



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

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TAŞ KUBBELERDE PENCERE BOŞLUĞUNUN VE KASNAK
YÜKSEKLİĞİNİN DAVRANIŞ VE DAYANIM ÜZERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Şükran TANRIVERDİ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

AKSARAY, 2020

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 172357604 numaralı Doktora öğrencisi Şükran TANRIVERDİ tarafından hazırlanan “**TAŞ KUBBELERDE PENCERE BOŞLUĞUNUN VE KASNAK YÜKSEKLİĞİNİN DAVRANIŞ VE DAYANIM ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Ali URAL

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Ersin AYDIN

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 29 /12/2020

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

.....
Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduĐum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı dűşecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıĐımı, yararlandıĐım eserlerin kaynakçada gűsterilenlerden olduĐunu, çalıřmamda kullandıĐım verilerin orijinalliĐini ve her tűrlű intihalden uzak olduĐunu beyan ederim.

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

İmza

şukran TANRIVERDİ

TEŞEKKÜR

“Taş kubbelerde pencere boşluğunun ve kasnak yüksekliğinin davranış ve dayanım üzerine etkisinin incelenmesi” başlıklı doktora tez çalışmamı bana öneren ve doktora eğitimim boyunca deneyimleriyle, bilgisiyle desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerini esirgmeden, çalışmalarımın destekleriyle ve yardımlarıyla önünü açan ayrıca çalışmamda tez izleme komitesi üyesi olan çok kıymetli Doç. Dr. Ali URAL’a şükranlarımı sunarım.

Doktora çalışmam boyunca değerli fikirlerini esirgemeyen, vaktini ayırıp tez çalışmamı inceleyen tez izleme komitesi üyesi değerli hocam Prof. Dr. Ersin AYDIN’a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana destek ve yardımcı olan arkadaşım Fatih ÇELİK’e İnşaat Mühendisliği Bölümünde görev yapan araştırma görevlisi arkadaşım Tülin ÇELİK’e ve çok değerli mesai arkadaşım Merve ARIBAŞ’a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme ve çalışmam boyunca desteğini ve yardımlarını esirgemeyen eşim İnş. Müh. Cihan TANRIVERDİ’ye ve kızım Elif Asmin TANRIVERDİ’ye tüm kalbimle teşekkür ederim.

Şükran TANRIVERDİ
AKSARAY, 2020

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
1.2 Literatür Özeti	5
1.2.1 Tarihi yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar	6
1.2.2 Tarihi yapıların davranışlarının incelendiği çalışmalar	10
2. KUBBELER	14
2.1 Kubbe Geçiş Elemanları	19
2.2 Kubbe Yapılarda Kasnak Uygulaması	21
2.3 Kubbelerde Oluşan Kuvvetler ve Yük Dağılımları	25
3. MALZEME ÖZELLİKLERİ	27
3.1 Tüf Taşın Özellikleri	27
3.2 Horasan Harcının Özellikleri	29
3.3 Yığıma Duvar Numunelerinin Basınç Dayanımı	31
4. KUBBE DENEY ELEMANLARI	34
4.1 Kubbe Deney Elemanlarının Hazırlanması	34
4.1.1 Deplasman ölçerlerin yerleştirilmesi	40
4.2 Model-Ref (Boşluksuz Referans) Deney Elemanı	41
4.3 Model-100 Deney Elemanı	48
4.4 Model-200 Deney Elemanı	55
4.5 Model-300 Deney Elemanı	62
4.6 Model-400 Deney Elemanı	69
4.7 Model-Ref/2,5 (Boşluklu Referans Deney Elemanı) Deney Elemanı	76
4.8 Model-300/2,5 Deney Elemanı	85
4.9 Model-400/2,5 Deney Elemanı	91
4.10 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	99
4.10.1 Boşluksuz üretilen kubbe deney elemanlarının karşılaştırılması	99
4.10.2 Boşluk oranı % 2,5 olan kubbe deney elemanlarının karşılaştırılması ..	107
4.10.3 Deney elemanlarının karşılaştırılması	113
5. KUBBE NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ	124
6. ANALİZ İLE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	132
6.1 Boşluk Oranı Arttırılan Kubbe Modellerin Sayısal Analizi	137
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ	158

DOKTORA TEZİ

TAŞ KUBBELERDE PENCERE BOŞLUĞUNUN VE KASNAK YÜKSEKLİĞİNİN DAVRANIŞ VE DAYANIM ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ŞÜKRAN TANRIVERDİ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

ÖZET

Bu tez çalışmasında, yığma kubbelerdeki kubbe kasnak yüksekliğinin ve pencere boşluk oranının kubbe davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışma kapsamında ikisi referans olarak adlandırılan kasnaksız ve altı tanesi farklı yüksekliklerde kasnaklı toplam sekiz adet kubbe deney elemanı teste tabi tutulmuştur. Deneysel olarak test edilen kubbe elemanlarının LUSAS analiz programı kullanılarak numerik olarak analizi yapılmıştır. Deney sonuçları numerik sonuçlarla karşılaştırmalı olarak sunulmuş, sonuçlar hakkında yorumlar yapılmıştır. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlarının birbirleri ile örtüştüğü görülmüştür. Bunun üzerine, kubbelerde pencere boşluk oranı değişiminin kubbe davranışına etkisini incelemek amacıyla on iki adet kubbe modelleri üzerinde analiz yapılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Analiz ve deneysel çalışma sonucunda boşluk (pencere) ve kasnağın kubbe davranışı üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Genel olarak kasnak yüksekliğinin ve pencere boşluk oranının kubbe taşıma kapasitesini ve yatay deplasmanını önemli oranda etkilediği görülmüştür. Kasnak yüksekliği arttıkça kubbenin taşıma kapasitesi artmış, yapmış olduğu yatay deplasman ise azalmıştır. Bunun yanında kubbelerde pencere boşluk oranı arttıkça yük taşıma kapasitesinin azaldığı yatay deplasmanın ise arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yığma Kubbe, Kubbe Kasnağı, Kasnak Yüksekliği, LUSAS, Pencere Boşluk Oranı.

Aralık, 2020; 157 sayfa

PhD. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WINDOW OPENING AND PULLEY HEIGHT ON BEHAVIOR AND STRENGTH ON STONE DOMES

Şükran TANRIVERDİ

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

Supervisor: Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

ABSTRACT

In this thesis, the effects of dome pulley height and window opening ratio on the behavior of masonry domes are investigated. A total of eight experimental dome models are tested, two of them named reference are produced with no pulley and six of them with different heights of pulley. The dome elements tested experimentally are also analyzed numerically using the LUSAS analysis program. The experiment results are presented in comparison with the numerical results, and comments are made about the results. It is observed that the analysis results and the experimental results overlapped with each other. Whereupon, a numerical parametric study is carried out by analyzing on twelve dome models in order to examine the effect of window opening ratio on the dome behavior. As a result of the analyses made on modeled dome elements and experimental study, the effect of the window opening and height of pulley on the dome behavior are determined. It is observed that the height of the pulley and the ratio of window opening significantly affect the load bearing capacity and horizontal displacement of the dome. In general, as the pulley height increases, the load bearing capacity of the dome increased, and its horizontal displacement decreased, while as the ratio of window opening increases in the domes, the load carrying capacity decreases and the horizontal displacement increases.

Keywords: Masonry Dome, Dome Pulley, Pulley Height, LUSAS software, Window Opening Ratio.

December, 2020; 157 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İstanbul Fatih Cami.	14
Şekil 2.2. Üsküp Kurşunlu Han.	15
Şekil 2.3. Taşıyıcı sistem ve yük aktarımlarına göre kubbe çeşiti resimleri.....	18
Şekil 2.4. İstanbul Ayasofya Müzesinde pandantif örneği.	19
Şekil 2.5. İstanbul Mihrimah Sultan Camii tromp örneği.....	20
Şekil 2.6. Tire Tahtakale Hamamı Türk Üçgeni örneği (URL-7).....	20
Şekil 2.7. Kubbedeki kasnağın çekme kuvvetini azalttığını gösteren yük dağılım şekli.	21
Şekil 2.8. Tarihi yığma kubbe yapılar.....	23
Şekil 2.8 (devam). Tarihi yığma kubbe yapılar.....	24
Şekil 2.8 (devam). Tarihi yığma kubbe yapılar.....	25
Şekil 2.9. Yığma kubbelerde meydana gelen gerilme kuvvetlerinin dağılımı.....	25
Şekil 2.10. Kubbede oluşan düşey ve yatay kuvvetlerin gösterimi (Uçak, 2012).	26
Şekil 2.11. Kubbede oluşan kuvvetlerin diğer taşıyıcı elemanlara aktarımı.....	26
Şekil 3.1. Tüf taşın basınç dayanımı testi ve boyutları.	27
Şekil 3.2. Tüf taşın eğilmede çekme testi.	28
Şekil 3.3. Horasan harcının basınç dayanımı testi.	30
Şekil 3.4. Horasan harcın yarmada çekme dayanım testi.	31
Şekil 3.5. Yığma duvar numunelerinin örülmesi.	32
Şekil 3.6. Yığma duvar numunelerinin deney düzeneğine yerleştirilmiş hali.	33
Şekil 3.7. Yığma duvar numunelerinin gerilme şekil değiştirme grafiği.....	33
Şekil 4.1. Şemsiye mekanizmasının görünümü.	35
Şekil 4.2.a) Çelik levha tablanın kaynak yardımı ile birleştirilmesi, b) Çelik levha tablasının boyanması.	36
Şekil 4.3. Kubbe deney elemanları örümü için çelik kalıbın yapılması.	37
Şekil 4.4. Kubbe deney elemanları örümü için a) beton blokların üretimi ve b) beton blokların çelik levha tablası üzerine yerleştirilmesi.....	38
Şekil 4.5. Yapılan deney elemanlarının çizimi.	39
Şekil 4.6. Şemsiye mekanizmasına LVDT'lerin yerleştirilmesi.....	40
Şekil 4.7. Veri toplama cihazına LVDT'lerin ve S tipi yük hücrelerinin bağlanması.	41
Şekil 4.8. a) Model-Ref deney elemanının genel geometrisi, b) Model-Ref deney elemanına LVDT ve yük hücrelerinin bağlanması.	42
Şekil 4.9. Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali.....	43
Şekil 4.9 (devam). Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali.....	44
Şekil 4.9 (devam). Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali.....	45
Şekil 4.10. Model-Ref deney elemanına ait yük- deplasman grafiği.....	46
Şekil 4.10 (devam). Model-Ref deney elemanına ait yük- deplasman grafiği.....	47
Şekil 4.10 (devam). Model-Ref deney elemanına ait yük- deplasman grafiği.....	48
Şekil 4.11. a) Model-100 deney elemanının deney öncesi hali ve b) LVDT'lerin Model-100 deney elemanına yerleştirilmesi.	49
Şekil 4.12. Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali.	50
Şekil 4.12 (devam). Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali.	51
Şekil 4.12 (devam). Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali.	52
Şekil 4.13. Model-100'e ait yük- deplasman grafiği.	53
Şekil 4.13 (devam). Model-100'e ait yük- deplasman grafiği.	54
Şekil 4.13 (devam). Model-100'e ait yük- deplasman grafiği.	55

Şekil 4.14. a) Model-200 deney elemanına LVDT'lerin yerleştirilmesi, b) Model-200 deney düzeneğinin hazırlanması.	56
Şekil 4.15. Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali.	57
Şekil 4.15 (devam). Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali.	58
Şekil 4.15 (devam). Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali.	59
Şekil 4.16. Model-200'e ait yük- deplasman grafiği.	59
Şekil 4.16 (devam). Model-200'e ait yük- deplasman grafiği.	60
Şekil 4.16 (devam). Model-200'e ait yük- deplasman grafiği.	61
Şekil 4.17. a) Model-300 deney elemanının görünümü, b) Model-300 deney elemanına LVDT'lerin ve yük hücrelerinin yerleştirilmesi.	62
Şekil 4.18. Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.	63
Şekil 4.18 (devam). Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.	64
Şekil 4.18 (devam). Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.	65
Şekil 4.18 (devam). Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.	66
Şekil 4.19. Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.	66
Şekil 4.19 (devam). Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.	67
Şekil 4.19 (devam). Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.	68
Şekil 4.19 (devam). Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.	69
Şekil 4.20. Model-400 Deney elemanının deney öncesi hali.	69
Şekil 4.21. Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.	70
Şekil 4.21 (devam). Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.	71
Şekil 4.21 (devam). Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.	72
Şekil 4.21 (devam). Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.	73
Şekil 4.22. Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.	73
Şekil 4.22 (devam). Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.	74
Şekil 4.22 (devam). Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.	75
Şekil 4.22 (devam). Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.	76
Şekil 4.23. Model-Ref/2,5 (a) deney elemanının örümü ve (b) deney öncesi hali. ...	76
Şekil 4.23 (devam). Model-Ref/2,5 (a) deney elemanının örümü ve (b) deney öncesi hali.	77
Şekil 4.24. Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	77
Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	78
Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	79
Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	80
Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	81
Şekil 4.25. Model-Ref/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	82
Şekil 4.25 (devam). Model-Ref/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	83
Şekil 4.25 (devam). Model-Ref/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	84
Şekil 4.26. Model-300/2,5 deney elemanının hazırlanması deney öncesi görünümü.	85
Şekil 4.27. Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	86
Şekil 4.27 (devam). Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	87
Şekil 4.27 (devam). Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.	88
Şekil 4.28. Model-300/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	89
Şekil 4.28 (devam). Model-300/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	90
Şekil 4.28 (devam). Model-300/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	91
Şekil 4.29. Model-400/2,5 deney elemanının deney öncesi görünümü.	92
Şekil 4.30. Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.	92
Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.	93
Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.	94

Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.....	95
Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.....	96
Şekil 4.31. Model-400/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	97
Şekil 4.31 (devam). Model-400/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	98
Şekil 4.31 (devam). Model-400/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.	99
Şekil 4.32. Yük- birim şekil değiştirme grafiği.	100
Şekil 4.32 (devam). Yük- birim şekil değiştirme grafiği.	101
Şekil 4.32 (devam). Yük- birim şekil değiştirme grafiği.	102
Şekil 4.33. Yük- çevre uzunluğu değişim grafiği.	103
Şekil 4.34. Maksimum yük altında (a) Model-Ref,(b) Model-100,(c) Model-200, d)Model- 300 ve (e)Model-400 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.....	104
Şekil 4.34 (devam). Maksimum yük altında (a)Model-Ref, (b)Model-100, (c)Model- 200, (d)Model-300 ve (e)Model-400 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.....	105
Şekil 4.34 (devam). Maksimum yük altında (a)Model-Ref, (b)Model-100, (c)Model- 200, (d)Model-300 ve (e)Model-400 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.....	106
Şekil 4.35. Yük-birim şekil değiştirme grafiği.	108
Şekil 4.35 (devam). Yük-birim şekil değiştirme grafiği.	109
Şekil 4.36. Yük-çevre uzunluğu değişim grafiği.	110
Şekil 4.37. Maksimum yük altında (a)Model-Ref/2,5, (b)Model-300/2,5, ve c)Model- 400/2,5 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.....	111
Şekil 4.37 (devam). Maksimum yük altında (a)Model-Ref/2,5, (b)Model-300/2,5, ve (c)Model-400/2,5 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.....	112
Şekil 4.38. Deney elemanlarının deney sonrası halleri.....	114
Şekil 4.39. Toplam yük- deplasman grafiği.....	115
Şekil 4.39 (devam). Toplam yük- deplasman grafiği.....	116
Şekil 4.39 (devam). Toplam yük- deplasman grafiği.....	117
Şekil 4.39 (devam). Toplam yük- deplasman grafiği.....	118
Şekil 4.40. Deney elemanlarının (a) yük-çevre uzunluğu değişim ve (b) yük-birim şekil değiştirme grafikleri.	121
Şekil 5.1. Yığma duvarlardaki modelleme teknikleri a) Detaylı mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, c) Makro modelleme.....	125
Şekil 5.2. Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).	126
Şekil 5.3. Kubbe numunelerinin analizinde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayısı.....	127
Şekil 5.4. Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.....	128
Şekil 5.4 (devam). Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.....	129
Şekil 5.4 (devam). Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.....	130
Şekil 5.4 (devam). Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.....	131
Şekil 6.1. Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük- deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.	133
Şekil 6.1. (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük- deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.	134

Şekil 6.1. (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.....	135
Şekil 6.1. (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.....	136
Şekil 6.1. (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.....	137
Şekil 6.2. Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin eleman ve düğüm noktası sayıları.....	138
Şekil 6.2 (devam). Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin eleman ve düğüm noktası sayıları.....	139
Şekil 6.3. Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.....	140
Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.....	141
Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.....	142
Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.....	143
Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10, % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.....	144
Şekil 6.4. Kubbe modellerin analiz sonrası yük- deplasman grafiği.....	146

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Osmanlı döneminde yapılan kubbeli bazı tarihi yapıların geometrik boyutları	4
Çizelge 3.1. Tüf taşın basınç dayanımı test sonuçları.....	28
Çizelge 3.2. Tüf taşının eğilmede çekme dayanımı test sonuçları.....	29
Çizelge 3.3. Tüf taşın fiziksel test sonuçları (Kaygısız, 2010).....	29
Çizelge 3.4. Horasan harcının basınç dayanımı test sonuçları.....	30
Çizelge 3.5. Horasan harcın yarmada çekme dayanımı test sonuçları.....	31
Çizelge 3.6. Yığma duvar numunelerinin basınç dayanımları.....	32
Çizelge 4.1. Şemsiye mekanizmasına LVDT'lerin bağlanması.	40
Çizelge 4.2. Boşluksuz kubbe deney elemanları deney sonuçları.	106
Çizelge 4.3. % 2,5 Boşluklu kubbe deney elemanları deney sonuçları.	112
Çizelge 4.4. Deney elemanları deney sonuçları.....	122
Çizelge 5.1. Kubbe modellerin malzeme özellikleri.....	128
Çizelge 6.1. Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	132
Çizelge 6.2. Kubbe modellerin analiz sonuçları.	145

SİMGELER VE KISALTMALAR

CFFT	Concrete Filled FRP Tubes
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
HHBD	Horasan Harcının Basınç Dayanımı
HHYD	Horasan Harcının Yarmada Çekme Dayanımı
LUSAS	London University Structural Analysis System
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PRO-FRCM	Fabric Reinforced Cementitious Matrix
TTBD	Tüf Taşının Basınç Dayanımı
TTED	Tüf Taşının Eğilmede Çekme Dayanımı
YDBD	Yığma Duvarın Basınç Dayanımı
A	Uygulanan Alan
b	Tüf Taşının Genişliği
c	Kohezyon
d	Tüf Taşının Yüksekliği
E	Elastisite Modülü
f	Basınç Dayanımı
F_{mak}	Uygulanan Maksimum Yük
h_c	Silindir Numunenin Yüksekliği
l_c	Silindir Numunenin Uzunluğu
L	Tüf Taşının Uzunluğu
r	Kubbe Yarıçapı
R_{tf}	Taşın Eğilmede Çekme Dayanımı
V_{mak}	Maksimum Yük
σ	Gerilme
ε	Birim Şekil Değişirme
Θ	İçsel Sürtünme Açısı
I₁	Gerilme Tansörünün Birinci İnveryantı
J₂	Deviatorik Gerilme Tansörünün İkinci İnveryantı

1. GİRİŞ

Tarihi yapılar yapıldıkları dönemin tarihini, ekonomik ve sosyal özelliklerini günümüze taşıyan eserler olup, yapım şekli, işçiliği ve kullanılan malzemeler açısından buldukları dönemin özelliklerini yansıtmaları bakımından önemlidirler. Kendilerine özgü kimliklerinin korunması ve gelecek nesillere güvenli bir şekilde aktarılması gereken kültürel miras değerlerinin başında gelmektedirler. Bu yapıların geleceğe aktarılabilmesi için var olan özelliklerinin korunması, onarım ve güçlendirme çalışmalarının tarihi yapı özgünlüğünü bozmadan yapılması toplumun sorumlulukları arasında yer almaktadır. Ayrıca yeni yapılacak genellikle kültürel değerleri ön planda tutan yığma yapıların mühendislik hizmeti olarak geçmişte yapılan hatalar yapılmadan inşa edilmesi veya restore edilemeyen tarihi binaların aslına uygun yeniden inşa edilmesi üzerinde durulması gereken önemli bir mühendislik konusudur.

Tarihi yapılarda geniş açıklıkları geçmek için eğrisel örtü sistemi olarak kubbeler yapılmıştır. Bu kubbeler genellikle tuğla ya da taş gibi malzemelerle yığma olarak inşa edilmiştir. Geçmişten günümüze kadar toplumun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla birçok farklı kubbe ve kasnak modeli yapılmıştır. Bu çalışmada Osmanlı döneminde en yaygın olarak inşa edilen sekizgen kasnaklı yığma kubbeler dikkate alınarak kasnak yüksekliğinin ve boşluk (pencere) oranının kubbe davranışına etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Çalışma 7 (yedi) bölümden oluşmuştur. Birinci bölümde tarihi yapıların önemi anlatıldıktan sonra çalışmanın amacı ve kapsamı, tarihi yapıların güçlendirilmesi ve davranışlarıyla ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

İkinci bölümde kubbeler, kubbe geçiş elemanları ve geçiş elemanlarının kubbenin yük dağılımına etkileri hakkında genel bilgi verilmiştir. Ayrıca kubbe yapılarda kasnağın kubbe davranışına etkisi ve kubbelerde kuvvet ve yük dağılımlarının diğer taşıyıcı elemanlara aktarımının nasıl olduğu anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde ise deney öncesi malzeme özelliklerini belirlemek için yapılan malzeme deneyleri sunulmuştur. Bu bölümde tuf taşı için basınç ve eğilmede çekme dayanımı testleri, horasan harcı için basınç dayanımı ve yarmada çekme testi, ayrıca analizde kullanılacak modellerin elastisite modülünü belirlemek amacıyla, yığma duvar numunelerinin basınç dayanım testleri yapılmıştır.

Dördüncü bölümde sekiz adet üretilen kubbe deney elemanları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada boşluksuz ve yüzeysel olarak açılan % 2,5 boşluklu deney elemanları ele alınmıştır. İlk başta, boşluklu ve boşluksuz olarak birer adet kasnaksız referans numune olarak adlandırılan deney elemanları yapılmıştır. Daha sonra sırasıyla kasnak yüksekliği 100 mm, 200 mm, 300 mm ve 400 mm boşluksuz deney elemanları ile kasnak yüksekliği 300 mm ve 400 mm boşluklu deney elemanları üretilmiştir. Tarihi yapılarda kubbelerdeki pencere boşlukları kasnak yüksekliği ile orantılı şekilde yapılarak kasnak içerisinde kaldığı için 100 mm ve 200 mm kasnak yüksekliğine sahip deney elemanları yapılmamıştır. Bu bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler birbirleri ile karşılaştırılarak tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Beşinci bölümde, deneysel olarak daha önce incelenen kubbe deney elemanlarının numerik analizleri yapılmıştır. Analizde kullanılan LUSAS analiz programı ile ilgili genel bilgiler verilip, kubbe modellerinin analizler sonucunda maksimum yük altında yatay yönde meydana gelen deplasman değerleri ve görüntüleri verilmiştir.

Altıncı bölümde analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu bölümde deney sonuçları ile analiz sonuçları örtüştüğünden boşluk oranlarının kubbe üzerindeki davranışlarını incelemek amacıyla ilave olarak farklı boşluk oranına sahip (% 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5) kubbe modellerin sadece analizi yapılarak parametrik (değişken olarak kasnak yüksekliği ve boşluk miktarı dikkate alınan) bir çalışma yapılmıştır. Her bir boşluk oranı için birer adet kasnaksız, birer adet de kasnak yüksekliği 300 mm ve 400 mm olan toplamda 12 (on iki) adet değişik kubbe modelleri üzerinde analizler yapılmıştır.

Yedinci bölümde deney ve sayısal analiz sonucunda elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanarak yorumlar yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda çeşitli öneriler sunulmuştur.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yığma yapı; çekme dayanımı düşük, daha çok basınca çalışan taş, tuğla, briket, kerpiç gibi malzemelerin harç yardımı ile birleştirilerek elde edilen kemer, tonoz, kubbe, sütun, duvar gibi taşıyıcı elemanlarının hepsi veya birkaçının birleşimi olan yapıya denir. Tarihi yığma yapılarda genellikle duvarlar, sütunlar, kemerler, tonozlar ve kubbeler gibi yapı elemanları bulunmaktadır. Bu çalışma yığma kubbeler dikkate alınarak kasnak yüksekliğinin ve kubbe üzerindeki pencere gibi boşluk miktarlarının kubbe davranışına olan etkileri araştırılmıştır. Yığma kubbelerde kubbenin yüksekliğinin % 40'lık üst kısmında basınç gerilmesi oluşurken, % 60'lık alt kısmında ise çekme gerilmesi oluşmaktadır. Taş, tuğla gibi basınca çalışan kâgir malzemelerle üretilen yığma kubbelerin çekme dayanımları çok düşüktür. Bu sebeple etek kısmında oluşabilecek açılmaları önlemek ve yanal hareketi engellemek amacıyla kubbeler kasnaklı yapılabilmektedir.

Zemin koşullarının yetersiz oluşu, savaşlar, yapı malzemelerinin zaman içerisinde bozulması sonucu dayanımını kaybetmesi, projelendirme ve uygulamadaki hatalar, şiddetli deprem ve rüzgâr etkileri gibi sebepler tarihi yapılarda bir takım hasarlara neden olmaktadır. Tarihi yapıların gelecekte de ayakta kalabilmesi ve dolayısıyla korunması için kubbe formlarının yapısal davranışının bilinmesi gerekmektedir. Kültürel miraslarımız arasında bulunan hasarlı kubbeli yapıların onarılması ve güçlendirilmesi hiç kuşkusuz tarihi değerlerimiz açısından sorumluluklarımız arasında önceliklidir. Sabit, hareketli, deprem ve rüzgâr yüklerine karşı yapı taşıyıcı sistemlerinin onarılması ve güçlendirilmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Ayrıca kubbe geometrik özellikleri gibi birtakım parametrelerin kubbe davranışına etkisi de araştırılmıştır. Fakat kasnak yüksekliğinin ve kubbe üzerindeki pencere gibi boşluk oranlarının kubbe davranışına etkisi ilgili yapılmış analitik veya deneysel çalışma bulunmamaktadır. Tez kapsamında, Osmanlı döneminde yapılan sekizgen kubbe kasnak yükseklikleri, pencere miktarları (boşluk oranları) ve malzeme özellikleri dikkate alınmıştır.

Çalışmaya başlamadan önce, Osmanlı döneminde yapılmış Çizelge 1.1’de geometrik özellikleri verilen 35 adet cami ve imaretin kubbelerinin boyutları, kasnak şekli, kasnak boyutları incelenmiştir. İncelenen 35 adet tarihi yapılardan 34 tanesinin kubbe kasnak şekli sekizgen olup 1 tanesinin kasnak şekli yuvarlaktır.

Çizelge 1.1. Osmanlı döneminde yapılan kubbeli bazı tarihi yapıların geometrik boyutları.

Cami Adı	Yapılış Tarihi	Kubbe Genişliği	Kubbe Kasnağı	Kubbe Kasnak Genişliği			Kubbe Kasnak Yüksekliği
				x	y	köşe mesafesi	
Manisa Ali Bey İmaret	1427	5,75	Sekizgen	0,25	0,5	1,5	0,5
Edirne Gazi Mihal İmaret	1422	7,5	Sekizgen	0,25	0,25	0,5	0,5
Edirne muradiye İmaret	1436	8	Sekizgen	0,5	0,5	2	1
Bursa Muradiye İmaret	1426	9,7	Sekizgen	0,29	0,29	0,57	0,63
Edirne Beyler Beyi İmaret	1429	6,6	Sekizgen	0,2	0,2	1,4	0,42
Havza Mustafa Bey Cami	1430	5,17	Sekizgen	0,17	0,33	1,17	0,33
Osmançık Koca Mehmet Paşa İmaret	1430	5,3	Sekizgen	0,17	0,17	0,33	0,34
Ankara Karaca Bey İmaret	1427	3,8	Sekizgen	0,22	0,44	1,11	0,66
Tire Yahşi Bey İmaret	1442	7,6	Sekizgen	0,4	0,4	0,6	0,8
Kütahya Yakup Çelebi İmaret	1412	10,75	Yuvarlak	0,13	0,63	2,5	
Kastamanu İsmail Bey İmaret	1451	7,55	Sekizgen	0,22	0,22	0,67	0,45
Bursa Hamza Bey İmaret	1440	4,7	Sekizgen	0,23	0,23	0,31	0,47
İstanbul Mahmut Paşa İmaret	1463	8	Sekizgen	0,4	0,4	2,8	0,8
İstanbul Rum Mehmet Paşa Cami	1472	8,83	Sekizgen	0,25	0,25	1,83	0,5
Afyon Gedik Ahmet Paşa İmaret	1472	11,67	Sekizgen	0,5	0,67	2,83	1
İnegöl İshak Paşa İmaret	1476	8	Sekizgen	0,2	0,2	2	0,5
İstanbul Davut Paşa Cami	1485	19,71	Sekizgen	0,29	0,29	0,86	0,6
Tokat Hatuniye İmaret	1485	10,67	Sekizgen	0,27	0,27	2,67	0,55
Edirne 2. Beyazd İmaret	1506	8,6	Sekizgen	0,3	0,3	1,8	0,6
Manisa Hatuniye Cami	1491	10	Sekizgen	0,2	0,2	2,4	0,44
Kurşunlu Yıldırım İmaret	1544	12,66	Sekizgen	0,29	0,43	2,71	0,6
Hüseyin Bey İmaret	1499	10,6	Sekizgen	0,2	0,2	0,7	0,43
İstanbul 2. Beyazd İmaret	1506	13	Sekizgen	0,5	0,5	2,75	1
Trabzon Gülbahar Hatun İmaret	1506	10,8	Sekizgen	0,3	0,3	2,6	0,6
Amasya Hatuniye Cami	1510	4,3	Sekizgen	0,15	0,15	1	0,3
Diyarbakır Fatih Paşa Cami	1520	9,15	Sekizgen	0,29	0,29	2,14	0,6
İstanbul Sultan Selim Cami	1522	15,33	Sekizgen	0,67	0,67	4	1,38
İstanbul Piri Mehmet Paşa Cami	1530	8,16	Sekizgen	0,33	0,33	0,58	0,66
Yenişehir Postınpuş Baba Zaviyesi	1362	8,8	Sekizgen	0,4	0,4	0,8	0,8
İstanbul Rüstem Paşa Cami	1561	10,29	Sekizgen	0,29	0,29	0,57	0,58
Piyale Paşa Cami	1573	8,86	Sekizgen	0,67	0,67	1	1,1
Mihrimah Camisi	1548	11	Sekizgen	1	1	1,6	2
İstanbul Haseki Cami	1551	11	Sekizgen	0,5	0,5	0,75	1
Süleymaniye Cami	1556	25,53	Sekizgen	0,53	0,53	1,32	1,18
Sultan Ahmet Cami	1617	22,7	Sekizgen	0,54	0,54	1,35	1,19

Bu çalışmada kubbeler boşluklu (pencereli) ve boşluksuz olarak iki farklı şekilde ele alınmıştır. Deneysel çalışma için boşluksuz olarak üretilen kubbe deney elemanlarında hiç bir kasnak uygulaması yapılmadan referans numune olarak adlandırılan bir adet kasnaksız, 4 tanesi farklı kasnak yüksekliğine sahip (100 mm, 200 mm, 300 mm ve 400 mm) sekizgen şeklinde kasnak uygulaması yapılarak toplamda 5 adet kubbe deney elemanı üretilmiştir.

Daha önce üretilen boşluksuz 5 adet deney elemanına ilave 3 adet % 2,5 boşluklu deney elemanı üretilerek toplam 8 adet kubbe deney modeli oluşturulmuştur. Boşluklu kubbelerde boşluklar pencere şeklinde kubbenin karşılıklı dört tarafından açılmıştır. Boşluklu kubbe deney elemanlarından bir tanesi kasnaksız olarak üretilmiştir. Bu deney elemanı boşluklu referans numune olarak ele alınmıştır. İki tane deney elemanı da farklı yükseklikte (300 mm ve 400 mm) kasnaklı olarak yapılmıştır. Boşluklu kubbe deney elemanlarında boşluklar kasnak içerisinde kalacağından kasnak yüksekliği 100 mm ve 200 mm olan deney elemanları yapılmamıştır.

Boşluklu ve boşluksuz toplamda sekiz adet kubbe deney elemanı üzerinde kasnak yüksekliğinin kubbe davranışı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile deneyi gerçekleştirilen modellerin analizi yapıp deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve analitik sonuçların örtüşmesi sonucunda, deneysel olarak çalışılan %2,5 boşluk oranına ilave olarak % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 boşluklu kubbe modelleri üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Yapılan parametrik çalışma sonucunda boşluk oranlarının da kubbenin davranışına etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, boşluklu kubbe yapılar ile boşluksuz kubbe yapılar kasnak yükseklikleri açısından hem kendi içerisinde hem de birbirleri ile karşılaştırılarak her iki uygulamada da kasnak boyutlarının ve boşluk oranlarının kubbenin davranışına etkisi hakkında veriler elde edilmiştir. Bu konu ile ilgili literatür de hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma ile literatürde bu konudaki eksiklerin giderilmesi ve uygulamaya yönelik çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Özeti

Literatürde genellikle tarihi yığma yapıların davranışları, restorasyon çalışmaları ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen, tez kapsamında ele alınan tarihi yapılardaki kubbe modellerde, kasnak yüksekliklerinin ve kubbelerde bulunan boşlukların (pencerelerin) kubbenin davranışına olan etkisi hakkında yapılmış hiçbir çalışma mevcut değildir.

1.2.1 Tarihi yapıların güçlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar

Benedetti vd. (1998) 24 adet kâgir (yığma) yapı elemanları üzerinde toplamda 119 tane sarsma tablası deneyi yapmıştır. Deney sonucunda hasara uğrayan yığma yapılar çeşitli harçlarla ve çelik çubuklarla farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Güçlendirilen deney elemanları sarsma tablasına yerleştirilip, deney işlemi tekrar yapılmıştır. Deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırılarak, elde edilen veriler sonucunda uygulanabilecek güçlendirme teknikleri ortaya konulup güçlendirmenin önemi vurgulanmıştır.

Foraboschi (2004) yaptığı çalışmada kemer ve tonoz yapı elemanlarının iç ve dış kısımlarını FRP (Fiber Reinforced Polymer) ile güçlendirmiş, mafsal mekanizmasını göçme modu oluşturmayacak şekilde tasarlamış ve yapının davranışını incelemiştir. Kayma, ezilme, sıyrılma ve FRP kopması gibi davranış biçimleri için matematiksel modeller sunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen matematiksel modeller sayesinde göçme modlarının her biri için maksimum yük taşıma kapasiteleri bulunmuştur.

Mahrebel (2006) çalışmasında tarihi yığma yapı türlerini, bu yapıların inşasında kullanılan malzeme ve özelliklerini, bu yapıların taşıyıcı özelliklerini ve tarihi yapılarda meydana gelen hasar türlerini, bu hasarların onarım ve güçlendirme yöntemleri ile nasıl düzeltilebileceğini araştırmıştır.

Aydın vd. (2007) deprem bölgelerindeki tarihi yapılarda güçlendirme üzerinde durmuş, tarihi yapıların güçlendirilmesinde kullanılan FRP'nin (fiber reinforced polymer) tarihi yapılar açısından uygunluğu, olumlu ve olumsuz yönleri, koruma disiplini ve uluslararası koruma tüzükleri çerçevesinde önerilerde bulunmuşlardır.

Cancelliere, vd. (2010) bu çalışmada güçlendirilmemiş kemer numunesi ile FRP şeritler ile kemerin dış ve iç yüzeyinden güçlendirilmiş kemer numunelerinin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırarak incelemiştir. Kompozit şeridin uygulanmasıyla güçlendirilmiş kemerlerin çökme mekanizması önemli derecede değişmiştir.

Milani ve Bucchi (2010) çalışmalarında kinematik sonlu elemanlar modelini kullanarak, şeritler halinde FRP malzemesi ile güçlendirilmiş kemer, kubbe gibi yapıların göçme yükünü ve göçme mekanizmalarını belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda, modelin göçme mekanizması ve göçme yükü güvenli bölge içerisinde yer aldığından bu modelin çalışmalarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Oliveira vd. (2010)'nin çalışmalarında iki adet güçlendirilmemiş hasar görmüş numune ve GFRP (glass fiber reinforced polymer) ile güçlendirilmiş on adet yığma kemerli yapıların deneysel davranışları incelenmiştir. Kemer numunelerine kemer genişliğinin $\frac{1}{4}$ 'ü oranında düşey olarak yük uygulanarak test edilmiştir. Deney sonucunda kemerin iç yüzeyine uygulanan GFRP malzemesi ile güçlendirilen numunelerin dayanımlarının diğerlerine oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiş ve bu çalışmada elde edilen verilere dayanarak ilgili standart ve yönetmeliklerin geliştirilmesi, ileri sayısal modellerin ve analitik çözümlerin doğrulanması için önemli faydalar sağlayacağı belirtilmiştir.

Garmendia vd. (2011) taş kemerlerin onarım ve güçlendirilmesinde BTRM bazalt tekstil malzemesi kullanmışlardır. Deneyler sonucunda taş yapı ile bu malzemenin kimyasal ve fiziksel olarak uygunluk sağladığı BTRM malzemesinin yapının sünekliğini ve yük taşıma kapasitesini olumlu yönde arttırdığı gözlenmiştir.

Tao vd. (2011) çalışmalarında iki açıklıklı dairesel kemer köprülerin iç yüzeyinin FRP ile güçlendirilmesi sonucu köprülerin davranışını incelemişlerdir. Deney sonucunda FRP malzemesinin kemerin taşıma kapasitesini arttırmada etkili bir güçlendirme metodu olduğunu belirtmişlerdir.

Dagher vd. (2012)'nin çalışmalarında FRP ile sarılmış kemer şeklindeki beton yapı elemanına (CFFT- concrete filled FRP tubes-) düşey doğrultuda yük uygulanmıştır. Dört adet kemer üzerinde yapılan bu çalışma ile kemerin deformasyon ilişkisi-eğilme kuvveti ve moment eğrilik ilişkisi incelenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışma sonucunda kemerlerin eğilme tepkisi değerlendirilmiş ve test sonuçları sayısal modelleme ile karşılaştırılarak FRP'nin uygulamada kullanılabileceği belirlenmiştir.

Gonen vd. (2013) Elazığ'ın Palu ilçesinde bulunan Palu köprüsü yığma yapı olarak inşaa edilmesine rağmen zamanla içerisinde ahşap, beton ve çelik yapı olarak üç kez yeniden yapılmıştır. Bu çalışmada köprünün zaman içerisindeki hasarları Sap 2000

programını kullanarak incelemiştir. Analiz sonucunda köprünün yapısı bozulmadan yeniden güçlendirme projesi hazırlanmış ve köprü taşları çelik çubuklar ve özel harçlarla birbirlerine bağlanarak restorasyon yapılmıştır.

Tugrueleci (2014) yaptığı tez çalışmasında farklı tipteki gergilerin kemerler üzerindeki davranışını deneysel olarak incelemiş ve deney sonuçlarını sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırarak tarihi yapıların restorasyon ve güçlendirilmesi çalışmalarında kullanılacak değişik tipteki gergi çubuklarının davranışları hakkında bilgi vermiştir.

Çakır vd. (2015)'nin çalışmalarında dört adet yarı dairesel yığma kemer birimleri, önceden reçine yedirilmiş kompozit (prepreg) malzeme ile farklı şekillerde güçlendirme yapılmış ve sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. İlkinde kompozit malzeme kemer iç yüzeyine, ikincisinde kemer dış yüzeyine, üçüncüsünde kemerin hem iç hem de dış yüzeyine son olarak kemerin analiz sonucunda elde edilen kritik bölgelere uygulanmıştır. Aynı noktada kemerlere en az beş kez titreşim verilerek çalışma sonucunda bu kompozit malzemenin kemerin frekanslarını ve sönüm oranlarını arttırdığı gözlenmiştir. En fazla artış kompozit malzemenin kemerin iç ve dış yüzeyine uygulandığında gözlemlenirken, en az artış ise kemerin analiz sonucunda elde edilen kritik bölgelere uygulananda görülmüştür.

Chmielewski vd. (2015) çalışmalarında 1772 yılında Polonya'da yapılan Anna Wilanow Kilisesi'nin kubbesinde oluşan çatlakların onarılmasında kullanılan teknikler anlatılmıştır. Öncelikle kubbenin statik ve mukavemet hesabı, kullanılan malzeme özellikleri dikkate alınarak, karbon bant SİKA ve spinal çelik çubuk HELIFIX kullanılarak güçlendirme işlemi tamamlanmıştır.

Fırat vd. (2015)'nin çalışmalarında biri referans olmak üzere altı adet hasar verilmiş kemer numunelerine uygulanan değişik FRP ile güçlendirme teknikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonucunda FRP ile güçlendirilen kemer numunelerinin referans numunesine göre dayanımının %58,5 oranında arttığı gözlenmiştir.

Alecci vd. (2016)'nin çalışmalarında iki tane güçlendirilmemiş, iki tanesi kemer iç yüzeyinden, iki tanesi kemer dış yüzeyinden olmak üzere toplamda 4 adet PBO-FRCM (fabric reinforced cementitious matrix) ile güçlendirilmiş ve 2 tanesi kemer iç yüzeyinden 2 tanesi kemer dış yüzeyinden olmak üzere 4 adet de FRP ile

güçlendirilmiş 10 tane kemer numunesi deneysel çalışma sonucunda birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda her iki malzeme içinde, kemer iç yüzeyine uygulanan kompozitlerle yapılmış numunelerde maksimum yük kemer dış yüzeyine uygulanana oranla daha fazladır. CFRP kompozitinin maksimum yük açısından katkısının PBO-FRCM kompozit tarafından sağlananlardan çok daha yüksek olduğu vurgulanmıştır. PBO-FRCM malzemesi ile yapılan kemer numuneleri, FRP ile yapılan kemer numunelerine göre daha sünek davranış sergilemiştir. PBO-FRCM ile güçlendirilen kemerin özellikle kinematik sünekliği, kemerin dış yüzey uygulaması için güçlendirilmemiş kemer için olan değerinin yaklaşık 13 katına, kemer iç yüzey uygulaması durumunda güçlendirilmemiş kemer numunesinin 2 katına karşı gelmiştir.

Otoni vd. (2016)'nin çalışmasında, 16. yüzyılda İtalya'da inşa edilmiş sekizgen kubbenin yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Kubbenin eteklerinde açılmaları önlemek amacıyla en eski geleneksel güçlendirme tekniği olan metal gergi çubuğu kullanılarak sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Sonuç olarak, kullanılan gergi çubuğunun kubbenin korunmasını sağlamak için en etkili yol olduğu ileri sürülmüştür.

Ural vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada biri gergisiz referans numune olmak üzere beş tanesi farklı tasarımdaki gergi çubuklarıyla yapılan kemer numunelerinin düşey yük uygulamasındaki davranışları deneysel olarak incelenmiş ve sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak kemer numunelerinde kullanılan gergi çubuğunun önemi vurgulanmıştır. Bu çalışmanın tarihi yapılarda kullanılan restorasyon ve güçlendirme uygulamalarında iyi bir referans olacağı vurgulanmıştır.

Alecci vd. (2017) yaptıkları çalışmada, 2 tane güçlendirilmemiş, 2 tanesi PBO-FRCM kompoziti ile, 2 tanesi C-FRCM malzemesi ile güçlendirilmiş 8 tane kemer numunesi hem deneysel olarak hem de sayısal analiz yöntemiyle incelenip çeşitli sonuçlara varılmıştır. FRCM kompozitleri, geri dönüşüm prensibi ile uyumlu, yüksek sıcaklıklara karşı iyi dirençli, nemli yüzeylere uygulanabilir, iyi bir buhar geçirgenliğe sahip ve duvar örgüsü ile yüksek bir fiziksel- kimyasal uyumluluk gösterir.

PBO-FRCM, C-FRCM ve CFRP malzemeleriyle güçlendirilen kemerlerin göçme anındaki yükü güçlendirilmemiş kemerlerin göçme anındaki yüküne göre sırası ile 5.4, 7.1 ve 15.1 kat daha yüksek olduğuna ve PBO-FRCM ile güçlendirilen kemerlerin diğerlerine göre daha sünek davranış sergilediği kanısına varılmıştır.

Çelik (2020) doktora çalışmasında, tarihi yapılar olan yığma kubbelerin güçlendirilmesi ele alınmıştır. Biri referans 8 tanesi farklı şekilde güçlendirme teknikleri kullanılarak kubbeli yapıların deneysel ve sayısal modellemesi yapılmıştır. 2 m çapında ve 1 m yüksekliğinde yığma kubbe üzerinde ilk olarak hiçbir güçlendirme tekniği uygulanmamıştır. Bu model referans deney elemanı olarak ele alınmıştır. 3 adet çelik uygulama ile 3 adet FRP ile güçlendirme yapılmıştır. 1 tane kenet uygulama ve 1 tane de tamir harcı ile güçlendirme tekniği kullanıp kendi ağırlığı altında deneye tabii tutulmuştur. Bu deney elemanlarının sayısal modellemesi de yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda kenet uygulamasının en az yük taşıdığı, referans numunenin ve tamir harcının benzer davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir. Kubbe üzerine hem kasnağa hem de etek kısmına yapılan çelik uygulamanın en iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.

Preciado vd. (2020) yapmış oldukları çalışmada 19 Eylül 2017 tarihinde meydana gelen deprem sonucunda Puebla, Morelos ve Mexico City eyaletlerindeki tarihi yapılarda oluşan hasarları tespit etmişlerdir. Bu yapıları onarmak için bir takım öneriler sunmuşlardır. FRP, GFRP, CFRP gibi malzemeler kullanılarak yapıların mimari özelliklerini de bozmadan güçlendirme yöntemlerinin uygulanabileceği belirtilmiştir.

1.2.2 Tarihi yapıların davranışlarının incelendiği çalışmalar

Mal'tsev vd. (1984) çalışmalarında 8 mm kalınlığında ve 2 m çapında küre şeklindeki çelik kabuk yapı üzerine patlatma yükü uygulanmıştır. Bu patlatma yükünden dolayı, yapı üzerinde kabuk gerilmeleri oluşmuştur. Deneysel olarak elde edilen veriler ile analitik olarak elde edilen veriler birbirleri ile karşılaştırılmış ve aralarındaki farklar ifade edilmiştir.

Ogihara (1985)'nin çalışmasında küre şeklindeki silikon kauçuktan yapılmış kabuk yapı üzerinde titreşim testleri yapılarak yapının rijitlik değerlendirilmesi yapılmıştır. Tek eksenli sarsma tablası kullanılarak kabuk yapı harmonik bir yük ile uyarılmıştır.

Deney esnasında LVDT'ler (Linear Variable Differential Transformer) kullanılarak yapı üzerinde meydana gelen deplasmanlar ölçülmüştür. Sonlu elemanlar yönteminin öz değer analizi ile mod şekilleri ve periyotları hesaplanmıştır.

Sönmezer (2002) çalışmasında, İstanbul'daki Mimar Sinan Camilerini ele alarak, mekân ile düşey taşıyıcılar arasında boyut ilişkisi incelenmiştir. Yapılar arasında oran-strüktür ilişkisi tespit edilip karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Altı ve sekiz destekli kubbeli camilerde kubbe, kemer, düşey taşıyıcı yükseklikleri arasındaki oran birbirlerine yakın çıkarken dört destekli camilerde daha farklı çıkmıştır.

Bernardeschi vd. (2004) çalışmalarında, Floransa Katedrali'nin bir parçası olan Buti Çan Kulesi'ni ele alarak bu kulenin sayısal modellemesini yapmışlardır. Modellemede iki farklı analiz yapılmıştır. İlk olarak, Buti Çan Kulesi kendi ağırlığına tabi tutulmuştur. İkinci olarak ise kule hem kendi ağırlığına hem de yatay yüke maruz bırakılmıştır. Yapı üzerinde meydana gelen çatlaklar, deplasmanlar ve gerilmeler incelenmiş, analiz sonucunda oluşan çatlak dağılımları ile yapı üzerinde var olan çatlak dağılımlarının uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilgin (2006) çalışmasında Mimar Sinan'ın yapmış olduğu bazı camileri dikkate almıştır. Camileri dörtgen, altıgen ve sekizgen mesnet ile desteklenen camiler olarak gruplara ayırmıştır. SAP2000 programı kullanarak bu camilerin kendi ağırlıkları altında analizlerini yapmıştır. Çalışma sonucunda kubbe geçiş elemanlarının yük dağılımlarına nasıl etkisi olduğunu ve altıgen, sekizgen mesnetlerle desteklenen camilerdeki deplasman ve yük dağılımlarının dörtgen mesnetlerle desteklenen camilere kıyasla daha emniyetli olduklarını göstermiştir.

Calderini vd. (2006) çalışmalarında dünyanın en büyük beşinci kubbesi olan İtalya'da bulunan Vicoforte kubbesini ele alarak yapının lineer ve lineer olmayan analizini yapmıştır. Analiz sonuçları doğrultusunda kubbede ve temelde oluşan hasarlar tespit edilmiştir.

De Stefano (2007)'nin çalışmasında, dört farklı titreştirici malzeme kullanılarak, yığma olarak inşa edilmiş kilisenin kubbesinde dinamik testler yapılmıştır. Analiz yapılırken modele elastik şeklinde yaylar tanımlanarak, diğer yapılarla etkileşimi sağlanmıştır. Analiz sonucunda ilk altı mod şekli tespit edilmiştir. Bu çalışma ile yaklaşık olarak tespit edilen iyileştirme değişkenlerinin belirsizlikleri sunulmuştur.

Atamtürktür vd. (2011)'nin çalışmasında, biri hasarsız ve diğeri hasarlı olmak üzere iki farklı şekilde tonoz yapı ele alınmıştır. Bu yapılar üzerinde darbe çekici kullanarak titreşim testi deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda farklı iki türdeki tonozların yapısal olarak farklılıkları belirtilmiştir.

Şeker (2011) tez çalışmasında, 28 adet Mimar Sinan Camisini ele almıştır. Sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak hazırlanan ANSYS yazılımından yararlanarak statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda Mimar Sinan Camilerinde en çok zorlanan kesitler ve bu kesitlerde oluşan büyüklükler tespit edilmiştir.

Savaşır (2016) yapmış olduğu çalışmada, yük aktarım şekillerine ve taşıyıcı sistemlerine göre yedi farklı gruba ayrılan kubbeler üzerinde analiz çalışması yapmıştır. Yedi farklı türde yapılan kubbeli yapılar üzerinde yapılan analiz sonucunda, kubbelerin sadece basınca çalışmadığı sonucuna varılmıştır. Yığma kubbe çeşitlerinde kubbe etek kısmında çekme gerilmelerinin oluştuğunu dile getirmiştir. Kabuk, kemer taşıyıcı, çubuk ağı ve kablo destekli ve pnömatik kubbelerin yapımında çekmeye karşı dayanımı yüksek malzemeler kullanıldığından bu kubbelerde de çekme gerilmelerinin oluştuğunu belirtmiştir.

Döndüren vd. (2017) çalışmalarında tarihi yapılarda görülen hasarların; zeminden kaynaklanan hasarlar, taşıyıcı duvarlarda oluşan hasarlar, kubbe, kemer ve tonozlarda oluşan hasarlar, iklim koşullarından kaynaklanan hasarlar olarak belirtmişlerdir. İklim koşulları sebebiyle fiziksel ve kimyasal bozulmalar, zemin problemleri, taşıyıcı duvarlarda oluşan hasarlar, yangınlar, sel gibi doğal olaylar sonucunda tarihi yapılarda görülen hasarları gidermek için tarihi yığma yapıların deprem davranışı, düşey ve yatay gerilme hesapları gibi birçok önemli konular inşaat mühendisliği eğitiminde yeterince verilmesi kanısına varılmıştır.

Turan (2018) tez çalışmasında Konya İli'nde bulunan 21 mahalle mescidinin kubbe geçiş elemanları hakkında araştırma yapmıştır. 13. yy Selçuklu döneminde yapılan bu mescitlerin kubbe geçiş elemanlarının geometrik boyutlarını, şekillerini ve yapıldıkları malzemeleri incelenmiştir. Bu dönemde geçiş elemanı olarak en fazla trompların en az pandantiflerin tercih edildiği sonucuna varılmıştır.

Demir (2019)'in çalışmasında, Diyarbakır Sur İlçesi'nde bulunan On gözlü Köprü'nün statik ve dinamik analizi SAP2000 programı ile yapılmıştır. Analiz sonucunda köprüde meydana gelebilecek maksimum deplasman ve maksimum gerilmeler tespit edilmiştir.

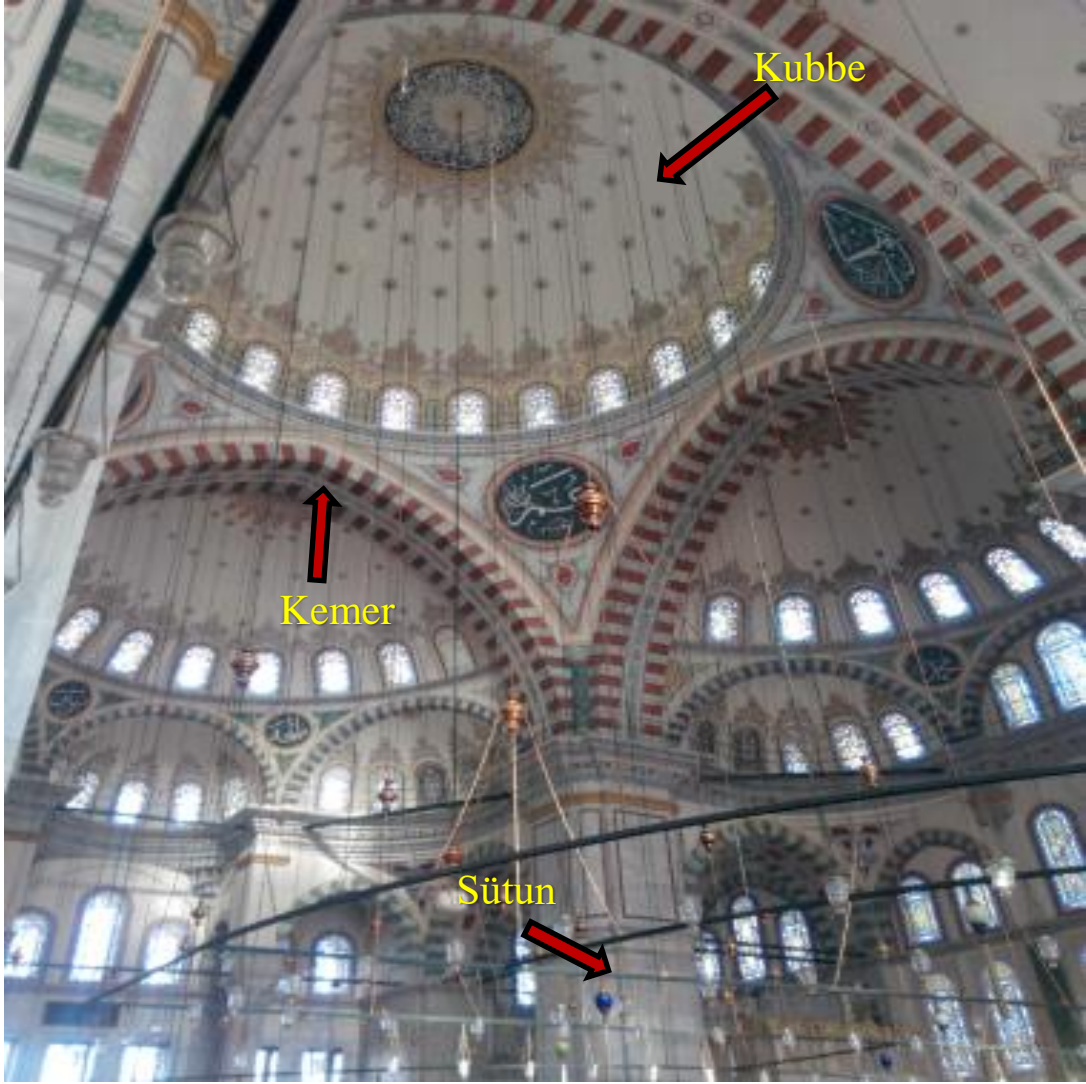
Kocaman vd. (2019)'nin çalışmalarında Erzurum İli'nde bulunan Lala Mustafa Paşa Cami'sini ele almışlardır. Caminin taşıyıcı elemanlarının mekanik özelliklerini ortaya çıkarmak için daha önce yapılan çalışmaları incelemişlerdir. Literatürdeki çalışmalar doğrultusunda Lala Mustafa Paşa Camii üzerinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapının teorik modal analizi, Operasyonel Modal Analiz yöntemi ile ise deneysel modal analizi yapılmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda yapının deneysel ve teorik analizler arasında % 0,6 ile % 19,4 değişen farklılıklar olduğu ortaya çıkmıştır. Sonlu elemanlar modelinde 1992 Erzincan depremindeki ivme değerleri kullanıldığı için bu şiddette olası bir depremde yapının tamamen göçeceği belirtilmiştir.

Türkekul (2019) yüksek lisans tez çalışmasında Tokat'ta yer alan Yağbasan Medrese'si üzerinde sayısal modellemeler yapmıştır. İlk olarak medresenin kubbesini şu anki durumunda yani yarım kubbe olarak almıştır. İkinci olarak ise kubbeyi tam kubbe şeklinde yaparak Sap 2000 programında analizini gerçekleştirmiştir. Yapı üzerinde statik, dinamik ve modal analiz yapılmıştır. Sonuçlar tam kubbe şekli ile yarım kubbe şekli olan medrese arasında karşılaştırılmıştır.

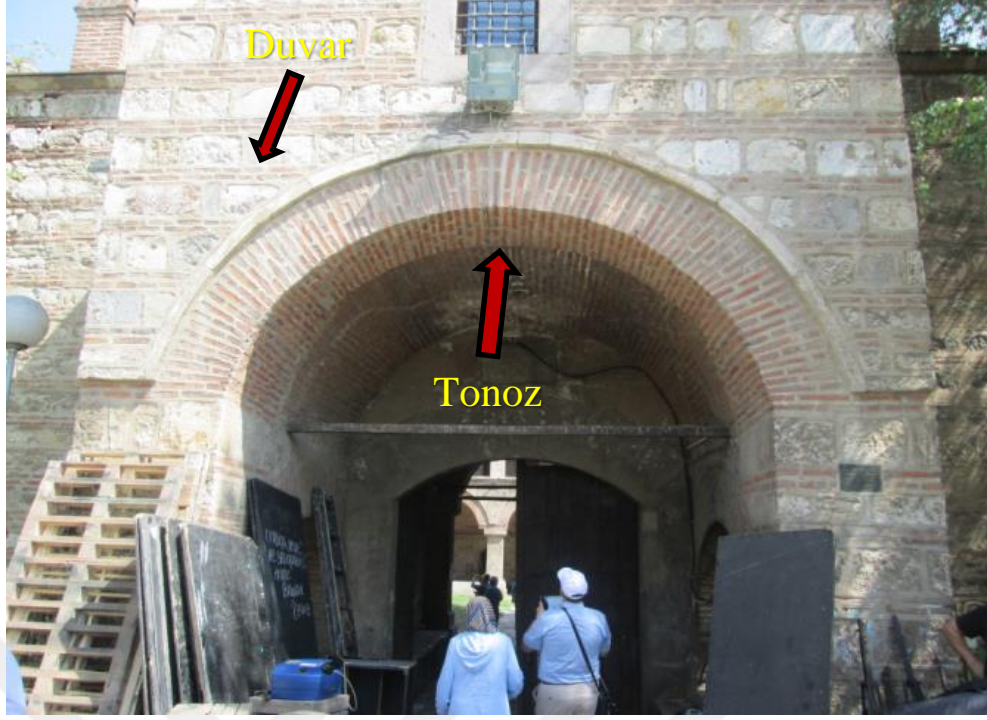
Türker vd. (2020) Aydın İli Didim İlçesinde bulunan İlyasbey Cami'nin yapısal davranışını incelemek amacıyla çevresel titreşim testi ile dinamik ölçümler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analitik ölçümler yapmışlardır. Cami üzerinde deprem, rüzgâr ve sabit yükler altında yapılan analizler sonucunda cami minaresinde oluşan kayma, basınç ve çekme gerilmeleri ile deplasman dağılımları belirlenmiştir. Minarede meydana gelen deplasmanların sabit ve rüzgâr yükü altında az olduğu, deprem yükü altında ise 17 kat artış gösterdiği belirlenmiştir. Minarede oluşan kayma gerilmelerinin 0,015-0,150 MPa, basınç gerilmelerinin 0,040-0,120 MPa ve çekme gerilmelerinin 0,015-0,250 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir.

2. KUBBELER

Yığma yapıların taşıyıcı sistemleri kubbe, kemer, tonoz, duvar ve sütundur. Kubbe, kemer, sütun örnekleri Şekil 2.1’de Fatih Cami içerisinde, Şekil 2.2’de ise tonoz ve duvar örneği Üsküp’de Osmanlılar döneminde yapılmış olan Kurşunlu Han içerisinde verilmiştir.



Şekil 2.1. İstanbul Fatih Cami.



Şekil 2.2. Üsküp Kurşunlu Han.

Düşey taşıyıcı sistem olan sütunlar, blok taşların birleşimiyle veya tek bir malzemeden oluşurlar. Sütunlar üç parçaya ayrılmaktadır. Bunlar, alt başlık, gövde ve üst başlıktır. Sütunlar kemerlerden, tonozlardan, döşemelerden, aldıkları yükleri zemine aktarmaktadırlar. Bir nevi günümüzde yaygın olarak kullanılan kolonların görevini görürler.

Duvarlar, düşey ve yatay yükleri temele aktaran kısımdır. Yığma duvarların yatay ve düşey yükleri karşılayabilmesi için duvar örümünde kullanılan taş, tuğla, kerpiç gibi malzemeler harç, hatıl kenet gibi elemanlarla bağlanırlar. Böylece taşıyıcı elemanın yük taşıma kapasitesi artırılmış olur. Duvar örme işleminde düşey derzler üst üste gelmeden şaşırtmalı olarak örülmelidir. Derzler üst üste geldiği zaman yük aktarımı düzgün yapılamadığından en zayıf nokta olan derz noktaları yapının yıkılmasına neden olmaktadır. Duvarların bu şekilde örülmesinin sebebi düşey yüklerin duvar üzerinde yayılarak zemine aktarımının sağlanmasıdır.

Kemerler, iki veya daha fazla sayıdaki açıklığı geçmek amacıyla inşa edilmiş yay şeklindeki yapılardır. Kemerler geometrik şekillerinden dolayı basınca çalışmaktadırlar. Çekme kuvvetine karşı zayıf olan kemerli yapılar da yatay yüklerin oluşturacağı açılmaları önlemek amacıyla gergi çubukları kullanılmaktadır.

Tonozlar, kemerlerin kendi düzleminde dikey eksenleri doğrultusunda ötelenmesiyle oluşan yapı türleridir. Tonozlarda tıpkı kemerler gibi basınca çalışırlar. Tonozlarda yatay kuvvetler payandalar, duvarlar veya kemerlerdeki gibi gergi çubuklar aracılığıyla taşınır.

Kültürel miraslarımız arasında yer alan kubbeli yapılar, kemerli yapıların merkezinden geçen dik eksen üzerinde 360° dönmesiyle oluşan yapı türleridir. Kubbe formunun ilk örnekleri Mezopotamya'da görülmekle birlikte kubbe ilk Hristiyan, Ermeni, Sasani, Bizans, Roma ve İslam mimarilerinde yapısal eleman olarak kullanılmıştır (Kuban, 1998). Osmanlı döneminde yapılan camilerde ilk olarak tek kubbeli camiler yapılmıştır. Mimar Sinan ile birlikte merkezi ve buna ilave yarım kubbeli camiler yapılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte pandantifler, tromplar, Türk üçgenleri gibi kubbe geçiş elemanları kullanımı yaygınlaşmıştır.

Tarihi yığma yapılar arasında yer alan kubbelere, taşıyıcı sistem ve yük aktarım şekillerine göre yedi farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar; 1. Pnömatik sistemli kubbelere, 2. Kabuk kubbelere, 3. Kaburgalı kubbelere, 4. Kablo destekli kubbelere, 5. Çubuk ağı kubbelere, 6. Kemer taşıyıcılı kubbelere ve 7. Yığma kubbelere dir. Taşıyıcı sistem ve yük aktarımlarına göre ayrılan kubbe çeşitleri Şekil 2.3'de verilmiştir.

Pnömatik sistemli kubbelere, membran ile kaplı kubbelere hava veya gaz ile ön germe verilerek yapılan kubbe çeşitidir. Bu kubbe çeşitlerinde iç basınç dış basınçtan fazla tutularak kubbenin ayakta kalması sağlanmaktadır. Pnömatik sistemli kubbelere membranlar çekme gerilmelerini karşılamaktadır. Şekil 2.3(a)'da verildiği gibi Tokyo Dome Stadyumu pnömatik sistemli kubbeğe örnek olarak verilmiştir.

Kabuk kubbelere, betonarme malzemelerden yapılmış basınç kuvvetlerini beton ile çekme kuvvetlerini ise çelik ile karşılayarak örölmüş kubbelere dir. Kabuk kubbelere yük aktarım şekli yığma kubbelere oldukça benzerdir. Kabuk kubbeğe örnek olarak Roma Pantheon Tapınağının kubbesi verilebilir. Roma Pantheon Tapınağı'nın kubbesi Şekil 2.3(b)'de gösterilmiştir.

Kaburgalı kubbelere de kaburga ve dolgu malzemesi olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmaktadır. Kaburga malzemesi olarak genellikle ahşap, metal ve tuğla, taş gibi kâgir malzemeler, dolgu malzemesi olarak kâgir malzemeler ile cam ve membranlar

tercih edilmektedir. Dolgu malzemeleri kaburgalar eğilmeye çalıştığı zaman kaburgalar arasına yerleştirilmektedir. Dolgu malzemeleri hem gelen yükü hem de kendi ağırlığını kaburgalara iletir. Böylece kaburgalar gelen yükü kubbe eteklerine aktarmış olur. Şekil 2.3(c)'de verilen İtalya'da yer alan Floransa Katedrali kubbesi kaburgalı kubbe çeşiti olarak yapılmıştır.

Kablo destekli kubbelerde, elips veya daire şeklinde olan kubbeler, kasnak şeklinde çekme çemberleri ile kısım kısım ayrılmaktadır. Ayrılan bu çekme çemberlerin arasına kablolar yerleştirilir. Bu şekilde yapılan kubbelere kablo destekli kubbeler denilmektedir. Kasnaklar arasında dik kablolar, bu dik kablolar arasında ise diyagonal şeklinde kablolar yer almaktadır. Kablo destekli kubbeye örnek olarak Şekil 2.3(d)'de görüldüğü üzere İngiltere'de bulunan Milenyum Kubbesi verilmiştir.

Çubuk ağı kubbe, küre şeklindeki yüzeylerin çelik çubuklarla farklı geometrik şekillere bölünerek oluşturulan kubbe çeşitidir. Boyuna doğrultuda yerleştirilen çelik çubuklar basınç gerilmelerini, enine doğrultuda yerleştirilen çelik çubuklar üst kısımda basınç gerilmelerini alt kısımda ise çekme gerilmelerini karşılamaktadır. Şekil 2.3(e)'de gösterildiği gibi Kanada'da yer alan etkinlik, eğlence parkı olarak kullanılan Ontario Place çubuk ağı kubbe şeklindedir.

Kemer taşıyıcı kubbeler birbirlerine paralel olarak yer alan kemerlerin oluşturduğu kubbe çeşitidir. Kemerler arasında oluşan boşluklar membran, ahşap, cam gibi malzemelerle kapatılmaktadır. Bu kubbelerde düşey yükler kemerlere iletilir, kemerlere gelen yüklerde zemine aktarılır. Çin'de spor merkezi olarak kullanılan Nantong Sports Centre kemer taşıyıcı kubbe şeklinde yapılmış olup Şekil 2.3(f)'de gösterilmiştir.

Yığma kubbeler taş, tuğla, kerpiç gibi genelde basınca çalışan malzemelerden üretilmişlerdir. Bu tez çalışmasında yığma kubbeler dikkate alınarak numuneler üzerinde deneysel ve sayısal modelleme çalışması yapılmıştır. İstanbul'da bulunan Ayasofya Cami Şekil 2.3(g)'de gösterildiği gibi yığma kubbelere örnek olarak verilmiştir.



a) Tokyo Dome pnömatik sistemli kubbe (URL-1).



b) Roma Pantheon kabuk kubbe (URL-2).



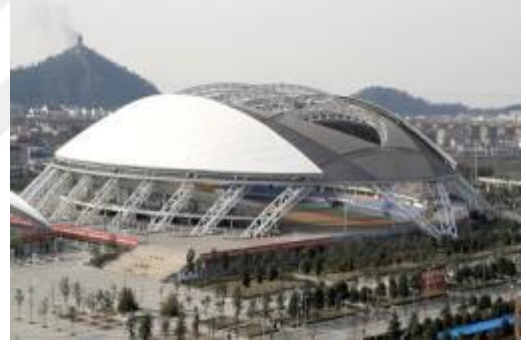
c) Floransa Katedrali (İtalya) kaburgalı kubbe (URL-3).



d) Milenyum Kubbesi (İngiltere) kablo destekli kubbe (URL-4).



e) Ontario Place (Kanada) çubuk ağı kubbe (URL-5).



f) Nantong Sports Centre (Çin) kemer taşıyıcı kubbe (URL-6).



g) Ayasofya Cami İstanbul yığma kubbe.

Şekil 2.3. Taşıyıcı sistem ve yük aktarımlarına göre kubbe çeşiti resimleri.

2.1 Kubbe Geçiş Elemanları

Yığma yapılar arasında yer alan kubbeli yapıların taşıyıcı eleman olan kemerlere, duvarlara, tonozlara yük aktarımını yapabilmeleri için geçiş elemanlarına ihtiyaç duyulmuştur. Kubbeli yapılarda Pandantif, Tromp ve Türk Üçgeni geçiş elemanları olarak kullanılmaktadır. Kubbe geçiş elemanları, dairesel olan kubbe yapıları prizma şeklindeki gövdelere bağlayarak yapıya önemli bir estetik görünüm de katmaktadır.

Pendantifin ilk örnekleri Suriye’de görülmüştür. Kubbe ile kubbeyi taşıyan kemerler arasına yerleştirilen pendantifler, kubbeden gelen yükleri duvarlar ve sütunlar yardımıyla zemine iletirler. Pendantifler küresel üçgen şeklinde olup basit, ayrıntılı ve mukarnaslı pendantif olmak üzere üçe ayrılmaktadır. İstanbul Ayasofya Cami’inde Şekil 2.4’de gösterildiği gibi pendantif örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.4. İstanbul Ayasofya Cami’inde pendantif örneği.

Daire şeklindeki kubbelerin kare veya dikdörtgen bir alana oturtulması için bir diğer geçiş elemanı olarak bilinen tromplar kullanılmaktadır. Tromp örnekleri ilk olarak İran’da Sasani mimarlığında görülmüştür (Okçuoğlu, 1995). Tromplar küçük tonoz şeklinde olup, köşelere inşa edilirler. Tromplar kubbeden gelen yükleri duvarlara iletirerek yük dağılımına yardımcı olurlar. Basit, yivli, baklavalı, ayrıntılı ve mukarnaslı olarak beş çeşit tromp vardır. Şekil 2.5’de İstanbul Mihrimah Sultan Cami’nde görülen tromp örneği verilmiştir.



Şekil 2.5. İstanbul Mihrimah Sultan Camii tromp örneği.

Kubbede yer alan kasnağın kare veya dikdörtgen plana oturabilmesi için kasnak ile kare, dikdörtgen plan arasındaki boşlukları doldurmak amacıyla yapılan geçiş elemanına Türk Üçgeni denir. Türk Üçgeninde üçgenin tepe noktası kare, dikdörtgen planın köşesine, üçgenin taban kenarı ise kasnağa gelecek şekilde örülmektedir. Tire Tahtakale Hamamı'nda görülen Türk Üçgeni Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



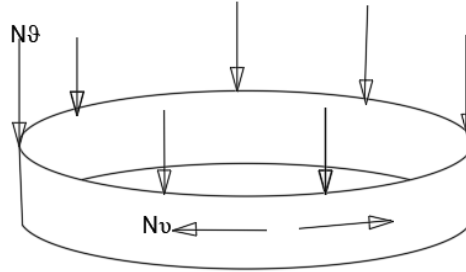
Şekil 2.6. Tire Tahtakale Hamamı Türk Üçgeni örneği (URL-7).

7 çeşit Türk Üçgeni vardır. Bunlar; baklavalı kuşaklama üçgen dizisi, baklavalı kısa üçgen dizisi, düzlem, çoklu düzlem, basit kısa üçgen dizisi, mukarnaslı düzlem, basit kuşaklama üçgen dizisi şeklindedir.

2.2 Kubbe Yapılarda Kasnak Uygulaması

Ülkemizde ve birçok yerde yığma kubbeli yapılar bulunmaktadır. Bu kubbeli yapıların bir kısmı kasnaklıyken, bir kısmı ise kasnaksız olarak yapılmıştır. Kasnaksız olarak yapılan yapıların birçoğu han, hamam, gibi küçük tarihi yapılardır. Kasnaklı yapılan kubbelerin kasnağı dörtgen, altıgen, sekizgen, onikigen ve onaltıgen şeklinde yapılmıştır.

Kasnak kubbenin üzerine oturduğu daire, kare veya çokgen şeklinde olan kaide kısmıdır. Bu sebeple kasnak, duvarın basınç dayanımını devamlı kılan elemandır. Kubbe kasnağında yatay ekseninde dışa doğru kayma gerilmesi, boyuna doğrultuda ise çekme gerilmesi etkilidir (Bayraktar, 2006). Kasnak kubbe üzerine gelen çekme gerilmelerini azaltmaktadır. Şekil 2.7’de kasnağın, kubbede meydana gelen çekme kuvvetini azalttığını gösteren yük dağılım şekli verilmiştir.



Şekil 2.7. Kubbedeki kasnağın çekme kuvvetini azalttığını gösteren yük dağılım şekli.

Kubbeli yapılarda kasnak, düşey yükleri kemer ve duvarlara iletirken, yatay yükleri de payanda ve yarım kubbe gibi geçiş elemanlarına iletmede yardımcı olur. Bu nedenle kasnağın açılması kubbedeki tüm dengeyi bozmaktadır. Kubbeli yapılarda kasnak kısmının çok dikkatli yapılması gerekmektedir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi Anadolu’da yığma kubbe olarak yapılan camilerde genellikle kasnaklı kubbe yapılar görülmektedir. Bu dönemde yapılan cami kubbelerinin kasnak kısımlarında genellikle pencereler bulunmaktadır.

Bu pencerelerin yapılmasının sebebi, tarihi yapıların özellikle camilerin daha ferah ve aydınlık görünmesini sağlamaktır. Bunlara en önemli tarihi miraslarımızdan örnek verecek olursak;

Şekil 2.8(a)'da 532-537 yılları arasında Bizans İmparatoru I. Justiniaus tarafından yaptırılan İstanbul'da bulunan Ayasofya Cami'nin kubbesi elips şeklinde olup çapı farklılık göstermektedir. Doğu-batı ekseninden ölçüldüğünde kubbe çapı 30,80 m olurken, kuzey-güney ekseninden ölçüldüğünde kubbenin çapı 32,6 m değerindedir. Kubbe yüksekliği ise 55,60 m'dir. Ana kubbenin iki yanında iki büyük yarım kubbe yer almaktadır. Ana kubbe dört kemer üzerine oturtulmuştur. Kubbe kasnağı sekizgen şeklinde olup kubbe kasnağında 40 adet kemerli pencere bulunmaktadır.

1609-1616 yılları arasında Sultan I. Ahmet zamanında inşa edilen Sultan Ahmet Cami Şekil 2.8(b)'de gösterilmiştir. Sekizgen kasnak üzerine yapılan kubbenin çapı 22,7 m, yüksekliği ise 11,43 m'dir. Kubbe kasnak yüksekliği 1,35 m, Kasnak genişliği 0,54 m olarak örülmüştür. Kubbe dört bir yandan yarım kubbelerle çevrilmiştir. Sultan Ahmet Cami'nde toplamda 260 adet pencere bulunmaktadır. Kubbe kasnağında 28 tane kemerli pencere yer almaktadır.

1540-1548 yılları arasında Kanuni Sultan Süleyman tarafından Mimar Sinan'a yaptırılan yapıyı 8 yıl süren Mihrimah Sultan Cami Şekil 2.8(c)'de verilmiştir. Kubbe çapı 11 m olup yüksekliği 6,27 m'dir. Kubbe kasnak şekli sekizgendir. Kubbe kasnak genişliği 1 m olup, kasnak yüksekliği 2 m'dir. Mihrimah Sultan Cami üç ana kemer üzerine oturtulup, yanlardan üç adet yarım kubbe ile desteklenmiştir. Cami içerisinde toplamda 161 adet kemerli pencere bulunmaktadır.

Şekil 2.8(d)'de 1463-1470 yılları arasında Fatih Sultan Mehmet tarafından yaptırılan Fatih Cami yer almaktadır. Fatih Cami kubbe çapı 26 m olup kubbe dört büyük kemer üzerine yapılmıştır. Kubbenin dört bir yanında yarım kubbeler bulunmaktadır. Kubbe kasnağı sekizgen olarak örülmüştür. Kubbe kasnağı üzerinde kemerli pencereler bulunmaktadır.

Yapımı 1486 yılında tamamlanan Amasya'da yer alan II. Bayezid Cami Şekil 2.8(e)'de verilmiştir. II. Bayezid Cami'nde iki büyük kubbe yer almaktadır. Küçük kubbenin çapı 13 m iken, büyük kubbenin çapı 15 m'dir. Kubbeler sekizgen kasnak üzerine oturtulmuştur. Büyük kubbe kasnağı üzerinde toplam 16 adet kemerli pencere bulunmaktadır.



(a) İstanbul Ayasofya Cami.



(b) İstanbul Sultan Ahmet Cami.

Şekil 2.8. Tarihi yığma kubbe yapılar.



(c) İstanbul Mihrimah Sultan Cami.



(d) İstanbul Fatih Cami.

Şekil 2.8 (devam). Tarihi yığma kubbe yapılar.

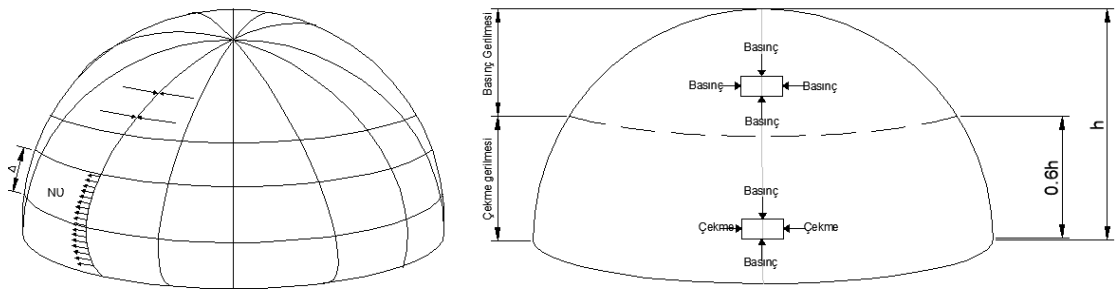


(e) Amasya II. Bayezid Cami.

Şekil 2.8 (devam). Tarihi yığma kubbe yapılar.

2.3 Kubbelerde Oluşan Kuvvetler ve Yük Dağılımları

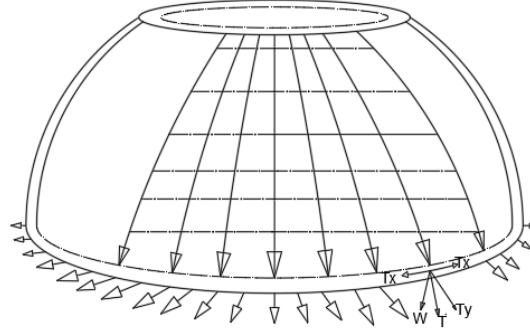
Yığma kubbelerde kubbenin yüksekliğinin % 40'lık üst kısmında basınç gerilmesi oluşurken, % 60'lık alt kısmında ise çekme gerilmesi oluşmaktadır (Savaşır, 2016). Şekil 2.9'da yığma kubbelerde meydana gelen gerilme kuvvetlerinin dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.9. Yığma kubbelerde meydana gelen gerilme kuvvetlerinin dağılımı.

Kubbeli yapılarda düşey yükler, kubbe kilit taşından başlayıp diğer taşlara aktarılarak kubbe tabanı boyunca iletilir. Kubbelerde sadece düşey yük oluşmamaktadır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi kubbenin tabanında meydana gelen yükte hem düşey bileşen

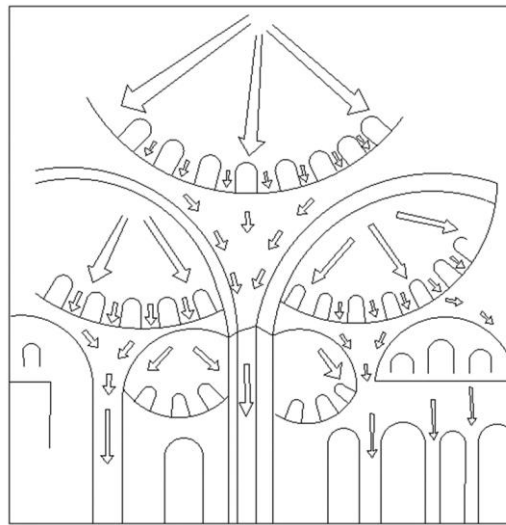
hem de yatay bileşen şeklinde iki bileşeni olan yük etki etmektedir. Düşey bileşenler kubbenin üzerine oturduğu kemer ve duvarlara iletilir. Kemerlere dik olarak inşa edilen payanda ve yarım kubbelere de yükün bu yatay bileşenleri gelmektedir.



Şekil 2.10. Kubbede oluşan düşey ve yatay kuvvetlerin gösterimi (Uçak, 2012).

Kubbelerde hasarın oluşmasına neden olan kuvvet genelde kubbe eteklerinde meydana gelen yatay kuvvetlerdir. Bu yatay kuvvetleri karşılayıp kubbenin eteklerinden açılmasını önlemek amacıyla kalın beden duvarları, payandalar, ağırlık kuleleri, kasnak, çekme çemberleri yapılmaktadır. Yatay yükleri karşılayan bu gibi yapılar yapılmadığı zaman kubbe eteklerinde dik doğrultuda çatlaklar meydana gelmektedir.

Örnek olarak Şekil 2.11’de kubbede oluşan kuvvetlerin diğer taşıyıcı elemanlara aktarımını gösteren şekil çizimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi kubbe üzerindeki düşey kuvvetler kemerlere ve duvarlara, yatay kuvvetler ise payanda veya yarım kubbelere iletilmiştir.



Şekil 2.11. Kubbede oluşan kuvvetlerin diğer taşıyıcı elemanlara aktarımı.

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan harç ve taşın özelliklerini belirlemek için, Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında standartlarda belirtildiği şekilde malzeme deneyleri yapılmıştır. Kubbe deney elemanlarında taşları birleştirmede yardımcı olan harç için basınç dayanım testleri ve yarmada çekme testleri; tuf taşı için basınç testleri, üç nokta eğilme testi ve küçük duvar numuneleri üzerinde basınç dayanım testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1 Tuf Taşın Özellikleri

Yığma yapılarda kullanılan malzemelerin basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük olduğundan çalışmada kullanılacak olan malzemelerin bu özellikleri yansıtması gerekmektedir. Bu sebeple yığma yapılarda çekme dayanımı düşük, basınç dayanımı yüksek doğal taşlar kullanılmaktadır. Deneyde boyutları 250x150x100 mm³ olan Kayseri yöresine ait tuf taşı olarak adlandırılan volkanik kökenli taş kullanılmıştır. Taşın basınç dayanım testi TS EN 772-1 (2012) (Kâgir birimlerin basınç dayanımının tayini)'de belirtildiği gibi, 40x40x40 mm³ boyutunda toplamda 6 adet taşın basınç dayanım testleri yapılmıştır. Kubbeler örülürken kullanılan standart taşın boyutları ve basınç dayanım testi Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Taşın basınç dayanım değerleri (σ), elde edilen maksimum yükün (F_{maks}) uygulanan alana (A) bölünmesiyle hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi taşın ortalama basınç dayanımı 17,73 MPa elde edilmiştir. Çizelgede gösterilen TTBD ile taşın basınç dayanım testi ifade edilmiştir.



Şekil 3.1. Tuf taşın basınç dayanımı testi ve boyutları.

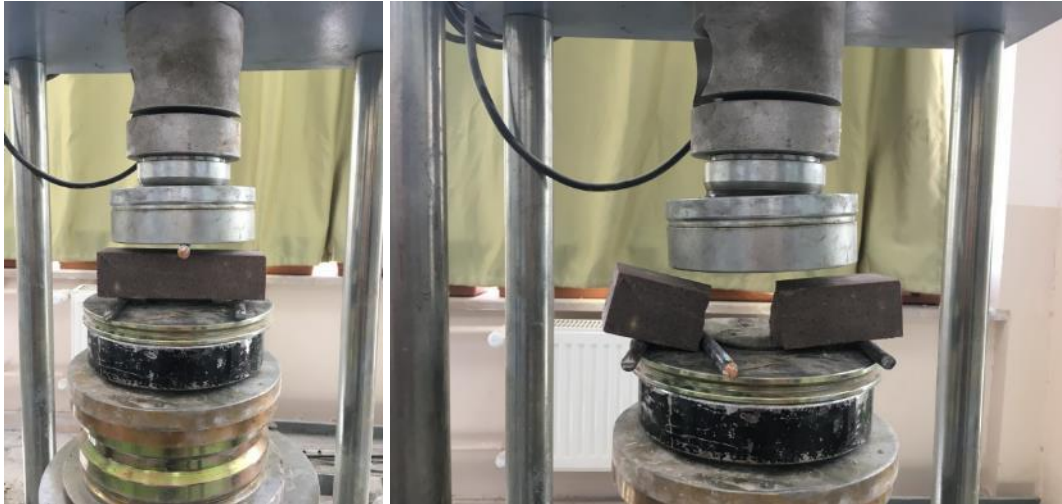
Çizelge 3.1. Tüf taşın basınç dayanımı test sonuçları.

Numune No	σ (MPa)
TTBD1	17,90
TTBD2	18,13
TTBD3	17,34
TTBD4	17,52
TTBD5	18,01
TTBD6	17,48
Ortalama	17,73
Standart Sapma	0,32

TTBD: Tüf taşın basınç dayanımı.

Volkanik tüf taşının eğilmede çekme dayanımını belirlemek amacıyla TS EN 772-6 (2004) (Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini) standardı dikkate alınarak boyutları 40x40x160 mm³ olan 6 adet taş üzerinde deney yapılmıştır. Taşın eğilmede çekme dayanımı Denklem 2.1’de belirtilen formül ile hesaplanmıştır. Tüf taşının eğilmede çekme dayanımı Şekil 3.2’de ve eğilmede çekme dayanımı test sonuçları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Yapılan deney sonucunda taşın ortalama eğilmede çekme dayanımı 5,55 MPa olarak belirlenmiştir. Taşın eğilmede çekme dayanımı TTED ile sembolize edilmiştir. Tüf taşının fiziksel test sonuçları Çizelge 3.3’de verilmiştir.

$$R_{tf} = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.1)$$



Şekil 3.2. Tüf taşın eğilmede çekme testi.

Çizelge 3.2. Tüf taşının eğilmede çekme dayanımı test sonuçları.

Numune No	P (kN)	R _{tf} (MPa)
TTED1	2,46	6,15
TTED2	2,10	5,25
TTED3	2,00	5,00
TTED4	2,25	5,63
TTED5	2,32	5,80
TTED6	2,18	5,45
Ortalama	2,19	5,55

TTED: Tüf taşın eğilmede çekme dayanımı.

Çizelge 3.3. Tüf taşın fiziksel test sonuçları (Kaygısız, 2010).

Test Adı/Birimi	Doymun Sonuç	Kuru Sonuç
Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³)	1,948±0,010	1,710±0,029
Ağırlıkça Su Emme Oranı (%)		14,74
Sonik Hız (km/sn)	1,92±0,03	1,87±0,05
Porozite (Gözeneklilik Derecesi) (%)		24,79
TEBD'na göre elastisite (GPa)	3,36±0,03	3,51±0,31
Darbe Dayanımları (MPa)		10±3,46
Aşınma Dayanım Değerleri (cm ³ /50 cm ²)		41,80

3.2 Horasan Harcının Özellikleri

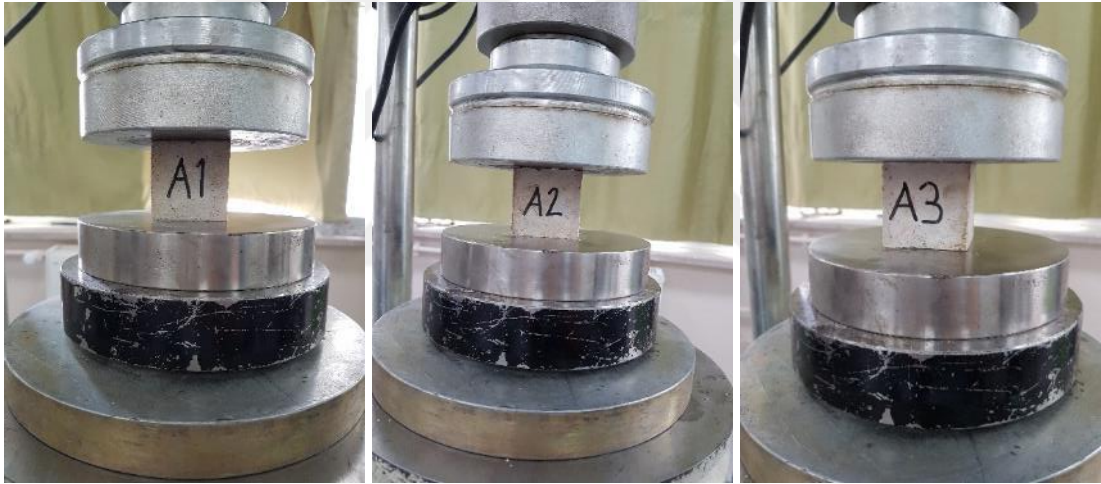
Kubbe örme işleminde taşları birleştirmek için yatay ve düşey doğrultudaki derzleri doldurmak amacıyla horasan harcı kullanılmıştır. Horasan harcı, taş, tuğla, kiremit gibi ürünlerin kırılarak öğütülüp toz haline getirilmesiyle elde edilen malzemenin kum, kireç ile birleşiminden elde edilir (Uslu, 2013). Deneyde kullanılan horasan harcının % 40'ı kum, % 40'ı kireç ve % 20'si taş tozudur. Harcın mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deneyler standartlara uygun bir şekilde yapılmıştır. Harcın basınç dayanımını test edebilmek için TS EN 12390-3 (2010) (Beton deney numunelerinde basınç dayanımının tayini) standardı ele alınarak 40x40x40 mm³'lük numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 28 gün sonucunda basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Şekil 3.3'de horasan harcının basınç dayanım testi ve Çizelge 3.4' de horasan harcının basınç dayanım sonuçları verilmiştir. Horasan harcının basınç dayanım değerleri (σ), deneyler sonucunda elde edilen maksimum yükün (F_{maks}) uygulanan alana (A) bölünmesiyle hesaplanmıştır.

Kubbe örme işleminde kullanılan horasan harcının ortalama basınç dayanımı 3,20 MPa olarak belirlenmiştir. Horasan harcının basınç dayanım testi HHBD ile ifade edilmiştir.

Çizelge 3.4. Horasan harcının basınç dayanımı test sonuçları.

Numune No	F (kN)	σ (MPa)
HHBD1	5,45	3,41
HHBD2	5,07	3,17
HHBD3	4,79	2,99
HHBD4	5,17	3,23
HHBD5	5,32	3,33
HHBD6	4,95	3,09
Ortalama	5,10	3,20
Standart Sapma		0,15

HHBD: Horasan harcının basınç dayanımı.



Şekil 3.3. Horasan harcının basınç dayanımı testi.

Silindir yarma deneyleri yapılarak harcın çekme dayanımları belirlenmiştir. Deney fotoğrafları Şekil 3.4'de gösterilmiştir. TS EN 12390-6 (2010) (Beton deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini) dikkate alınarak yapılan deney numunelerinin çekme dayanımları Denklem 2.2 ile hesaplanmıştır.

$$f_{cst,m} = \frac{2P_s}{\pi h_c l_c} \quad (2.2)$$

P_s ; elde edilen maksimum yükü, l_c ; ise silindir şeklindeki harcın uzunluğunu, h_c ; silindir şeklindeki harcın yüksekliğini, ifade etmektedir. Çizelge 3.5’de gösterildiği gibi HHYD ile ifade edilen horasan harcının yarmada çekme deneyi sonucunda ortalama dayanım 0,25 MPa olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5. Horasan harcın yarmada çekme dayanımı test sonuçları.

Numune No	P_s (kN)	$f_{cst,m}$ (MPa)
HHYD1	7,83	0,25
HHYD2	8,91	0,28
HHYD3	7,59	0,23
HHYD4	8,24	0,26
HHYD5	7,75	0,24
HHYD6	7,92	0,25
Ortalama	8,11	0,25
Standart Sapma		0,02

HHYD: Horasan harcının yarmada çekme dayanımı.



Şekil 3.4. Horasan harcın yarmada çekme dayanım testi.

3.3 Yığma Duvar Numunelerin Basınç Dayanımı

TS EN 1052-1 (2000) (Deney metotları basınç dayanım tayini) standardı dikkate alınarak kubbe numunelerinin basınç dayanımlarını belirlemek için duvar numunelerine basınç testi uygulanmıştır. Duvar numunelerini yapmadan önce taşlar $190 \times 90 \times 50 \text{ mm}^3$ ve $95 \times 90 \times 50 \text{ mm}^3$ ebatlarında kesilmiştir. Derz aralıkları 1'er cm olacak şekilde duvarlar şaşırtmalı bir şekilde Şekil 3.5’de gösterildiği gibi örülmüştür.



Şekil 3.5. Yığma duvar numunelerinin örülmesi.

Standartta belirtildiği şekilde üç adet $390 \times 290 \times 90 \text{ mm}^3$ 'lük duvar numuneleri yapılmıştır. Şekil 3.6'da deney düzeneği gösterilmiştir. Bu duvar numunelerine iki adet LVDT yerleştirilerek ne kadar deplasman yaptıkları ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen deplasmanlar, duvar numunelerin deney öncesindeki boyuna bölünerek duvar numunelerinde oluşan şekil değiştirmeler (ϵ) elde edilmiştir. Duvar numunelerine uygulanan düşey yükün, uygulanan alana bölünmesiyle de duvar numunelerinde meydana gelen gerilmeler (σ) hesaplanmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler toplu bir şekilde Çizelge 3.6'da verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Yığma duvar numunelerinin basınç dayanım testi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiğinden elastisite modulleri hesaplanmıştır. Ortalama olarak hesaplanan elastisite modülü, sonlu elemanlar yönteminde modellerin malzeme özelliklerinde kullanılmıştır. TS EN 1996-1-1 (2013) (Donatılı ve donatısız kâgir yapılar için genel kurallar)'te ifade edildiği gibi her bir numune için elastisite modülünün basınç dayanımına oranı 1000 değerinden düşük çıkmıştır.

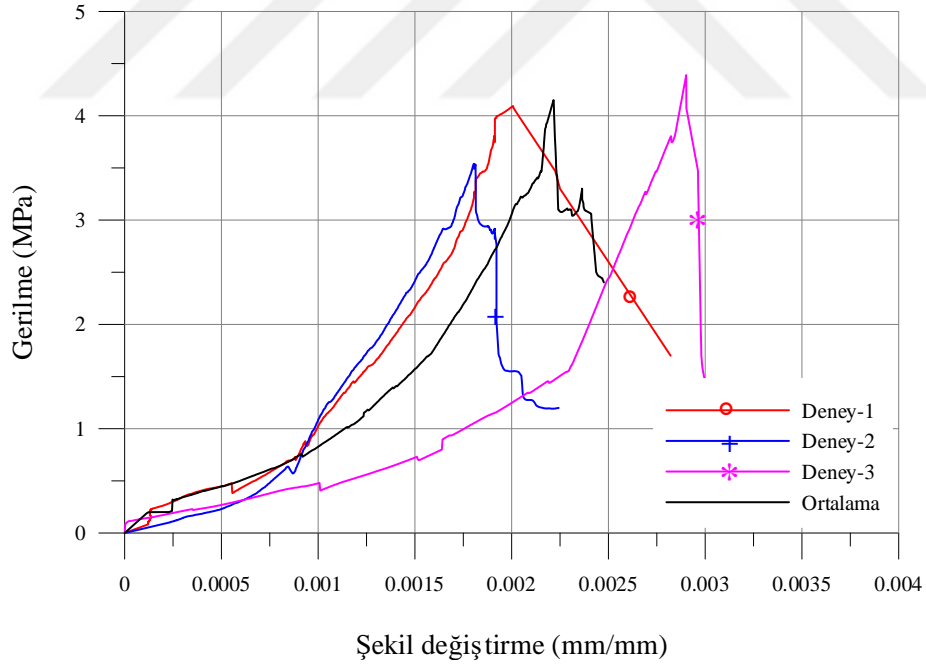
Çizelge 3.6. Yığma duvar numunelerinin basınç dayanımları.

Numune No	Maksimum yük V (kN)	Basınç dayanımı f (MPa)	Elastisite modülü E (MPa)	Oran E/ f_k
YDBD1	81,8	4,09	2038	582
YDBD2	70,6	3,53	1947	556
YDBD 3	87,8	4,39	1565	433
Ortalama	83,0	4,15	1850	524
$f_k=f/1,2$		3,50		

YDBD: Yığma duvarların basınç dayanımı.



Şekil 3.6. Yığma duvar numunelerinin deney düzeneğine yerleştirilmiş hali.



Şekil 3.7. Yığma duvar numunelerinin gerilme-şekil değıştirme grafiği.

4. KUBBE DENEY ELEMANLARI

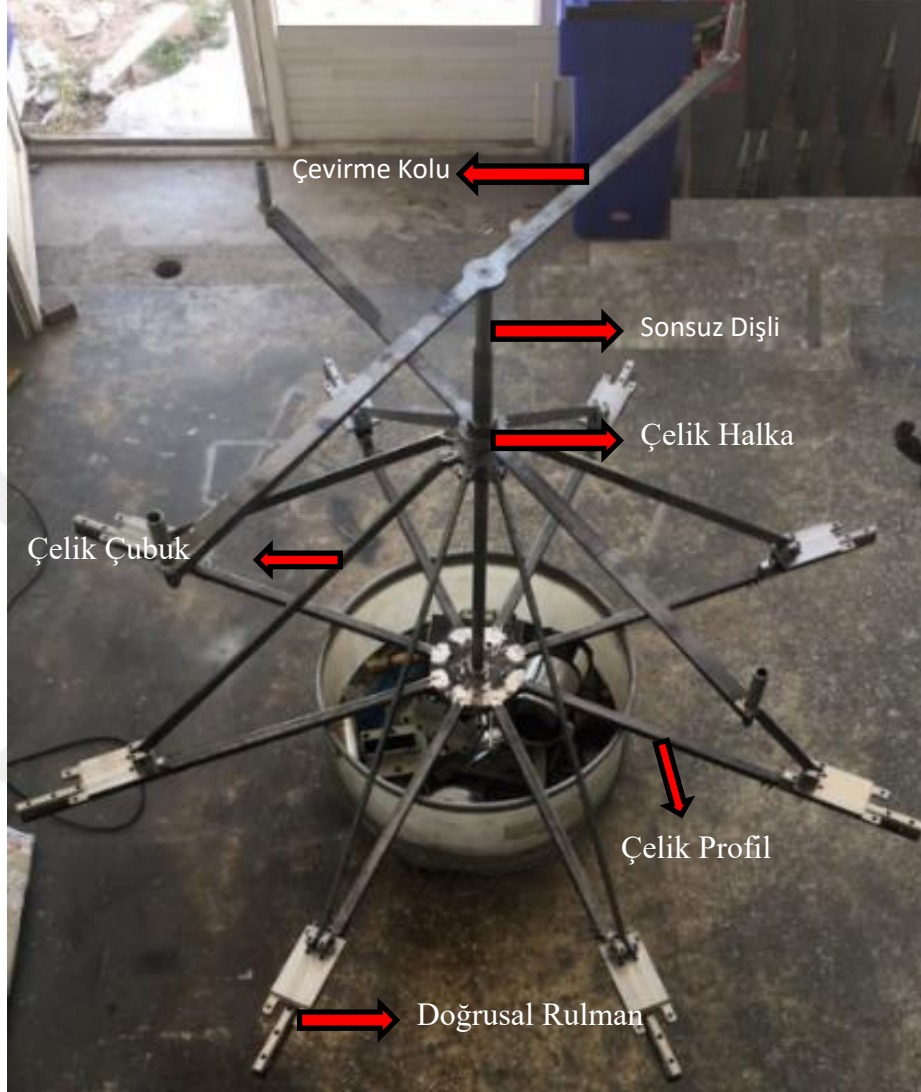
4.1 Kubbe Deney Elemanlarının Hazırlanması

Kubbe açıklığı 2000 mm, yüksekliği 1000 mm olan % 2,5 boşluk oranına sahip boşluklu (pencereli) ve boşluksuz (penceresiz) üretilen kubbe deney elemanları tasarlanmıştır. Boşluksuz olarak üretilen kubbe deney elemanlarında kasnak yüksekliği 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm olan ve bir adet de kasnak uygulaması yapılmadan referans olarak ele alınan deney elemanı ile birlikte toplamda 5 adet kubbe deney elemanları yapılmıştır. Boşluklu olarak üretilen kubbe deney elemanlarında boşluklu referans olarak tasarlanan bir adet kasnaksız deney elemanı, iki adet kasnak yüksekliği 300 mm ve 400 mm olan kubbe deney elemanları üretilmiştir. Boşluklu olarak üretilen deney elemanlarında, kasnak üzerine açılan boşluğun kasnak içerisinde kalmasından dolayı kasnak yüksekliği 100 mm ve 200 mm olan deney elemanları yapılamamıştır.

Boşluklu ve boşluksuz olarak değişen toplamda 8 adet kubbe deney elemanları üzerinde deneyler yapılmıştır. Osmanlı döneminde yapılmış kubbeli yapıların geometrik boyutları dikkate alınıp, bu deneysel çalışma öncesinde çok sayıda kubbe boyutları incelenmiştir. Elde edilen kubbe boyutlarının ortalaması alınarak ölçek $\frac{1}{4}$ oranında küçültülmüştür.

Deneysel çalışmada yükleme, şemsiye şeklinde mekanizma üzerinden yapılmıştır. Kubbenin tam ortasından 20 mm çapında 1300 mm uzunluğunda dairesel çelik profil ve çelik profilin üst kotundan 150 mm aşağısına uzunluğu 400 mm olan sonsuz dişli geçirilmiştir. Sekiz köşegenli kasnağın her bir kenarına eşit bir şekilde yük gelebilmesi için bu sonsuz dişliye sekiz tane boşluğu olan çelik halka geçirilmiştir. Bu halkanın her bir boşluğuna sekiz tane çelik çubuk bulon ve somun yardımıyla bağlanmıştır. Bu çelik çubuklar, çelik profillere birer adet olmak üzere toplamda sekiz adet doğrusal rulmanlarla bağlanarak sabitlenmiştir. Bu doğrusal rulmanlar yardımıyla sekiz çelik çubuk yükleme esnasında eşit bir şekilde hareket etmektedir. Deneyde yükleme işlemi şemsiye şeklindeki mekanizmanın çevirme kolunun saat yönünün tersine çevrilmesiyle yapılmıştır. Dört adet S tipi yük hücresi çelik çubuklara bağlanmıştır. Şemsiye şeklindeki mekanizma saat yönünün tersine çevrildiğinde doğrusal rulmanlar sayesinde sekiz çelik çubuğa eşit bir şekilde yük

iletılarak kubbe de açılmalar meydana gelmiştir. Kubbe mesnetlerinde açılmalar meydana gelirken her bir mesnete gelen yükler de yük hücreleri sayesinde ölçülmüştür. Şekil 4.1’de şemsiye mekanizmasının görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Şemsiye mekanizmasının görünümü.

Kubbe deneylerini yapabilmek için çelik levha tablası yapılmıştır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi çelik levha tablası, 150x150 mm² boyutunda, 1100 mm uzunluğunda yedi adet ayak ile desteklenmiştir. Şekil 4.2(a)’da görüldüğü gibi bu ayaklar çelik levhaya kaynak yardımıyla birleştirilmiştir. Çelik levha tablası üzerinde, yapılan kubbe deney elemanlarının çapı (2000 mm) boyutunda plazma kesim ile boşluk oluşturulmuştur. Çelik levha tablasının paslanmaması için üzerine anti pas atılmış ve anti pas üzerinde boyama işlemi Şekil 4.2(b)’de gösterildiği gibi yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.2. a) Çelik levha tablanın kaynak yardımı ile birleştirilmesi, b) Çelik levha tablasının boyanması.

Kubbe örme işlemi, oluşturulan çelik levha tablası üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kubbe deney elemanlarını, çelik levha üzerinde örebilmek için çelik profilden kalıp yapılmıştır. Çelik profiller yay şeklinde bükülerek birleştirilmiştir (Şekil 4.3). Yapılan kalıbın çapı 1990 mm olup, kubbenin çapından küçük yapılmıştır. Böylece kubbe örüldükten sonra kalıbın çelik levha üzerindeki boşluktan çıkarılması sağlanmıştır.



Şekil 4.3. Kubbe deney elemanları örümü için çelik kalıbın yapılması.

Kubbe deney elemanlarını örme işleminden önce beden duvarı görevini yapmak amacıyla sekiz adet beton bloklar üretilmiştir. Şekil 4.4(a)'da gösterildiği gibi beton bloklar için ahşap kalıplar hazırlanıp, kalıplara dayanımı 25 MPA olan betonlar dökülmüştür. Kubbe deney elemanları $750 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ boyutlarında beton kütleler üzerine örülmüştür. Bu beton kütleler sonsuz dişli yardımıyla ikişer adet doğrusal rulmanlara sabitlenerek çelik tabla üzerine Şekil 4.4(b)'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Yükleme işlemi kubbenin tepesinde bulunan çevirme kolunun saat yönü tersine döndürülmesiyle gerçekleştirilip çevirme kolu döndürüldüğü zaman sekiz tane çelik çubuğun eşit bir şekilde hareket etmesi sağlanmıştır. Böylece beton kütleler sekizgen kasnak ile birlikte hareket etmiştir.



(a)



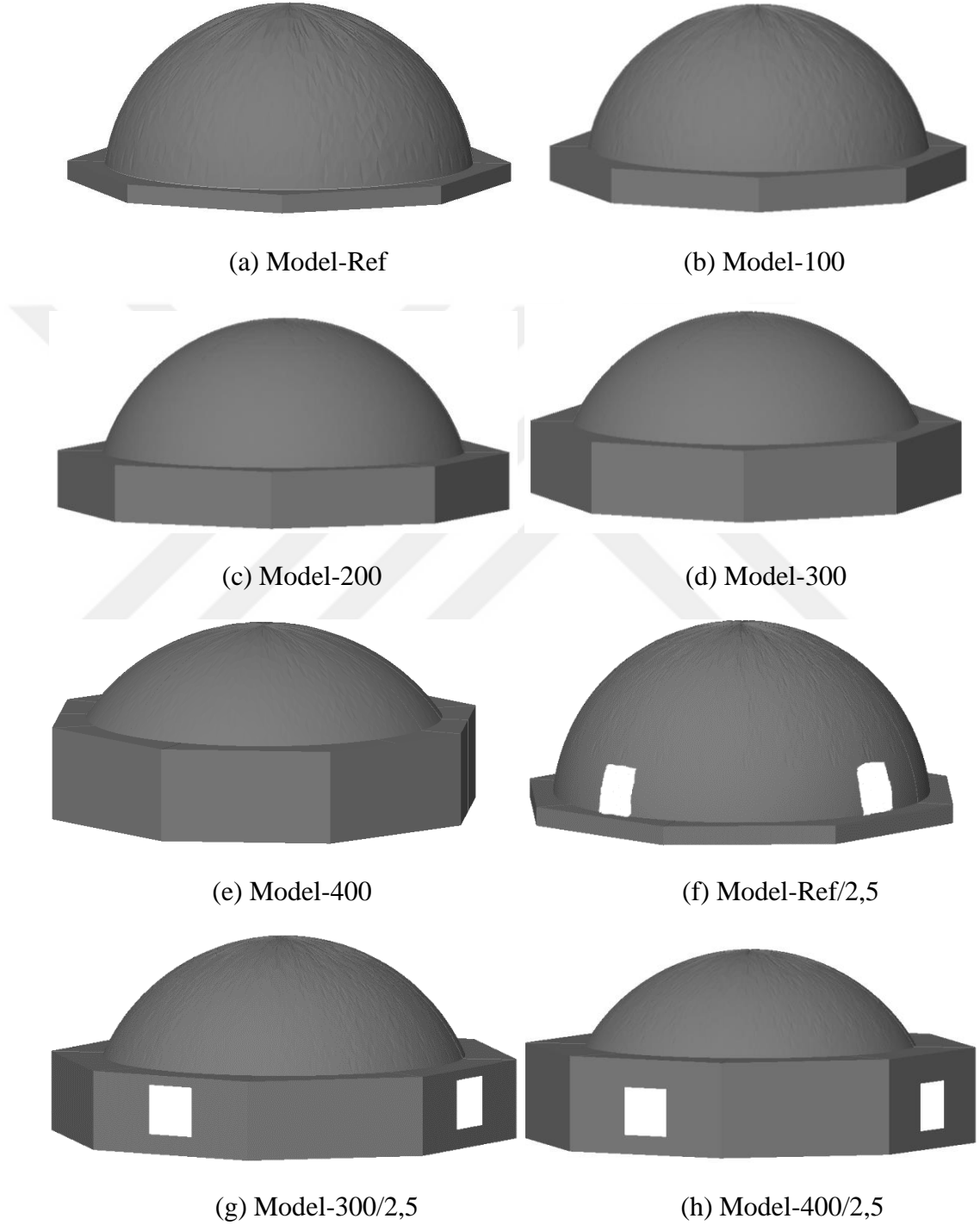
(b)

Şekil 4.4. Kubbe deney elemanları örümü için a) beton blokların üretimi ve b) beton blokların çelik levha tablası üzerine yerleştirilmesi.

Boşluksuz olarak yapılan deney elemanlarının her biri Model-Ref'den Model-400'e kadar isimlendirilmiş, kasnak uygulaması yapılmadan üretilen referans deney elemanı Model-Ref olarak adlandırılmıştır. Model-100 deney elemanında kubbenin kasnak yüksekliği 100 mm yapılmıştır. Model-200'de bu yükseklik değiştirilerek kasnak yüksekliği 200 mm olarak üretilmiştir. Model-300'de ise kasnak yüksekliği 300 mm ve Model-400'de kasnak yüksekliği 400 mm üretilerek deneysel işlem gerçekleştirilmiştir.

Boşluk oranı % 2,5 olarak üretilmiş deney elemanları ise Model-Ref/2,5'den Model-400/2,5'e kadar isimlendirilmiştir. Model-Ref/2,5 deney elemanında kasnak uygulaması yapılmamıştır. Bu yüzden Model-Ref/2,5 boşluklu referans deney elemanı olarak ele alınmıştır. Model-Ref/2,5 kasnaksız olarak üretilirken, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanları kasnaklı olarak üretilmiştir. Model-300/2,5 deney elemanında kasnak yüksekliği 300 mm, Model-400/2,5 deney elemanında ise kasnak yüksekliği 400 mm yapılmıştır.

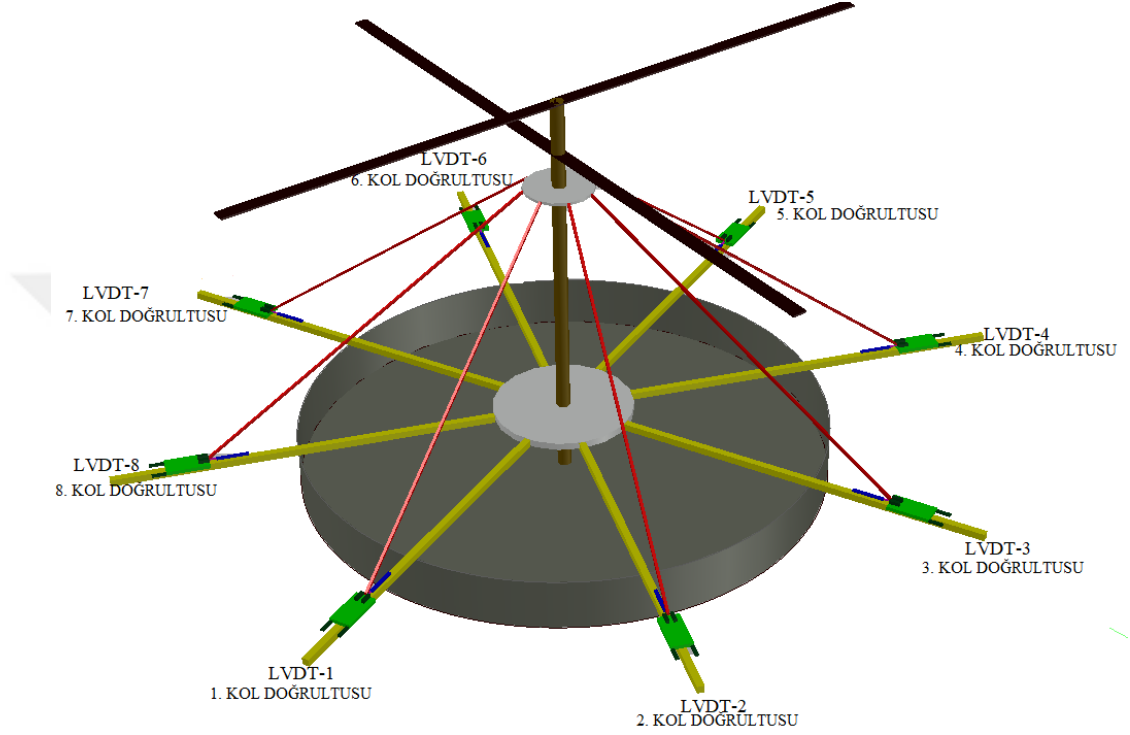
Referans deney elemanının yapılmasının amacı, referans deney elemanlarını kasnaklı olarak üretilen deney elemanları ile karşılaştırarak kubbeli yapılarda kasnağın ve kasnak boyutunun kubbe üzerindeki etkisini incelemektir. Şekil 4.5’de yapılan deney elemanlarının çizimi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Yapılan deney elemanlarının çizimi.

4.1.1 Deplasman ölçerlerin yerleştirilmesi

Deneyleerde meydana gelen uzama ve kısalmaları ölçmek için sekiz adet LVDT kullanılmıştır. Deney sırasında meydana gelen yatay deplasmanları ölçmek için kullanılan LVDT'lerin deney elemanları üzerine nasıl yerleştirildiği Şekil 4.6 ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Şemsiye mekanizmasına LVDT'lerin yerleştirilmesi.

Çizelge 4.1. Şemsiye mekanizmasına LVDT'lerin bağlanması.

KOL DOĞRULTULARI	LVDT İSİMLERİ
1. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-1
2. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-2
3. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-3
4. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-4
5. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-5
6. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-6
7. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-7
8. KOL DOĞRULTUSU	LVDT-8

Şekil 4.7’de deney elemanları için kullanılan veri toplama cihazı verilmiştir. Veri toplama cihazına sekiz adet LVDT ve dört adet S tipi yük hücresi bağlanmıştır. Deneyden elde edilen veriler, deney boyunca saniyede 250 data kaydetme özelliğine sahip on altı kanallı Test- Lab veri toplama cihazı aracılığıyla kayıt altına alınmıştır.



Şekil 4.7. Veri toplama cihazına LVDT’lerin ve S tipi yük hücrelerinin bağlanması.

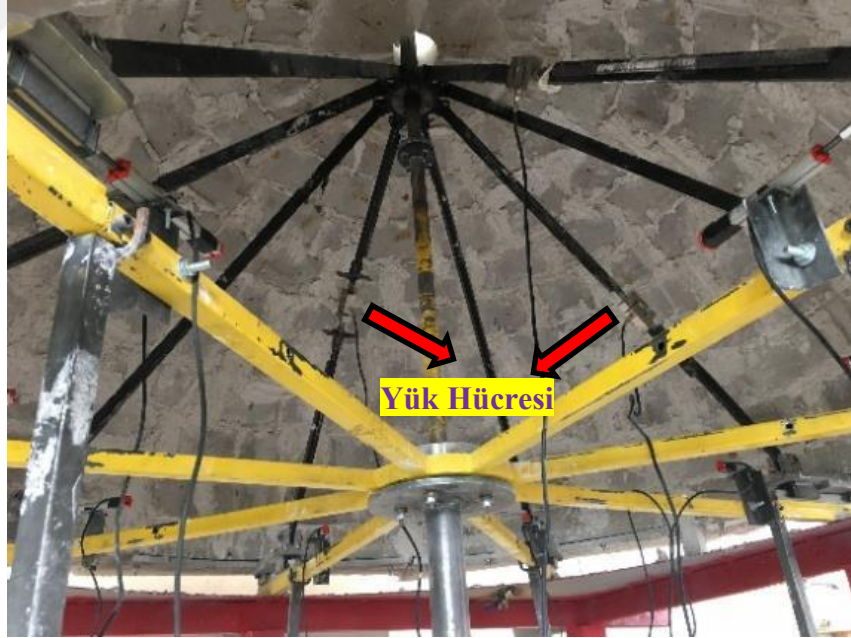
4.2 Model-Ref (Boşluksuz Referans) Deney Elemanı

Deneyle Kayseri yöresine ait olan tuf taşı olarak adlandırılan ve genellikle yığma bina ve cami inşaatlarında kullanılan volkanik kökenli taş, kubbe deney elemanlarını örme işleminde taşları birleştirmek için horasan harcı kullanılmıştır. Kullanılan horasan harcının kireç/kum/taş tozu karışım oranı yüzde olarak % 40, % 40 ve % 20’dir. Kubbe örme işleminde kullanılan taşların boyutları 250x150x100 mm³ ebadındadır. Kubbe deney elemanları eğrisel boyuta sahip olduğundan dolayı deney elemanları örülürken kubbenin üst kısımlarında yer alan taşların boyutlarında değişimler olmuştur. Taşlar Aksaray Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında taş kesme makinası ile kesilmiştir. Kesilen taşlar arasına horasan harcı konularak örme işlemi tamamlanmıştır. Şekil 4.8(a)’da Model-Ref deney elemanının genel geometrisi gösterilmiştir. Model-Ref deney elemanında kasnak uygulaması yapılmamıştır. Model-Ref deney elemanına aynı zamanda boşluksuz referans deney elemanı da denilmiştir. Şekil 4.8(b)’de ise Model-Ref deney elemanına LVDT’lerin ve yük hücrelerinin nasıl bağlandığı gösterilmiştir. Yatay deplasmanları ölçmek için toplamda sekiz adet LVDT mesnetlere yerleştirilmiştir. Yapılan bütün deney elemanlarında kubbenin alt uçları kayıcı mesnet olarak tasarlanmıştır.

Dört adet S tipi yük hücresi de karşılıklı olarak çelik çubuklara yerleştirilmiştir. Bu yük hücreleri sayesinde deney sonucunda Model-Ref'in taşıdığı maksimum yük ölçülmüştür.



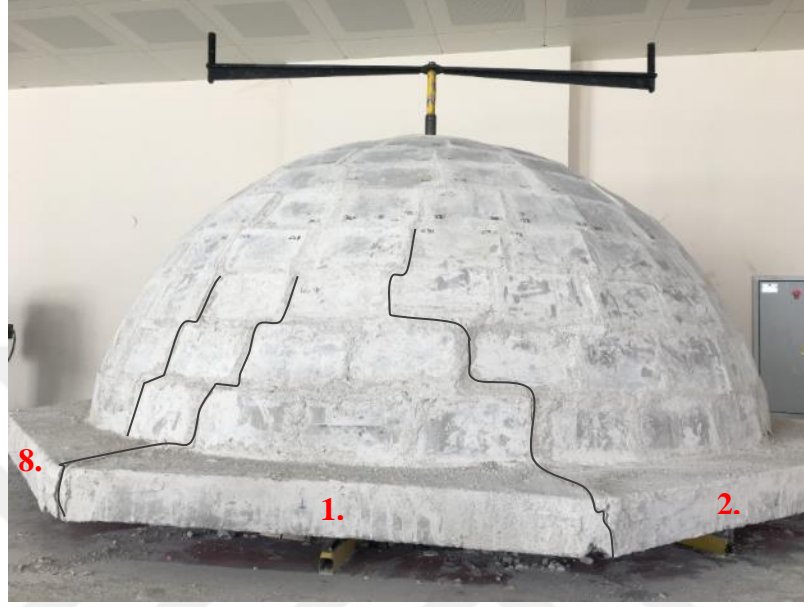
(a)



(b)

Şekil 4.8. a) Model-Ref deney elemanının genel geometrisi, b) Model-Ref deney elemanına LVDT ve yük hücrelerinin bağlanması.

Şekil 4.9’da Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kubbe yüzeyinde kubbe eteğinden başlayan nispeten kilit taşına doğru yönelmiş sekizgenlerin köşelerinde çatlaklar meydana gelmiştir. Çatlak genişlikleri de diğer modellere göre daha geniştir.

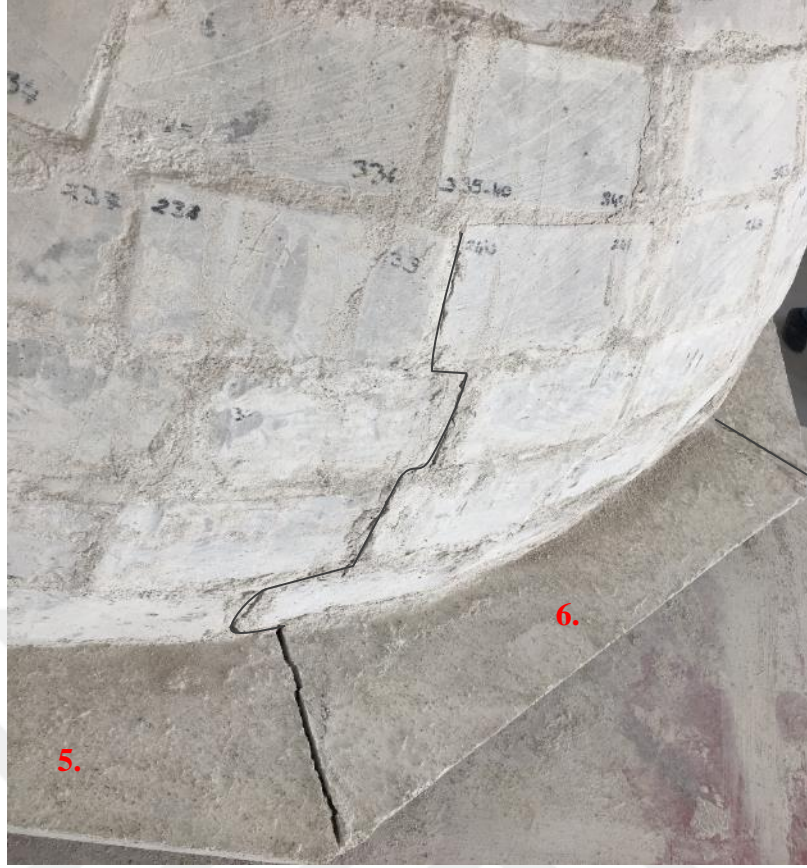


(a) 1.-2. ve 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(b) 3.-4. ve 4.-5. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.9. Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali.



(c) 5.-6. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(d) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.

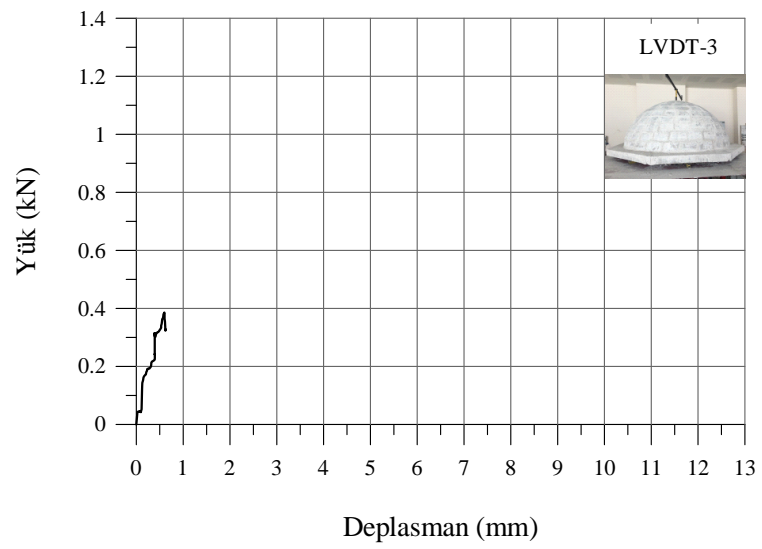
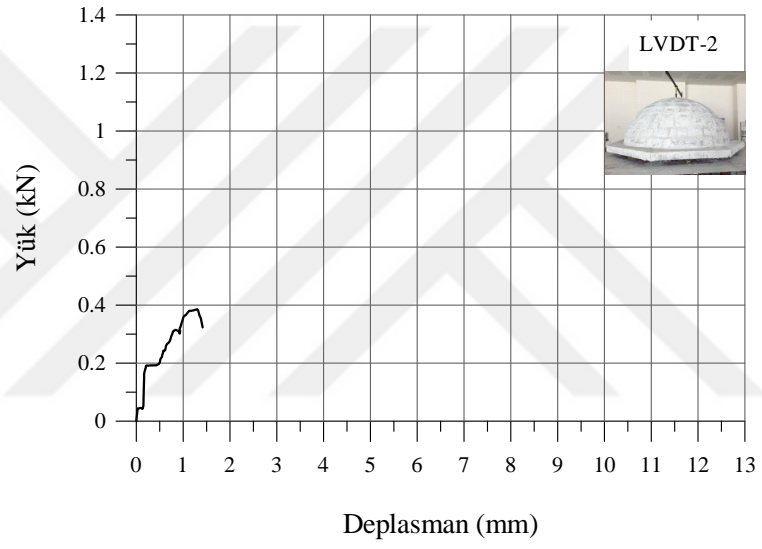
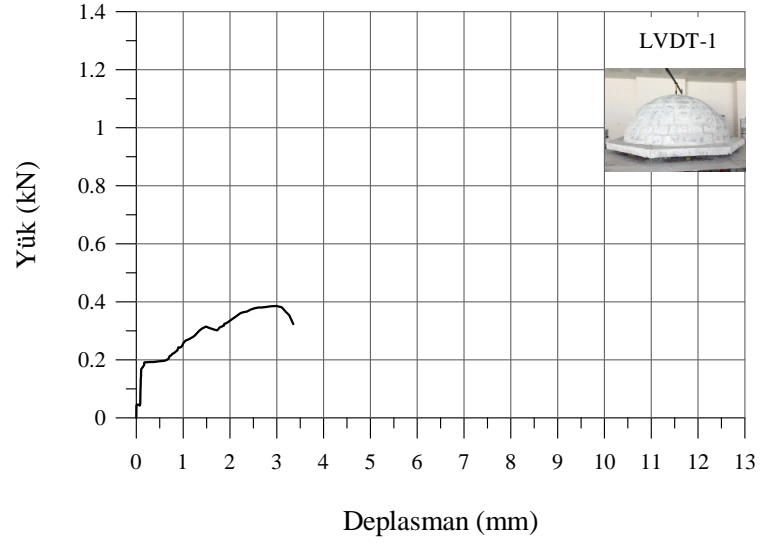
Şekil 4.9 (devam). Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali.



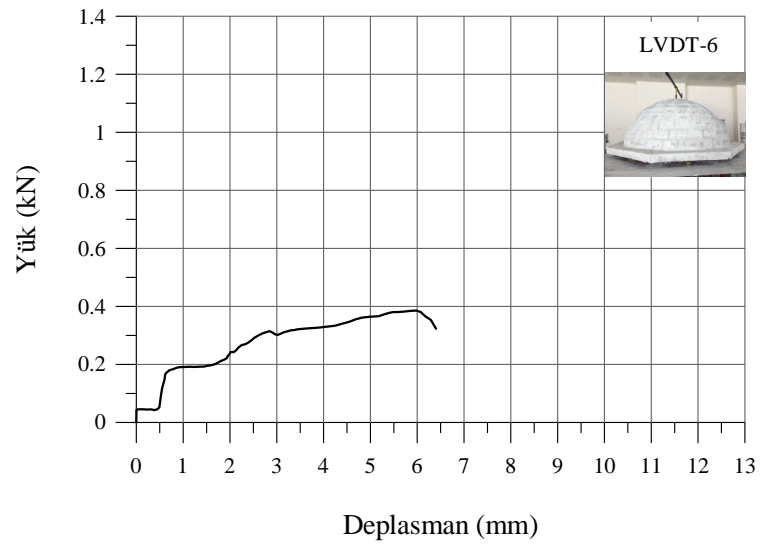
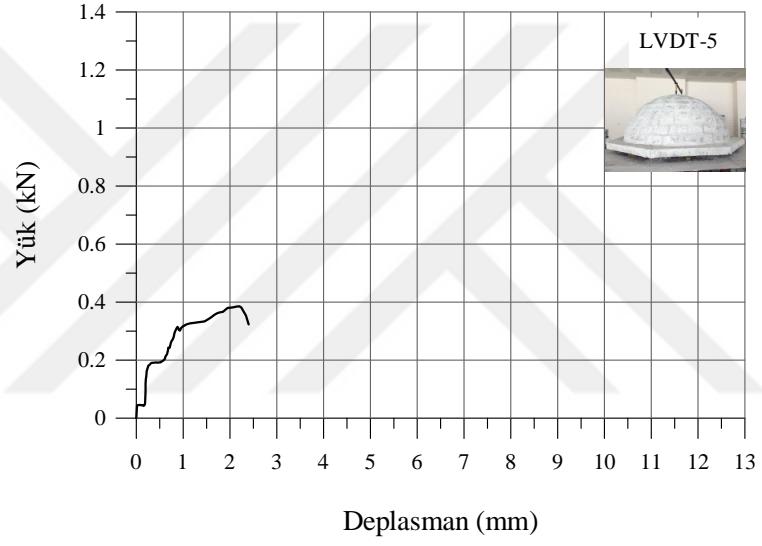
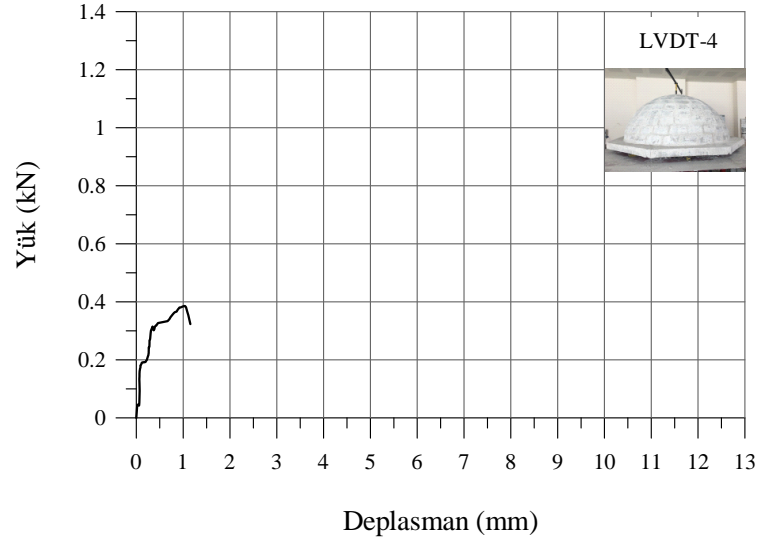
(e) 7.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.9 (devam). Model-Ref deney elemanının deney sonrası hali.

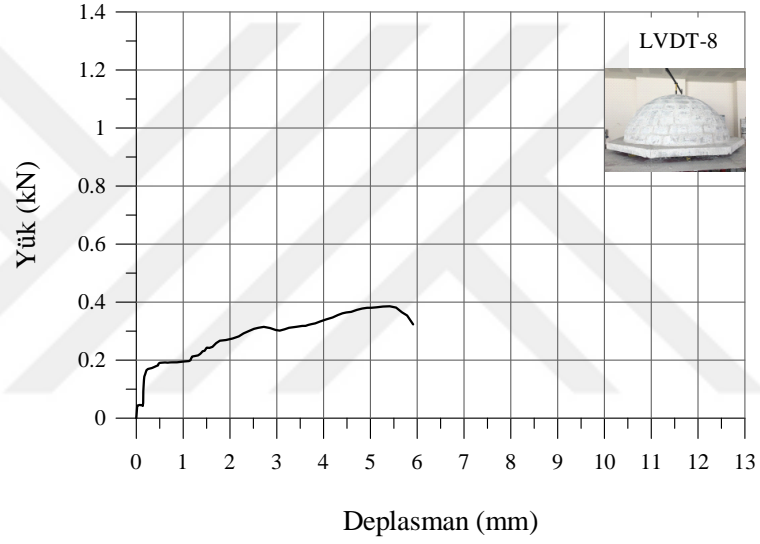
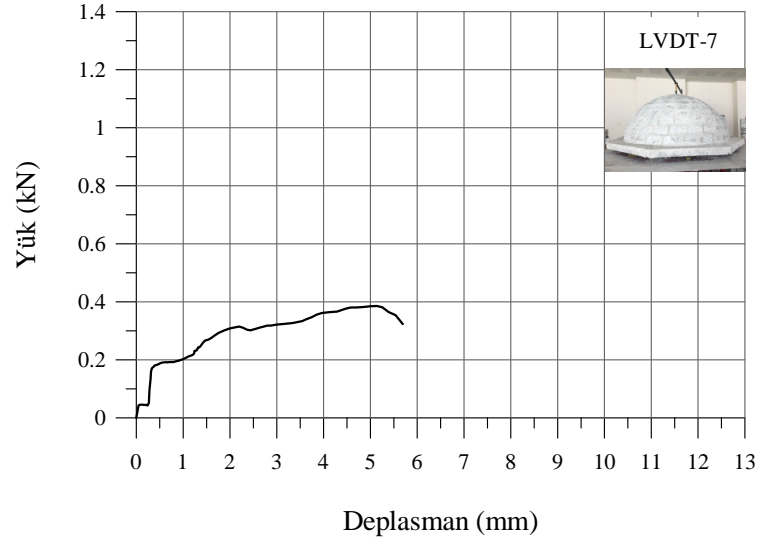
Şekil 4.10'da verilen yük- deplasman grafiğinde görüldüğü gibi boşluksuz referans deney elemanı (Model-Ref) maksimum 0,385 kN yük taşımıştır. Maksimum yük altında maksimum deplasman 5,979 mm değeriyle LVDT-6'dan elde edilmiştir. Minimum deplasman ise LVDT 3'den ölçülmüştür. Bu değer 0,599 mm'dir. Deney sonucunda maksimum deplasman LVDT-6 ve LVDT-8'den ölçülmüştür. Bu değerler sırasıyla 6,352 mm ve 5,975 mm'dir. Yük- deplasman grafiğinde de belirtildiği gibi minimum deplasman değeri 0,690 mm ile LVDT-3'den ölçülmüştür. Bunu takiben minimum deplasman 1,246 mm değeriyle LVDT-4'den elde edilmiştir. Minimum deplasmanın ölçüldüğü bölgelerde kılcal çatlaklar meydana gelirken, maksimum deplasmanın ölçüldüğü bölgelerde 3-4 cm genişliğinde çatlaklar meydana gelmiştir.



Şekil 4.10. Model-Ref deney elemanına ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.10 (devam). Model-Ref deney elemanına ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.10 (devam). Model-Ref deney elemanına ait yük- deplasman grafiği.

4.3 Model-100 Deney Elemanı

Model-100 deney elemanının örme işlemi Model-Ref deney elemanındaki gibi yapılmıştır. Model-Ref'den farklı olarak kubbe etrafına 100 mm yüksekliğinde kasnak yapılmıştır. Kasnak kısmında taşın boyutları $250 \times 150 \times 100 \text{ mm}^3$ olarak örülmüştür. Şekil 4.11(a)'da Model-100 deney elemanının deney öncesi hali ve Şekil 4.11(b)'de LVDT'lerin Model-100 deney elemanına nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.11. a) Model-100 deney elemanının deney öncesi hali ve b) LVDT'lerin Model-100 deney elemanına yerleştirilmesi.

Deney öncesinde de tahmin edildiği gibi kasnaklı üretilen kubbe deney elemanı, kasnaksız olarak üretilen kubbe deney elemanından daha fazla yük taşımıştır. Model-100 kubbe deney elemanında tek bir kol doğrultusuna gelen maksimum yük 0,499 kN'dur. Maksimum yük altındaki maksimum deplasman LVDT-6'dan 5,752 mm ve bunu takiben LVDT-7'den 4,157 mm ölçülürken, minimum deplasman LVDT-3 ve LVDT-2'den ölçülmüştür. Maksimum yük altındaki minimum deplasman değerleri

sırası ile 0,085 mm ve 0,297 mm'dir. Şekil 4.12'de deney sonrasında Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi deney sonucunda maksimum deplasman maksimum göçmenin olduğu yerlerde yer alan LVDT-6 ve LVDT-7'den ölçülmüştür.

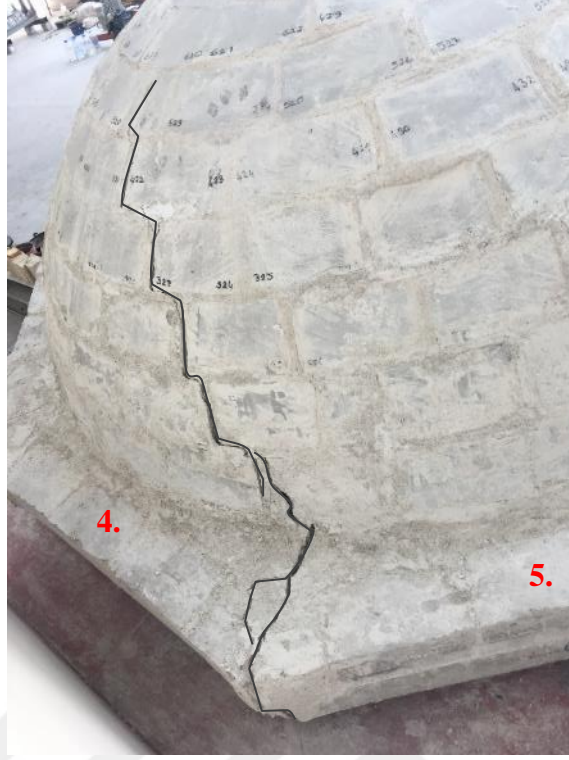


(a) 1.-2. kenarlardan başlayan çatlaklar.

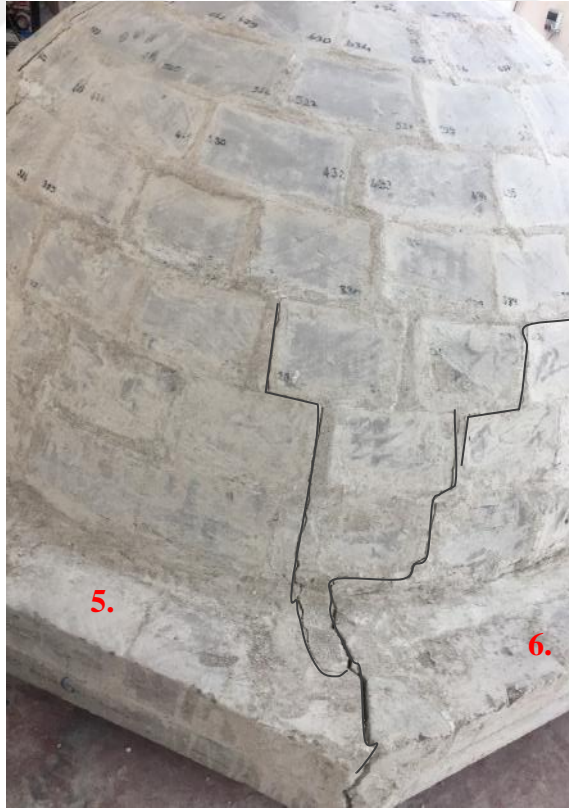


(b) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.12. Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali.



(c) 4.-5. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(d) 5.-6. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.12 (devam). Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali.



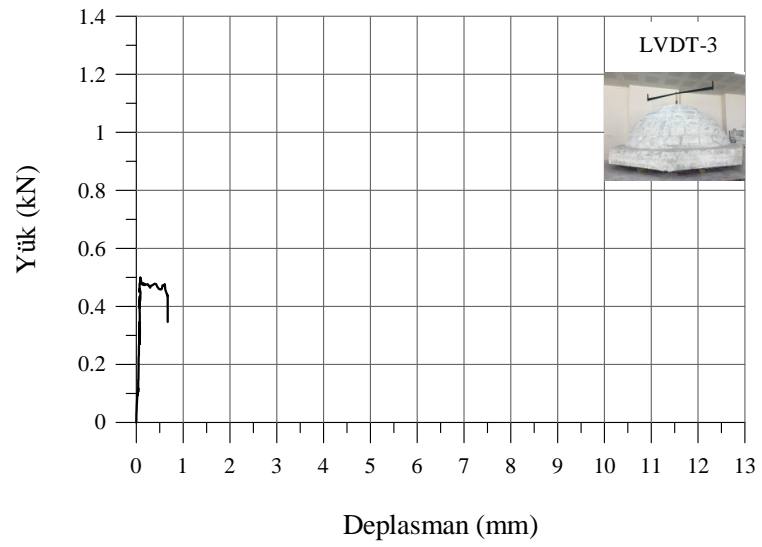
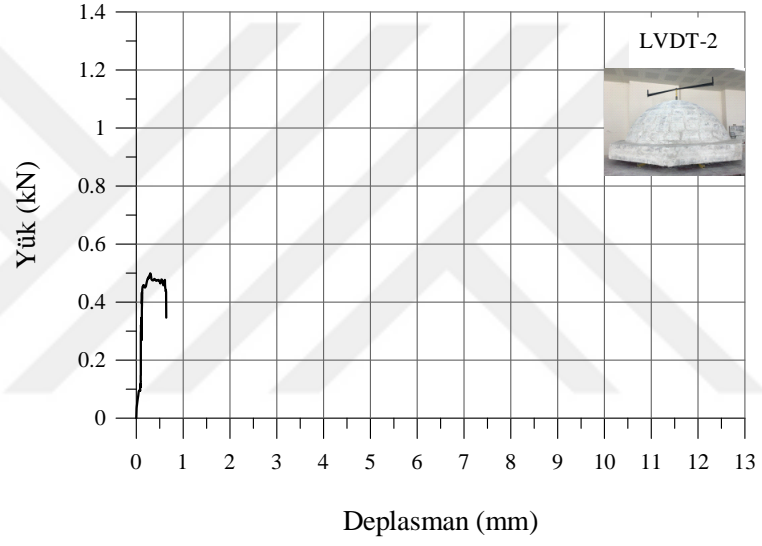
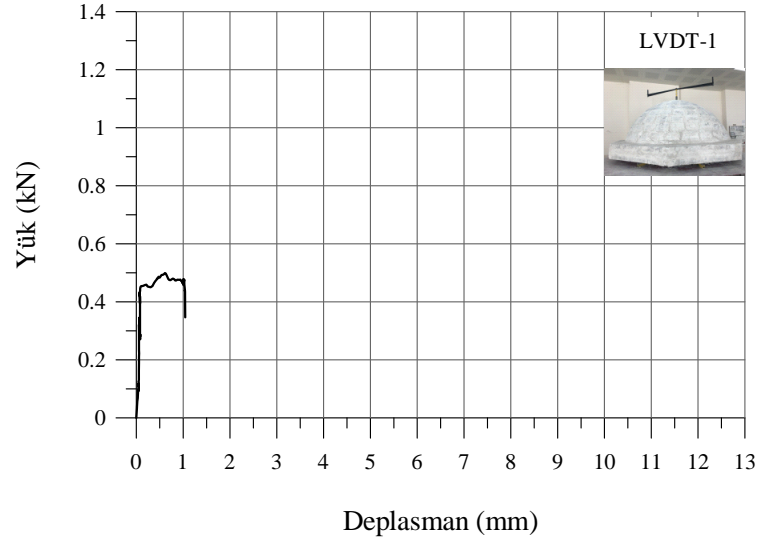
(e) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.



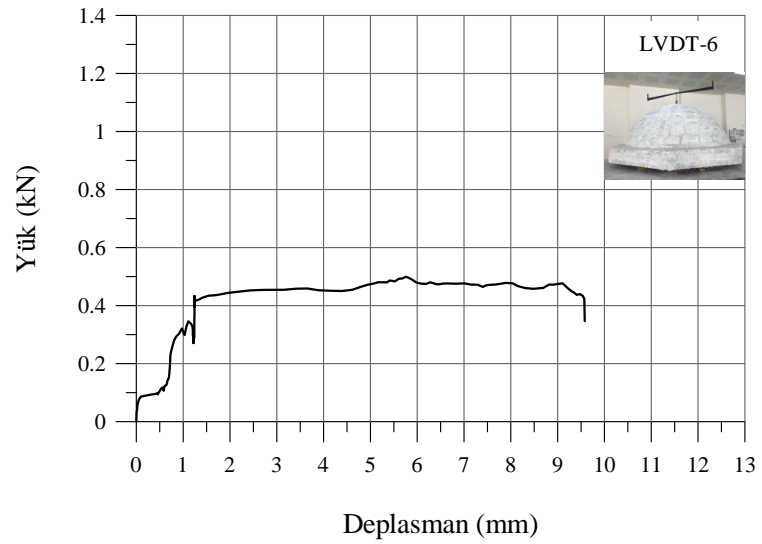
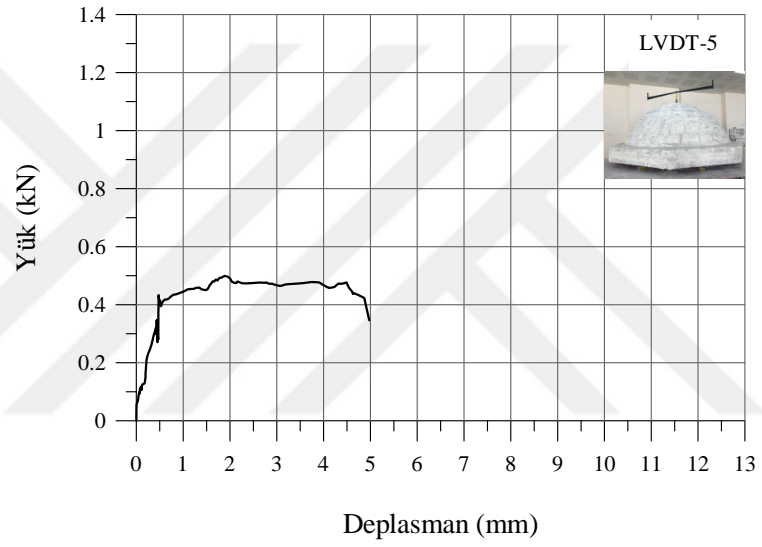
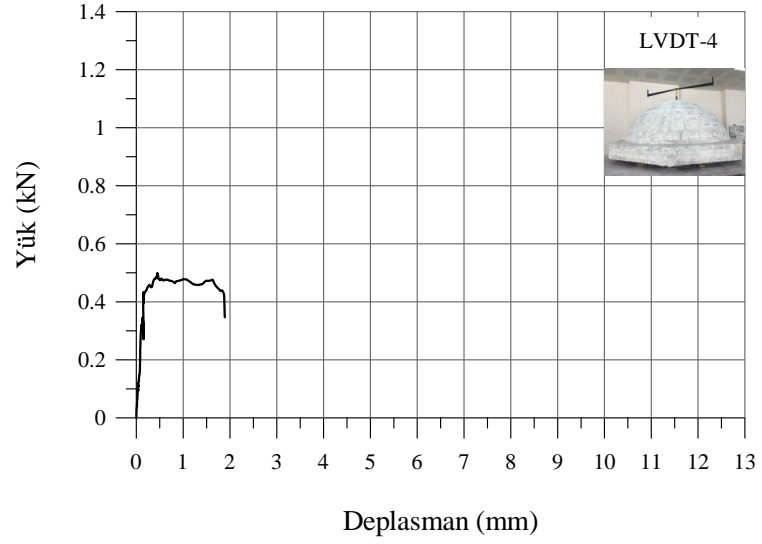
(f) Kubbe içerisinde oluşan çatlaklar.

Şekil 4.12 (devam). Model-100 deney elemanının göçme sonucundaki hali.

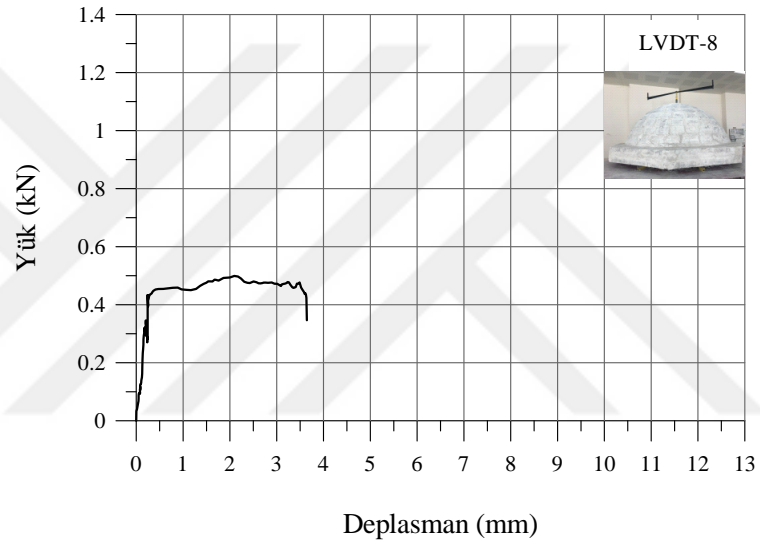
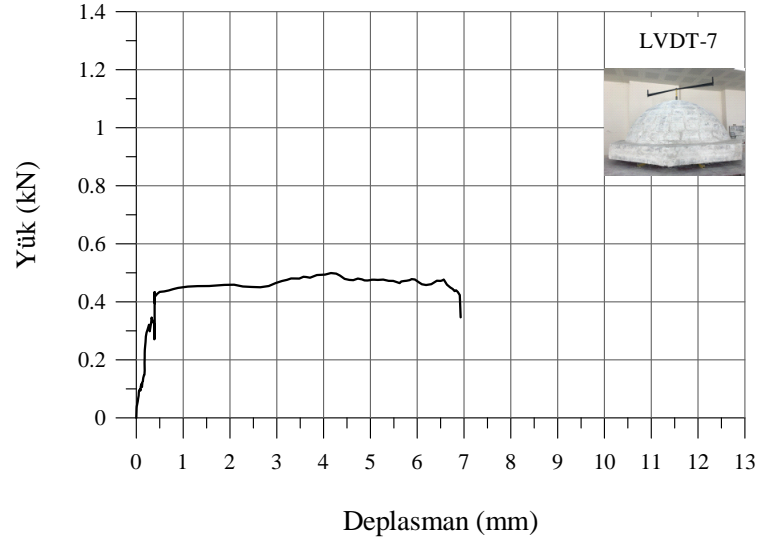
Deney sonucunda maksimum deplasman Şekil 4.13'de verilen yük- deplasman grafiğine bakılarak LVDT-6'dan 9,514 mm ve LVDT-7'den 6,992 mm olarak ölçüldüğü görülmektedir. Minimum deplasman çatlamanın az olduğu yerlerde yer alan LVDT-2 ve LVDT-3'den elde edilmiştir. Sırası ile bu değerler 0,512 mm ve 0,623 mm'dir. Çatlak genişlikleri Model-Ref boşluksuz referans deney elemanına göre küçük ve Model-100 deney elemanında daha az yerlerden çatlamlar meydana gelmiştir.



Şekil 4.13. Model-100'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.13 (devam). Model-100'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.13 (devam). Model-100'e ait yük- deplasman grafiği.

4.4 Model-200 Deney Elemanı

Model-200'de diğer modellerde olduğu gibi kubbe örme işlemi, boyutları 250x150x100 mm³ olan tuf taşı ile bu taşı birleştirmek amacıyla yapılan horosan harcı kullanılarak yapılmıştır. Bu model de, kasnak yüksekliği 200 mm olan kubbe deney elemanı deneye tabi tutulmuştur. Model-200 deney elemanı için LVDT'lerin yerleştirilmesi Şekil 4.14(a)'da, deney düzeneğinin hazırlanması ise Şekil 4.14(b)'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.14. a) Model-200 deney elemanına LVDT'lerin yerleştirilmesi, b) Model-200 deney düzeneğinin hazırlanması.

Şekil 4.14(a)'da gösterildiği gibi deney düzeneğine, sekiz adet yatay deplasmanı ölçmek için LVDT'ler yerleştirilmiştir. Şekil 4.15'de Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali gösterilmiştir. Çatlamlar kasnaklarda başlayıp, kubbe eteklerinde devam etmiştir. Derzlerde meydana gelen çatlakların genişliği 2-3 cm arasında değişmektedir. Deney sonucunda elde edilen yük- deplasman grafikleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Model-200'de her bir kol doğrultusu üzerine gelen

maksimum yük 0,924 kN'dur. Maksimum yüke ulaşıldığında maksimum deplasman 3,928 mm olarak LVDT-6'dan elde edilmiştir. Bu değeri 3,123 mm deplasman yapan LVDT-7 takip etmektedir. Bu LVDT'ler kubbeye en fazla çatlakların oluştuğu yerlerde meydana gelen deplasmanları ölçmektedir. Şekil 4.16'da görüldüğü gibi deney sonrasında Model-200 üzerine yerleştirilen LVDT'den en fazla deplasman değeri 4,002 mm ile LVDT-6'dan ölçülürken en az deplasman ise 0,431 mm ile LVDT-2'den elde edilmiştir. En az deplasman olan yerde çatlama kılcal şeklinde olmuştur.



(a) 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(b) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.15. Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali.



(c) 4.-5. kenarlardan başlayan çatlaklar.



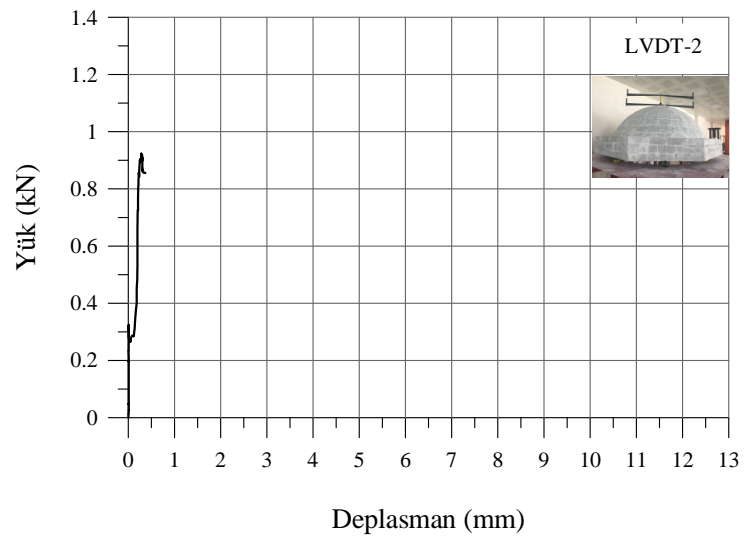
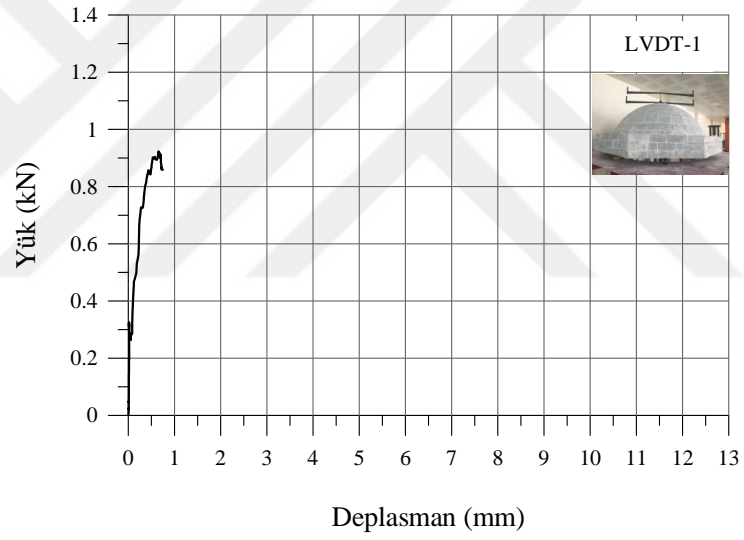
(d) 5.-6. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.15 (devam). Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali.

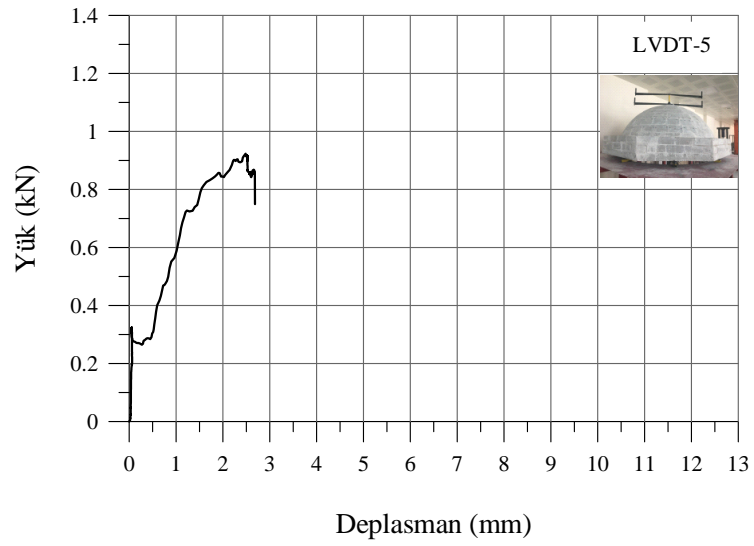
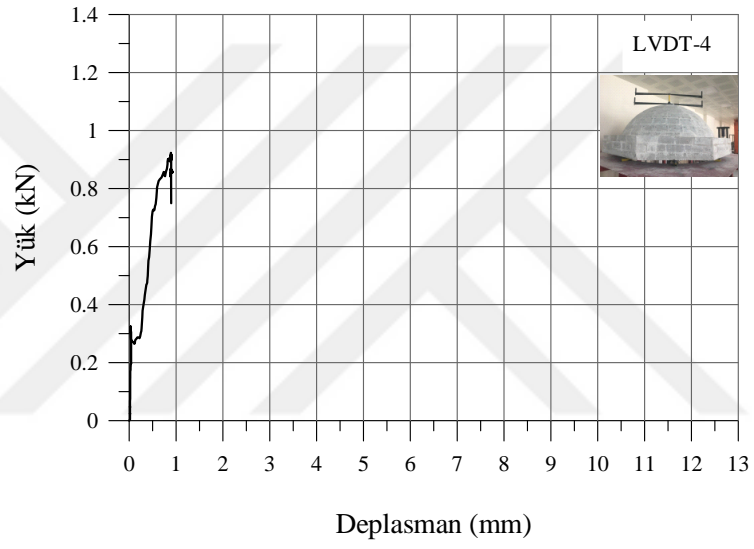
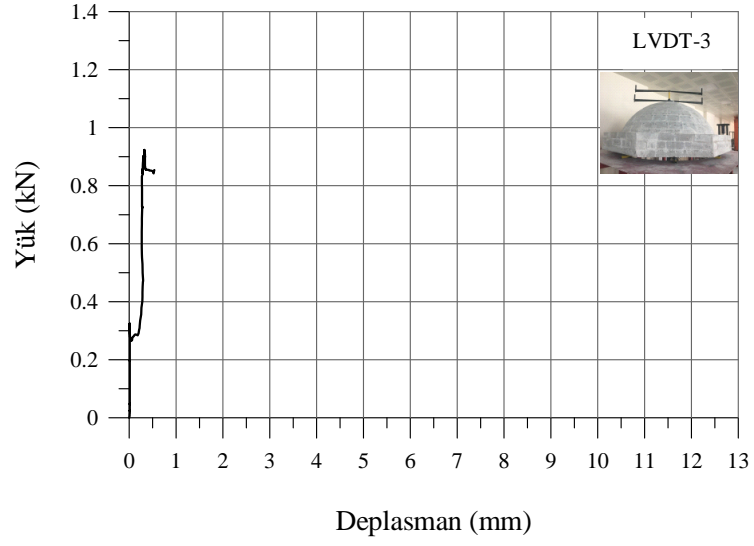


(e) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.

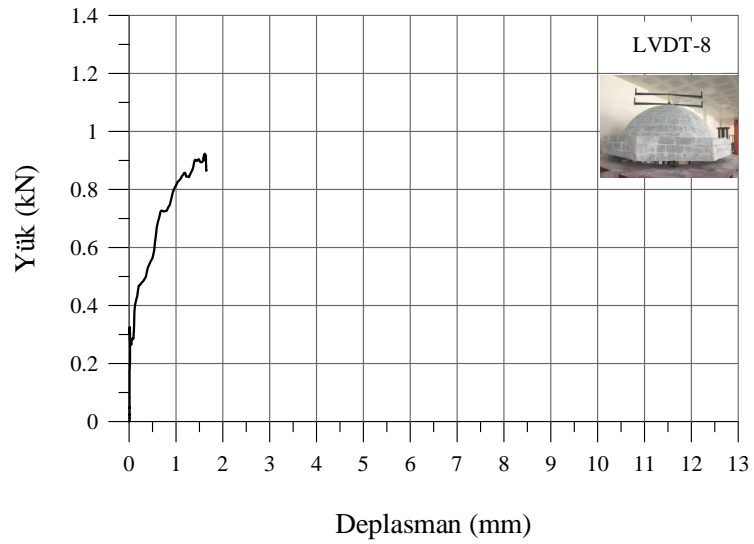
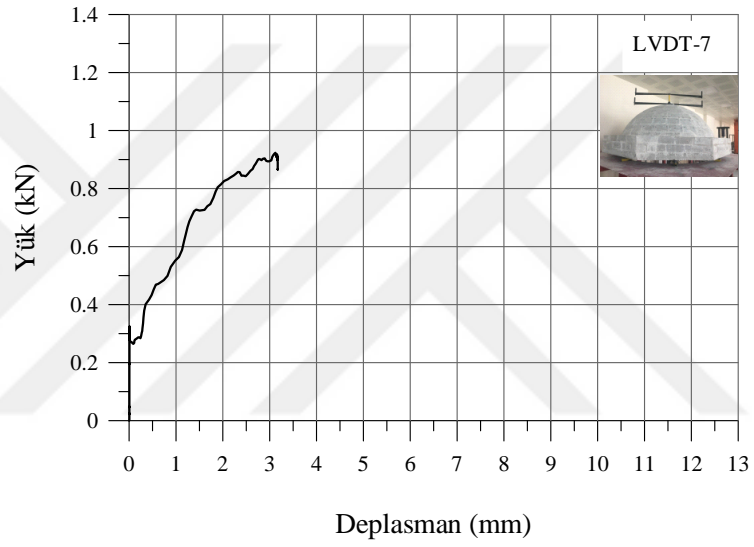
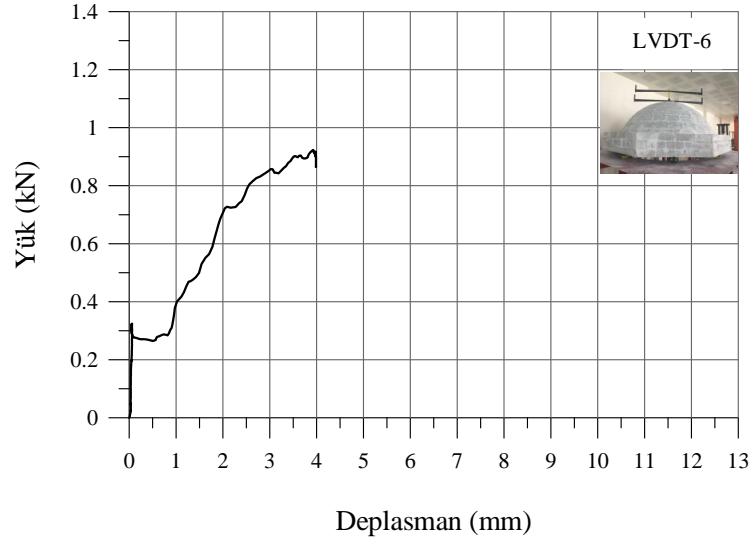
Şekil 4.15 (devam). Model-200 deney elemanının göçme sonucundaki hali.



Şekil 4.16. Model-200'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.16 (devam). Model-200'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.16 (devam). Model-200'e ait yük- deplasman grafiği.

Yük 0,6 kN iken kubbede ilk kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Yük artmaya devam ettikçe kılcal olan çatlak genişlikleri de artmıştır. Model-300 deney elemanı maksimum 0,988 kN'luk yük taşımıştır. Maksimum yüke ulaşıldığında maksimum deplasman değeri 3,664 mm olarak LVDT-3'den ölçülürken, minimum deplasman ise 0,378 mm ile LVDT-8'den ölçülmüştür. Model-300'ün deney sonucundaki hali Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi maksimum deplasmanın ölçüldüğü yerde maksimum çatlaklar, minimum deplasmanın ölçüldüğü yerlerde ise kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir. Deney sonucunda maksimum deplasman 5,524 mm ile LVDT-3'den, minimum deplasman ise 0.531 mm ile LVDT-6'dan ve bunu takip eden 0.618 mm ile LVDT 7'den ölçülmüştür. Şekilde 4.19'da görüldüğü gibi LVDT-6 ve LVDT-7'nin yer aldığı 6. ve 7. kasnak kenarlarından başlayan çatlak ve açılmalar kubbenin diğer yerlerine göre oldukça azdır. Model-300'deki çatlak genişlikleri Model-200'e göre daha azdır. Model-200'de kubbenin birçok yerinde çatlaklar oluşurken, Model-300'de 2. ve 3. kasnak kenarlarından başlayıp kubbe tepesine doğru incelen çatlak meydana gelmiştir. LVDT'lerle ölçülen yük-deplasman grafikleri Şekil 4.19'da verilmiştir.



(a) 1.-2. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.18. Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.



(b) 2.-3. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(c) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.18 (devam). Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.



(d) 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.



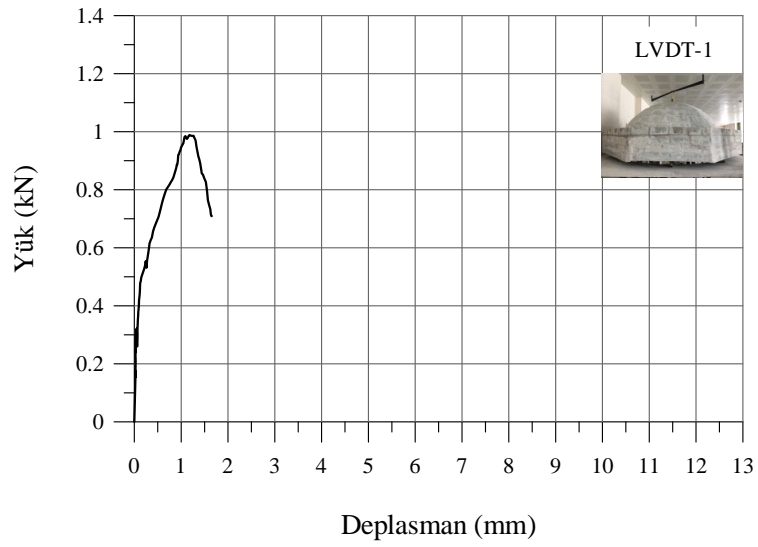
(e) Model-300 kubbe deney elemanında oluşan çatlak genişliği.

Şekil 4.18 (devam). Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.

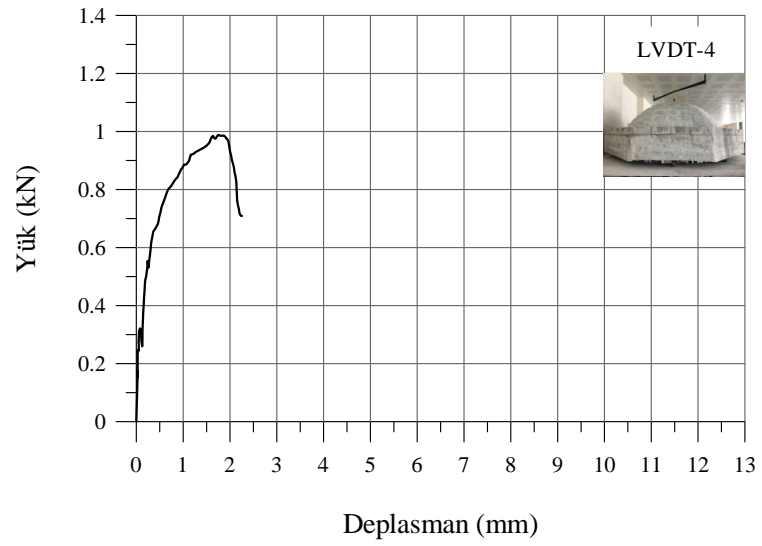
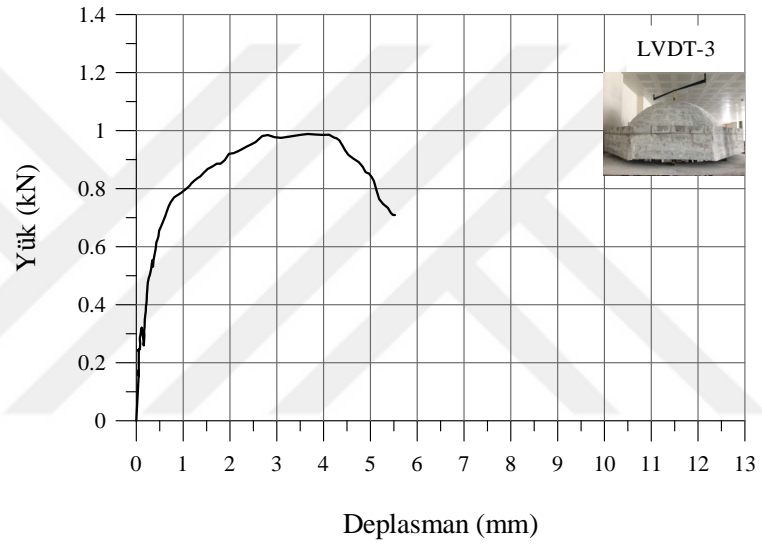
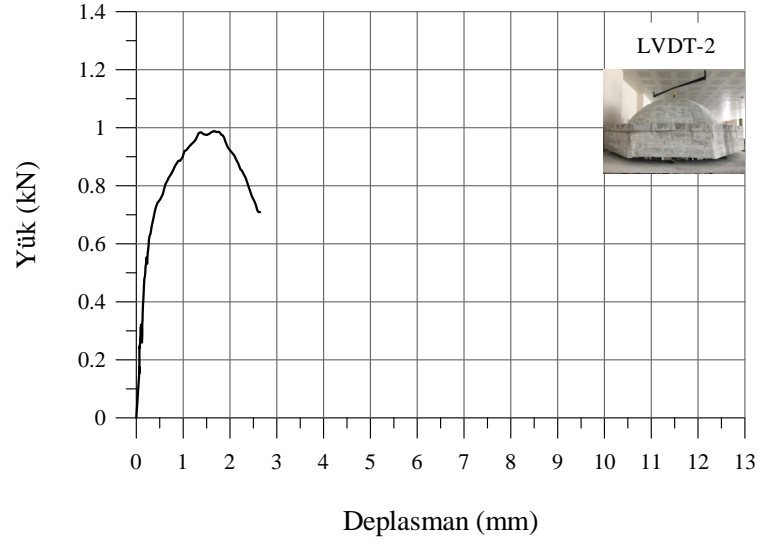


(f) Kubbe içerisinde oluşan çatlaklar.

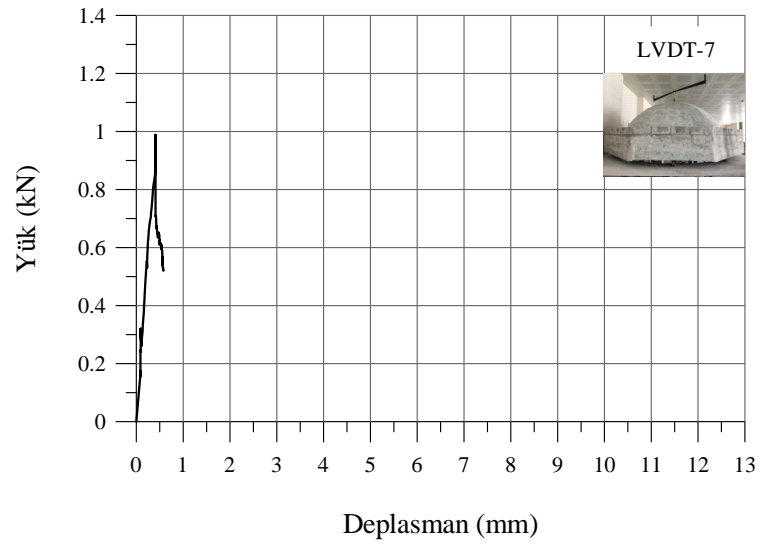
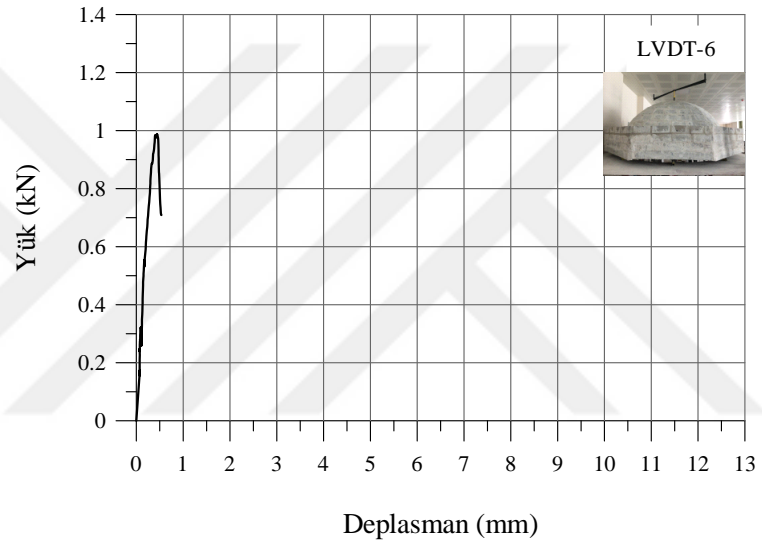
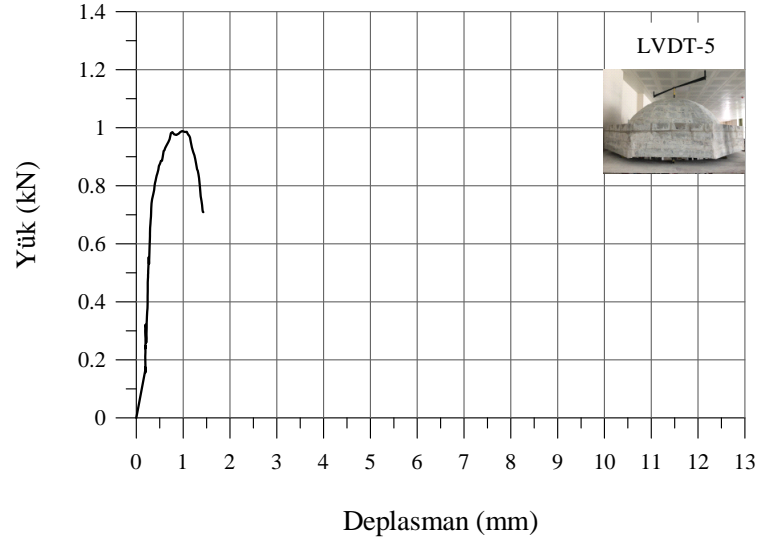
Şekil 4.18 (devam). Model-300 deney elemanının deney sonucundaki hali.



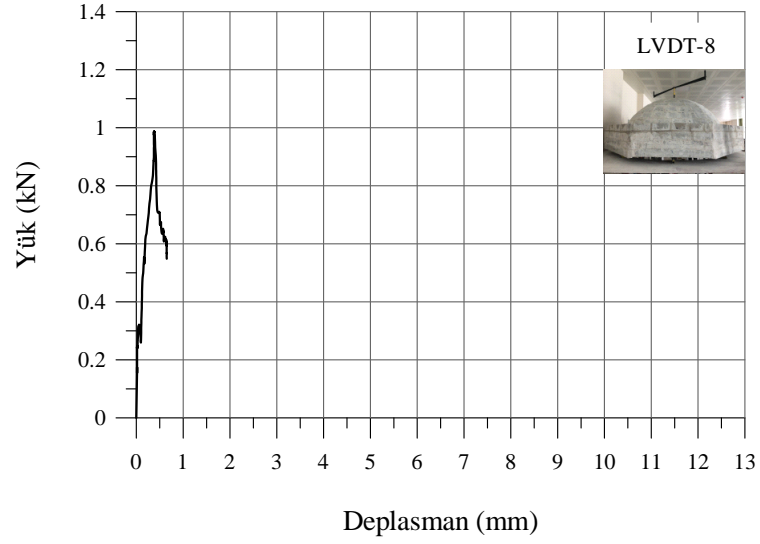
Şekil 4.19. Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.19 (devam). Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.19 (devam). Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.19 (devam). Model-300'e ait yük- deplasman grafiği.

4.6 Model-400 Deney Elemanı

Model-400 deney elemanında kasnak yüksekliği 400 mm olarak üretilmiştir. Diğer deney elemanlarında olduğu gibi sekiz adet yatay deplasmanı ölçen LVDT'ler ve mesnetlere gelen yükü ölçmek için dört adet yük hücreleri yerleştirilmiştir. Şekil 4.20'de Model-400 deney elemanının deney öncesi hali gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Model-400 Deney elemanının deney öncesi hali.

Yükleme işlemi diğer deneylerde olduğu gibi uygulanmıştır. Daha önceden de tahmin edildiği gibi Model-400 deney elemanı diğer modellere göre daha fazla yük taşımıştır. Kasnak yüksekliği arttıkça modelin yük taşıma kapasitesi artıp, çatlak sayıları ve genişlikleri azalmıştır. Model-400 deney elemanı maksimum 1,331 kN yük taşımıştır. Maksimum yük altında, maksimum deplasman kubbenin 3. ve 2. kol doğrultuları üzerinde yer alan LVDT-3 ve LVDT-2'den elde edilmiştir. Sırası ile bu değerler 2,777 mm ve 1,487 mm'dir. Yük 1,331 kN iken minimum deplasman 0,424 mm ve 0,607 mm ile LVDT-7 ve LVDT-8'den okunmuştur.

Şekil 4.21'de Model-400'ün deney sonrası hali verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney sonrasında maksimum deplasman, çatlak genişliklerinin fazla olduğu yerlerde yer alan LVDT'lerden ölçülmüştür. Maksimum deplasman LVDT-3'den 4,617 mm ve LVDT-2'den 2,999 mm okunmuştur. Minimum deplasman değerleri ise kılcal çatlakların oluştuğu yerde bulunan LVDT-7 ve LVDT-8'den alınmıştır. Bu değerler sırası ile 0,715 mm ve 1,110 mm'dir. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi çatlak genişliği diğer modellere göre daha küçüktür. Şekil 4.22'de Model-400'e ait yük- deplasman grafikleri verilmiştir.



(a) 1.-2. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.21. Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.



(b) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(c) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.21 (devam). Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.



(d) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.



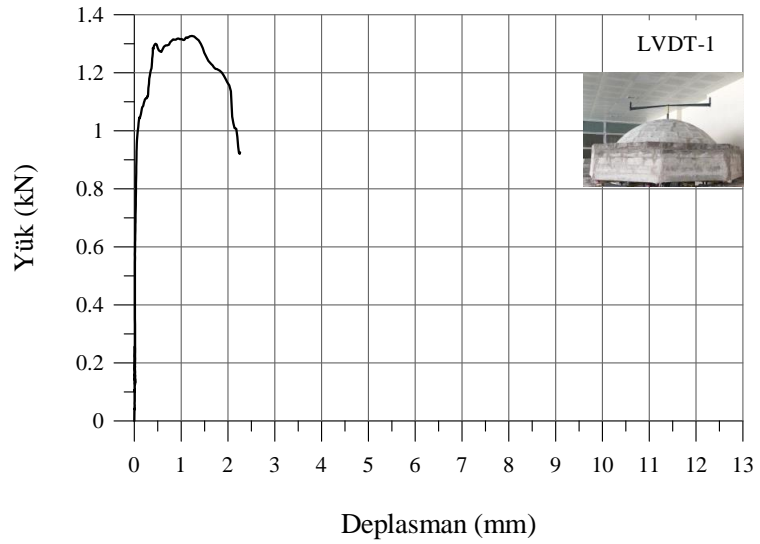
(e) 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.21 (devam). Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.

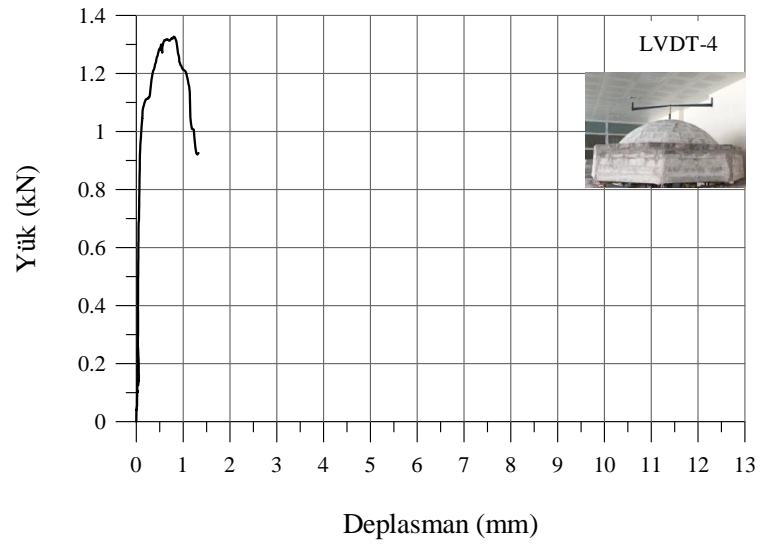
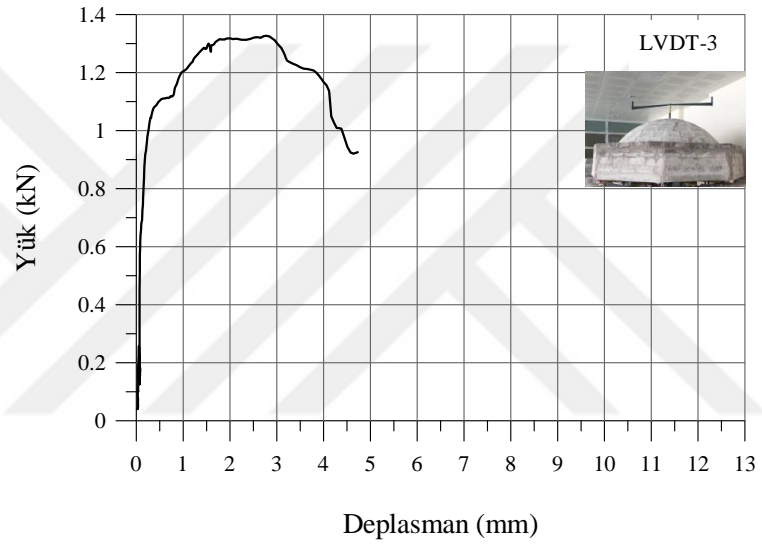
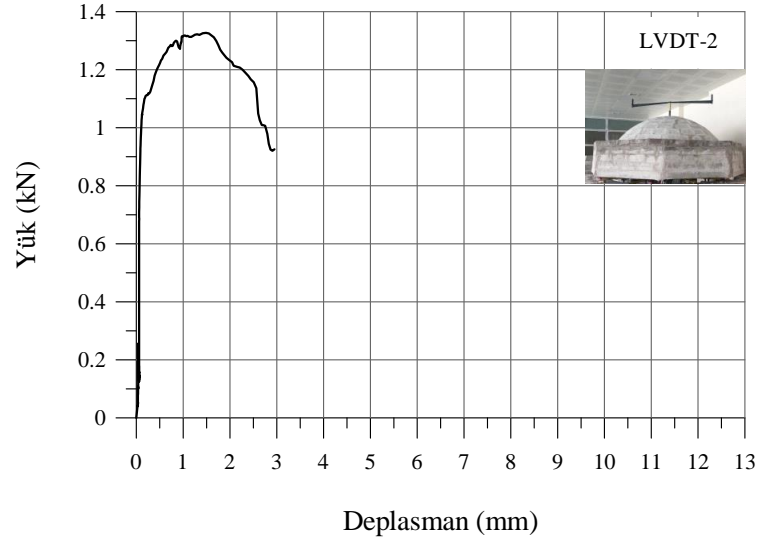


(f) Kubbe içerisinde oluşan çatlaklar.

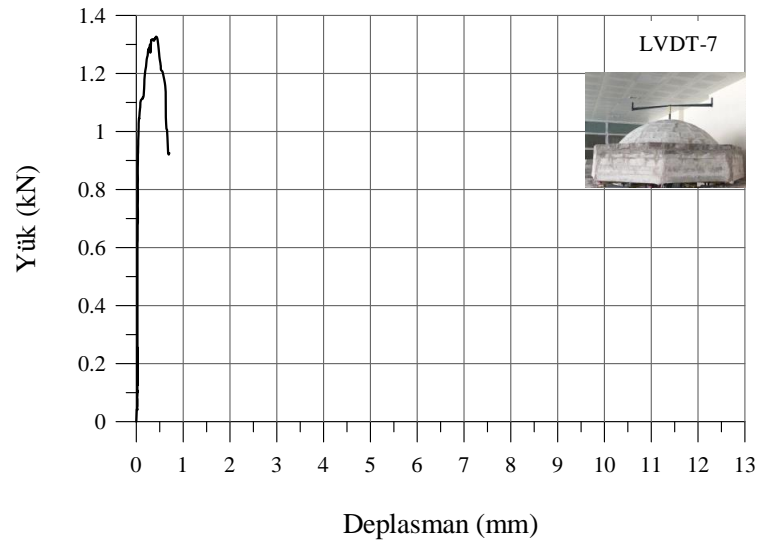
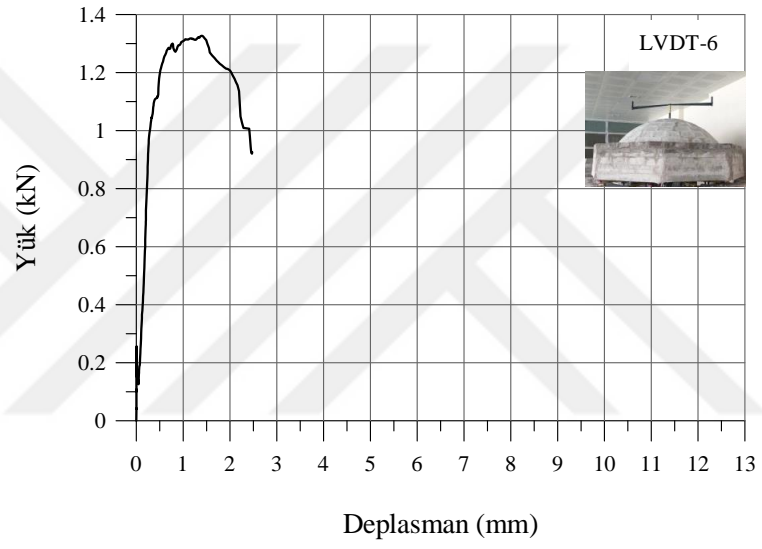
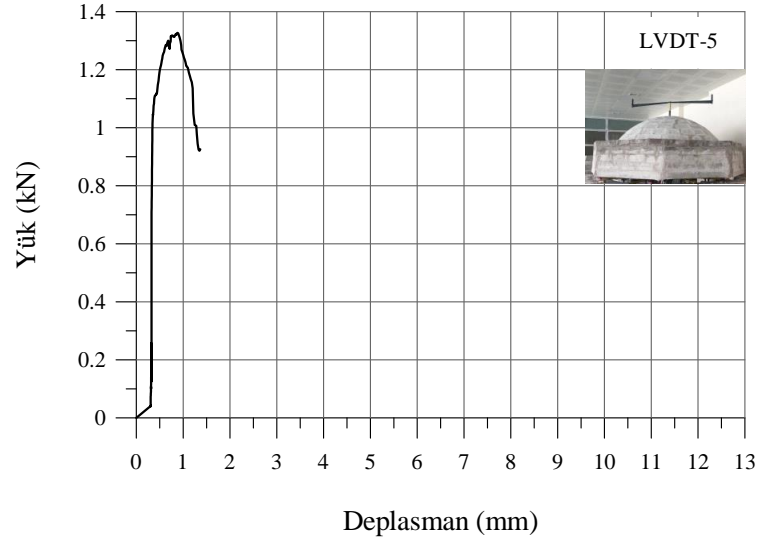
Şekil 4.21 (devam). Model-400 Deney elemanının deney sonrası hali.



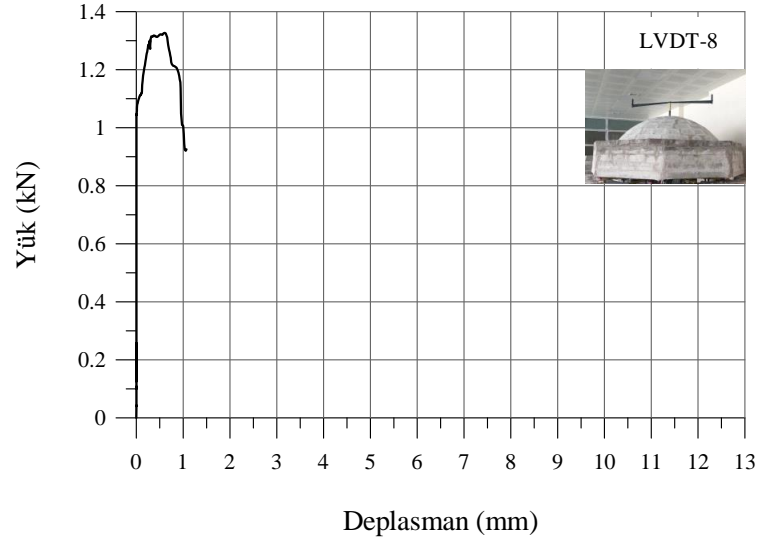
Şekil 4.22. Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.22 (devam). Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.22 (devam). Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.22 (devam). Model-400'e ait yük- deplasman grafiği.

4.7 Model-Ref/2,5 (Boşluklu Referans Deney Elemanı) Deney Elemanı

Model-Ref/2,5 deney elemanı kasnaksız ve diğer deney elemanlarından farklı olarak boşluklu (pencereli) üretilmiştir. Karşılıklı dört bölgeden kubbe üzerinde boşluklar açılmıştır. Yüzeysel olarak açılan bu boşlukların oranı % 2,5'dir. Boşluk (pencere) yüksekliği 220 mm, uzunluğu 250 mm ve genişliği 150 mm'dir. Boşluk üzerlerine ahşaptan lento uygulaması yapılmıştır. Şekil 4.23'de Model-Ref/2,5 deney elemanı için pencere sisteminin örümü ve Model-Ref/2,5 deney elemanının deney öncesi hali gösterilmiştir.



(a)

Şekil 4.23. Model-Ref/2,5 (a) deney elemanının örümü ve (b) deney öncesi hali.



(b)

Şekil 4.23 (devam). Model-Ref/2,5 (a) deney elemanının örümü ve (b) deney öncesi hali.

Yük 0,101 kN'a geldiğinde kubbe üzerinde ilk kılcal çatlaklar meydana gelmeye başlamıştır. Deney sonucunda Model-Ref/2,5 deney elemanında kol doğrultuları üzerine gelen maksimum yük 0,364 kN'dur. Maksimum yük altında maksimum deplasman LVDT-6 ve LVDT-7'de meydana gelmiştir. Bu değerler sırası ile 9,739 mm ve 6,914 mm'dir. Maksimum yük altında minimum deplasman ise 0,864 mm ve 1,443 mm ile LVDT-2 ve LVDT-1'den ölçülmüştür. Şekil 4.24'de görüldüğü gibi çatlaklar kubbe yüzeyinin her tarafında meydana gelmiştir. Boşluk kenarlarında çatlaklar görülmüştür.



(a) 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.24. Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.



(b) 1.-2. ve 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(c) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.



(d) 4.-5. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(e) 5.-6. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.



(f) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(g) 7.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.



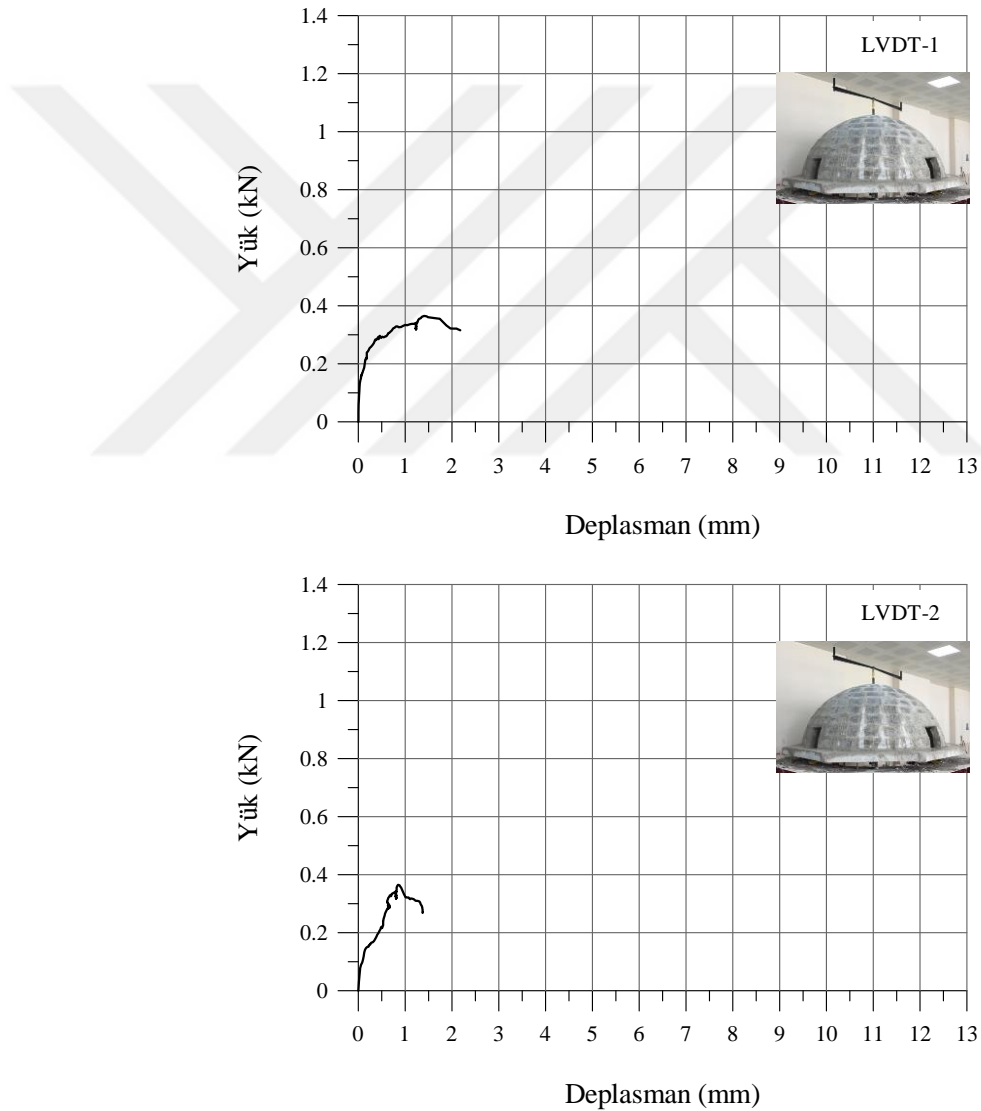
(h) Kubbe içinde oluşan çatlaklar.



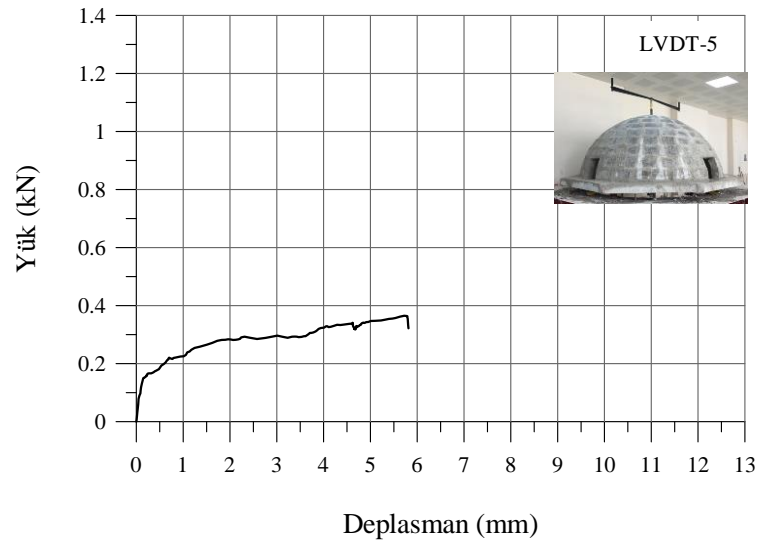
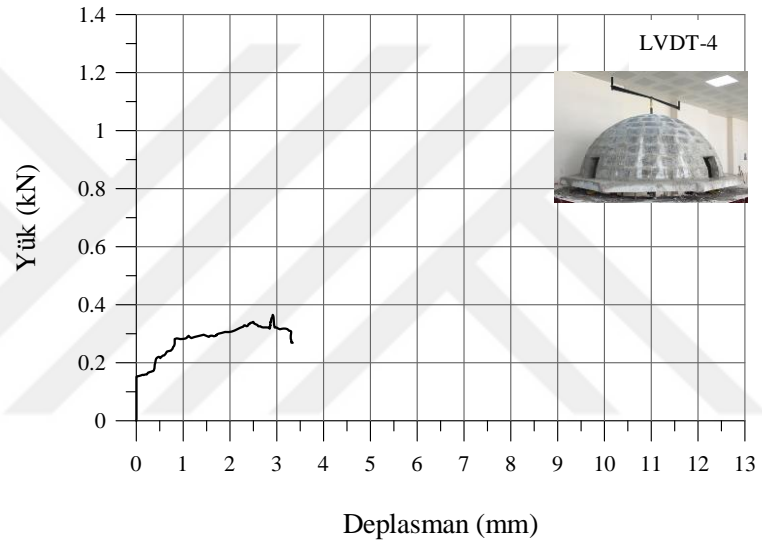
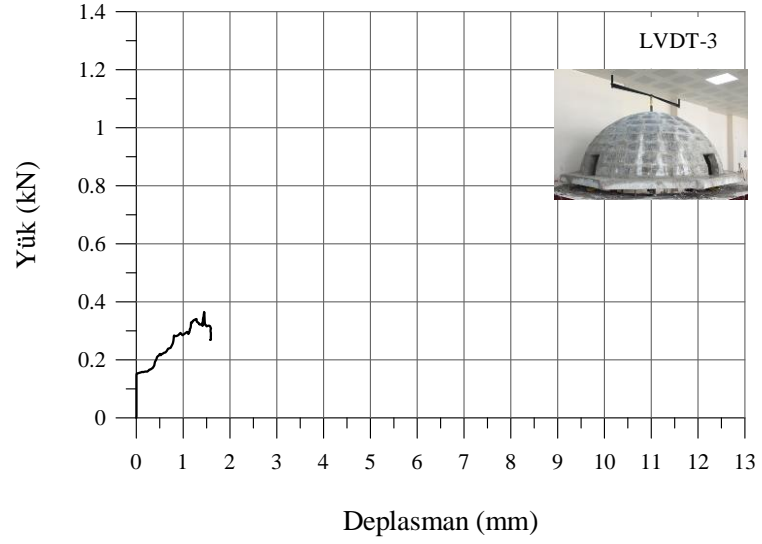
(i) Kubbe içinde oluşan çatlaklar.

Şekil 4.24 (devam). Model-Ref/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.

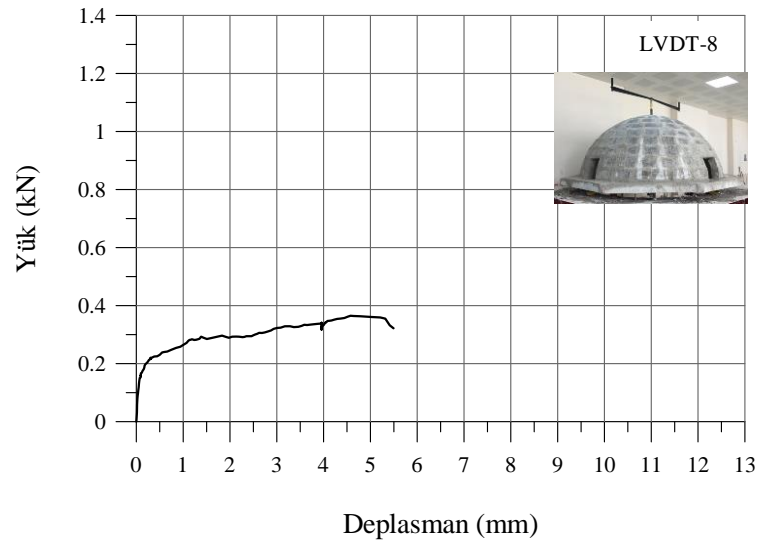
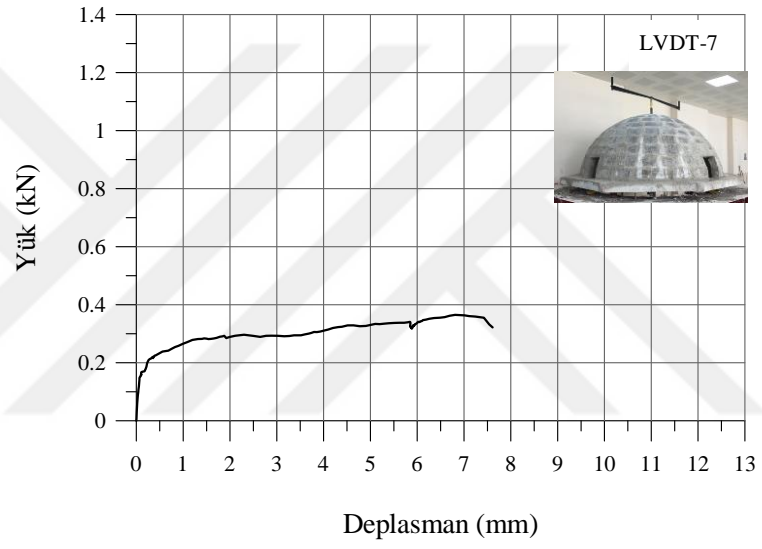
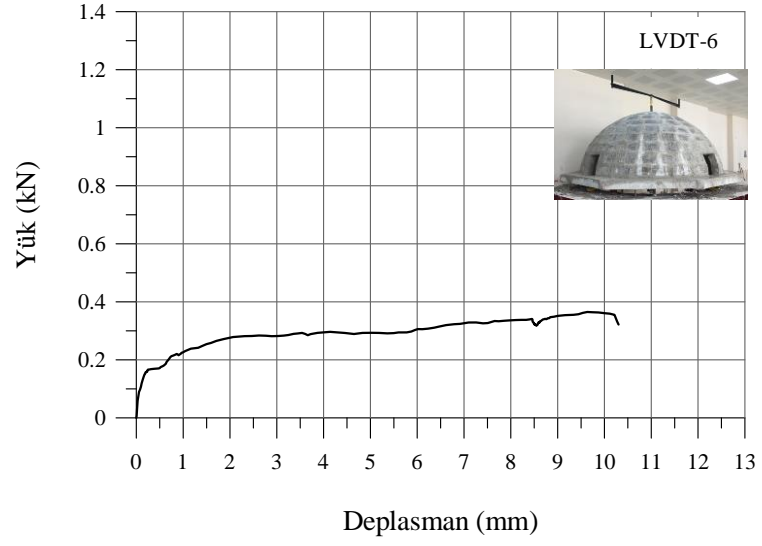
Şekil 4.25’de Model-Ref/2,5’e ait yük- deplasman grafiği verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi deney sonunda Model-Ref/2,5 deney elemanında maksimum deplasman 10,324 mm değeriyle LVDT-6’dan ve 7,521 mm değeriyle LVDT-7’den ölçülmüştür. Şekil 4.24 incelendiği zaman kubbenin 6., 7. ve 8. kenarlardan başlayıp kubbe tepesine doğru ilerleyen çatlaklar diğer bölgelere göre daha geniştir. Buna karşı minimum deplasman ise LVDT-2’nin ve LVDT-3’ün bulunduğu noktalardan elde edilmiştir. Bu değerler sırası ile 1,324 mm ve 1,548 mm’dir. Maksimum deplasmanların elde edildiği bölgelerdeki oluşan çatlak genişlikleri, minimum deplasmanların elde edildiği bölgelerdeki çatlak genişliklerinden büyüktür.



Şekil 4.25. Model-Ref/2,5’e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.25 (devam). Model-Ref/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.25 (devam). Model-Ref/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.

4.8 Model-300/2,5 Deney Elemanı

Model-300/2,5 deney elemanı Model-Ref/2,5 deney elemanı gibi üretilmiştir. Model-Ref/2,5'den farklı olarak 300 mm yüksekliğinde kasnak yapılmıştır. Bu deney elemanında hem kubbe üzerinde hem de kasnak üzerinde dört bölgeden boşluk açılmıştır. Yine Model-Ref/2,5'de olduğu gibi boşlukların üzerine ahşap malzemeden lento uygulaması yapılmıştır. Şekil 4.26'da Model-300/2,5 deney elemanının üretilmesi ve Model-300/2,5 deney elemanının deney öncesi görünümü verilmiştir.



Şekil 4.26. Model-300/2,5 deney elemanının hazırlanması deney öncesi görünümü.

Model-300/2,5 deney elemanında tek bir kol doğrultusuna gelen maksimum yük deney sonucunda 0,959 kN olarak elde edilmiştir. Maksimum yüke karşılık gelen maksimum deplasmanlar sırası ile LVDT-8 ve LVDT-3'den ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler 4,039 mm ve 2,261 mm'dir. 0,959 kN yük altındaki minimum deplasman değeri 0,266 mm ve 0,653 mm ile LVDT-4 ve LVDT-7'den okunmuştur. Şekil 4.27'de Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi Model-300/2,5'de Model-Ref/2,5'deki gibi kubbe üzerinde çok fazla hasar meydana gelmemiştir. Çatlaklar sadece kasnak köşelerinde görülmemiş aynı zamanda kılcal şekilde kubbe üzerinde de görülmüştür. Kasnak üzerine açılan boşluklar rijit tablanın üzerinde yekpare gibi durduğu için boşluklarda çatlaklık gözlemlenmemiştir. Model-300/2,5'de kasnak üzerinde köşelerde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlak genişlikleri Model-Ref/2,5'dekine göre daha azdır.



(a) 1.-8. ve 1.-2. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(b) 1.-2. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.27. Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.



(c) 2.-3. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(d) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.27 (devam). Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.

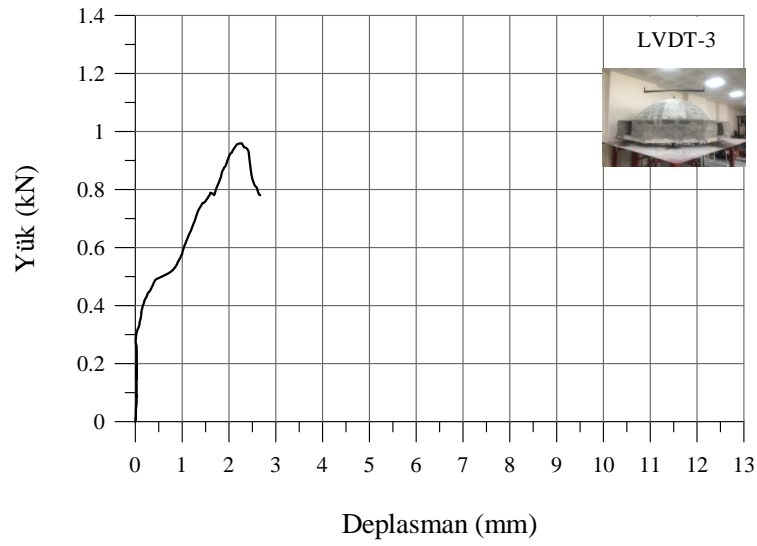
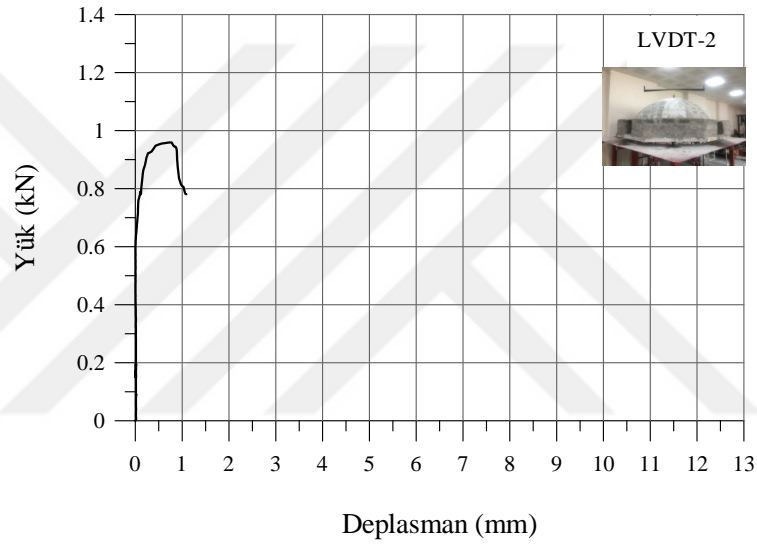
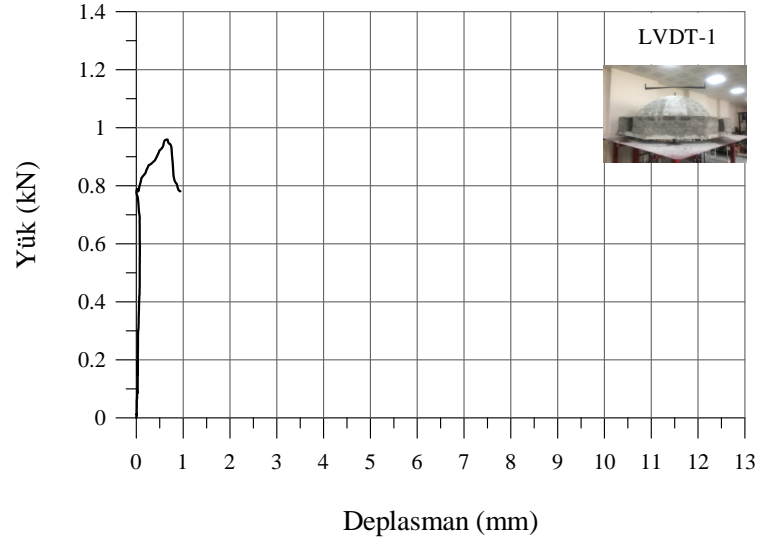


(e) 7.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.

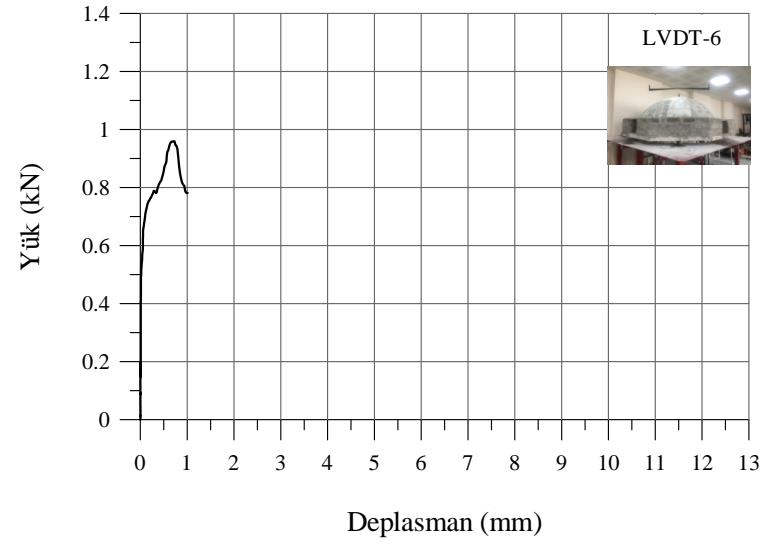
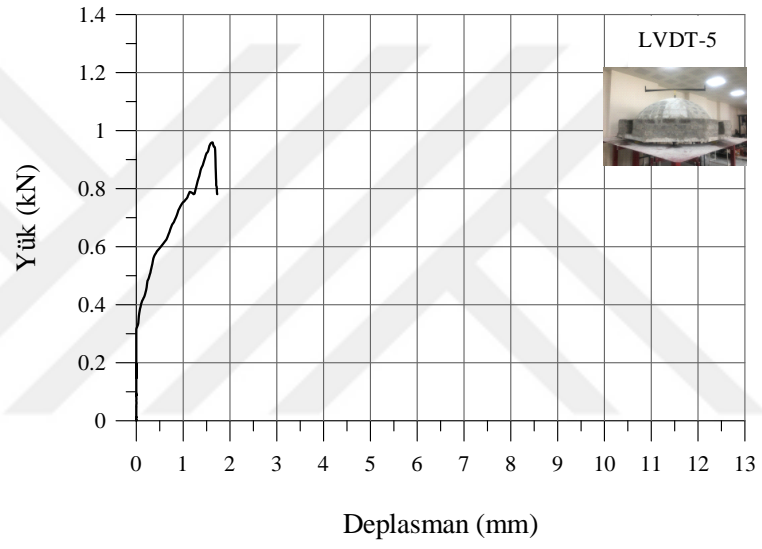
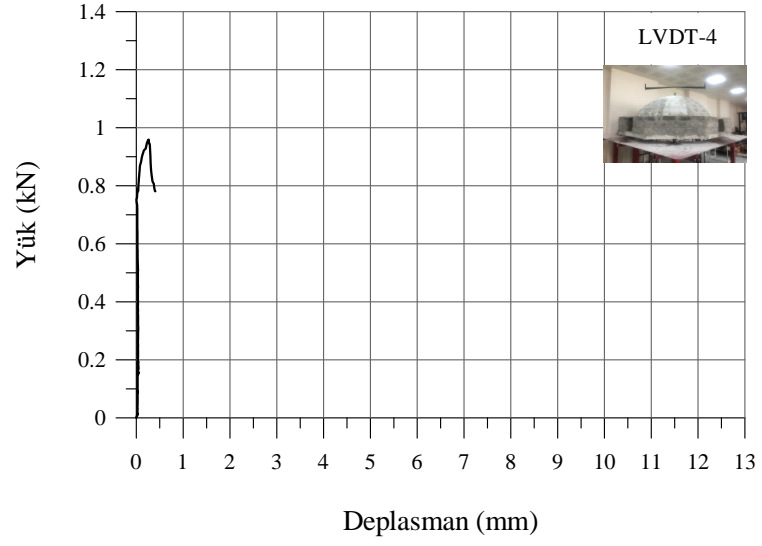
Şekil 4.27 (devam). Model-300/2,5 deney elemanının deney sonrası hali.

Şekil 4.28’de Model-300/2,5’e ait yük- deplasman grafikleri verilmiştir. Grafiklere de bakıldığında deney sonucunda maksimum deplasman LVDT-8’den ve LVDT-3’den elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler sırası ile 4,612 mm ve 2,708 mm’dir. Maksimum deplasmanlar Şekil 4.27’den de gözlemleneceği gibi çatlak genişliklerinin fazla olduğu 1. ve 8. kasnak kenarlarında meydana gelmiştir. Deney sonucunda elde edilen minimum deplasman değerleri 0,323 mm ve 0,874 mm’dir. Bu değerlerin elde edildiği LVDT’ler sırası ile LVDT-4 ve LVDT-7’dir. LVDT-4 ve LVDT-7’nin yer aldığı bölgelerde oluşan çatlak genişlikleri diğer bölgelerde meydana gelen çatlaklara göre daha azdır.

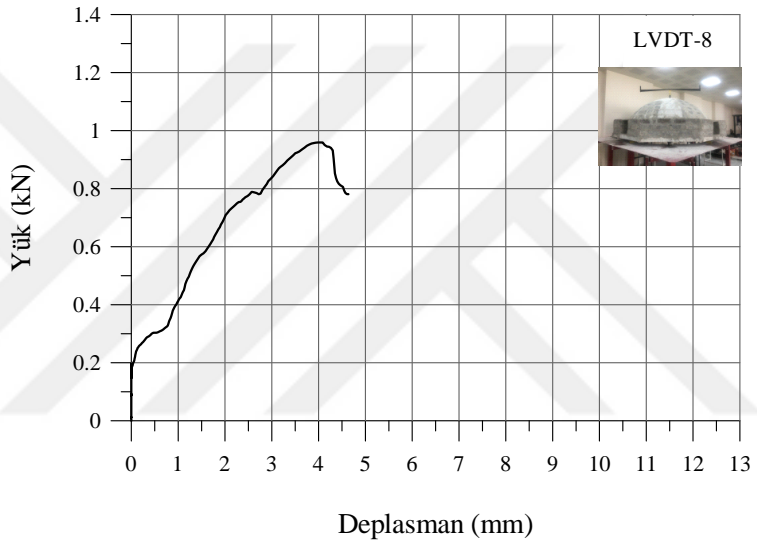
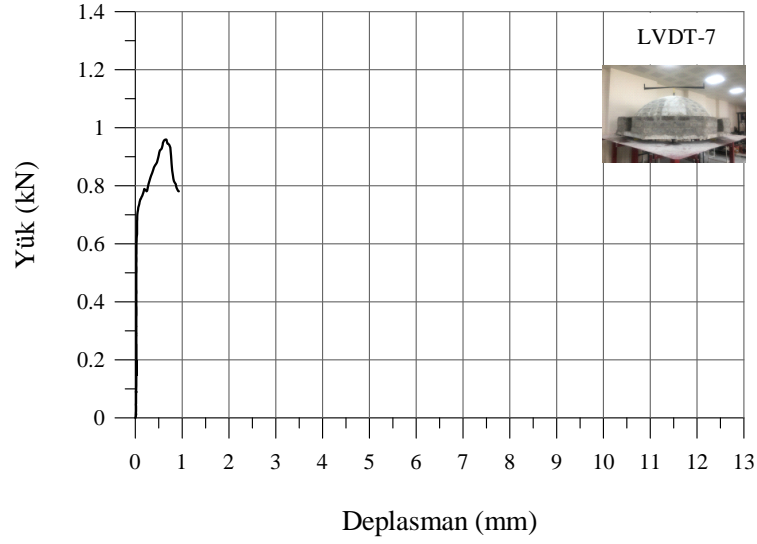
Buradan da anlaşılacağı gibi, kasnaklı yapılan Model-300/2,5 deney elemanı, kasnaksız yapılan Model-Ref/2,5 deney elemanına göre daha fazla yük taşımıştır. Aynı zamanda Model-Ref/2,5 deney elemanına göre daha az deplasman yapmıştır. Çatlak genişlikleri Model-Ref/2,5 deney elemanına göre daha azdır.



Şekil 4.28. Model-300/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.28 (devam). Model-300/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.28 (devam). Model-300/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.

4.9 Model-400/2,5 Deney Elemanı

Model-400/2,5 deney elemanında kubbe örme işlemi Model-Ref/2,5'de olduğu gibi kubbe üzerinde dört bölgede yüksekliği 220 mm, uzunluğu 250 mm ve genişliği 150 mm olan boşluklar açılmıştır. Daha sonra kubbe etrafında kasnak örme işlemi gerçekleştirilmiştir. Model-300/2,5'de yapmış olduğumuz pencere sistemi Model-400/2,5'de de yapılmıştır. Boşluk üstlerine yine lento uygulaması yapılarak kasnak yüksekliği 400 mm olan Model-400/2,5 deney elemanı deneye hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.29'da Model-400/2,5 deney elemanının deney öncesi görünümü gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Model-400/2,5 deney elemanının deney öncesi görünümü.

Model-400/2,5 deney elemanına yatay deplasmanı ölçmek için sekiz adet LVDT ve mesnetler üzerine gelen yükü ölçmek için dört adet S tipi yük hücreleri diğer deney elemanlarında olduğu gibi yerleştirilmiştir. Şekil 4.30'da Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası hali verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bazı bölgelerde kılcal çatlaklar gözlemlenirken, bazı bölgelerde ise daha geniş çatlaklar ve açılmalar gözlemlenmiştir. Model-400/2,5 deney elemanında maksimum çatlaklar LVDT-1'in ve LVDT-8'in bulunduğu 1. ve 8. kol doğrultuları arasında kasnak köşesinde meydana gelmiştir. Deney sonrası fotoğraflar incelendiği zaman, boşluk kenarlarında hiçbir çatlama meydana gelmediği görülmektedir. Çatlamalar genellikle kasnak köşelerinde oluşmuştur. Model-Ref/2,5 ve Model-300/2,5'e göre çatlak sayıları ve genişlikleri daha azdır.



(a) 1.-2. ve 2.-3. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.30. Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.



(b) 1.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(c) 2.-3. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.



(d) 3.-4. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(e) 6.-7. kenarlardan başlayan çatlaklar.

Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.



(f) 7.-8. kenarlardan başlayan çatlaklar.



(g) Kubbe içinde oluşan çatlaklar.

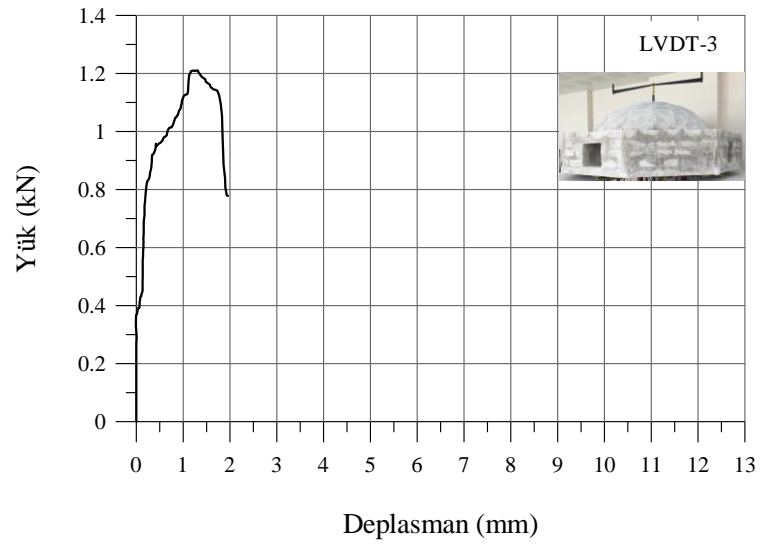
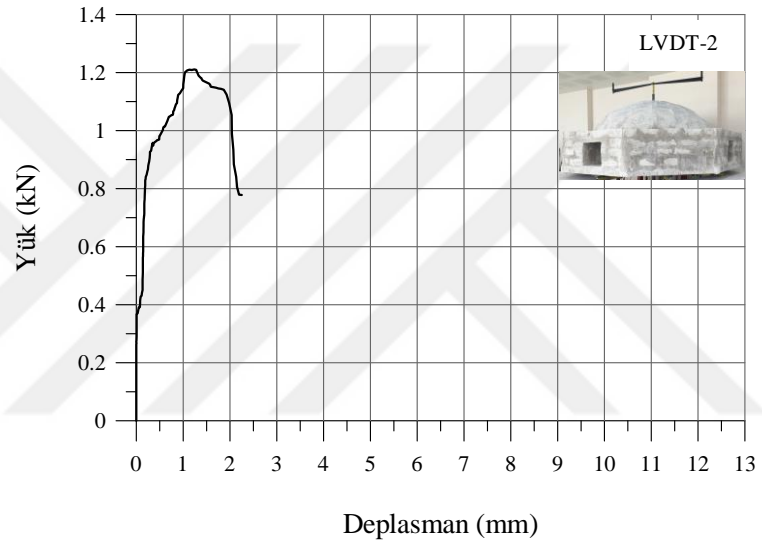
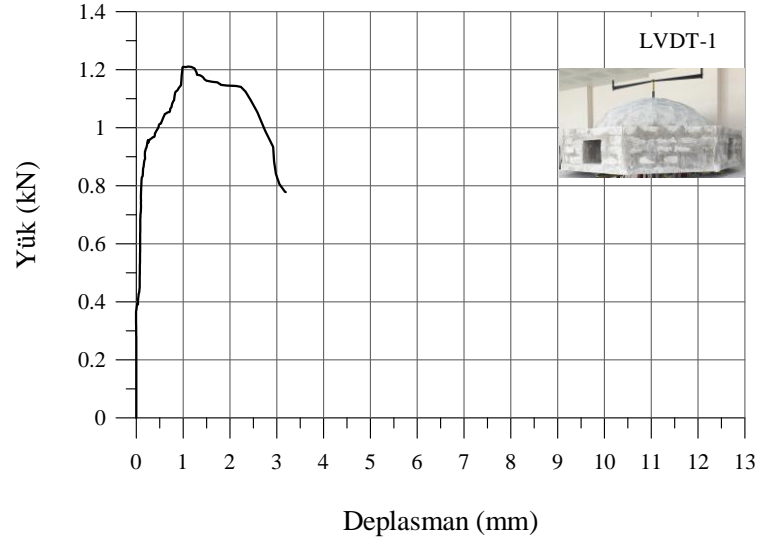
Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.



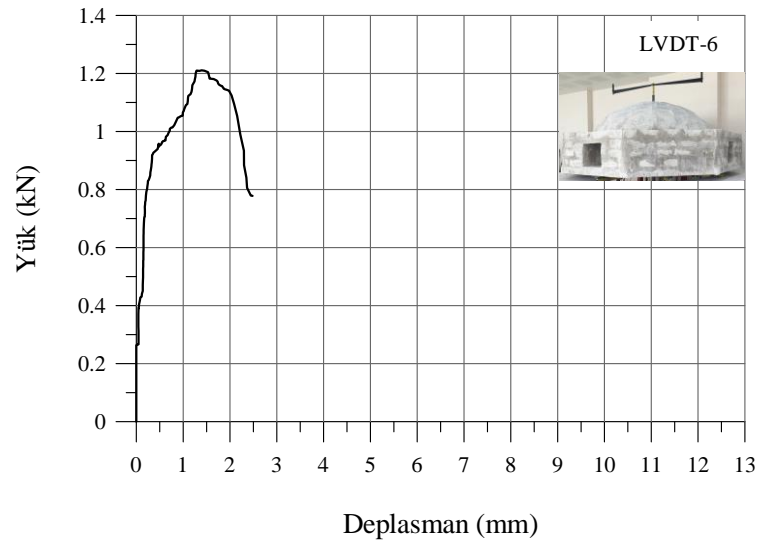
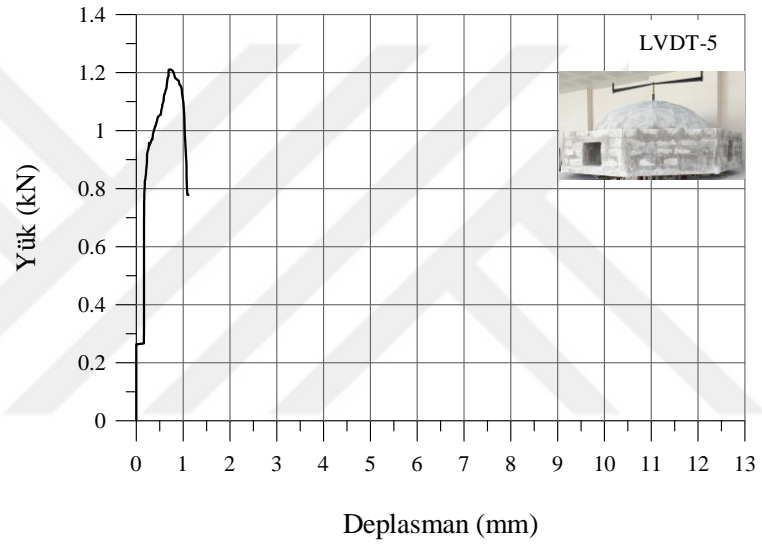
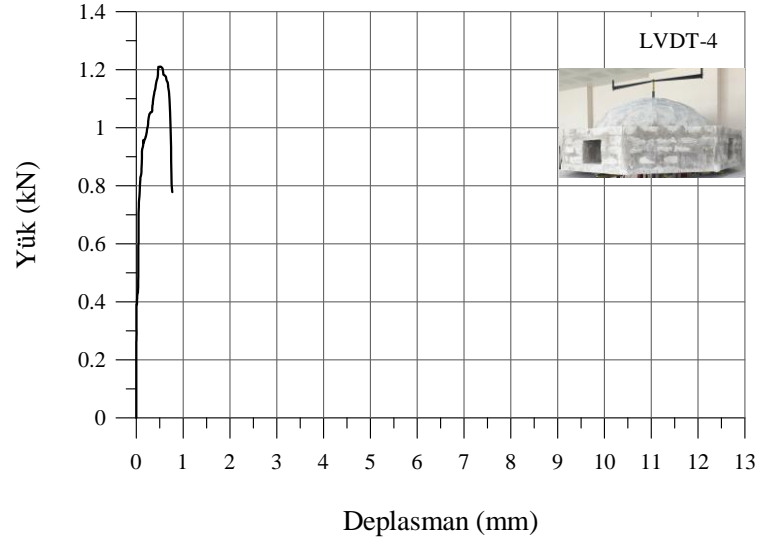
(h) Kubbede oluşan çatlak genişliği.

Şekil 4.30 (devam). Model-400/2,5 deney elemanının deney sonrası görünümü.

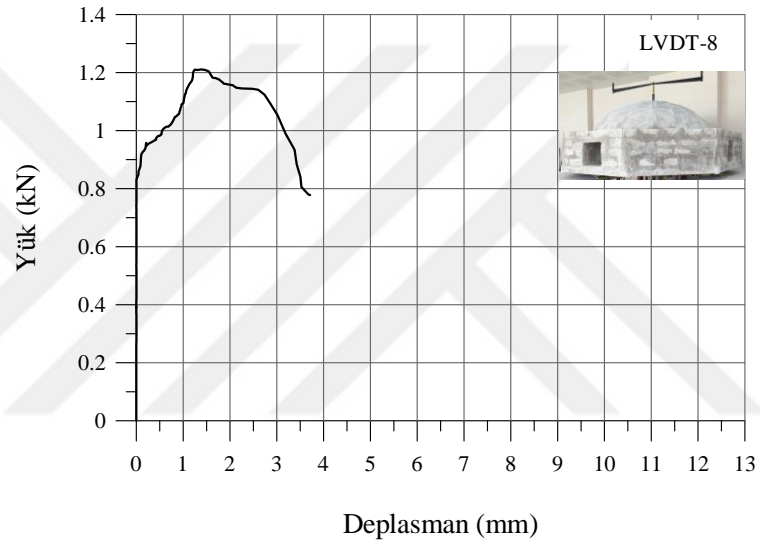
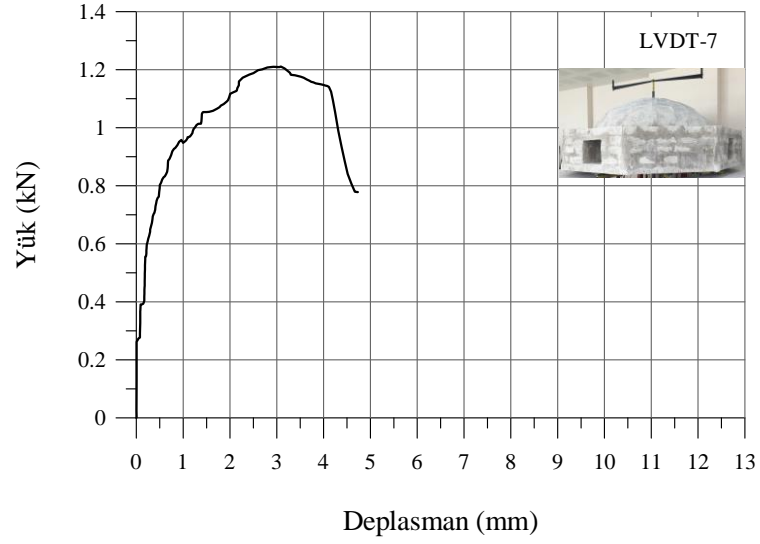
Model-400/2,5 deney elemanında her bir kol doğrultusuna karşılık gelen maksimum yük 1,210 kN olarak ölçülmüştür. Model-400/2,5 maksimum yüke ulaştığı zaman 1. ve 8. kasnak kenarları ile 6. ve 7. kasnak kenarları arasında kasnak köşelerinde büyük çatlaklar meydana gelmiştir. Kubbe üzerinde çok küçük kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir. Şekil 4.31’de verilen yük- deplasman grafikleri incelendiği zaman deney elemanı maksimum yük altında iken maksimum deplasman değeri LVDT-7 ve LVDT-6’dan ölçülmüştür. Bu değerler sırası ile 3,087 mm ve 1,395 mm’dir. Maksimum yük altında minimum deplasman ise 0,509 mm ve 0,720 mm değerleri ile LVDT-4 ve LVDT-5’den okunmuştur. Deney sonucunda en fazla deplasmanı yine LVDT-7 yaparken, minimum deplasman ise LVDT-4’de gerçekleşmiştir. LVDT-7 ve LVDT-8’in bulunduğu tarafta kasnakta çok fazla çatlama ve açılma gözlemlenmiştir.



Şekil 4.31. Model-400/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.31 (devam). Model-400/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.



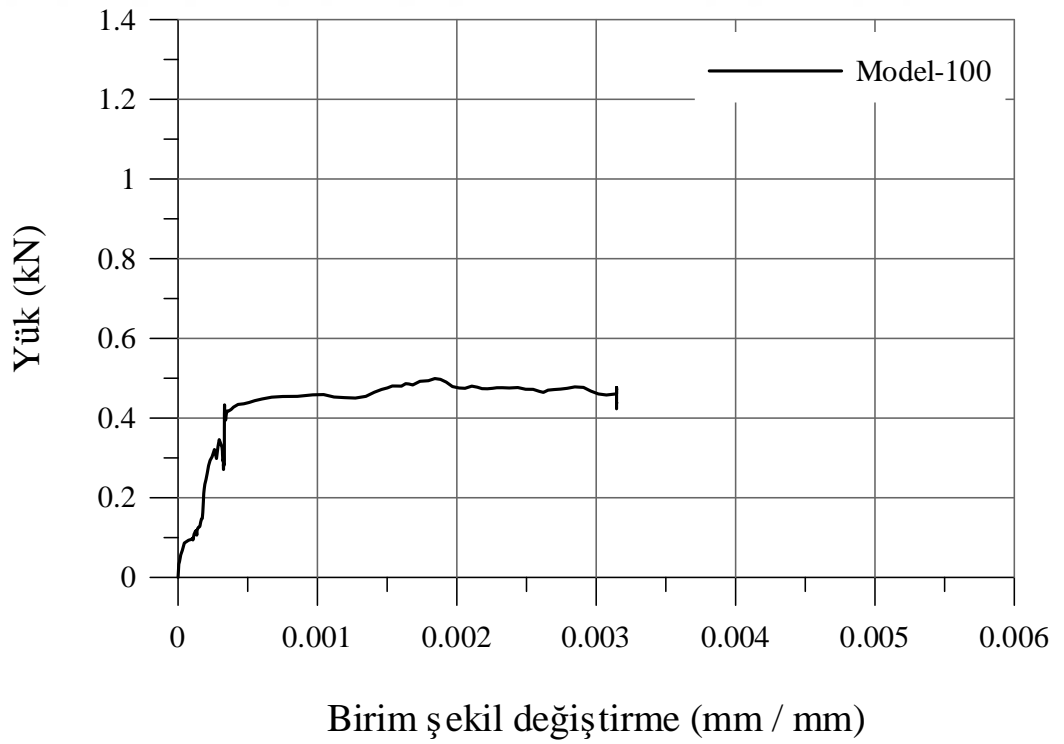
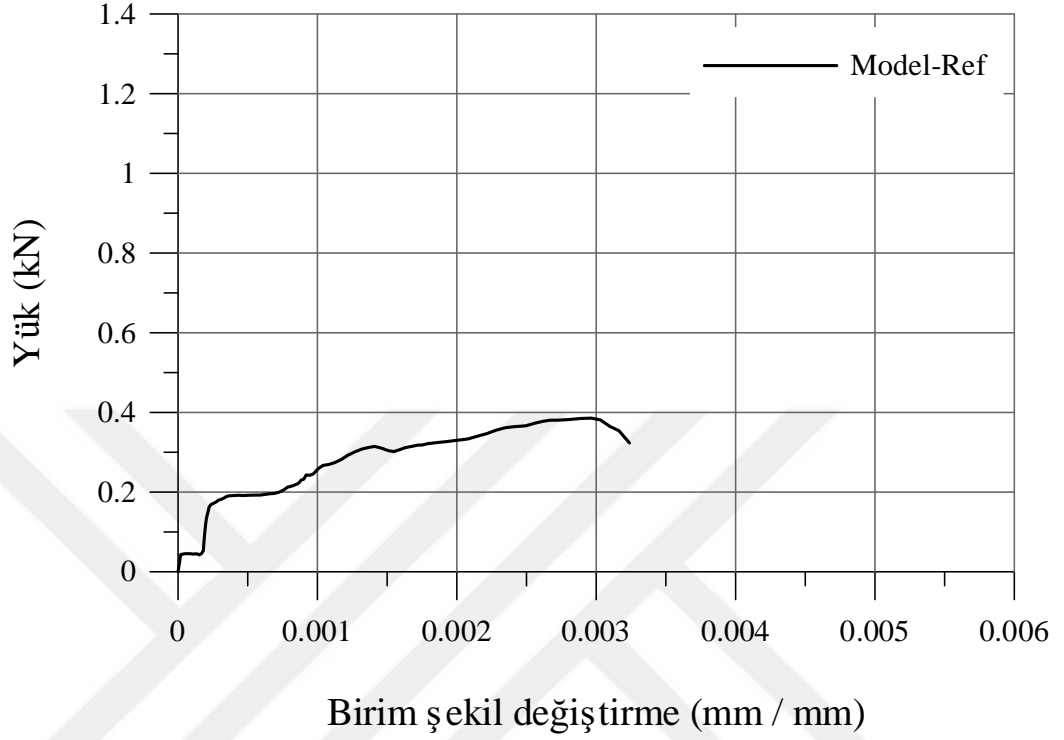
Şekil 4.31 (devam). Model-400/2,5'e ait yük- deplasman grafiği.

4.10 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

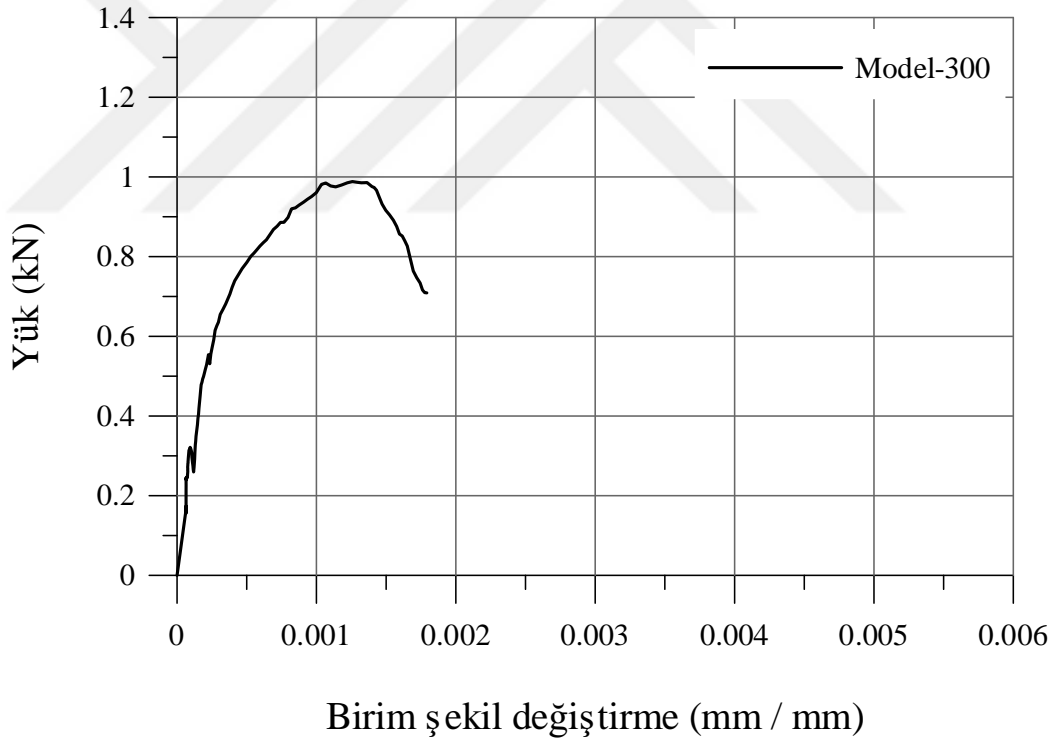
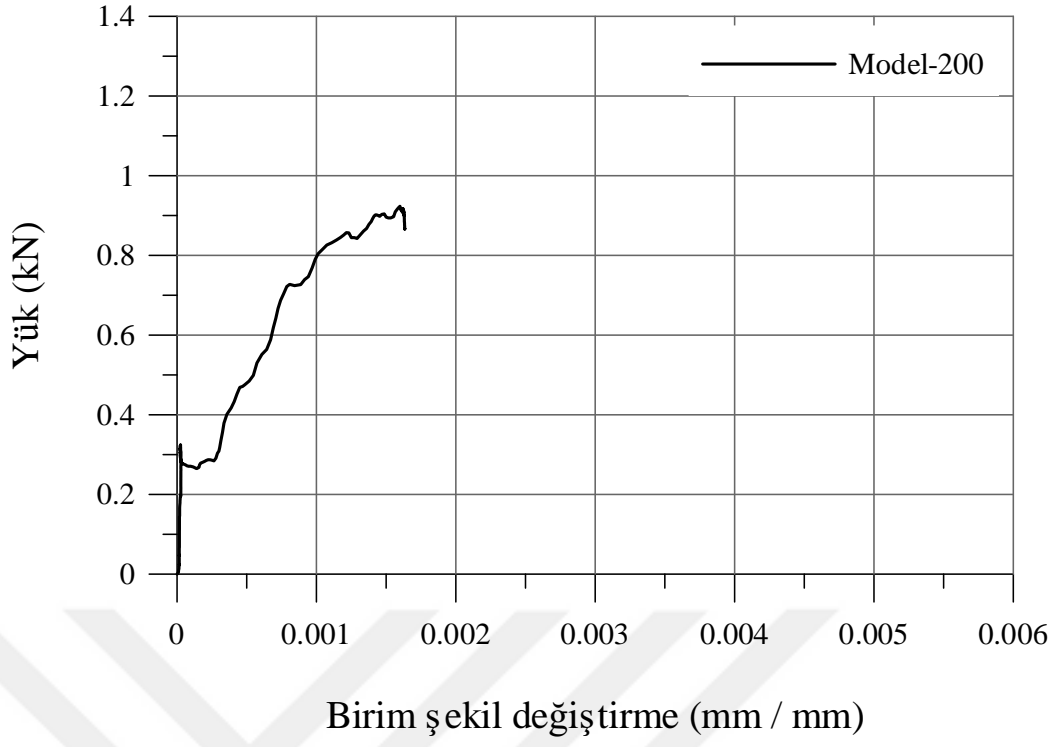
4.10.1 Boşluksuz üretilen kubbe deney elemanlarının karşılaştırılması

Deney boyunca bütün LVDT'ler kubbe deney elemanları üzerinde aynı bölgelere bağlanmıştır. Deney sonucunda çevre uzunluğundaki değişimi ve birim şekil değiştirmeleri elde edebilmek için ilk olarak deney öncesi kubbe çapı 2000 mm olarak ölçülmüştür. Bu çapa karşılık gelen çevre uzunluğu $2\pi r$ formülünden elde edilmiştir. Deney sırasında, deney elemanlarının yatay deplasmanlarını ölçmek için sekiz adet LVDT yerleştirilmiş, bu LVDT'ler yardımı ile deney elemanlarının çapında meydana gelen değişimler elde edilmiştir. Bu değişimler ele alınarak, yeni oluşan kubbe çapına karşılık çevre uzunlukları ve birim şekil değiştirmeleri

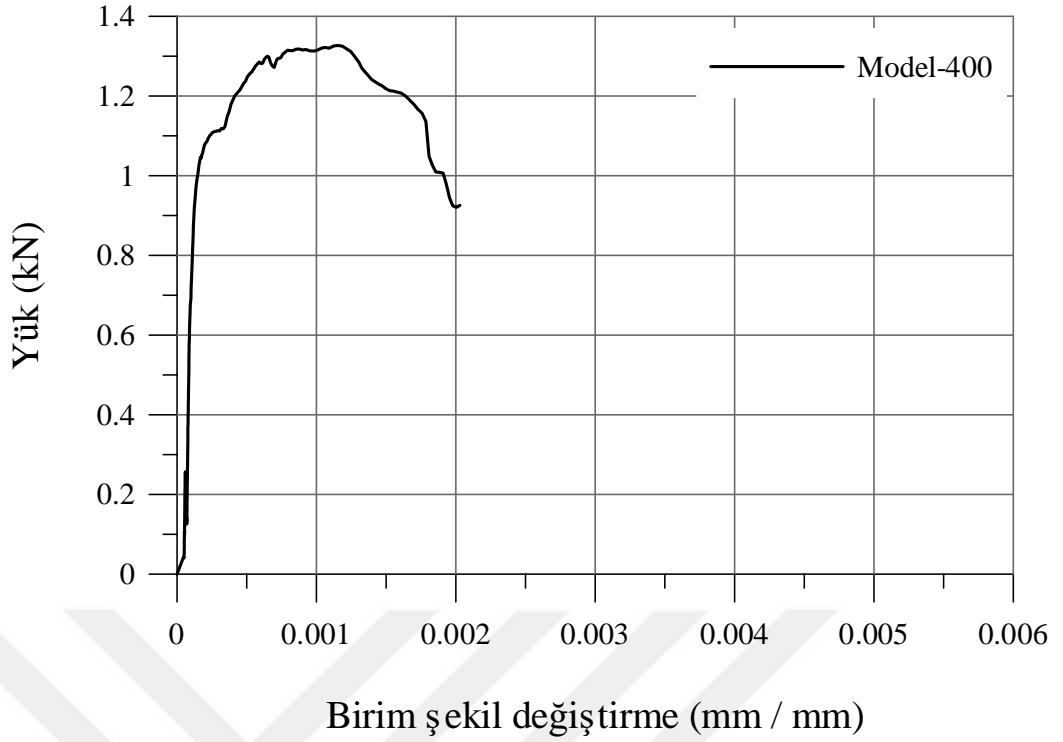
belirlenmiştir. Birim şekil değiştirme (ϵ) $\Delta L/L$ formülü ile hesaplanmıştır. (ΔL = deney süresince çapta meydana gelen değişim, L = deney öncesi kubbe çapı) Şekil 4.32’de her bir deney elemanı için yük- birim şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.32. Yük- birim şekil değiştirme grafiği.



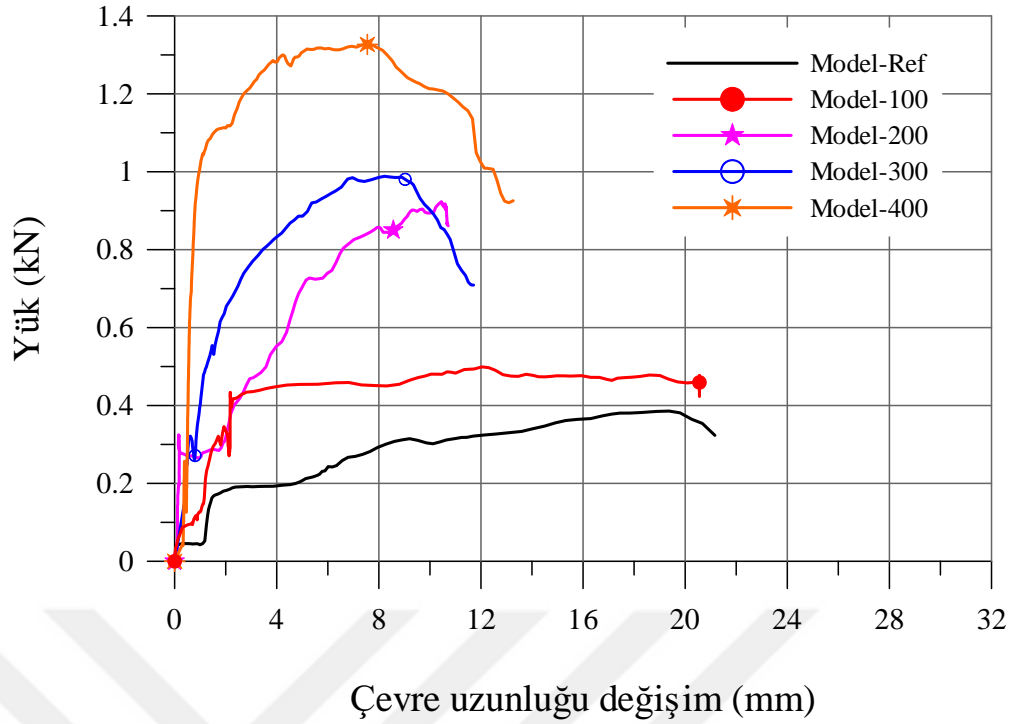
Şekil 4.32 (devam). Yük- birim şekil değıştirme grafiği.



Şekil 4.32 (devam). Yük- birim şekil değiştirme grafiği.

Şekil 4.32’de verilen yük- birim şekil değiştirme grafiğine göre referans olarak yapılan Model-Ref deney elemanı maksimum yük altında 0,0029 mm/mm birim şekil değiştirme yaparken, Model-100 deney elemanı maksimum yük altında 0,0018 mm/mm birim şekil değiştirme yapmıştır. Deney sonucunda Model-Ref’deki birim şekil değiştirme değeri 0,0033 mm/mm, Model-100 de bu değer 0,0032 mm/mm olarak hesaplanmıştır.

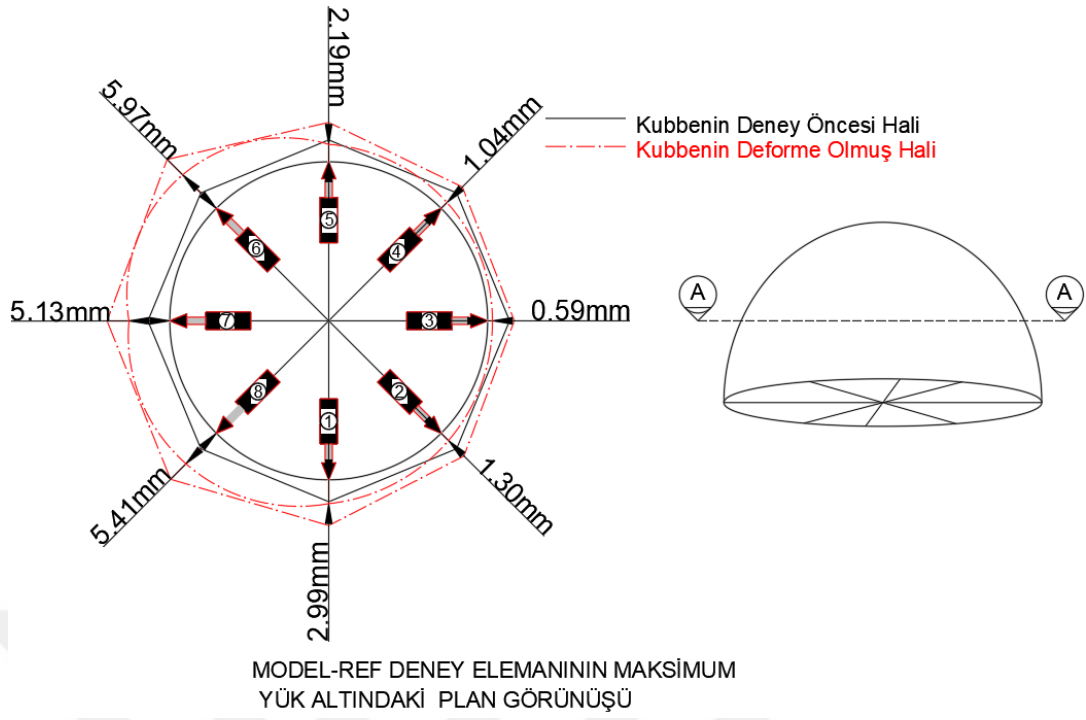
Model-200 deney elemanında maksimum yüke karşılık gelen birim şekil değiştirme miktarı 0,0015 mm/mm’dir. Deney sonunda bu değer 0,0017 mm/mm olarak ölçülmüştür. Model-300 deney elemanı maksimum yük altındayken birim şekil değiştirme miktarı 0,0012 mm/mm, deney sonunda birim şekil değiştirme miktarı ise 0,0018 mm/mm’dir. Model-400 deney sonunda 0,0021 mm/mm’lik birim şekil değiştirme yaparken, maksimum yük altındaki birim şekil değiştirme miktarı 0,0011 mm/mm olarak hesaplanmıştır. Deney sonrası çevre uzunluğu ile deney öncesi çevre uzunluğu karşılaştırılarak yük- çevre uzunluğu değişim grafiği Şekil 4.33’de verilmiştir.



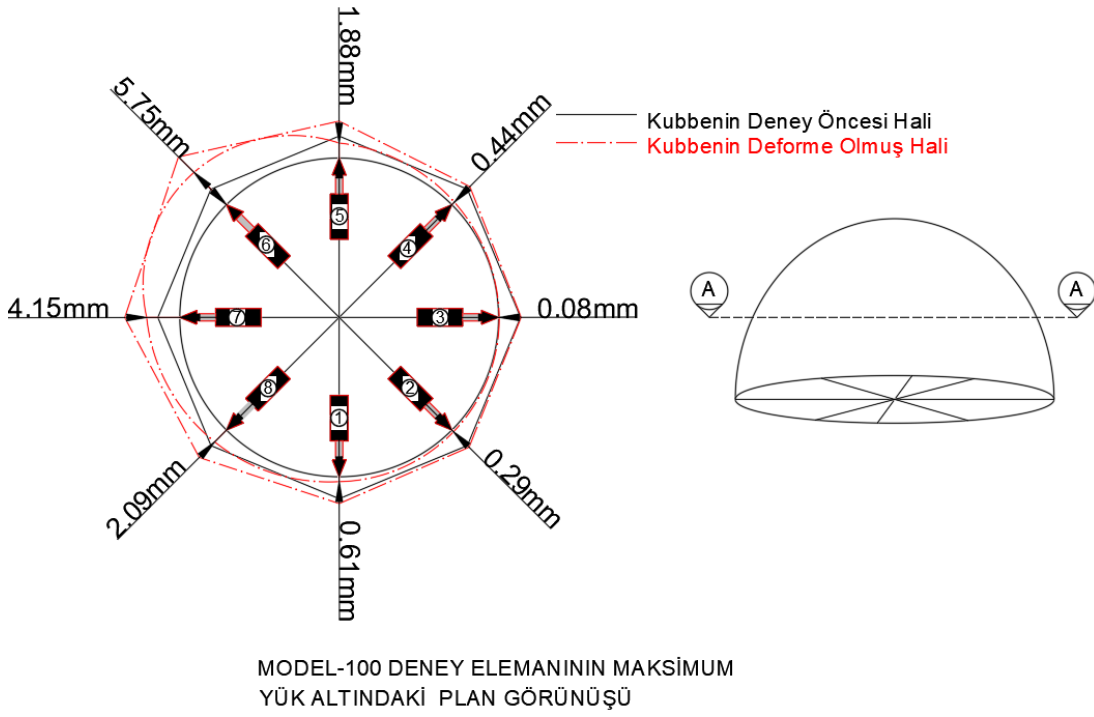
Şekil 4.33. Yük- çevre uzunluğu değişim grafiği.

Şekil 4.33’de görüldüğü gibi Model-100 ve Model-Ref’de çevre uzunluğundaki değişim diğer modellere göre daha fazladır. Deney sonrasında Model-Ref’de çevre uzunluğundaki değişim 21,251 mm olurken, Model-100 deney elemanında bu değişim 20,90 mm elde edilmiştir. Bunu sırası ile 13,223 mm değişim ile Model-400 ve 11,690 mm değişim ile Model-300 takip etmektedir. Model-200’de çevre uzunluğundaki değişim 10,55 mm olarak belirlenmiştir.

Maksimum yük altında referans numune olarak örülen Model-Ref deney elemanının çevre uzunluğu değişim miktarı 19,372 mm’dir. Model-100 ve Model-200 deney elemanlarında bu değer sırası ile 12,038 mm ve 10,451 mm olarak hesaplanmıştır. Model-300 ve Model-400’de ise maksimum yüke karşılık gelen çevre uzunluğu değişimi 8,219 mm ve 7,549 mm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.34’de Model-Ref, Model-100, Model-200, Model-300 ve Model-400 deney elemanlarının maksimum yük altındayken deforme olmuş halleri verilmiştir.

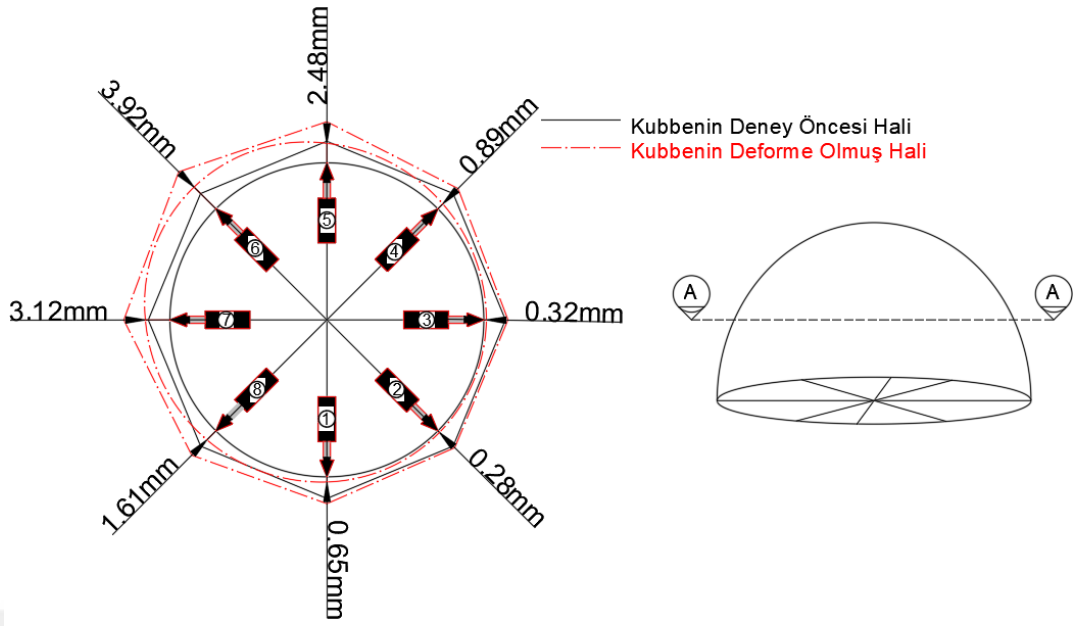


(a)



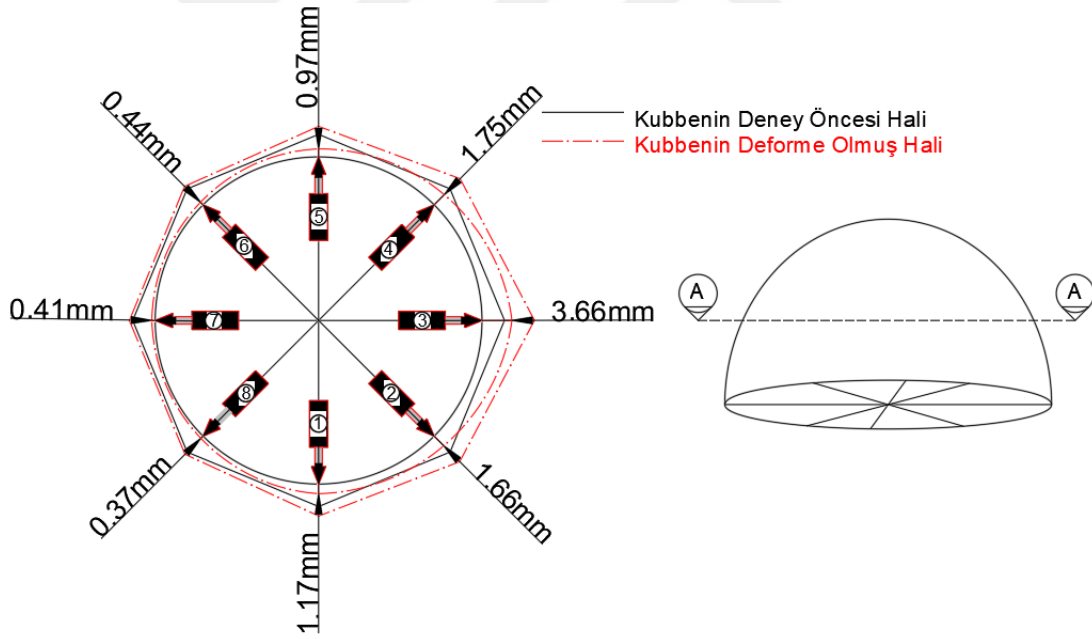
(b)

Şekil 4.34. Maksimum yük altında (a)Model-Ref, (b)Model-100, (c)Model-200, d)Model-300 ve (e)Model-400 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.



MODEL-200 DENEY ELEMANININ MAKSİMUM YÜK ALTINDAKİ PLAN GÖRÜNÜŞÜ

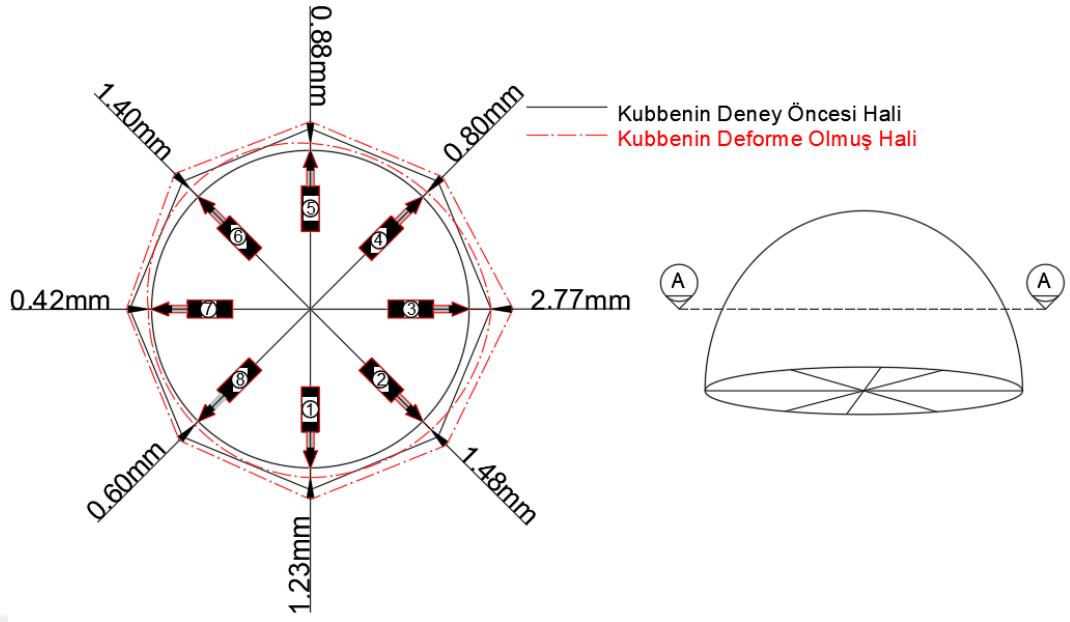
(c)



MODEL-300 DENEY ELEMANININ MAKSİMUM YÜK ALTINDAKİ PLAN GÖRÜNÜŞÜ

(d)

Şekil 4.34 (devam). Maksimum yük altında (a)Model-Ref, (b)Model-100, (c)Model-200, (d)Model-300 ve (e)Model-400 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.



MODEL-400 DENEY ELEMANININ MAKSİMUM YÜK ALTINDAKİ PLAN GÖRÜNÜŞÜ

(e)

Şekil 4.34 (devam). Maksimum yük altında (a)Model-Ref, (b)Model-100, (c)Model-200, (d)Model-300 ve (e)Model-400 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.

Boşluksuz olarak üretilen kubbe deney elemanları deney sonuçları Çizelge 4.2'de toplu bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.2. Boşluksuz kubbe deney elemanları deney sonuçları.

Numune No	Şekiller	P_f (kN) (Mak. Yük)	Artış ^a (%)	Mak.yüke karşılık gelen maksimum yatay deplasman (mm)	Mak.yüke karşılık gelen birim şekil değiştirme (mm/mm)	Mak.yüke karşılık gelen çevre uzunluğundaki değişim (mm)
Model-Ref (Boşluksuz Referans Numune)		0,385	-	5,979	0,0029	19,372
Model-100		0,499	29,610	5,752	0,0018	12,038
Model-200		0,924	140,000	3,928	0,0015	10,451
Model-300		0,988	156,623	3,664	0,0012	8,219
Model-400		1,331	245,714	2,777	0,0011	7,549

^a Modellerin Model-Ref deney elemanına göre maksimum yüklerindeki yüzdelik artış miktarı

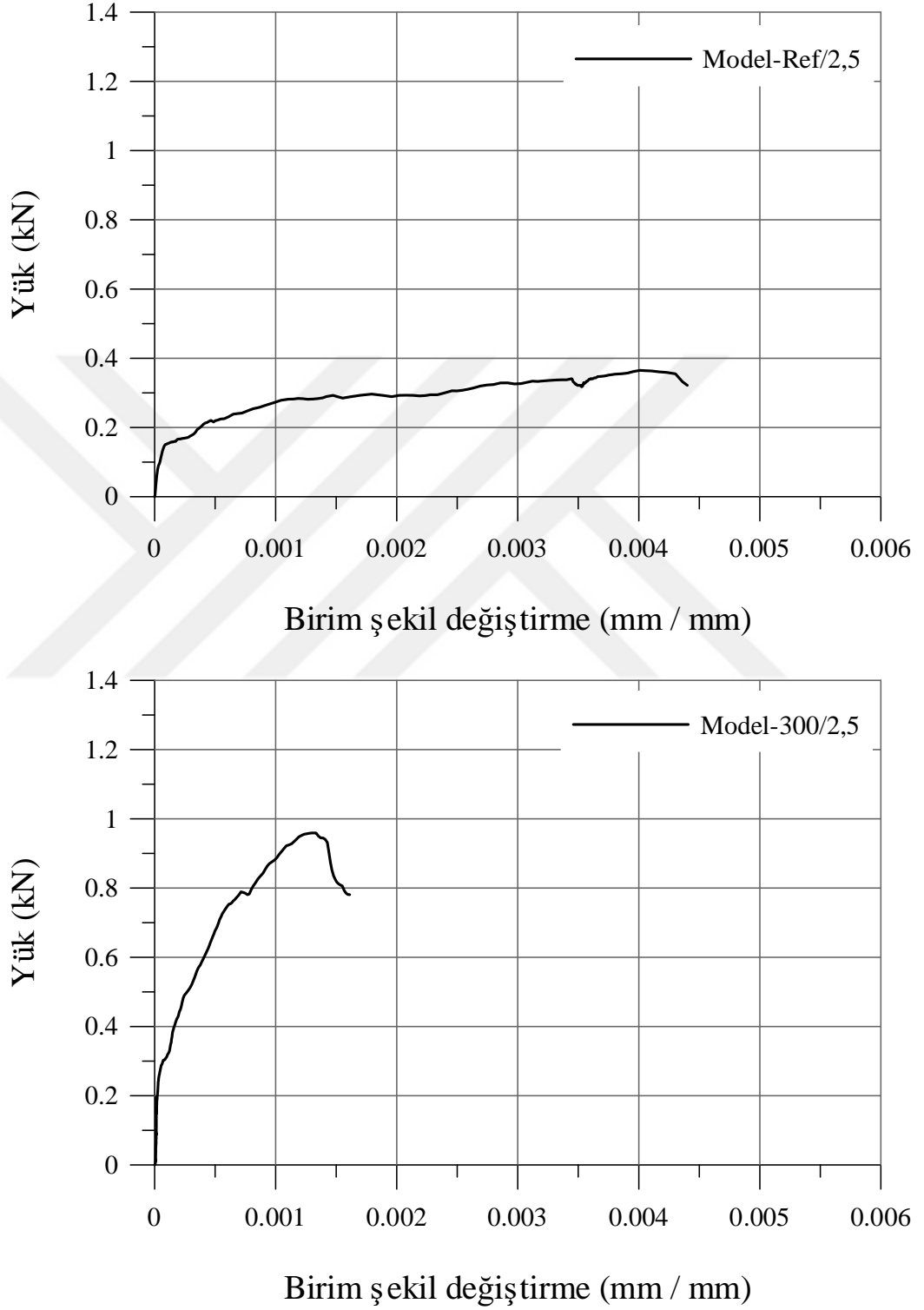
Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi deney elemanları arasında en fazla yükü taşıyan deney elemanı Model-400 olmuştur. Model-400’ün maksimum yük taşıma kapasitesi 1,331 kN iken yatay deplasman miktarı 2,777 mm, birim şekil değiştirme miktarı 0,0011 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim ise 7,549 mm’dir. 300 mm yükseklikte kasnak uygulaması yapılan Model-300 deney elemanı ise maksimum 0,988 kN yük taşımıştır. Buna karşılık gelen yatay deplasman miktarı ise 3,664 mm, birim şekil değiştirme miktarı 0,0012 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim 8,219 mm’dir. Model-200’ün maksimum yük taşıma kapasitesi 0,924 kN olarak elde edilmiştir. Maksimum yük altındaki yatay deplasman miktarı 3,928 mm, birim şekil değiştirme miktarı 0,0015 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim ise 10,451 mm’dir. Tek sıra taş ile üretilmiş kasnak yüksekliği 100 mm olan Model-100 deney elemanında ise yük en fazla 0,499 kN’a çıkmıştır. Bu yük altındaki yatay deplasman 5,752 mm, birim şekil değiştirme 0,0018 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim ise 12,038 mm olarak ölçülmüştür. Referans deney elemanı olarak yapılan Model-Ref deney elemanında kasnak olmadığından maksimum yük 0,385 kN olarak elde edilmiştir. Maksimum yük altındaki maksimum yatay deplasman miktarı 5,979 mm, birim şekil değiştirme miktarı 0,0029 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim 19,372 mm’dir. Çalışma sonucunda taşlar hiçbir şekilde hasara uğramamıştır. Çatlamlar derzler de meydana geldiği için şekil değiştirme ve çevre uzunluğundaki değişimler deneylerde birbirine yakın çıkmıştır.

Boşluksuz olarak üretilen kubbelerde, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre kasnak yüksekliği arttıkça taşıma kapasitesi de artmaktadır. Kasnaklı üretilen kubbe deney elemanının yük taşıma kapasitesi, kasnaksız olarak üretilen kubbe deney elemanına oranla % 29,61 artmıştır.

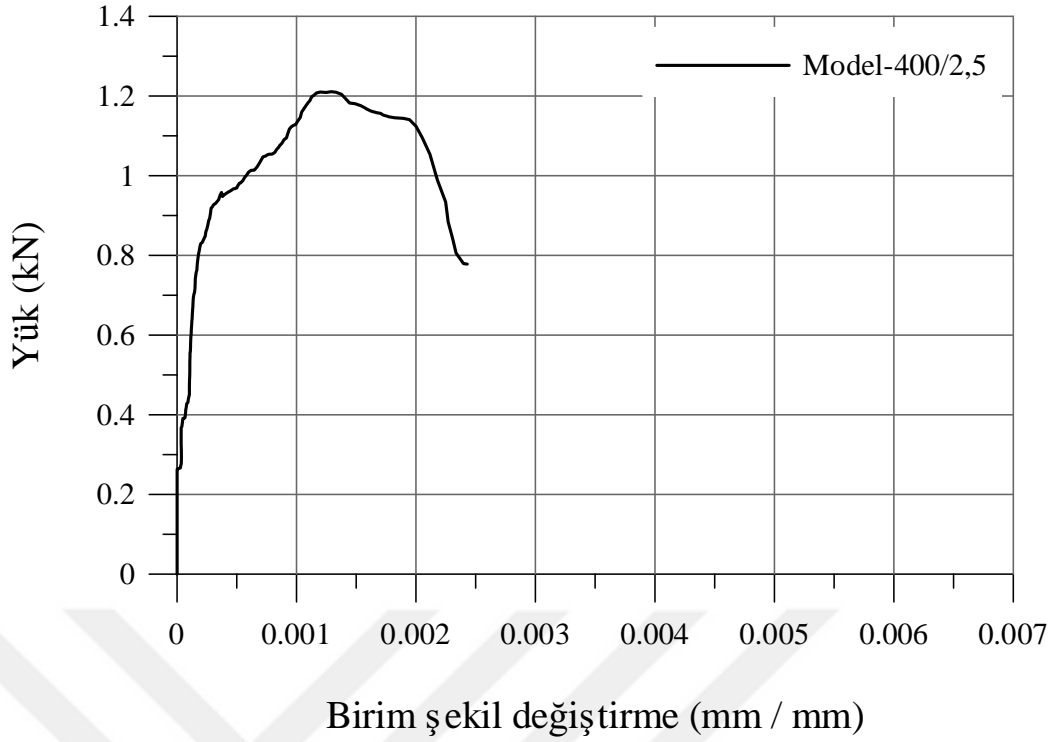
4.10.2 Boşluk oranı % 2,5 olan kubbe deney elemanlarının karşılaştırılması

Deney boyunca Model-Ref/2,5, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanlarında gözlemlenen birim şekil değiştirmeler ve çevre uzunluğundaki değişim, boşluksuz üretilen kubbe deney elemanlarındaki gibi hesaplanmıştır. Kubbe deney elemanlarının çapı deney öncesinde 2000 mm olarak ölçülmüştür. Deney elemanlarına bağlanan LVDT’ler yardımıyla çapta meydana gelen değişimler hesaplanmıştır. Elde edilen her bir sayısal değer için çevre uzunluğu $2\pi r$ ile ve birim şekil değiştirmeler (ϵ) $\Delta L/L$ formülü ile hesaplanmıştır. Bu veriler dikkate alınarak

Şekil 4.35’de verilen yük- birim şekil değiştirme grafikleri Model-Ref/2,5, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanları için ayrı ayrı çizilmiştir. Yük-çevre uzunluğu değişim grafiği ise Şekil 4.36’da verilmiştir.

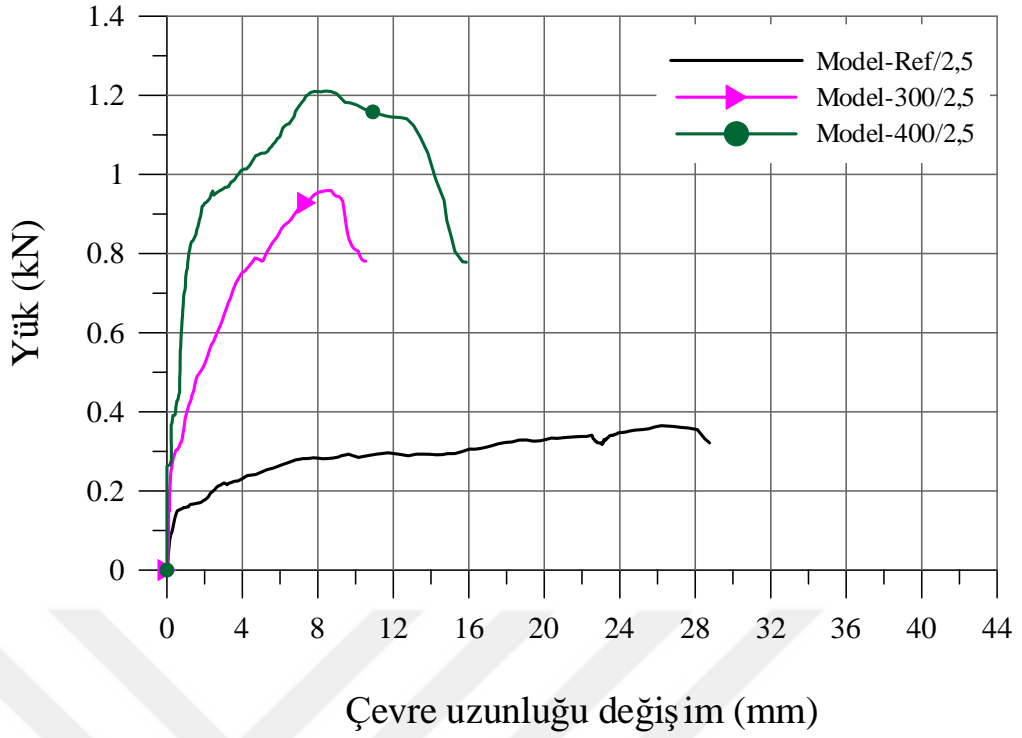


Şekil 4.35. Yük-birim şekil değiştirme grafiği.



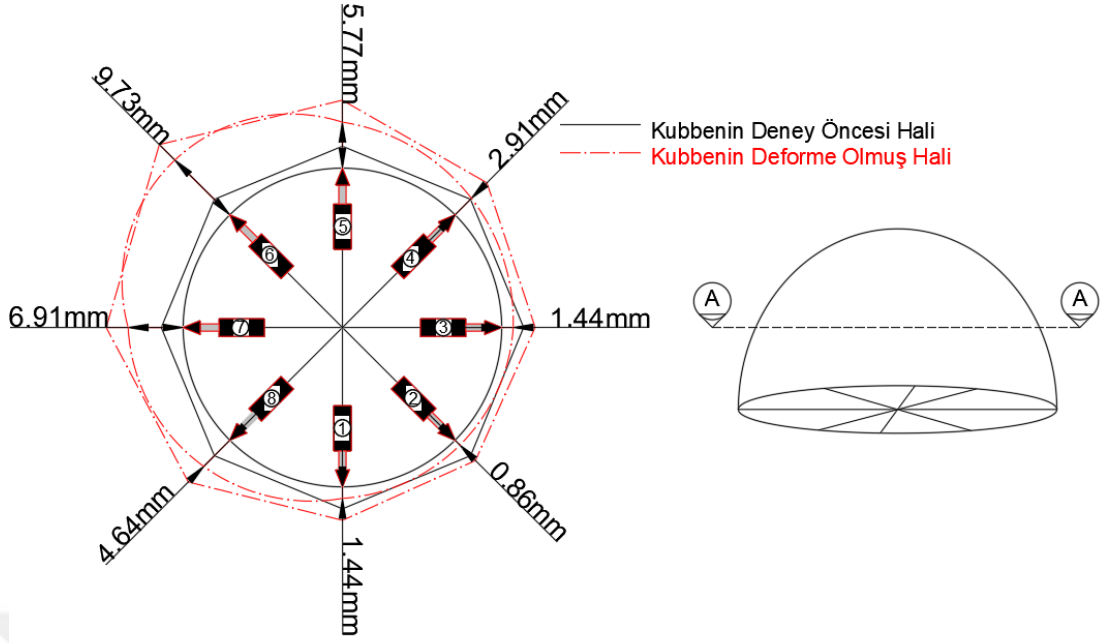
Şekil 4.35 (devam). Yük-birim şekil değiştirme grafiği.

Grafikten de görüldüğü gibi boşluklu referans numune olarak adlandırılan Model-Ref/2,5 deney elemanının maksimum yük altındayken yapmış olduğu birim şekil değiştirme miktarı 0,0040 mm/mm'dir. Deney sonucunda bu değer 0,0044 mm/mm olarak ölçülmüştür. Model-300/2,5 deney elemanı deney sonrasında 0,0015 mm/mm birim şekil değiştirme yaparken, maksimum yük altında 0,0013 mm/mm birim şekil değiştirme yapmıştır. Model-400/2,5 deney elemanında ise deney sonucunda birim şekil değiştirme değeri 0,0023 mm/mm ölçülürken, maksimum yük altında iken bu değer 0,0012 mm/mm olarak hesaplanmıştır.



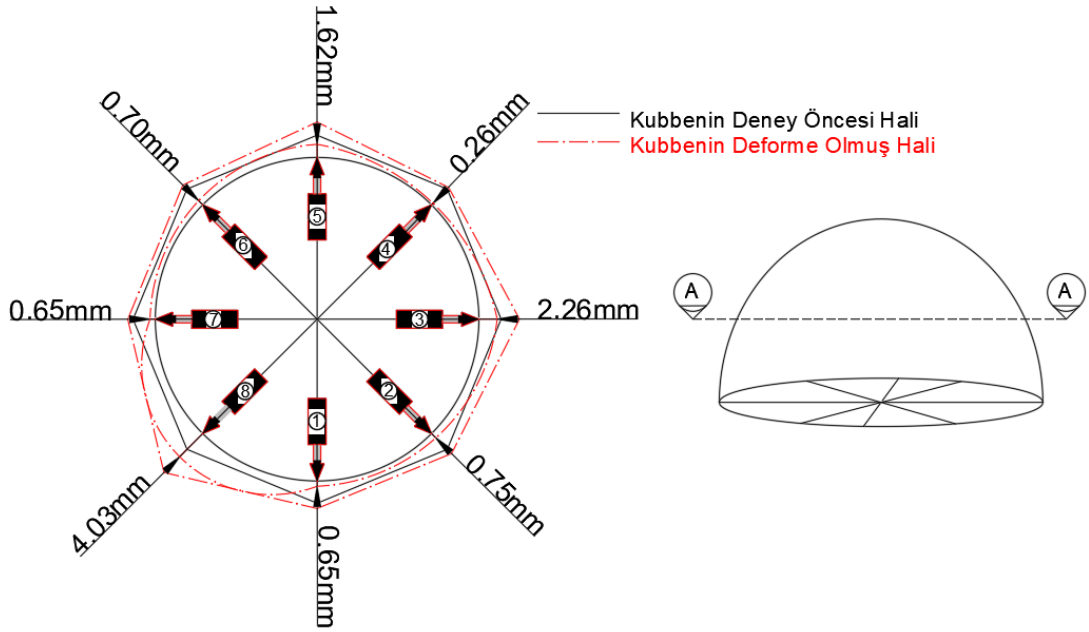
Şekil 4.36. Yük-çevre uzunluğu değişim grafiği.

Şekil 4.36'da Model-Ref/2,5, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanları için yük- çevre uzunluğu değişim grafiği verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi deney sonucunda Model-400/2,5'de ve Model-Ref/2,5'de çevre uzunluğundaki değişim Model-300/2,5'e göre daha fazladır. Model-400/2,5'de çevre uzunluğundaki değişim 16 mm iken, Model-Ref/2,5'de 28,924 mm olarak elde edilmiştir. En az çevre uzunluğu değişimi gösteren Model-300/2,5'de ise bu değer 10,152 mm olarak hesaplanmıştır. Maksimum yük altında Model-Ref/2,5 deney elemanındaki çevre uzunluğu değişimi 26,505 mm, Model-300/2,5'de bu değer 8,609 mm, Model-400/2,5'de ise 8,422 mm'dir. Şekil 4.37'de Model-Ref/2,5, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanlarının maksimum yük altındayken deforme olmuş halleri verilmiştir.



MODEL-REF/2,5 DENEY ELEMANININ MAKSİMUM YÜK ALTINDAKİ PLAN GÖRÜNÜŞÜ

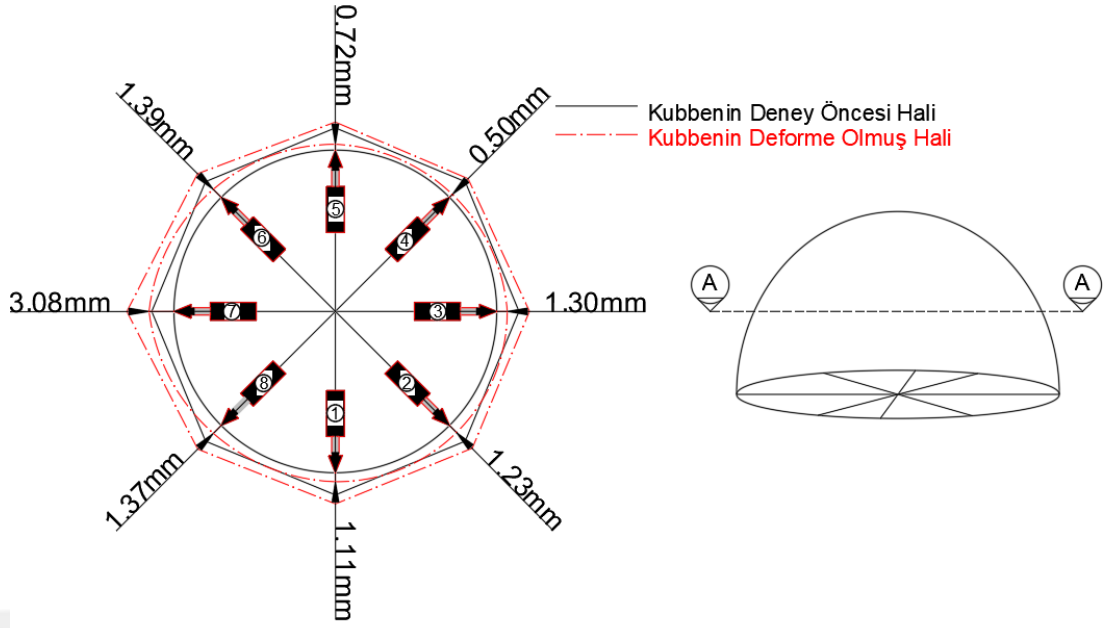
(a)



MODEL-300/2,5 DENEY ELEMANININ MAKSİMUM YÜK ALTINDAKİ PLAN GÖRÜNÜŞÜ

(b)

Şekil 4.37. Maksimum yük altında (a) Model-Ref/2,5, (b) Model-300/2,5, ve (c) Model-400/2,5 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.



MODEL-400/2,5 DENEY ELEMANININ MAKSİMUM YÜK ALTINDAKİ PLAN GÖRÜNÜŞÜ

(c)

Şekil 4.37 (devam). Maksimum yük altında (a) Model-Ref/2,5, (b) Model-300/2,5, ve (c) Model-400/2,5 deney elemanlarının deforme olmuş halleri.

Çizelge 4.3. % 2,5 boşluklu kubbe deney elemanları deney sonuçları.

Numune No	Şekiller	P_f (kN) (Mak Yük)	Artış ^a (%)	Mak.yüke karşılık gelen mak. yatay deplasman (mm)	Mak.yüke karşılık gelen birim şekil değiştirme (mm/mm)	Mak.yüke karşılık gelen çevre uzunluğundaki değişim (mm)
Model-Ref/2,5 (Boşluklu Referans Numune)		0,364	-	9,739	0,0040	26,505
Model-300/2,5		0,959	163,461	4,039	0,0013	8,609
Model-400/2,5		1,210	232,417	3,087	0,0012	8,422

^aModellerin Model-Ref/2,5 deney elemanına göre maksimum yüklerindeki yüzdelik artış miktarı

Çizelge 4.3'de boşluklu olarak üretilen kubbe deney elemanlarında tek bir kol doğrultusuna gelen maksimum yükler ve bu yüklerle karşılık gelen yatay deplasmanlar, birim şekil değiştirmeler ve çevre uzunluğundaki değişim verilmiştir. Model-400/2,5 deney elemanında maksimum yük 1,210 kN ölçülmüştür. Bu yüke karşılık gelen yatay deplasman miktarı 3,087 mm, birim şekil değiştirme miktarı

0,0012 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim 8,422 mm olmuştur. Model-Ref/2,5, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanları arasında en fazla yükü taşıyan ikinci deney elemanı Model-300/2,5 olmuştur. Model-300/2,5’de tek bir kol doğrultusuna karşılık gelen maksimum yük değeri 0,959 kN civarında iken yapmış olduğu maksimum yatay deplasman miktarı 4,039 mm, birim şekil değiştirme miktarı 0,0013 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim ise 8,609 mm’dir. Model-Ref/2,5 deney elemanında maksimum yük 0,364 kN, maksimum yük altındaki maksimum yatay deplasman miktarı 9,739 mm, birim şekil değiştirme miktarı 0,0040 mm/mm ve çevre uzunluğundaki değişim ise 26,505 mm olarak elde edilmiştir.

4.10.3 Deney elemanlarının karşılaştırılması

Gerek boşluklu sistemde gerekse boşluksuz sistemde kasnak yüksekliği arttıkça kubbe de tek bir kol doğrultusuna karşılık gelen yük, buna bağlı olarak kubbenin taşıma kapasitesi artmaktadır. Boşluksuz üretilen deney elemanlarında maksimum yük kasnak yüksekliği 400 mm olan Model-400 deney elemanından elde edilmiştir. Aynı şekilde boşluklu üretilen deney elemanlarında da maksimum yük kasnak yüksekliği 400 mm olan Model-400/2,5 deney elemanından ölçülmüştür.

Her bir deney elemanının deney sonrası halleri toplu olarak Şekil 4.38’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi referans olarak ele alınan Model-Ref, Model-Ref/2,5 ve kasnak yüksekliği 100 mm olan Model-100 deney elemanlarında kubbenin çekme hatta basınç bölgesinde kubbe yüzeyinin her tarafında çatlama meydana gelmiştir. Kasnak yüksekliği arttıkça kubbe üzerinde meydana gelen çatlak sayıları azalmış ve çatlak genişlikleri küçülmüştür. Çatlaklar genellikle kubbe kasnak köşelerinde meydana gelmiştir.

Model-Ref/2,5 deney elemanında boşluk kenarlarında kılcal şekilde çatlaklar gözlemlenirken, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 deney elemanlarında kasnak yüksekliklerinin artması sebebiyle boşluk kenarlarında hiçbir şekilde çatlak gözlemlenmemiştir.



(a) Model-Ref



(b) Model-100



(c) Model-200



(d) Model-300



(e) Model-400



(f) Model-Ref/2,5



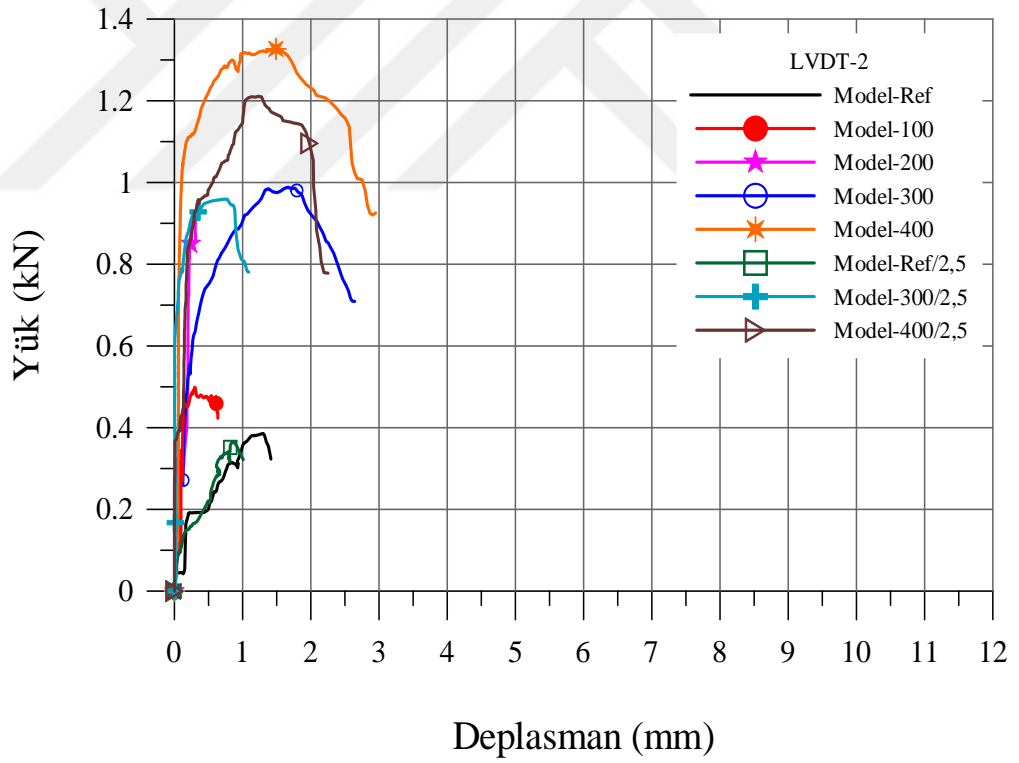
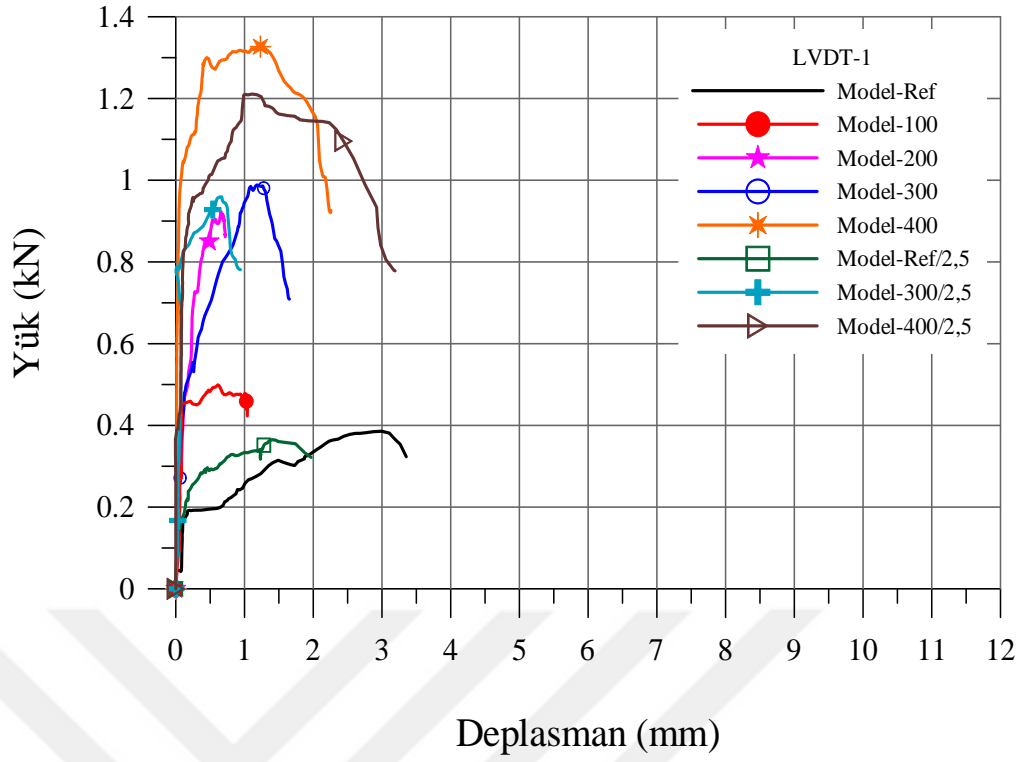
(g) Model-300/2,5



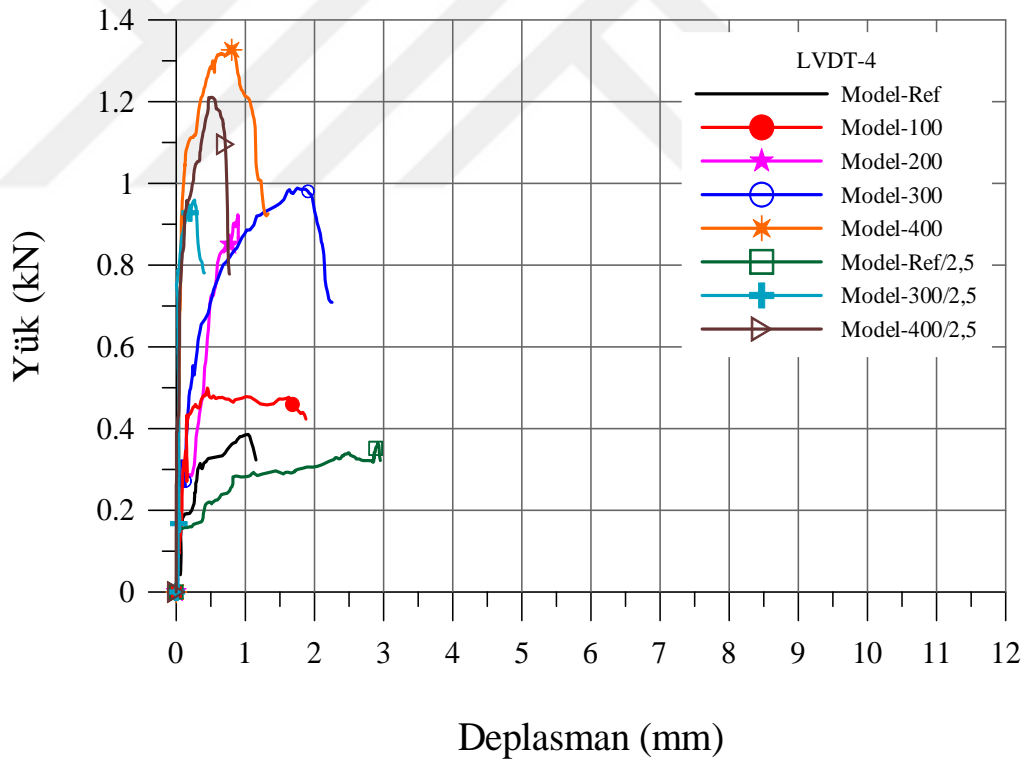
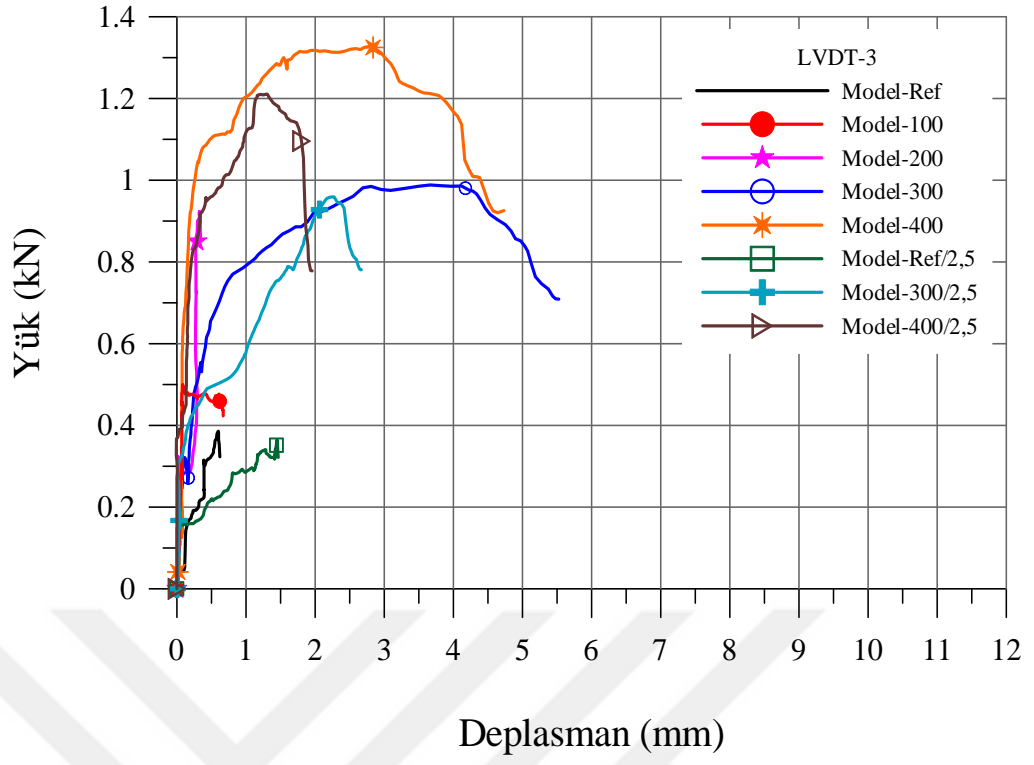
(h) Model-400/2,5

Şekil 4.38. Deneş elemanlarının deneş sonrası halleri.

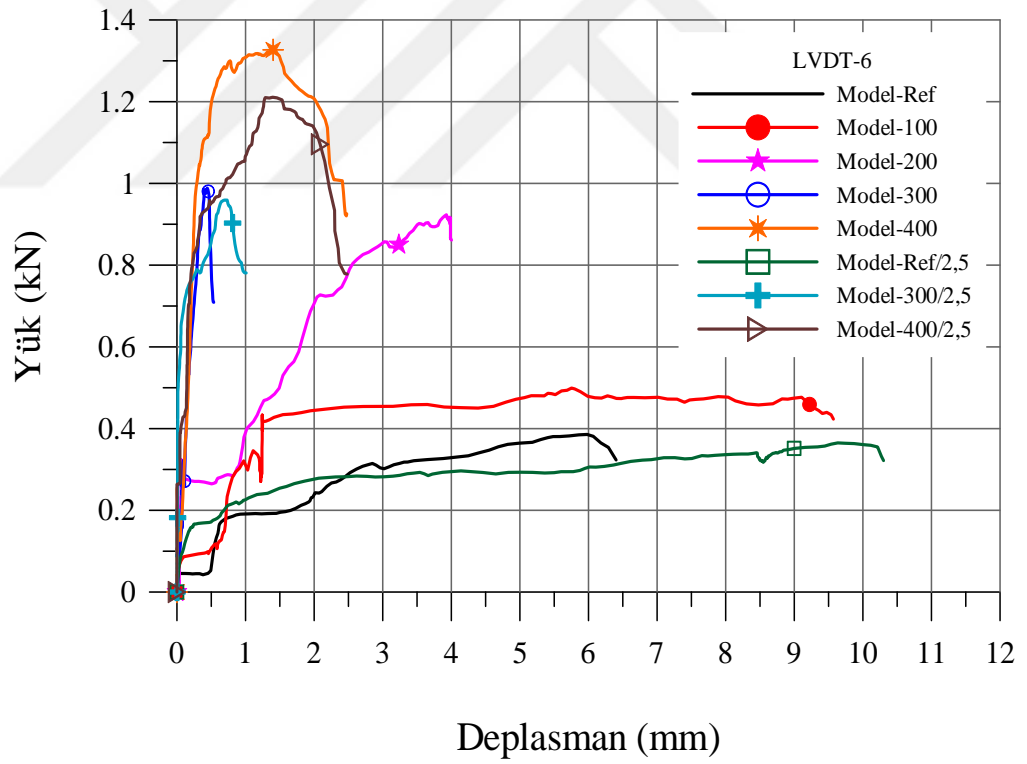
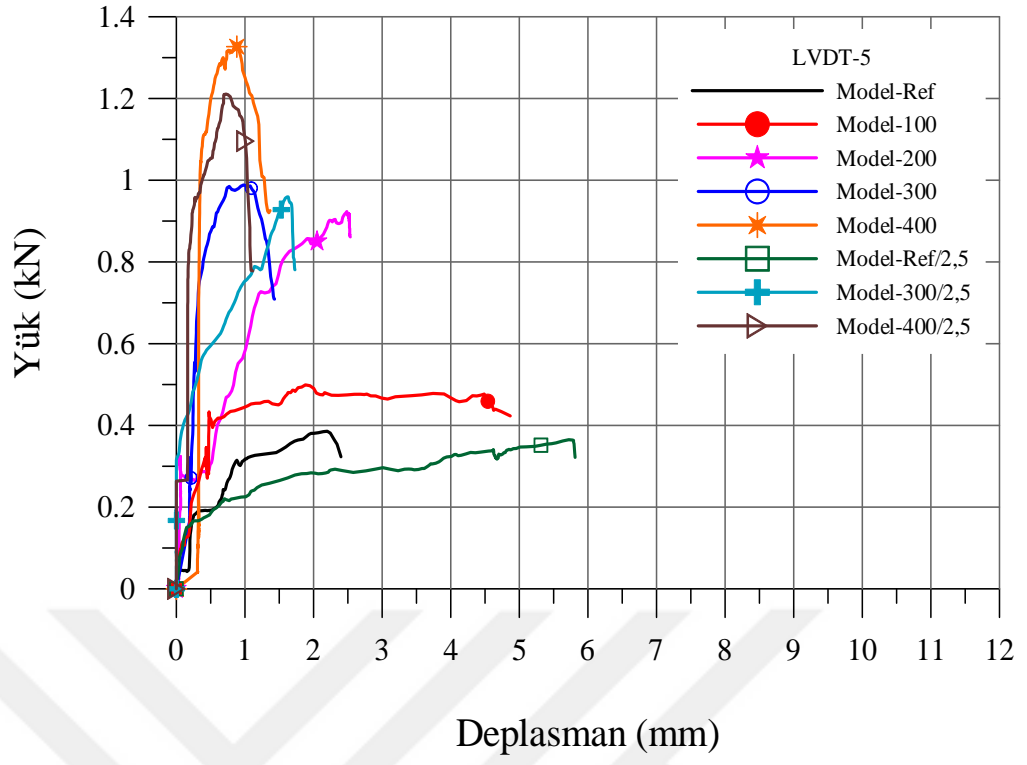
Kubbe deneş elemanlarında yatay deplasmanlarını ölçmek amacıyla sekiz adet LVDT'nin her biri aynı bölgeye bağlanmıştır. Her bir deneş elemanı için yatay olarak yerleştirilen LVDT'lerden elde edilen ölçümler Şekil 4.39'da verilen toplam yük- deplasman grafiğinde toplu olarak gösterilmiştir.



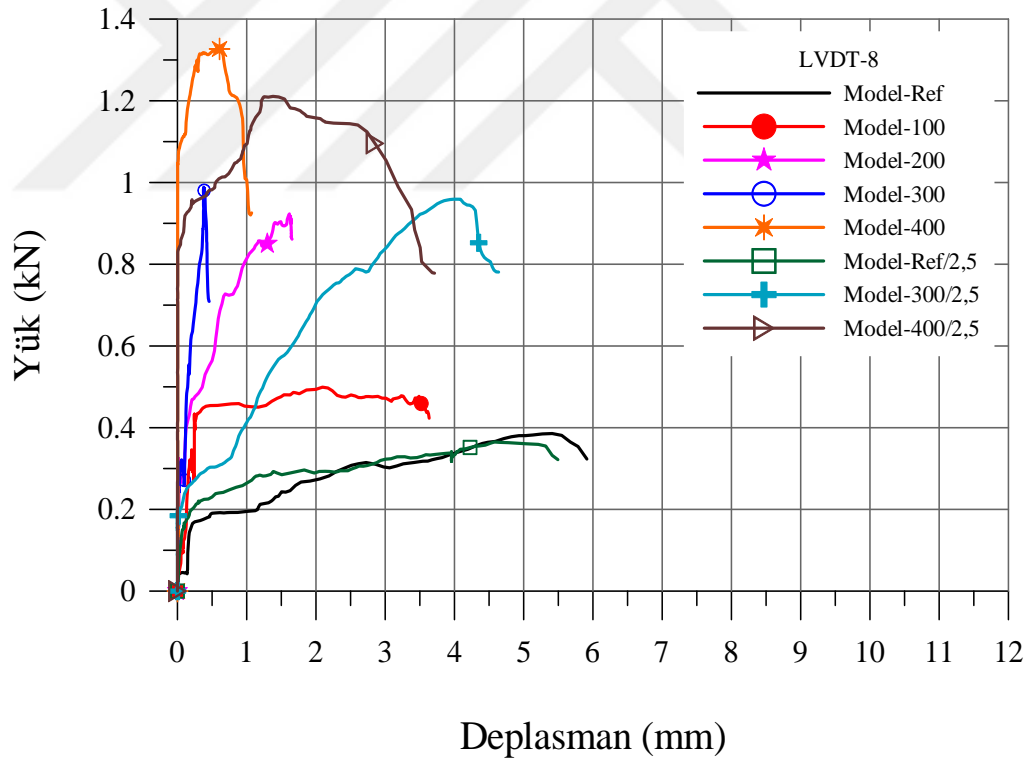
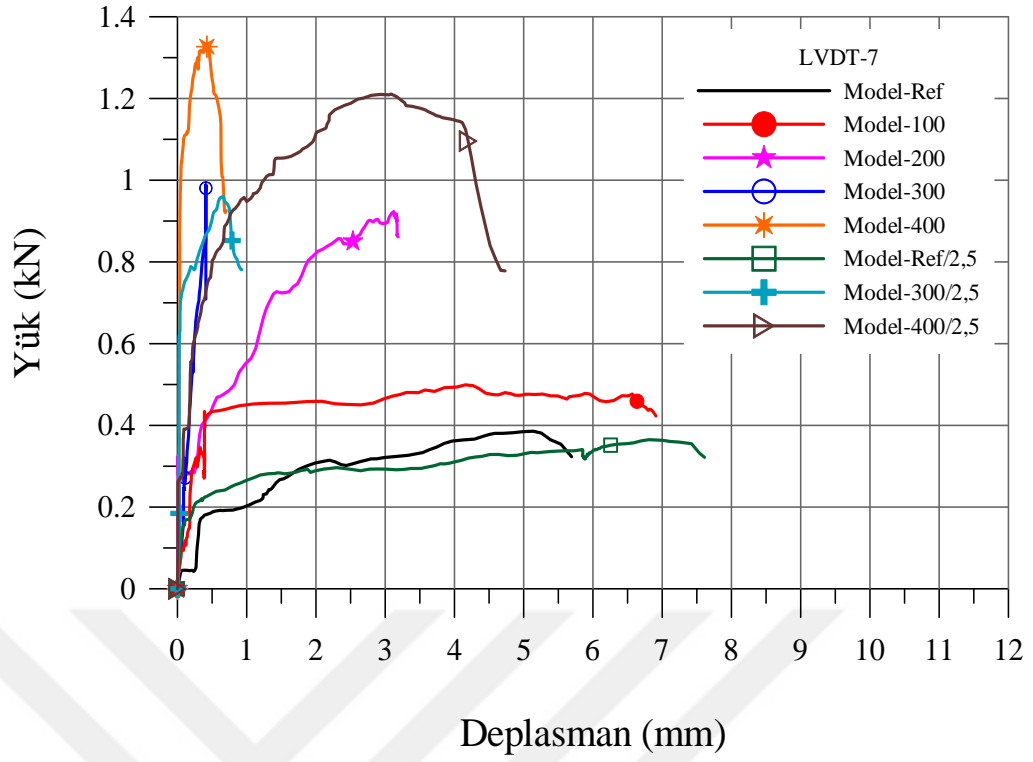
Şekil 4.39. Toplam yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.39 (devam). Toplam yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.39 (devam). Toplam yük- deplasman grafiği.



Şekil 4.39 (devam). Toplam yük- deplasman grafiği.

Şekil 4.39'da görüldüğü gibi LVDT-1'de yatay deplasman en fazla Model-Ref'de 3,330 mm ölçülürken, en az deplasman ise 0,647 mm ile Model-200'den ölçülmüştür. Deney sonrası fotoğraflar incelendiği zaman Model-Ref ve Model-400/2,5'de LVDT-1'in bulunduğu bölgede diğer modellere göre daha fazla çatlama ve açılma gözlemlenmiştir.

LVDT-2'de en fazla yatay deplasmanı yapan deney elemanı Model-400 olmuştur. LVDT-2'nin yer aldığı kısım incelendiği zaman en geniş çatlama ve açılma Model-400 ve Model-300'de meydana gelmiştir. Deney sonrasında Model-400'de LVDT-2'nin yaptığı deplasman değeri 2,999 mm'dir. Buna rağmen en az deplasman ise 0,431 mm değeriyle ile Model-200'den okunmuştur.

Model-300'de LVDT-3'ün bulunduğu 3. kasnak kenarı üzerinde diğer modellere göre daha fazla açılmalar ve daha büyük çatlak genişlikleri meydana gelmiştir. LVDT-3'den 5,524 mm ile maksimum yatay deplasman Model-300'de ölçülmüştür. Model-200'de ise bu bölgede kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Bu sebeple LVDT-3'ün yer aldığı kısımda minimum yatay deplasman 0,524 mm değeriyle Model-200'de gerçekleşmiştir.

LVDT-4 için yatay deplasman en fazla Model-Ref/2,5'de gözlemlenirken, en az yatay deplasman ise Model-300/2,5'de gözlemlenmiştir. Bu değerler sırası ile 3,000 mm ve 0,323 mm'dir.

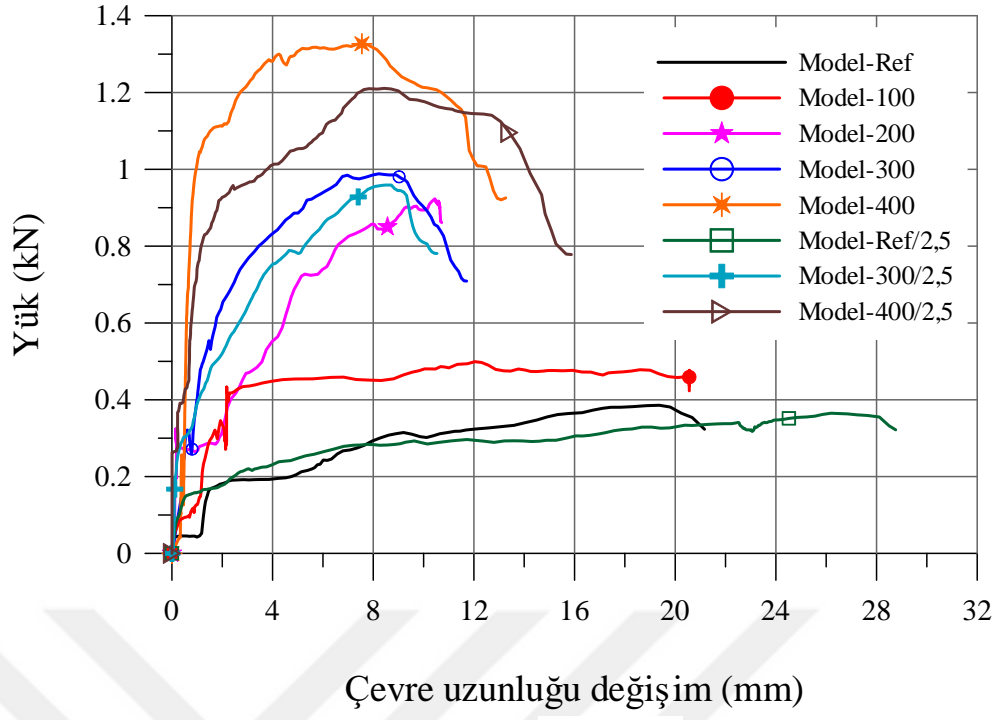
LVDT-5'te maksimum yatay deplasman 5,80 mm değeri ile Model-Ref/2,5'de olurken, minimum yatay deplasman ise 1,195 mm ile Model-400/2,5'de olmuştur. Model-Ref/2,5'de LVDT-5'in yer aldığı bölgede diğer modellere göre daha fazla açılma meydana gelmiştir. Bu sebeple buradaki yatay deplasman miktarı diğer modellere göre daha fazladır.

LVDT-6 için en fazla yatay deplasman Model-Ref/2,5'de ölçülürken, en az yatay deplasman ise Model-300'de ölçülmüştür. Bu değerler sırası ile 10,324 mm ile 0,531 mm'dir. Model-300'de LVDT-6'nın yer aldığı bölgede kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Bu nedenle Model-300'de LVDT-6'daki yatay deplasman miktarı diğer modellere göre daha azdır.

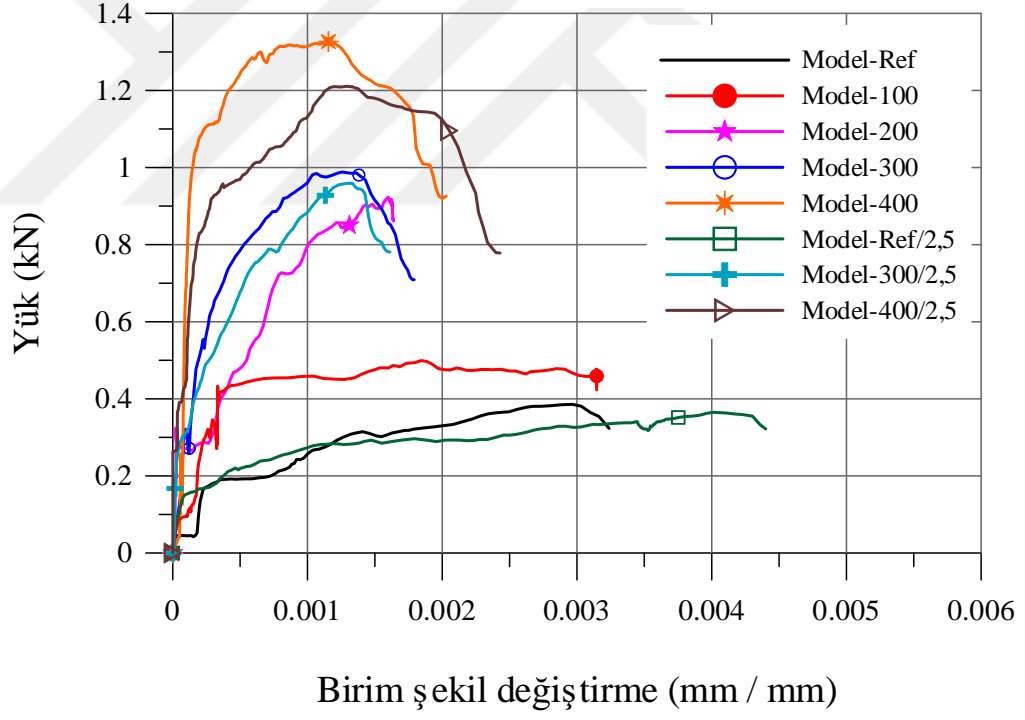
Boşluksuz referans numune olarak örülen Model-Ref/2,5'de LVDT-7'nin bulunduğu bölgede diğer modellere göre daha fazla açılma meydana gelmiştir. Bu sebeple LVDT-7 için maksimum deplasman 7,521 mm ile Model-Ref/2,5'den okunurken, minimum deplasman 0,618 mm ile Model-300'den okunmuştur.

LVDT-8'de en fazla deplasman Model-Ref'de gözlemlenmiştir. Model-Ref'de LVDT-8'den ölçülen yatay deplasman miktarı 5,975 mm'dir. Minimum deplasman ise Model-300'de gözlemlenmiştir. LVDT-8'in yer aldığı bölgede Model-300'de meydana gelen yatay deplasman değeri 0,423 mm'dir.

Şekil 4.40(a)'da deney elemanlarının çevre uzunluğunda meydana gelen değişim ve yük grafikleri verilmiştir. En fazla değişim Model-Ref ve Model-Ref/2,5 deney elemanlarında görülmüştür. Bunu 100 mm kasnak yüksekliğine sahip Model-100 takip etmiştir. Deney sonucunda çevre uzunluğunda en az değişime sahip deney elemanı Model-300/2,5 olmuştur. Şekil 4.40(b)'de Model-Ref'den Model-400/2,5'e kadar bütün deney elemanlarının yük-birim şekil değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Deney sonucunda en fazla birim şekil değiştirme Model-Ref ve Model-Ref/2,5'de gözlemlenmiştir. Bu deney elemanlarında kasnak uygulaması yapılmadığı için yatay deplasman diğer modellere göre fazla olmuştur. En az birim şekil değiştirme yapan deney elemanı ise Model-300/2,5'de meydana gelmiştir. Maksimum yük altında en fazla birim şekil değiştirme yapan deney elemanı Model-Ref/2,5 ve Model-Ref'dir. Model-400, Model-300 ve Model-400/2,5 deney elemanları ise maksimum yük altında en az birim şekil değiştiren deneyler olmuştur. Çizelge 4.4'de Model-Ref'den Model-400/2,5'e kadar bütün deney elemanlarının deneysel sonuçları tablo halinde verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.40. Deneysel elemanların (a) yük-çevre uzunluğu değişim ve (b) yük-birim şekil değiştirme grafikleri.

Çizelge 4.4. Deney elemanları deney sonuçları.

Numune No	Şekiller	P_f (kN) (Mak. Yük)	Artış ^a (%)	Mak.yüke karşılık gelen mak. yatay deplasman (mm)	Mak.yüke karşılık gelen birim şekil değiştirme (mm/mm)	Mak.yüke karşılık gelen çevre uzunluğunda ki değişim (mm)
Model-Ref (Boşluksuz Referans Numune)		0,385	-	5,979	0,0029	19,372
Model-100		0,499	29,610	5,752	0,0018	12,038
Model-200		0,924	140,000	3,928	0,0015	10,451
Model-300		0,988	156,623	3,664	0,0012	8,219
Model-400		1,331	245,714	2,777	0,0011	7,549
Model-Ref/2,5 (Boşluklu Referans Numune)		0,364	-	9,739	0,0040	26,505
Model-300/2,5		0,959	163,461	4,039	0,0013	8,609
Model-400/2,5		1,210	232,417	3,087	0,0012	8,422

^a Modellerin referans deney elemanlarına göre maksimum yüklerindeki yüzdelik artış miktarı

Şekil 4.40(a) ve Çizelge 4.4 incelendiği zaman maksimum yük altında en fazla çevre uzunluğunda değişim yapan deney elemanları sırası ile Model-Ref/2,5, Model-Ref ve Model-100 olmuştur. Deneysel çalışma sonucunda boşluksuz üretilen deney elemanları boşluklu üretilen deney elemanlarına göre daha fazla yük taşımıştır. Çatlakların olduğu yerler ve çatlak genişlikleri bakımından boşluklu ve boşluksuz üretilen deney elemanları birbirlerine yakın davranış sergilemişlerdir. Kasnak yüksekliği arttıkça kubbe deney elemanlarının tek bir kol doğrultusuna gelen yatay yük ve buna bağlı olarak taşıma kapasiteleri artmıştır. Boşluksuz olarak üretilen deney elemanları kendi aralarında karşılaştırıldığı zaman, kasnaklı olarak üretilen deney elemanları kasnaksız üretilen Model-Ref deney elemanına göre taşıdıkları yük bakımından % 29,610 artış göstermiştir. Kasnak yüksekliği 300 mm olarak üretilen Model-300 deney elemanının tek bir kol doğrultusuna gelen yük Model-Ref deney elemanına göre yüzde 156,623 artmıştır. Model-400 deney elemanında ise bu artış

yüzde 245,714 olmuştur. Boşluklu üretilen deney elemanları karşılaştırıldığında, kasnak yüksekliği 300 mm olan Model-300/2,5 deney elemanının yatay yükü referans olarak ele alınan Model-Ref/2,5 deney elemanına göre yüzde 163,461 oranında artış göstermiştir. 400 mm kasnak yüksekliğine sahip Model-400/2,5 deney elemanında tek bir kol doğrultusuna gelen maksimum yük Model-Ref/2,5 deney elemanına göre yüzde 232,417 artmıştır. Çizelge 4.4’de belirtildiği gibi maksimum yük altında en fazla birim şekil değiştirme yapan deney elemanı 0,0040 mm/mm değeri ile Model-Ref/2,5 ve 0,0029 mm/mm değeri ile Model-Ref olmuştur. Model-400, Model-300, Model-400/2,5 ve Model-300/2,5’de ise maksimum yük altında minimum birim şekil değiştirme meydana gelmiştir. Bu değerler sırası ile 0,0011 mm/mm, 0,0012 mm/mm, 0,0012 mm/mm ve 0,0013 mm/mm’dir.



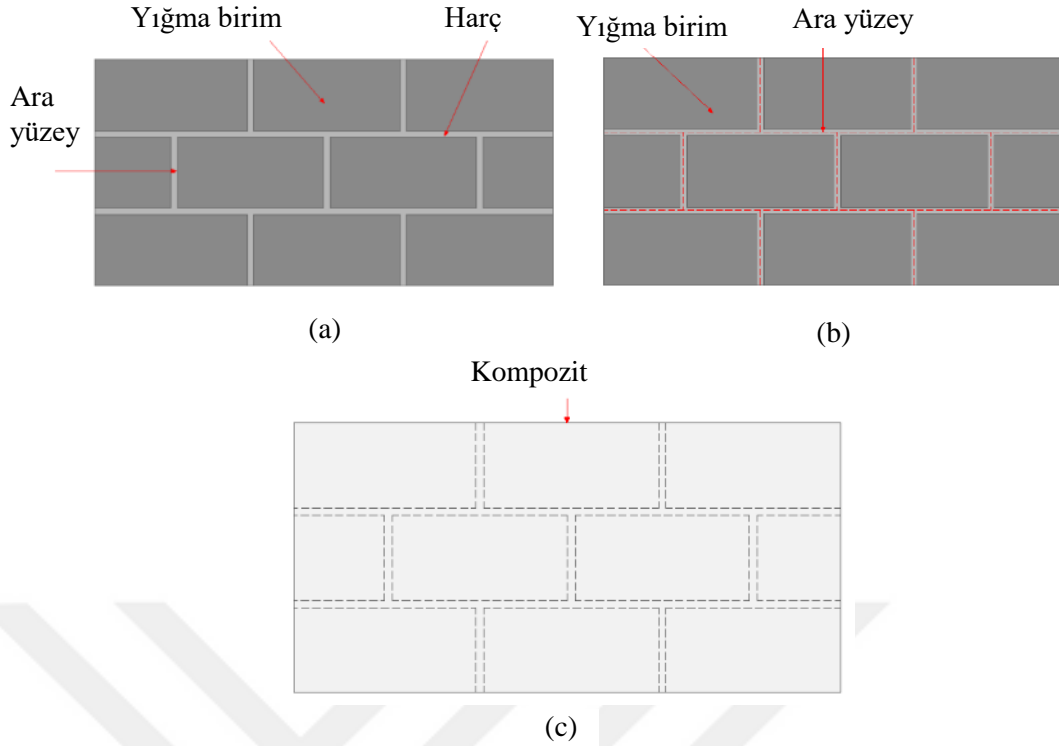
5. KUBBE NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Yığma yapı türlerinin analizlerinde detaylı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme olmak üzere üç farklı modelleme tekniği kullanılmaktadır. Mikro modellemeler yığma yapılarda detaylı incelemelerde kullanılırken, makro modellemeler ise yapıyı bir bütün olarak ele alır.

Detaylı mikro modelleme, bu modellemelerde yapıyı oluşturan yığma birim ve harç ayrı ayrı ele alınır. Yığma birimin ve harcın mekanik özellikleri (poisson oranı, elastisite modülü ve elastik olmayan özellikleri) tek tek girilerek analiz yapılır. Bu modellemede oluşacak çatlakların harç ile yığma birim arasındaki yüzeyde meydana geleceği varsayılmaktadır.

Basitleştirilmiş mikro modellemede ise yığma birimler harcın kalınlığının yarısı kadar genişletilerek harç ihmal edilmiş, yığma birimler ara yüzey ile birbirlerinden ayrılmıştır. Bu modellemede oluşacak çatlakların ara yüzeylerde meydana geleceği kabul edilmiştir.

Mikro modellemeler detaylı bir şekilde incelemede bulunduğu için bilgisayar üzerinden bunların analizi uzun süreli olacağından makro modellemeler tercih edilmiştir. Makro modellemelerde yığma birimin ve harcın mekanik özellikleri ayrı ayrı ele alınmamaktadır. Yığma birim ve harçtan homojen olarak elde edilen yığma duvarlar kompozit olarak düşünülüp, yığma duvarın mekanik özellikleri ele alınmaktadır. Şekil 5.1’de yığma yapılarda kullanılan modelleme çeşitleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Yığma duvarlardaki modelleme teknikleri a) Detaylı mikro modelleme, b) Basitleştirilmiş mikro modelleme, c) Makro modelleme.

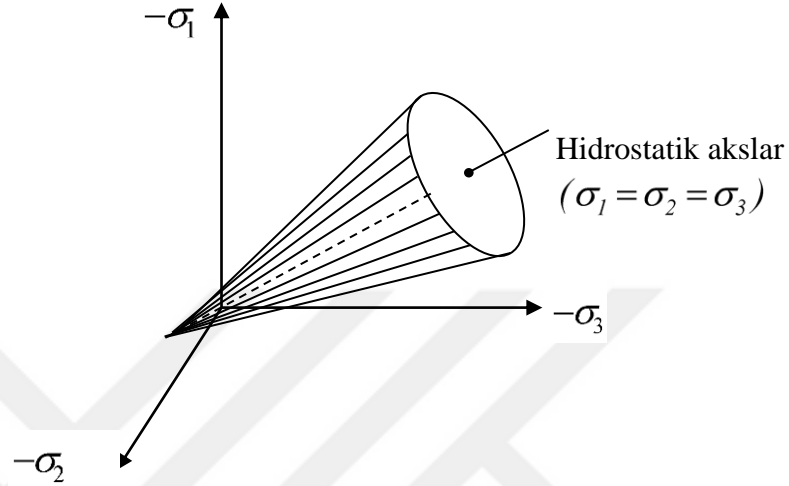
Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda çizilen grafikler incelendiğinde kubbe deney elemanlarının doğrusal olmayan davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında sonlu elemanlar yöntemi olarak LUSAS analiz programı kullanılmıştır. LUSAS analiz programında makro modelleme ele alınarak elasto-plastik davranışını temsil eden Drucker-Prager kriteri uygulanmıştır. Drucker-Prager kriterinde iki parametrenin tanımlanması gerekmektedir. Bu parametreler, kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısıdır (ϕ).

Von-Mises enerji hipotezinin basitleştirilmiş hali olan Drucker-Prager kriteri, genellikle makro modellemelerde kullanılır. Drucker-Prager kriteri ve von-Mises kriterindeki hidrostatik gerilme değeri Denklem 4.1 ile ifade edilmektedir (Ural, 2009).

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad 4.1$$

Denklem 4.1'de α ve k malzeme sabitleri, I_1 , gerilme tansörünün birinci invariantı, J_2 deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantıdır. $\alpha = 0$ ise Drucker Prager kriteri von- Mises Kriteri ile aynıdır. Drucker-Prager kırılma yüzeyinin üç boyutlu gerilme hali Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Hidrostatik aks etrafında bir koni olarak gösterilen

Drucker-Prager kriterinde koninin açık olan taban kısmı yığma duvarın basınç dayanımını gösterirken, kapalı olan uç kısmı ise yığma duvarın çekme dayanımını ifade etmektedir. Drucker-Prager kriteri diğer kriterlerden farklı olarak basınç ve çekme dayanımlarını ayrı ayrı göstererek yığma duvarların davranışını gerçeğe daha yakın temsil etmektedir.



Şekil 5.2. Drucker-Prager kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).

Mohr-Coulomb kriterine çok yakın olan Drucker-Prager kriterinin daire, Mohr-Coulomb altıgeninin dışından çizilen daire olarak düşünülürse, iki yüzey $\theta=60^\circ$, α ve k ile belirlenecek basınç meridyenine uygun olarak Denklem 4.2 ile ifade edilebilir (Chen ve Mizuno, 1990). Denklemdaki ϕ ve c sırası ile içsel sürtünme açısını ve kohezyonu ifade etmektedir.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad 4.2$$

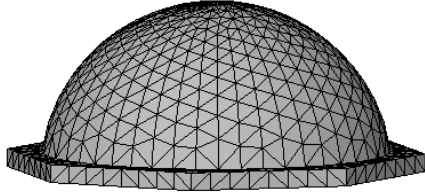
$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}$$

Aynı zamanda çekme meridyeninden geçen, $\theta=0^\circ$ ile iç koniyi belirleyen sabitler Denklem 4.3 ile bulunmaktadır.

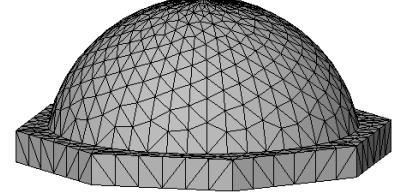
$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad 4.3$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$$

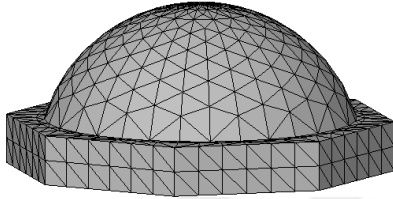
Bu çalışmada LUSAS analiz programında makro modellemede Drucker- Prager kriteri dikkate alınarak, 10 düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında 3'er adet serbestliği bulunan üç boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) katı elemanlar kullanılmıştır. Şekil 5.3'de kubbe numunelerinin analizinde kullanılan eleman ve düğüm noktaları sayıları ve Çizelge 5.1'de kubbe modellerinin malzeme özellikleri verilmiştir.



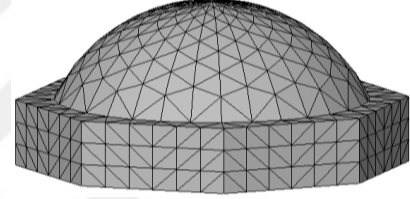
Eleman sayısı:4520
Düğüm noktası:1720
a) Model-Ref



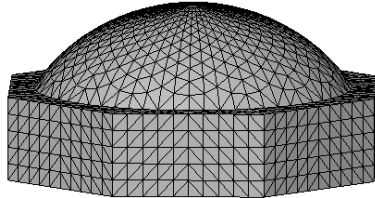
Eleman sayısı:3760
Düğüm noktası:1356
b) Model-100



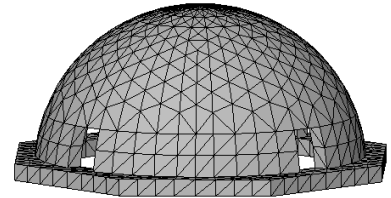
Eleman sayısı:3464
Düğüm noktası:1208
c) Model-200



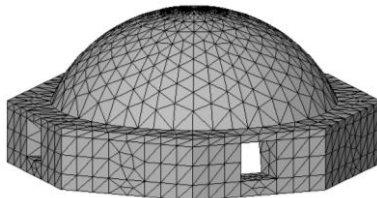
Eleman sayısı:3632
Düğüm noktası:1248
d) Model-300



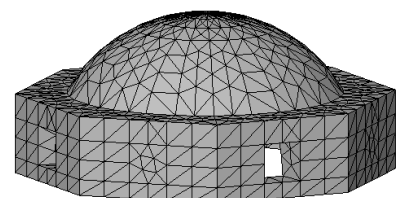
Eleman sayısı:10280
Düğüm noktası:3344
e) Model-400



Eleman sayısı:4339
Düğüm noktası:1637
f) Model-Ref/2,5



Eleman sayısı:5732
Düğüm noktası:2007
g) Model-300/2,5



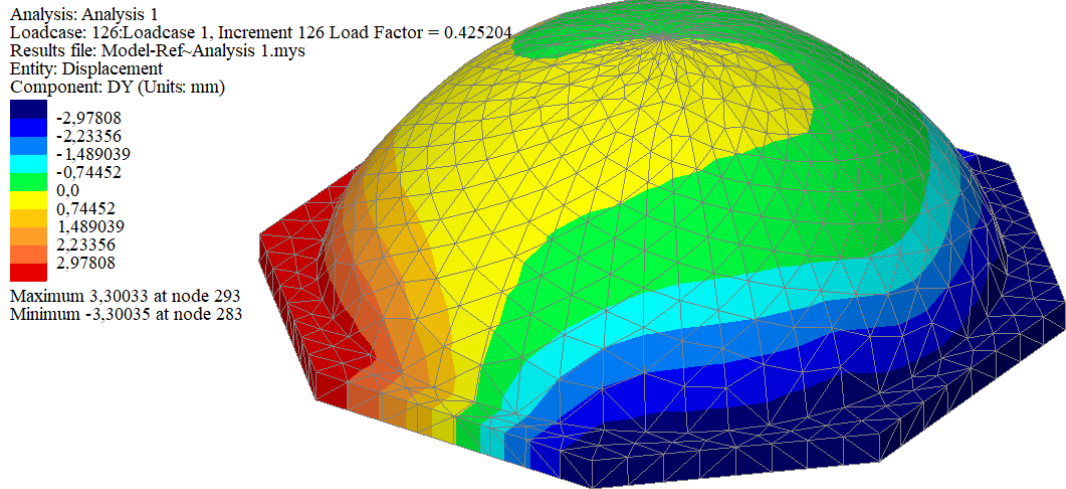
Eleman sayısı:5004
Düğüm noktası:1653
h) Model-400/2,5

Şekil 5.3. Kubbe numunelerinin analizinde kullanılan eleman ve düğüm noktası sayısı.

Çizelge 5.1. Kubbe modellerin malzeme özellikleri.

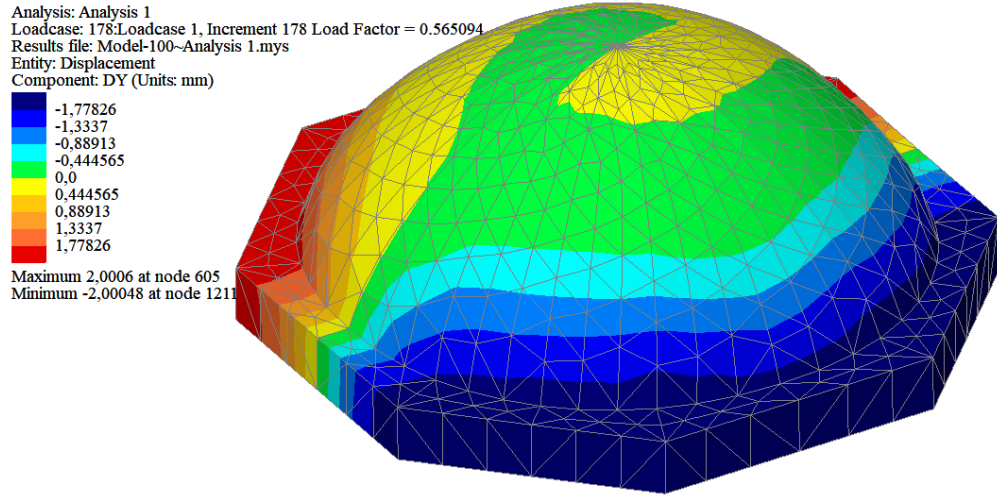
Malzeme	Özellikler	Değerler
Yığma Birim	Elastisite modülü	1850
	Poisson oranı	0,2
	Kohezyon	2,5
	İçsel sürtünme açısı	30
	Çekmede kohezyon eğimi	0,0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0,0
	Plastik şekil değiştirme	0,001

Sonlu elemanlar analizinde yükleme, deneysel çalışmada olduğu gibi sekiz adet kol doğrultusu yönünde tekil yük uygulanarak yapılmıştır. Mesnetler beton blokların alt kısımlarında kayıcı mesnet olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.4’de kubbe modellerinin sayısal analiz sonuçları ve maksimum yük altında y yönündeki deplasman görüntüleri verilmiştir.

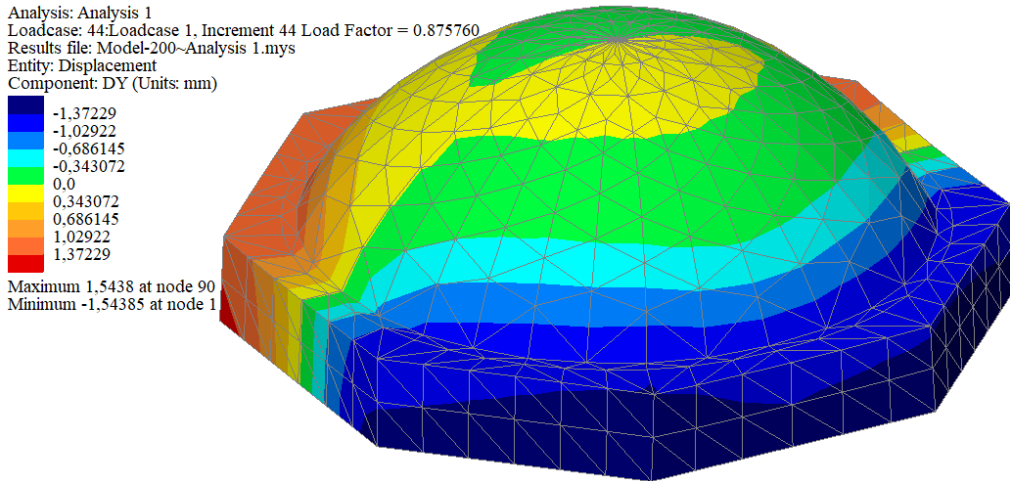


(a) Model-Ref

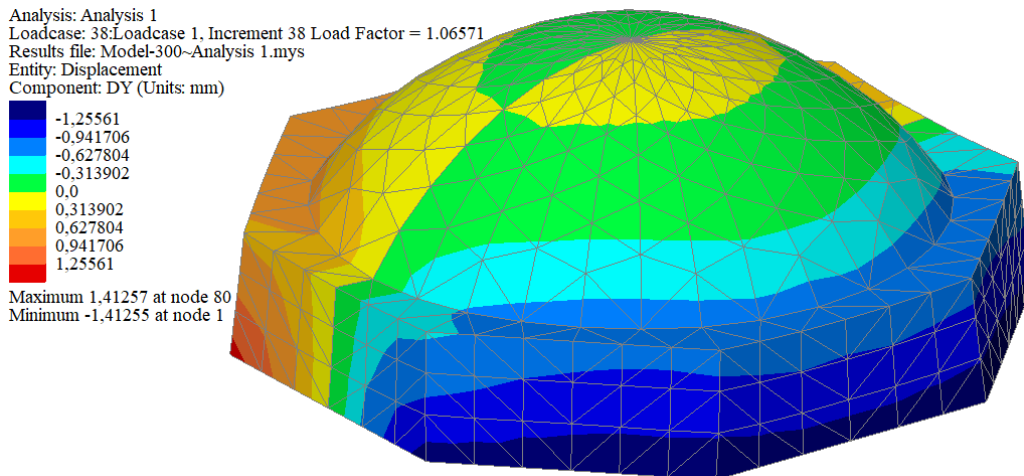
Şekil 5.4. Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.



(b) Model-100



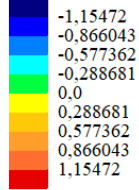
(c) Model-200



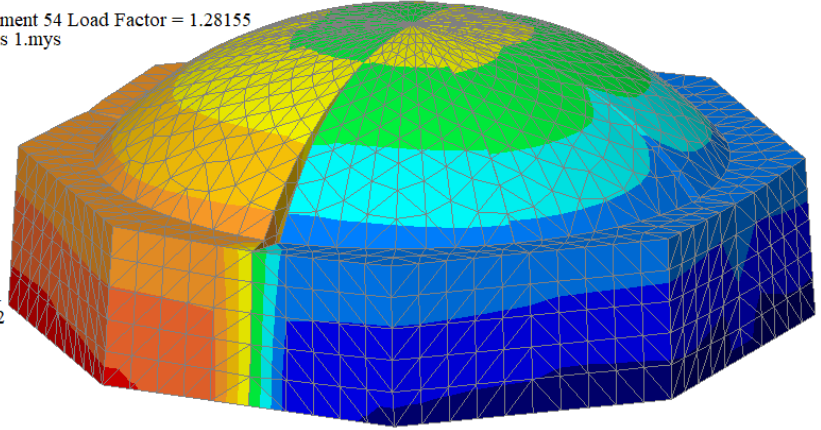
(d) Model-300

Şekil 5.4 (devam). Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 54:Loadcase 1, Increment 54 Load Factor = 1.28155
Results file: Model-400~Analysis 1.mys
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)

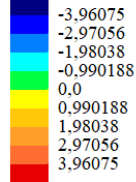


Maximum 1,29897 at node 1124
Minimum -1,29916 at node 2792

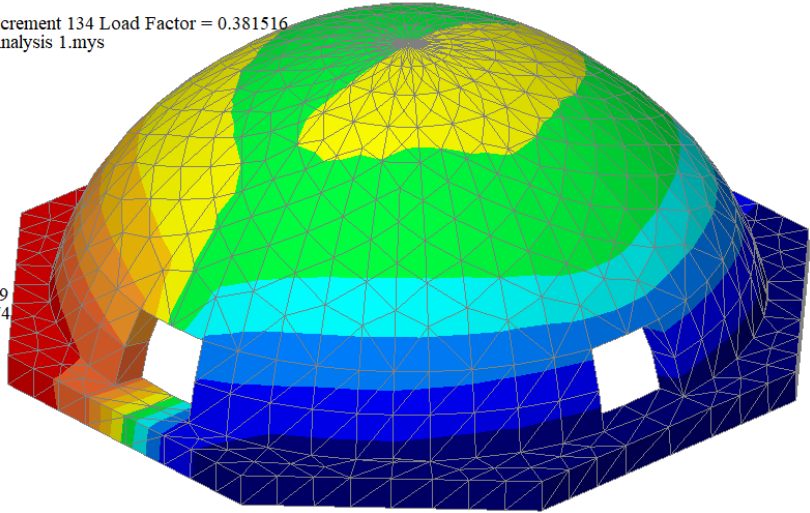


(e) Model-400

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 134:Loadcase 1, Increment 134 Load Factor = 0.381516
Results file: Model-Ref-2,5~Analysis 1.mys
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)

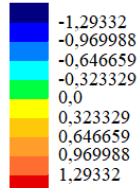


Maximum 4,44786 at node 449
Minimum -4,46384 at node 274

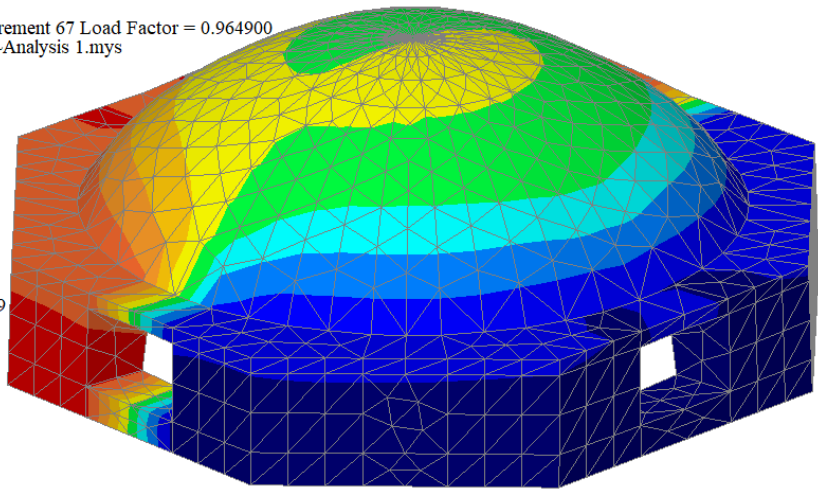


(f) Model-Ref/2,5

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 67:Loadcase 1, Increment 67 Load Factor = 0.964900
Results file: MODEL-300-2,5~Analysis 1.mys
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)



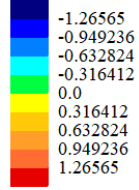
Maximum 1,45034 at node 169
Minimum -1,45962 at node 1



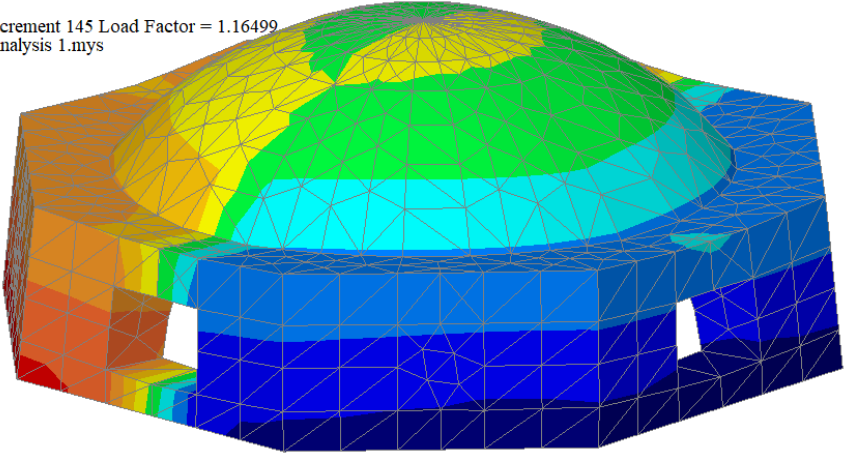
(g) Model-300/2,5

Şekil 5.4 (devam). Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 145:Loadcase 1, Increment 145 Load Factor = 1.16499
Results file: Model-400-2,5-Analysis 1.mys
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)



Maximum 1.42137 at node 85
Minimum -1.42634 at node 1










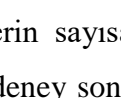
(h) Model-400/2,5

Şekil 5.4 (devam). Modellerin analiz sonucunda maksimum yük altında yatay yöndeki deplasman görüntüsü.

6. ANALİZ İLE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

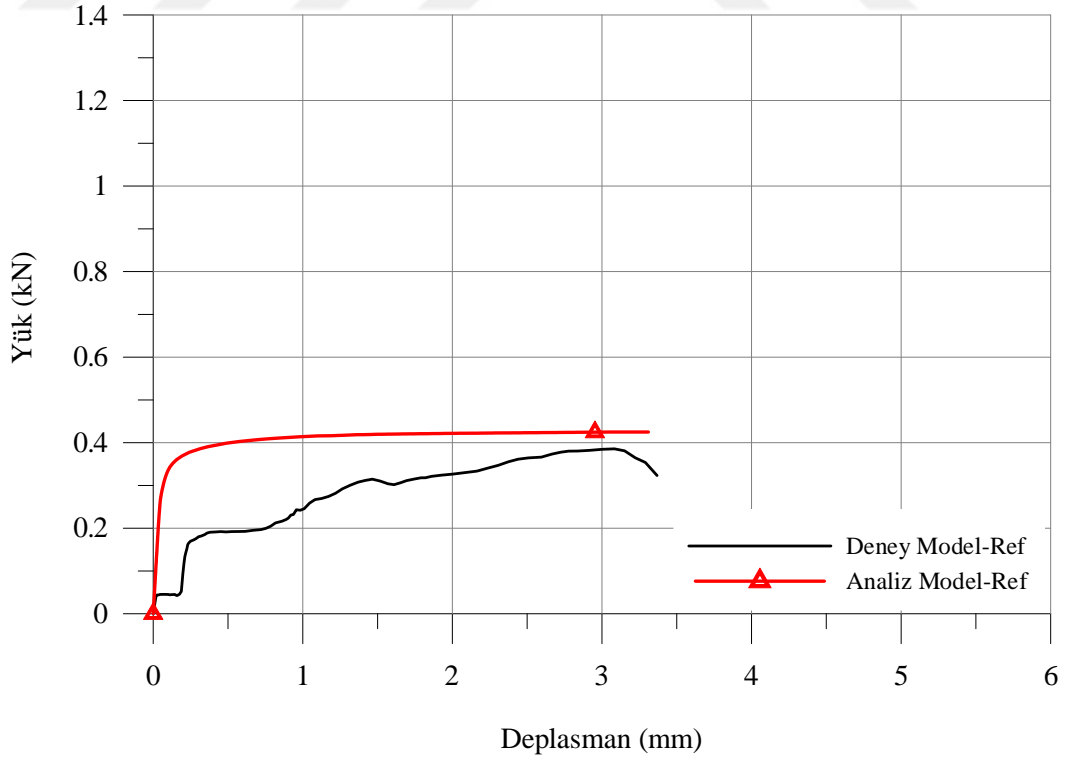
Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 6.1’de belirtilmiştir. Çizelge 6.1 incelendiği zaman deney ve analiz sonucundaki maksimum yük ve bu yük altında yapmış oldukları yatay deplasman değerleri birbirine yakın çıkmıştır.

Çizelge 6.1. Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

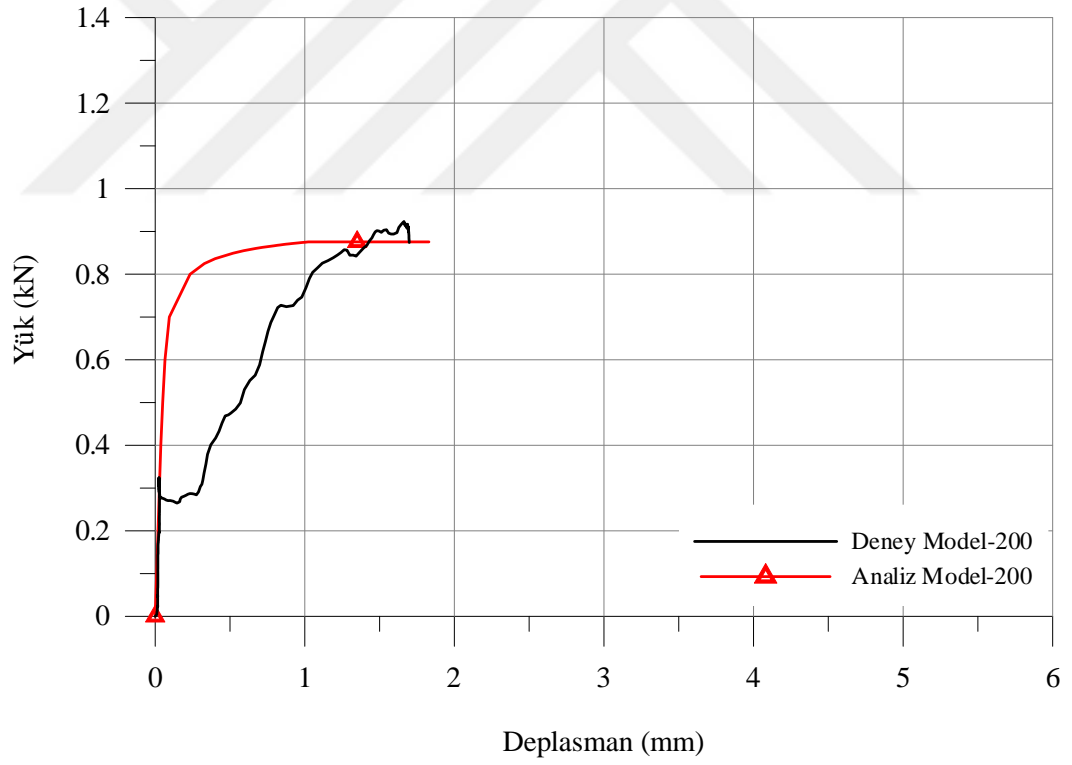
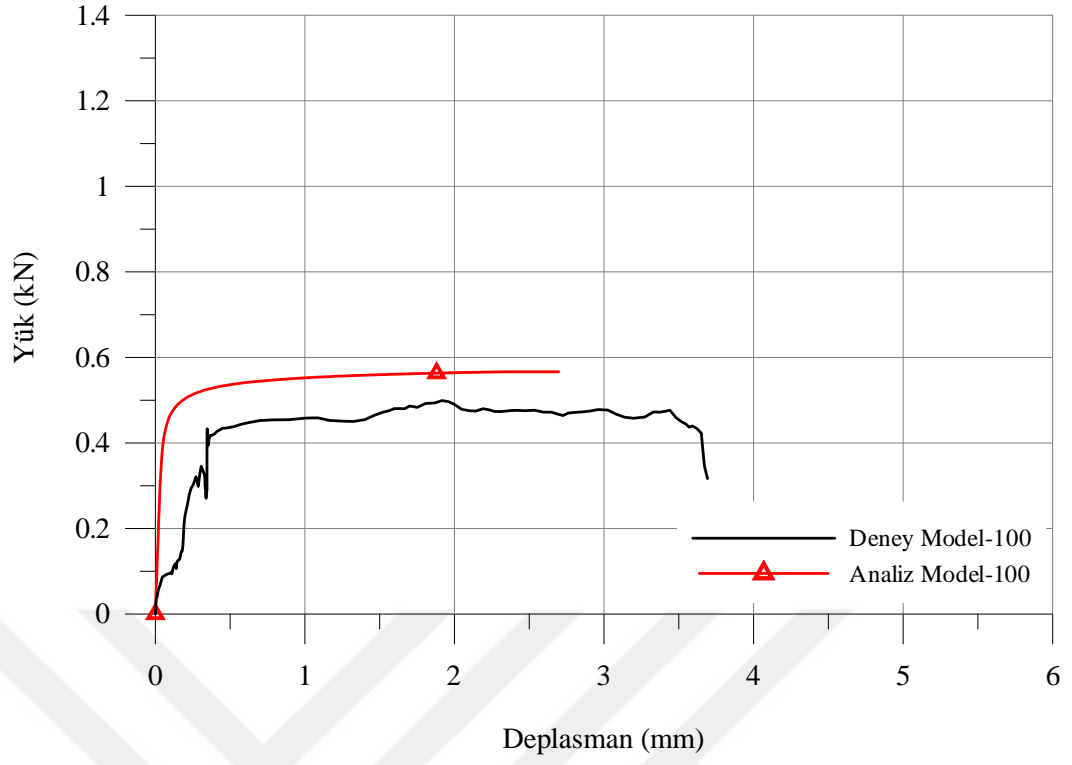
Numune No	Şekiller	P_f (kN) (Deneyde Mak. Yük)	P_f (kN) (Analizde Mak. Yük)	Deneyde mak. yüke karşılık gelen ortalama yatay deplasman (mm)	Analizde mak. yüke karşılık gelen yatay deplasman (mm)
Model-Ref (Boşluksuz Referans Numune)		0,385	0,425	3,083	3,300
Model-100		0,499	0,565	1,916	2,000
Model-200		0,924	0,875	1,663	1,543
Model-300		0,988	1,065	1,308	1,412
Model-400		1,331	1,281	1,201	1,298
Model-Ref/2,5 (Boşluklu Referans Numune)		0,364	0,381	4,218	4,447
Model-300/2,5		0,959	0,964	1,370	1,450
Model-400/2,5		1,210	1,165	1,342	1,421

Kubbe modellerin sayısal analiz ve deneysel sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Model-Ref’de deney sonucunda ve analiz sonucunda tek bir kol doğrultusuna gelen maksimum yük sırası ile 0,385 kN ve 0,425 kN’dur. Bu maksimum yüklere karşılık gelen yatay deplasman değerleri ise 3,083 mm ve 3,300 mm’dir. Model-100’deki maksimum yük değeri deneyde 0,499 kN, analizde 0,565 kN’dur. Maksimum yükteki yatay deplasman değeri deneyde 1,916 mm analiz sonucunda ise 2,000 mm elde edilmiştir. Model-200’ün analiz ve deney sonucunda maksimum yük değeri sırası ile 0,924 kN ve 0,875 kN’dur. Bu yüke karşılık gelen yatay deplasman değeri deney sonucunda 1,663 mm, analiz sonucunda ise 1,543 mm’dir.

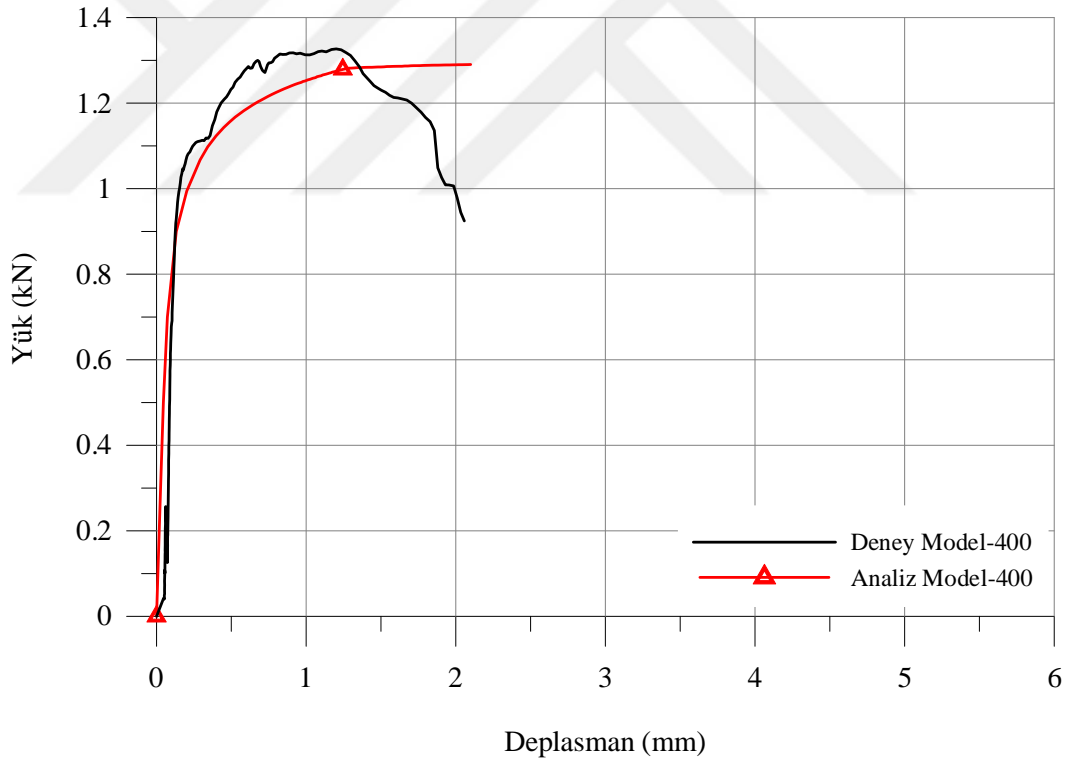
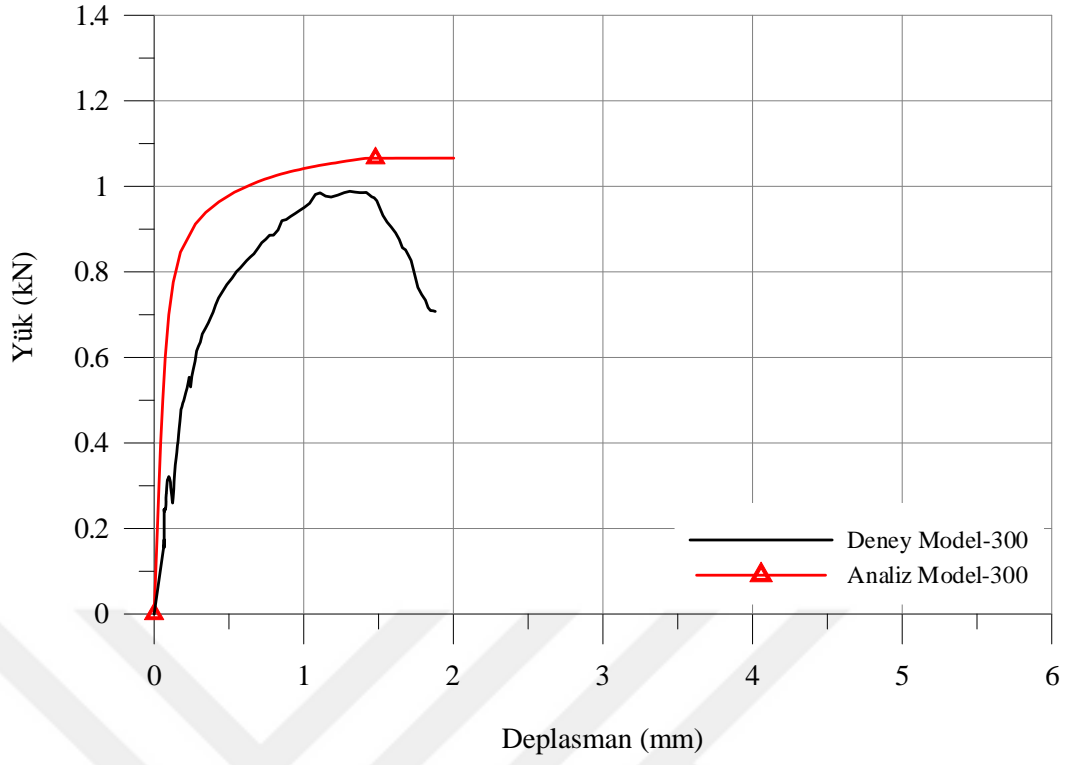
Deney sonucunda maksimum yükü 0,988 kN ve analiz sonucunda 1,065 kN olan Model-300'de ise yatay deplasman değerleri deney ve analiz sonucunda sırası ile 1,308 mm ve 1,412 mm'dir. Model-400 maksimum yükü taşıyan kubbe olmuştur. Maksimum yük deneyde 1,331 kN, analizde ise 1,281 kN değerindedir. Maksimum yük altındaki yatay deplasman deneysel çalışmada 1,201 mm, analiz sonucunda ise 1,298 mm elde edilmiştir. Boşluklu olarak ele alınan Model-Ref/2,5, Model-300/2,5 ve Model-400/2,5'de ise maksimum yükü taşıyan Model-400/2,5 olmuştur. Bu değer deney sonucunda 1,210 kN elde edilirken, analiz sonucunda 1,165 kN elde edilmiştir. Bu yük altındaki deplasman değerleri deneysel çalışmada 1,342 mm analiz çalışmasında ise 1,421 mm'dir. Model-300/2,5'de ise maksimum yük değeri deneyde 0,959 kN, analizde ise 0,964 kN'dur. Bu yüke karşılık gelen yatay deplasman ise deney ve analiz sonucunda sırası ile 1,370 mm ve 1,450 mm elde edilmiştir. Son olarak Model-Ref/2,5 boşluklu referans modelde tek bir kol doğrultusuna gelen maksimum yük deney sonucunda 0,364 kN analiz sonucunda ise 0,381 kN olarak ölçülmüştür. Maksimum yük altındaki yatay deplasman deney sonucunda 4,218 mm, analiz sonucunda ise 4,447 mm'dir. Şekil 6.1'de deney ve analiz sonucunda elde edilen yük- deplasman grafikleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



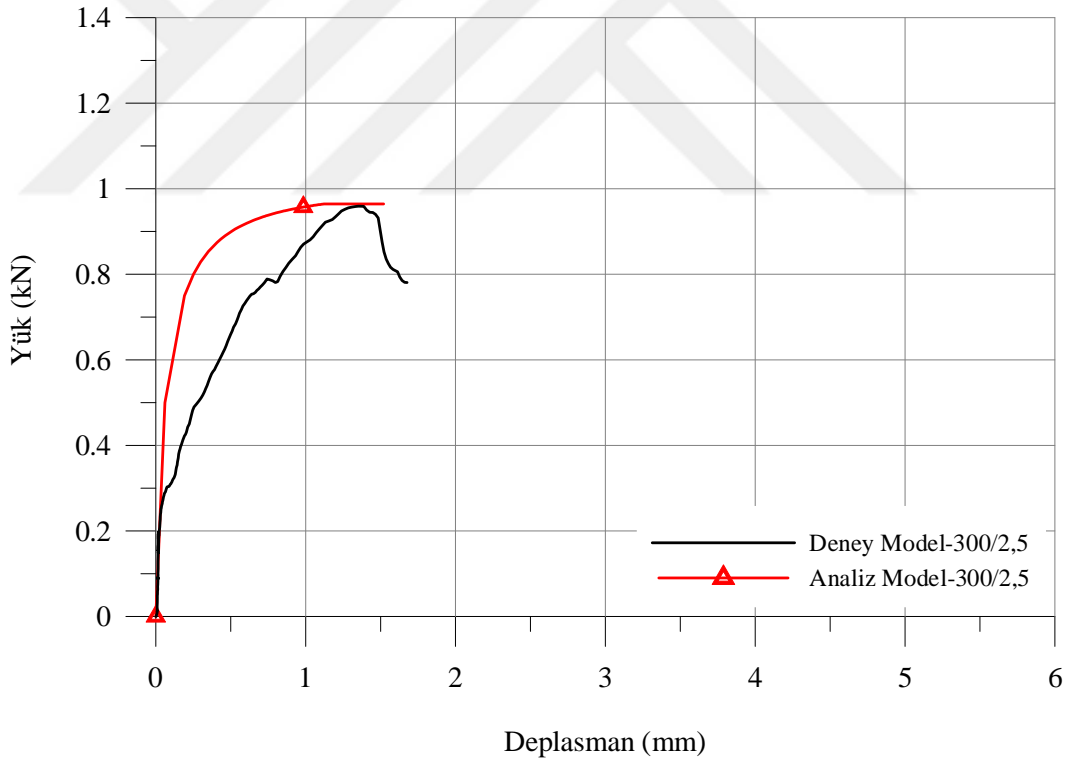
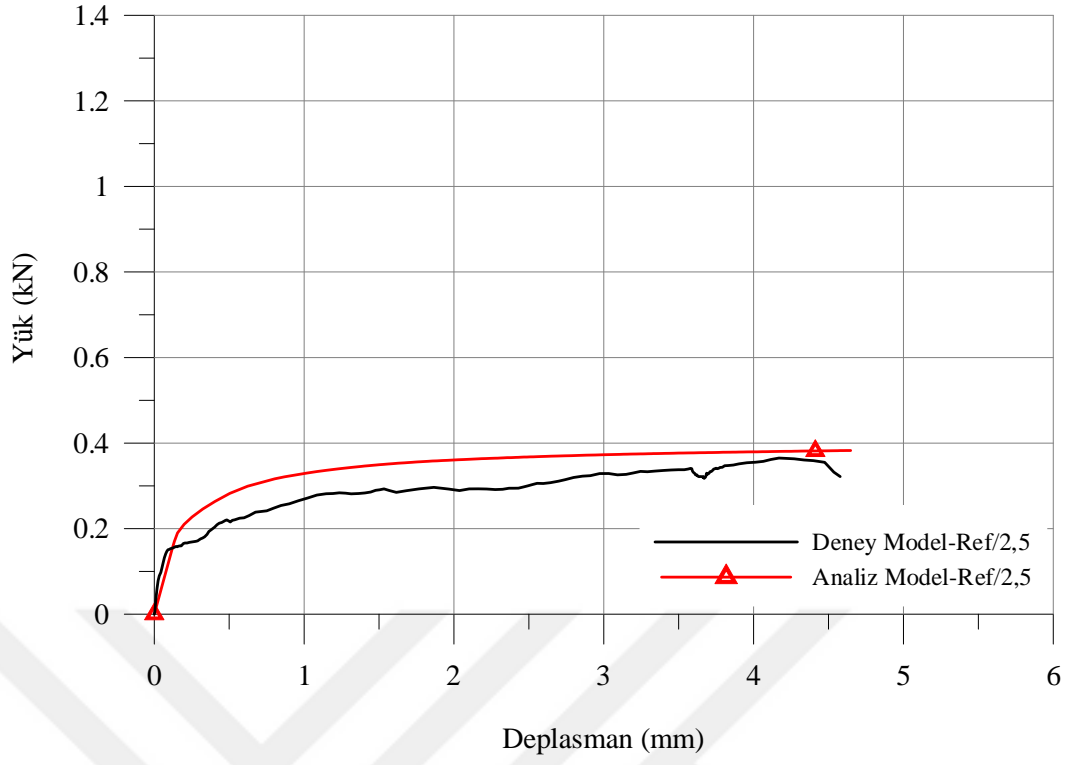
Şekil 6.1. Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük- deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.



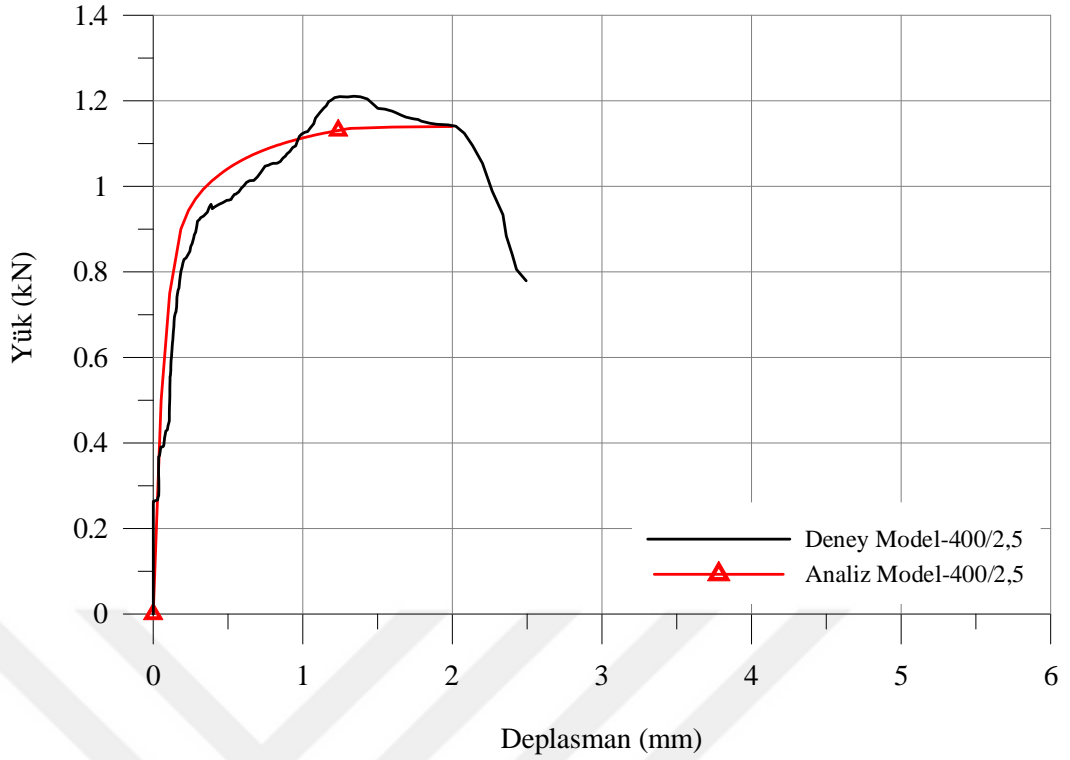
Şekil 6.1 (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.



Şekil 6.1 (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.



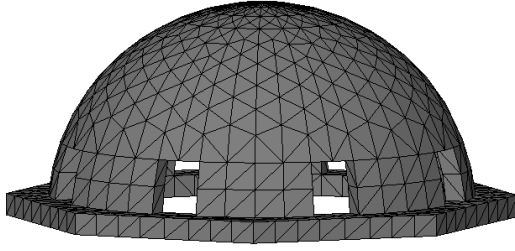
Şekil 6.1 (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.



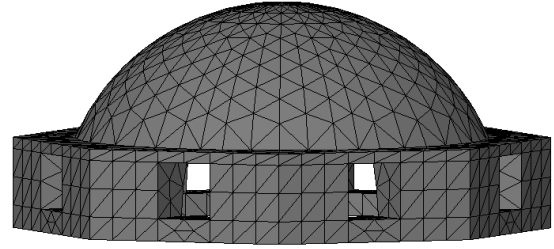
Şekil 6.1 (devam). Sonlu elemanlar ile deney sonuçlarından elde edilen yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılarak verilmesi.

6.1 Boşluk Oranı Arttırılan Kubbe Modellerin Sayısal Analizi

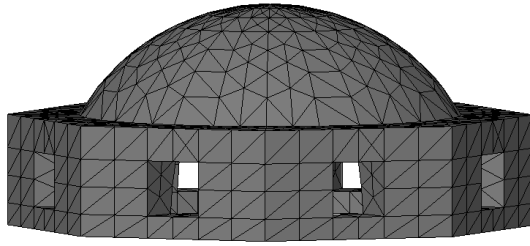
Yığma kubbeler de boşluk (pencere) oranının kubbe davranışına etkisini incelemek amacıyla LUSAS programında boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin sayısal analizi yapılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Bu modellerde kubbelerin geometrik boyutları ve malzeme özellikleri deneysel ve sayısal modellemesi yapılan diğer kubbelerle aynı olacak şekilde ele alınmıştır. Boşluklu kubbe modellerde birer adet kasnaksız, birer adet kasnak yüksekliği 300 mm olan ve birer adet de 400 mm kasnak yüksekliğine sahip toplamda 12 (on iki) adet kubbe modelleri üzerinde analiz yapılmıştır. Referans olarak ele alınan modeller boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modelleri için sırasıyla Model-Ref/5, Model-Ref/7,5, Model-Ref/10 ve Model-Ref/12,5 olarak adlandırılmıştır. Kasnak yüksekliği 300 mm olan modeller Model-300/5, Model-300/7,5, Model-300/10 ve Model-300/12,5, 400 mm kasnak yüksekliğine sahip kubbe modeller ise Model-400/5, Model-400/7,5, Model-400/10 ve Model-400/12,5 olarak adlandırılmıştır. Şekil 6.2’de boşluk oranları arttırılarak yapılan kubbe modellerin analizdeki eleman ve düğüm noktaları sayıları verilmiştir.



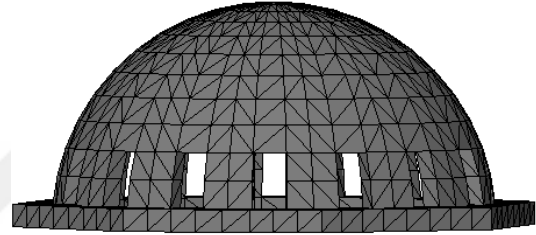
Eleman sayısı: 4162
Düğüm noktası: 1601
a) Model-Ref /5



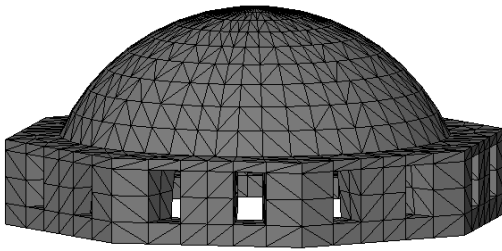
Eleman sayısı: 5408
Düğüm noktası: 1968
b) Model-300 /5



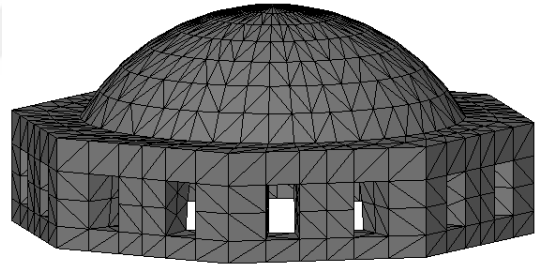
Eleman sayısı: 4692
Düğüm noktası: 1615
c) Model-400 /5



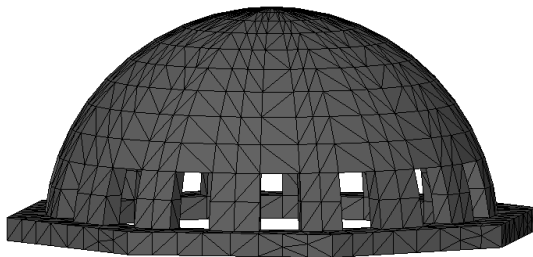
Eleman sayısı: 4724
Düğüm noktası: 1753
d) Model-Ref /7,5



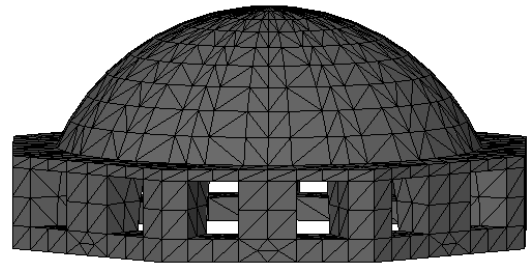
Eleman sayısı: 5671
Düğüm noktası: 1972
e) Model-300 /7,5



Eleman sayısı: 4442
Düğüm noktası: 1623
f) Model-400 /7,5

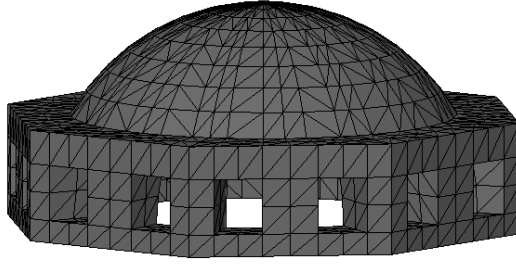


Eleman sayısı: 3912
Düğüm noktası: 1623
g) Model-Ref /10

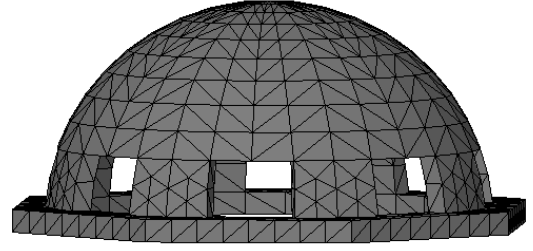


Eleman sayısı: 6376
Düğüm noktası: 2289
h) Model-300 /10

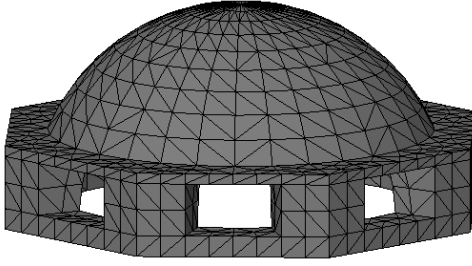
Şekil 6.2. Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerinin eleman ve düğüm noktası sayıları.



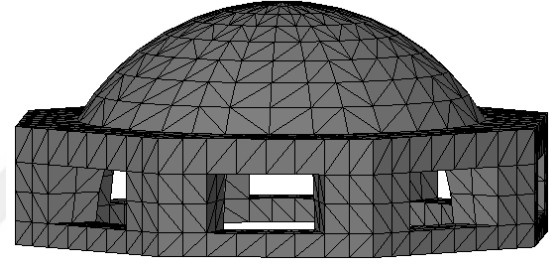
Eleman sayısı:5433
Düğüm noktası: 2035
ı) Model-400 /10



Eleman sayısı:3090
Düğüm noktası:1329
i) Model-Ref /12,5



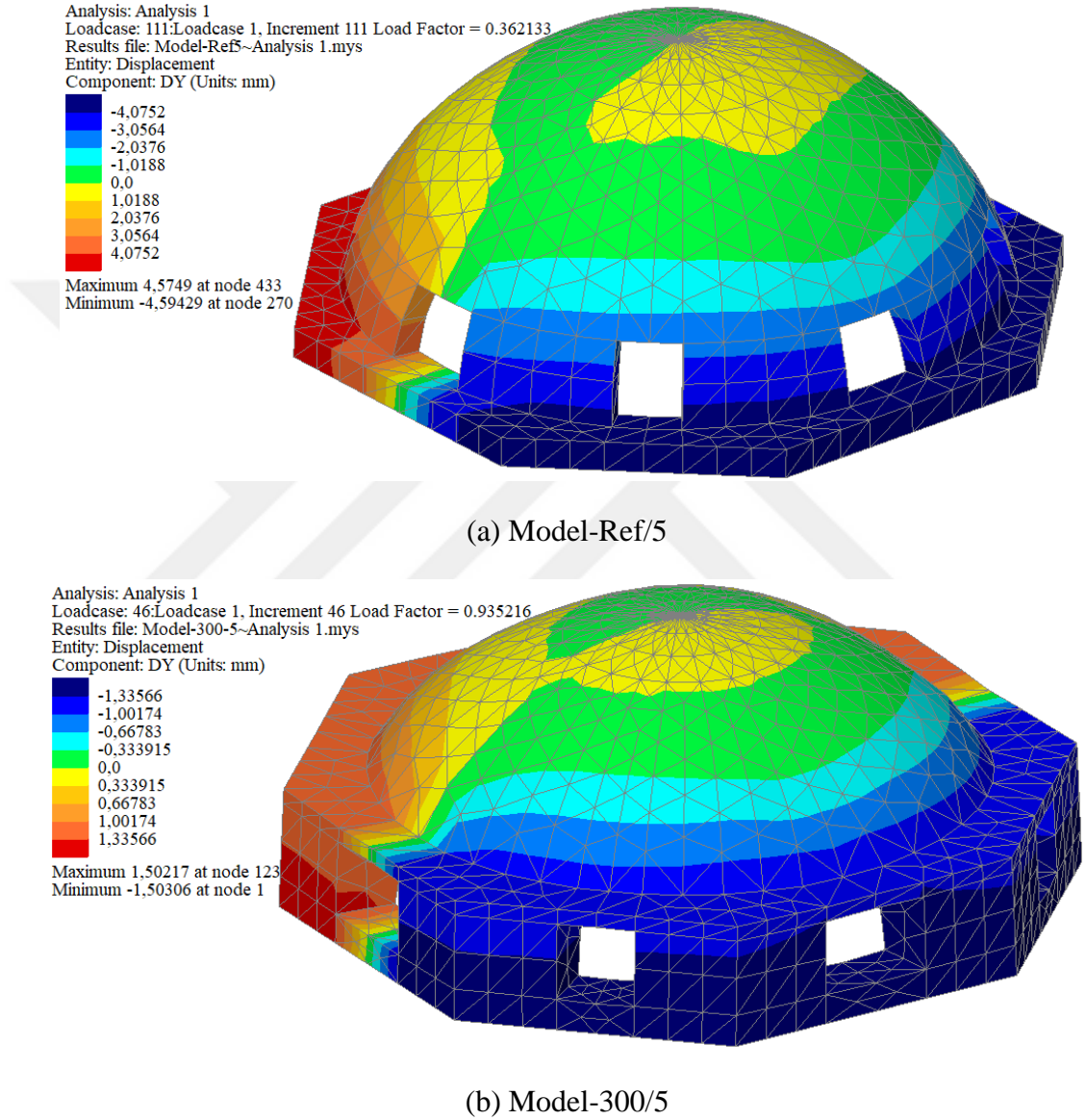
Eleman sayısı:4392
Düğüm noktası:1688
j) Model-300 /12,5



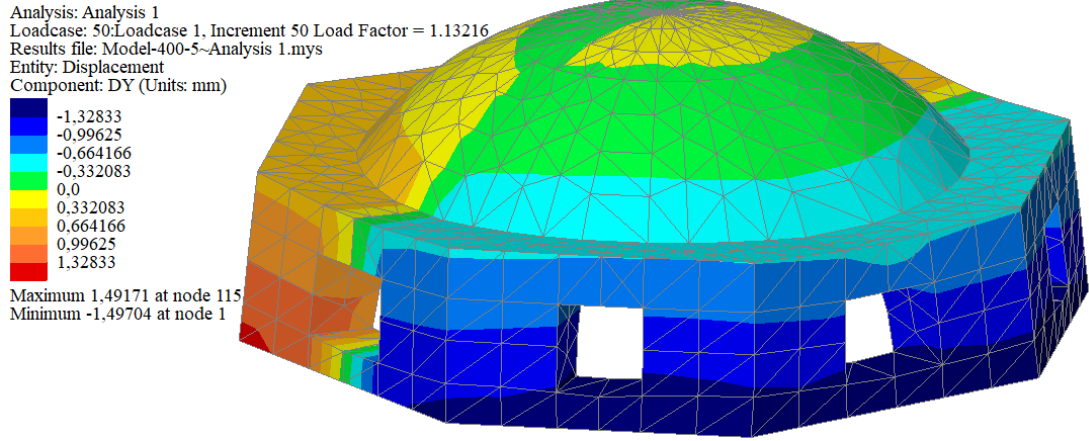
Eleman sayısı:3761
Düğüm noktası:1482
k) Model-400 /12,5

Şekil 6.2 (devam). Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin eleman ve düğüm noktası sayıları.

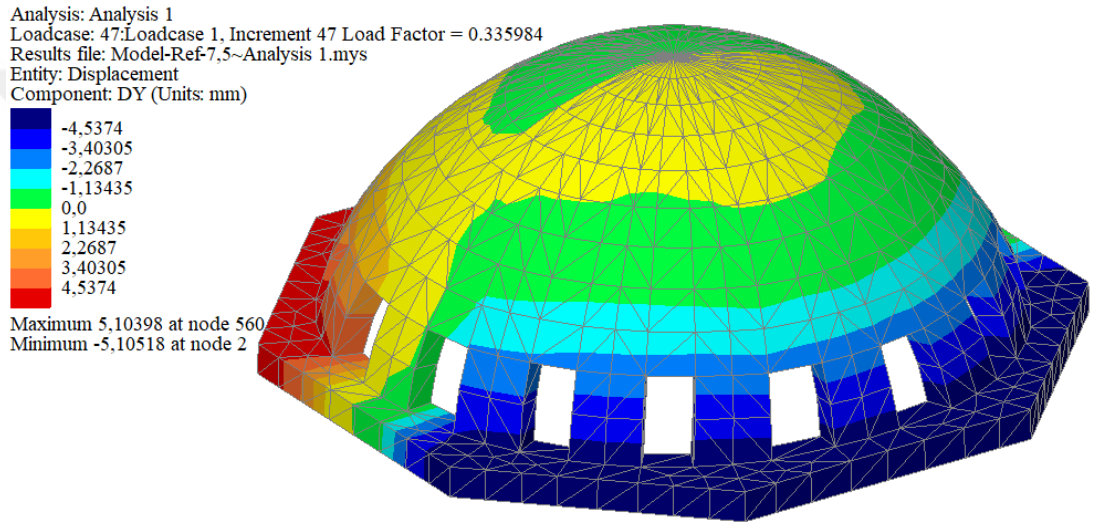
Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbelerin analizi de, boşluksuz ve % 2,5 boşluk oranına sahip kubbe modellerin analizinde olduğu gibi LUSAS programında Drucker Prager kriteri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 6.3’de ise boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin sayısal analiz sonucunda taşıdıkları maksimum yük ve bu yük altında yatay yöndeki deplasmanları verilmiştir.



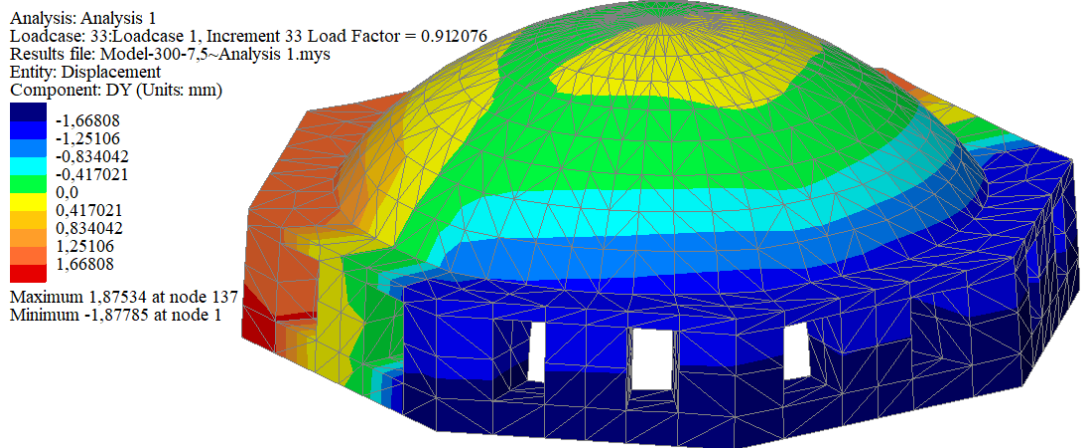
Şekil 6.3. Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.



(c) Model-400/5

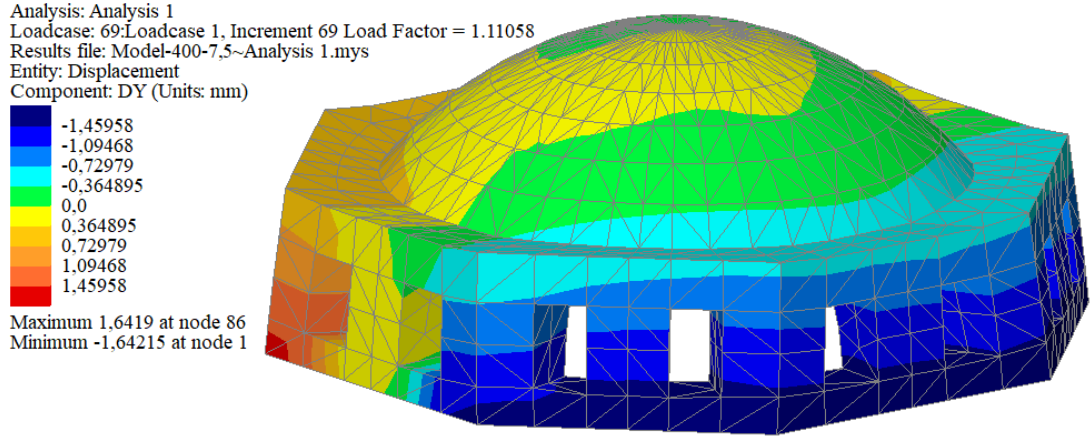


(d) Model-Ref/7,5

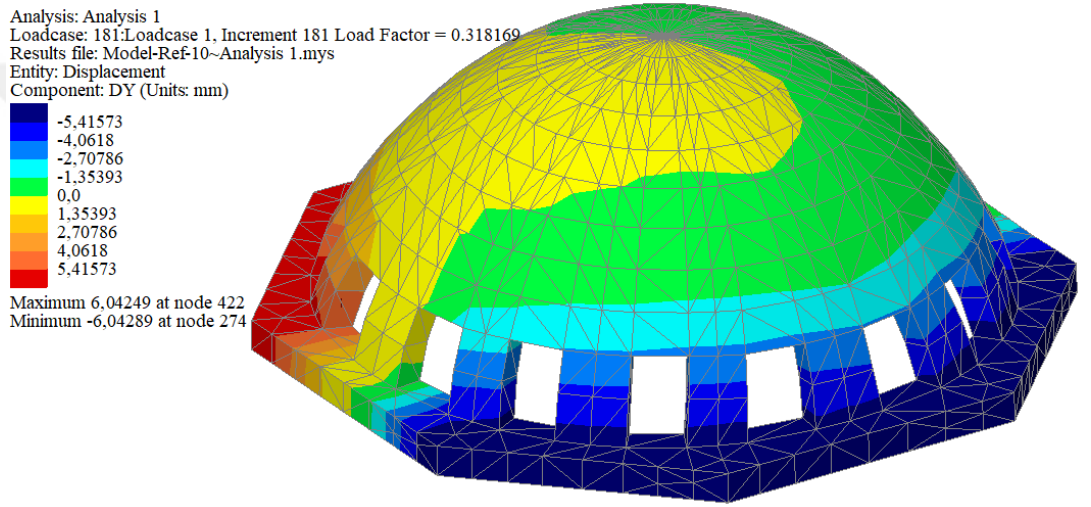


(e) Model-300/7,5

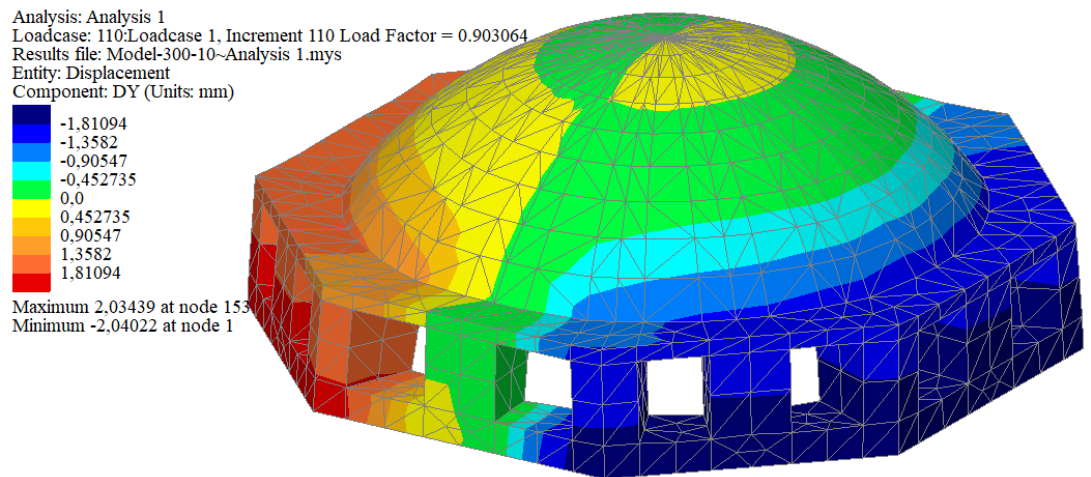
Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.



(f) Model-400/7,5

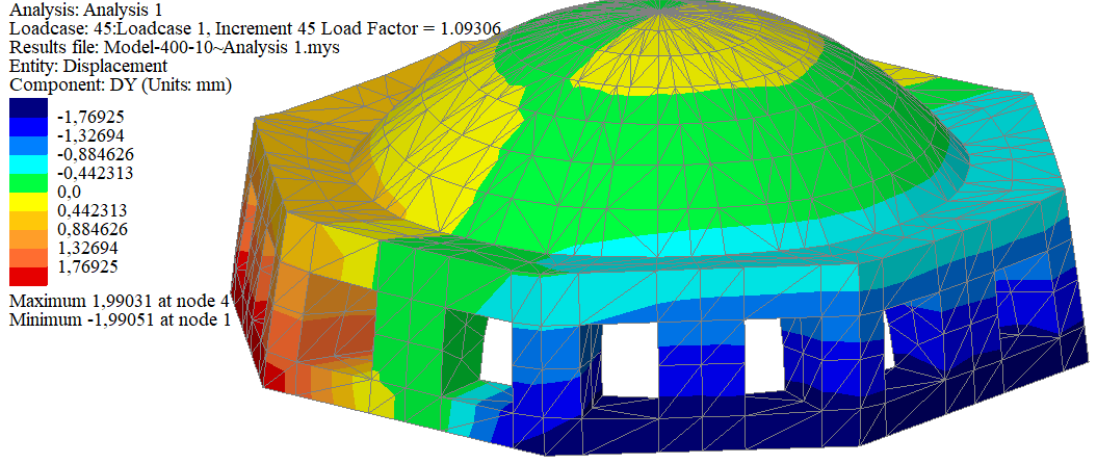


(g) Model-Ref/10

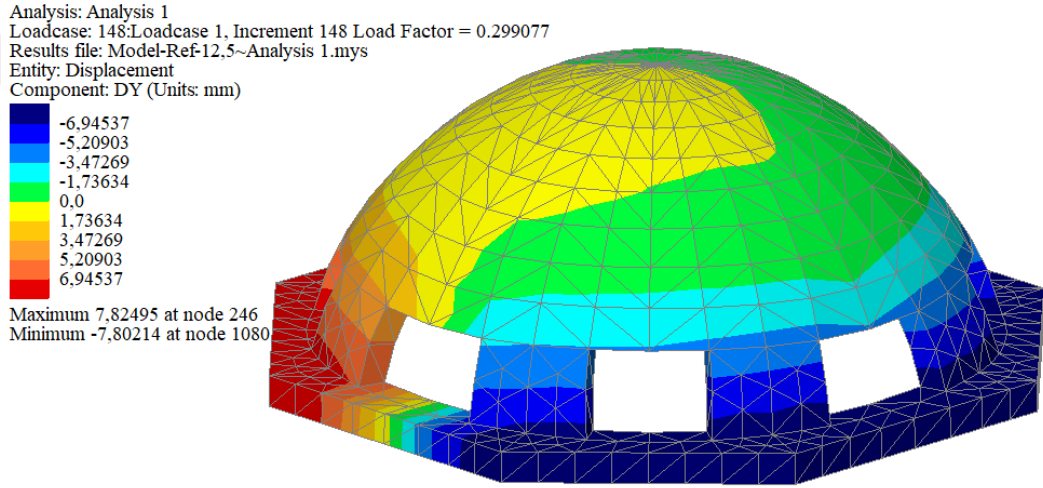


(h) Model-300/10

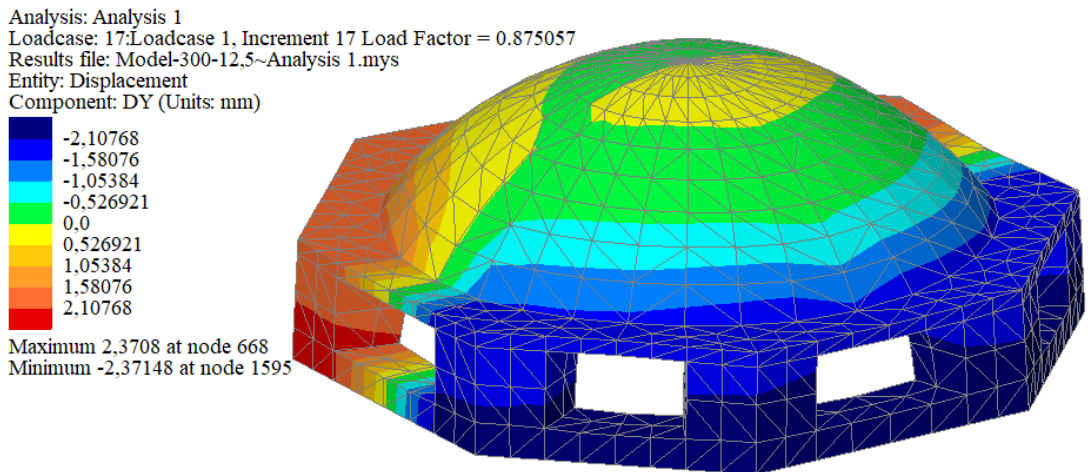
Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.



(i) Model-400/10



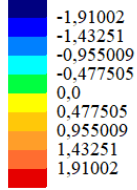
(i) Model-Ref/12,5



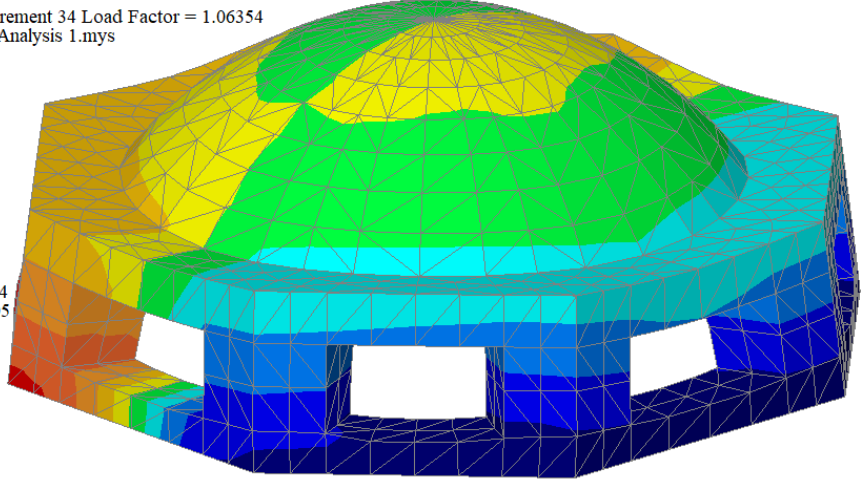
(j) Model-300/12,5

Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.

Analysis: Analysis 1
Loadcase: 34:Loadcase 1, Increment 34 Load Factor = 1.06354
Results file: Model-400-12.5~Analysis 1.mys
Entity: Displacement
Component: DY (Units: mm)



Maximum 2.15325 at node 424
Minimum -2.15429 at node 305



(k) Model-400/12,5

Şekil 6.3 (devam). Boşluk oranları % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin analiz sonuçları.

Boşluk oranı % 2,5, % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modellerin, analiz sonucunda elde edilen maksimum yük ve boşluksuz modellenen kubbe modellere göre yüzdelik azalışı Çizelge 6.2’de verilmiştir. Çizelge 6.2 ve Şekil 6.4 incelendiği zaman Model-Ref/2,5 maksimum 0,381 kN, Model-Ref/5 0,362 kN, Model-Ref/7,5 0,335 kN, Model-Ref/10 0,318 kN yük taşıırken, Model-Ref/12,5 0,299 kN yük taşımıştır. Maksimum yük altındayken yaptıkları deplasmanlar sırası ile 4,447 mm, 4,574 mm, 5,103 mm, 6,042 mm ve 7,824 mm’dir. Kasnak yüksekliği 300 mm olarak üretilen modellerin taşıdıkları maksimum yük, Model-300/2,5’de 0,964 kN, Model-300/5’de 0,935 kN, Model-300/7,5’de 0,912 kN, Model-300/10’da 0,903 kN ve Model-300/12,5’de ise 0,875 kN’dur. Bu yüklere karşılık gelen yatay deplasmanlar 1,450 mm, 1,502 mm, 1,875 mm, 2,034 mm ve 2,370 mm’dir. Boşluk oranı % 2,5 olan 400 mm kasnak yüksekliğine sahip Model-400/2,5 kubbe modeli maksimum 1,165 kN yük taşımıştır. Maksimum yük altındaki deplasman değeri ise 1,421 mm’dir. % 5 boşluk oranına sahip kubbe modellerden Model-400/5’in taşıdığı maksimum yük değeri 1,132 kN’dur. Yük 1,132 kN iken yatay deplasman değeri ise 1,491 mm’dir. Boşluk oranı % 7,5 olan Model-400/7,5 maksimum 1,110 kN yük altında 1,641 mm deplasman yapmıştır.

Kasnak yüksekliği 400 mm ve boşluk oranı % 10 olan Model-400/10 modelinin taşıdığı maksimum yük 1,093 kN ve bu yüke karşılık gelen deplasman değeri ise 1,990 mm'dir. Boşluk oranı % 12,5 olan Model-400/12,5'de ise maksimum yük değeri 1,063 kN, maksimum yük altındaki deplasman 2,153 mm değerindedir.

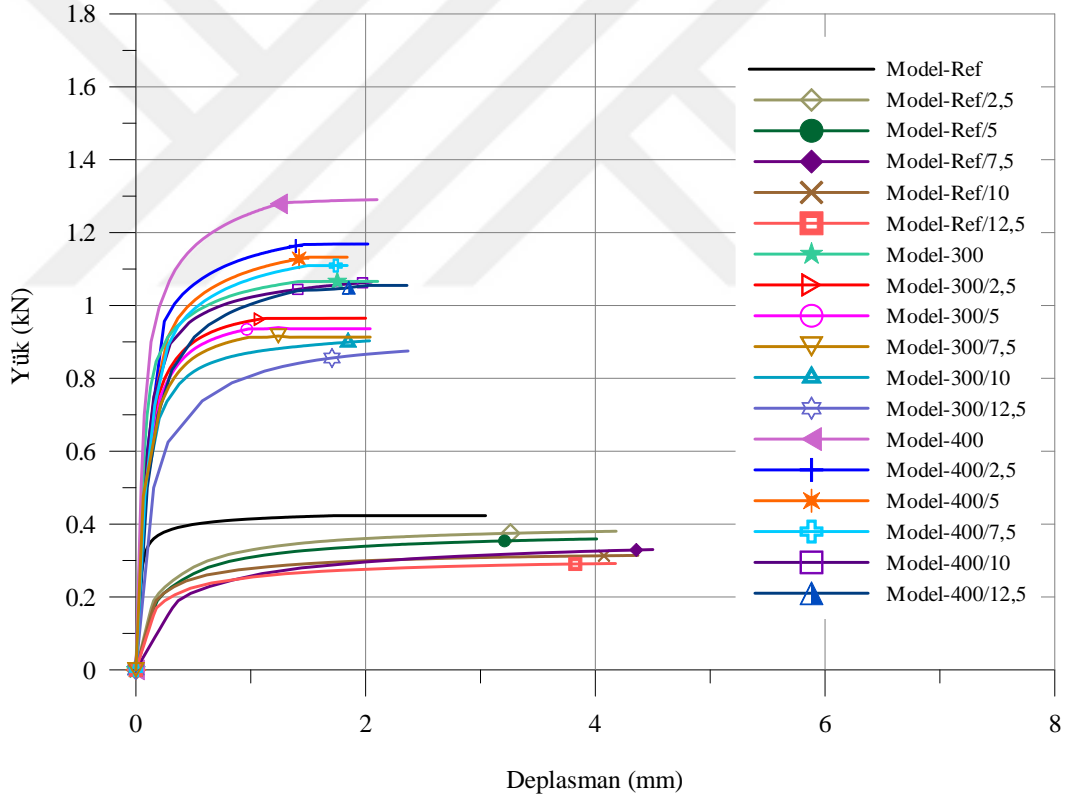
Çizelge 6.2. Kubbe modellerin analiz sonuçları.

Numune No	Boşluk oranı (%)	P _r (kN) (Maksimum Yük)	Azalış ^a (%)
Model-Ref/0	0	0,425	-
Model-Ref/2,5	2,5	0,381	10,352
Model-Ref/5	5	0,362	14,823
Model-Ref/7,5	7,5	0,335	21,167
Model-Ref/10	10	0,318	25,176
Model-Ref/12,5	12,5	0,299	29,647
Model-300/0	0	1,065	-
Model-300/2,5	2,5	0,964	9,398
Model-300/5	5	0,935	12,124
Model-300/7,5	7,5	0,912	14,366
Model-300/10	10	0,903	15,132
Model-300/12,5	12,5	0,875	17,840
Model-400/0	0	1,281	-
Model-400/2,5	2,5	1,165	9,055
Model-400/5	5	1,132	11,631
Model-400/7,5	7,5	1,110	13,348
Model-400/10	10	1,093	14,676
Model-400/12,5	12,5	1,063	17,017

^aBoşluksuz (% 0) modellenen kubbe modellere göre azalış

Çizelge 6.2'de gösterildiği gibi boşluk oranı % 2,5 olan referans kubbe modellenin (Model-Ref/2,5) boşluksuz olarak analizi yapılan referans modele (Model-Ref/0) göre maksimum taşıdığı yük % 10,352 azalmıştır. % 5 boşluk oranına sahip kubbe modellerinde (Model-Ref/5) bu azalış % 14,823, boşluk oranı % 7,5 olan Model-Ref/7,5'de % 21,167'dir. % 10 boşluk oranı olan Model-Ref/10'un maksimum yükündeki azalış % 25,176'dır. Boşluk oranı % 12,5 olan Model-Ref/12,5 Model-Ref/0'a göre maksimum taşıdığı yük bakımından % 29,647 azalış göstermiştir. Kasnak yüksekliği 300 mm olarak modellenen Model-300/2,5'in taşıdığı maksimum yük, boşluksuz olarak analizi yapılmış Model-300/0'a göre % 9,398 azalmıştır. Model-300/5'in taşıdığı maksimum yük değeri % 12,124 azalırken, Model-300/7,5'de % 14,366 azalma olmuştur.

Model-300/10'da maksimum yükteki azalma % 15,132'dir. % 12,5 boşluk oranına sahip Model-300/12,5, boşluksuz olarak modellenen Model-300/0'a göre % 17,840 daha az yük taşımıştır. 400 mm kasnak yükseliğine sahip kubbe modelleri karşılaştırıldığı zaman boşluk oranı % 2,5 olarak modellenen Model-400/2,5, boşluksuz modellenen Model-400/0'a göre % 9,055 daha az yük taşımıştır. Model-400/5 olarak adlandırılan 400 mm kasnak yükseliğine sahip boşluk oranı % 5 olan kubbe modelinde bu azalış yaklaşık olarak % 12 olurken, boşluk oranı % 7,5 olan kubbe modelinde (Model-400/7,5) bu azalış % 13,348 olmuştur. % 10 boşluk oranına sahip Model-400/10 kubbe modeli boşluksuz olarak modellenen Model-400/0'a göre % 14,676 daha az yük taşımıştır. Kasnak yükseliği 400 mm, boşluk oranı % 12,5 olarak modellenen Model-400/12,5 Model-400/0'a göre maksimum taşıdığı yük bakımından % 17,017 azalış göstermiştir.



Şekil 6.4. Kubbe modellerin analiz sonrası yük- deplasman grafiği.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ilk olarak farklı kasnak yüksekliğine sahip boşluklu ve boşluksuz olarak ele alınan toplamda sekiz adet kubbe deney elemanı üzerinde kasnak yüksekliğinin kubbe davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu deney elemanlarından iki tanesi kasnaksız yapılarak referans deney elemanı olarak ele alınmıştır. Referans olarak ele alınan numunelerden boşluksuz kubbe deney elemanı Model-Ref, yüzeysel olarak boşluk oranı % 2,5 olarak üretilen kubbe deney elemanı ise Model-Ref/2,5 olarak isimlendirilmiştir. Burada boşluk oranı pencere boşluklarını ifade etmektedir. Altı adet kubbe deney elemanı ise farklı kasnak yüksekliklerinde imal edilmiştir. 300 mm ve 400 mm kasnak yüksekliğine sahip boşluklu (% 2,5) deney elemanları sırası ile Model-300/2,5 ve Model-400/2,5 olarak adlandırılırken, kasnak yükseklikleri 100 mm, 200 mm, 300 mm ve 400 mm olarak üretilen boşluksuz deney elemanları ise Model-100, Model-200, Model-300 ve Model-400 olarak isimlendirilmiştir. Deneysel olarak incelenen kubbe deney elemanlarının numerik analizleri de yapıp, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçları örtüştüğünden ilave olarak boşluk oranı % 5, % 7,5, % 10 ve % 12,5 olan kubbe modelleri üzerinde sadece analiz yapılmıştır. Yapılan bu modellerden her biri için birer adeti kasnak uygulaması yapılmadan diğer modeller gibi referans olarak ele alınmıştır. Bunlar Model-Ref/5, Model-Ref/7,5, Model-Ref/10 ve Model-Ref/12,5 olarak adlandırılmıştır. Kasnak yüksekliği 300 mm ve 400 mm olarak modellenen boşluk oranı % 5 olan kubbe modeli Model-300/5 ve Model-400/5 olarak, boşluk oranı % 7,5 ve % 10 olan kubbe modelleri sırası ile Model-300/7,5, Model-400/7,5, Model-300/10 ve Model-400/10 olarak adlandırılırken, % 12,5 boşluk oranına sahip kubbe modelleri Model-300/12,5 ve Model-400/12,5 olarak adlandırılmıştır. Boşluklu olarak üretilen kubbe modellerde boşluklar kasnak içerisinde kalması sebebiyle kasnak yüksekliği düşük olan 100 mm ve 200 mm kubbe modeller yapılmamıştır.

Çalışmada sekizgen kasnağa sahip, kasnak yükseklikleri ve pencere boşluk oranları farklı olan kubbe modellerin, kubbenin davranışına etkisi incelenmiştir. Deneysel ve sayısal analizlerle kubbe modellerde kasnak ve boşluk (pencere) varlığının kubbe davranışı üzerindeki etkisi tespit edilmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Boşluksuz olarak üretilen referans deney elemanı (Model-Ref) ile % 2,5 boşluk oranına sahip referans deney elemanının (Model-Ref/2,5) deney sonucuna ait veriler karşılaştırıldığında Model-Ref/2,5'in taşıdığı maksimum yükün nispeten daha düşük olduğu görülmüştür. Sekizgen olarak üretilen kasnağın her bir kenarına dik olarak konumlanmış deney aleti koluna karşılık gelen maksimum yük değeri sonuçlarına bakıldığında Model-Ref'in 0,385 kN, Model-Ref/2,5'in ise 0,364 kN yük taşıdığı belirlenmiştir. Ayrıca Model-Ref ve Model-Ref/2,5'de meydana gelen çatlakların, kubbelerin çekme ve basınç bölgelerinde olduğu görülmüştür.
- Kasnak yüksekliği 100 mm olan Model-100 deney elemanın tek bir kol doğrultusuna karşılık gelen maksimum yük değeri 0,499 kN olarak belirlenmiştir. Taşıdıkları maksimum yük değerleri kıyaslandığında Model-100'ün kasnaksız olarak üretilen Model-Ref'den daha fazla yük taşıdığı görülmektedir. Bunun yanında Model-100'deki çatlamlar ve açılmalar Model-Ref'e benzer şekilde sadece kasnak köşelerinde değil kubbe yüzeyinin her tarafında meydana gelmiştir.
- Kasnak yüksekliği 200 mm olan Model-200'ün tek bir kol doğrultusuna karşılık gelen maksimum yük değerinin (0,924 kN) Model-Ref ve Model-100'e göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Model-200'ün Model-Ref'e göre yük taşıma kapasitesi % 140,0 artmıştır. Model-200'de meydana gelen çatlaklar incelendiğinde kasnak köşelerinden başlayıp kubbe tepesine doğru olan çatlaklar Model-Ref ve Model-100'den farklı olarak kubbe yüzeyinin her tarafında meydana gelmediği, büyük açılmaların kasnak köşelerinde olduğu, çatlak genişliklerinin ise bu iki deney elemanından daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Model-200'ün bazı bölgelerinde meydana gelen çatlakların kılcal şekilde olduğu gözlemlenmiştir.

- Kasnak yüksekliği 300 mm olan Model-300'ün yük taşıma kapasitesi incelendiğinde bu deney elemanının kasnaksız Model-Ref'e göre % 156,6 daha fazla yük taşıyabildiği belirlenmiştir. Model-200 ile kıyaslandığında ise Model-300'ün daha küçük ve daha az sayıda çatlaklara sahip olduğu görülmüştür. Bu durum Model-300'ün kasnak yüksekliğinin daha fazla olması ile açıklanabilmektedir.
- Boşluklu olarak üretilen kasnaklı Model-300/2,5 ve kasnaksız % 2,5 boşluklu Model-Ref/2,5'in taşıdıkları yükler incelendiğinde Model-300/2,5'in Model-Ref/2,5'e göre % 163,4 daha fazla yük taşıdığı belirlenmiştir. Model-300/2,5'de büyük açılmalar ve çatlamların Model-300'e benzer şekilde kasnak köşelerinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Model-300/2,5 ile Model-300 karşılaştırıldığı zaman Model-300'ün Model-300/2,5'e göre daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Model-300'ün taşıdığı maksimum yük 0,988 kN ölçülürken, Model-300/2,5'de bu değer yaklaşık olarak 0,959 kN ölçülmüştür.
- Aynı kasnak yüksekliğine sahip (400 mm) iki farklı deney elemanı olan Model-400 ve Model-400/2,5 taşıdıkları yük bakımından incelendiği zaman Model-400'ün Model-400/2,5'e göre yük taşıma kapasitesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Model-400 maksimum 1,331 kN yük taşıırken, Model-400/2,5 1,210 kN yük taşımıştır. Bu deney elemanlarının taşıdıkları maksimum yükler referans deney elemanları ile (Model-Ref ve Model-Ref/2,5) kıyaslandığında ise Model-400'ün Model-Ref'den % 245,7; Model-400/2,5'in ise Model-Ref/2,5'den % 232,4 daha fazla olduğu görülmektedir.
- Deneysel çalışılan tüm kubbelerdeki yük taşıma kapasitelerine bakıldığında referans deney elemanına göre kasnak yüksekliğinin % 10 arttırılmasıyla, kubbe deney elemanının dayanımı kasnaksız kubbeye oranla % 29,6 artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Deneysel çalışma sonucunda kasnak yüksekliği fazla olan deney elemanlarında (Model-300, Model-400, Model-300/2,5, Model-400/2,5) kasnak köşelerinde başlayıp kubbe tepesine doğru incelen çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çatlakların diğer numunelerde gözlemlenen

çatlaklardan daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Bu deney elemanlarında kubbe üzerinde oluşan çatlakların bazıları ise kılcal şeklindedir. Kasnak yüksekliği az olan (Model-100, Model-200) deney elemanları ile kasnaksız olarak üretilen (Model-Ref, Model-Ref/2,5) deney elemanların çatlak genişlikleri diğer deney elemanlarına göre daha fazla olup, çatlaklar kubbe yüzeyinin her tarafında olmuştur. Analiz ve deneysel çalışma sonucunda yapılan bütün modellerde büyük açılmalar genellikle kubbe kasnak köşelerinde meydana geldiği için kubbeli yapılarda pencere boşlukları kasnak köşelerine yapılmamalıdır.

Kubbelerdeki değişik pencere boşluk oranlarına göre yapılan analiz çalışmaları genel olarak değerlendirilirse;

- Kasnaksız kubbe üzerinde % 2,5 boşluk açılarak modellenen Model-Ref/2,5’de maksimum yük taşıma kapasitesinde % 10,35’lik bir azalma meydana gelmiştir. Referans modellerde her % 2,5 boşluk miktarının arttırılmasıyla yük taşıma kapasitesinde ortalama % 4,82’lik bir azalma olmuştur. Kasnak yüksekliği 300 mm olan kubbe üzerinde boşluk oranı % 2,5 olacak şekilde boşluk açılarak modellenen Model-300/2,5’de maksimum yük taşıma kapasitesi % 9,398 azalmıştır. 300 mm kasnak yüksekliğine sahip modellerde, her % 2,5 boşluk miktarının arttırılmasıyla kubbe modellerin maksimum taşıdığı yükte ortalama % 2,11 azalma meydana gelmiştir. Kasnak yüksekliği 400 mm olan kubbe üzerinde % 2,5 boşluk açılarak modellenen Model-400/2,5’de yük taşıma kapasitesinde % 9,055 ‘lik azalma olmuştur. 400 mm kasnak yüksekliğine sahip modellerde, her % 2,5 boşluk miktarının arttırılmasıyla yük taşıma kapasitesi ortalama % 1,99 azalmıştır.
- Analiz sonuçlarına göre, kubbe modellerde boşluk oranı arttırıldığı zaman modellerin taşıdıkları maksimum yüklerde, referans olarak modellenen kasnaksız kubbelerde daha fazla azalma olurken, kasnak yüksekliği 400 mm olarak modellenen kubbelerin taşıdıkları yüklerde daha az azalma olmuştur. Aynı zamanda referans modellerin yapmış oldukları yatay deplasmanlar kasnak yüksekliği fazla olan kubbelere göre daha fazladır.

- Boşluk oranına bakılmaksızın kasnak yüksekliği arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Osmanlı dönemi camilerinde boşluklu (pencereli) sistemlerde kasnak yüksekliğinin nispeten fazla olması gerekliliği yapılan bu çalışma ile oransal olarak kanıtlanmış olmaktadır.

Tez çalışması sonucunda deneysel ve analiz sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde;

Kubbedeki kasnak yüksekliğinin ve boşluk oranının kubbenin yük taşıma kapasitesi, dayanımı ve yatay deplasman gibi özellikleri üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Kasnak yüksekliğinin artmasıyla kubbenin taşıdığı maksimum yük değeri ve dayanımı artmış, kubbenin yapmış olduğu yatay deplasman ise azalmıştır. Kubbelerde boşluk oranının artmasıyla yük taşıma kapasitesinin azaldığı yatay deplasmanın ise arttığı tespit edilmiştir.

Doktora tez çalışması sonucunda kubbe kasnak yüksekliğinin kubbenin yüksekliğine oranının 0,2 değerinden küçük olmaması gerektiği belirlenmiştir. Daha az kasnak yüksekliği kubbenin yük taşıma kapasitesini ve yatay deplasmanlarını dikkate değer oranda değiştirmedeği görülmüştür.

Bu çalışma ileride yapılacak cami, han, hamam gibi kubbeli yapılarda veya tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde uygulanacak güçlendirme çalışmalarında kubbe kasnak boyutlarının ve boşluklu (pencereli) kubbeli yapıların nasıl yapılması gerektiği konusunda iyi bir referans olacaktır. Günümüzde yapılan güçlendirme çalışmalarında kubbeli yapılarda kullanılan çekme çemberi ve FRP gibi malzemelerin kullanımı tarihi yapıların orijinal dokusunu bozmaktadır. Aynı zamanda çekme çemberlerinde kullanılan profillerin paslanma gibi sorununun olması ve tuğla, taş gibi malzemelerle bir bütün olarak çalışmaması gibi dezavantajlar ortaya çıkmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda kubbenin FRP malzemesi ile sarılarak güçlendirme işlemi yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan uygulamada FRP malzemesi taşların hava almasını engelleyerek yığma birimlerin çürümesine neden olmaktadır. Bu gibi dezavantajlar nedeniyle tarihi yapıların diğer yapısal özelliklerinin de dikkate alınması kaydı ile bir güçlendirme yöntemi olarak kasnak yapımının veya kasnak yüksekliğinin arttırılmasının dikkate alınması gerekmektedir.

Doktora tezinin bir kısmında kasnak yüksekliği değişiminin kubbe davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Buna rağmen kasnak genişliklerinin kubbe davranışı üzerine nasıl etki edeceği araştırılması gereken konular arasında yer almaktadır. Aynı zamanda bu çalışmadaki kubbeler Osmanlı döneminde yaygın olarak inşa edilen sekizgen kubbe kasnağı dikkate alınarak deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Fakat farklı kasnak modelleri olan yuvarlak, dörtgen, altıgen, on ikigen kubbe kasnaklarının kubbe üzerine etkileri araştırılması gereken başka bir konudur. Kubbe kasnaklarıyla aynı şekilde olumlu etki yapacağını düşündüğümüz payandaların veya ağırlık kulelerinin kubbe davranışı üzerine ne oranda olumlu etki yapacakları incelenmesi ve araştırılması gereken çalışmalar olarak önerilecektir.



KAYNAKLAR

- Alecci, V., Focacci, F., Rovero, L., Stipo, G. ve De Stefano, M., 2016. Extradados strengthening of brick masonry arches with PBO-FRCM composites: Experimental and analytical investigations, *Composite Structures*, 149, 184-196.
- Alecci, V., Focacci, F., Rovero, L., Stipo, G. ve De Stefano, M., 2017. Intrados strengthening of brick masonry arches with different FRCM composites: Experimental and analytical investigations, *Composite Structures*, 176, 898-909.
- Atamtürkür, S., Bornn, L. ve Hemez, F., 2011. Vibration characteristics of vaulted masonry monuments undergoing differential support settlement, *Engineering Structures*, 33, 9, 2472-2484.
- Aydın, E. Ö., Fahjan, Y. M. ve Çömlekçioğlu, R., 2007. Deprem bölgelerindeki tarihi kagir yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yeni teknikler, *International Earthquake Symposium, Kocaeli, Bildiriler Kitabı*, 636-644.
- Bayraktar, A., 2006. Tarihi yapıların analitik incelenmesi ve sismik güçlendirme metotları, *Beta Yayınları*, İstanbul.
- Benedetti, D., Carydis, P. ve Pezzoli, P., 1998. Shaking table tests on 24 simple masonry buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 67-90.
- Bernardeschi, K., Padovani, C. ve Pasquinelli, G., 2004. Numerical modelling of the structural behaviour of Buti's bell tower, *Journal of Cultural Heritage*, 5, 4, 371- 378.
- Bilgin, H., 2006. Mimar Sinan yapılarında kubbeli örtü sistemlerinin yapısal analizi, *S.Ü. Müh. Mim. Fak. Derg.*, 21, 3-4, 119-127.
- Cakir, F., Uckan, E., Shen, J., Seker, B. S. ve Akbas, B., 2015. Seismic damage evaluation of historical structures during Van earthquake, October 23, 2011, *Engineering Failure Analysis*, 58, 249-266.
- Calderini, C., Chiorino, M. A., Lagomarsino S. ve Spadafora, A., 2006. Non linear modelling of the elliptical dome of Vicoforte, *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi, 1177-1186.
- Cancelliere, I., Imbimbo, M. ve Sacco, E., 2010. Experimental tests and numerical modeling of reinforced masonry arches, *Engineering Structures*, 32, 3, 776-792.
- Chen, W. F. ve Mizuno, E., 1990. *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*, Elsevier Science Publishers B.V.

- Chmielewski, R. ve Kruszka, L., 2015. Application of selected modern technology systems to strengthen the damaged masonry dome of historical St. Anna's Church in Wilanów (Poland), *Case Studies in Construction Materials*, 3, 92-101.
- Çelik, T., 2020. Tarihi cami kubbelerinde güçlendirme yöntemlerinin deneysel metodlarla incelenmesi, Doktora Tezi, ASÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Dagher, H. J., Bannon, D. J., Davids, W. G., Lopez-Anido, R. A., Nagy, E. ve Goslin, K., 2012. Bending behavior of concrete-filled tubular FRP arches for bridge structures, *Construction and Building Materials*, 37, 432-439.
- Demir, O., 2019. Tarihi Diyarbakır Dicle (On Gözlü) Köprüsü'nün sonlu eleman yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.
- De Stefano, A., 2007. Structural identification and health monitoring on the historical architectural heritage, *Key Engineering Materials*, 347, 37-54.
- Döndüren, M., Şişik, Ö. ve Demiröz, A., 2017. Tarihi yapılarda görülen hasar türleri, *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, 13, 45- 58.
- Fırat, F. K. ve Eren, A., 2015. Investigation of FRP effects on damaged arches in historical masonry structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30, 4, 659-670.
- Foraboschi, P., 2004. Strengthening of masonry arches with fiber-reinforced polymer strips, *Journal of Composites for Construction*, 8, 3, 191-202.
- Garmendia, L., San-Jose, J. T., Garcia, D. ve Larrinaga, P., 2011. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material, *Construction and Building Materials*, 25, 4374-4385.
- Gonen, H., Dogan, M., Karacasu, M., Özbasaran, H. ve Gokdemir, H., 2013. Structural failures in retrofit historical masonry arch bridge, *Engineering Failure Analysis*, 35, 334-342.
- LUSAS, 2020. Finite element analysis software products. United Kingdom: finite element system, FEA Ltd.
- Kaygısız, H., 2010. Kayseri yöresindeki yapıtaşlarının fiziko-mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kocaman, İ., Okuyucu, D. ve Kazaz, İ., 2019. Tarihi yapı malzeme özelliklerinin belirlenmesinde yeni bir yöntem önerisi: Lala Paşa Camii örneği, *Teknik Dergi*, 9125-9146.
- Kuban, D., 1998. Kent ve mimarlık üzerine İstanbul yazıları. Yapı Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.

- Mahrebel, H. A., 2006. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mal'tsev, V. A., Konon, Y. A., Adishchev, V. V. ve Kornev, V. M., 1984. Experimental study and analysis of the vibrations of an impulsivley loaded thin-walled spherical shell, Plenum Publishing Corporation / Fizika oreniye I Vzryva, 20, 2, 97-102.
- Milani, G. ve Bucchini, A., 2010. Kinematic FE homogenized limit analysis model for masonry curved structures strengthened by near surface mounted FRP bars, Composite Structures, 93, 239-258.
- Ogihara, Y., 1985. Stiffness evaluation method and vibration tests of a spherical Shell structures, Pressure Vessels and Piping Division, 98, 3.
- Okçuoğlu, T., 1995. Anadolu Selçuklu mescitlerinde kubbeye geçiş alanının değerlendirilmesi, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi , Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Oliveira, D. V., Basilio, I. ve Lourenço, P. B., 2010. Experimental behavior of FRP strengthened masonry arches, Journal of Composites for Construction, 14, 3, 312-322.
- Otoni, F. ve Blasi, C., 2016. Hoping as an ancient remedy for conservation of large masonry domes, International Journal of Architectural Heritage, 10, 2-3, 164-181.
- Preciado A., Santos, J. C., Silva, C., Ramirez-Gaytan, A. ve Falcon, J. M., 2020. Seismic damage and retrofiting identification in unreinforced masonry Churches and bell towers by the september 19, 2017 (Mw = 7.1) Puebla-Morelos earthquake, Engineering Failure Analysis, 118,104924.
- Savaşır, K., 2016. Kubbelerin yapım sistemlerinin yük aktarım prensiplerine göre irdelenmesi, 8. Ulusal Çatı ve Cephe Sempozyumu 2-3 Haziran, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul.
- Sönmezer, Ş., 2002. İstanbul'daki Sinan Camilerinde mekan ile serbest düşey taşıyıcılar arasındaki boyut ilişkisi, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Şeker, B. Ş., 2011. Mimar Sinan Camilerinin statik ve dinamik yükler etkisinde davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tao, Y., Stratford, T. J. ve Chen, J. F., 2011. Behavior of a masonry arch bridge repair using fibre-reinforced polymer composites, Engineering Structures, 33, 1594- 1606.
- TS EN 772-1, 2012. Kâgir birimler-deney yöntemleri-bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 772-6, 2004. Kâgir birimler-deney metodları-bölüm 6: Beton kâgir birimlerin eğilmede çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6, 2010. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1052-1, 2000. Deney metodları-bölüm 1: Basınç dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1996-1-1:2005+A1, 2013. Kâgir yapıların tasarımı-bölüm 1-1: Donatılı ve donatısız kâgir yapılar için genel kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuğrueleçi, Ş., 2014. Düşey yüklenen tuğla kemerlerdeki gergi çubukların davranışa etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Turan, Ş. N., 2018. Türk mimarisinde kullanılan kubbeye geçiş elemanları; 13.yy. Anadolu Selçuklu Dönemi Konya Mahalle Mescitleri örneği, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Türkecul, H., 2019. Yarım kubbeli tarihi medreselerin dinamik davranışlarının incelenmesi: Tokat Yağlıbasan (Çukur) Medrese örneği, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Türker, T. ve Yanık, Y., 2020. İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, 1431-1453.
- Uçak, Ş., 2012. Tarihi yığma kubbelerin dinamik davranışlarının operasyonel modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ural, A., Fırat, F. K., Tuğrueleçi, Ş. ve Kara, M. E., 2016. Experimental and numerical study on effectiveness of various tie-rod systems in brick arches, Engineering Structures, 110, 209-221.
- Uslu, S., 2013. Tarihi yığma yapılarda kullanılan metal bağlantı elemanlarının deneysel metotlarla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- URL-1< <http://informadik.blogspot.com/2019/07/erken-ronesansin-ilk-yapilarindan.html> >, Erişim tarihi:16.08.2020.
- URL-2< <https://marmaralife.com/2015/08/24/pantheondan-ayasofyaya-kubbelerin-oykusu/>>, Erişim tarihi:16.08.2020.
- URL-3< <http://gezginlerkulubu.org/mimaride-cigir-acan-4-kubbe/>>, Erişim tarihi:16.08.2020.

URL-4< <https://travel.sygic.com/tr/poi/the-o2-milenyum-kubbesi-poi:468>>, Erişim tarihi:16.08.2020.

URL-5< <https://www.cbc.ca/news/canada/toronto/ontario-place-heritage-listing-register-1.5105153>>, Erişim tarihi:16.08.2020.

URL-6< http://stadiumdb.com/stadiums/chn/nantong_stadium>, Erişim tarihi:16.08.2020.

URL-7< <http://www.erolsasmaz.com/?oku=1051>>, Erişim tarihi:16.08.2020.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Şükran TANRIVERDİ

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : K.T.Ü., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2007-2012

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 2012-2014

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Arş. Gör. 2013-