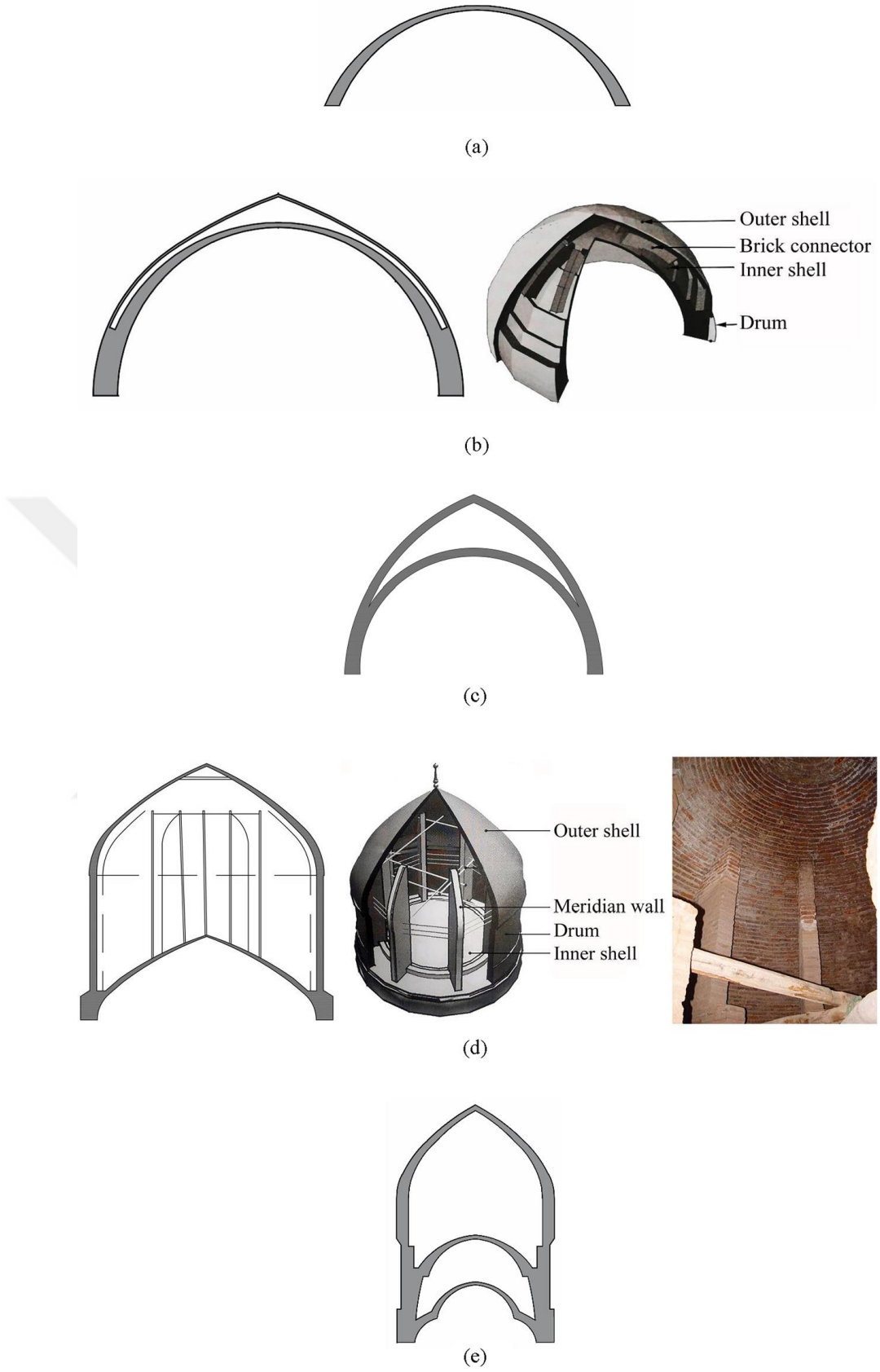
Büyük açıklıkları düşey taşıyıcı olmaksızın geçme isteğiyle inşa edilen kubbelerin kabuk sayısı zamanla artmıştır. Kubbelerin kabuk sayısındaki bu değişimin temel nedeni stabiliteyi sağlayarak daha yüksek kubbeler inşa etmek ve kubbenin iç kısmındaki süslemelerin de rahatça görünmesini sağlamaktır.

Hejazi ve Pourabedin (2021) tarihi yığma kubbeleri sahip oldukları kabuk sayısına göre üçe ayırmıştır. Bunlar: tek cidarlı, çift cidarlı ve üç cidarlı kubbelerdir. Şekil 3’de kubbeler cidar sayısına göre sınıflandırılmıştır. Çift cidarlı kubbelerse kendi içerisinde sürekli ve süreksiz olarak sınıflandırılır. Sürekli iç ve dış kubbeler, dayanak noktasından 22,5 dereceye kadar birlikte inşa edilirler (Safaeipour vd., 2012). Böylece yapısal açıdan yekpare bir davranış sergilerler. Sürekli çift cidarlı kubbeler arasındaki mesafe yaklaşık birkaç santimetre olacak şekilde çok azdır ve bazı uygulamalarda bu kabuklar birbirlerine tuğlalar yardımıyla bağlanır. Şekil 2.3.(b) sürekli çift cidarlı kubbe örneğini ve tuğla bağlantıları göstermektedir.

Süreksiz çift cidarlı kubbelerin arasındaki mesafe birkaç metreyi bulacak şekilde fazla olabilmektedir. Bu kubbeler bazen Şekil 2.3.(c)’de olduğu gibi tabanın üçte biri yüksekliğe kadar beraber inşa edilirken bazen tabandan itibaren ayrı olarak inşa edilebilmektedir. Bu durumda Şekil 2.3.(d)’de görüldüğü gibi iki kubbe arasına tuğla iç payandalar inşa edilebilir.

Günümüze ulaşan en eski ayrık süreksiz çift cidarlı kubbe örneği 11. yüzyıla ait, Büyük Selçuklular Dönemi’nde inşa edilmiş olan Karahan İkiz Türbeleridir (Valibeig vd., 2018). Söz konusu türbeler Şekil 2.4’de gösterilmektedir.

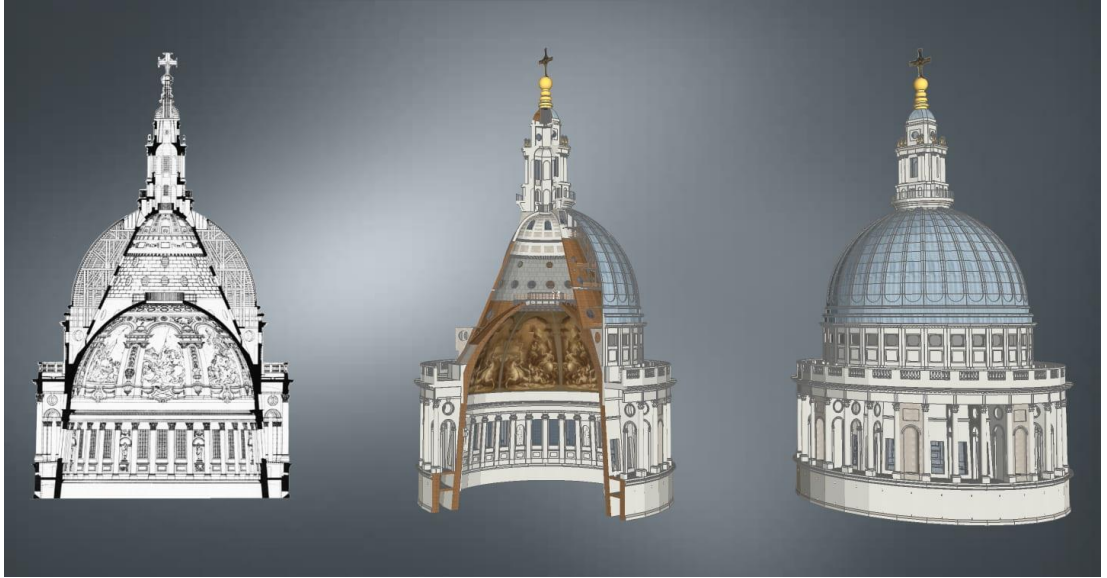
Çift cidarlı kubbeler kadar yaygın olmasa da bazı mühendisler yapılarda Şekil 3(e)’deki gibi üç cidar kullanmayı denemiştir. Üç cidarlı kubbelerin Batı mimarisindeki en spesifik örneği Londra’da bulunan Aziz Paul Katedrali’nin yığma kubbesidir. İç ve dış kubbe görsel amaçlarla tasarlanırken ortadaki kubbe taç kısmındaki ağır feneri desteklemek amacıyla geliştirilmiştir (Şekil 2.5). İslam mimarisinde ise üç cidarlı kubbeler özellikle Timur Dönemi’nde kullanılmış olup daha sonra neredeyse hiç görülmemiştir (Ashkan ve Ahmad, 2009).



Şekil 2.3. Kubbelerin sınıflandırılması (Hejazi ve Pourabedin, 2021). a) Tek cidarlı kubbe b) Sürekli çift cidarlı kubbe c) Radyal duvarları olmayan süreksiz çift cidarlı kubbe d) Radyal duvarları olan süreksiz çift cidarlı kubbe e) Üç cidarlı kubbe.



Şekil 2.4. Karahan ikiz türbeleri (URL-5).



Şekil 2.5. Aziz Paul Katedrali'nin üç cidarlı kubbesi (URL-6).

Ahşap karkas ve çitalar üzerine sıva uygulamasına dayanan bağdadi tekniği Osmanlı kubbelerinde yaygın olarak kullanılmıştır (Şahin, 2013). Genellikle yığma yapı sisteminin üzerinde örtü işlevinde kullanılan bağdadi kubbeler kâgir imajı vermek amacıyla kurşunla kaplanır (Alkan, 2019). Bu teknikle yapılan kubbelerden bazıları çift cidarlı ve cidarlar arasındaki mesafe çok az olduğu için sürekli kategorisinde değerlendirilebilir. Yıldız Hamidiye Camii'nin bağdadi kubbesi örnek olarak verilebilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Yıldız Hamidiye Cami'nin kubbesi (Alkan, 2019).

2.2 Çift Cidarlı Kubbeler

Bir kubbe üslubu olarak meydana gelen çift cidarlı kubbelerin erken dönem vakaları İran bölgesinde Büyük Selçuklu Devleti'nde görülmüştür. Akabinde Artuklu, İlhanlı, Akkoyunlu, Timur ve Safevi dönemlerinde çift kubbe formları kullanılmıştır (Yeşilbaş, 2020). Çift cidarlı kubbe uygulamalarının temel motivasyonu devletin otoritesini temsil eden büyük bir kubbe inşa etmektir. Bunu yaparken iç kısımdaki çini ve işlemelerin daha rahat görülmesini sağlamak amacıyla dış kubbeye nazaran daha az yüksekliğe sahip iç kubbe formları kullanılmıştır.

Tarihte gösterişli yapıların birçoğunda çift cidarlı kubbe kullanılmıştır. Bu üslubun en gelişmiş örneklerine Timur mimarisinde rastlamak mümkündür. Nitekim Timur'un anıt mezarı olan Gur-i Emir çift kubbesiyle Özbekistan'ın en önemli anıtsal yapılarından birisi olmuştur. UNESCO tarafından koruma altına alınan Taj Mahal ise Babür hükümdarı Şah Cihan'ın eşi için yaptırılmıştır. Kubbe yerden 47 m yüksekliğe kadar uzanır ve çift cidarlıdır (Yeşilbaş, 2020). Şekil 2.7 çift cidarlı kubbe örneklerini sunar.

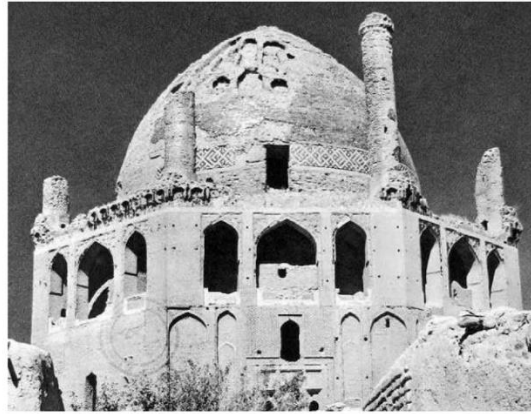
İlhanlı hükümdarı Olcaytu'nun anıt mezarı olan ve Burnellesci'nin Florensa Katedrali'ni tasarlarken ilham aldığı söylenen Sultaniye Kubbesi birbirlerine kusursuz biçimde paralel çift cidara sahiptir. UNESCO tarafından koruma altına alınan yapıda kabuklar arasında kubbenin stabilitesini arttıran ağ biçiminde bağlantı elemanları bulunmaktadır (Feizolahbeigi vd., 2024). Şekil 2.8 kubbedeki bahsi geçen ağlanma biçimini ifade eder.



(a) Gur-i Emir, Özbekistan (URL-7).

(b) Taj Mahal, Hindistan (URL-8).

Şekil 2.7. Çift cidarlı kubbe örnekleri.



(a)



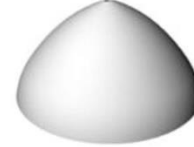
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 2.8. a) Sultaniye Kubbesi b) iç kubbe c) kubbeler arası bağlantı elemanları d) iç kubbe + bağlantı elemanları e) iç kubbe + bağlantı elemanları + dış kubbe (Feizolahbeigi vd., 2024).

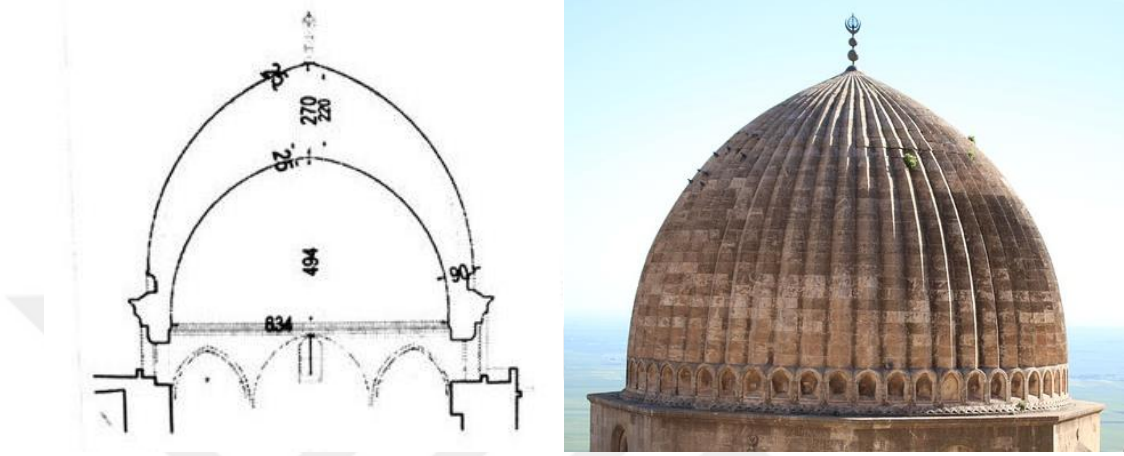
İran bölgesinde yaygın bir şekilde kullanılan çift cidarlı kubbe üslubu kültürel ve siyasi etkileşimler sonucunda Anadolu'ya taşınmıştır. Büyük Selçuklu, İlhanlı ve Timur döneminde dış kubbelerin çiniyle kaplanması ve heybetli kubbeler üretilmesi söz konusu iken Artuk, Memlük, Akkoyunlu ve Osmanlı devletlerinde işlevsel açıdan bu üslup değerlendirilmiş ve dış kubbede çini kaplaması yaygın olarak kullanılmamıştır (Yeşilbaş, 2020).

Yeşilbaş (2020) yaptığı çalışmada Anadolu'da bulunan çift cidarlı kubbeleri mimari açıdan değerlendirerek bir derleme ortaya koymuştur. Bu çalışmadan yola çıkarak ülkemizde yer alan çift cidarlı kubbelerden bazıları Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Ülkemizde bulunan bazı çift cidarlı kubbeler.

Yapının Adı	Yapıldığı Dönem	Bulunduğu Şehir	Yapıldığı Yüzyıl
Mardin Ulu Cami	Artuklular	Mardin	12. yy
Zinciriye Medresesi	Artuklular	Mardin	14. yy
Kasımiye Medresesi	Artuklular Akkoyunlular	Mardin	15. yy
Hamza-i Kebir Türbesi	Akkoyunlular	Mardin	15. yy
Yakutiye Medresesi	İlhanlılar	Erzurum	14. yy
Zeynelbey Türbesi	Akkoyunlular	Batman	15. yy
II. Selim Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
Şehzade Mehmet Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
Kanuni Sultan Süleyman Türbesi	Osmanlı	İstanbul	17. yy
Kara Ahmed Paşa Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
Şehzadeler Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
Zal Mahmud Paşa Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
Kılıç Ali Paşa Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
III. Murad Türbesi	Osmanlı	İstanbul	16. yy
III. Mehmed Türbesi	Osmanlı	İstanbul	17. yy
Adıyaman Ulu Cami*	Dulkadiroğulları	Adıyaman	16. yy - 19. yy
* Yapımı 16. yüzyılda tamamlanan Adıyaman Ulu Cami 19. yüzyılda yıkılarak çift cidarlı kubbesiyle yeniden yapılmıştır. Bu yapı Şubat 2023 Elbistan depremi neticesinde yıkılmıştır.			

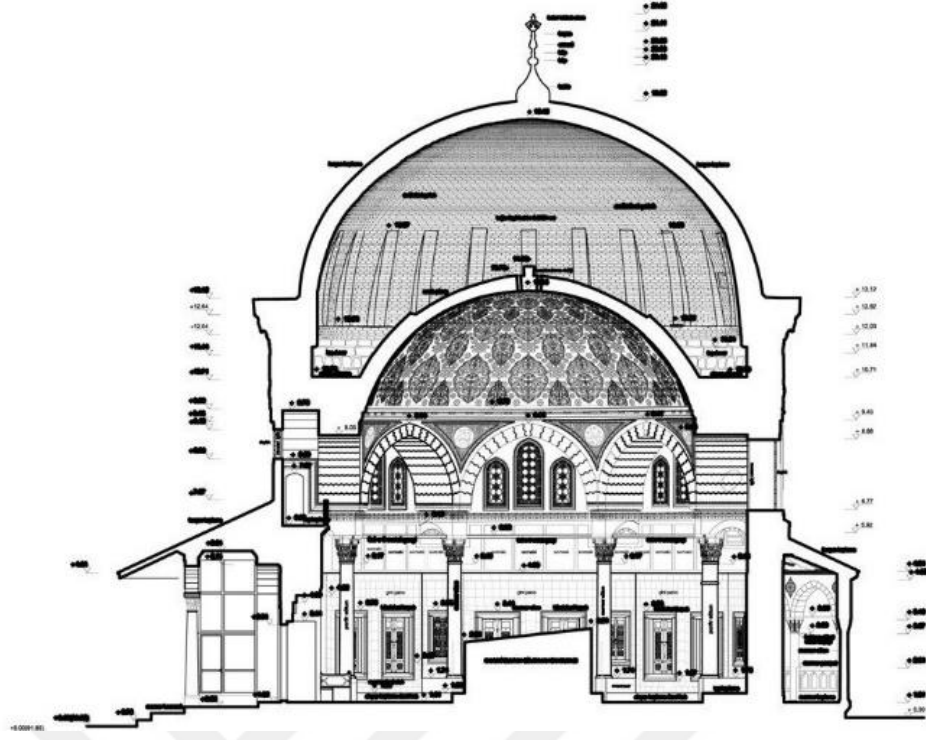
Mardin Ulu Cami çift cidarlı kubbelerin Anadolu’da bulunan en erken örneklerinden biridir. Artuklu dönemine ait olan yapıda dilimli ve sivri tipolojide dış cidar mevcuttur (Şekil 2.9). Yine aynı bölgede bulunan Zinciriye Medresesi, Kasımiye Medresesi ve Hamza-i Kebir Türbesinde çift cidarlı dilimli kubbe geleneğinin devam ettiği görülmektedir.



Şekil 2.9. Mardin Ulu Cami'nin kubbesi (URL-10, Ali Şahin Aytek).

Evliya Çelebi’nin seyahatnamesinde övgüyle bahsettiği Kanuni Sultan Süleyman Türbesi’nin kubbesi ülkemizdeki süreksiz çift cidarlı kubbelerin en önemli örneklerindendir. İki kubbe arasında hatırı sayılır bir boşluk ve kaburga sistemi bulunmaktadır (Şekil 2.13). Kaburgalar özellikle kubbenin çekme kuvvetinin en fazla olduğu etek bölgesine 1,2 m aralıklarla yerleştirilmiş (Çelik, 2001). Şekil 2.10’da söz konusu kubbenin kesiti görülmektedir.

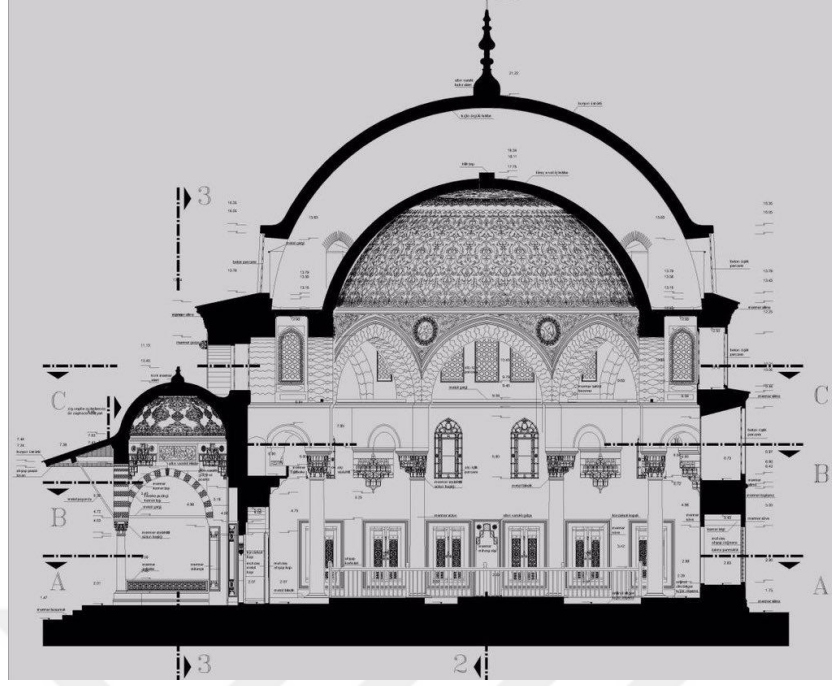
Mimar Sinan çift cidarlı kubbe uygulamasını yalnızca Kanuni Sultan Süleyman Türbesi ile sınırlı tutmayarak Süleymaniye Cami’nin yan sahnin kubbelerinin bir kısmında da sürdürmüştür (Berkas, 2021). Sonrasında yine Mimar Sinan tarafından II. Selim Türbesi (Şekil 2.11 ve Şekil 2.12) ve Hürrem Sultan Türbesi’nde çift cidarlı kubbe kullanılmıştır. Sinan’dan sonraki dönemde Osmanlı mimarisinde III. Murad ve III. Mehmed türbelerinde de bu gelenek devam etmiştir (Ziyrek, 2011).



Şekil 2.10. Kanuni Sultan Süleyman Türbesi'nin kesiti (Abdulkadir Pekşen'in kütüphanesi).



Şekil 2.11. II. Selim Türbesinin iç ve dış kubbesi (URL-11, Seda Özen Bilgili).



Şekil 2.12. II. Selim Türbesinin kesiti (Abdulkadir Pekşen'in kütüphanesi).

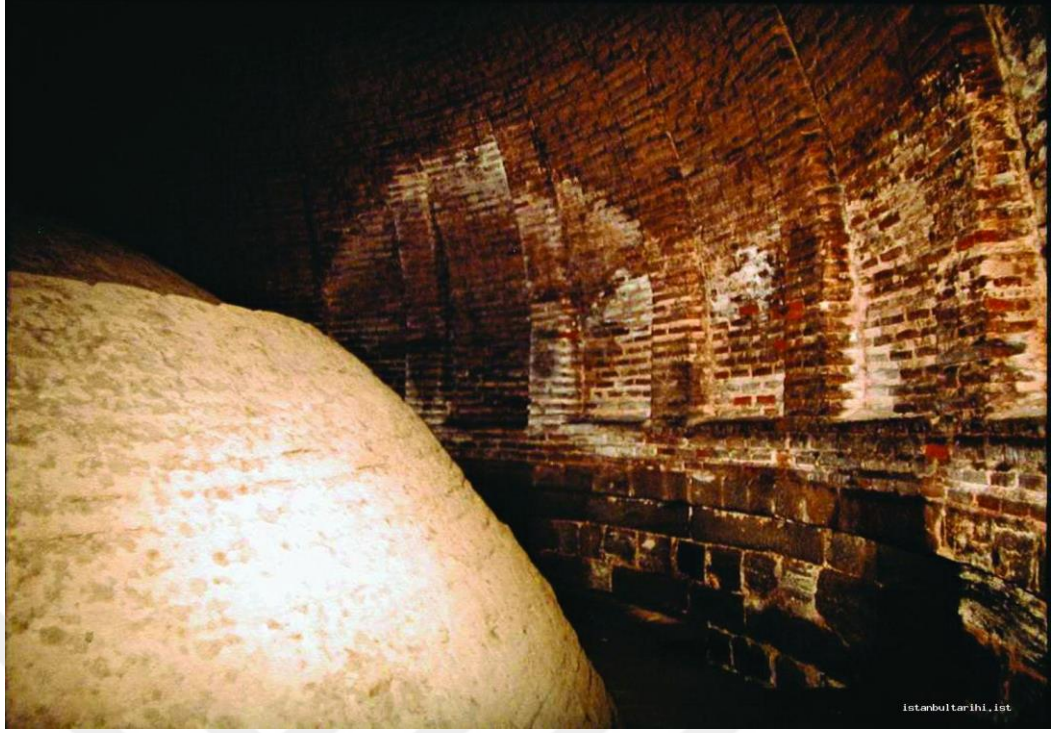
2.2.1 Çift cidarlı kubbelerin sistem elemanları

Çift cidarlı kubbe sistemi iç ve dış kubbeler, bu kubbelerin arasında bulunan iç payandalar, ahşap bağlantı elemanları ve kubbe kasnağını içerir. Tez kapsamında sistem elemanları teker teker ızah edilecektir.

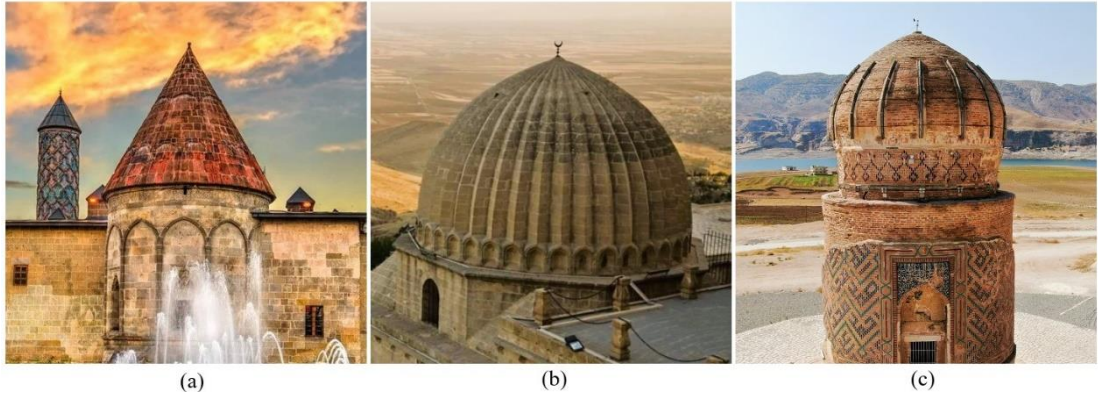
2.2.1.1 İç ve dış kubbeler

Çift kabuklu kubbe inşa etmenin temel motivasyonu görsel üstünlük sağlamaktır. Bunun yanında bu sistemin çeşitli avantajları vardır. Dış kubbenin varlığı iç kubbeyi hava koşullarına karşı korunması bu avantajlardan birisidir (Ashkan ve Ahmad, 2010). İç ve dış kabukların arasında bulunan boşluk ısı yalıtımı sağlar. İki kubbenin arasındaki mesafe ne kadar fazlaysa sıkışan havanın hacmi o kadar çoktur (Valibeig vd., 2018).

Çift cidarlı kubbe uygulamalarında iki kubbe farklı formlara sahip olabildiği gibi aynı formda da inşa edilebilmektedir. Çift cidarlı kubbeleri dış kabuk şekline göre konik, sivri ve soğanlı olarak sınırlandırmak mümkündür (Ashkan ve Ahmad, 2010). İç kubbelerse genellikle eliptik, dairesel ve sivri formlarda kullanılmıştır.

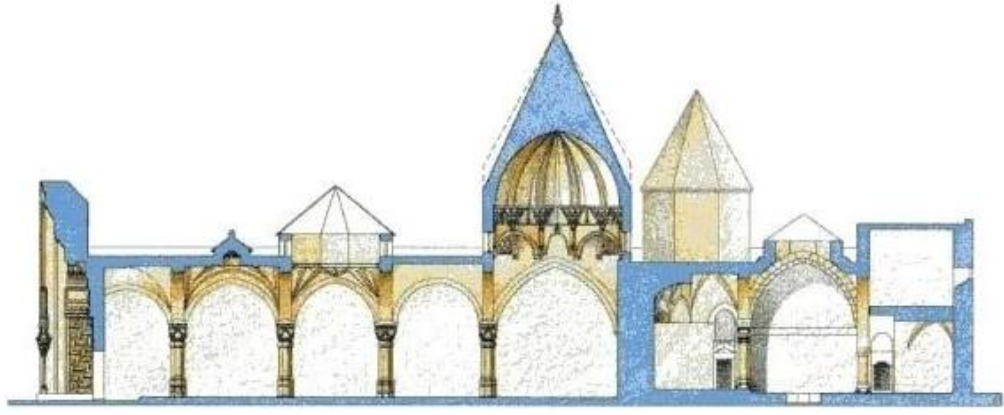


Şekil 2.13. Kanuni Sultan Süleyman Türbesi'nin iç ve dış kubbesi (URL-12).



Şekil 2.14. Farklı dış kubbe formları. a) Yakutiye Medresesi'nin konik kubbesi (URL-13) b) Zinciriye Medresesi'nin sivri kubbesi (URL-14) c) Zeynelbey Türbesi'nin soğanlı kubbesi (URL-15).

Türk mimarisinde kurganla başlayan konik kubbe kullanımı anıt mezarlarda da etkisini göstermiştir. İçte silindirik kubbe dışta külâh şeklinde sivri tipolojideki çift cidarlı kubbeler cami ve anıt mezarlarda yaygın bir kullanıma sahiptir. UNESCO tarafından koruma altına alınan Divriği Ulu Cami sivri tipolojide çift cidarlı kubbeye sahiptir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Divriği Ulu Cami'nin kubbe kesiti (URL-16).

Mühendisler tarihi kubbeleri tasarlarken stabiliteyi sağlamak için kubbe yüksekliğinin açıklığa oranının belirli bir sayı olması gerektiğini savunmuştur. Bu orana literatürde Khiz oranı denir. Kubbenin stabil durumda olması için bu oranın 0,5'e büyük eşit olması gerekmektedir (Feizolahbeigi vd., 2021).

2.2.1.2 İç payandalar

Süreksiz çift cidarlı kubbelerin arasında kimi zaman kabukları ve kasnağı birbirine bağlayan iç payandalar bulunmaktadır. Bu payandalar sistemin yekpare çalışmasına katkıda bulunan yapısal elemanlardır (Feizolahbeigi vd., 2021). Aynı zamanda kubbenin radyal itmelerine karşı koyan ve dairesel çekme kuvvetini sınırlandıran takviye elemanlarıdır. Şekil 14 Abbasi Ulu Camii'nin Şekil 2.16 Abdulkadir Geylani Türbesi'nin kubbeleri içerisindeki iç payandalarını göstermektedir.

Uygun boyut ve konumda kullanıldığında iç payandalar, çekme gerilmelerini kubbenin alt kısımlarındaki çekme bölgesinden üst kısımlarındaki basınç bölgesine aktararak yapısal performansın iyileşmesini sağlar.

Feizolahbeigi vd. (2021) yaptığı çalışma sonucunda açıklığın yüksekliğe oranı 1'den küçük olduğunda yer değiştirmelerin üst kısımdaki basınç alanına aktarılması için iç payandaların gerekliliğini vurgulamıştır. Yani sistem basınç bölgesinde güçlendirilmelidir. Bu oran 1'den büyükse yer değiştirmeleri aktarmak için iç payandalar hayati bir öneme sahip değildir ama çatlak gelişiminin önlenmesine katkı sağlarlar.



Şekil 2.16. Abbasi Ulu Cami'nin iç payandaları (URL-17, Fariborz Alaghband).



Şekil 2.17. Abdulkadir Geylani Türbesi'nin iç payandaları (Abdulkadir Pekşen kütüphanesi).

İç payandalar yapının ihtiyacına göre farklı sayılarda inşa edilmiştir. Ashkan ve Ahmad, 2010 yılında incelediği kubbelerin iç payanda sayıları 4,6,8,14 ve 18 olarak değişmektedir. Yine aynı çalışmada payandaların yüksekliğinin 8 ile 15 metre arasında olduğu görülmüştür. Bu payandalar birinci ve ikinci tip olarak ikiye ayrılır ve birincil tip payandalar daha küçük boyutlara sahiptir.

Dış kabukla eş zamanlı inşa edilen kubbe payandalarının varlığı kasnağa gelen yatay kuvveti dengeler. Bu durum kubbenin yatay yönde açılma eğilimini azaltırken iç kuvvetlerin tek bir noktada yığılmasını engeller. Sütbaş ve Ural (2023) yaptıkları çalışmada iç payandaların varlığının kubbedeki çekme, basınç ve kayma gerilmelerinin tek bir noktada yığılmasını engellediğini ortaya koymuştur. Gerilmeler dış kabukta yığılmamış olup aradaki çizgilerle bölünmüştür. Bu çizgiler payandaların konumunu gösterir.

2.2.1.3 Ahşap elemanlar

Ahşap bağlantı elemanları çift kubbelerin arasında farklı konumlarda kullanılan, global çekme dayanımını arttıran (Feizolahbeigi vd., 2021) yapısal elemanlar olarak tanımlanır. Bu elemanlar kimi zaman radyal duvarların arasında kullanılırken kimi zamanda iç kubbenin tepesinden dış kubbenin tepesine kadar yükselen bir dikme olarak konumlanabilir (Şekil 2.18). İran mimarisinde dikey ahşap takviyeler görülürken Özbekistan ve Türkmenistan mimarisinde ahşap elemanlar radyal duvarların arasında kullanılmıştır (Ashkan ve Ahmad, 2010).



Şekil 2.18. Kabuklar arasında bulunan ahşap elemanlar (URL-17).

2.2.1.4 Kubbe kasnağı

Kasnak basit tanımıyla kubbenin üzerine oturduğu yapı elemanıdır. Şekli dairesel yahut çokgensel olabilir. Mühendisler Anadolu’da bulunan kubbeli yapıların birçoğunu kasnaklı biçimde tasarlamıştır. Mimar Sinan yapılarında dörtgen, altıgen ve sekizgen kasnaklar kullanmıştır. Mihrimah Sultan Cami, Süleymaniye, Şehzade Cami dörtgen; Gazi (Kara) Ahmed Paşa Cami ve Kadirga Sokullu Mehmet Paşa Cami altıgen; Azapkapı Sokullu Mehmet Paşa Cami ve Selimiye Cami sekizgen biçiminde kasnağa sahiptir (Bilgin, 2006).



Şekil 2.19. Kubbe kasnağı örneği (URL-18).

Kasnakların mühendislik işlevi genel anlamda kubbe eteklerinde oluşan dairesel kuvvetleri absorbe ederek oluşabilecek açılmaların önüne geçmektir. Kubbelerde kasnak yüksekliğinin artması dayanımı ve taşınan maximum yükü arttırırken yatay deplasmanı azaltıcı bir etkide bulunur (Tanrıverdi, 2020).

Kubbe kasnakları çift cidarlı kubbelerde sıklıkla kullanılmıştır. Erken dönemlerde daha kısa kasnaklar kullanılırken özellikle Timur mimarisinde uzun kasnaklar tercih edilmiştir (Safaeipour vd., 2012). Tanrıverdi (2020), yaptığı çalışmada kasnak yüksekliğinin %10 artmasıyla dayanımın %29,6 arttığı sonucuna ulaşmıştır. Bu da Timur Dönemi’nde uzun kasnakların kullanılmasını doğrular niteliktedir.

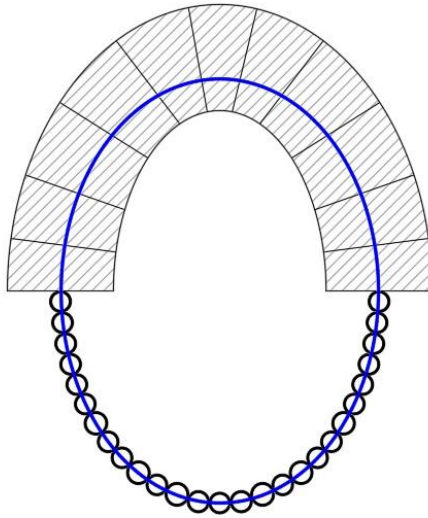
2.3 Kubbelerin Yapısal Davranışı

Basit geometriye sahip bir kubbenin kesiti alındığında ortaya çıkan yapısal eleman kemerdir. Dolayısıyla mühendis ve bilim adamları bir kubbenin yapısal davranışını ele almadan önce kemerler üzerinde çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu yüzden tez kapsamında önce kemer sonrasında kubbe davranışları hakkında yapılan çalışmalara değinilecek, akabinde kubbelerin yük aktarım prensiplerinden bahsedilecektir.

2.3.1 Yığma kemer teorileri

1670 yılında Robert Hooke kemerlerin stabilite sorununu ilk defa ortaya koymuş ve “ideal kemer formu nedir?” sorusuna yanıt aramıştır. Aradan beş yıl geçtiğinde sorusunu şu şekilde yanıtlamıştır: Asılı bir zincir nasıl sarkıyorsa ters çevrilmiş bir kemer de öyle sarkacaktır. Kemer ile asılı zincirin statığı aynıdır (Huerta, 2011).

1697 yılında Matematikçi Gregory Hooke’un cevabını desteklemiş ancak şöyle bir eklemede bulunmuştur: Zincir eğrisinden başka hiçbir şey gerçek bir kemer figürü değildir ve herhangi bir kemer yük taşıyabiliyorsa bunun sebebi kalınlığının içerisinde bazı zincir eğrilerinin yer almasıdır.



Şekil 2.20. Zincir-kemer sistemi.

Fransa'da kemer teorisinden bahseden makaleyi ilk olarak La Hire 1695 yılında yayınlamıştır. Bu çalışmada “yarı dairesel bir kemer dengede kalması için hangi yük uygulanması gerekir?” sorusunun cevabını aramıştır. Problemi çözmek için kuvvet poligonu kullanmıştır.

1712'de yayınladığı makaleyle kemer teorisine esas katkıyı sağlamıştır. Yaptığı çalışmada “itme kuvveti kemerin koptuğu noktalardan geçer ve iç eğriye teğettir.” sonucuna ulaşmıştır. Böylece kopma noktaları bilinen bir kemerin itme kuvveti ve dayanakların derinliği hesaplanabileceğini söylemiştir.

1729 yılında Belidor La Hire'nin teorisine ek olarak pratik bir hesaplama tablosu önermiştir. Kopma noktalarını taç ile ayakların ortasında sabitleyerek itme noktasını mesnetin ortasına kaydırmıştır.

Genel anlamda İngiltere'de tasarımcılar Hooke ve Gregory'nin yaklaşımını kullanarak denge hâlinde bir kemer oluşturmaya çalışırken Fransa'da La Hire – Belidor teorisine göre itme kuvvetini hesaplamak için kopma noktalarını belirlemeye yönelik çalışmalar yürütmüşlerdir.

Daha sonra 1824 yılında itme hattına dayanan kemer teorisi ilk defa Young tarafından ortaya konulmuştur. İtme hattı iç kuvvetlerin belirli bir mafsal tarafından kesiştiği yeri ifade eder. İtme hattı iç ve dış eğrilere temas etmemeli ve kemerin sınırları içinde kalmalıdır. Aksi halde mafsal oluşturarak çökme mekanizması geliştirebilir.

İtme hattı kavramının ortaya konulmasından konuyla ilgili farklı durumlara özgü çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

2.3.2 Yığma kubbe teorileri

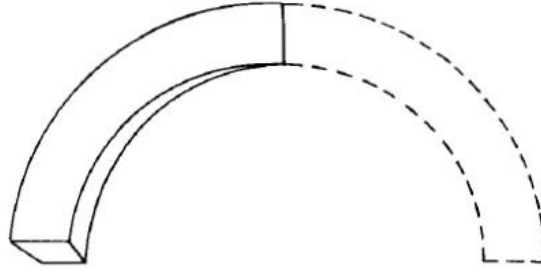
Gerçek bir kubbe tasarlamaya yönelik yapılan ilk bilimsel çalışma Hooke tarafından Aziz Paul Katedrali üzerine yapılmıştır. İlk bilimsel makale ise Bouguer tarafından 1734 yılında yazılmıştır. Araştırmacı sürtünmesiz ortamda olası stabil kubbe formlarını incelemiştir (Huerta, 2011).

Gerçek bir kubbenin stabilitesi hakkındaki ilk çalışmaysa 1742 yılında Le Seur, Jacquier ve Boscovich isimli üç matematikçi tarafından Aziz Petrus Bazilika'sının kubbesinde bulunan çatlakların incelenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Matematikçiler kubbeye bulunan çatlakların kasağın dışa doğru hafifçe eğilmesinden kaynaklandığı sonucuna ulaşmıştır.



Şekil 2.21. Aziz Petrus Katedrali'nin çatlakları hakkında yapılan çalışma (Le Seur, 1742).

Michelangelo tarafından tasarlanan Aziz Petrus Katedrali'nin kubbesi hakkında Poleni 1748 yılında Hooke ve Gregory'nin ilkelerini kullanarak deneysel bir çalışma yürütmüştür. Le Seur, Jacquier ve Boscovich tarafından hesaplanan ağırlıkları kullanarak kubbeyi 50 portakal dilimine ve her bir dilimi 16 parçaya bölmüştür. Ağırlıkları parçalarla orantılı olan bir zincir oluşturmuş ve karşılıklı iki portakal dilimini bir kemer olarak düşünmüştür. Buna göre sarkıtılan zinciri ters çevirdiğinde itme hattının kemerlerin sınırları içerisinde kaldığını dolayısıyla çatlakların stabilite açısından sorun teşkil etmeyeceğini söylemiştir (Heyman, 1988).



Şekil 2.22. Poleni'nin portakal dilimi (Heyman, 1987).

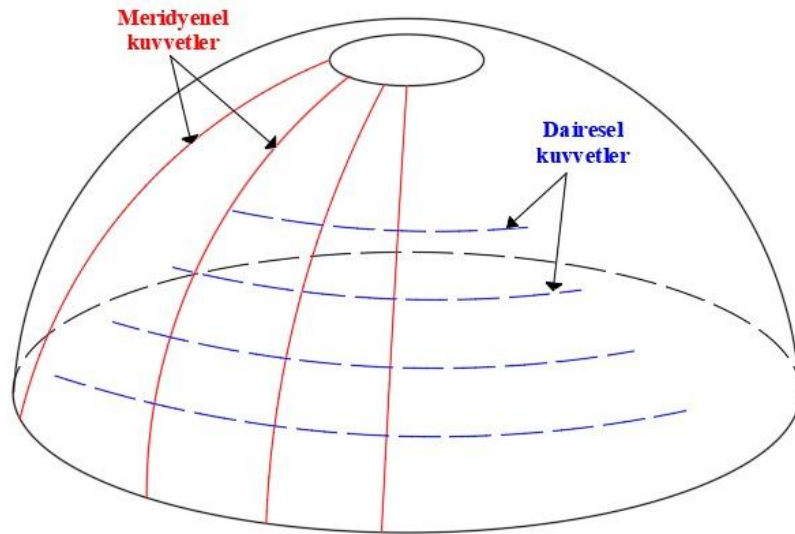
1798 yılına gelindiğinde Fransız mühendis Gauthey Paris'teki St. Genevieve kubbesinin yeni tasarımının geçerliliğiyle ilgili dilimleme tekniğini uygulayarak uzmanlık tezi yayınlamıştır (Huerta, 2011).

Daha sonraki yıllarda kubbe ve tonoz tipi yapılarda itme hattı ve dilimleme tekniği kullanılarak çeşitli çalışmalar yürütülmüştür.

2.3.3 Kubbelerin yük aktarım prensipleri

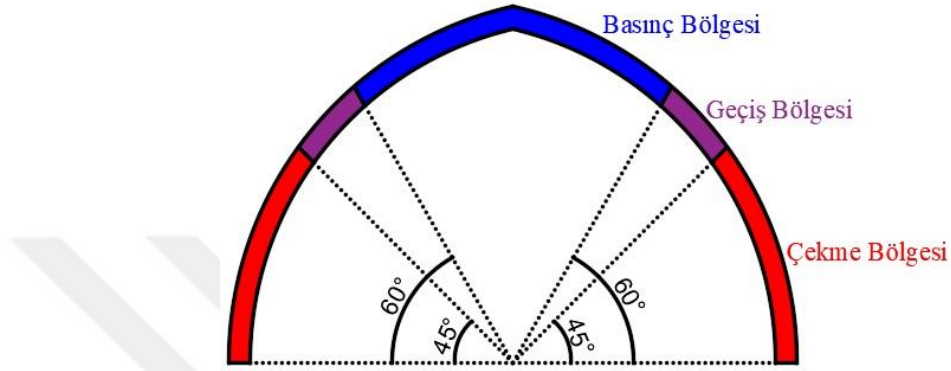
Geometrik olarak kubbe bir dizi portakal diliminin paralel bantlarla birleştirilmesinden oluşan yüzeyi ifade eder.

Dilimler boyunca dikey yükler altında basınca çalışan meridyenel iç kuvvetler etki ederken paralel bantlar boyunca meridyenel kuvvetlere dik olan dairesel iç kuvvetler etkilidir. Şekil 2.23 kubbe üzerinde yer alan iç kuvvetleri ifade etmektedir.



Şekil 2.23. Kubbe üzerindeki meridyenel ve dairesel kuvvetler (Lau, 2006).

Meridyenel kuvvetler tepeden gelen yükleri tabana aktarmaya çalışan basınç kuvvetleridir. Bu kuvvetlerin büyüklüğü tepeden tabana doğru artar (Zessin vd., 2010). Dairesel kuvvetlerse üst kısımlarda basınç olarak etki ederken kubbenin alt kısımlarında çekme kuvveti olarak etkisini gösterir. Genellikle basınç bölgesinden çekme bölgesine geçiş kubbenin geometrisine bağlı olarak 45° ile 60° arasında gerçekleşir (Heyman, 1982; Lucchesi, 2007).



Şekil 2.24. Kubbe kesitinde çekme bölgesinden basınç bölgesine geçiş.

3. ZEYNELBEY TÜRBEŞİ

Tez kapsamında ülkemizde bulunan ve çift cidarlı kubbeye sahip olan Zeynel Bey Türbesi'nin spektral analizi gerçekleştirilmiş ve gerilme sonuçları değerlendirilmiştir. Takip eden başlıklarda türbe hakkında genel bilgiler, kullanılan materyaller, analiz ve yorumlama kısmı bulunmaktadır.

3.1 Zeynel Bey Türbesi Hakkında Genel Bilgiler

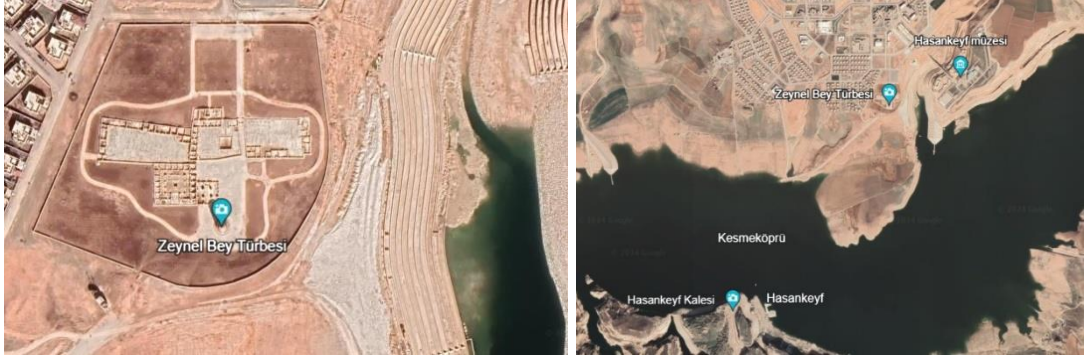
Zeynel Bey Türbesi Batman ilinin Hasankeyf ilçesinde konumlanmaktadır. Hasankeyf ilçesi 37 derece 43 dakika enlemde; 41 derece 24 dakika boylamda yer almaktadır. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde bulunan Hasankeyf ilçesinin iki yanı Dicle ırmağı tarafından ayrılmaktadır. Batman iline 37 km Mardin iline 75 km mesafededir.



Şekil 3.1. Türkiye haritasında Batman ilinin yeri (URL-19).

Tarihte Anadolu medeniyetleri için siyasi bir önem taşıyan Hasankeyf 1981 yılında sit alanı ilân edilmiştir. GAP kapsamında inşa edilen Ilısu Barajı nedeniyle bölgedeki eserlerin zarar görmemesi amacıyla Kültür ve Turizm Bakanlığı çeşitli çalışmalar yürütmüştür.

Tarihi ilçede yer alan önemli eserlerden birisi Akkoyunlu hükümdarı Uzun Hasan'ın oğlu Zeynel Bey adına yapılan Zeynel Bey Türbesi'dir. Eser 15. yüzyılda Zeynel Bey'in Otlukbeli Savaşı'nda hayatını kaybetmesi sonucunda anıt mezar olarak inşa edilmiştir. Zeynel Bey Külliyesinin içerisinde yer alan eser 2017 yılında Ilısu Barajı'ndan dolayı sular altında kalmaması için 2 km öteye taşınmıştır.



Şekil 3.2. Zeynel Bey Türbesi'nin harita konumu.

Dıştan silindirik içten sekizgen plana sahip olan türbe çift kubbeyle örtülmüştür. Dış silindirin çapı yaklaşık olarak 9 m kadardır. Kuzey ve güney yönlerinde sivri kemerli kapı boşlukları bulunmaktadır. Aynı zamanda kasnağın üzerinde tüm yönlere açılan dört adet pencere bulunmaktadır ancak kuzey yönündeki pencere aktif durumda değildir. Türbede yer yer çinili süslemelere rastlanmıştır.



Şekil 3.3. Zeynel Bey Türbesi kuzey cephesi (URL-20).

Türbenin kaide kısmında taş geri kalan kısımlarında tuğla kullanılmıştır. Türbe kısmı kasnağa kadar 9,7 m yüksekliktedir. Kasnak kısmıysa 2,3 m yüksekliğe sahiptir. Kasnak üzerine oturtulan dış cidar soğanlı tipolojiye sahipken iç cidar daha basık ve eliptik bir formdadır.

Cidarlar arasında sekiz adet iç payanda bulunmaktadır. İç payandalar birbirine simetrik biçimde olup yaklaşık 3,2 m yüksekliğine sahiptir. Soğanlı dış kubbe 4,7 m yükseklikte 7,5 m çapındadır. Dış cidar yukarıya doğru incelmektedir.



Şekil 3.4. Zeynel Bey türbesinin iç payandaları.

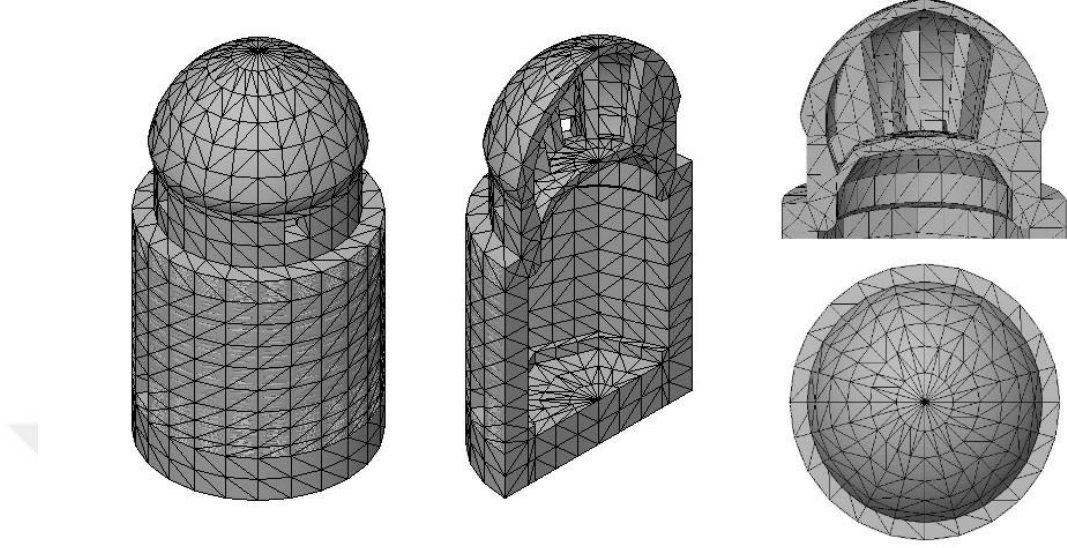
3.2 Materyal ve Yöntem

Söz konusu türbenin davranışını değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapısal analiz yapılmıştır. Bunun için FEA Limited şirketi tarafından geliştirilmiş LUSAS (London University Stress Analysis System) yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılımla doğrusal, doğrusal olmayan, üç boyutlu statik ve dinamik analizler yapılabilir. Yapıda kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Zeynel Bey Türbesi’ne ait malzeme özellikleri.

Malzemeler	Doğal Taş	Harç	Tuğla	Taş + Harç	Tuğla + Harç
Basınç Dayanımı (MPa)	13,12	4,43	10,33	9,83	9,03
Poisson Oranı	0,35	0,21	0,29	0,21	0,18
Elastisite Modülü (MPa)	1315,76	619,26	935,52	1049,32	601,21
Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	2,35	1,52	1,66	-	-
Çekme Dayanımı (MPa)	4,6	-	2,2	-	-

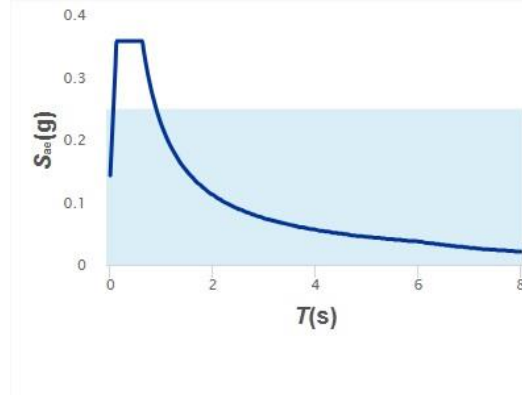
Veriler yardımıyla oluşturulan modelde 2166 adet düğüm noktası 8529 adet sonlu eleman kullanılmıştır. Oluşturulan modelin sonlu elemanlar ağı görünümü Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Zeynel Bey Türbesi’nin sonlu elemanlar modeli.

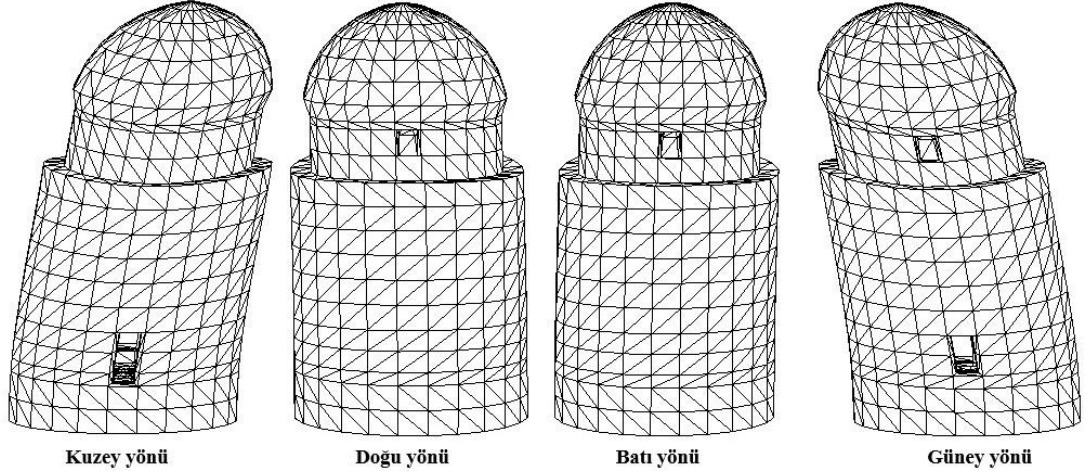
3.3 Spektral Analiz

Modellenen yapı üzerindeki dinamik etkileri anlamak için spektral analiz gerçekleştirilmiştir. Spektral analiz yaklaşımında spektrum eğrisi kullanılmaktadır. Bu grafik her bir periyotta oluşan ivmelerden elde edilen maksimum ivme değerlerinin işaretlenmesiyle oluşturulmaktadır. Spektral ivme grafiğini elde etmek için 1 Ocak 2019’da yürürlüğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritasından yararlanılmıştır. Deprem yer hareket düzeyi olarak 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan yani tekrarlanma periyodu 475 yıl olan deprem yer hareket düzeyi (DD-2) seçilmiştir.



Şekil 3.6. Periyot-spektral ivme grafiği (AFAD, 2024).

Zeynel Bey Türbesi üzerinde gerçekleştirilen dinamik analiz neticesinde yapının deforme olmuş hâli Şekil 3.7’de gösterilmektedir.

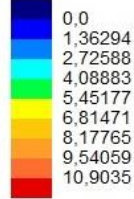


Şekil 3.7. Zeynel Bey Türbesinin deforme olmuş hâli.

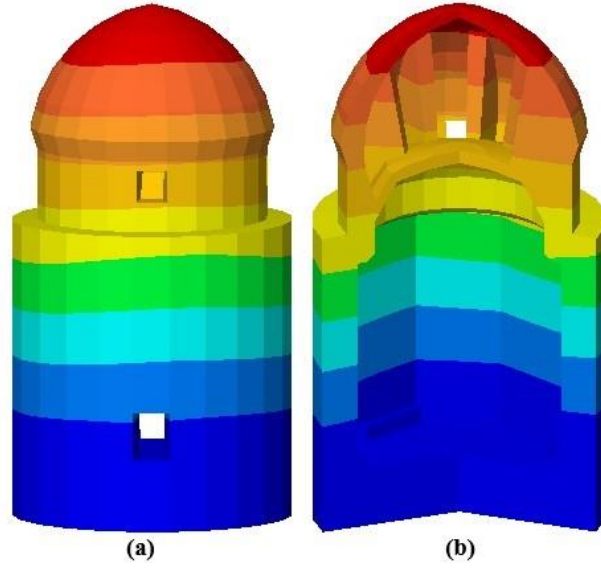
3.3.1 Deplasmanlar

Genel anlamda bakıldığında maksimum deplasman yatay doğrultuda meydana gelmiştir. Y doğrultusunda meydana gelen bu deplasmanın değeri 12 mm olup konumu kubbenin tepe noktasıdır. Şekil 3.8 Zeynel Bey Türbesinin deprem analizi neticesinde Y doğrultusunda meydana gelen deplasmanı ifade etmektedir.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)



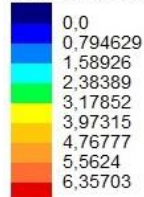
Maximum 12.2665 at node 2166
Minimum 0.0 at node 1



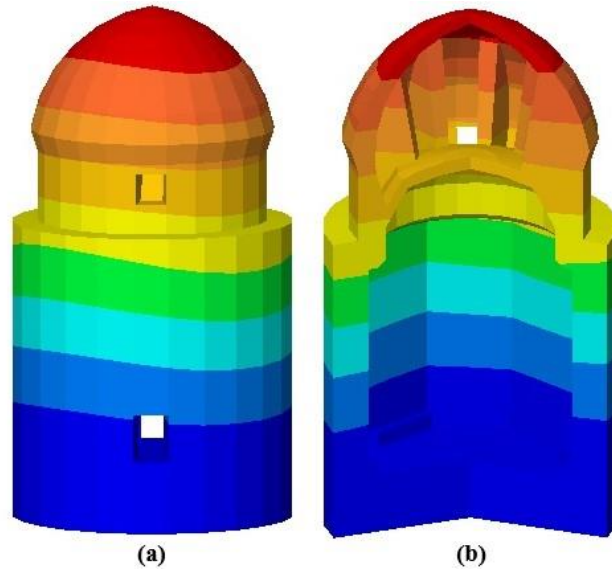
Şekil 3.8. Y doğrultusundaki deplasman dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

Yatay X ekseninde tıpkı Y ekseninde olduğu gibi deplasman dağılımı düzgün bir renklendirmeye sahiptir. X doğrultusunda maksimum deplasman kubbenin tepe noktasında sayısal değeri 7 mm olarak meydana gelmiştir. Şekil 3.9 yatay x eksenindeki deplasman dağılımını göstermektedir.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Displacement
Component: DX (Units: mm)

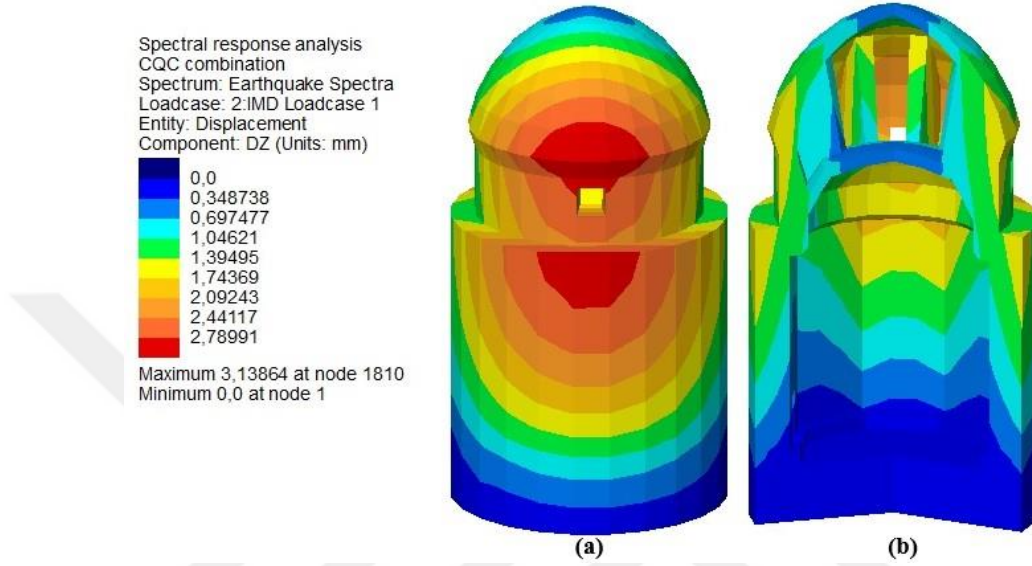


Maximum 7.15166 at node 2166
Minimum 0.0 at node 1



Şekil 3.9. X doğrultusundaki deplasman dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

Düşey eksene bakıldığında maksimum deplasman doğu ve batı yönünde kasnakta bulunan pencerelerde meydana geldiği görülmektedir. Türbenin düşey eksenindeki deplasmanı yatay eksendekilere nazaran daha küçük olup yaklaşık olarak 3 mm değerindedir. Şekil 3.10 türbenin Z eksenindeki deplasman dağılımını ifade etmektedir.



Şekil 3.10. Z doğrultusundaki deplasman dağılımı. a) Türbenin doğu cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

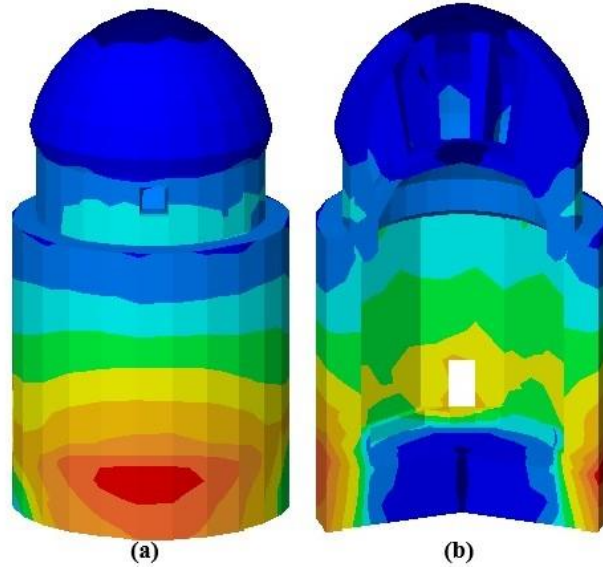
3.3.2 Çekme gerilmesi

Analiz neticesinde türbede çekme gerilmeleri doğu ve batı yönlerinde kaide kısmında gerçekleşmiştir. Bunun yanında kuzey ve güney yönündeki kapı kenarları da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Şekil 3.11’de gerilme dağılımı görülmektedir. Yapının aldığı en büyük çekme gerilmesinin değeri 0,35 MPa’dır. Bu değer yapıda kullanılan tuğlanın çekme dayanımı olan 2,2 MPa’dan ve doğal taşın çekme dayanımı olan 4,6 MPa değerinden küçüktür. Kâgirin çekme dayanımı genel anlamda kâgirin basınç dayanımının %10’una karşılık gelir. Türbe duvarlarının basınç dayanımı 9 MPa olup çekme dayanımı olarak 0,9 MPa kabul edilebilir. Analiz neticesinde hesaplanan çekme gerilmesi bu değerden düşüktür.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0,0367484
0,0734968
0,110245
0,146994
0,183742
0,22049
0,257239
0,293987
0,330736

Maximum 0,34979 at node 327
Minimum 0,0190543 at node 2166



Şekil 3.11. Çekme gerilmesi dağılımı. a) Türbenin doğu cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

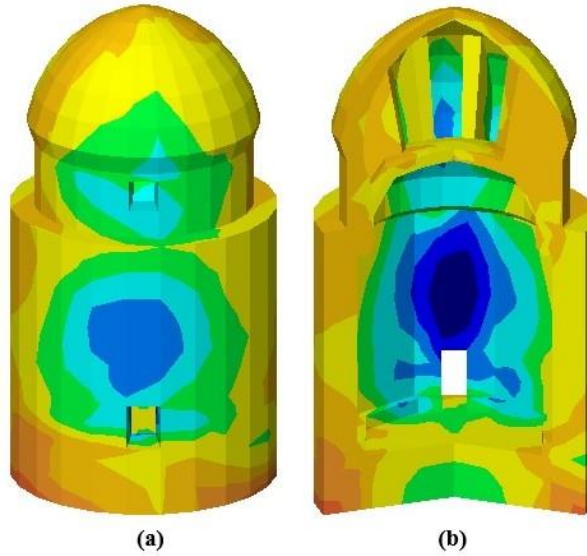
3.3.3 Basınç gerilmesi

Analiz neticesinde türbede meydana gelen basınç gerilmeleri dış cephede en fazla kuzey ve güney cephelerinde kapı üstüyle kasnak arasındaki kısımda yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte güney cephesindeki pencere kısmında da gerilmeler mevcuttur. İç kısımda ise yine kapı üstünde yoğunlaşmak üzere iç ve dış kubbelerde de basınç gerilmesi gözlemlenmiştir. Şekil 3.12’de söz konusu gerilme dağılımı görülmektedir.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

-0,0757189
-0,0605751
-0,0454313
-0,0302876
-0,0151438
0,0
0,0151438
0,0302876
0,0454313

Maximum 0,0464113 at node 99
Minimum -0,0898827 at node 814



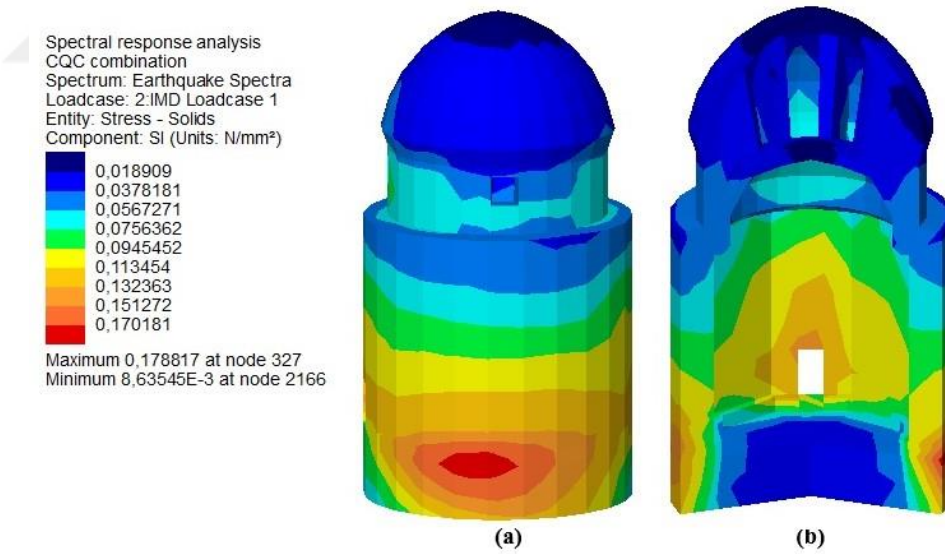
Şekil 3.12. Basınç gerilmesi dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

Türbede meydana gelen maksimum basınç gerilmesi değeri 0,09 MPa'dır. Bu değer türbenin basınç dayanımı olan 9 MPa'nın yüzde biri kadar olup stabilite açısından tehlike arz etmemektedir.

3.3.4 Kayma gerilmesi

Türbede kayma gerilmeleri doğu ve batı cephelerinde kaide kısmında yoğunlaşmıştır. Buna ek olarak kuzey ve güney cephelerindeki kapı boşluklarının üst kısımları da kayma gerilmesine maruz kalan kısımlardır. Kayma gerilmesi dağılımı Şekil 3.13'de görülmektedir.

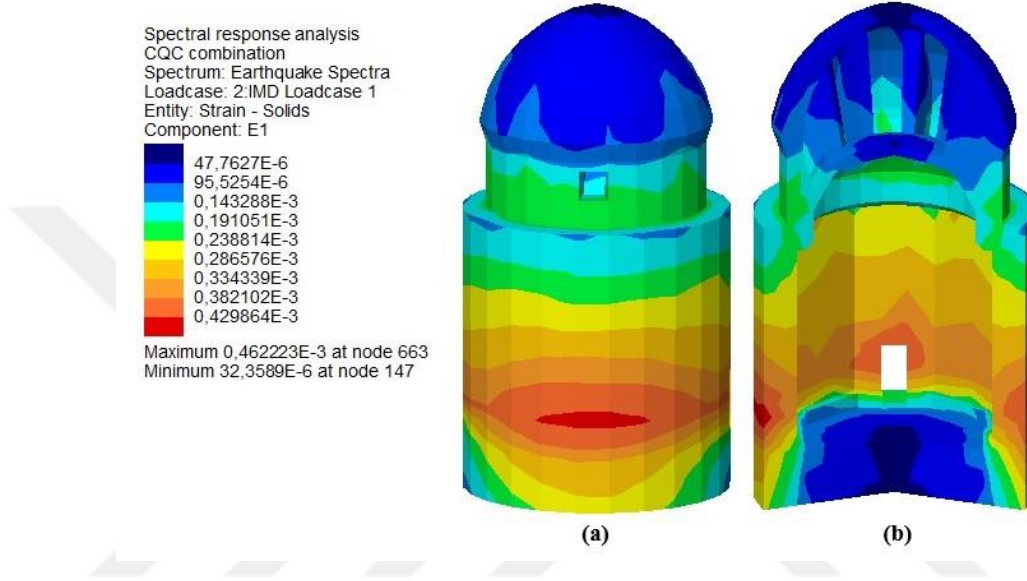
Kayma gerilmelerinin maksimum değeri 0,18 MPa olarak saptanmıştır. Yapının kayma dayanımıyla ilgili herhangi bir deney yapılmadığı için mukayese yapmak amacıyla Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nden faydalanılacaktır. TBDY 2018'e göre kayma dayanımı basınç dayanımının %40'ı olarak alınabilir. Dolayısıyla kayma dayanımı 3,6 MPa kayma gerilmesi olan 0,18 MPa'dan büyüktür ve stabilite açısından tehlike arz etmemektedir.



Şekil 3.13. Kayma gerilmesi dağılımı. a) Türbenin batı cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

3.3.5 Birim şekil değıştirmeler

Yapının çekme durumunda birim şekil değıştirmesi en fazla doğu ve batı cephelerinde gövdenin alt kısmında gerçekleşmiş olup 0,00046 değerindedir. Bununla birlikte kuzey ve güney kapılarının iç kısmında da çekme birim şekil değıştirmeleri yoğunlaşmıştır. Şekil 3.14 çekme durumunda birim şekil değıştirme dağılımını göstermektedir.



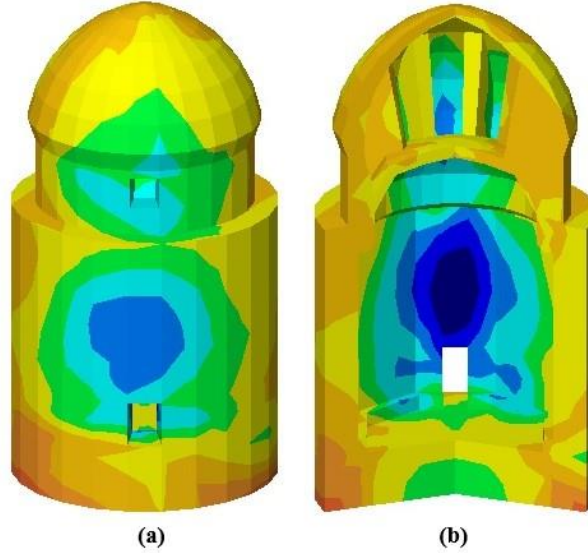
Şekil 3.14. Çekme birim şekil değıştirme dağılımı. a) Türbenin batı cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

Basınç durumunda birim şekil değıştirmesi en fazla kuzey ve güney iç cephelerinde kapının üstünde gerçekleşmiştir. Basınç durumunda maksimum birim şekil değıştirme değeri 0,00018 olarak saptanmıştır. Kuzey ve güney yönündeki pencere kenarlarında ve iç kubbede de basınç birim şekil değıştirmesi görülmektedir. Şekil 3.15 basınç durumunda birim şekil değıştirme dağılımını göstermektedir.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

Blue	-0,0757189
Dark Blue	-0,0605751
Light Blue	-0,0454313
Green	-0,0302876
Yellow	-0,0151438
Orange	0,0
Red	0,0151438
Dark Red	0,0302876
Light Red	0,0454313

Maximum 0,0464113 at node 99
Minimum -0,0898827 at node 814



Şekil 3.15. Basınç birim şekil değiştirme dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

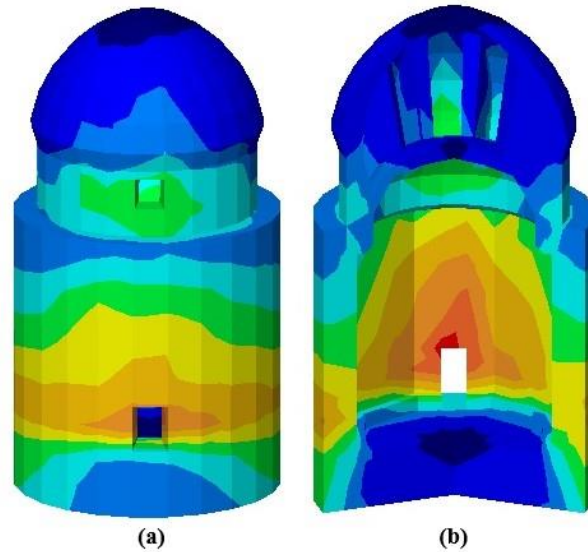
Analiz neticesinde kayma birim şekil değiştirmesinin yoğunlaştığı bölgeler kuzey ve güney cephelerinde yer alan kapı kenarlarıdır. Özellikle yapının iç kısmında yoğunlaşmış olup maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,00062'dir. Şekil 3.16 kayma durumunda birim şekil değiştirme dağılımını göstermektedir.

Hesaplanan birim şekil değiştirme değerleri Eurocode-8'e göre önerilen 0,0035 değerinin oldukça altında kalmaktadır.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1

Blue	65,6646E-6
Dark Blue	0,131329E-3
Light Blue	0,196994E-3
Green	0,262658E-3
Yellow	0,328323E-3
Orange	0,393987E-3
Red	0,459652E-3
Dark Red	0,525317E-3
Light Red	0,590981E-3

Maximum 0,622515E-3 at node 592
Minimum 31,5338E-6 at node 2166



Şekil 3.16. Kayma birim şekil değiştirme dağılımı. a) Türbenin güney cephesi b) Türbenin içten görünüşü.

3.3.6 Değerlendirme

Zeynel Bey Türbesi üzerinde gerçekleştirilen spektral analiz neticesinde meydana gelen maksimum deplasman, gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri Çizelge 3.3’de sunulmuştur. Genel anlamda analiz neticesinde hesaplanan gerilme değerleri deneyler sonucunda belirlenen dayanımların altında kaldığı görülmüştür. Dolayısıyla türbe tasarım depreminden daha düşük bir deprem ivmesine maruz kaldığında herhangi bir sorun oluşmayacaktır.

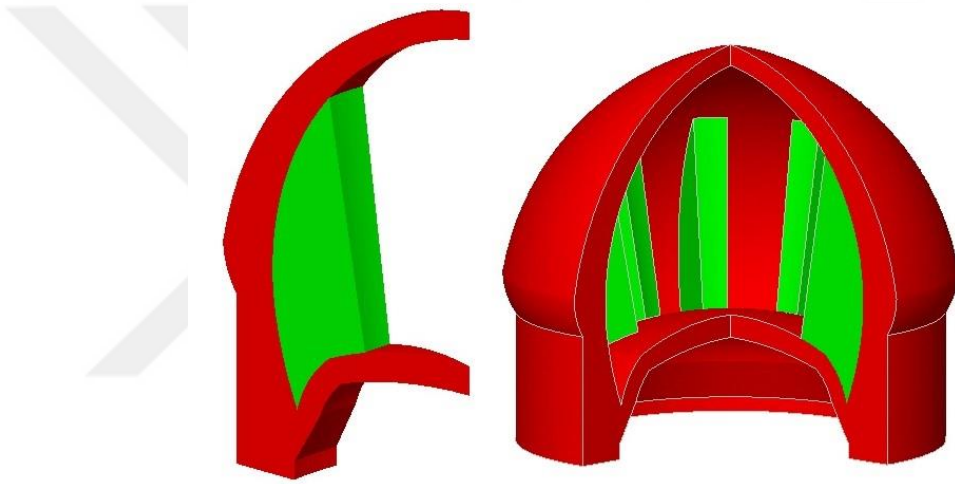
Çizelge 3.2. Zeynel Bey Türbesinde gerçekleştirilen spektral analizin sonuçları.

X yönündeki deplasman (mm)	7,152
Y yönündeki deplasman (mm)	12,266
Z yönündeki deplasman (mm)	3,139
Çekme gerilmesi (MPa)	0,350
Basınç gerilmesi (MPa)	0,090
Kayma gerilmesi (MPa)	0,179
Çekme birim şekil değiştirmesi	0,000462
Basınç birim şekil değiştirmesi	0,000184
Kayma birim şekil değiştirmesi	0,000622

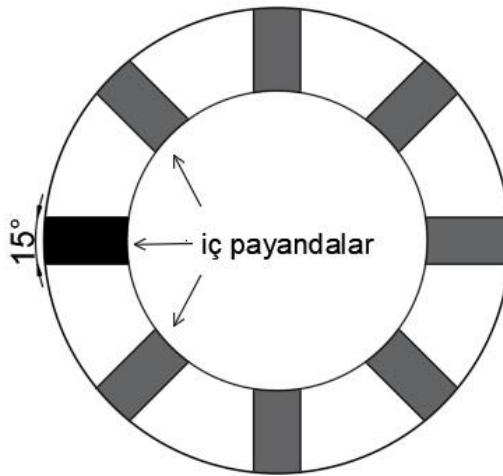
Yığma sistemlerde çekme gerilmesini alabilecek herhangi bir metal eleman kullanılmadığından, herhangi bir yatay etkenden dolayı doğrusal aşamayı kolaylıkla geçip doğrusal ötesi davranışta çatlaklar meydana gelebilmektedir. Çatlakların esas sebebinin asal çekme gerilmeleri olduğu düşünüldüğünde bu yapı için özellikle beden duvarlarının alt kotlarında asal çekme gerilmelerinin oluşması, ileride olması muhtemel depremlerde bu bölgelerde çekme çatlaklarının oluşabileceğini göstermektedir.

4. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Cidarlar arasında bulunan payandaların deprem durumundaki tepkisini anlamak amacıyla parametrik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Zeynel Bey Türbesine ait kubbenin geometrisinden yararlanılmıştır. Kubbe kasnak kısmından itibaren dikkate alınmıştır. Kasnak yüksekliği yaklaşık 2,3 m'dir. Soğanlı tipolojiye sahip olan dış cidar kasnağın bittiği noktada başlamaktadır. İç cidar ise dış cidara nazaran oldukça basıktır. Mevcut yapının kubbesi süreksiz çift cidarlı kubbe kategorisinde değerlendirilir. İki cidar arasında 15 derece açığa sahip 8 adet payanda bulunmaktadır. Bir payandanın hacmi $2,4 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 parametrik çalışma için kullanılan referans geometriyi ifade eder.



Şekil 4.1. Parametrik çalışmada kullanılan referans geometri.



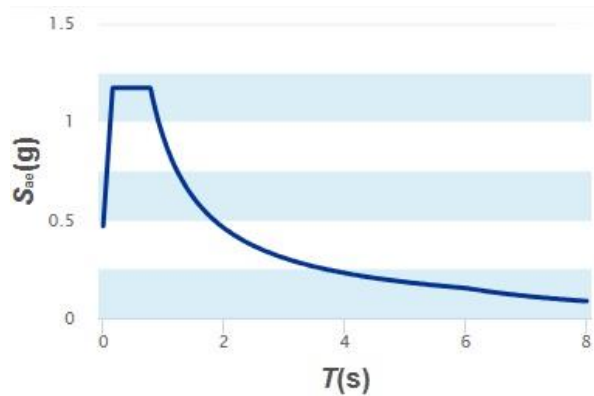
Şekil 4.2. Model-15-8'in üstten görünüşü.

Parametrik çalışma için modellerde malzeme olarak tuğla ve harç kullanılmıştır. Bunun için Çizelge 3.1’de Zeynel Bey Türbesi için kullanılan malzeme özelliklerinden yararlanılmıştır. Kubbelerin dinamik etkilerini araştırmak için tepki spektrumu analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için Türkiye Deprem Tehlike Haritası kullanılmıştır. Dinamik etkileri daha net anlamak maksadıyla yapının 37.611621° enleminde 37.377583° boylamında olduğu ve bulunduğu zeminin ZE sınıfında olduğu varsayılmıştır. Buradan alınan verilerle ivme spektrumu / periyot grafiği oluşturularak modeller üzerinde uygulanmıştır. Şekil 4.3 Türkiye Deprem Tehlike Haritasına girilen verileri gösterir.

Rapor Başlığı:	parametrik çalışma	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi:	DD-2	50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($C_u < 25$ kPa) içeren profiller
Enlem:	37.611621°	
Boylam	37.377583°	

Şekil 4.3. Deprem tehlike haritasına girilen veriler (AFAD, 2024).

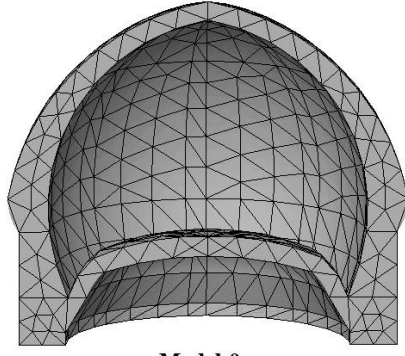
Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen veriler yardımıyla S_{DS} kısa periyot tasarım ivme spektral katsayısı ve S_{D1} 1 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Bunlar yardımıyla periyot spektral ivme grafiği oluşturularak modeller üzerinde uygulanmıştır. Şekil 4.4 periyot-spektral ivme grafiğini ifade eder.



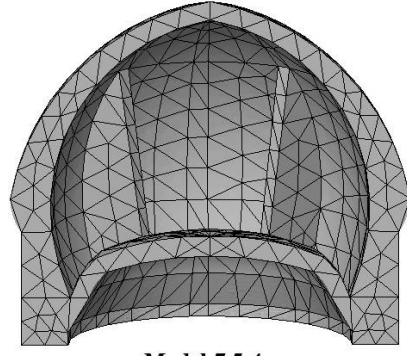
Şekil 4.4. Periyot-spektral ivme grafiği (AFAD, 2024).

Bu çalışma için 7 adet model oluşturulmuştur. Model-15-8’de 15 derecelik açıya sahip 8 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Model-15-12’de 12 adet 15 derecelik payanda bulunurken Model-15-4’de payanda sayısı dördür. Model-0’da herhangi bir payanda bulunmamaktadır. Model-7,5-4, Model-7,5-8 ve Model-7,5-12’nin payandaları 7,5 derece açıya sahiptir. Tüm modellerde payandalar birbirine simetrik vaziyette konumlanmıştır. Oluşturulan modeller Şekil 4.5’de modellerin eleman ve düğüm noktası sayıları Çizelge 4.1’de verilmektedir.

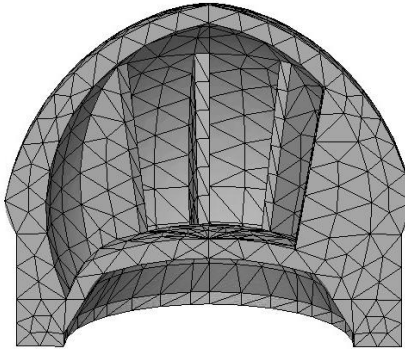




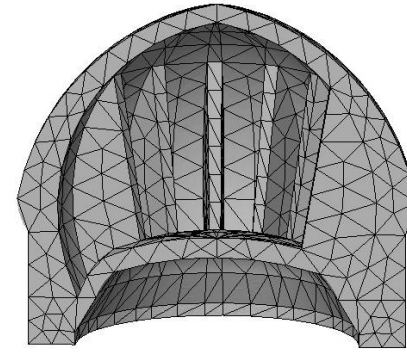
Model-0



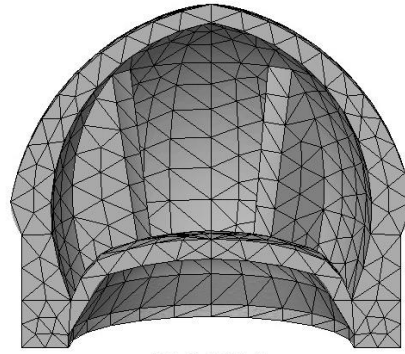
Model-7,5-4



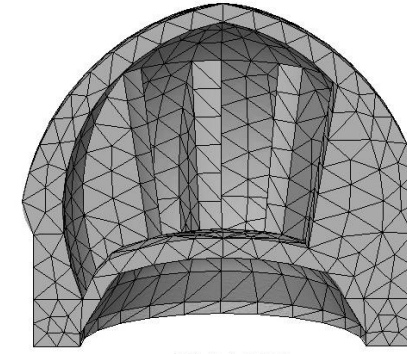
Model-7,5-8



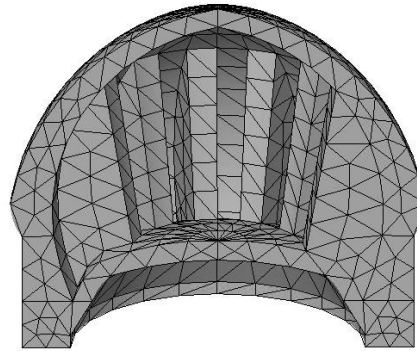
Model-7,5-12



Model-15-4



Model-15-8



Model-15-12

Şekil 4.5. Parametrik çalışma için oluşturulan modeller.

Çizelge 4.1. Modellerin eleman ve düğüm noktası sayısı.

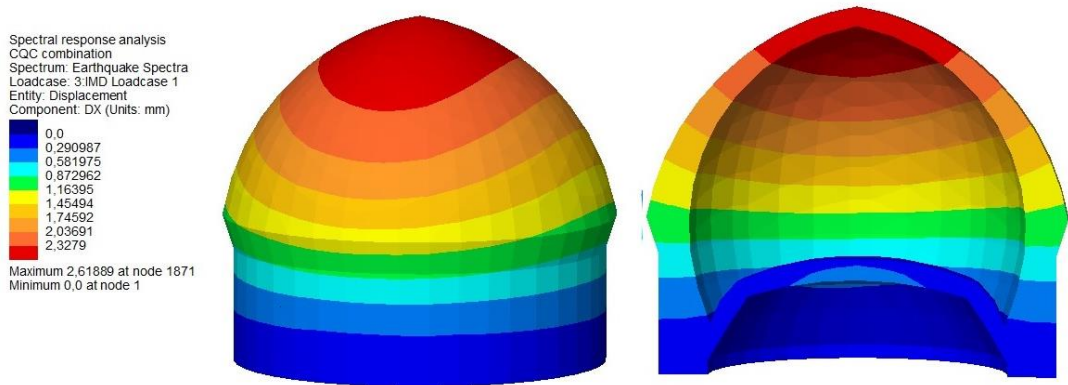
Modeller	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Model-0	6221	1711
Model-15-4	6582	1778
Model-15-8	6910	1866
Model-15-12	8183	2147
Model-7,5-4	6509	1791
Model-7,5-8	6797	1871
Model-7,5-12	7892	2125

4.2 Model-0 için Analiz Sonuçları

Model-0 herhangi bir payandanın olmadığı sadece iç ve dış cidarların olduğu durumu ifade etmektedir. Modelin toplam hacmi 108 m^3 olarak hesaplanmıştır.

4.2.1 Deplasmanlar

Yapılan analiz neticesinde Model-0 en fazla deplasmanı yatay x doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası 2,62 mm yer değiştirmiştir. Şekil 4.6 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay y doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer 1,55 mm'dir. Şekil 4.7 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve 0,78 mm deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.8 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.

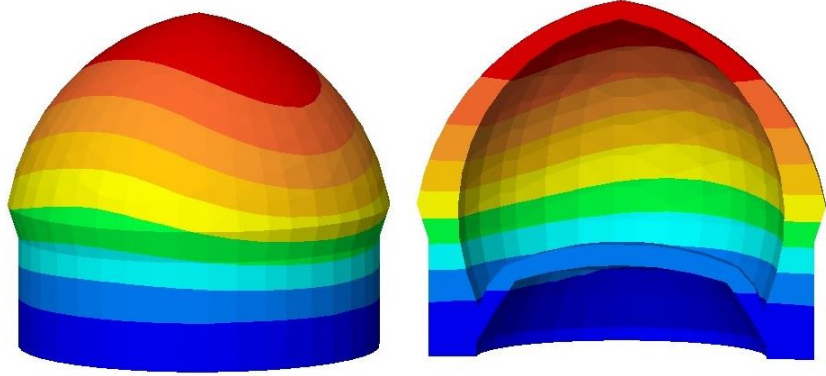


Şekil 4.6. Model-0 için x yönündeki deplasman dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3 IMD Loadcase 1
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)

0.0
0.172765
0.345529
0.518294
0.691058
0.863823
1.03659
1.20935
1.38212

Maximum 1.55488 at node 1871
Minimum 0.0 at node 1

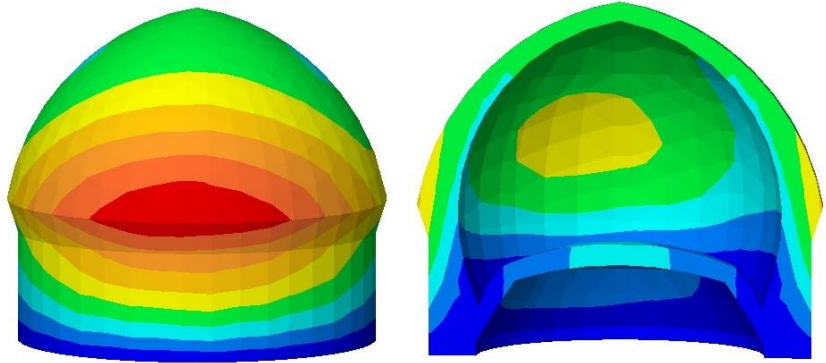


Şekil 4.7. Model-0 için y yönündeki deplasman dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3 IMD Loadcase 1
Entity: Displacement
Component: DZ (Units: mm)

0.0
0.0864895
0.172979
0.259469
0.345958
0.432448
0.518937
0.605427
0.691916

Maximum 0.778406 at node 1080
Minimum 0.0 at node 1



Şekil 4.8. Model-0 için z yönündeki deplasman dağılımı.

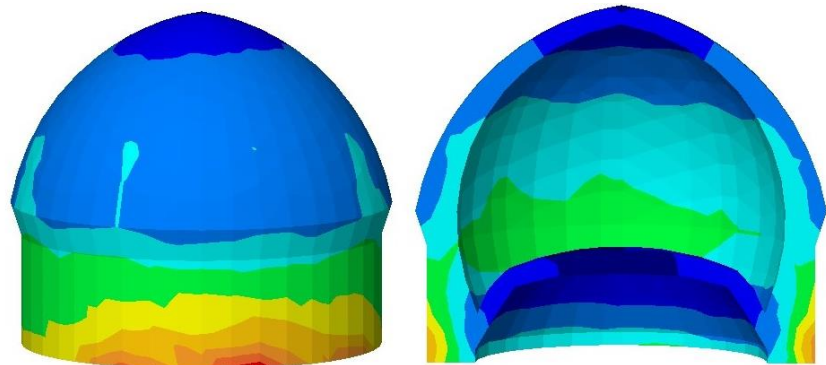
4.2.2 Çekme gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,26 MPa'dır. Şekil 4.9 Model-0'de çekme gerilmesi dağılımı verilmektedir.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3 IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.0273481
0.0546962
0.0820442
0.109392
0.13674
0.164088
0.191437
0.218785
0.246133

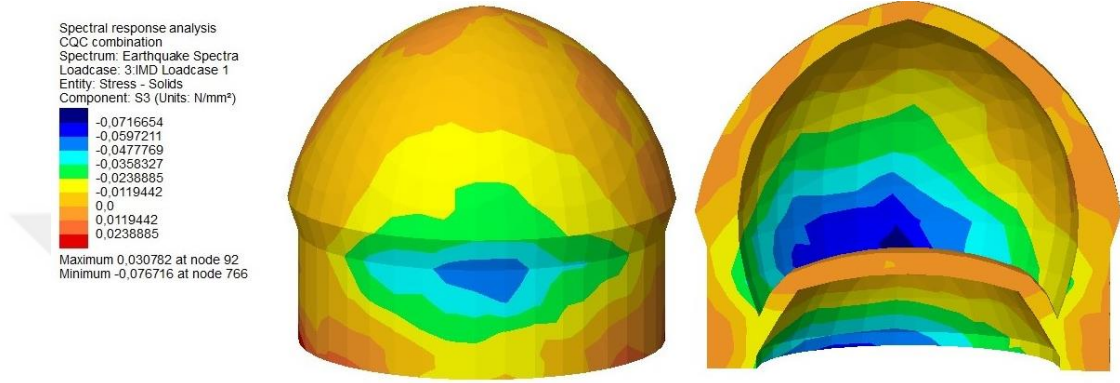
Maximum 0.265469 at node 92
Minimum 0.0193361 at node 768



Şekil 4.9. Model-0 için çekme gerilmesi dağılımı.

4.2.3 Basınç gerilmesi

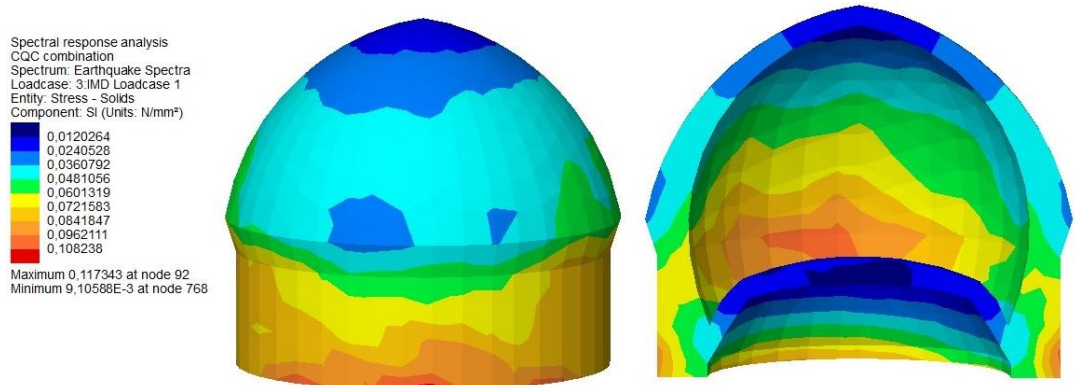
Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,077 MPa'dır. Şekil 4.10 Model-0 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.



Şekil 4.10. Model-0 için basınç gerilmesi dağılımı.

4.2.4 Kayma gerilmesi

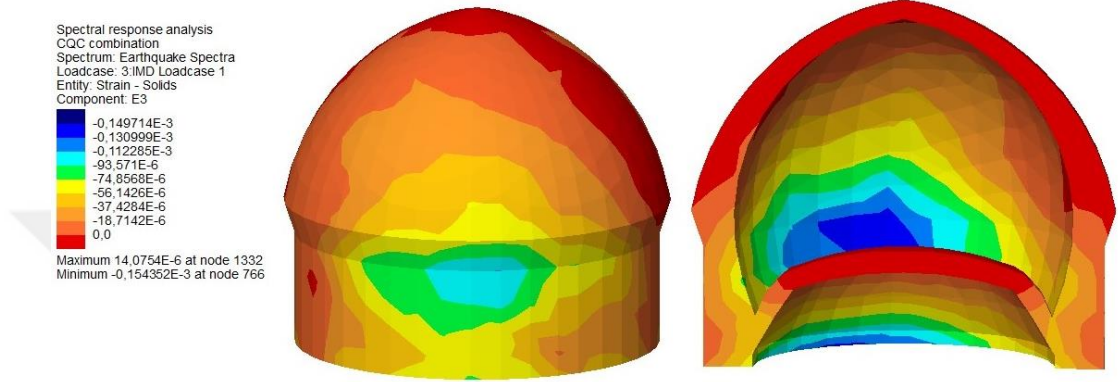
Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,117 MPa'dır. Şekil 4.11 Model-0 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.



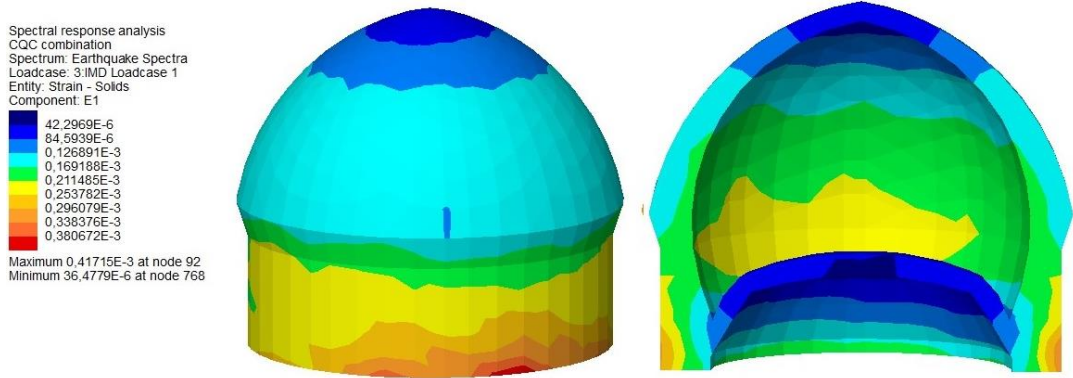
Şekil 4.11. Model-0 için kayma gerilmesi dağılımı.

4.2.5 Birim şekil değiştirmeler

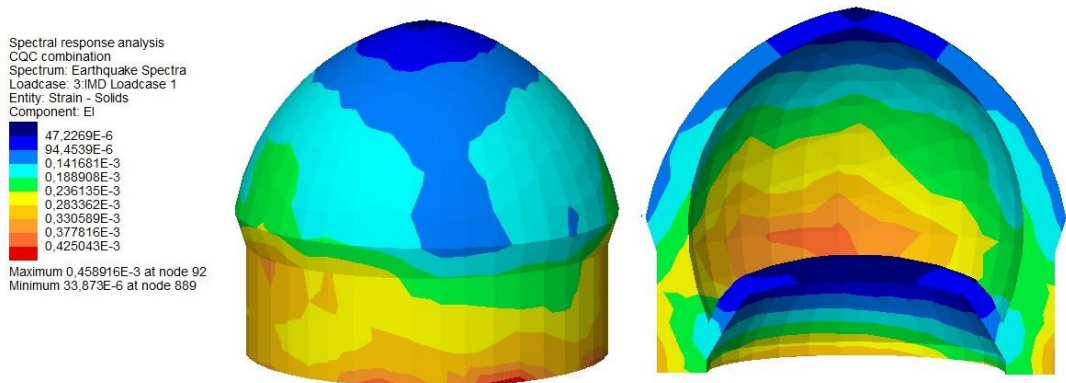
Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000417 basınç durumunda 0,000154 kayma durumunda 0,000459 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.



Şekil 4.12. Model-0 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 4.13. Model-0 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.



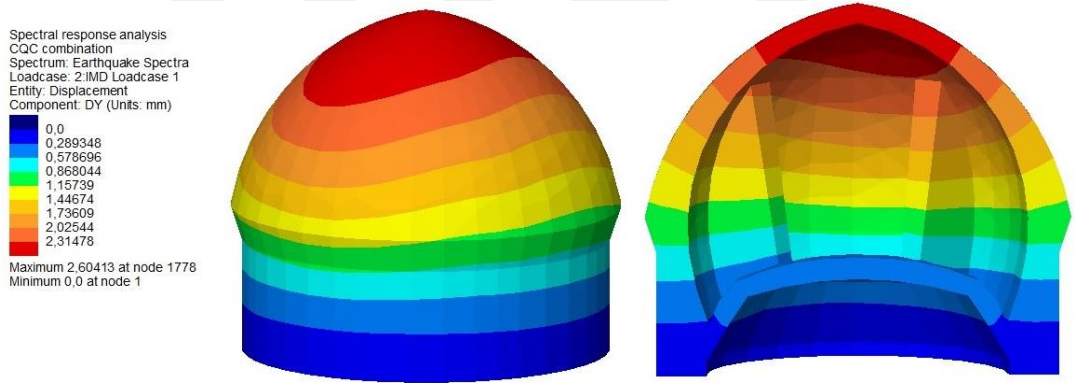
Şekil 4.14. Model-0 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

4.3 Model-15-4 için Analiz Sonuçları

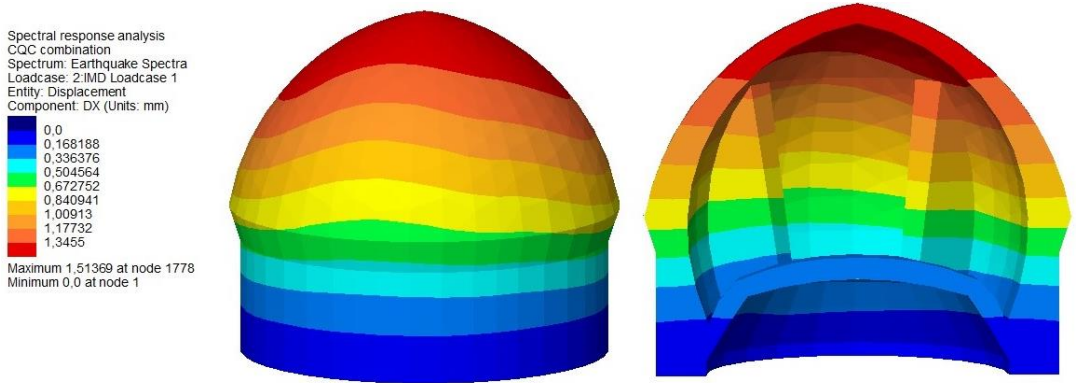
Model-15-4 15 derecelik 4 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Payandaların toplam hacmi $9,6 \text{ m}^3$, modelin toplam hacmi $117,6 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

4.3.1 Deplasmanlar

Yapılan analiz neticesinde Model-15-4 en fazla deplasmanı yatay y doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası $2,604 \text{ mm}$ yer değiştirmiştir. Şekil 4.15 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay x doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer $1,514 \text{ mm}$ 'dir. Şekil 4.16 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve $0,816 \text{ mm}$ deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.17 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.

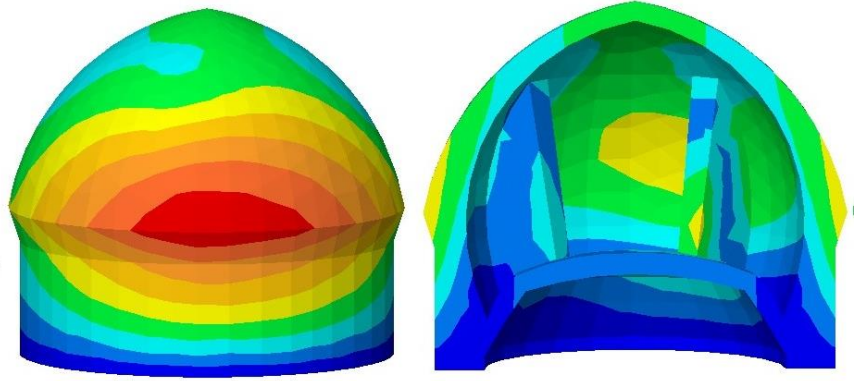


Şekil 4.15. Model-15-4 için y yönündeki deplasman dağılımı.



Şekil 4.16. Model-15-4 için x yönündeki deplasman dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Displacement
Component: DZ (Units: mm)
0.0
0.0906222
0.181244
0.271866
0.362489
0.453111
0.543733
0.634355
0.724977
Maximum 0,815599 at node 1024
Minimum 0,0 at node 1

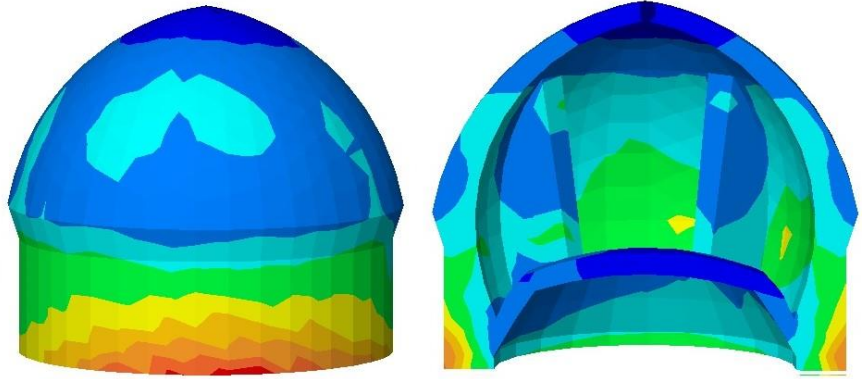


Şekil 4.17. Model-15-4 için z yönündeki deplasman dağılımı.

4.3.2 Çekme gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,258 MPa'dır. Şekil 4.18 Model-15-4 için çekme gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)
0.0260705
0.052141
0.0782115
0.104282
0.130352
0.156423
0.182493
0.208564
0.234634
Maximum 0.257676 at node 126
Minimum 0.023042 at node 1777



Şekil 4.18. Model-15-4 için çekme gerilmesi dağılımı.

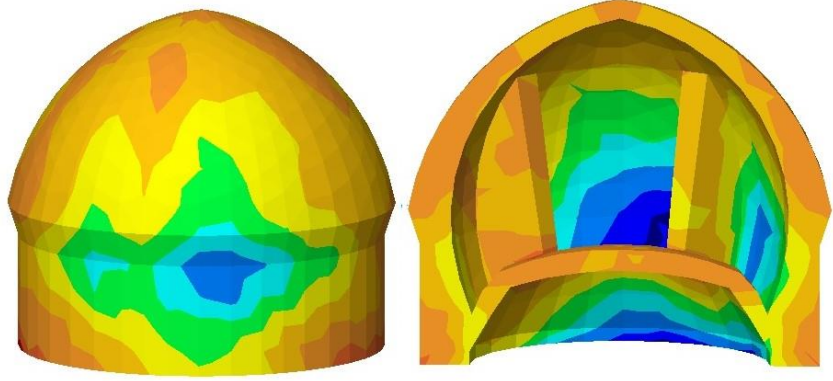
4.3.3 Basınç gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,075 MPa'dır. Şekil 4.19 Model-15-4 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

-0.070109
-0.0584241
-0.0467393
-0.0350645
-0.0233697
-0.0116848
0.0
0.0116848
0.0233697

Maximum 0.0306889 at node 126
Minimum -0.0744746 at node 908



Şekil 4.19. Model-15-4 için basınç gerilmesi dağılımı.

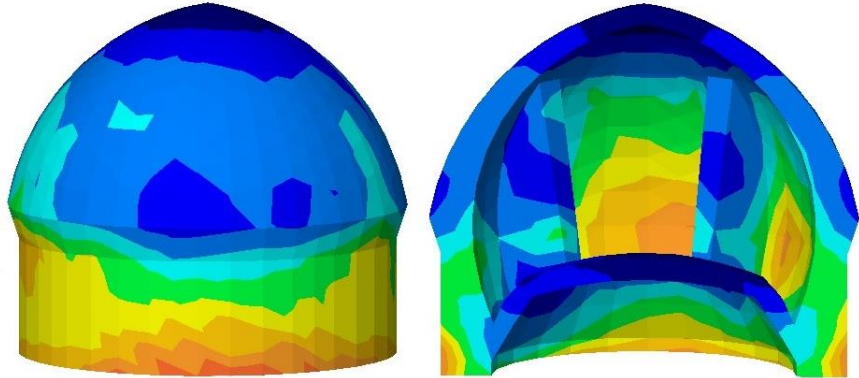
4.3.4 Kayma gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,113 MPa'dır. Şekil 4.20 Model-15-4 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.0226639
0.0339959
0.0453278
0.0566598
0.0679918
0.0793237
0.0906557
0.101988
0.11332

Maximum 0.113494 at node 126
Minimum 0.0115061 at node 1777

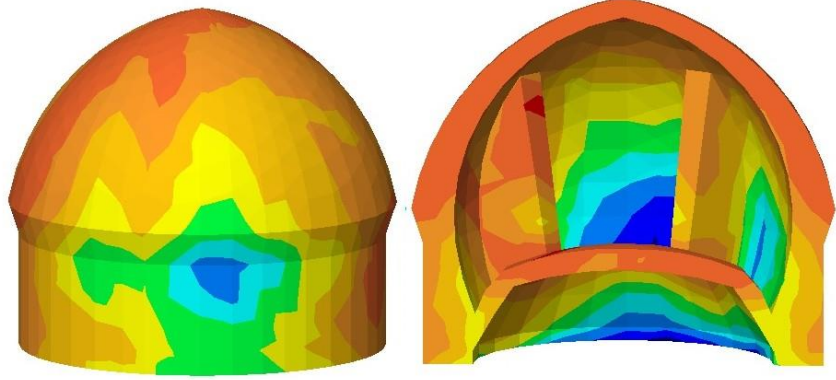


Şekil 4.20. Model-15-4 için kayma gerilmesi dağılımı.

4.3.5 Birim şekil değiştirmeler

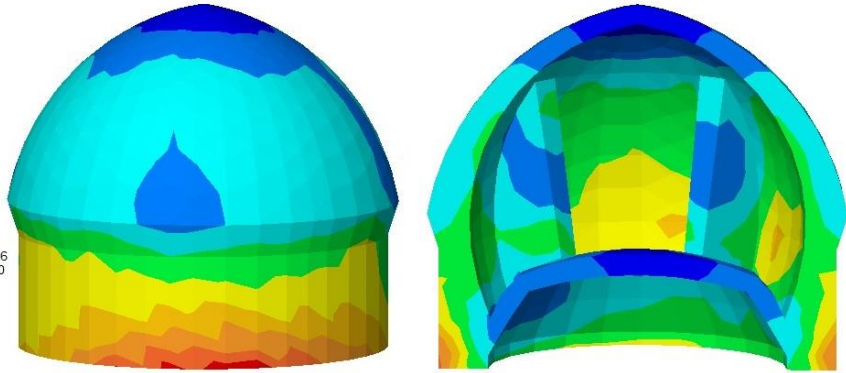
Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000407 basınç durumunda 0,000159 kayma durumunda 0,000429 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2.IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E3
-0,145589E-3
-0,12479E-3
-0,103992E-3
-83,1935E-6
-62,3951E-6
-41,5968E-6
-20,7984E-6
0,0
20,7984E-6
Maximum 28,3644E-6 at node 1362
Minimum -0,158821E-3 at node 74



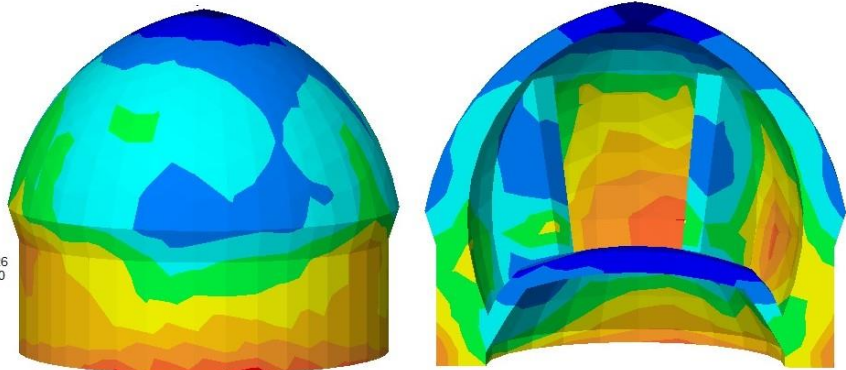
Şekil 4.21. Model-15-4 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2.IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1
41,2489E-6
82,4978E-6
0,123747E-3
0,164996E-3
0,206244E-3
0,247493E-3
0,288742E-3
0,329991E-3
0,37124E-3
Maximum 0,407318E-3 at node 126
Minimum 36,0784E-6 at node 1770



Şekil 4.22. Model-15-4 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2.IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1
44,2671E-6
88,5341E-6
0,132801E-3
0,177068E-3
0,221335E-3
0,265602E-3
0,30967E-3
0,364137E-3
0,398404E-3
Maximum 0,429104E-3 at node 126
Minimum 30,7003E-6 at node 1770



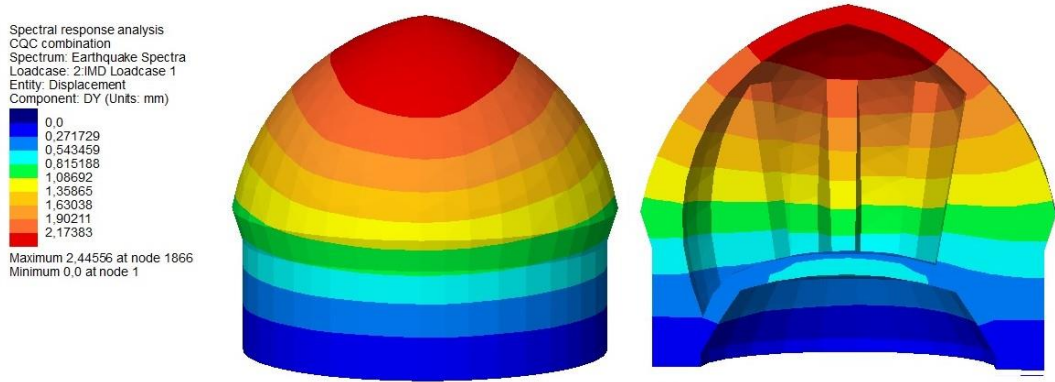
Şekil 4.23. Model-15-4 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

4.4 Model-15-8 için Analiz Sonuçları

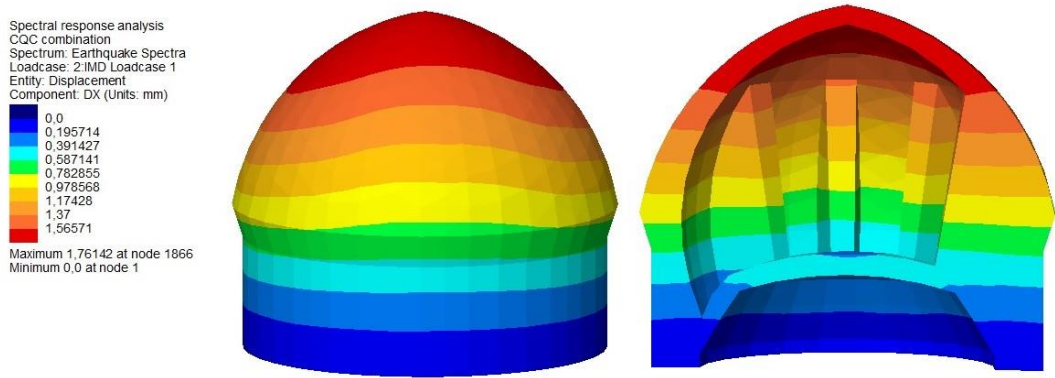
Model-15-8 15 derecelik 8 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Payandaların toplam hacmi 19,2 m³, modelin toplam hacmi 127,2 m³ olarak hesaplanmıştır.

4.4.1 Deplasmanlar

Yapılan analiz neticesinde Model-15-8 en fazla deplasmanı yatay doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası 2,446 mm yer değiştirmiştir. Şekil 4.24 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay x doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer 1,761 mm'dir. Şekil 4.25 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve 0,727 mm deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.26 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.



Şekil 4.24. Model-15-8 için y yönündeki deplasman dağılımı.

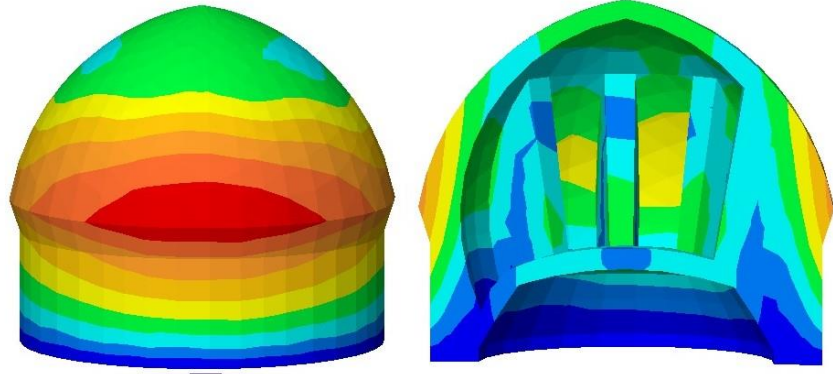


Şekil 4.25. Model-15-8 için x yönündeki deplasman dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Displacement
Component: DZ (Units: mm)

0.0
0.0808132
0.161626
0.24244
0.323253
0.404066
0.484879
0.565692
0.646506

Maximum 0.727319 at node 1066
Minimum 0.0 at node 1



Şekil 4.26. Model-15-8 için z yönündeki deplasman dağılımı.

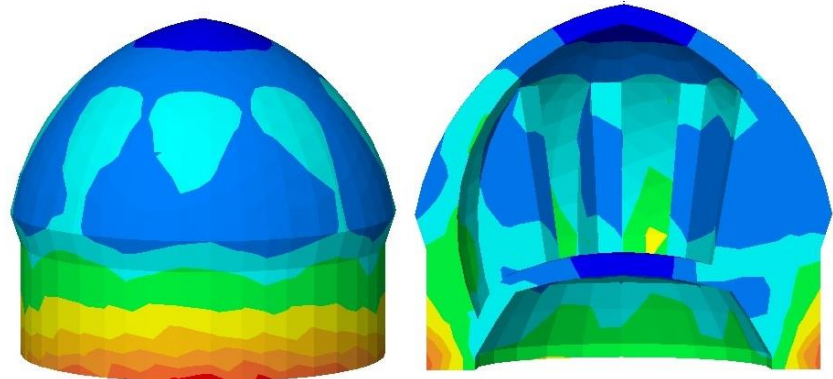
4.4.2 Çekme gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,257 MPa'dır. Şekil 4.27 Model-15-8 için çekme gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.0257493
0.0514985
0.0772478
0.102997
0.128746
0.154496
0.180245
0.205994
0.231743

Maximum 0.257101 at node 126
Minimum 0.0253579 at node 1862



Şekil 4.27. Model-15-8 için çekme gerilmesi dağılımı.

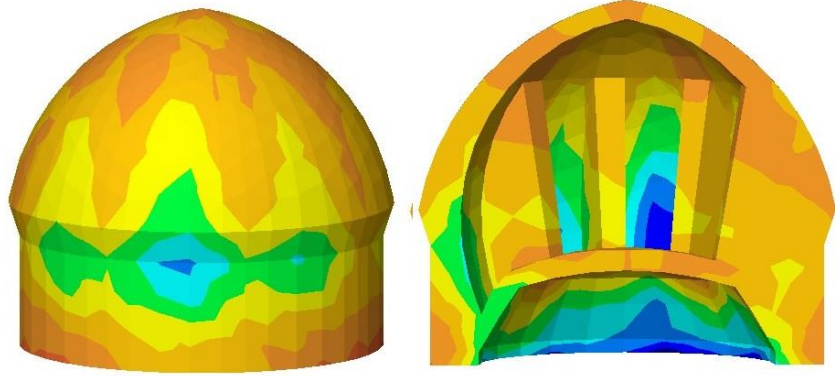
4.4.3 Basınç gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,072 MPa'dır. Şekil 4.28 Model-15-8 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2.IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

-0.0634584
-0.052882
-0.0423056
-0.0317292
-0.0211528
-0.0105764
0.0
0.0105764
0.0211528

Maximum 0.0230905 at node 126
Minimum -0.0720971 at node 74



Şekil 4.28. Model-15-8 için basınç gerilmesi dağılımı.

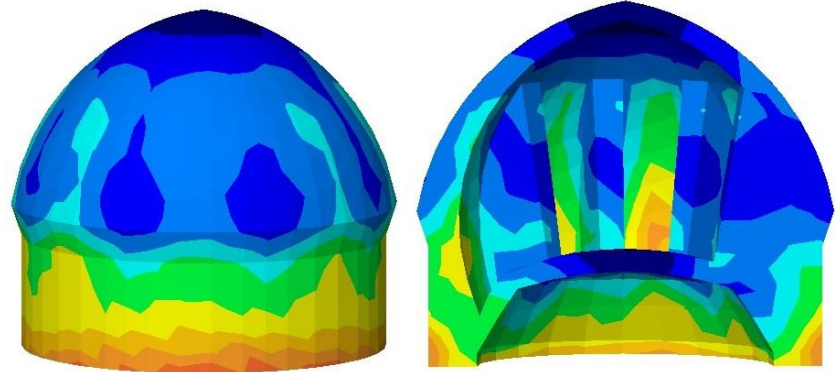
4.4.4 Kayma gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,117 MPa'dır. Şekil 4.29 Model-15-8 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2.IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.0232075
0.0348113
0.046415
0.0580188
0.0696226
0.0812263
0.0928301
0.104434
0.116038

Maximum 0.117005 at node 126
Minimum 0.0125716 at node 852



Şekil 4.29. Model-15-8 için kayma gerilmesi dağılımı.

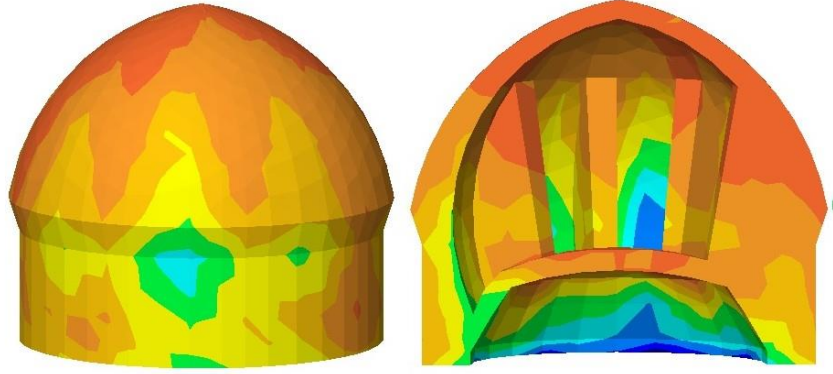
4.4.5 Birim şekil değiştirmeler

Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000409 basınç durumunda 0,000158 kayma durumunda 0,000447 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2/IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E3

-0,143634E-3
-0,123115E-3
-0,102596E-3
-82,0766E-6
-61,5574E-6
-41,0383E-6
-20,5191E-6
0,0
20,5191E-6

Maximum 26,4589E-6 at node 682
Minimum -0,158213E-3 at node 74

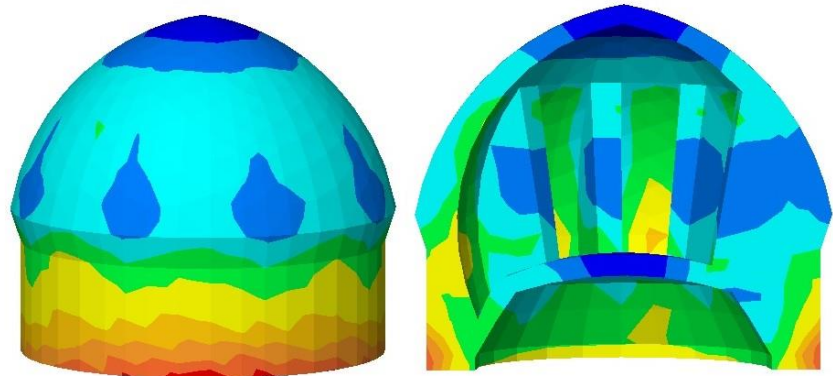


Şekil 4.30. Model-15-8 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2/IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1

41,1263E-6
82,2527E-6
0,123379E-3
0,164505E-3
0,205632E-3
0,246758E-3
0,287884E-3
0,329011E-3
0,370137E-3

Maximum 0,40939E-6 at node 126
Minimum 39,253E-6 at node 1862

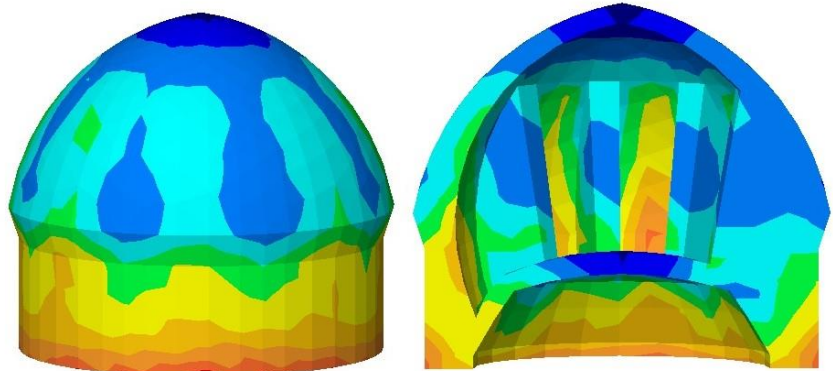


Şekil 4.31. Model-15-8 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2/IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1

45,9864E-6
91,9728E-6
0,137959E-3
0,183946E-3
0,229932E-3
0,275919E-3
0,321905E-3
0,367891E-3
0,413878E-3

Maximum 0,447355E-3 at node 126
Minimum 33,4773E-6 at node 1862



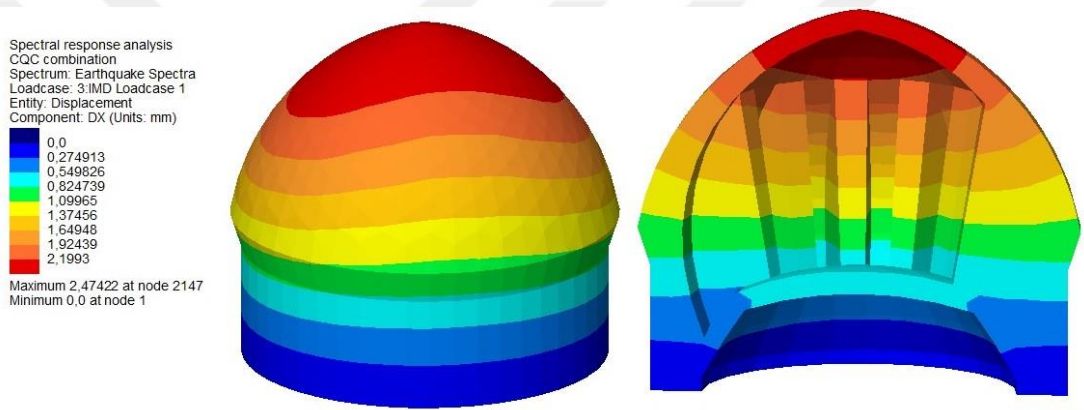
Şekil 4.32. Model-15-8 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

4.5 Model-15-12 için Analiz Sonuçları

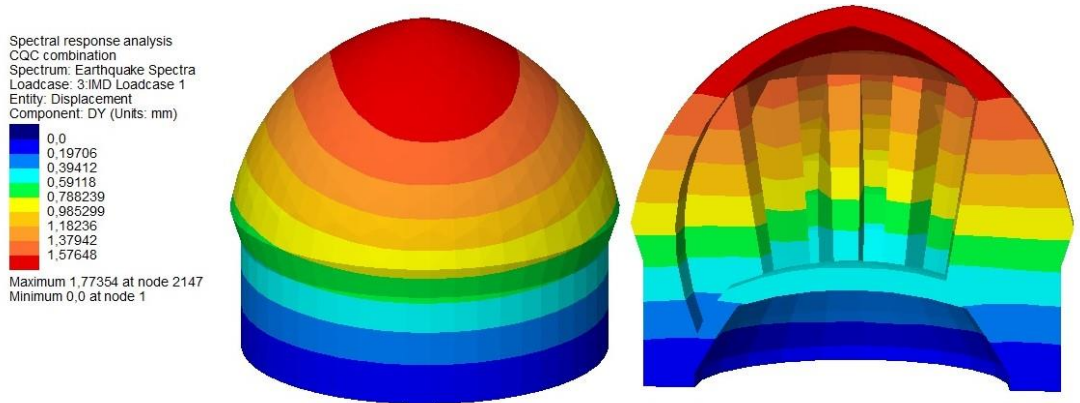
Model-15-12 15 derecelik 12 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Payandaların toplam hacmi 28,8 m³, modelin toplam hacmi 136,8 m³ olarak hesaplanmıştır.

4.5.1 Deplasmanlar

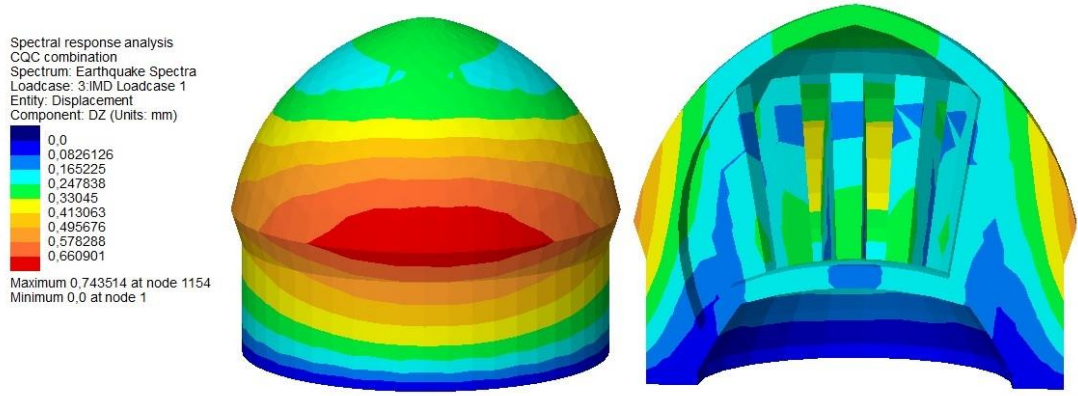
Yapılan analiz neticesinde Model-15-12 en fazla deplasmanı yatay doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası 2,474 mm yer değiştirmiştir. Şekil 4.33 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay y doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer 1,773 mm'dir. Şekil 4.34 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve 0,743 mm deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.35 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.



Şekil 4.33. Model-15-12 için x yönündeki deplasman dağılımı.



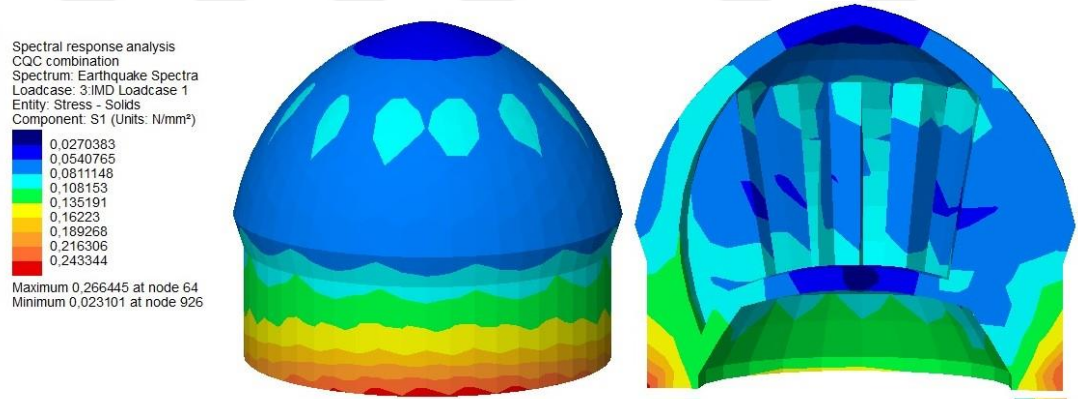
Şekil 4.34. Model-15-12 için y yönündeki deplasman dağılımı.



Şekil 4.35. Model-15-8 için z yönündeki deplasman dağılımı.

4.5.2 Çekme gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,266 MPa'dır. Şekil 4.36 Model-15-12 için çekme gerilmesi dağılımını ifade eder.



Şekil 4.36. Model-15-12 için çekme gerilmesi dağılımı.

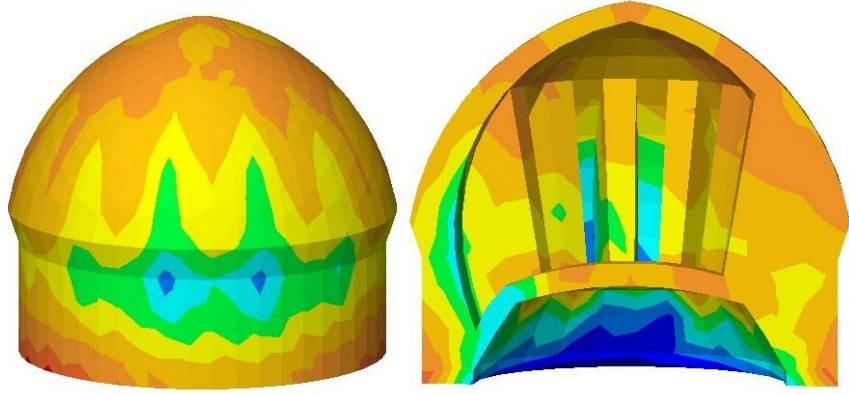
4.5.3 Basınç gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,062 MPa'dır. Şekil 4.37 Model-15-12 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3 IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

-0.0552029
-0.0460024
-0.0368002
-0.0276015
-0.018401
-9.20049E-3
0.0
9.20049E-3
0.018401

Maximum 0.0212314 at node 50
Minimum -0.061573 at node 116



Şekil 4.37. Model-15-12 için basınç gerilmesi dağılımı.

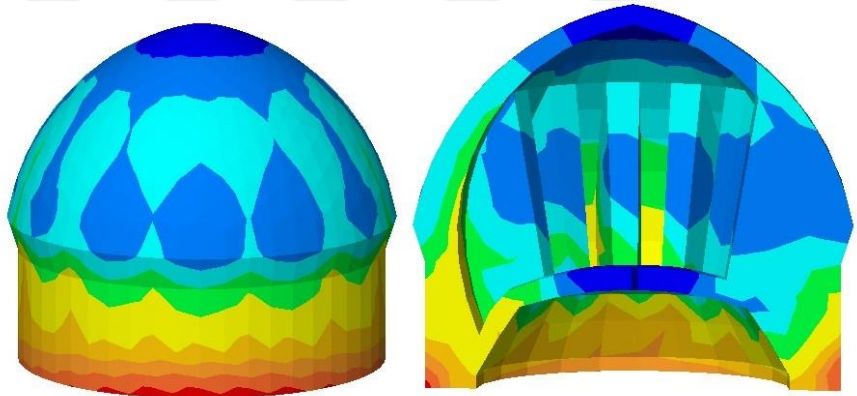
4.5.4 Kayma gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,124 MPa'dır. Şekil 4.38 Model-15-12 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3 IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.012476
0.0249521
0.0374281
0.0499041
0.0623801
0.0748562
0.0873322
0.0998082
0.112284

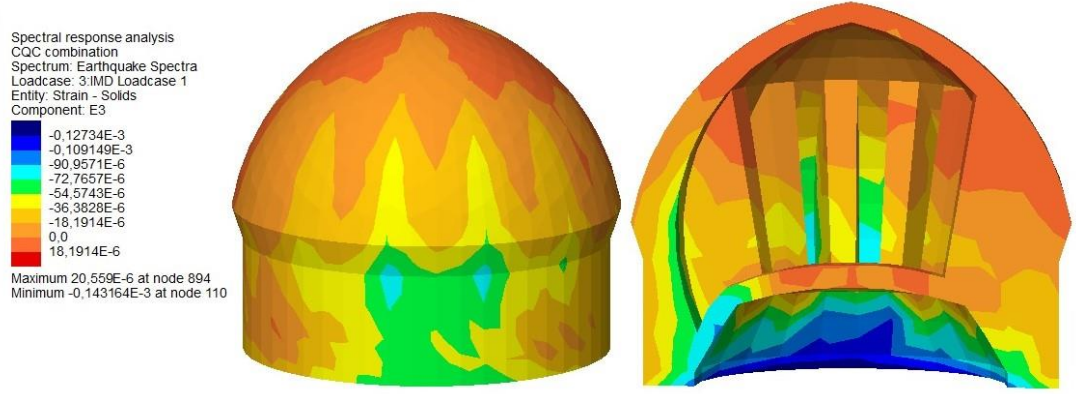
Maximum 0.124097 at node 64
Minimum 0.0118128 at node 926



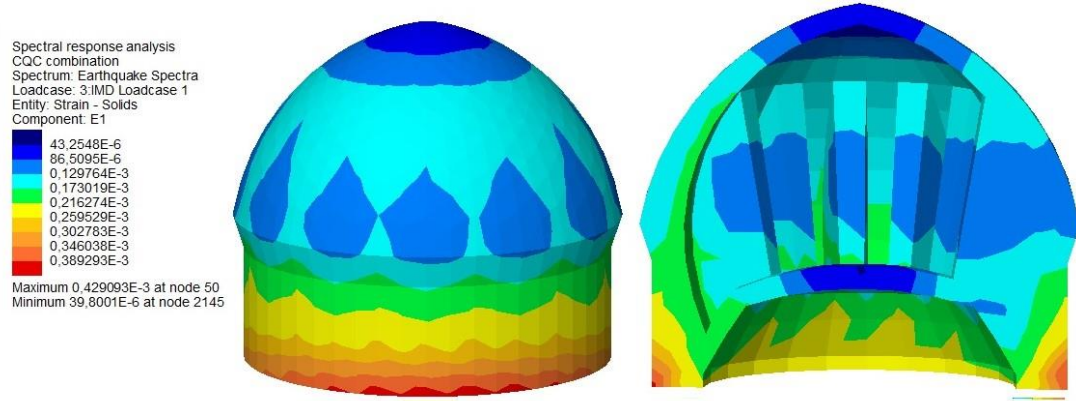
Şekil 4.38. Model-15-12 için kayma gerilmesi dağılımı.

4.5.5 Birim şekil değiştirmeler

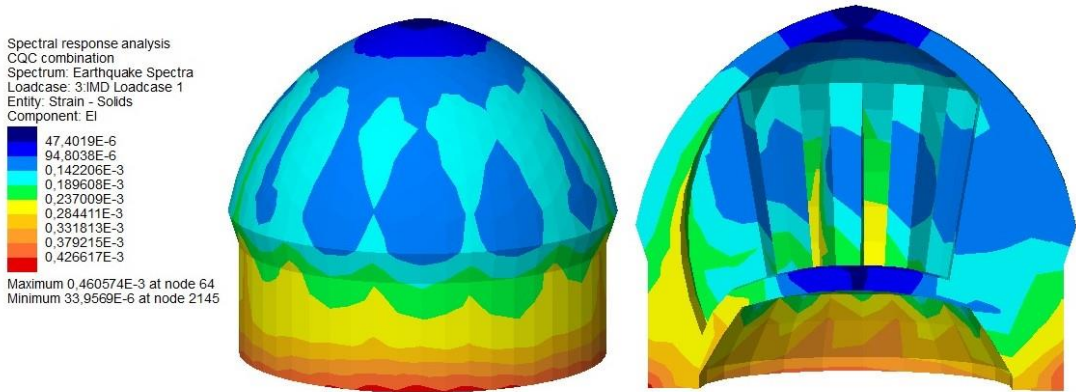
Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000429 basınç durumunda 0,000143 kayma durumunda 0,000461 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.



Şekil 4.39. Model-15-12 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 4.40. Model-15-12 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.



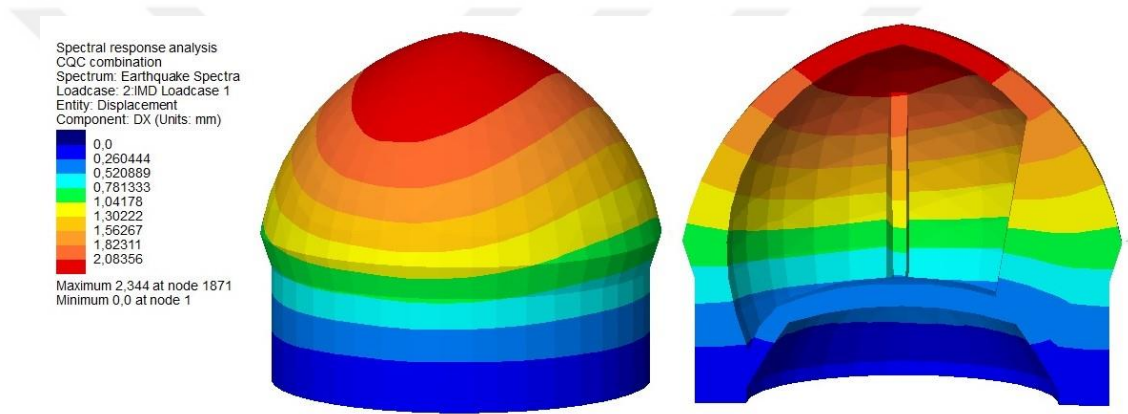
Şekil 4.41. Model-15-12 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

4.6 Model-7,5-4 için Analiz Sonuçları

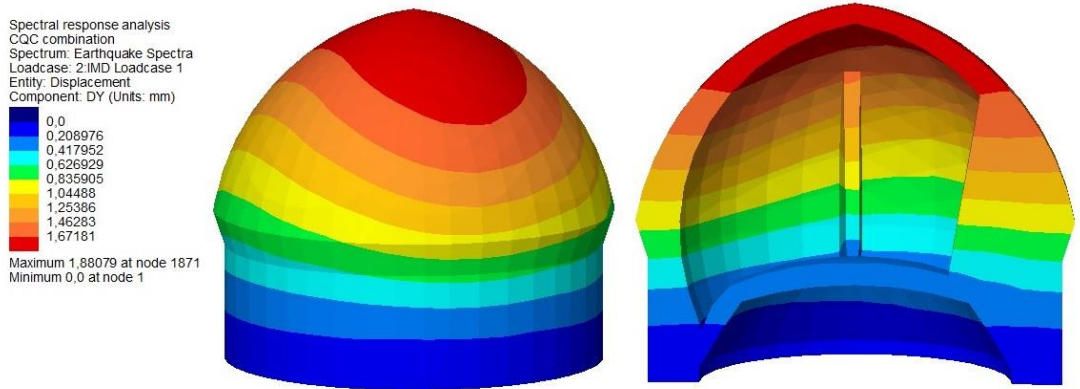
Model-7,5-4 7,5 derecelik 4 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Payandaların toplam hacmi 4,8 m³, modelin toplam hacmi 112,8 m³ olarak hesaplanmıştır.

4.6.1 Deplasmanlar

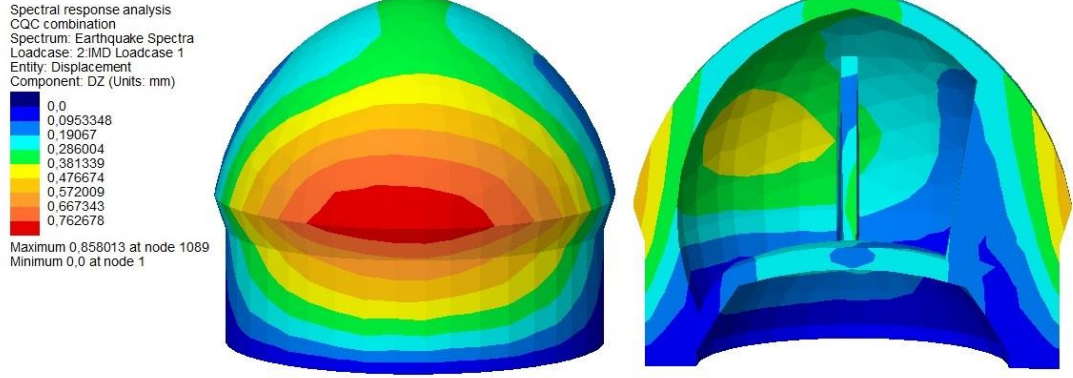
Yapılan analiz neticesinde Model-7,5-4 en fazla deplasmanı yatay doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası 2,344 mm yer değiştirmiştir. Şekil 4.42 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay y doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer 1,881 mm'dir. Şekil 4.43 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve 0,858 mm deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.44 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.



Şekil 4.42. Model-7,5-4 için x yönündeki deplasman dağılımı.



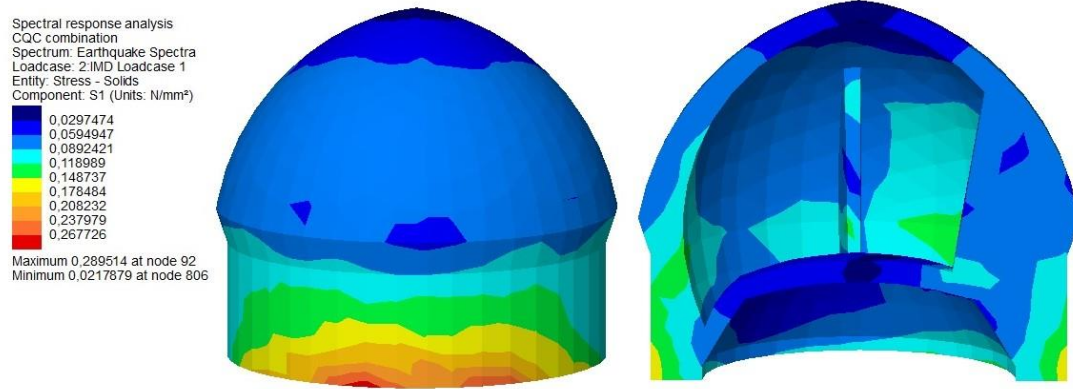
Şekil 4.43. Model-7,5-4 için y yönündeki deplasman dağılımı.



Şekil 4.44. Model-7,5-4 için z yönündeki deplasman dağılımı.

4.6.2 Çekme gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,289 MPa'dır. Şekil 4.45 Model-7,5-4 için çekme gerilmesi dağılımını ifade eder.



Şekil 4.45. Model-7,5-4 için çekme gerilmesi dağılımı.

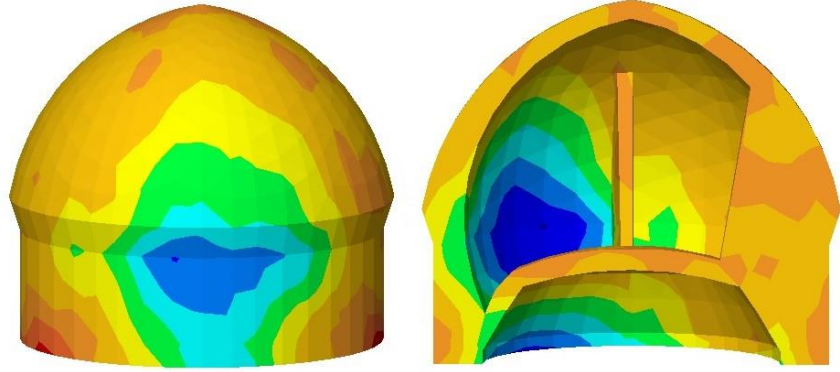
4.6.3 Basınç gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,089 MPa'dır. Şekil 4.46 Model-7,5-4 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

-0.0828667
-0.0690556
-0.0552444
-0.0414333
-0.0276222
-0.0138111
0.0
0.0138111
0.0276222

Maximum 0.0351149 at node 92
Minimum -0.0891851 at node 761



Şekil 4.46. Model-7,5-4 için basınç gerilmesi dağılımı.

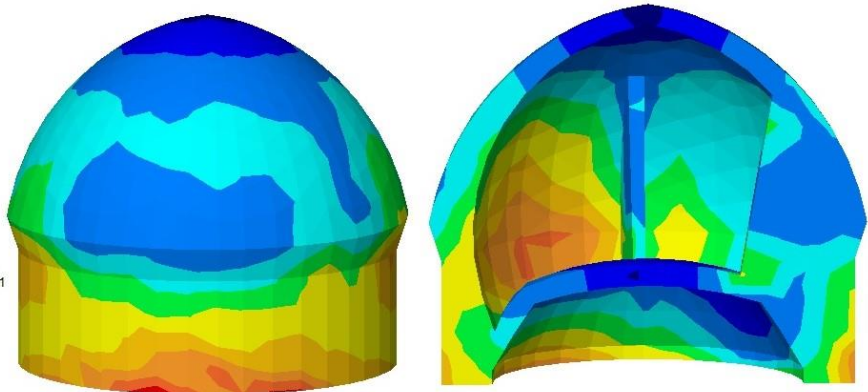
4.6.4 Kayma gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,127 MPa'dır. Şekil 4.47 Model-7,5-4 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 2:IMD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.0128694
0.0257387
0.0386081
0.0514774
0.0643468
0.0772161
0.0900855
0.102955
0.115824

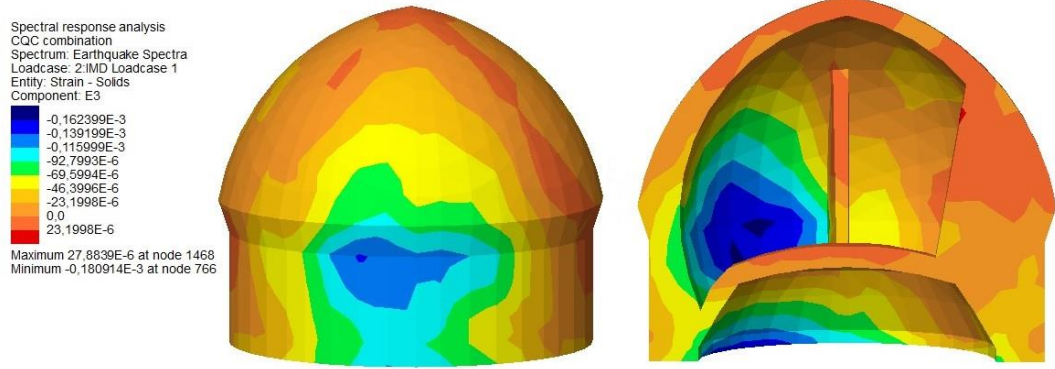
Maximum 0.1272 at node 92
Minimum 0.0113755 at node 1871



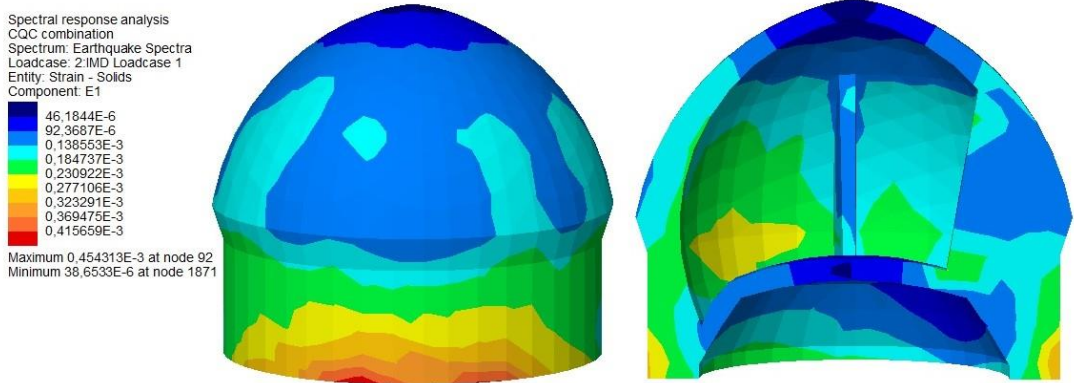
Şekil 4.47. Model-7,5-4 için kayma gerilmesi dağılımı.

4.6.5 Birim şekil değiştirmeler

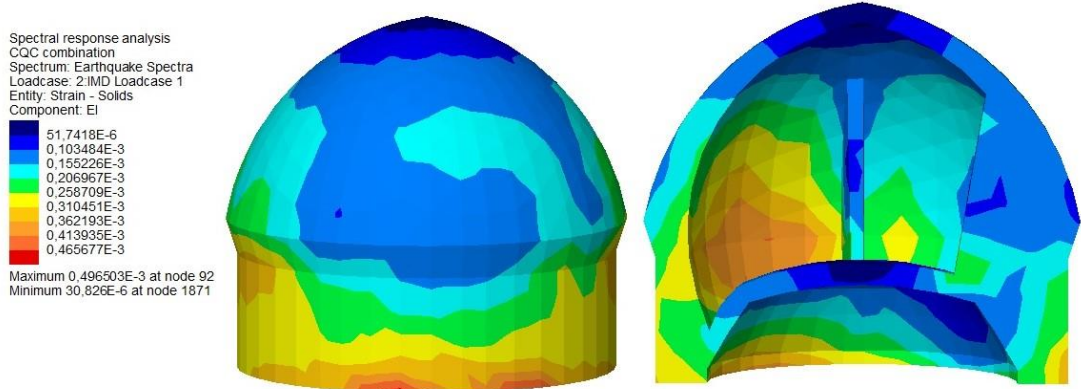
Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000454 basınç durumunda 0,000181 kayma durumunda 0,000496 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.



Şekil 4.48. Model-7,5-4 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.



Şekil 4.49. Model-7,5-4 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.



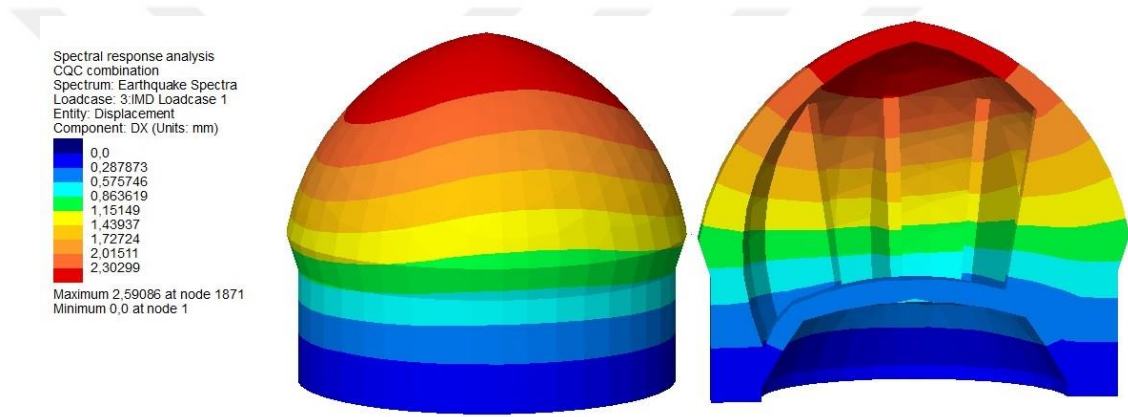
Şekil 4.50. Model-7,5-4 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

4.7 Model-7,5-8 için Analiz Sonuçları

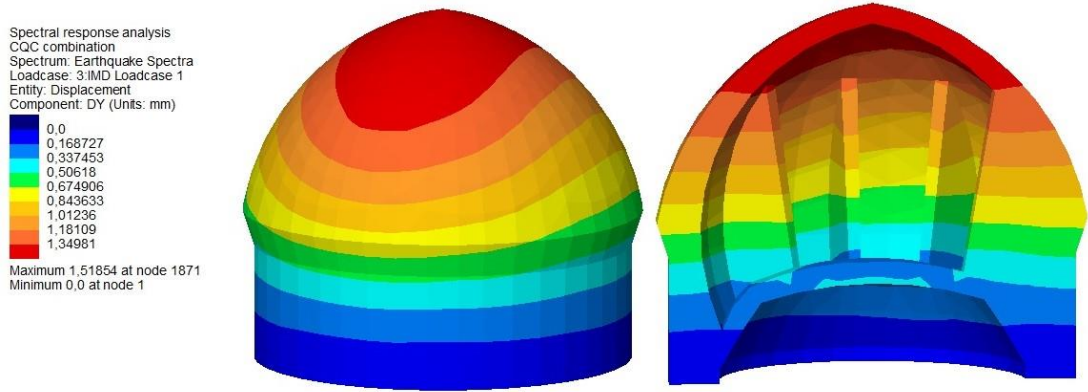
Model-7,5-8 7,5 derecelik 8 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Payandaların toplam hacmi $9,6 \text{ m}^3$, modelin toplam hacmi $117,6 \text{ m}^3$ olarak hesaplanmıştır.

4.7.1 Deplasmanlar

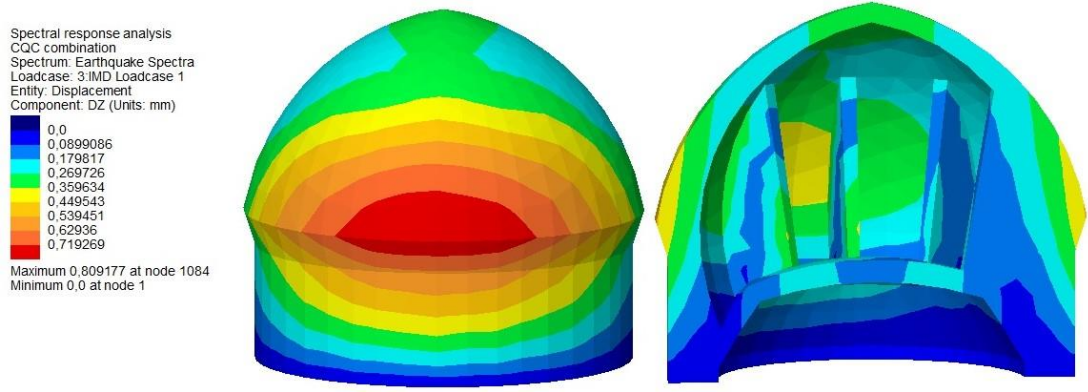
Yapılan analiz neticesinde Model-7,5-8 en fazla deplasmanı yatay doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası 2,591 mm yer değiştirmiştir. Şekil 4.51 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay y doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer 1,518 mm'dir. Şekil 4.52 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve 0,809 mm deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.53 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.



Şekil 4.51. Model-7,5-8 için x yönündeki deplasman dağılımı.



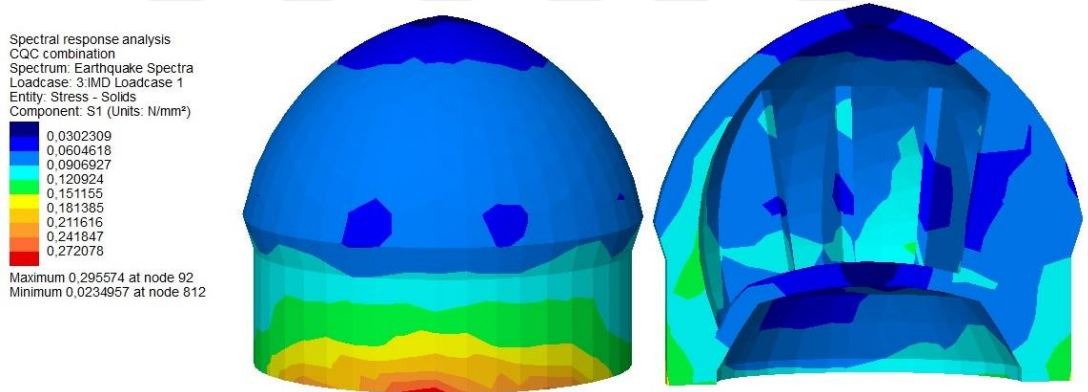
Şekil 4.52. Model-7,5-8 için y yönündeki deplasman dağılımı.



Şekil 4.53. Model-7,5-8 için z yönündeki deplasman dağılımı.

4.7.2 Çekme gerilmesi

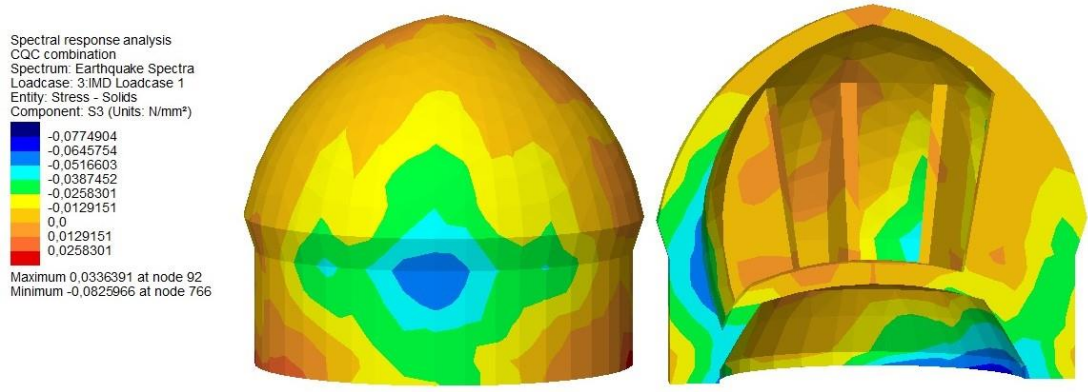
Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,296 MPa'dır. Şekil 4.54 Model-7,5-8 için çekme gerilmesi dağılımını ifade eder.



Şekil 4.54. Model-7,5-8 için çekme gerilmesi dağılımı.

4.7.3 Basınç gerilmesi

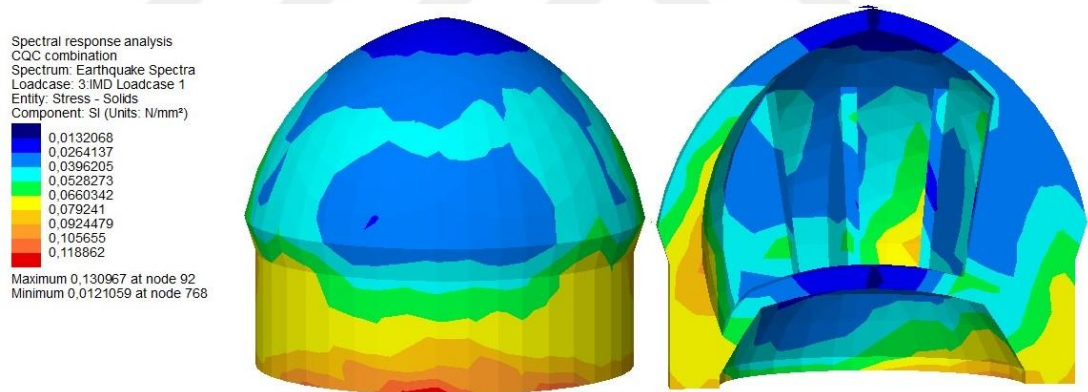
Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,083 MPa'dır. Şekil 4.55 Model-7,5-8 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.



Şekil 4.55. Model-7,5-8 için basınç gerilmesi dağılımı.

4.7.4 Kayma gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,131 MPa'dır. Şekil 4.56 Model-7,5-8 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.

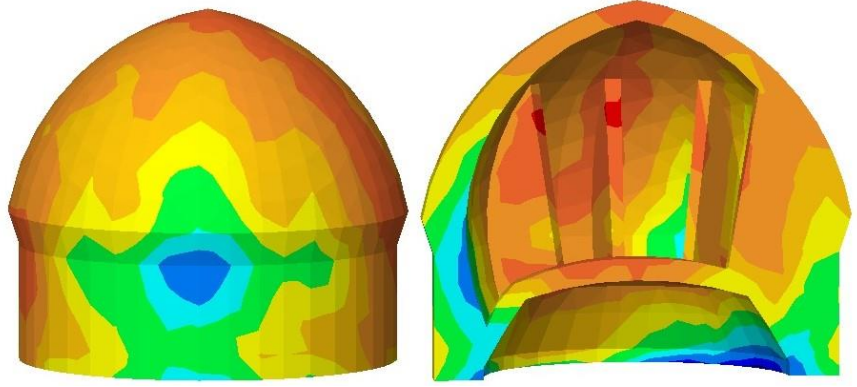


Şekil 4.56. Model-7,5-8 için kayma gerilmesi dağılımı.

4.7.5 Birim şekil değiştirmeler

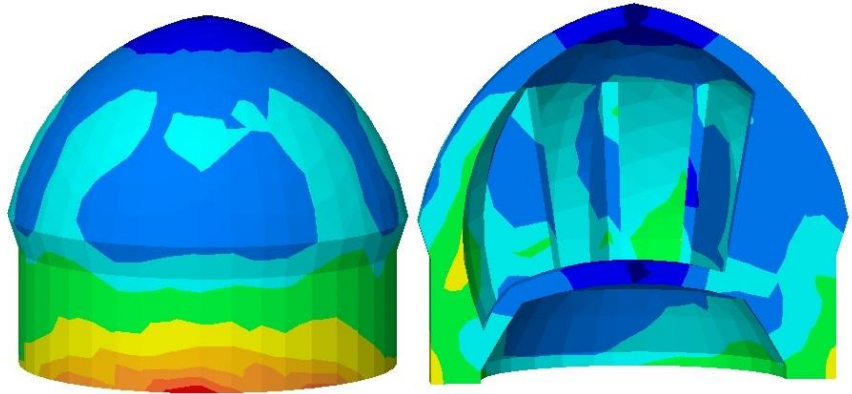
Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000465 basınç durumunda 0,000167 kayma durumunda 0,000512 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.57, Şekil 4.58 ve Şekil 4.59 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E3
-0,152474E-3
-0,130692E-3
-0,10891E-3
-87,1285E-6
-65,3462E-6
-43,5641E-6
-21,7821E-6
0,0
21,7821E-6
Maximum 28,8987E-6 at node 1465
Minimum -0,16714E-3 at node 766



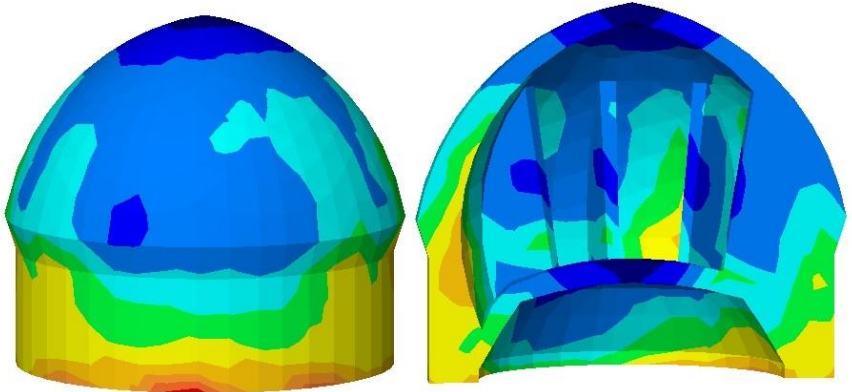
Şekil 4.57. Model-7,5-8 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1
46,806E-6
93,612E-6
0,140418E-3
0,187224E-3
0,23403E-3
0,280836E-3
0,327642E-3
0,374448E-3
0,421254E-3
Maximum 0,464653E-3 at node 92
Minimum 43,3989E-6 at node 812



Şekil 4.58. Model-7,5-8 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1
53,0121E-6
0,106024E-3
0,159036E-3
0,212048E-3
0,26506E-3
0,318072E-3
0,371085E-3
0,424097E-3
0,477109E-3
Maximum 0,512251E-3 at node 92
Minimum 35,1423E-6 at node 1871



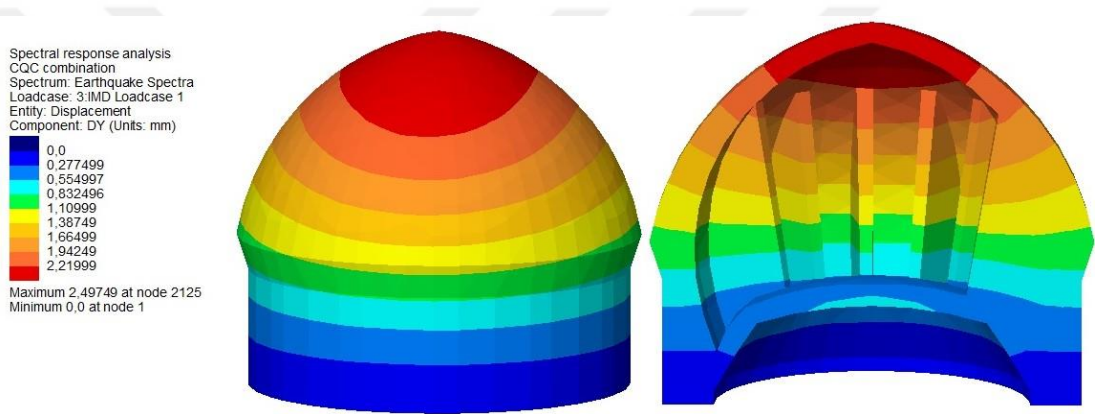
Şekil 4.59. Model-7,5-8 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

4.8 Model-7,5-12 için Analiz Sonuçları

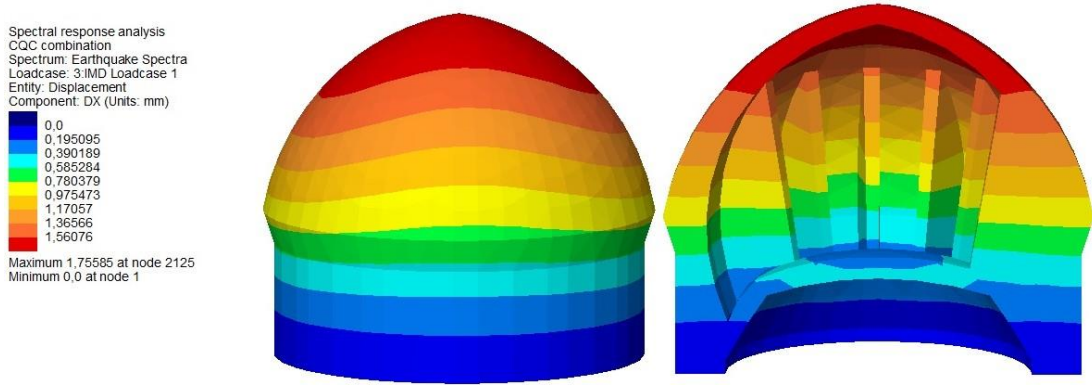
Model-7,5-12 7,5 derecelik 12 adet payandanın olduğu durumu ifade eder. Payandaların toplam hacmi 14,4 m³, modelin toplam hacmi 122,4 m³ olarak hesaplanmıştır.

4.8.1 Deplasmanlar

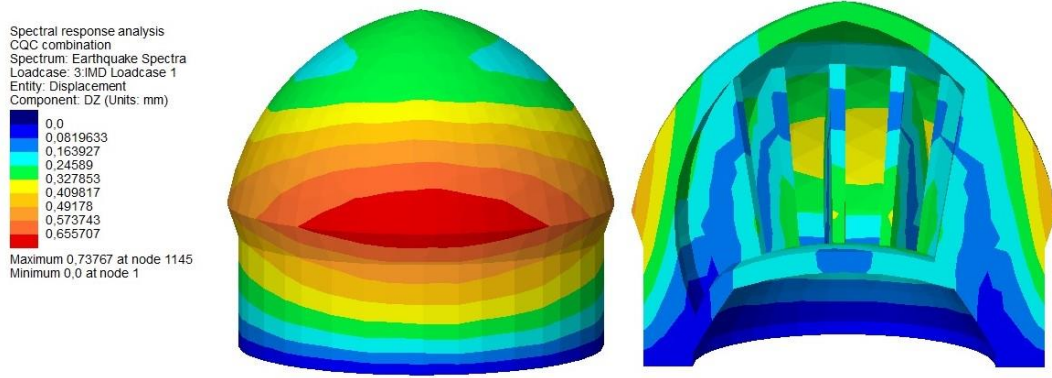
Yapılan analiz neticesinde Model-7,5-12 en fazla deplasmanı yatay doğrultusunda kubbenin tepe noktasında gerçekleştirmiştir. Kubbenin tepe noktası 2,497 mm yer değiştirmiştir. Şekil 4.60 modelin y doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Yatay x doğrultusunda yine benzer bir dağılıma sahiptir. En fazla deplasman kubbenin tepe noktasında gerçekleşmiştir ve bu değer 1,756 mm'dir. Şekil 4.61 modelin x doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder. Düşey z doğrultusuna bakıldığında modelin en fazla yer değiştirmesi dış cidarın soğan kısmında olduğu ve 0,738 mm deplasman yaptığı görülmüştür. Şekil 4.62 modelin z doğrultusunda yaptığı deplasman dağılımını ifade eder.



Şekil 4.60. Model-7,5-12 için y yönündeki deplasman dağılımı.



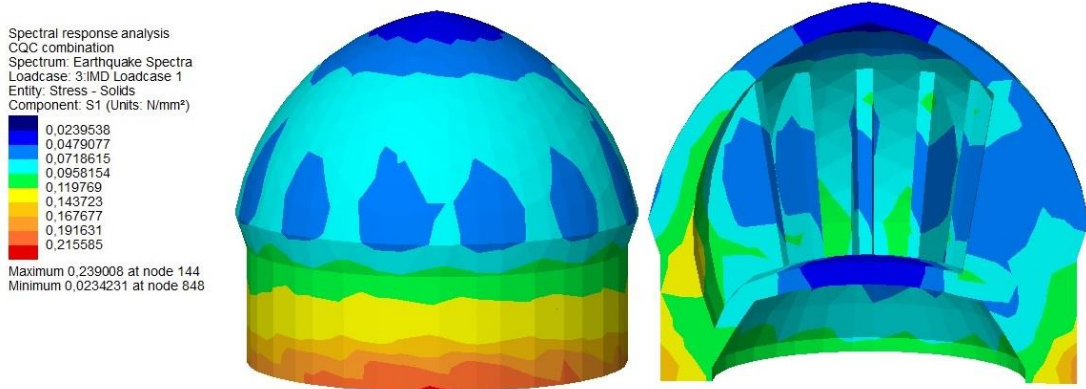
Şekil 4.61. Model-7,5-12 için x yönündeki deplasman dağılımı.



Şekil 4.62. Model-7,5-12 için z yönündeki deplasman dağılımı.

4.8.2 Çekme gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde çekme gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da çekme gerilmesine maruz kalmıştır. Çekme gerilmesinin en fazla olduğu kısım kasnağın alt kısmı olup maksimum çekme gerilmesi değeri 0,239 MPa'dır. Şekil 4.63 Model-7,5-12 için çekme gerilmesi dağılımını ifade eder.



Şekil 4.63. Model-7,5-12 için çekme gerilmesi dağılımı.

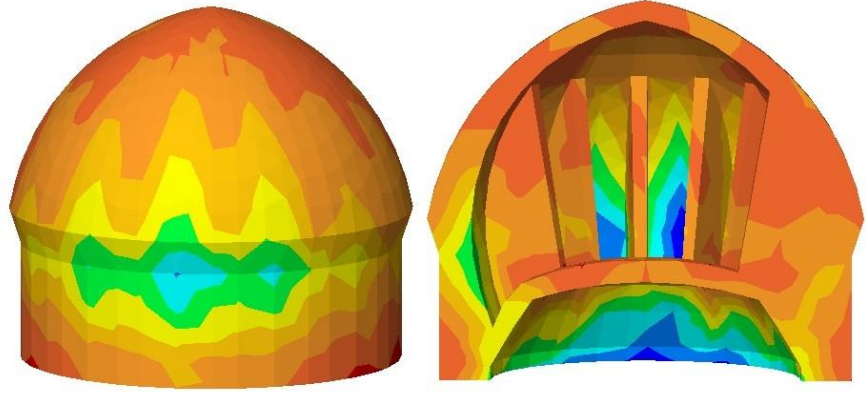
4.8.3 Basınç gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde basınç gerilmesi genel olarak kasnakla dış kubbenin birleştiği noktada meydana gelmiştir. Bununla birlikte modele içten bakıldığında iç ve dış kubbelerin taban kısımları da basınç gerilmesine maruz kalmıştır. Basınç gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,060 MPa'dır. Şekil 4.64 Model-7,5-12 için basınç gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3.1MD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S3 (Units: N/mm²)

-0.0594993
-0.0509994
-0.0424995
-0.0339996
-0.0254997
-0.0169998
-8.4999E-3
0.0
8.4999E-3

Maximum 0.0160607 at node 106
Minimum -0.0604384 at node 1016



Şekil 4.64. Model-7,5-12 için basınç gerilmesi dağılımı.

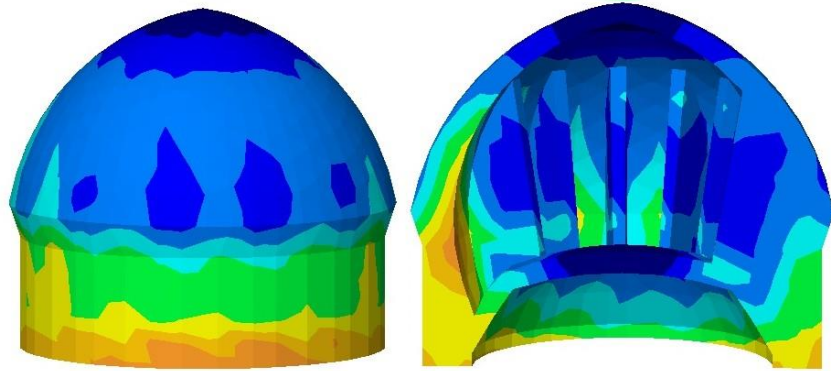
4.8.4 Kayma gerilmesi

Yapılan analiz neticesinde kayma gerilmesi genel olarak kasnak kısmında meydana gelmiştir. Bununla birlikte dış kubbenin iç kısmı da kayma gerilmesine maruz kalmıştır. Kayma gerilmesinin aldığı maksimum değer 0,119 MPa'dır. Şekil 4.65 Model-7,5-12 için kayma gerilmesi dağılımını ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3.1MD Loadcase 1
Entity: Stress - Solids
Component: S1 (Units: N/mm²)

0.0237097
0.0356645
0.0474194
0.0592742
0.071129
0.0829839
0.0948387
0.106694
0.118548

Maximum 0.118592 at node 144
Minimum 0.0118983 at node 790



Şekil 4.65. Model-7,5-12 için kayma gerilmesi dağılımı.

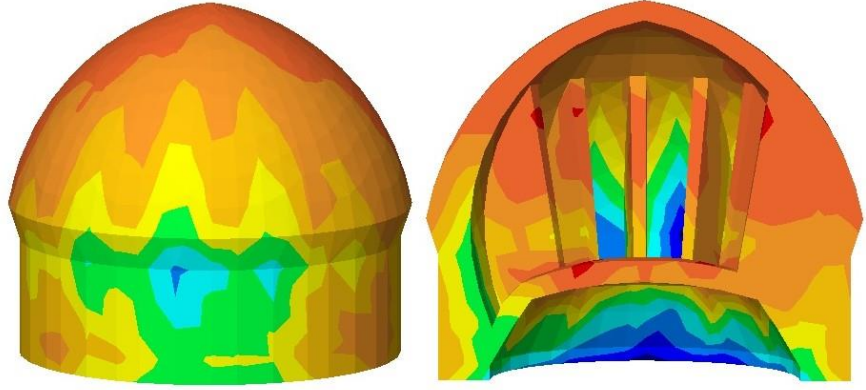
4.8.5 Birim şekil değiştirmeler

Yapılan analiz neticesinde yapıda gözlemlenen birim şekil değiştirme dağılımları gerilme dağılımlarına benzer biçimdedir. Çekme durumunda maksimum birim şekil değiştirmenin 0,000391 basınç durumunda 0,000128 kayma durumunda 0,000407 olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.66, Şekil 4.67 ve Şekil 4.68 modeldeki birim şekil değiştirmeleri ifade eder.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E3

-0,119968E-3
-0,10283E-3
-85,6915E-6
-68,5532E-6
-51,4149E-6
-34,2766E-6
-17,1383E-6
0,0
17,1383E-6

Maximum 26,1184E-6 at node 787
Minimum -0,128126E-3 at node 55

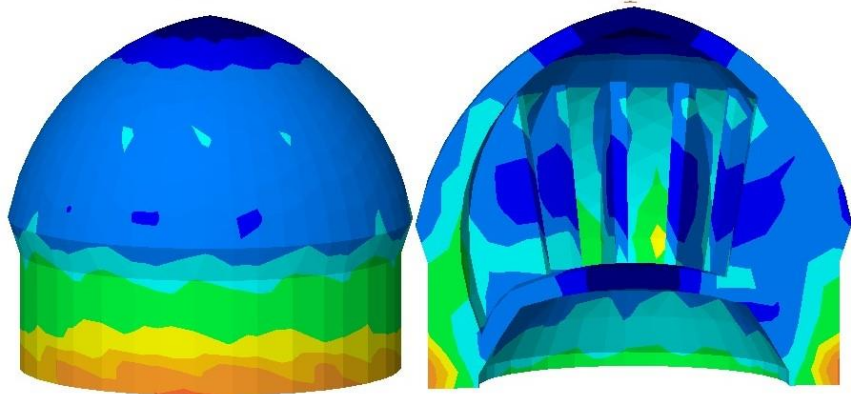


Şekil 4.66. Model-7,5-12 için basınç birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1

77,4737E-6
0,116211E-3
0,154947E-3
0,193684E-3
0,232421E-3
0,271158E-3
0,309895E-3
0,348632E-3
0,387369E-3

Maximum 0,391045E-3 at node 143
Minimum 42,4133E-6 at node 935

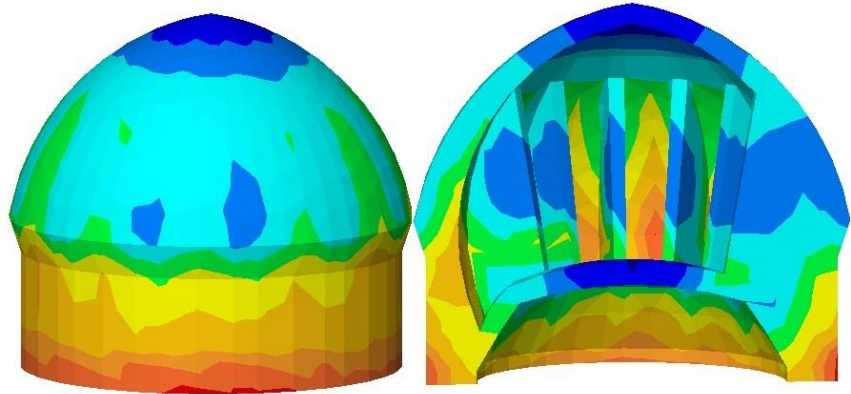


Şekil 4.67. Model-7,5-12 için çekme birim şekil değiştirme dağılımı.

Spectral response analysis
CQC combination
Spectrum: Earthquake Spectra
Loadcase: 3:IMD Loadcase 1
Entity: Strain - Solids
Component: E1

40,9846E-6
81,9692E-6
0,122954E-3
0,163938E-3
0,204923E-3
0,245908E-3
0,286892E-3
0,327877E-3
0,368862E-3

Maximum 0,40676E-3 at node 144
Minimum 37,898E-6 at node 935



Şekil 4.68. Model-7,5-12 için kayma birim şekil değiştirme dağılımı.

5. SONUÇ

İç payandaların çift cidarlı kubbelerin deprem davranışına etkisini incelemek için oluşturulan modellerin analizi LUSAS programını kullanarak yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen deplasman, gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

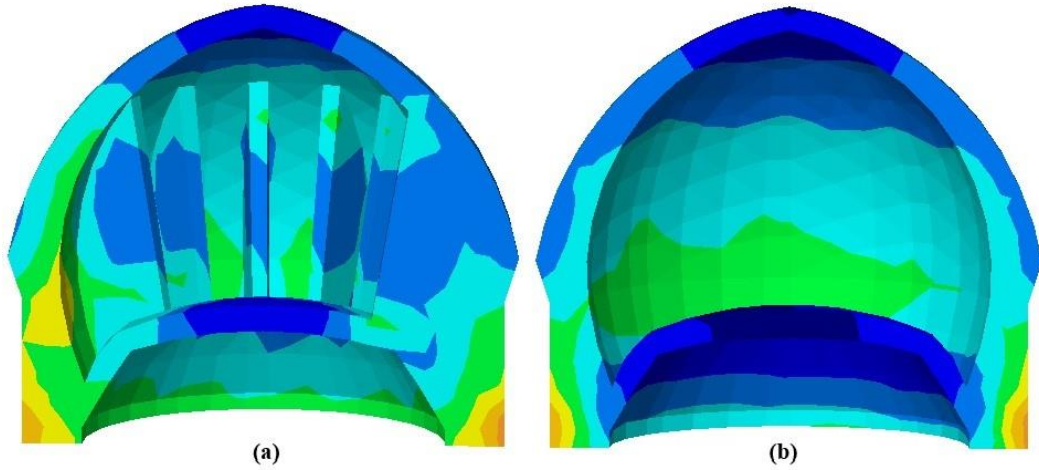
Çizelge 5.1. Parametrik çalışmaya ait analizlerin sonuçları.

Modeller	Model-0	Model 15-4	Model 15-8	Model 15-12	Model 7,5-4	Model 7,5-8	Model 7,5-12
Yatay Deplasman (mm)	2,619	2,604	2,446	2,474	2,344	2,591	2,497
Düşey deplasman (mm)	0,778	0,816	0,727	0,743	0,858	0,809	0,738
Çekme Gerilmesi (MPa)	0,265	0,258	0,257	0,266	0,289	0,296	0,239
Basınç Gerilmesi (MPa)	0,077	0,075	0,072	0,062	0,089	0,083	0,060
Kayma Gerilmesi (MPa)	0,117	0,113	0,117	0,124	0,127	0,131	0,119
Çekme Birim Şekil Değiştirme	0,000417	0,000407	0,000409	0,000429	0,000454	0,000465	0,000391
Basınç Birim Şekil Değiştirme	0,000154	0,000159	0,000158	0,000143	0,000181	0,000167	0,000128
Kayma Birim Şekil Değiştirme	0,000459	0,000429	0,000447	0,000461	0,000496	0,000512	0,000407
Payanda Hacmi (m ³)	0	9,6	19,2	28,8	4,8	9,6	14,4
Tüm Hacim (m ³)	108	117,6	127,2	136,8	112,8	117,6	122,4
Payanda Hacmi / Tüm Hacim	0	0,082	0,151	0,211	0,043	0,082	0,118

Tez kapsamında yapılan parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar toplu bir şekilde irdelendiğinde aşağıdaki çıkarımlara ulaşılmıştır.

İç payandaların kütesinin artması toplam yapı kütesini arttırmasına karşın modellerin aldığı maksimum gerilme değerleri genel anlamda birbirine yakın seyretmiştir. Modeller kıyaslandığında çekme gerilmesine en az maruz kalan Model-7,5-12 olmuştur. Modelin aldığı en büyük çekme gerilmesi 0,239 MPa'dır. Hiçbir payandası olmayan Model-0'a göre yaklaşık 0,026 MPa daha az çekme gerilmesi meydana gelmiştir. Bu anlamda Model-7,5-4 ve Model-7,5-8 kötü performans sergilemişlerdir.

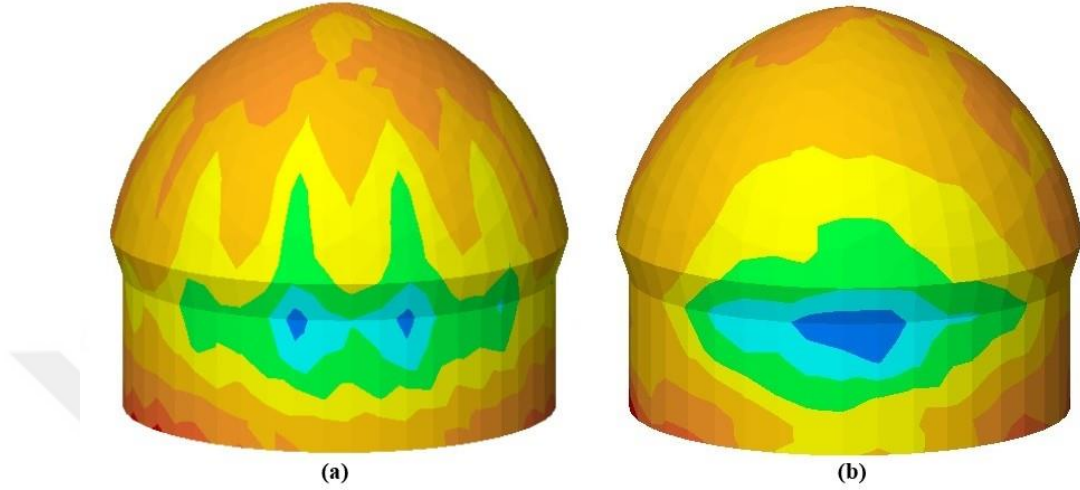
Model-7,5-12 ve Model-0'ın çekme gerilmesi renk dağılımına bakıldığında Model-0'da dış cidarın iç kısmında bulunan çekme gerilmelerinin bir kısmının Model-7,5-12'de payandalara dağıldığı ve yüklerin daha düzgün taşındığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.1'de söz konusu modelleri gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Modellerde çekme gerilmesi dağılımı. a) Model-7,5-12 için çekme gerilmesi dağılımı b) Model-0 için çekme gerilmesi dağılımı.

Basınç gerilmelerine bakıldığında en iyi performansı sergileyen modeller Model-7,5-12 ve Model-15-12'dir. Yaklaşık 0,06 MPa basınç gerilmesine maruz kalmışlardır. Payandanın bulunmadığı Model-0'a göre 0,017 MPa daha az basınç gerilmesi taşımışlardır. Bu anlamda en kötü performansı sergileyen modeller Model-7,5-4 ve Model-7,5-8 olmuştur.

Basınç gerilmesi dağılımları incelendiğinde payandaların dış cidarda basınç gerilmelerini tek bir noktaya toplanmasını engellediği ve daha düzgün bir yayılım göstermesini sağladığı görülmüştür. Şekil 5.2’de Model-15-12 ve Model-0’a ait basınç gerilmesi dağılımları görülmektedir.



Şekil 5.2. Modellerde basınç gerilmesi dağılımı. a) Model-15-12 için basınç gerilmesi dağılımı b) Model-0 için basınç gerilmesi dağılımı.

Tüm modellerde kayma gerilmeleri birbirine yakın seyretmiştir. Ancak tıpkı çekme gerilmesi dağılımında olduğu gibi payandaların uygun şekilde kullanımının dış kubbenin iç kısmındaki kayma gerilmelerini dağıttığı görülmüştür.

Genel anlamda Model-7,5-4 ve Model-7,5-8 beklenen performansı gösterememiştir. Bu da kubbelerde payanda kullanımının uygun oranlarda ve dizilimde yapılması gerektiğini göstermektedir.

Tüm modellerin toplam payanda hacminin tüm hacme oranı hesaplanmıştır. Bu hesaplama göre en büyük orana sahip olan model 0,211 ile Model-15-12 iken Model-0 haricinde en düşük orana sahip olan model ise Model-7,5-4’dir. Genel anlamda en ideal performansı sergileyen Model-7,5-12’nin oranı 1,118’dir. Model-15-4 ile Model-7,5-8 aynı orana sahiptir. Bunların arasından Model-15-4 daha az basınç, çekme ve kayma gerilmelerine maruz kalarak daha iyi bir performans sergilemiştir. Bu da payandaların kubbelerde uygun oran ve konumda kullanılması gerektiğini göstermektedir.

Yapılan tez çalışmasında Zeynel Bey Türbesinin dinamik etkilere karşı yapısal davranışı genel anlamda ele alınmıştır. Yığma yapılarda çekme gerilmesini alan elemanların bulunmamasından dolayı doğrusal ötesi davranışlarda çatlak oluşması muhtemeldir. Dolayısıyla türbenin kaide kısmında asal çekme gerilmelerinin oluşması gelecek depremlerde bu bölgede çekme çatlaklarının oluşabileceğini göstermektedir. Bu açıdan yapılan tez çalışması tarihi yapıların onarım ve güçlendirme çalışmalarında referans olması beklenmektedir.

Akabinde Zeynel Bey Türbesinin kubbesi baz alınarak payanda hacminin dinamik etkilere katkısıyla ilgili yürütülen çalışmada payandaların uygun konum ve boyutlarda kullanılmasının gerilme yığılmasını önlediği görülmüştür. Ancak söz konusu türbenin kubbesi soğanlı tipolojiye ve yüksek bir kasnak bölgesine sahiptir. Dolayısıyla diğer tipolojilerdeki çift cidarlı kubbelerde iç payandaların nasıl etki sağlayacağı araştırılması gereken konular arasındadır. İncelenen vakada kubbe yüksekliği ve açıklığı sabit tutulmuştur. Tarihi yapıların geometrik özelliklerinin yapısal davranışa etkisi düşünüldüğünde çift cidarlı kubbelerin açıklık ve yükseklik değişiminin yapısal davranışa nasıl etki ettiği ileride yapılacak başka bir araştırmanın konusudur.

KAYNAKLAR

- Altın, M., 2019. Pantheon'dan Günümüze Kubbelerin Gelişimi, Yalın Yayıncılık, İstanbul.
- Ashkan, M. ve Ahmad, Y., 2009. PERSIAN DOMES: HISTORY, MORPHOLOGY AND TYPOLOGIES. ArchNet-IJAR, 3, 3. Altın, M., 2019. Pantheon'dan Günümüze Kubbelerin Gelişimi, Yalın Yayıncılık, İstanbul.
- Ashkan, M. ve Ahmad, Y., 2010. Discontinuous double-shell domes through Islamic eras in the middle east and central Asia: History, morphology, typologies, geometry, and construction. nexus network Journal, 12, 287-319.
- Berksan M., 2021. Süleymaniye Camisi'nin Çift Cidarlı Kubbeleri ve Bu Konudaki Yayınlar Eleştirel Bir Bakış, Arkitera. URL Adres: Süleymaniye Camisi'nin Çift Cidarlı Kubbeleri ve Bu Konudaki Yayınlar Eleştirel Bir Bakış - Arkitera Erişim tarihi: 07.03.2024.
- Bilgin, H., 2006. Mimar Sinan Yapılarında Kubbeli Örtü Sistemlerinin Yapısal Analizi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 21, 3-4, 119-128.
- Çelik, S., 2001. Mevcut Belgeler Işığında Süleymaniye Külliyesinin Yapım Süreci, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Eurocode-8. 2006. Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- Feizolahbeigi, A., Lourenço, P. B., Golabchi, M., Ortega, J. ve Rezazadeh, M., 2021. Discussion of the role of geometry, proportion and construction techniques in the seismic behavior of 16th to 18th century bulbous discontinuous double shell domes in central Iran. Journal of Building Engineering, 33, 101575.
- Hejazi, M. ve Pourabedin, M., 2021. Performance of Persian brick masonry discontinuous double-shell domes against earthquakes, Engineering Failure Analysis, 119, 104994.
- Hugo, V., 2019. Notre Dame'ın Kamburu. İş Bankası Kültür Yayınları. XII. Basım. İstanbul.
- Lau, W. W., 2006. Equilibrium analysis of masonry domes, Doktora Tezi, Massachusetts institute of technology, Cambridge.
- Leseur, T., 1742. Parere di tre matematici sopra i danni, che si sono trovati nella cupola di San Pietro sul fine dell'anno 1742. Verlag nicht ermittelbar.
- LUSAS, 2024. V19, Finite element analysis software products. United Kingdom: finite element system, FEA Ltd.

- Pavlovic, M., Reccia, E., ve Cecchi, A., 2016. A procedure to investigate the collapse behavior of masonry domes: some meaningful cases, *International Journal of Architectural Heritage*, 10, 1, 67-83.
- Safaeipour, H., Zargar, A. H. ve Goudarzi, S., 2012. Typology of Khashkhashis (stiffeners) in discontinuous double-shell domes. *Domes in the World*, Florence, Italy.
- Sütbaşı, Ü. ve Ural, A., 2023. Earthquake analysis of double-shell domes with different typologies, 3rd International Congress of Civil Engineering and Architecture (ICEARC), Trabzon, Volume 1: Civil Engineering, 1081-1095.
- Şahin, M., 2013. Giresun ilindeki bağdadi kubbeli camiler. *TÜBA-KED Türkiye Bilimler Akademisi Kültür Envanteri Dergisi*, 11, 71-89.
- Tanrıverdi, Ş., 2020. Taş kubbelerde pencere boşluğunun ve kasnak yüksekliğinin davranış ve dayanım üzerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- TBDY. 2018. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Valibeig, N., Rahimi Ariaei, A. ve Rahravi Poodeh, S., 2018. Survey of the outer-shell structure of the double-shell discrete Nar domes, *Iran*, 56, 2, 161-172.
- Yeşilbaş, E., 2020. İslam Mimarisinde “Çift Cidarlı Kubbe” Uygulaması ve Anadolu’dan Bazı Örnekler, *Şehir ve Medeniyet Dergisi*, 6, 13, 366-392.
- Ziyrek, A., 2011. Süleymaniye Külliyesi Türbeleri ve Haziresi, *Restorasyon Yıllığı Dergisi*, 3, 123-132.
- URL-1, < <https://monolithicdome.com/pantheon-a-temple-to-all-gods> >, Erişim tarihi: 08.11.2023.
- URL-2, < <https://olabilirsiniz.com/mimarlik/mimar-sinan-tarafindan-yapilan-5-camii/> >, Erişim tarihi: 08.11.2023.
- URL-3, < <https://www.selcuklumirasi.com/architecture-detail/alaeddin-camii-4> >, Erişim tarihi: 08.11.2023.
- URL-4, < <https://tr.pinterest.com/pin/330381322663511905/> >, Erişim tarihi: 08.11.2023.
- URL-5 < Karahan İkiz Türbeleri - Vikipedi (wikipedia.org) >, Erişim tarihi: 08.11.2023.
- URL-6 < St. Paul’s Cathedral Dome: a synthesis of engineering and art – Myles Zhang >, Erişim tarihi: 08.11.2023
- URL-7 < TRT AVAZ on X: "Gur-i Emir - Timur'un türbesi Semerkant

- <https://t.co/TBQm0vfluV> / X (twitter.com) >, Erişim tarihi: 16.11.2023
- URL-8 < Taç Mahal Agra Hindistan - Pixabay'de ücretsiz fotoğraf - Pixabay >, Erişim tarihi: 16.11.2023
- URL-9 < Olcaytu Türbesi - Vikipedi (wikipedia.org) >, Erişim tarihi: 16.11.2023
- URL-10 < Ali Şahin Aytek on X: "Çift Cidarlı Kubbe Tekniği Dışta yapıyı belirgin kılan vurguyu, içte ise insanda bıraktığı duyguyu esas alan bir mimari tercih. <https://t.co/fkr1k6ECUb> / X (twitter.com) >, Erişim tarihi: 04.04.2024
- URL-11 < Seda Özen Bilgili on X: "Çift cidarlı, birbirine paralel iki kubbe arası. Ayasofya, II.Selim Türbesi, Mimar Sinan eseri.50-100 yılda bir onarımda girilecek bir mekân <https://t.co/udnRI4TWcO> / X (twitter.com) >, Erişim tarihi: 04.04.2024
- URL-12 < İSTANBUL YAPI TEKNOLOJİSİ | Büyük İstanbul Tarihi (istanbultarihi.ist) >, Erişim tarihi: 10.12.2023
- URL-13 < Yakutiye Medresesi: 7 asırlık tarihiyle Erzurum'un simgesi (ntv.com.tr) >, Erişim tarihi: 21.09.2023
- URL-14 < Zinciriye (Sultan İsa) Medresesi Turları - Mardin Turları ve Tur Fiyatları - Mührü Kil TurMardin Turları ve Tur Fiyatları – Mührü Kil Tur (muhrukultur.com) >, Erişim tarihi: 21.09.2023
- URL-15 < Zeynel Bey Türbesi (hasankeyf.gov.tr) >, Erişim tarihi: 21.09.2023
- URL-16 < Divriği Ulu Camii | SANATIN YOLCULUĞU (sanatinyolculugu.com) >, Erişim tarihi: 05.03.2024
- URL-17 < ایراد گنبد مسجد امام از سازهاست نه کاشی گنبد/ برای مرمت عجله نکنید (javanonline.ir) >, Erişim tarihi: 05.04.2024
- URL-18 < Camii Cami Islam - Pixabay'de ücretsiz fotoğraf - Pixabay >, Erişim tarihi: 05.04.2024
- URL-19 < BATMAN | Sultan Turizm >, Erişim tarihi: 16.05.2024
- URL-20 < Zeynel Bey Türbesi (hasankeyf.gov.tr) >, Erişim tarihi: 16.05.2024

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı :Ülkücan SÜTBAŞ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans :Necmettin Erbakan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü, 2020

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalı, 2024

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Makaleler

1. Sütbaş, Ü. ve Ural, A., 2023. Earthquake analysis of double-shell domes with different typologies, 3rd International Congress of Civil Engineering and Architecture (ICEARC), Trabzon, Volume 1: Civil Engineering, 1081-1095.