T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TARİHİ CAMİ KUBBELERİNDE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL METOTLARLA İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Tülin ÇELİK

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ali URAL

AKSARAY, 2020

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezinde; bu çalışmayı yöneten ve araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyerek değerli eleştirileriyle beni yönlendiren, engin fikirleriyle yetişme ve gelişmeme katkıda bulunan bana büyük emeği geçen danışman hocam sayın Doç. Dr. Ali URAL'a en derin teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tezimin her aşamasında bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşarak beni aydınlatan, tez izleme komitesi üyesi sayın Prof. Dr. Turan KARABÖRK ve sayın Prof. Dr. Ersin AYDIN'a, deneylerim boyunca beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen sayın Prof. Dr. Mehmet Emin Kara ve sayın Doç. Dr. Fatih Kürşat FIRAT'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana her türlü desteği saylayan kıymetli arkadaşlarım, Arş. Gör. Şükran TANRIVERDİ ve Arş. Gör. Dr. Merve ARIBAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Beni yetiştirip bugünlere getiren annem; Hatice SANDIKCI, babam; Kemal SANDIKCI ve kardeşim; Mutlu SANDIKCI'a ayrıca tez çalışmam boyunca bir çok fedakarlık göstererek beni destekleyen, onlara ayırmam gereken zamandan çalmama rağmen, her zaman desteğini yanımda gördüğüm eşim Aykut ÇELİK'e ve biricik oğlum Mete ÇELİK'e en derin duygularla teşekkür ederim. Akademisyenlik yolunda bana her türlü desteği veren manevi annem merhum İnci BİRBEN'e tüm içtenliğim ile minnettarlığımı sunuyorum.

Tezimin gerçekleşmesinde 2018-040 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi'ne teşekkür ederim.

TÜLİN ÇELİK

AKSARAY, 2020

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Tezin Önemi 2
1.3 Kubbeler ve Yapısal Elemanları 3
1.3.1 Kubbenin tarihsel gelişimi 3
1.3.2 Kubbelerin yük aktarımı 12
1.3.3 Kubbe türleri 13
1.4 Kubbeli Yapılarda Geçiş Elemanları 23
1.4.1 Tromp (Tonoz bing) 24
1.4.2 Pandantif (Küresel bingi) 25
1.4.3 Türk Üçgeni 25
1.5 Kubbelerdeki Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri 26
1.5.1 Horasan harcı 30
1.5.2 Tamir harcı 32
1.5.3 Dikiş (Kenet) 33
1.5.4 Çekme çemberi 35
1.5.5 FRP 36
2. KAYNAK ÖZETLERİ 39
2.1 Kubbe ile İlgili Literatür Yapılan Çalışmaları 39
2.2 Güçlendirme Yöntemleri İle İlgili Yapılan Çalışmalar 53
3. MALZEME VE YÖNTEM 59
3.1 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 61
3.1.1 Horasan harcının mekanik özelliklerin belirlenmesi 61
3.1.2 Tamir harcının teknik özelliklerinin belirlenmesi 63
3.1.3 Taşın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi 64
3.1.4 Çelik kenetin ve sacın mekanik özelliklerinin belirlenmesi 67
3.1.5 FRP ve epoksinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi 68
3.1.6 Yığma duvarın mekanik özelliklerinin belirlenmesi 70
3.2 Deney Düzeneğinin Oluşturulması 72
3.2.1 Çelik levha düzeneğinin yapılış aşamaları 72
3.2.2 Çelik profil kalıbın yapılış aşamaları 73
3.2.3 Kubbe için beton kasnakların hazırlanma aşamaları 74
3.2.4 Kubbe tahribat aparatı 75

3.2.5 Kubbe örme işlemi ... 78
3.2.6 Ölçüm aparatları ve yerleştirilmesi ... 79
3.3 Yapılan Deneyler ... 81
3.3.1 ERef numunesi ... 83
3.3.2 EC numunesi ... 83
3.3.3 EM numunesi ... 86
3.3.4 EPS numunesi ... 86
3.3.5 EPD numunesi ... 87
3.3.6 EPSD numunesi ... 89
3.3.7 ERS numunesi ... 89
3.3.8 ERD Numunesi ... 91
3.3.9 ERSD numunesi ... 91
3.4 Sonlu Elemanlar Modeli ... 93
3.4.1 ERef Analizi ... 95
3.4.2 EC Analizi ... 95
3.4.3 EM Analizi ... 96
3.4.4 EPS Analizi ... 96
3.4.5 EPD Analizi ... 97
3.4.6 EPSD Analizi ... 97
3.4.7 ERS Analizi ... 98
3.4.8 ERD Analizi ... 98
3.4.9 ERSD Analizi ... 99
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA ... 100
4.1 ERef Numune Sonucu ... 100
4.2 EC Numune Sonucu ... 108
4.3 EM Numune Sonucu ... 117
4.4 EPS Numune Sonucu ... 124
4.5 EPD Numune Sonucu ... 133
4.6 EPSD Numune Sonucu ... 143
4.7 ERS Numune Sonucu ... 152
4.8 ERD Numune Sonucu ... 160
4.9 ERSD Numune Sonucu ... 169
4.10 ERef Analiz Sonucu ... 178
4.11 EC Analiz Sonucu ... 180
4.12 EM Analiz Sonucu ... 181
4.13 EPS Analiz Sonucu ... 183
4.14 EPD Analiz Sonucu ... 184
4.15 EPSD Analiz Sonucu ... 186
4.16 ERS Analiz Sonucu ... 187
4.17 ERD Analiz Sonucu ... 189
4.18 ERSD Analiz Sonucu ... 190
5. SONUÇ VE ÖNERİLER ... 192
KAYNAKLAR ... 219
ÖZGEÇMİŞ ... 230

DOKTORA TEZİ

TARİHİ CAMİ KUBBELERİNDE GÜÇLENDİRME YÖNTEMLERİNİN DENEYSEL METOTLARLA İNCELENMESİ

Tülin ÇELİK

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali URAL

ÖZET

Kubbeler mimari yapıların üstünü örtmek için kullanılan genellikle yarım küre şeklindeki sistemler olup tarih boyunca birçok topluma hizmet vermiş yapısal elemanlardır. Birçok toplum tarih öncesi çağlardan günümüze kadar kubbe inşa etmiştir. Böylece kubbe formları zaman içerisinde insanların ihtiyaçlarını karşılayabilmek için gelişim ve değişim göstermiştir. Kubbelerde oluşan hasarlar yapısal, çevresel ve insani etkilerden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmanın ilk bölümünde kubbenin tarih boyunca gelişiminden, mevcut kubbe türlerinden, kubbenin yük aktarıma prensiplerinden ve kubbenin geçiş öğelerinden bahsedilmiştir. Ayrıca kubbede meydana gelen hasarları ve bunlar için uygulanan onarım ve güçlendirme yöntemlerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümünde litaratür taraması yapılmıştır. Üçüncü bölümde deneylerde kullanılan malzeme özellikleri belirtilmiştir. Bununla beraber deney düzeneğinin yapım aşamalarından ve kırma mekanizmasından söz edilmiştir. Son olarak yapılan dokuz adet kubbe deney numunesinin hazırlık aşamalarından bahsedilmiştir. Kubbe boyutları için Klasik Osmanlı Döneminde inşa edilen ve günümüze kadar gelen kubbe formları incelenerek en uygun kubbe boyutu belirlenmiştir. Bununla birlikte kubbelerde onarım ve güçlendirme yöntemleri olarak kullanılan mevcut uygulamalar incelenmiş kubbelerde onarım/güçlendirme yöntemi olarak, horasan harcı, tamir harcı, dikiş, çekme çemberi ve FRP yöntemleri kullanılmıştır. Dördüncü bölümde kubbe deney ve analizlerinin sonuçları sunulmuş ve bu sonuçlar karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. Beşinci bölümde bu çalışmadan çıkarılacak sonuçlar ve önerilere yer verilmiştir. Bu çalışmada mevcut kubbe hasarları, farklı bölgelerde uygulanan farklı güçlendirme yöntemleri kullanılarak onarılıp bu kapsamda maksimum deplasman ve yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Bu tez çalışması, izlenen yaklaşım ve yöntemler açısından, tarihi cami kubbelerinin korunması için uygun onarım ve güçlendirme yöntemlerinin seçilerek uygulanmasına katkıda bulunmak ve yol gösterici bir kaynak olmak amacındadır. Bu konu ile ilgili literatürde çok fazla çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma ile bu alanda büyük bir eksikliğin giderilmesi öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi kubbeler, Onarım ve güçlendirme yöntemleri, Deneysel yöntemler.

Ağustos, 2020; 230 sayfa

PhD. THESIS

STRENGTHENING METHODS IN HISTORICAL MOSQUE DOMES EXAMINATION WITH EXPERIMENTAL METHODS

Tülin ÇELİK

Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geological Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali URAL

ABSTRACT

Domes, which are generally demi globe shaped structures and are used for clothing the upper side of the architectural structures, have served many societies during the history. Many societies have built domes since pre historic ages to present time. Thus the forms of dome have showed variation and improvement to over time meet the needs of the people. Another issue about domes that they have detriments on their structures, which are derived from three sources: structural, environmental and humanistic. In the first chapter of this study, it has been told about the development of domes throughout the history, existing dome shapes, load transfer principle of domes and transition element of domes. Besides, damages occurred at domes and repair and strengthening methods for these damages have been mentioned. In the second chapter, a literatüre review has been made. In the third chapter the features of experiment materials, stages of construction of experimental set up and destruction machine have been spoken of. Lastly, the phases of preparation of samples of nine domes have been told. For the sizes of domes, the most optimum forms of domes have been determined by examining the shape of domes which have been existing since the Classical Ottoman Era to present day. In addition to this, FRP, steel ring, clamp, repair mortar and horasan mortar are used, at the same time, with examined the existing applications today, for repairment and strenghting of domes. In the fourth chapter, results of samples of dome experiments and analyzes, which has been done, have been explained. In the fifth chapter guideline includes the conclusions and recommendations to be drawn from this study. At this study, existing dome damages have been repaired by using different strenghting methods on different areas of the dome and as a result of this, maximum load and displacement values have been analyzed. In the four phase, results of experiment samples have been spoken of. This study of thesis, from the perspective of course and methods that have been tracked, aims to be a guiding source and contribute to selection of proper reinforcement and repairment methods to protect and implement to historical mosques' dome structures. There is not much work in the literature related to this subject and because of this, with this study, it is foreseen to eliminate a great deficiency in this field.

Keywords: Historical domes, Repair and strengthening methods, Experimental methods.

August, 2020; 230 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Cro - Mangon evi Ukrayna. 4
Şekil 1.2. Atreus hazine binası. 5
Şekil 1.3. Pantheon Tapınağı kubbesi. 5
Şekil 1.4. Ayasofya Camii ve kubbesi. 6
Şekil 1.5. Floransa Santa Maria Del Fiore Katedrali. 6
Şekil 1.6. Saint Paul Katedralinin. 7
Şekil 1.7. Sultan Sencar Türbesi. 8
Şekil 1.8. İsfahan Cuma Camii. 8
Şekil 1.9. Firuzağa Camisi. 9
Şekil 1.10. Edirne Üç Şerefeli Camii. 9
Şekil 1.11. Edirne Selimiye Camii. 10
Şekil 1.12. Nuruosmaniye Camii. 11
Şekil 1.13. Kubbenin tabakaları. 11
Şekil 1.14. Kubbelerde oluşan gerilme mekanizmaları. 13
Şekil 1.15. Soğan kubbe örnekleri. 14
Şekil 1.16. Küresel kubbe örnekleri. 15
Şekil 1.17. Konsollu kubbe örnekleri. 16
Şekil 1.18. Oval kubbe örnekleri. 17
Şekil 1.19. Parabolik kubbe örnekleri. 18
Şekil 1.20. Çokgen kubbe örnekleri. 19
Şekil 1.21. Yelken kubbe örnekleri. 20
Şekil 1.22. Şemsiyeli kubbe örnekleri. 21
Şekil 1.23. Jeodezik kubbe örnekleri. 22
Şekil 1.24. Tabak kubbe örnekleri. 23
Şekil 1.25. Tromp yük şeması ve örneği. 24
Şekil 1.26. Pandantif yük şeması ve örneği. 25
Şekil 1.27. Türk üçgeni yük şeması ve örneği. 26
Şekil 1.28. Kubbelerde tipik hasar şekli. 28
Şekil 1.29. Cami kubbesinde meydana gelen diyagonal çatlaklar. 28
Şekil 1.30. Urla Helvacılar Camindeki eksenel kubbe hasarı. 29
Şekil 1.31. Küçük kubbelerde meydana gelen kısmi çökmeler. 30
Şekil 1.32. Kubbe çatlaklarının enjeksiyon yöntemiyle doldurulması. 31
Şekil 1.33. Kubbenin dıştan harç ile onarılması. 31
Şekil 1.34. Kubbede geniş çatlakların restorasyon uygulaması. 32
Şekil 1.35. Kubbe çatlaklarının enjeksiyon yöntemiyle doldurulması. 33
Şekil 1.36. Kubbe hasarı ve dikiş yöntemi uygulaması. 33
Şekil 1.37. Sultan I. Mahmut Kütüphanesi merkezi kubbede dikiş uygulaması. 34
Şekil 1.38. Filibe Cuma Camisi kubbe çatlakların dikiş yöntemiyle onarılması 35
Şekil 1.39. Kubbe hasarı ve çekme çemberi uygulaması 35
Şekil 1.40. I. Mahmut kütüphane kubbesindeki çatlakların çekme çemberi uygulaması 36
Şekil 1.41. Lif Takviyeli Polimer (FRP) kullanılarak kubbelerin güçlendirilmesi 36
Şekil 1.42. Üsküp Mustafa Paşa Cami kubbesinin FRP ile onarılıp güçlendirilmesi. 37

Şekil 1.43. Küçük Ayasofya Caminde oluşan kubbe kasnağındaki hasarlar 37
Şekil 1.44. Küçük Ayasofya Cami Kubbe kasnağında FRP uygulaması. 38
Şekil 3.1. Kubbe görünümü 60
Şekil 3.2. Kubbe kalıbı. 60
Şekil 3.3. Kubbe deneylerinde kullanılan horasan harcının basınç deneyi. 61
Şekil 3.4. Eğilmede çekme dayanımı tayininde kullanılan deney düzeneği. 62
Şekil 3.5. Yığma birimlerin basınç dayanım testleri. 65
Şekil 3.6. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanım testleri. 66
Şekil 3.7. FRP ve 2 bileşenli epoksi. 69
Şekil 3.8. (a) Yığma duvarın basınç dayanım deney düzeneği, (b) gerilme – şekil değiştirme grafiği. 72
Şekil 3.9. Çelik levha düzeneğinin yapılışı. 73
Şekil 3.10. Deney düzeneği üzerine kubbe kalıbının yerleştirilmesi. 73
Şekil 3.11. Beton kasnağı için beton dökümü. 74
Şekil 3.12. Beton kasnağını altına çelik kasnak profilinin yerleştirilmesi. 74
Şekil 3.13. Kubbe tahribat aparatı. 75
Şekil 3.14. Trapez çevirme kolu ve yük hücresi. 76
Şekil 3.15. Çelik halka ve sekiz tane çelik çubuk. 76
Şekil 3.16. 8 tane kolu olan çelik halka profil. 77
Şekil 3.17. Lineer ray arabası. 77
Şekil 3.18. Kubbe örümü. 78
Şekil 3.19. Kubbe kasnağının örülmesi. 78
Şekil 3.20. Kubbe kasnağındaki dolgu malzemeleri. 79
Şekil 3.21. Kubbe kasnağı dolgusu. 79
Şekil 3.22. LVDT yerleştirilmesi. 80
Şekil 3.23. Veri toplama cihazı. 80
Şekil 3.24. Kubbenin kısımları. 81
Şekil 3.25. Yapılan deney isimleri ve kodlamaları. 82
Şekil 3.26. ERef deney numunesi. 83
Şekil 3.27. Kubbe taşının delinmesi ve tamir harcının doldurulması. 84
Şekil 3.28. Dikiş yönteminin uygulanması. 85
Şekil 3.29. EC deney numunesi. 85
Şekil 3.30. EM deney numunesi ve tamir harcı uygulanan bölgeler. 86
Şekil 3.31. Kubbenin etek hizasına FRP uygulaması. 87
Şekil 3.32. EPS deney numunesi. 87
Şekil 3.33. Kubbede FRP bant uygulaması. 88
Şekil 3.34. EPD deney numunesi. 88
Şekil 3.35. EPSD deney numunesi. 89
Şekil 3.36. Çekme çemberi imalat detayları. 90
Şekil 3.37. Kubbe eteğine çekme çemberi ve gerinim ölçer yerleştirilmesi. 90
Şekil 3.38. ERS deney numunesi. 91
Şekil 3.39. ERSD deney numunesi. 92
Şekil 3.40. Kubbenin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi. 93
Şekil 3.41. ERef analizi. 95
Şekil 3.42. EC analizi. 95
Şekil 3.43. EM analizi. 96
Şekil 3.44. EPS analizi. 96

Şekil 3.45. EPD analizi. 97
Şekil 3.46. EPSD analizi. 97
Şekil 3.47. ERS analizi. 98
Şekil 3.48. ERD analizi. 98
Şekil 3.49. ERSD analizi. 99
Şekil 4.1. ERef numunesi deformasyon eğrisi. 101
Şekil 4.2. ERef numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar 102
Şekil 4.3. ERef numunesinde 5. ve 6. kolları arasında oluşan çatlak. 102
Şekil 4.4. ERef numunesinde 6. ve 7. kolları arasında oluşan çatlak. 103
Şekil 4.5. ERef numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 103
Şekil 4.6. ERef numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 104
Şekil 4.7. ERef numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 104
Şekil 4.8. ERef numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 105
Şekil 4.9. ERef numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 105
Şekil 4.10. ERef numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 106
Şekil 4.11. ERef numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 106
Şekil 4.12. ERef numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 107
Şekil 4.13. ERef numunesi Yük – Birim şekil değiştirme grafiği. 107
Şekil 4.14. EC numunesi deformasyon eğrisi. 109
Şekil 4.15. EC numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar. 110
Şekil 4.16. EC numunesinin 2. ve 3. kolları arasında oluşan çatlaklar. 110
Şekil 4.17. EC numunesinin 3. ve 4. kolları arasında oluşan çatlaklar. 111
Şekil 4.18. EC numunesinin 6. ve 7. kolları arasında oluşan çatlaklar. 111
Şekil 4.19. EC numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 112
Şekil 4.20. EC numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 112
Şekil 4.21. EC numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 113
Şekil 4.22. EC numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 113
Şekil 4.23. EC numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 114
Şekil 4.24. EC numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 114
Şekil 4.25. EC numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 115
Şekil 4.26. EC numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 115
Şekil 4.27. EC numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 116
Şekil 4.28. EC numunesi gerinim ölçerlerin grafiği. 116
Şekil 4.29. EM numunesi deformasyon eğrisi. 118
Şekil 4.30. EM numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 3-4 kollar arası çatlaklar. 119
Şekil 4.31. EM numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 4-5 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar. 119
Şekil 4.32. EM numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 120
Şekil 4.33. EM numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 120
Şekil 4.34. EM numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 121
Şekil 4.35. EM numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 121
Şekil 4.36. EM numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 122
Şekil 4.37. EM numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 122
Şekil 4.38. EM numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 123
Şekil 4.39. EM numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 123
Şekil 4.40. EM numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 124
Şekil 4.41. EPS numunesi deformasyon eğrisi. 126
Şekil 4.42. EPS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar. 127

Şekil 4.43. EPS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 3-4 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar. ..127
Şekil 4.44. EPS numunesinde oluşan çatlaklar; 7-8 kollar arası çatlaklar.....128
Şekil 4.45. EPS numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 128
Şekil 4.46. EPS numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 129
Şekil 4.47. EPS numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 129
Şekil 4.48. EPS numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 130
Şekil 4.49. EPS numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 130
Şekil 4.50. EPS numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 131
Şekil 4.51. EPS numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 131
Şekil 4.52. EPS numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 132
Şekil 4.53. EPS numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 132
Şekil 4.54. EPS numunesi gerinim ölçerlerin grafiği. 133
Şekil 4.55. EPD numunesi deformasyon eğrisi. 135
Şekil 4.56. EPD numunesinin 1. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 136
Şekil 4.57. EPD numunesinin 2. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 136
Şekil 4.58. EPD numunesinin 4. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 137
Şekil 4.59. EPD numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 5-6 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar...137
Şekil 4.60. EPD numunesinin 8. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 138
Şekil 4.61. EPD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.....138
Şekil 4.62. EPD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.....139
Şekil 4.63. EPD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.....139
Şekil 4.64. EPD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.....140
Şekil 4.65. EPD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.....140
Şekil 4.66. EPD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.....141
Şekil 4.67. EPD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.....141
Şekil 4.68. EPD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.....142
Şekil 4.69. EPD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 142
Şekil 4.70. EPD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.....143
Şekil 4.71. EPSD numunesi deformasyon eğrisi. 145
Şekil 4.72. EPSD numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar.146
Şekil 4.73. EPSD numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 3-4 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.146
Şekil 4.74. EPSD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 147
Şekil 4.75. EPSD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 147
Şekil 4.76. EPSD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 148
Şekil 4.77. EPSD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 148
Şekil 4.78. EPSD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 149
Şekil 4.79. EPSD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 149
Şekil 4.80. EPSD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 150
Şekil 4.81. EPSD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 150
Şekil 4.82. EPSD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 151
Şekil 4.83. EPSD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği. 151
Şekil 4.84. ERS numunesi deformasyon eğrisi.....153
Şekil 4.85. ERS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar...154
Şekil 4.86. ERS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 3-4 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar...154
Şekil 4.87. ERS numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.....155
Şekil 4.88. ERS numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.....155
Şekil 4.89. ERS numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.....156

Şekil 4.90. ERS numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 156
Şekil 4.91. ERS numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 157
Şekil 4.92. ERS numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 157
Şekil 4.93. ERS numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 158
Şekil 4.94. ERS numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 158
Şekil 4.95. ERS numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 159
Şekil 4.96. ERS numunesi gerinim ölçerlerin grafiği. 159
Şekil 4.97. ERD numunesi deformasyon eğrisi. 161
Şekil 4.98. ERD numunesinin 2. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 162
Şekil 4.99. ERD numunesinin 4. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 162
Şekil 4.100. ERD numunesinin 6. ve 7. kolları arasında oluşan çatlaklar. 163
Şekil 4.101. ERD numunesinin 8. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 163
Şekil 4.102. ERD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 164
Şekil 4.103. ERD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 164
Şekil 4.104. ERD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 165
Şekil 4.105. ERD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 165
Şekil 4.106. ERD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 166
Şekil 4.107. ERD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 166
Şekil 4.108. ERD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 167
Şekil 4.109. ERD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 167
Şekil 4.110. ERD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 168
Şekil 4.111. ERD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği. 168
Şekil 4.112. ERSD numunesi deformasyon eğrisi. 170
Şekil 4.113. ERSD numunesinin 1. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 171
Şekil 4.114. ERSD numunesinin 2. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 171
Şekil 4.115. ERSD numunesinin 4. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 172
Şekil 4.116. ERSD deneyinde oluşan çatlaklar; (a) 5-6 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar. 172
Şekil 4.117. ERSD numunesinin 8. kol üzerinde oluşan çatlaklar. 173
Şekil 4.118. ERSD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği. 173
Şekil 4.119. ERSD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği. 174
Şekil 4.120. ERSD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği. 174
Şekil 4.121. ERSD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği. 175
Şekil 4.122. ERSD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği. 175
Şekil 4.123. ERSD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği. 176
Şekil 4.124. ERSD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği. 176
Şekil 4.125. ERSD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği. 177
Şekil 4.126. ERSD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği. 177
Şekil 4.127. ERSD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği. 178
Şekil 4.128. ERef sonlu elemanlar analizi. 179
Şekil 4.129. ERef sonlu elemanlar analiz grafiği. 179
Şekil 4.130. EC sonlu elemanlar analizi. 180
Şekil 4.131. EC sonlu elemanlar analiz grafiği. 181
Şekil 4.132. EM sonlu elemanlar analizi. 182
Şekil 4.133. EM sonlu elemanlar analiz grafiği. 182
Şekil 4.134. EPS sonlu elemanlar analizi. 183
Şekil 4.135. EPS sonlu elemanlar analiz grafiği. 184
Şekil 4.136. EPD sonlu elemanlar analizi. 185

Şekil 4.137. EPD sonlu elemanlar analiz grafiği. 185
Şekil 4.138. EPSD sonlu elemanlar analizi. 186
Şekil 4.139. EPSD sonlu elemanlar analiz grafiği. 187
Şekil 4.140. ERS sonlu elemanlar analizi. 188
Şekil 4.141. ERS sonlu elemanlar analiz grafiği. 188
Şekil 4.142. ERD sonlu elemanlar analizi. 189
Şekil 4.143. ERD sonlu elemanlar analiz grafiği. 190
Şekil 4.144. ERSD sonlu elemanlar analiz grafiği. 191
Şekil 4.145. ERSD sonlu elemanlar analiz grafiği. 191
Şekil 5.1. ERef ve EM deney grafikleri. 192
Şekil 5.2. ERef ve EM maksimum yük grafiği. 193
Şekil 5.3. ERef ve EM birim şekil değiştirme grafikleri. 193
Şekil 5.4. EPS, EPD ve EPSD deney grafikleri. 194
Şekil 5.5. EPS, EPD ve EPSD maksimum yük grafiği. 195
Şekil 5.6. EPS, EPD ve EPSD birim şekil değiştirme grafikleri. 195
Şekil 5.7. EC, ERS, ERD ve ERSD deney grafikleri. 196
Şekil 5.8. EC, ERS, ERD ve ERSD maksimum yük grafiği. 197
Şekil 5.9. EC, ERS, ERD ve ERSD birim şekil değiştirme grafikleri. 197
Şekil 5.10. Kubbe etek bölgesi güçlendirme grafikleri. 198
Şekil 5.11. Kubbe etek bölgesi maksimum yük grafiği. 199
Şekil 5.12. Kubbe etek bölgesi birim şekil değiştirme grafikleri. 199
Şekil 5.13. Kubbe kasnak bölgesi grafikleri. 200
Şekil 5.14. Kubbe kasnak bölgesi maksimum yük grafiği. 201
Şekil 5.15. Kubbe kasnak bölgesi birim şekil değiştirme grafikleri. 201
Şekil 5.16. Kubbe etek ve kasnak bölgesi grafikleri. 202
Şekil 5.17. Kubbe etek ve kasnak bölgesi maksimum yük grafiği. 203
Şekil 5.18. Kubbe etek ve kasnak bölgesi birim şekil değiştirme grafikleri. 203
Şekil 5.19. Kubbe deney grafikleri. 205
Şekil 5.20. Toplam yük - deplasman sonuçları. 206
Şekil 5.21. Maksimum yük grafiği. 207
Şekil 5.22. Toplam yük – birim şekil değiştirme grafiği. 208
Şekil 5.23. ERef deney ve analiz sonuç grafiği. 209
Şekil 5.24. EC deney ve analiz sonuç grafiği. 209
Şekil 5.25. EM deney ve analiz sonuç grafiği. 210
Şekil 5.26. EPS deney ve analiz sonuç grafiği. 210
Şekil 5.27. EPD deney ve analiz sonuç grafiği. 211
Şekil 5.28. EPSD deney ve analiz sonuç grafiği. 212
Şekil 5.29. ERS deney ve analiz sonuç grafiği. 212
Şekil 5.30. ERD deney ve analiz sonuç grafiği. 213
Şekil 5.31. ERSD deney ve analiz sonuç grafiği. 214
Şekil 5.32. Analiz modellerinin yük - deplasman grafikleri. 214

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Horasan harcının basınç deney sonuçları. 61
Çizelge 3.2. Horasan harcının eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları. 63
Çizelge 3.3. Tamir harcının teknik özellikleri. 64
Çizelge 3.4. Yığma birimlerin basınç dayanım test sonuçları. 65
Çizelge 3.5. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanım test sonuçları. 66
Çizelge 3.6. Kayseri tüf taşının fiziksel deney sonuçları. 67
Çizelge 3.7. Kayseri tüf taşının mekanik deney sonuçları. 67
Çizelge 3.8. Çelik sacın kimyasal özellikleri. 68
Çizelge 3.9. Çelik sacın mekanik özellikleri 68
Çizelge 3.10. FRP bantların malzeme özellikleri. 69
Çizelge 3.11. Epoksi yapıştırıcının malzeme özellikleri. 70
Çizelge 3.12. Yığma duvarların basınç dayanımları. 71
Çizelge 3.13. Sayısal modellere ait tanımlanan malzeme özellikleri. 94
Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının karşılaştırılması. 204

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	Numune Genişliği (mm)
CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
d	Etkili Derinlik (mm)
E	Elastisite Modülü (MPa)
EC	Dikiş Yöntemi Deneyi
EM	Tamir Harcı Deneyi
EPD	FRP Kasnak Deneyi
EPDS	FRP Etek ve Kasnak Deneyi
EPS	FRP Etek Deneyi
ERef	Referans Deneyi
ERD	Çekme Çemberi Kasnak Deneyi
ERS	Çekme Çemberi Etek Deneyi
ERSD	Çekme Çemberi Etek ve Kasnak Deneyi
f	Basınç Dayanımı (MPa)
$\mathbf{F_m}$	Deney Sırasında Akma Noktası Geçildikten Sonra Deney Parçasının Dayandığı En Büyük Yük (N).
FRP	Lif Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Lif Takviyeli Polimer
HBD	Harcın Basınç Dayanımı
HÇD	Harcın Çekme Dayanımı
k	Pozitif Malzeme Sabiti
L	Mesnet Silindirlerinin Eksenleri Arasındaki Mesafe (Mm)
LUSAS	London University Structural Analysis System
LVDT	Liner Variable Differantial Transformer
mV	Milivolt
P	Maksimum yükleme (N)
$\mathbf{R_m}$	Çekme dayanımı (N/mm^2)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
TBD	Taşın Basınç Dayanımı
TÇD	Taşın Çekme Dayanımı
V	Maksimum yük (N)
YBD	Yığma Duvarların Basınç Dayanımı
σ	Basınç Dayanımı (MPa)

1. GİRİŞ

Anadolu, birçok tarihi esere ev sahipliği yapmış bir coğrafyadır. Anadolu'da yaşayan farklı toplumların mimari gelenekleri sentezlenerek Osmanlı mimarisinin oluşmasına katkı sağlamışlardır. Yıllar içerisinde yapıların inşasında kullanılan malzemeler ve yapım teknikleri değişim ve gelişim göstermiştir. Böylece yıllar içerisinde insanların mimarlık ve mühendislik anlamında kendilerini geliştirmesiyle tarihi yapılardaki dayanım ve mimari bütünlük sağlanmıştır.

Tarihi yapılar geçmişten günümüze ulaşan, yapıldığı devrin özelliklerini taşıyan ve gelecek nesillere aktarılması gereken kültürümüzün birer parçası olan eserlerdir. Tarihi yapıları içlerinde bulunduğu ortamdan ayırmadan ve tanıklık ettiği tarihi özellikleri bozmadan onarım ve güçlendirme yapmak gerekmektedir. Bu husus tarihsel ve kültürel mirasımızı gelecek nesillere doğru bir şekilde aktarılması için oldukça önemlidir. Bu kapsamda tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında uluslararası koruma ilkeleri ve koruma bilinci doğrultusunda yapılmasıyla sağlanacaktır. Tarihî yapıların korunması ve restorasyonu hakkında uluslararası bir çerçeve belirlemek amacıyla 1964 yılında Venedik Tüzüğü olarak adlandırılan anlaşma kabul edilmiştir. Böylece birçok ülke bu tüzüğün ilkelerini benimseyerek yasalarına dahil etmiştir (Kaderli, 2014). Tarihi yapıların iyileştirilmesinde en önemli ilke yapıya uygulanacak müdahalelerin minimum seviyede tutulmasıdır. Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde öncelikli olarak taşıyıcı sistem irdelenmeli, sonrasında ise malzeme özellikleri ile zemin parametreleri dikkatli bir şekilde ele alınmalıdır.

Şehirlere hayat veren bu kültür varlıklarımızın yaşatılması ve kendilerine özgü nitelikleriyle gelecek nesillere aktarılması önemli sorunlardan biridir. Bir diğer sorun, kültürel mirasımızı oluşturan tarihi eserlerin zaman içerisinde yenilenme ve güçlendirilmesinde yeterli mühendislik bilgisi olmadan ve gerekli analizler yapılmadan restore edilmesidir. Yapılan bu çalışma ile tarihi yapıların restorasyonu sürecinde karşılaşılan zorluklar, yapılan hatalar ve dikkat edilmesi gereken hususlar hakkında yol göstermesi planlanmıştır.

Anadolu'da yer alan tarihi eserlerin büyük çoğunluğunu cami, hamam, han, medrese, imarethane tipi yapılar oluşturmaktadır. Zaman içerisinde bu yapılar gelişim göstererek daha fazla insan topluluğuna hizmet etmişlerdir. Böylece daha büyük ve görkemli tarihi yapılar günümüze kadar gelmiştir.

1.1 Tezin Amacı

Literatürde camiler ile ilgili yapısal analizlere ve restorasyon çalışmalarına ışık tutabilecek kapsamlı bir çalışmanın eksikliği söz konusudur. Özellikle yığma taş cami kubbelerinin restorasyonuna yönelik yapılmış deneysel çalışmalar neredeyse yok denecek kadar azdır. Tez kapsamında literatürdeki bu eksikliklerin giderilmesi ve bu konuda literatüre ve uygulamaya yönelik çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Çalışmada, Osmanlı İmparatorluğunun kuruluşundan 16. Yüzyıla kadar inşa edilmiş camilerin kubbe sistemleri incelenerek, kubbelerde görülen hasarlar belirlenmiştir. Kubbelerde en çok görülen hasar çeşidi dikkate alınarak güçlendirme çalışmaları deneysel ve sayısal model olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kubbelerdeki hasarlar için en uygun güçlendirme tekniğinin bulunması hedeflenmiştir.

Kubbelerde zaman içerisinde çeşitli deformasyonlar ve yıkılmalar meydana gelmektedir. Bu sebepten dolayı kubbe hasarlarının mühendislik açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durumun gerçekleşmesi ise kubbelerin teorik ya da deneysel açıdan incelenmesiyle mümkün olmaktadır. Çalışmada, kubbeler sonlu elemanlar modeli oluşturularak teorik açıdan, laboratuvar ortamında modellenerek de deneysel açıdan incelenmiştir. Yapılan deneysel modeller ile analiz modelleri kıyaslanarak yapılan güçlendirme teknikleri teorik olarak da desteklenmiştir. Deney ve analiz modelleriyle gerçekleştirilen incelemeler sonucunda kubbelerdeki hasarların onarılması için en uygun güçlendirme tekniğinin bulunması amaçlanmaktadır.

1.2 Tezin Önemi

Cumhuriyetin ilk yıllarından günümüze kadar olan süreçte tarihi yapıların onarımları ve güçlendirmeleri genellikle bilimsel olarak gerçekleştirilmedi. Ülkemizde restorasyon

konusunda çalışan bilim insanlarının azlığı ve laboratuvar imkanlarının kısıtlı olmasından dolayı bu çalışmalar neredeyse bilinçsizce yapılmaktaydı.

Günümüzden 10-15 yıl öncesine kadar restorasyon uygulamalarında çimento esaslı yapısal elemanlar bile kullanılmıştır. Çimentonun tarihi dokuya zarar verdiği bilimsel olarak kanıtlandığından dolayı artık geleneksel yapım teknikleri araştırma konusu olarak birçok yerli bilim insanı tarafından çalışılmaya başlanmıştır.

Bu kapsamda, Osmanlı dönemi camilerinin esas ve vazgeçilmez taşıyıcı elemanı olan kubbelerin zaman içerisindeki deformasyonları, bu elemanların onarılmasını, hatta güçlendirmesini gerektirmektedir. Yapılacak olan onarım/güçlendirme çalışmalarında da gerek tarihi dokuya zarar vermemesi ve gerekse yüzyıllar boyunca dayanması öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken hususlardır.

Bu çalışma, Osmanlı Dönemi camilerinin kubbelerinde meydana gelen hasarların belirlenmesi ve bu hasarlar için önerilecek güçlendirme yöntemlerinin değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada hasarlı cami kubbelerinin deneysel ve sayısal veriler yardımıyla en uygun güçlendirme tekniğinin nasıl yapılacağı incelenmiştir.

1.3 Kubbeler ve Yapısal Elemanları

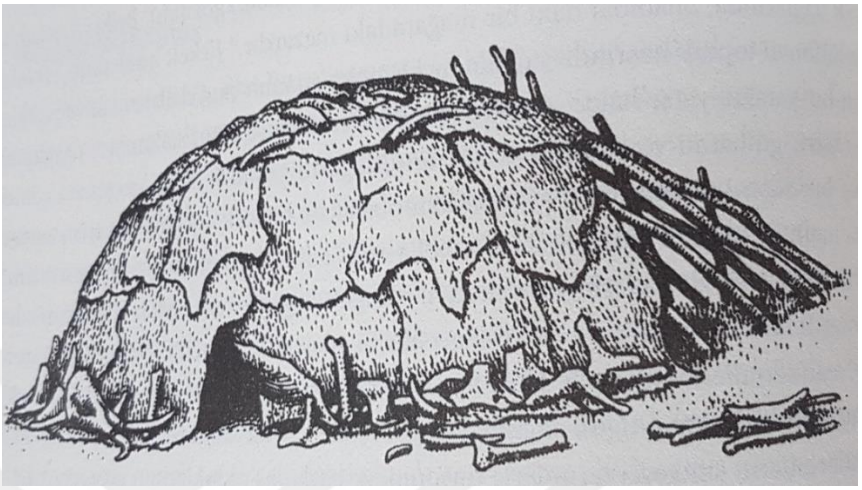
1.3.1 Kubbenin tarihsel gelişimi

Kubbe bir eğrinin simetri ekseni etrafında döndürülmesiyle oluşan ve mühendislik yapılarındaki geniş mekânları kapatmak amacıyla yapılan eğrisel örtü sistemidir.

Kubbenin yapısı ve şekli; bölgenin coğrafyasına, mimari kültürüne ve dinsel inançlarına göre değişim göstermektedir. Kubbeler, içinde barındırdıkları farklı özellikler sayesinde bulunduğu coğrafyanın kimliğini oluşturmuştur. Tarih öncesi çağlardan günümüze kadar dünyanın birçok bölgesindeki toplumlar yapıların üzerine kubbe inşa etmişlerdir. Böylece kubbe mimarisi tarih boyunca gelişim ve değişim göstermiştir.

İlk ilkel kubbenin M.Ö. 44.000 -12.0000 yıllarında olduğu kabul edilmiştir. Bazıları 9,1 m. açıklığa sahip olan ilkel kubbenin iskeleti mamut kemikleri ve kafataslarından oluşmuştur. Bu iskeletin üzerine ağaçlar ağ şeklinde sarılmış olup üzeri hayvan postları

ile örtülmüştür. Bu ilkel kubbenin şeklinin kubbe veya konik biçiminde olduğu düşünülmektedir (Şekil 1.1) (Roth, 2000).

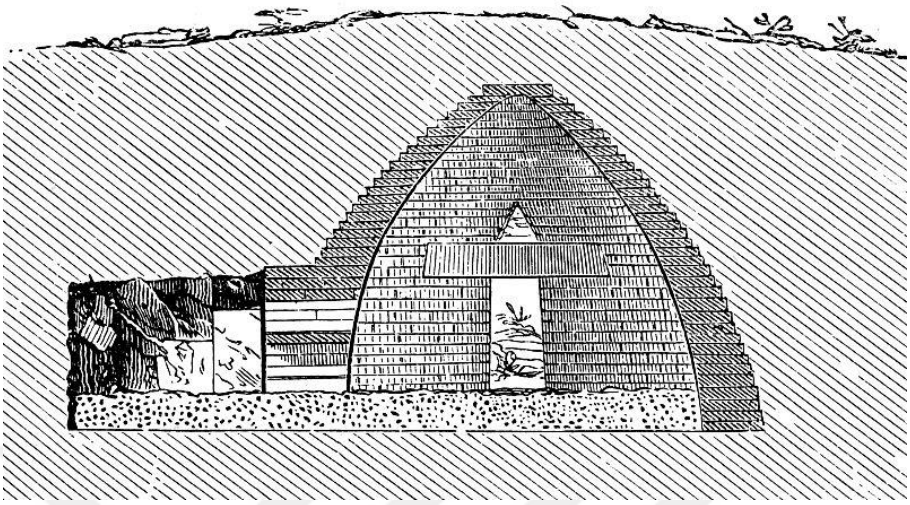


Şekil 1.1. Cro - Mangon evi Ukrayna (Roth, 2000).

Dünya tarihinde bilinen ilk kubbeli yapılar Neolitik çağlarda görülmüştür. M.Ö. 7.000 yılına kadar giden bu dönemde kubbeli dolmenler Sümerler tarafından inşa edilmiştir. Tek kubbesi olan bu yapılar, harçsız taşlar ile örülmüş ve kilit taşı ile kapatılarak sabitlenmiştir (Altın, 2010).

Dünyanın en eski tarihli kubbesi Mezopotamya'daki Arpaçiya'a bulunmuş olup M.Ö. VI. yüzyıla ait olduğu düşünülmektedir. Günümüzde Musul yakınlarında olan Arpaçiya'da yuvarlak temele sahip olan kubbede yapı malzemesi olarak taş ve kerpiç, bağlayıcı malzeme olarak da çamur harcı kullanılmıştır (Mülayim, 2002).

Ege bölgesinde M.Ö. 16. ve 13. yüzyılla ait olduğu düşünülen kubbeli mezarlar bulunmuştur. Kubbeli mezarlar için Yunanistan'da bulunan Atreus Hazine Binası (Şekil 1.2) dönemin en önemli örneğidir. Dokuz kubbeli mezardan en büyüğü olan yapının kubbe çapı 14,50 metredir (Mülayim, 2002).



Şekil 1.2. Atreus hazine binası (Uçak, 2012).

Roma'da M.S. 27 yılında inşa edilen ve dönemin en büyük kubbesi olarak adlandırılan Pantheon tapınağının kubbe açıklık ve yüksekliği 43,4 metredir (Şekil 1.3). Panteonun yapı malzemesi Roma betonudur. Günümüze kadar gelebilen Pantheon kendisinden sonra yapılan merkezi kubbeli yapılara öncülük etmiştir (Corbusier, 2010).



a) Kubbenin üstten görünüşü (URL-1) b) Kubbenin alttan görünüşü (URL-2)

Şekil 1.3. Pantheon tapınağı kubbesi.

Roma ve Bizans döneminden günümüze kadar gelebilen az sayıda kubbe olmasına rağmen 571 yılında inşa edilen Ayasofya bunun en iyi örneğidir. Ayasofya'nın ana kubbe çapı 31,8 metre olup yapıldığı dönemdeki bazilika planlı kubbelerin en büyüğü ve en geniş bir alanı örtme özelliğine sahiptir (Şekil 1.4). Bu durum Bizans mimarisindeki kubbelerin ulaştığı boyutları göstermektedir (Aktuğ Kolay, 1999).



Şekil 1.4. Ayasofya Camii ve kubbesi (URL-3).

Floransa'da da bulunan gotik tarzda olup 1471 yılında tamamlanmıştır. Kubbe çapı 42 metre ve kubbe formu Santa Maria del Fiore Katedrali sekizgen dilimli manastır tonozu şeklindedir (Şekil 1.15). Bu katedral dönemin tuğla malzeme kullanılarak inşa edilmiş en büyük kubbe olma özelliğini taşımaktadır (Altın, 2010).



Şekil 1.5. Floransa Santa Maria Del Fiore Katedrali (URL-4).

17. Yüzyılda yapımı tamamlanan Saint Paul Katedralinin kubbe yüksekliği 113 metre ve kubbe çapı 32,9 metre olarak dünyanın en büyük kubbelerinden biridir (Şekil 1.6). Geç Rönesans dönemi Barok tarzında yapılan katedralin kubbesi sekiz ahşap kaburga ile taşınır (Roth, 2000).



Şekil 1.6. Saint Paul Katedrali (URL-5).

Türk mimarisindeki ilk kubbe örneklerine (745-940) yılları arasında Uygur Döneminde görülmüştür. Hoço Harabelerindeki mezarların üzerlerinde kubbe kalıntılarına rastlanmıştır. Karahanlılar döneminde daha çok kubbe inşa edilmiş olup kubbe formu yukarıya doğru sivrileşen bir yapıdadır. Gaznelilerde ise yatay olarak gelişen cami formu bulunurken ilk mihrap önü kubbesi burada yapılmıştır (Tuncer, 1980).

Selçuklu mimarisinde genellikle çokgen parçalı, mukarnas konik kubbe formları yapılmıştır (Çetinarslan, 2013). Selçuklu döneminde birçok kamu yapılarının üst örtüsünde kubbe formu kullanılmıştır. Şekil 1.7'de Büyük Selçuklu döneminde Türk mimarisinde önemli bir yere sahip olan Sultan Sencar Türbesi 17 metre çapındaki kubbesiyle dönemin önemli eserlerindendir (Turan, 2018). Şekil 1.8'de ise Selçuklu mimarisinde kubbeye verilen önemi 10. yüzyılda inşa edilen İsfahan Mescid-i Cuması'sının anıtsal boyuttaki kubbesinde görülmektedir (Eren, 2018).



Şekil 1.7. Sultan Sencar Türbesi (URL-6).



Şekil 1.8. İsfahan Cuma Camii (URL-7).

Erken Osmanlı Dönemi, (1299-1501) yılları arasındaki kubbe mimarisi Anadolu Selçuklu ve beylikler döneminin izlerini taşımıştır. Bu dönemde daha çok merkezi planlı kubbe yapılmış ve yapılardaki kubbe çapları da arttırılmıştır (Şimşek, 2010). Erken Osmanlı döneminde genellikle inşa edilen tek kubbeli cami, medrese gibi yapılarda az sayıda ayaklar ile geniş hacimler oluşturmak istenmiştir. Bu sebeple ana kubbeyi destekleyen iki ya da dört yönde yarım kubbeler yapılmıştır. Kubbeler payanda ya da ağırlık kuleleri ile desteklenmiş olup kubbenin içi pandantif, dışı ise alçak sekizgen kasnaklarla geçilmiştir.

Tek kubbeli caminin en güzel örneği 15. Yüzyılda yapılan 10,5 metre kubbe çapı ile Firuzağa Camisidir (Şekil 1.9). Merkezi planlı camiye en iyi örnek olarak 1447 yılında tamamlanan Edirne Üç Şerefeli Camisi verilebilir (Şekil 1.10). Ana kubbesi 24 metre çapında olup dördü beden duvarları üstünde ve ikisi serbest olan, altıgen kesitli altı ayağa oturmuştur (Kula Say, 2007).



Şekil 1.9. Firuzağa Camisi (URL-8).



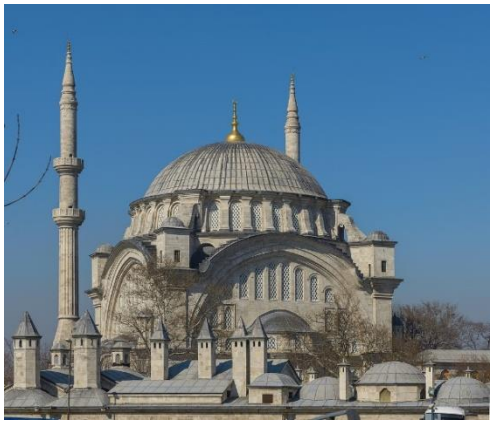
Şekil 1.10. Edirne Üç Şerefeli Camii (URL-9).

Klasik Osmanlı Dönemi (1501-1703) yılları arasında Osmanlı tarihinin en gelişmiş yapıları inşa edilmiş olup kubbe mimarisi bu dönemle altın çağını yaşamıştır. Bu dönemde merkezi kubbenin ağırlığını ve gelen yatay kuvveti kemer, pandantif, payanda ve yarım kubbe gibi elemanların birleşmesiyle oluşan taşıyıcı sitem toprak zemine iletilir. Ana kubbe yuvarlak formda olup kubbeyi taşıyan sütunlar görünür hale getirilmiştir. Klasik dönemin en önemli eserlerinden biri hiç şüphesiz 31,50 metre çapındaki Edirne Selimiye Cami olmuştur (Şimşek, 2010). Bu cami ile ilgili görsel Şekil 1.11'de verilmiştir. Bu dönemde mimaride farklı uygulamalar kullanılmıştır. Kubbe açıklığı geniş olan yapılarda kubbenin yatay yüklerden etkilenmemesi için kasnağının oturduğu yerlerdeki tuğla daha kalın seçilmiştir. Kubbenin üst kısımlarında ise bu kalınlık kubbe yükünü hafifletmek amacıyla azaltılmış ve kubbenin üst kısmında içi boş tuğlalar kullanılmıştır (Yılmaz, 2012).



Şekil 1.11. Edirne Selimiye Camii (URL-10).

Geç Osmanlı Döneminde, klasik dönemde görülen mimari ve sanat anlayışı 18. Yüzyıldan başlayan batılılaşma hareketleri sonucunda oldukça değişiklik göstermiştir. Bu dönem mimari anlamda gelişme göstermemiş olup gösterişe ve ihtişama daha çok yer verilerek yapılan süslemelerle yapılarda derinlik elde edilmeye çalışılmıştır. Buna en güzel örnek İstanbul'da 1755 yılında tamamlanan tek kubbeye sahip ve kubbe çapı 25,50 metre olan Nuruosmaniye Cami'dir (Şekil 1.12) (Eren, 2018).



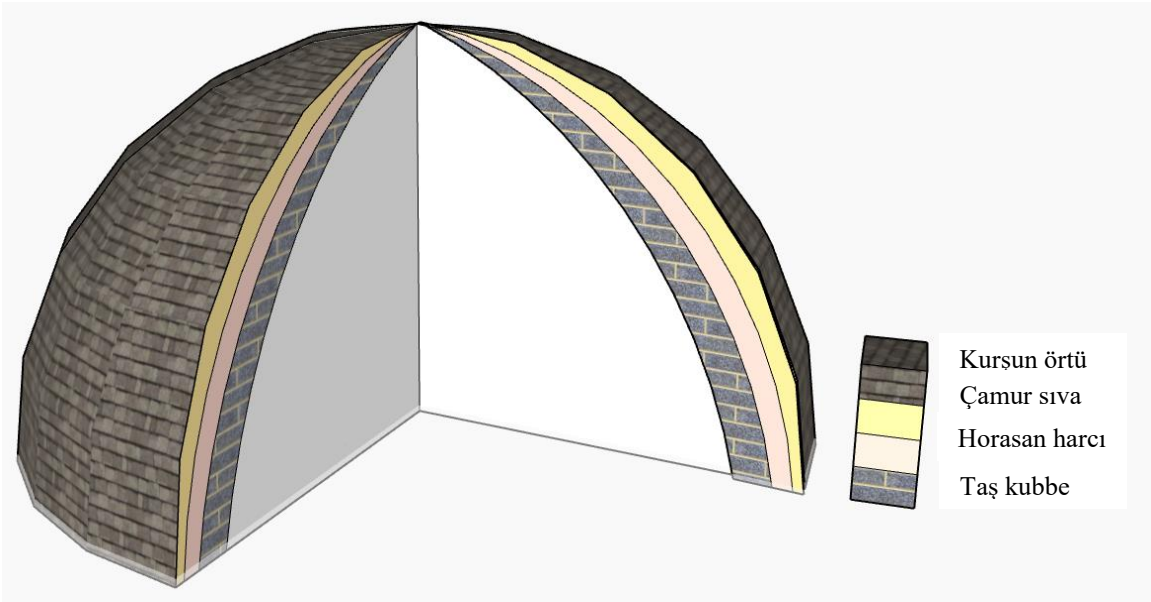
a) Nuruosmaniye Camii (URL-11)



b) Nuruosmaniye Cami kubbesi (URL-12)

Şekil 1.12. Nuruosmaniye Camii.

Osmanlı döneminde kubbeler beden duvarları üzerine inşa edilmişlerdir. Kubbe yuvarlağını beden duvarların üzerine oturtmak için yapılan daire, kare, çokgen şeklindeki bölüme kasnak denilmektedir. Kubbeyi kasnak, kasnağı ise beden duvarı taşımaktadır. Osmanlı kubbelerinin yapım aşamaları genellikle aynıdır. İlk olarak kesme taş ve horasan harcı ile kubbe örülür. Ardından taş kubbelerin üstü horasan harcı ile sıvanır ve onun üzerine de rutubet olmaması amacıyla çamur sıva yapılır. Kubbenin korunması amacıyla en üst tabaka kurşun örtü ile kaplanır (Şekil 1.13).



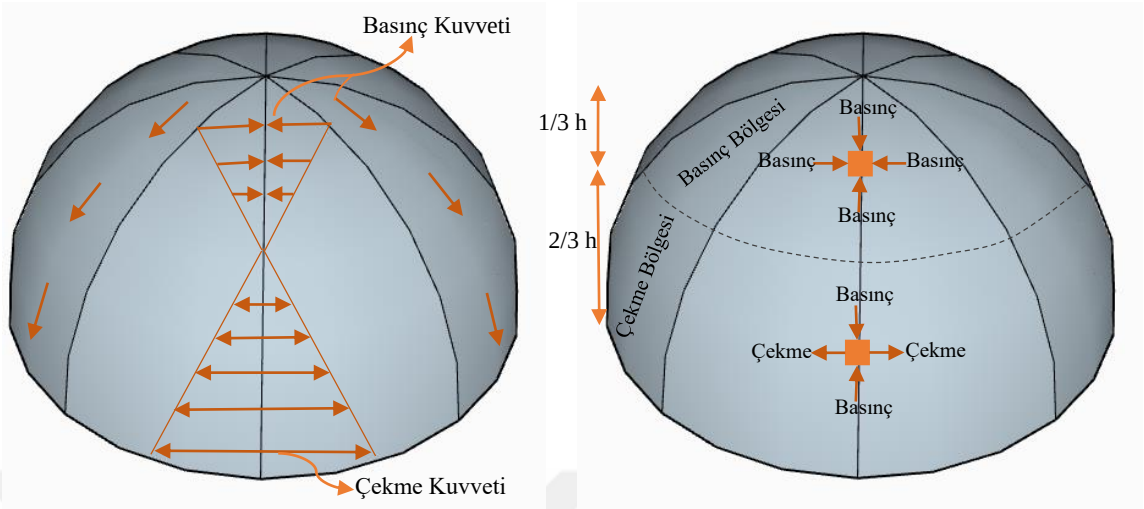
Şekil 1.13. Kubbenin tabakaları.

1.3.2 Kubbelerin yük aktarımı

Kubbe kendi ağırlığı ve kar yükleri gibi düşey kuvvetleri taşıyabilen eğrisel yüzeyli örtü sistemidir. Kubbenin yük taşıma prensibi; kubbenin tepe noktasında bulunan kilit taşının altındaki her sıra taş bir önceki taşların ağırlığını taşır ve bir alt sıra taşa aktarır sayede yük kubbenin kasnağına ve oradan da mesnetlere iletilir. Böylece kubbenin üst kısmındaki basınç gerilmeleri yüzey alanı arttıkça kubbenin alt kısımlarında çekme gerilmelerine dönüşmektedir.

Kubbeler gerçekte üç boyutlu kuvvetlere yani eğilme, basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalırlar. Ancak bu durumu basitleştirmek adına iki kabul yapılabilir. Bunlardan ilki kubbenin küçük kalınlıkta bir kabuk eleman olduğunu varsayarak bu elemanın çok düşük eğilme dayanımına sahip olduğu ve kabuktaki basınç gerilmeleri meridyenler boyunca oluştuğunu kabul eder. Kubbedeki dairesel gerilmeler kubbe tabanına doğru indikçe basınç gerilmeleri azalmakta çekme gerilmeleri artmaktadır. İkincisi ise kubbeyi kemer olarak kabul edip kemerdeki basınç çizgisi iç ve dış yüzeyler arasında kalıyorsa kemer yeteri kadar güçlü ve dayanıklı olmaktadır. Bu durumda kubbede meydana gelebilecek çatlaklara rağmen kubbe dayanıklı olarak kabul edilir (Beckmann, 1995).

Kubbenin tabanına gelen yük yatay ve düşey kuvvet olarak ikiye ayrılır. Düşey kuvvet kubbe duvarları ya da geçiş elemanları yardımıyla mesnetlere aktarılır. Kubbelere gelen yatay kuvvetleri; gergi sistemi, kubbe dışı ağırlık kuleleri, uçan payandalar ya da kasnak kalınlığını arttırarak karşılanabilir. Böylece kubbenin eteği yandan desteklenerek açılması engellenmiş olur. Yuvarlak kubbelerde bütün yük eğrisel örtü sistemine yayılır fakat dilimli kubbelerde bütün yük omurgalarda toplanmaktadır (Şimşek, 2010).



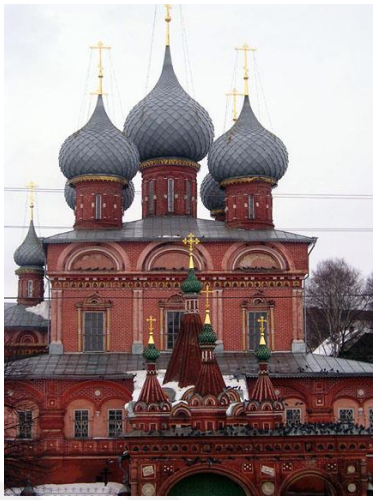
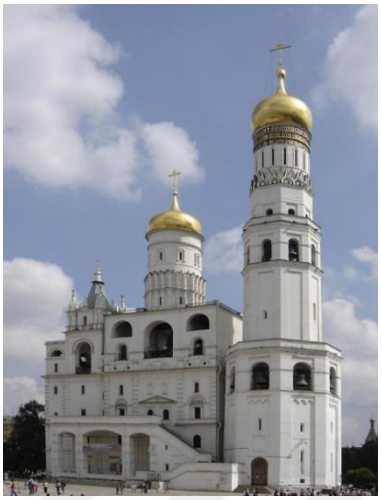
Şekil 1.14. Kubbelerde oluşan gerilme mekanizmaları.

1.3.3 Kubbe türleri

Mimari açıdan kubbeler soğan, küresel, konsollu, jeodezik, oval, parabolik, çokgen, yelken, tabak ve şemsiye biçimli kubbeler olarak sınıflandırılmıştır.

Soğan kubbeler

Soğan kubbe isminden de anlaşılacağı gibi şekli soğanı andırmaktadır. Bu kubbe formunda kasnak kısmı daha dar etek kısmı daha geniş açıklığa sahip olup tepe noktasına doğru kubbe düzgünce sivrilmektedir. Dolayısı ile kubbenin yüksekliği kubbenin geliştiğinden daha fazladır. Bu formdaki kubbeler genellikle Rus Ortodoks kiliselerinde görülmektedir. Aşağıda Şekil 1.15'de soğan kubbeli formlara sahip örnekler olarak verilmiştir.


a) Diriliş Kilisesi (URL-13) b) Ivan Çan Kulesi (URL-14) c) Aziz Andreas Kilisesi (URL-15)

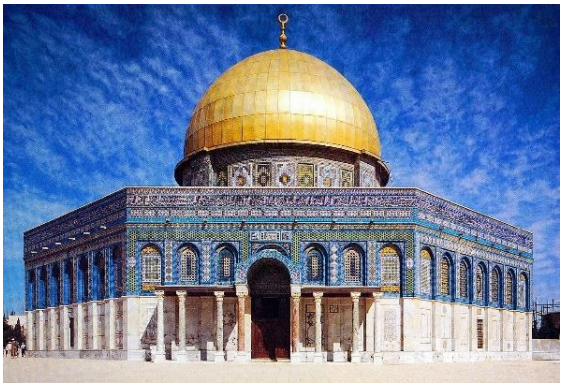



d) Tac Mahal (URL-16) (d) Putra Camii (URL-17)

Şekil 1.15. Soğan kubbe örnekleri.

Küresel kubbeler

Küresel kubbeler en yaygın olarak kullanılan kubbe formu olup yarım küre şeklindedir. Küresel formdaki kubbenin genişliği ve yüksekliği birbirine yakındır. Kubbenin dairesel kasnak üzerine inşa edilir. 689-691 yıllarında Kudüs'te inşa edilen İslam mimarisinin bilinen ilk kubbeli yapısı olan Omar Cami küresel kubbeye en iyi örnektir. Aşağıda Şekil 1.16'da küresel kubbeye sahip örnekler verilmiştir.



a) Omar Cami (URL-18)



b) Abuja Cami (URL-19)



c) Al Rahman Camii (URL-20)



d) Malakka Boğazı Camii (URL-20)

Şekil 1.16. Küresel kubbe örnekleri.

Konsollu kubbeler

Konsollu kubbeler farklı boyutlardaki halka şeklindeki kalın taş ya da tuğla duvarın aynı merkez doğrultusunda, birbiri üzerine halka çapı küçültülerek inşa edilmesiyle oluşur. Bu kubbe formunun görünüşü dairesel merdiven şeklindedir. İspanya, Minorca 'da 1857 yılında yapılan taş konsollu kubbe örneği ve 11. Yüzyılda Hindistan, Mehrauli'de yapılan Qutb cami birçok yapı için iyi bir örnek olma özelliğine sahiptir (Şekil 1.17).



Minora-İspanya konsollu kubbe ve Apulia-İtalya konsollu kubbe (Martynenko, 2017).



Qutb Cami (URL-21)

Şekil 1.17. Konsollu kubbe örnekleri.

Oval kubbeler

Kubbe formu oval bir yapıya sahip olup kubbe şekil olarak yumurtayı anımsatmaktadır. İlk olarak orta çağ dönemlerinde yapılmaya başlayan bu kubbeler Rönesans döneminde yaygın olarak kullanılmıştır. Oval kubbelerin belirli özellikleri sayesinde daha özgür bir mimariye izin vermiştirler. Karmaşık bir yapıya sahip olan oval kubbeler mimari açıdan oldukça kullanışlıdırlar. Bu kubbelerin mukavemeti yüksek olup, oval kasnak üzerine inşa edilirler (Şekil 1.18).





a) Vicoforte Sanctuary 1891 (URL-26)





b) Burgros Katedrali (URL-27) c) Sevilla Katedrali (URL-28)

Şekil 1.18. Oval kubbe örnekleri.

Parabolik kubbeler

Bir parabolün dikey eksen etrafında 180 derece döndürülmesiyle oluşan kubbe formudur. Bu kubbeler sabit yükün kubbeye düzgün yayılı yük olarak etkimesinden dolayı eğilme gerilmelerinin sıfır olduğu yapılardır. Eğer bu kubbeye tepe noktasına bir tekil yük uygulanırsa eğilme gerilmeleri sonsuz olmaktadır. Daha sonraları ise kubbenin tepe noktasında oluşabilecek bu sonsuz gerilmelerden kaçınmak için kubbenin şekli değiştirilmiştir. Eski çağlarda binaların inşasında yaygın olarak kullanılmasının nedeni de budur (Uçak, 2012). Parabolik kubbeler dairesel iskelet sistemine sahiptir ve dairesel kasnak üzerine inşa edilirler (Şekil 1.19).



a) Tore Agbar (URL-30)



b) Reichstag binası (URL-30)



c) Mavi Cami (URL-31)



d) Masjid Raya Selong Camii (URL-32)

Şekil 1.19. Parabolik kubbe örnekleri.

Çokgen kubbeler

Çokgen kubbeler aslında ismini oturduğu kasnağın çokgen şekilde olmasından almaktadır. Kubbenin kasnak bölgesinde büyük ve tepe noktasının altında da küçük olmak üzere iki tane çokgen halka vardır ve aynı doğrultudaki çokgenlerin köşe noktalarından eğik çubuklar-kaburga yarımıyla birleştirilmiştir. Çokgen kubbeler beşgen, altıgen ve sekizgen kasnak üzerine inşa edilmektedirler. Çokgen kubbeler birçok yerde vardır fakat inşası yüksek mühendislik isteyen muhteşem kubbe formları arasındadır. Bunun en bilinen örneği Brunelleschi tasarımı olan Rönesans döneminde sekizgen kubbe olarak inşa edilen Floransa Katedrali'dir. Aşağıda Şekil 1.20'de çokgen kubbe örnekleri verilmiştir.



a) Aziz Paul Katedrali (URL-5)



b) Aziz Petrus Bazilikası (URL-33)



c) Floransa Katedrali (URL-4)



d) Santa Maria Della Spina Kilisesi

Şekil 1.20. Çokgen kubbe örnekleri.

Yelken kubbeler

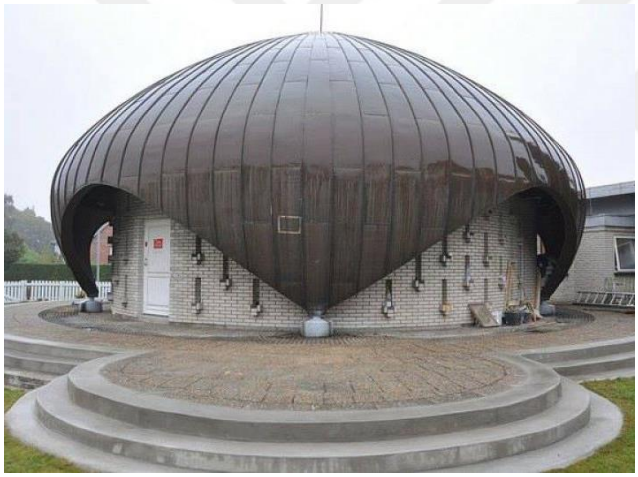
Yelken kubbeler pandantif kubbe olarak da bilinir. Yelken kubbenin üst kısmı küre şeklinde olup alt kısmı dört tane eğri üçgenden oluşmaktadır (Şekil 1.21). Kubbe kare planlı olup her bir köşesine üçgenin uçları mesnetlenmiştir. Bu kubbeler çok kullanışlı olmamakla birlikte günümüzde inşa edilen modern kubbeler olarak bilinmektedir.



a) Şiraz Mescid-İ Vakil Camii (URL-34)



b) Erbil Celil Hayat Camii (URL-34)



c) Nusrat Jahan Camii (URL-20)



d) Samsun Merkez Camii (URL-35)

Şekil 1.21. Yelken kubbe örnekleri.

Şemsiyeli kubbeler

Şemsiyeli kubbelerin bir diğer ismi kaburgalı kubbelerdir (Şekil 1.22). Kubbe kasnağından başlayıp tepe noktasında kesişen kemerler yapının iskelet sistemini oluşturmaktadır. İskeletler arasında kalan kubbe dilimleri dolgu malzemeleri ile doldurularak kubbede bütünlük sağlanmış olmaktadır. Kubbedeki dolgu malzemesinin görevi üstündeki yükü iskelet istemine aktarmak, iskelet sisteminin görevi ise yükü kasnağa iletmektir. Bu şemsiye kubbe formuyla büyük açıklıklar geçilebilmektedir.



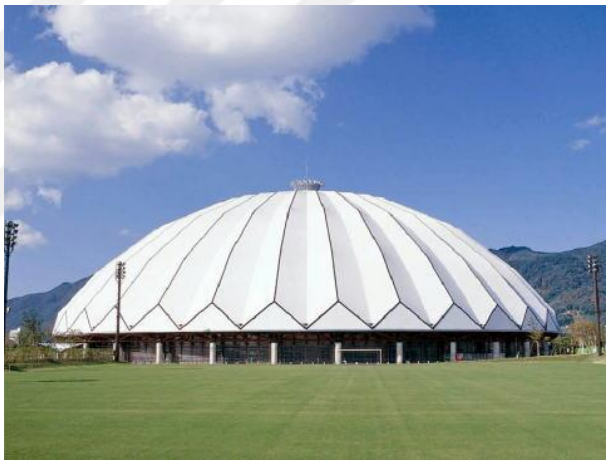
a) Palacio De Bellas Artes (URL-40)



b) St. Louis County kongre binası (URL-41)



c) Frederik Kilisesi (URL-42)



d) İzumo Dome (URL-43)

Şekil 1.22. Şemsiyeli kubbe örnekleri.

Jeodezik kubbeler

Jeodezik kubbe bir küre üstünde üçgen ya da çokgen şeklindeki noktaların birbirleriyle birleştirilmesiyle oluşan sistem türüdür. Bu kubbede formunda ölü ve hareketli yükler çekme ya da basınç çubukları yardımıyla düğüm noktalarına oradan da mesnetlere iletilir. Bu kubbelerde yığma kubbelerden farklı olarak çelik malzemesi kullanılmaktadır. Jeodezik kubbelerin spor salonu, stadyum, tiyatro, konser salonları, silolar, seralar, okullar ve evler olmak üzere çok yaygın bir kullanım alanı vardır. Aşağıdaki Şekil 1.23'de jeodezik kubbe örneği görünmektedir.



a) Nagoya beyzbol sahası (URL-22)



b) Aldar Headquarters building (URL-23)



c) Cybertecture Egg binası (URL-24)



d) Hulhumale Camii (URL-25)

Şekil 1.23. Jeodezik kubbe örnekleri.

Tabak kubbe

Tabak kubbenin bir diğer ismi basık kubbedir. Tabak kubbe yarım kürenin enine kesilmiş şeklinde olup dilimli kesitler (dilimli kesite sahip) halinde inşa edilen ve dairesel kasnağa oturan kubbe formundaki yapılardır (Şekil 1.24). Rome ve Bizans mimarisindeki kubbeler gibi düşük eğimli alçak kubbe formundadır. Tabak kubbe, mesnetlere gelen yatay kuvvetlere karşı oldukça dayanıksız olmasına rağmen yapının hafif, malzemenin kaliteli ve ekonomik olmasından dolayı tercih edilir. Bu kubbe formu düşey yüklere karşı oldukça dayanıklıdır ve yapılan en büyük kubbeler tabak kubbe formundadır. Hindistan, Pakistan, İran ve Afganistan camilerinin çoğu bu tiptedir.



a) Louisiana Superdome (URL-36)



b) Evoluon (URL-37)



c) Rock (Temppeliaukio) Kilisesi (URL-38)



d) Samara Arenası (URL-39)

Şekil 1.24. Tabak kubbe örnekleri.

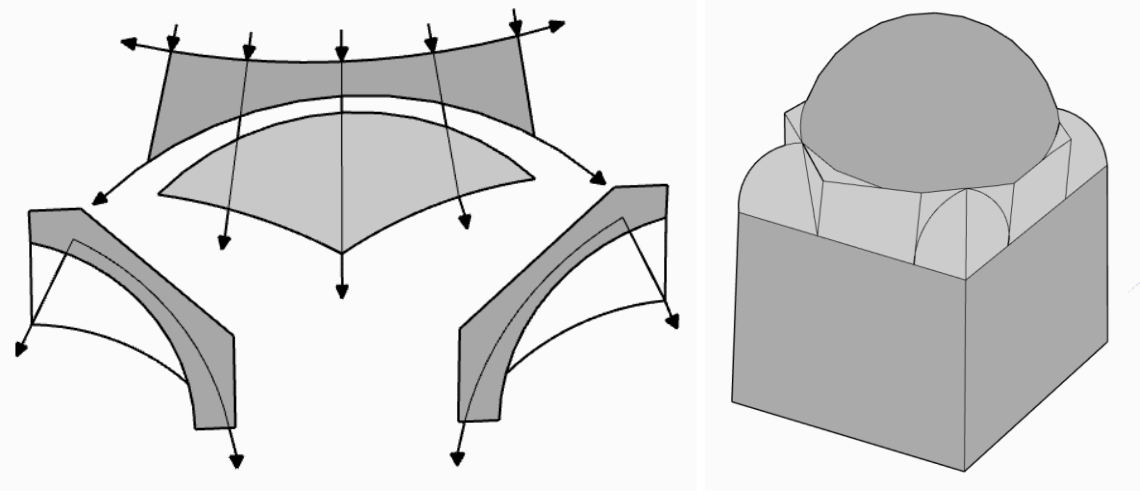
1.4 Kubbeli Yapılarda Geçiş Elemanları

Kare plana sahip bir yapının dairesel ya da sekizgen forma geçerken birleşim bölgelerinde görülen üçgensel boşlukları kapatmak adına geliştirilmiş, bütünleştirici özelliği olan ve kubbeden gelen düşey yüklerin aktarımını sağlayan elemanlara geçiş elemanları denir. Bu elemanlar kubbenin etek bölgesine gelen ölü yükleri diğer taşıyıcı elemanlara aktarmaktadır. Sonuçta kubbe geçiş elemanları üzerine gelen yükleri taşıyıcı kemer ve duvarlara aktarmaktadır.

Kubbeli yapılardaki geçiş elemanları tarihi dönemlere ve coğrafi bölgelere göre farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Bu durum dönemin mimari unsurlarına, yapım tekniğine ve kullanılan malzemelere göre değişiklik göstermektedir. Bu geçiş öğeleri tonoz, pandantif ve türk üçgeni olarak bilinmektedir.

1.4.1 Tromp (Tonoz bing)

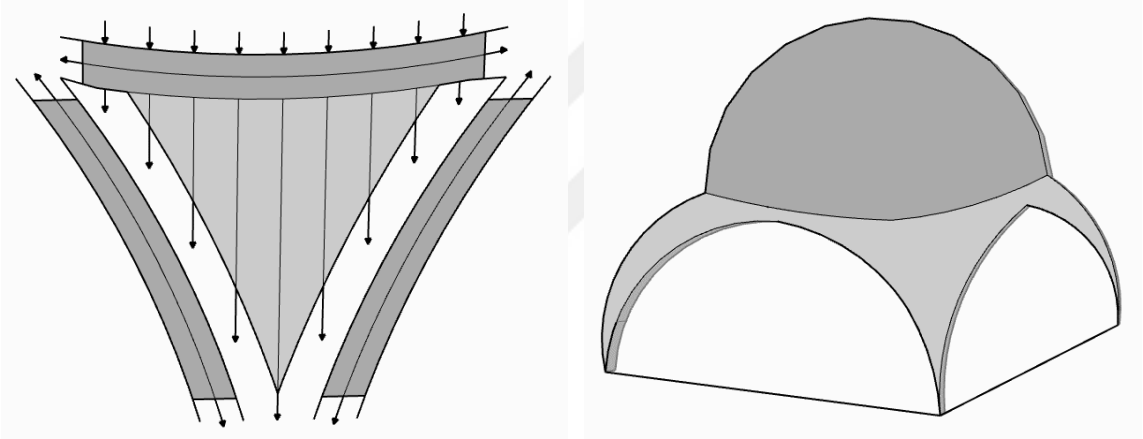
Tromp kare plana sahip kubbeli bir yapının duvar köşelerinin üst kısmına ve yapının üstüne sekiz kenarlı bir şekil halinde koyularak kubbe kasnağının oturması için yapılan tonoz bingi, köşe tonozu olarak tanımlanmakladır. Bir diğer tanımı ise yapının köşesine bindirmeli olarak örülen tonoz parçasıdır (Hasol, 1998). Geçiş elemanı olarak bilinen tromp çoğunlukla İran ve Türkistan bölgelerinde kullanılmıştır (Batur, 1980). Tromp elemanının inşasında tuğla ya da taş malzeme kullanılmıştır. Tromp sayesinde düşey yükler kemer ve duvarlara aktarılmaktadır. Tromp'ın geçiş öğesinin ilk örnekleri M.S. 1. yüzyılda Türkmenistan'da Part şehrinin Nisa bölgesinde yapılan kazılarda ortaya çıkmıştır (Okçuoğlu, 1995). Türklerdeki ilk tromp örnekleri ise Uygurlar zamanında Türklerine ait Hoço kentinde bir saray harabesinde İran ateşgahları biçiminde yapılmış Maniheist mabetlerde görülmektedir (Aslanapa, 2017). Tromplar; basit, ayrıtlı, yivli, mukarnaslı ve baklavalı tromp olmak üzere beş farklı tipte uygulanmıştır. Geçiş elemanlarından trompun şekli ve yük şeması Şekil 1.25'de gösterilmiştir.



Şekil 1.25. Tromp yük şeması ve örneği.

1.4.2 Pandantif (Küresel bingi)

Pandantif, kubbeyi taşıyan kemerler ile kubbe kasnağı arasındaki bölgeyi kapatan ve kare planlı kubbenin dairesel kasnağını geçmeyi sağlayan küresel üçgen olarak tanımlanmaktadır (Hasol, 1998). İlk pandantif örnekleri Suriye'de bulunmuş olup, Roma döneminden Bizans dönemine kadar yaygın olarak tercih edilmiştir. Pandantif, geçiş elemanı olarak basit, mukarnaslı ve ayrıntılı olmak üzere üç tiptedir (Turan, 2018). Ayasofya pandantifin ilk anıtsal kaynağı olarak görülmektedir (Hasol, 1998). Aşağıdaki Şekil 1.26'da geçiş elemanlarından biri olan pandantif örneği ve yük dağılım şeması gösterilmiştir.

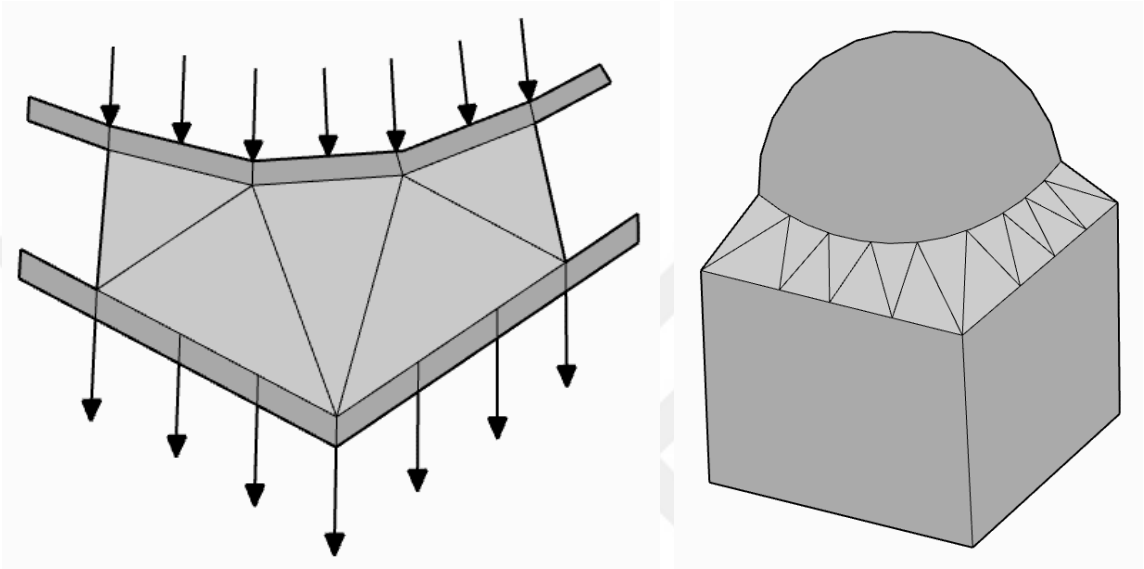


Şekil 1.26. Pandantif yük şeması ve örneği.

1.4.3 Türk Üçgeni

Türk üçgeni, kubbe duvarı ile kubbe kasnağı arasına geçiş elemanı olarak yapılan üçgenlerden meydana gelen yapıdır ve bu üçgenlerden oluşan kuşak kubbeye yumuşak bir geçiş sağlamıştır. Uygur kubbelerinde Türk üçgeninin en basit uygulamaları görülmektedir (Hasol, 1998). Türk üçgeni Anadolu Selçuklu döneminde ortaya çıkıp Osmanlı döneminde zirveye ulaşmıştır. Bunun nedeni Osmanlıdaki merkezi planlı yapılar inşa edebilmek için büyük çaplı kubbelere yapılmıştır ve bu kubbelerin yüklerini taşıyabilecek güçlü geçiş elemanları geliştirmiştir.

Türk Üçgen tipleri yedi tane olup bunlar; düzlem, çoklu (ikili, üçlü ve çoklu) düzlem, mukarnaslı düzlem, basit kısa üçgen dizisi, basit kuşaklama üçgen dizisi, baklavalı kısa üçgen dizisi, baklavalı kuşaklama üçgen dizisidir (Turan, 2018). Aşağıda Şekil 1.27'de geçiş elemanı Türk üçgeninin şekli ve yük şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.27. Türk üçgeni yük şeması ve örneği.

1.5 Kubbelerdeki Hasarlar, Onarım ve Güçlendirme Yöntemleri

Kubbelerde meydana gelen hasarların birçok sebebi vardır. Bunlardan bazıları yapısal, bazıları çevresel ve bazıları da insan etkilerinden kaynaklanmaktadır. Kubbelerde meydana gelen hasar sebeplerinden bazıları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- Zeminde meydana gelen oturmalardan dolayı oluşan hasarlar.
- Yapının inşası esnasında malzeme ve işçilik hatalarından kaynaklanan hasarlar.
- Yapı onarımında kalitesiz malzeme kullanımı, bilinçsiz ve yanlış onarımların yapılması sonucu oluşan hasarlar.
- Yapıda zamanın etkilerinden kaynaklanan ve kötü kullanıma bağlı olarak meydana gelen hasarlar.
- Deprem, heyelan, sel ve yangın gibi doğal afetler sonucu yapıda oluşan hasarlar.

- Savaşlar, iklimsel şartlar, hava ve trafik kirliliği gibi etkenler nedeniyle yapılarda meydana gelen hasarlar.

Kubbede oluşan hasarlar incelendiğinde en çok karşılaşılan hasarlar ve nedenleri aşağıda belirtilmiştir.

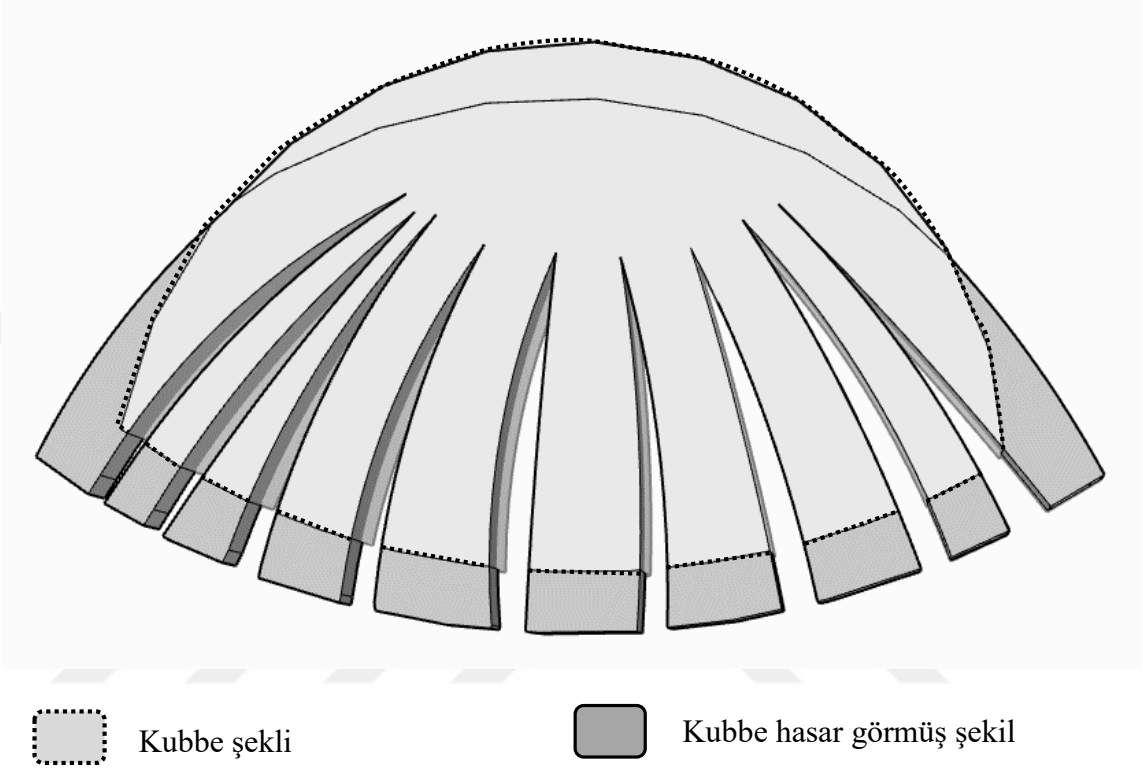
Kubbeyi iklim şartlarından korumak için yapılan kurşunların zaman içerisinde deforme olması ve altında bulunan çamur sıvanın dağılması ile kubbelerde hasarlar oluşmaktadır. Bu hasarlara neden olan bir diğer etken ise kiremitlerin zaman içerisinde eskimesi ve kırılmasından kaynaklanmaktadır. Kubbeye gelen yanal kuvvetler veya zeminden kaynaklanan sorunlar nedeniyle kubbede çatlaklar, yarıklar ve derz boşlukları oluşur. Kubbede kullanılan geleneksel malzeme yerine çimento esaslı malzemelerin kullanılması bir diğer hasar nedenidir. Bunlara örnek olarak kubbe kasnağının betonarme olarak inşa edilmesi ve kubbe sıvası olarak horasan harcı yerine çimento esaslı sıva yapılması verilebilir. Kubbeden sızan sulardan veya nemden kaynaklanan nedenlerden ötürü horasan sıvasının kabarması veya dökülmesidir.

Kasnakta meydana gelen hasarlar incelendiğinde en çok karşılaşılan hasarlar ve nedenleri aşağıda belirtilmiştir.

Kasnağın taşıyıcı elemanlarında, zeminden kaynaklı sorunlar ve yatay etkiler sonucu oluşan hasarlar nedeniyle kasnak duvarlarında yapısal çatlakların, yarıkların ve derz boşalmaları gibi hasarlar oluşmaktadır. Aynı zamanda bu etkenler nedeniyle kasnak duvarında bir kısım yıkılmalar hatta çökmeler meydana gelmektedir. Hasar türlerinden biride geleneksel onarıma uygun olmayan çimento esaslı malzemeler kullanılarak kasnağın örülmesi ve sıvasının yapılmasından kaynaklanmaktadır. Kubbede çevresel etkenler nedeniyle oluşan nem ve rutubet sebebiyle kasnağın iç yüzeyindeki horasan sıvanın eskimesi, kabarması ve dökülmesi bir diğer hasarlardır.

Tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmesinde yapının aslına uygun olmasına ve müdahalenin en az düzeyle tutulması en önemli hususlar arasındadır. Bilinçsizce yapılan onarım ve güçlendirme uygulamaları tarihi yapılara zarar vermektedir.

Şekil 1.28'de kubbelerde yaygın olarak görülen hasar şekli gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 1.29'da kubbelerdeki diyagonal çatlaklar, Şekil 1.30'da kubbelerdeki eksenel çatlaklar ve Şekil 1.31'de ise kubbelerdeki kısmi göçmeler gösterilmiştir.



Şekil 1.28. Kubbelerde tipik hasar şekli.



Şekil 1.29. Cami kubbesinde meydana gelen diyagonal çatlaklar (BASF, 2018).



Şekil 1.30. Urla Helvacılar Camindeki eksenel kubbe hasarı (Güzel, 2019).



Şekil 1.31. Küçük kubbelerde meydana gelen kısmi çökmeler (BASF, 2018).

Kubbelerde onarım ve güçlendirme yöntemleri olarak horasan harcı, tamir harcı, dikiş, FRP, çekme çemberi uygulamaları yapılmaktadır.

1.5.1 Horasan harcı

Kubbedeki küçük çatlakların onarım ve güçlendirilmesi için horasan harcı uygulaması yapılmaktadır. Bu uygulama 2 mm genişliğinde ve çok derine inmeyen çatlakların onarımı için uygulanmaktadır.

Horasan harcı uygulamasına örnek olarak Fatih Caminde yapılan onarım ve güçlendirme uygulamaları verilmiştir. Fatih Caminde yapılan bu uygulamada, kubbedeki küçük çatlakların hava jeti ile temizlenmesinin ardından kubbe yapısına uygun harç hazırlanarak enjeksiyon yöntemiyle çatlaklar doldurulmuştur (Şekil 1.32).



Şekil 1.32. Kubbe çatlaklarının enjeksiyon yöntemiyle doldurulması (Ceylan ve Ocakcan, 2013).

İstanbul Fatih Caminin kubbe dışında oluşan geniş çatlaklar ilk olarak hava jeti ile temizlenmiş olup çatlak çevresindeki 15'er cm genişliğindeki bölge çürütülmüştür. Bu çürütülen bölge kendine özgün tuğla ve harç malzemesi ile yeniden örülmüştür (Şekil 1.33).



Şekil 1.33. Kubbenin dıştan harç ile onarılması (Çılı ve Yıldız, 2013).

Fatih Camii İstanbul'da meydana gelen birçok depremden görmüştür. Cami kubbesi içinde bulunan çatlaklar hava jeti ile temizlenip çatlak çevresindeki 15'er cm genişliğinde bölge çürütülerek buraya kubbenin kendine özgü uygun tuğla ve harç malzemesi ile yeniden örülmüştür (Şekil 1.34).



Şekil 1.34. Kubbede geniş çatlakların restorasyon uygulaması (Ceylan ve Ocakcan, 2013).

1.5.2 Tamir harcı

Tamir harcı kubbedeki küçük çatlakların onarım ve güçlendirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Bu onarım 2 mm genişliğinde olan ve çok derine inmeyen çatlaklar için uygulanmaktadır (Mahrebel, 2006).

Sultan I. Mahmut kütüphanesinde onarım ve güçlendirilmesinde tamir harcı uygulaması kullanılmıştır. I. Mahmut kütüphanesinin kubbesindeki çatlakların onarımı için 5 atm basınç altında hidrolik bazlı sıva harç kubbeye enjekte edilmiştir (Şekil 1.35). Özellikle kubbede oluşan deformasyonları ortadan kaldırmak amacıyla enjeksiyon işleminden sonra tamir harcı (hidrolik kireç bazlı harç) ile en çok 3 cm kalınlığında olacak şekilde şap atılmıştır.



Şekil 1.35. Kubbe çatlaklarının enjeksiyon yöntemiyle doldurulması (Küçük, 2010).

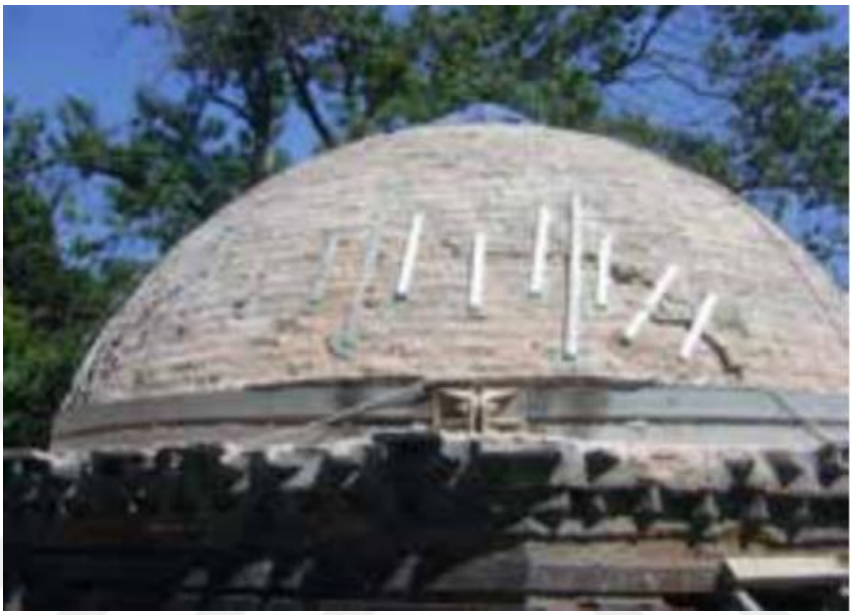
1.5.3 Dikiş (Kenet)

Kubbelerde oluşan çatlaklar orta genişlikte yani 10 mm'den büyük çatlaklar için ya da kubbenin taşları düşmüşse dikiş (kenet) yöntemi ile onarım ve güçlendirme yapılabilmektedir (Şekil 1.36). Sultan I. Mahmut kütüphanesinin kubbesinde ve Filibe Cuma cami kubbesinde onarım ve güçlendirme yöntemi olarak dikiş uygulaması yapılmıştır.



Şekil 1.36. Kubbe hasarı ve dikiş yöntemi uygulaması (Çılı ve Yıldız, 2013).

Sultan I. Mahmut kütüphanesinin kubbesinde oluşan orta genişlikteki çatlakların onarımı için paslanmaz çelik kenetler yardımıyla dikiş yapılmıştır (Şekil 1.37). Kubbe özgün harç malzemesi hazırlanarak düşük basınç attında enjeksiyon yöntemi ile doldurulmuştur.



Şekil 1.37. Sultan I. Mahmut Kütüphanesi merkezi kubbede dikiş uygulaması (Ocakcan, 2013).

Bulgaristan'daki Filibe Cuma Camisi 1928 yılında yaşanan depremler ve sonrasında yapılan arkeolojik kazılar sonucu kubbesinde hasarlar meydana gelmiştir. Caminin tuğla kubbesindeki çatlaklar dikiş yöntemi kullanılarak onarılmıştır (Şekil 1.38).

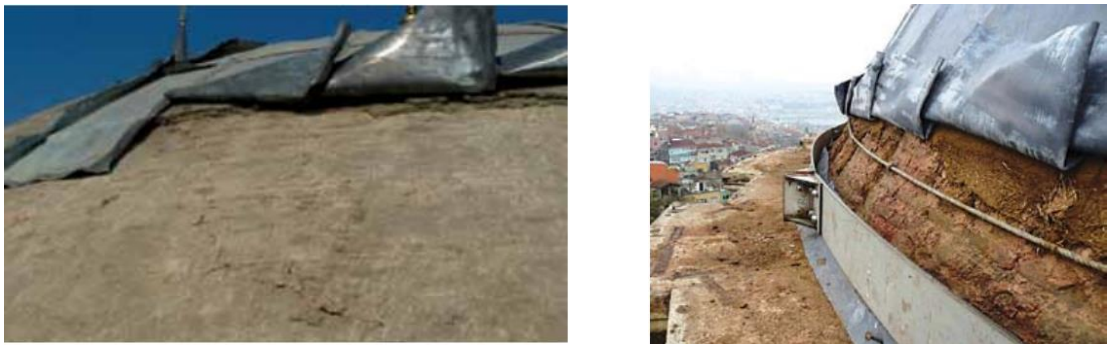


Şekil 1.38. Filibe Cuma Camisi kubbe çatlakların dikiş yöntemiyle onarılması (Küçük, 2010).

1.5.4 Çekme çemberi

Kubbe ve kasnaklarda 10 mm'den büyük genişlikteki çatlakların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden biridir. Çekme çemberi uygulamasında kullanılacak çelik paslanmaz çelik olması korozyona uğramaması açısından önemlidir.

İstanbul Mihrimah Sultan Camii kubbesinde meydana gelen çatlakların onarımında çekme çemberi yöntemi uygulanmıştır. Mihrimah Sultan Cami kubbedeki çatlalar ana kubbenin etek kısmından başlayıp tepe noktasına doğru ilerleyen radyal çatlaklar onarılıp bu çatlakları önlemek için kubbe eteğine çekme çemberi uygulaması yapılmıştır (Şekil 1.39).



Şekil 1.39. Kubbe hasarı ve çekme çemberi uygulaması (Sesigür ve Çılı, 2014).

Sultan I. Mahmut kütüphane kubbedeki çatlaklar genişletildikten sonra yeniden örülerek onarım yapılmıştır. Kubbede yeniden çatlak oluşmaması adına kubbede etek hizasında çekme çemberi uygulaması ile güçlendirme yapılmıştır (Şekil 1.40).



Şekil 1.40. I. Mahmut kütüphane kubbesindeki çatlakların çekme çemberi uygulaması (Çılı ve Yıldız, 2013).

1.5.5 FRP (Lif Takviyeli Polimer)

Yığma kubbelerde orta genişlikteki çatlakların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan FRP uygulaması oldukça etkin ve kullanımı yaygın olan yöntemlerden biri Lif Takviyeli Polimerdir (Şekil 1.41). Üsküp Mustafa Paşa Camii ve Küçük Ayasofya Camii kubbelerinde onarım ve güçlendirme yöntemi olarak dikiş uygulaması yapılmıştır.



Şekil 1.41. Lif Takviyeli Polimer (FRP) kullanılarak kubbelerin güçlendirilmesi (BASF, 2018).

1963 yılında gerçekleşen Üsküp depreminde Üsküp Mustafa Paşa caminin merkez kubbesi ve son cemaat kubbeleri hasar görmüştür. Üsküp Mustafa Paşa Cami kubbesinin sıvası horasan harcı ile yenilendikten sonra ile 2,9 m genişliğinde 7 sıra FRP bantlar ile sarılarak güçlendirilmesi yapılmıştır (Şekil 1.42).



Şekil 1.42. Üsküp Mustafa Paşa Cami kubbesinin FRP ile onarılıp güçlendirilmesi (Karakuş, 2019).

İstanbul'daki Küçük Ayasofya caminde zeminin farklı oturmasından kaynaklanan kubbe kasnağında hasarlar meydana gelmiştir (Şekil 1.43). Kubbe kasnağının güçlendirilmesi amacıyla lifli polimer malzeme kullanılmıştır (Şekil 1.44).



Şekil 1.43. Küçük Ayasofya Caminde oluşan kubbe kasnağındaki hasarlar (Aköz, 2008).



Şekil 1.44. Küçük Ayasofya Cami Kubbe kasnağında FRP uygulaması (Aköz, 2008).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tarihi kubbelerle ilgili literatürde yapılan araştırmada çok az sayıda yayına ulaşılabilmiştir. Bu durum yapılan bu tez çalışmasının önemini daha da artırmaktadır. Elde edilen literatürde genellikle kubbelerin sayısal analizleri gerçekleştirilmiş, deneysel herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tezin bu bölümünde; yapılan deneysel çalışmaya öncülük etmesi bakımından taş yığma yapılarda uygulanan güçlendirme çalışmaları da dâhil edilmiştir. Bu sebepten dolayı aşağıda iki alt başlık halinde kaynak özetleri sunulmaktadır.

2.1 Literatür Yapılan Kubbe ile İlgili Çalışmaları

Pesciullesi vd., (1997) kendi ağırlıkları altında üniform yüklü küresel yığma kubbeleri basınç durumları için incelemiştirler. Yığma yapı malzemesinin çekme gerilmesine maruz kalmadığı ve kubbenin her noktasının küresel olduğu kabul edilmiştir. İlave yüklemelerden kaynaklı çevresel çekme gerilmesi oluşmuştur ve kabul edilebilir açıklığın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada tek gözlü küresel kubbelerin çözümleri yapılmıştır.

Çamlıbel (1998) çalışmasında Mimar Sinan cami yapılarından bir kısmını mühendislik özellikleri açısından incelemiş, elemanlara yük aktarımı ve iç gerilme değerlerini tespit etmek için denge denklemleri yardımı ile bir takım bağıntılar elde etmiştir. Bu sabit denklemler yardımı ile bu yapılar analize tabi tutulmuş ve her bir yapı için bir güvenlik sayısı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sayıya göre de yapının dayanımı hakkında yorum yapılmıştır.

Akan ve Özen (2005) çalışmada Bursa Yeşil Türbesini 3 boyutlu olarak SAP 2000 programında modellemişlerdir. Yapının modları incelenip, salınım periyodları hesaplanarak elde edilen veriler tepki spektrumu aracılığıyla yapıya deprem yükü uygulamak amacıyla kullanılmıştır. Modelleme lineer elastik malzeme özelliğine göre yapılmıştır. Zorlanan kısımlar analizler neticesinde tespit edilmiştir.

Bayraktar (2005) bu çalışmada tarihi yığma yapıların depreme karşı güçlendirilmesi konusunda çalışılarak bazı önerilerde bulunmuştur. Güçlendirme çalışmalarında ilk olarak

yapının çok detaylı bir şekilde incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Daha sonra deprem anında yapıda oluşan çekme gerilmeleri ve bu çekme gerilmelerinin oluştuğu bölgeler bilgisayarda yapılan analizler yardımıyla belirlenmelidir. Yapıda meydana gelen çekme kuvvetleri yapının bünyesine entegre edilecek çekme elemanları kullanılmalıdır. Kubbelerde onarım ve güçlendirme ilk olarak çemberin tamir ve takviyesi ile başlanmalıdır. Eğer kubbede bulunan çemberde hasar fazla ise kubbe mutlaka askıya alınmalıdır. Çemberin çürümüş elemanlarının onarıldıktan sonra çemberin dışından açılan derzin içine karbon elyafı ön germe teli, kısmen öngörme verilerek yerleştirilip kilitlenmelidir. Sonrasında ise derz dışarıdan orijinal derz dolgu harcı ile doldurularak onarılmalıdır.

Chiorino Mario vd., (2006) çalışmasında alanı 37.23 x 24.89 m boyutlarında en büyük eliptik kubbeyi seçmiştir. Vicoforte eliptik kubbesinin yapısal davranışı iki farklı yaklaşıma göre modellenmiştir: limit analiz ve sonlu elemanlar yöntemiyle analiz. Modelleme için ANSYS programı kullanılmıştır. Kubbe yapımından sonra kubbede ve temelde oluşan hasarları belirlemiştir.

Fahjan ve Keypour (2006) bu çalışmada tarihi Osmanlı yapılarının kubbe sistemleri incelenmiştir. Deprem davranışına kubbe sistemlerinin ve yatay destek elemanlarının etkisini Süleymaniye Camisi ve Fatih Camisi üzerinde incelemişlerdir. Bu çalışmada yapılar üzerinde doğru yük aktarım mekanizması ve güçlü diyafram etkileri olduğu belirlenmiştir.

Lau (2006) bu tez çalışmasında yığma kubbelerin yapısal davranışını analiz etmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem grafik tabanlı olup, mevcut yöntemlerle karşılaştığında çeşitli avantajlar sunmaktadır. Mevcut yöntemlerle analiz edilmesi zor veya imkânsız olan geleneksel olmayan asimetrik kubbe geometrilerini de analiz etmiştir. Bu yöntem iki küçük ölçekli yığma kubbenin nihai yük taşıma kapasitesini tahmin etmiştir. Bunun yanında, küçük boyuttaki kubbeleri gerçek kubbeler ile karşılaştırıldığında ise aynı sonuca ulaşılamamıştır. Sonuç olarak kubbenin küçük ölçekte olmasının kubbenin yapısal davranışını etkilemiş olabileceği düşünülmektedir.

Russo (2006) yaptığı çalışmada Nepal ’deki bir kiliseyi incelemiştir. Tarihi kubbelerin yapısal değerlendirilmesi ve statik yönden geçmişi üzerine bir çalışma yapmıştır. Modellemede sonlu elemanlar yöntemini kullanan DIANA programında analizler yapılmıştır. Kiliseye daha önce yapılan müdahaleler belirlenmiştir.

Atamtürktür ve Boothby (2007) yaptıkları çalışmaları iki farklı yığma tuğla kubbe üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalardan yüksek kalite verileri elde edilmiş ve on mod şekli belirlemiştirler. Kubbenin malzeme özelliklerini belirlemek için tahribatlı ve tahribatsız teknikler kullanılmıştırlar. Çalışmasında iyileştirme parametreleri sınır koşullarıyla sınırlandırmıştırlar. İyileştirme tamamlandığında sonlu eleman model tahminleriyle deneysel olarak belirlenen ilk altı doğal frekans ve mod şekilleri karşılaştırmışlar.

Beyen (2007) 1999 Kocaeli depremi sonrasında hasar gören Fatih caminin yapısal güvenliğini incelemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Hasarlı tarihi yapı üç boyutlu olarak modellenmiştir. Modal analiz ile birlikte mevcut deprem kayıtları dikkate alınarak zaman tanım alanında yapı analizleri gerçekleştirmiştir. Daha sonra meydana gelebilecek depremlerde sadece taşıyıcı kemerlerden birinin tepe noktasında hasar oluşabileceği yönünde bir sonuca ulaşılamamıştır.

Aköz (2008) tez çalışmasında tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi konusunu incelemiştir. Bu kapsamda İstanbul’da bulunan tarihi Murat Paşa Camisinin üç boyutlu sonlu eleman modeli SAP 2000 programında analiz etmiştir. Bu caminin statik ve dinamik analizleri yapılıp deprem güvenliği belirlenerek cami ile ilgili onarım ve güçlendirme yöntemleri önerilmiştir.

Gedik (2008) tez çalışmasında İstanbul’da bulunan tarihi Mehmet Ağa Caminin yapısındaki mevcut hasarları belirlemiştir. Yapının kendi ağırlığı ile deprem yükleri altında analizlerini SAP 2000 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Camideki mevcut hasarların nedenlerini belirlemek için çekme gerilmesi bölgeleri araştırılmış ve mevcut hasarlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda gelecekteki hasarların önlenmesi için bazı onarım ve güçlendirme önerilerinde bulunmuştur.

Kırlangıç (2008) çalışmada, Aya Sofya'nın yapısal davranışının incelenmesi ve muhtemel güçlendirme stratejilerini belirlemiştir. Yapının sonlu elemanlar modeli kullanılarak statik ve özdeğer analizleri gerçekleştirmiştir. Güçlendirme için iki strateji geliştirmiştir. Ard-gerilmiş tendon kullanmanın FRP ile güçlendirmekten daha etkili olduğu analizler sonucu ortaya çıkmıştır.

Anagnostopoulou vd., (2010) yaptıkları çalışmada Darfield depreminden hasar gören kiliselerin yapısal davranışlarını ve hasar tiplerini araştırmışlardır. Kiliselerin mimari görünüşleri incelendiğinde, yapısal sistemden, zeminin altından, düzlem dışı kalkan duvardan, çan kulelerindeki göçmelerden, zeminde oturma ve sıvılaşmadan kaynaklanan çeşitli hasarlar belirlemişlerdir. Birçok kilise için onarım ve güçlendirme yöntemleri önermişlerdir.

Cebi (2010) çalışmasında Pertevniyal Valide Sultan Caminin restorasyon çalışmaları incelenmiştir. Valide Sultan camisinde görülen bütün çatlaklar, çatlak ölçüm aletleri kullanılarak tespit edilmiştir. Tonozlardaki kılcal çatlaklar dışarıdan 2-3 cm genişliğindedir. Bu tip çatlaklarda paslanmaz çelik kenetler vasıtasıyla dikilerek, kapatılması sağlanmıştır. Çatlaklar, tonozlardaki özgün harç olan horasan harcının karışımlarına uygun malzeme kullanılarak enjeksiyon yöntemiyle doldurulmuştur. Kubbedeki, kötü durumda olan kubbe kurşunu ve kasnak eteğindeki kurşunlar değiştirilmiştir.

Küçük (2010) yaptığı çalışmada Bulgaristan'daki Filibe Cuma caminin deprem sonrasında meydana gelen yapısal hasarları belirleyerek bunlar ile ilgili yapılan onarım ve güçlendirmeleri incelemiştir. Filibe Cuma Camisinde iki yıl boyunca yapılan bütün onarım ve güçlendirme çalışmalarından bahsedilmiştir. Cami kubbesinde meydana gelen çatlakların onarımı için enjeksiyon yöntemi ve dikiş uygulaması yapılmıştır.

Krstevska vd., (2010) yapılan çalışmada Üsküp'te bulunan Mustafa Paşa caminin 1/6 ölçeğinde küçültülerek yapılan modelin sismik değerlendirilmesi yapılmıştır. Mustafa paşa camii modeli üzerinde güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş durumları için analizler gerçekleştirilmiştir. Model cami üzerinde yapılan deneysel sonuçlar neticesinde model hasarları ve sismik davranışları analiz edilmiştir.

Sav ve Kuşüzümü (2010) çalışmada Kocaeli depreminde büyük hasar gören Mihrimah Sultan Camii ‘ndeki onarım ve güçlendirme çalışmaları yapılmıştırlar. Camii mihrap kemeri üzerindeki çatlaklar oluşmuş, ana kemer kilit taşı yerinden düşmüş ve yan kemer taşları birbirinden ayrılmıştır. Ayrıca ana kubbede derin çatlaklar meydana gelmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kemerin üzengi noktasına en yakın kotta gergi düzenlemesi uygulanmıştır. Ana kubbede oluşan çatlaklarla ilgili olarak ana kubbe eteğine de çemberle sağlamlaştırma sistemi uygulanmıştır.

Akdeniz (2011) tez çalışması kapsamında tarihi yapılardaki taşıyıcı sistem elemanları, hasarlar, onarım ve güçlendirme yöntemleri açıklamıştır. Ayrıca Malatya’da 1224 yılında yapılan Malatya Ulu caminin ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek lineer ve lineer olmayan analizleri 2003 Bingöl depremi kayıtları kullanılarak yapmıştır. Analiz sonucunda Camideki hasarlar belirlenerek bunlar ile ilgili bazı çıkarımlarda bulunmuştur.

Doğangün vd., (2011) çalışmalarında Erzurum’da bulunan 18. yy. yapılan Bardız Cami’nin hasarları belirlenerek onarım ve güçlendirme yöntemleri önermişlerdir. Bardız camisinin kemer, kubbe ve minaresindeki çatlakları belirlemişlerdir. Caminin deprem analizini SAP 2000 programında sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre Bardız Camisi için güçlendirme önerilerinde bulunmuşlardır.

Ekinci (2011) yaptığı tez çalışmasında Konya Mevlana müzesinde oluşan hasarlar ve nedenleri araştırarak alınacak gerekli önlemleri anlatmıştır. Müzenin taşıyıcı sistemi ve zemin yapısındaki sorunları belirleyerek Mevlana Müzesi SAP 2000 programı yardımıyla analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre onarım ve güçlendirme önerilerinde bulunmuştur.

Çılı (2011) bu kapsamda, Süleymaniye Cami taşıyıcı sisteminin onarımı ve güçlendirme çalışmaları incelenmiştir. İlk olarak kubbede görülen çatlakların yerleri belirlenerek bu çatlakların genişlik ve derinlikleri ölçülmüştür. Bu çatlakların oluşma nedenleri kubbenin değişik şekiller ve mesnet durumlarına göre modellenip değişik yük durumları altında incelenerek anlamaya çalışılmıştır. Mevcut gerilmeden kaynaklı çatlakların genişliklerine

göre enjeksiyon ya da paslanmaz çelik elemanlarla dikildikten sonra enjeksiyon yöntemi ile onarılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ersen vd., (2011) bu kapsamda Süleymaniye Cami'nin 2007-2010 yılları arasındaki restorasyon çalışmaları incelenmiştir. Kubbenin üstünde bulunan hasarlı kurşun yapısı yenilenmiştir. Kubbe üstünde bulunan detay hatalarını ve delik kurşunlar değiştirilmiştir. Kurşun değişimi yapılan alanlarda horasan sıva ve çamur sıva uygulaması yapılarak yenilenmiştir. Minarede görülen bozulmalar için minarenin çekirdek çapına göre imal edilen paslanmaz çelik kelepçeler, ankraj tekniği ile minare çekirdeklerine uygulanmıştır.

Şeker (2011) çalışmasında 28 adet Mimar Sinan camisinin geometrisine ilişkin parametre değerlerini belirlemiştir ve bu parametrelerin caminin statik ve dinamik davranışına etkilerini araştırmıştır. Yapılan analizlere göre camilerin çeşitli parametre değerleri belirlenmiş ve davranış üzerindeki etkinlikleri incelenmiştir. Sinan camilerinin dış yükler etkisinde yeterli sağlamlıkta olduğu, kubbelerin deprem esnasında önemli oranda etkin olabileceği görülmüştür.

Atamtürktür vd., (2012a) bu çalışmada iki farklı Guastavino tarzı yığma kubbenin doğrusal olmayan deprem performansı üzerinde gerçekleştirilen analitik ve deneysel çalışmaları sunulmuştur. Yığma kubbelerin sismik performansları doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri ile temsil edilmiştir. Sonlu eleman modellerinin geliştirilmesi aşamasında varsayımları ve kararları desteklemek için kubbelerin titreşim tepkilerini, yapılar üzerinde gerçekleştirilen ölçümlerle belirlenmiştir. Ölçülen mod şekilleriyle görsel açıdan doğal frekanslarla, yakın uyum olacak şekilde sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Son olarak 1940 El Centro deprem ivme kayıtlarını kullanarak sismik yükleme altında iki farklı kubbenin performansını belirlenmiştir.

Atamtürktür vd., (2012b) çalışmasında bir (tile) kiremit kubbesi için doğal frekanslardaki deneysel olarak tespit edilen sapmalardan yararlanarak, yük taşıma kapasitesindeki azalmayı tahmin etmek için yarı deneysel bir ilişki kurulmuştur. Kubbeyi analiz etmek için geliştirilen sonlu eleman modeli, hem tahribatsız titreşim ölçümlerine hem de arızaya kadar tahribatlı yük deplasman ölçümlerine karşı kalibre edilmiştir. Model daha sonra çatlakların artan gelişimini simüle etmede uygulanmıştır. Kubbenin kalan yük taşıma

kapasitesini ve ilk doğal frekansını ampirik ilişkiyi belirlemek üzere incelemiştir ve değişken açıklık ve yükseklik oranı ile küresel kubbeler için genelleştirmelerde bulunmuştur.

Uçak, Ş. (2012) yaptığı çalışmada tarihi yığma kubbelerin dinamik karakteristiklerinin Operasyonal Modal Analiz ve Sonlu Elemanlar yöntemiyle belirlemeye çalışmıştır. Teorik ve deneysel analiz sonuçları karşılaştırmıştır ve Sonlu Elemanlar modelleri deneysel bulgular kullanılarak iyileştirilmiştir. OMA yönteminin, tarihi yığma kubbelerin deneysel dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde ve sonlu eleman modellerinin iyileştirilmesinde güvenle kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Zessin (2012) bu tez çalışmasında yatay yer ivmesi ve büyük mesnet yer değiştirmelerine sahip donatısız yığma yapıların göçmesi incelenmiştir. İki farklı yapısal şekil seçilmiş ve her birinin göçme koşullarını belirlenmiştir. Analiz yapılan birinci yapısal form kubbe, ikincisi ise eğimli duvardır. Az sayıda Küçük kubbe modelinde kritik açıklık artışı olmuştur. Buna ek olarak, yarı küresel bir kubbenin çökmesine sebep olan sabit yatay ivmelenmenin kritik değeri de incelenmiştir, iki kubbenin bir düzlemde eğilmesini modellemiştir. Her iki durumda da kubbede mekanizma oluşarak, kubbe kararsız hale gelerek göçmüştür. Basit analitik modeller, geometri ve denge arasındaki ilişkiyi vurgulamış, başarısızlık sınırlarını belirlemiş ve mekanizmaları doğru bir şekilde tahmin edebilmiştir.

Çılı ve Yıldız (2013) 1766 depreminde Fatih Cami'nin ana kubbesi tamamen çökmüş, duvarları da büyük oranda yıkılmıştır. 1999 Kocaeli depreminden I. Mahmut Kütüphanesinin yapı bütününde çatlaklar meydana gelmiştir. Fatih Caminde çatlaklar paslanmaz çelik çubuk kenetlerle dikildikten sonra aradaki boşluklara enjeksiyon yöntemi uygulanmıştır. I. Mahmut kütüphanesinde çatlaklar kenetler yardımıyla ya da çatlaklar genişletildikten sonra yeniden örülerek onarılmıştır. Kubbe etek kotunda paslanmaz çelik malzeme kullanılarak çember kuşaklama düzenlemesi yapılmıştır.

Eriş vd., (2013) bu çalışmada Atik Valide Sultan Külliyesi 2011-2013 yılları arasında uygulanan restorasyon çalışmaları incelenmiştir. Çatıda ve kubbede görülen bitkilenme için bitkilere kimyasal ilaç enjekte ederek bunlar kurutulmuştur. Kubbede kurşun altı

çamur sıva yapıldıktan sonra kurşun uygulanmıştır. Böylece kubbe yapısının içine yağış girmesini engelleyerek rutubetlenme ve yosunlaşmanın önüne geçilmiştir. Kubbe ve duvarlarda görülen 3-4 cm. 'den büyük olan çatlaklarda, bir sıra tuğla sökülerek özgün malzeme ile dikiş yapılmıştır ve sonrasında enjeksiyon işlemi yapılarak onarım tamamlanmıştır. Yapıda hasar görmüş kemerler özgün malzeme kullanılarak onarılmış, eksik kemerler ise şekli korunarak tamamlanmıştır.

Li ve Atamtürktür (2013) çalışmasında yığma kubbeler üzerinde üç modelleme tekniği olan (ayrıntılı mikro modelleme, basitleştirilmiş mikro modelleme ve makro modelleme) kubbe modelinin sağlamlığı ve doğruluğu göz önünde bulundurularak incelenmiştir. İki mikro model ve makro model tekniklerinin doğruluğu, aynı ölçekli yığma kubbesi üzerinde gerçekleştirilen statik, yükleme boşaltma testleri ile karşılaştırılarak değerlendirmiştir. Son olarak, üç modelin dayanıklılığı girdi parametrelerindeki belirsizlik ile birlikte değerlendirmiştir.

Mustafaraj ve Yardım (2013a) yaptığı çalışmada Arnavutlukta bulunan ve Osmalı camilerinden biri olan Naziresha Caminin yapısal durumunu incelemiştir. Naziresha Camisinde bulunan yapısal kusurları analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Sonuç olarak, camideki yapısal problemlerin çözümü için güçlendirme teknikleri önermiştir.

Mustafaraj ve Yardım (2013b) bu çalışmada, Korça kentindeki tek Osmanlı anıtı olan Mirahor İlyas Bey Camiinin yapısal şartlarını ve mimari özelliklerini inceleyerek güçlendirme önerileri sunmuştur. İlyas Bey Cami bölgede meydana gelen birçok depremden zarar görmüştür. Yapının restorasyonu için aslına uygun tamir yöntemleri uygulanmıştır. Kubbe yapısal koşulları statik yük taşımak için yeterli değildir. Kubbenin yapısında bulunan çatlakların büyümesini önlemek için çekme çemberi uygulaması önerilmiştir. Caminin yük taşıyan duvarlarında ciddi çatlaklar bulunmaktadır. Duvarlardaki 10 mm daha küçük çatlaklar için kireç esaslı tamir harçları enjekte edilmesi, 10 mm den daha büyük çatlaklar için ise FRP çubukların kullanılmasını önermiştir.

Ocakcan (2013) yaptığı çalışmada I. Mahmut Kütüphanesi için yapılan restorasyon çalışmalarını kapsamaktadır. I. Mahmut kütüphanesinin kubbesinde, beden duvarlarında

ve bodrum kat tonozlu tavanda çatlaklar ve ayrılmalar meydana gelmiştir. Ana mekân tonozların belirli yerlerinde çökmeler gözlenmiştir. Kubbelerdeki kılcal çatlaklar için kubbenin kendi yapısına özgün harcı ile 1-2 bar basınçla enjeksiyon yapılırken, daha geniş çatlaklarda paslanmaz çelik kenetlerle şaşırtmalı dikiş yapılmıştır. Beden duvarlarında bulunan geniş çatlaklar için güçlendirme çalışmaları tamamlandıktan sonra çürütme ve kendi malzemesi ile dikiş yöntemiyle onarılmıştır. Tonozu ve merkez kubbeyi taşıyan kemerlerde kendi malzemesi ile onarım gerçekleştirilmiştir. Çatı kotunda tonozların etrafında bulunan ve birbirine bindirme yöntemi ve büyük ebatlı çiviler ile bağlanan 20 x 20 cm boyutlarında ahşaplar ile ahşap hatıl sistemi yapılmıştır. Bunun yanında merkez kubbe için kubbe eteğinde paslanmaz çelik lamalarla çemberleme sistemi uygulanmıştır.

Brencich vd., (2014) bu çalışma kapsamında, 16. yüzyılda Cenova'daki Carignano S. Maria Kilisesinin kubbesinin değerlendirmiştir. Kilisenin kubbesinde var olan çatlakları ve daha önceden yapılan güçlendirme yöntemlerini incelemiştir. Kilisenin modellenmesinde doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Kilisenin kubbesinde yer alan meridyen çatlaklarının kubbenin kendi ağırlığından kaynaklandığını tespit etmiştir. Kubbenin içinde yer alan çelik kasnağın etkisi ile kubbe malzemesinin daha rijit davranış gösterdiği sonucuna varmıştır.

Danieli vd., (2014) bu çalışmada tarihi yığma taş kubbelerin sismik dayanımını arttırmak için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, kubbenin üstüne yerleştirilmiş bir destek halkası ile ince bir betonarme kabuğun dökülmesinden oluşur. Beton bağlantı elemanları, gövdeden kubbe gövdesine doğru belirli bir derinliğe kadar uzanır. Taş kubbe yapısı statik, termal ve sismik yüklere maruz kaldığı düşünülerek, bunlarla ilgili gerilme ve yer değiştirmeler dikkate alınmıştır. Kubbenin yapısal analizi sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak bu yöntemin taş kubbelerin depreme dayanıklılığını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür.

Rossi vd., (2014) yapılan bu çalışmada, kiremit kubbesi için doğal frekanslardaki, deneysel olarak tespit edilen sapmalardan yararlanarak, kubbenin yük taşıma kapasitesindeki azalmayı tahmin etmek için yarı amprik bir ilişki kurmuştur. Kubbeyi analiz etmek için geliştirilen sonlu elemanlar modeli, tahribatsız titreşim ölçümleri ve tahribatlı yük-deplasman ölçümleri yardımıyla modellenmiştir. Model daha sonra

çatlakların artan gelişimini simüle etmek için kullanılmıştır. Kubbenin ilk doğal frekansı ve geri kalan yük taşıma kapasitesi, farklı açıklık-yükseklik oranlarına sahip küresel kubbeler için nihai olarak genelleştirilen ampirik ilişkiyi tanımlamıştır.

Sesigür ve Çılı (2014) 1999 Marmara depreminde hasar gören Mihrimah Sultan Camisinde ana kubbeyi taşıyan kemerinde hasar oluşmuş, cephe duvarlarında ve ana kubbede çatlaklar meydana gelmiştir. Onarım ve güçlendirme çalışmalarında ana kemerdeki hasar için ek bir gergi önerilmiştir. Kubbe eteğindeki hasarlar için çelik kullanılarak 10 mm x 300 mm en kesit ölçülerinde bir çekme çemberi uygulanmıştır.

Cavalagli ve Gusella (2015) bu çalışmada, Santa Maria degli Angeli Kilise kubbesinin statik ve dinamik davranışı araştırılmıştır. Davul kubbe sisteminin analizini yapmıştır. Statik değerlendirmede limit analiz ve doğrusal olmayan davranışı kullanarak modelleme yapan sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda davul kubbe üzerindeki çatlaklar için takviye çelik halkalarının uygun olduğu sonucuna varmıştır. Sismik davranışın değerlendirmesini tepki spektrum analizi ile gerçekleştirmiştir.

Chmielewski ve Kruszka (2015) yapılan çalışmada, St. Anna tarihi kilisesinin çatlamış tuğlalı kubbesinin statik hesabını yapmıştır. Yığma Kubbenin 3 boyutlu yapısal modeli ile iç kuvvet dağılımının ayrıntılı bir şekilde belirlemiş ve bu yük taşıyıcı yapı için uygun bir onarım ve güçlendirme önerileri sunmuştur. Kubbeyi güçlendirmek için statik dayanımı hesaplamış ve güçlendirme için karbon bant ve sarmal çelik çubuklar kullanılmıştır.

Hökelekli (2015) yaptığı tez çalışmasında Manisa Hafsa Sultan Camii ve minaresinin deprem davranışı deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Sultan camisi ve minaresinin sonlu elemanlar yardımıyla ABAQUS programında modellenip deneysel ve dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Bu sonlu eleman modelleri, malzeme özelliklerindeki değişimler dikkate alınarak deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir. Hafsa Sultan Camiinin başlangıçtaki ve iyileştirilmiş sonlu eleman modellerine deprem ivme kaydı uygulanarak her iki durum için lineer deprem davranışı incelenmiştir.

Köseoğlu ve Canbay (2015) Bu çalışmada, 16. yüzyıla ait klasik Osmanlı mimarisinin parçası olan hasar görmüş tek kubbeli bir cami incelenmiştir. Caminin kubbe, duvar ve

çeşitli yerlerindeki yapısal elemanlarında ciddi hasarlar kaydedilmiştir. Çalışmanın amacı, yapısal hasarın nedenlerini araştırılması ve iyileştirme için uygun bir rehabilitasyon yöntemi önerilmesidir. Duvar hasarlarının yapının tarihi dokusuyla uyumlu olacak malzemeler kullanılarak onarılması, hasarlı kubbede çatlakların daha fazla yayılmasını önlemek için hasarlı kubbe tabanının çevresine uygun şekilde bir çelik halkanın yerleştirmesini önermiştir.

Ottoni (2015) bu çalışmada, İtalyada Santa Maria del Quartiere kubbesini deneysel olarak incelemiştir. Kubbede onarım ve güçlendirme yapabilmek için (Monitoring) izleme sisteminden yararlanılmıştır. Kubbeye yapılacak müdahaleler için izleme sistemi olumlu katkılarda bulunduğu üzerine durulmuştur. Kubbenin güçlendirilmesi için kubbenin etrafına çekme çemberi uygulaması yapılmıştır.

Dabanlı (2016) tez kapsamında İstanbul'da bulunan 18. yy. yapılan Nur-u Osmaniye Caminin üç boyutlu modeli sonlu elemanlar yöntemiyle statik ve dinamik analizlerle yapının düşey ve yatay yükler etkisindeki davranışı araştırılmıştır. Bu çalışma ile tarihi yapıların korunması için uygun yaklaşımların geliştirilmesine katkıda bulunmak ve yol gösterici bir kaynak olması amaçlanmıştır.

Ottoni vd., (2016) çalışmasında İtalya da 16. Yüzyıldaki inşa edilmiş sekizgen kubbenin yapısal olarak analizi gerçekleştirilmiştir. Kubbeyi sarmak ve yatay ötelenmeyi önlemek için en eski geleneksel güçlendirme tekniği olan metal gergi çubuğunu kullanılmıştır. Çalışma sonlu elamanlar modeli ile modellenmiştir. Sonuçta yeni gergi çubuklarının kubbenin korunmasını sağlamak için en etkili yol olduğunu ileri sürülmüştür.

Yavuzer (2016) çalışmasında Zal Mahmut Paşa Camii 'nin mimari ve yapısal özellikleri inceleyerek maruz kaldığı deprem, yangın gibi yapısal değişime sebep olacak etkileri araştırmıştır. Caminin geçirdiği onarım ve güçlendirmeler incelenerek, aynı dönemde benzer yapılarda kullanılan yapım teknikleri ile kullanılan malzemeler araştırılmıştır. Yapıda çevresel titreşim ölçümleri gerçekleştirilerek, sonuçlar ve elde edilen değerler gösterilmiştir. Yapının sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapının statik ve dinamik analizleri yapılmıştır.

Çalık vd., (2017) çalışmalarında Trabzon'da bulunan 10. yy. inşa edilen Ortahisar Fatih Camisinin mevcut durumuna ilişkin ABAQUS programı yardımıyla analitik model oluşturulmuş ve analitik modelin üzerinden statik ve dinamik analizler gerçekleştirilerek yapının performans değerlendirilmiştir. Fatih Camisinin yapısal hasarlarına yönelik yapılacak onarım ve güçlendirme önerileri sunularak bu öneriler cami üzerinde uygulanmıştır.

Döndüren vd., (2017) bu çalışmada, tarihi yapılarda görülen hasar türleri ve mevcut hasar türleri anlatılmıştır. Hasarlar genellikle yapıların strüktür bileşenleri, taşıyıcı duvarları, sütunları, payandaları, tonozları ve kubbelerinde oluşmaktadır. Kubbe ve tonoz yapılarının bünyesinde çekme gerilmeleri olduğunda, çekme bölgesindeki kalınlaştırma (ağırlık) azaldığında çekme bölgesi aktif hale gelir ve mesnetleri dışa doğru iterek tonozlarda mesnetlere paralel, kubbelerde mesnetlere dik çatlaklar oluşmuştur. Yığma kubbelerde genellikle hasar çekme bölgesinde meydana gelmektedir. Kubbe eteğinin olduğu bölgede çekme kuvvetlerinden dolayı düşey çatlaklar oluşmaktadır. Kubbeye gelen yükün düşey bileşeni, kubbeyi taşıyan kemer, duvar gibi elemanlara aktarılırken, yükün yatay bileşeni ise payandalar ve gergilerle karşılanarak kubbenin açılmasını önlemektedir. Kubbeden gelen yükleri kubbe kasnağının taşıyamadığı durumlarda, kubbede çekme gerilmeleri meydana gelmektedir ve bu durumda kubbede oluşabilecek çekme kuvveti düşeyde çatlak oluşumuna neden olarak kubbeye hasar vermektedir.

Şişik (2017) tez çalışmasında Edirne'de bulunan ve 15.yy. ile 16. yy arasında inşa edilmiş 4 adet cami ve 2 adet türbenin statik analizleri yapılarak bu yığma yapılar için onarım ve güçlendirme önerilerinde bulunmuştur. Analiz SAP 2000 programında sonlu elamanlar modeli ile modellenerek çeşitli yükler altında oluşan lineer statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak yapıda oluşan asal gerilmeler değerlendirilip cami ve türbelerin statik anlamda taşıyıcılık durumları belirlenmiştir.

Valente vd., (2017) İtalyada bulunan iki yığma Barok Kilisenin sismik performansı ve yapısal hasarları hakkında bilgi elde etmek için farklı şeyleri birleştirmiştir. Kiliselerin geometrik ölçümlerini lazer tarama sistemi ile gerçekleştirmiştir. İki kilisenin 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ve doğrusal olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Bu

çözümlemeler ile farklı düzeyde sismik hareketlere maruz kalan kiliselerin hasarları belirlemiş ve en zayıf kısımları tespit edilmiştir.

Aşık (2018) tez çalışmasında Konyada bulunan Zenburi mescidinin hasar tespiti yapılarak bunlar ile ilgili onarım ve güçlendirme önerileri sunmuştur. Zenbuni mescidi SAP 2000 programı yardımıyla modellenip statik analizi yapılmıştır. Mescid farklı bölgelerindeki hasarları için çeşitli güçlendirme yöntemleri önerilmiştir.

Chiozzi vd., (2018) bu çalışmada, yığma kiliselerde oluşan belirli göçme mekanizmalarını otomatik olarak değerlendirmek için limit analiz yöntemiyle NURBS tabanlı bir program kullanmıştır. İtalya depreminde hasar gören üç küçük ve orta boy kilisenin deprem analizleri yapılmıştır. Sonuçlar alternatif sayısal yaklaşımlar ve gözlenen gerçek hasarlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde kiliseler için belirlenen göçme mekanizmalarının, limit analiz yöntemi ile değerlendirildiğinde tam otomatik göçme mekanizmasının doğruluğunu göstermiştir.

Gürsoy vd., (2018) yaptıkları çalışmada Safranbolu'da bulunan 1661 yılında yapılan Köprülü Mehmet Paşa Camii'nde yapılan onarım, güçlendirme ve restorasyon çalışmaları irdelenmiştir. Doğal ve çevresel etkenler nedeniyle cami yapısının taşıyıcı sisteminde oluşan hasarlan incelenmiştir. Sonuç olarak elde edilen bulgular karşılaştırılarak Köprülü Mehmet Paşa camisi bazı sonuç ve öneriler sunulmuştur.

Mahrabel (2018) yaptığı tez kapsamında tarihi yapılarda uygulanan onarım ve güçlendirme teknikleri incelenmiştir. Çalışmasında tarihi yapı türleri ve tarihi yapılarda kullanılan malzeme özelliklerine değinmiştir. Ayrıca taşıyıcı sistem özellikleri, meydana gelen hasarlar ve günümüzde uygulanan hasar tespit yöntemleri anlatmıştır.

Sözen vd., (2018) yılındaki çalışmalarında Tokat'ın en eski camilerinde olan Garipler camisinin minaresi, cami içinde olup yapı içindeki tonozu delerek dışarı çıkmaktadır bu özel durumdaki yapının davranışını ve gerilme dağılmalarını ne ölçüde etkilediği araştırılmıştır. Yapının modeli SAP 2000 programı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda tonoz–minare birleşiminin tonoz kısımlarında gerilme yığılmalarının yoğunlaştığını görülmüştür. Tonozun bu kısımlarının, muhtemel deprem için en riskli yapı bölümleri

olduğu düşünülüp onarım ve güçlendirme çalışmaları olarak minare ile tonozun birbiriyle etkileşimini en aza indirecek uygulamaların yapılması sonucuna varılmıştır.

Alemdaroğlu Orulkaya (2019) tez çalışmasında örnek bir yığma yapı seçilmiş ve bu yapının deprem kuvvetleri altındaki performansları belirlenmiştir. Yığma binanın analizi için SAP2000 programı kullanılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, yapının yeterli deprem dayanımı olmadığı anlaşılmıştır. Yığma bina için püskürtme beton uygulaması ile beş farklı güçlendirme çözümü üretilmiş ve bu çözümlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak, bazı çözümlerde yeterli güvenliğe ulaşırken bazı çözümlerde ise bu sağlanamamıştır.

Döndüren vd., (2019) çalışma kapsamında Edirne'de bulunan 16. yy. inşa edilen Tütünsüz Baba türbesinin mekanik davranışları araştırılmıştır. Türbenin SAP 2000 programı yardımıyla statik analizleri yapılarak, mevcut durumu değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde çeşitli yükler altında oluşan kuvvetler ve gerilmeler hesaplanarak bu gerilmelere bağlı oluşan deformasyonlar belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan makro modelleme yaklaşımı ile bazı çözümler elde edilmiştir. Sonuç olarak türbede oluşan asal gerilmeler değerlendirilmiş ve statik anlamda taşıyıcılık durumları belirlenmiştir.

Güzel (2019) tez çalışmasında Urla'da bulunan 15. yüzyılda yapılmış Helvacılar Caminin yapısındaki mevcut hasarların tespit edilip, onarım ve güçlendirme yöntemleri ortaya koymuştur. Cami incelendiğinde ağır yapısal hasarlar olduğu görülmüştür. Helvacılar Cami'nin hasarsız sonlu elemanlar modeli ile kendi ağırlığı altında analizi, modal analizi, oturma analizi, tepki spektrumu analizi yapılıp üç adet gerçek deprem kaydı ile zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir.

Nursen ve Halifeoğlu (2019) çalışma kapsamında Diyarbakır Suriçi Bölgesinde yer alan tarihi camilerin mevcut hasarları belirlenerek mevcut hasar düzeylerinin gösterildiği bir tablo oluşturulmuştur. Bu camilerin hasar türlerine göre güçlendirme ve tamamlayıcı müdahale önerileri sunulmuştur. Diyarbakır'da bulunan camilerinden İskender Paşa Cami, Parlı Safa Cami, Ali Paşa Cami, Hoca Ahmet Paşa Cami, Behram Paşa Cami ve Nebi Cami'de mevcut taşıyıcı sistem hasarları tespit edilmiştir. Bunun yanında Ulu Cami,

Hüsrev Paşa Cami, Lala Kasım Bey Cami ve Melik Ahmet Paşa, Fatih Paşa (Kurşunlu Cami) camilerinin için de güçlendirme ve tamamlayıcı müdahale önerilmiştir.

Pehlivan (2019) tez çalışmasında yığma kubbelerin onarım ve güçlendirme yöntemlerinden biri olan CFRP ile güçlendirilmesini ve bu uygulamanın SAP 2000 programı yardımıyla modal analizi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuç olarak CFRP ile güçlendirme yapılmış ve yapılmamış kubbelerin analizi yapılarak sonuçları karşılaştırılmıştır.

Türkekul (2019) tez kapsamında Tokat Yağıbasan Medresesi gerçek deprem ivme kayıtları kullanılarak statik ve dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak orijinalindeki gibi Yağıbasan Medresesi yarım kubbeli olarak modellenip sonrasında tam kubbeli olarak modellenerek bu iki kubbe formunun analizleri yapılarak birbiri ile karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda her iki kubbe için gerilme yığılmalarının oluştuğu bölgelerin benzer olduğu fakat değerlerin değişiklikler gözlenmiştir.

Yazgan ve Ünay (2019) yaptıkları çalışmada Bursa Yenişehir'de bulunan 16 yy. yapılan Sinan Paşa Külliyesi imaretinde insan kaynaklı müdahale ve eklentilerin yapısal performansa etkilerini inceleyerek hedef yapının müdahale öncesi durumunu temsil eden sayısal model kullanılarak analizler gerçekleştirmişlerdir. Külliyenin herhangi bir müdahaleye maruz kalmaması halinde deprem etkisi ve diğer yüklere karşı oldukça dayanıklıyken, müdahale ve hasarlardan dolayı düşük kuvvetteki sismik hareketlerde dahi göçme riski ile karşı karşıya kalabileceği görmüşlerdir.

2.2 Güçlendirme Yöntemleri İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Croci (2000) Pisa Kulesi ve St. Assisi Francis Kilisesinin onarım ver restorasyon çalışmalarını incelemiştir. Çalışmada, çeşitli görüntüleme sistemleri ile matematiksel modelleme yöntemi kullanılarak, bu yapılarda oluşan gerilme yığılmalarının en fazla nerede olduğunu tespit etmişlerdir. Bu sonuçlar doğrultusunda Pisa kulesinin temelini güçlendirmek için kurşun bloklar yerleştirilmiştir. Daha sonra Pisa kulesi yere ankrajlanan büyük çelik kablolar yardımıyla balkonlardan çekilmiştir. Francis Kilisesindeki tonozlardaki çatlaklar için enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Kubbeyi ayakta tutan yığma kemerlere çelik çubuklar ile ankraj yapılarak arkadaki kulelere ve duvarlara sabitlenmiştir.

Sallıo (2005) yaptığı tez çalışmasında 1950 yıllarında yığma yapı olarak inşa edilen Buldan Göğüs Hastalıkları Hastanesi binasının mevcut durumu kesme kuvvetlerini karşılayacak yeterli rijitlik ve dayanıma sahip olmaması nedeniyle bazı duvarların püskürtme beton uygulaması ile güçlendirilmesi öngörülmüştür. Hastahane binasının mevcut hali ile güçlendirilmiş hali SAP 2000 de analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bortolo (2006) çalışmasında Bergamo'daki bir kilisenin statik ve dinamik davranışını analiz etmek için deneysel testler ve sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal analizler yapmıştır. Yapısal analizleri yapıldıktan sonra diyagonal çelik çubuklarla uygulanacak bir güçlendirme tekniği denemiştir. Tekniğin kolay, hızlı ve uygulanabilir olduğu yönünde bir sonuca ulaşılmıştır.

Oliveira vd., (2006) bu kapsamda, üç yapraklı taş yığma duvarların yapısal davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada üç yapraklı yığma taş duvarların güçlendirilmesi ve yapısal davranışları deneysel olarak incelemiştir. Üç yapraklı yığma duvarlar üzerinde (cam elyaf takviyeli polimer) malzemeleri, puzzolan-kireç bazlı harç ve kireç bazlı harç kullanılarak farklı güçlendirme teknikleri uygulanmıştır. Sonuçta cam elyaflı takviyeli polimer malzemenin üç yapraklı duvarın dayanımını % 71 oranında arttırdığı görülmüştür.

Kara (2009) tez kapsamına tarihi yığma yapılarda görülen hasar türleri ve hasarların oluşma nedenleri incelenerek güçlendirme yöntemleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Ayrıca çalışmada beş adet yığma yapının mevcut durumları belirlenerek deprem yönetmeliğine göre güçlendirilmeye ihtiyacı olup olmadığı tespit edilmiştir. Tarihi yığma yapılara güçlendirme yapılması durumunda deprem yönetmeliğine göre hesabı yapılarak mevcut durum ile güçlendirilmiş durum karşılaştırılmıştır.

Öztaş (2009) tez çalışmasında mevcut bir yığma yapı ele alınarak bunları çeşitli güçlendirme yöntemleri ile güçlendirerek birbiri ile kıyaslanmıştır. Mevcut yığma yapıya betonarme güçlendirme perdeleri eklenerek yeniden bir analiz yapmıştır. Ayrıca bu yapı üzerinde cam lifli polimerlerle (GFRP) güçlendirilerek tekrar analiz yapılmış ve yer değiştirmeler ile momentler karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre betonarme

perdeler veya GFRP ile güçlendirilmiş yığma yapıda yer değiştirmelerde ciddi düzelmeler görülmüştür.

Anzani vd., (2010) bu çalışmada İtalya'da bulunan bazı hasarlı kuleler incelenmiştir. Laboratuvar deneyleri, tahribatsız test yöntemleri ve izleme sistemleri yardımıyla tarihi kulelerin korunması ve onarılması amacıyla yöntem önerilmiştir. Farklı yaklaşımlar değerlendirilerek, çoklu yaklaşım yönteminin tarihi yapılar ve yığma yapıların müdahale ve değerlendirme rehber olacak bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

Yaldız ve Yavuz (2011) çalışmalarında Nevşehir'in Ürgüp ilçesinde bulunan İbrahim Paşa Köyü'nde yer alan yığma taş bir konut örneği üzerindeki onarım ve güçlendirme çalışmaları ele incelemişlerdir. Taş konutta oluşan hasarlara göre onarım ve güçlendirmeye yönelik önerilerde bulunmuşlardır.

Demir (2012) tez çalışmasında, çift cidarlı taş yığma duvarların düzlem içi doğrultuda etkiyen tekrarlı yük etkileri altındaki davranışının, deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Değişken olarak, eksenel gerilme düzeyi, kenet ve zıvana kullanımı ve dış tabakalar arasında iç moloz dolguyu kullanmıştır. Deneysel çalışma, yerdeğiştime kontrollü olarak etkitilen tekrarlı kesme kuvvetlerine maruz bırakılmış duvar numunelerinden meydana gelmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalınma ile kenetlerin kullanılması çatlak dağılımını etkilemekle birlikte, kullanılan küfeki taşının çekme dayanımının sınırlı olması nedeniyle taşlar çatlamış ve kenetlerin etkinlikleri sınırladığı sonucuna varmıştır.

Zakar L. (2013) çalışmasında koruma ve restorasyon uygulamalarında, tarihi yapılarda gerçekleşen bozulma ve hasarlar karşısında uygulanan müdahale yöntemlerini ele almaktadır. Yapılarda, yapı ve malzemede bozulmaya neden olan etkenleri açıklamıştır. Ayrıca koruma ve restorasyon sürecinde uygulanan müdahale türleri, yapı elemanı ve yapı malzemelerinden bahsetmiştir

Chamaky (2014) yaptığı tez çalışmasında, tarihi yığma yapıların sismik güçlendirmesi yapılırken uyulması gereken hesap ve yapım kurallarını araştırmıştır. Farklı tiplerdeki tarihi yığma yapıların her biri için kendisine uygun güçlendirme prensipleri ele alınmıştır. Bu çalışmada tarihi yığma yapıların sismik güçlendirilmesi için tasarım, analiz ve

güçlendirme esasları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çalışmada bazı güçlendirme teknikleri değerlendirildikten sonra 3 tane yığma yapı modeli analiz edilerek değerlendirilmiştir.

Milani vd., (2014) bu çalışmada, yığma çapraz tonozlarda bulunan yapısal hasarları ve dağınık çatlakları, doğrusal olmayan yöntem ve limit analiz yöntemiyle analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tek kemerli çapraz tonozların analizinde yaygın olarak kullanılan yaklaşımların her zaman güvenilir sonuçlar vermediği, nihai yüklerin göçme mekanizmalarının gerçekten oldukça farklı çıktığı görülmüştür. Yığma kemer köprülerdeki dolgu malzemesinin önemi görülmüştür. Bunun yanında dolgu maddesinin gerçek mekanik özelliklerine bağlı olarak göçme mekanizmalarını ve nihai yükü önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Milani ve Valente (2015) bu çalışmada, 2012 İtalya depreminde hasar gören yedi yığma kilisenin hasarları üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. Yığma kiliselerin analizleri 3 boyutlu sonlu elamanlar yöntemi ile doğrusal olmayan dinamik analiz yapılmıştır. Bu kapsamda doğrusal olmayan dinamik analizlerin, bu tür yapıların davranışların belirlemede oldukça yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

Carpentieri vd., (2016) bu çalışmada, yığma yapı elemanlarının üstüne gelen gerilmeleri karşılayabilmesi için ilave elemanlar tasarlayarak, bu tür yığma yapıları güçlendirmiştir. Donatısız yığma yapılarda ahşap veya çelik kiriş/bağlar yerine carbon takviyeli kompozit malzemeler kullanılabileceğini söylemiştir. Bazı sayısal örnekler ile yığma tonozun ve destekleyici duvarların üç boyutlu yapısını, yapıya gelen gerilmelere karşı dayanıklılığını arttıracak şekilde güçlendirme elemanları kullanarak analiz etmiştir.

Rossi vd., (2016) yapılan çalışmada 1:5 ölçekli haç yığma tonoz modelinde yapılan deneysel çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, tarihi yığma yapıların nihai düzlem içi sismik kapasitelerini (diyafram etkisi) belirleyerek, rijitlik, mukavemet ve nihai yer değiştirmelerinin analiz ile değerlendirilmiştir. Tonozlar üzerinde 3 boyutlu hasar mekanizmasını tanımlamıştır. 3 boyut yazıcı ile üretilen plastik bloklardan oluşan modelin mesnetlerin (duvarlar veya sütunlar) diferansiyel yer değiştirmelerini simüle etmek için, tonozun kenar ayaklarına farklı yatay yer değiştirmeleri statik uygulamalar uygulayarak test edilmiştir. Özellikle, düzlem içi yatay kesme

deformasyonlarının ve mesnetlerin uzunlamasına açılıp kapanmasının, duvarlı tonozlu yapılarda görülen en yaygın sismik hasar mekanizmaları olduğunu sonucuna varılmıştır.

Rossi vd., (2017) çalışmasında 3 boyutlu yazıcı kullanılarak elde edilen farklı bloklar ile yapılmış manastır tonoz üzerinde, deneysel testler yapılarak tonozun yapısal davranışını araştırmıştır. Tonozun göçme mekanizmalarını ve nihai yer değiştirme kapasitesini analiz etmiştir. Bu yöntemin tonozlu yapılar üstündeki güvenilirliği, gerçek tonozlarda bulunan çatlaklar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Deneysel veriler, doğrusal çizgi analizi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu etkileri dikkate alan belirli varsayımlar yaparak, iyi bir tahmin elde edilebileceği sonucuna varmıştır. Bu durum 3 boyutlu göçme için de analizinin doğrusal çizgi yönteminin önemini göstermiştir.

Rossi vd., (2017) yaptığı çalışmada, 3 boyutlu yazıcıyla üretilen küçük blokları kuru olarak birleştirerek manastır ve çapraz tonozların küçük ölçekli model üretimini gerçekleştirmiştir. Manastır ve çapraz tonozlu modellerin göçme mekanizmasını incelemiştir. Çalışmanın amacı, bilgisayar analiz programı yardımıyla bu yapılardaki 3 boyutlu dinamik hareketi, üç boyutlu göçme mekanizmasını ve her bir bloğun yerdeğiştirmesini hesaplamaktır. Bunun yanında 3 boyutlu ayrı bloklardan oluşturulan küçük ölçekli modelin kullanılma potansiyelini göstermektir. Manastır tonozu için gerçekleştirilen deneylerde simetrik ve asimetrik olarak dışa doğru yer değiştirmelerin olduğunu gözlemlemiştir. Çapraz tonozlarda ise yenilikçi bir yaklaşım olan kuvvete duyarlı hassas robotik kollar kullanmıştır. Bu mekanizma ile birlikte çapraz tonozlar üzerinde kontrollü kuvvet ve yerdeğiştirmeler uygulanabilmiştir.

Akbulut vd., (2018) çalışmalarında tarihi yığma yapıların onarımında kullanılan kireç esaslı enjeksiyon malzemesi ve uygulama yönteminin zaman içerisinde gelişimini inceleyerek olması gereken standartlar ve bundan sonra yapılacak bilimsel araştırmalara katkı sağlamayı amaçlamıştır. Çalışmasında tarihi yığma yapıların onarımı sırasında uygulanan enjeksiyon yöntemi tanımlanarak kireç esaslı enjeksiyon malzemesinin gelişimine katkıda bulunan şerbetler ve harçlarla ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Bu çalışmayla kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin ve deney yöntemlerinin gelişimi ele alınmıştır.

Hamdy vd., (2018) yapılan bu çalışmada, donatısız yığma duvar ve tonozun sayısal modeli ile doğrusal olmayan analizi yapılmıştır. Bu yapılar farklı teknikler kullanılarak güçlendirilmiştir. Kemer ve düzlem yapıların güçlendirilmesini yapabilmek için basit ve güvenilir bir hesaplama yöntemi geliştirmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen sayısal örnek ve doğrusal olmayan analizler ANSYS programında modellenmiştir. Güçlendirme yöntemleri olarak harç, yumuşak çelik çubuklar, FRP, ferrocement hazır tel ve polyester harcı kullanmıştır. Kubbelerde kullanılan güçlendirme malzemeleri olarak FRP ile % 190, yumuşak çelik çubuklar ve ferrocement hazır tel % 150 ve polyester ise %118 oranında bir artış görülmüştür.

İlbasan (2019) tez kapsamında mevcut bir yığma yapı incelenerek yönetmeliğe göre riskli olup olmadığı konusunda hesaplamalar yapılmıştır. Bu yapının sonlu elemanlar analizi SAP 2000 programında statik ve dinamik analizleri yapılmıştır. Yapının yönetmeliğe göre riskli yapı olduğu karşımıza çıkarken mantolama ile yapılan güçlendirme yönteminden sonra yapılan analizde yapının artık riskli yapı kapsamına girmediği anlaşılmıştır.

Karakuş (2019) yaptığı çalışma kapsamında tarihi yapılarda uygulanan onarım ve güçlendirme tekniklerinin incelenerek örneklendirilmiştir. Bu çalışmada tarihi yığma yapıların korunması için uygulanabilecek tüm onarım ve güçlendirme yöntemlerini ve bu yöntemlerin hangi durumlarda uygulandığını anlatılmıştır.

Literatürler incelendiğinde kubbede yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları ile ilgili deneysel ve sayısal veriler yardımıyla yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları literatürde bulunmamaktadır. Bu tez çalışması ile literatürdeki bu eksikliğin giderilip literatüre bu konuda katık sağlayacağı düşünülmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında Klasik Osmanlı dönemi camii kubbelerinin boyutları ve geometrileri incelenmiştir. Çalışmada cami kubbe yüksekliğinin çapına oranı 1/2 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen optimum kubbe boyutları, 1/4 ölçeğinde küçültülerek kubbe boyutu olarak ele alınmıştır. Bu dönemde en yaygın cami kasnak formu olarak sekizgen geometri kullanılması nedeniyle yapılan çalışmada sekizgen kasnak tercih edilmiştir.

Çalışmada cami kubbesi deneysel olarak laboratuvar ortamında inşa edilmiş olup sayısal olarak da modellenmiştir. Cami kubbelerinde zaman içerisinde kubbeye etki eden yükler altında çeşitli deformasyonlar ve yıkılmalar meydana gelmektedir. Bunlardan en yaygın görülen hasar türü cami kubbelerindeki beden duvarlarının birbirinden ayrılmasıdır. Tez çalışmasında bu hasarın kubbeye verilebilmesi için kubbe tahribat aparatı yapılmıştır.

Cami kubbesinin 3 boyutlu sayısal modelini oluşturmak için sonlu elemanlar yöntemi esas alınarak hazırlanmış olan LUSAS yazılımı kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal modellerde, daha önceden hasarlı kubbelerde onarım ve güçlendirme yöntemleri olarak uygulanan tamir harcı, dikiş uygulaması, çekme çemberi ve lif takviyeli polimer (FRP) uygulamaları yapılmıştır.

Bu çalışmada çekme çemberi ve FRP uygulamaları kubbenin etek bölgesi, kasnak bölgesi ve etek - kasnak bölgesine uygulanmıştır. Tez çalışmasında deneysel olarak 9 adet numune ve sayısal olarak da 9 adet model yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan deneysel ve sayısal modeller yardımıyla elde edilen veriler birbiri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak kubbelerdeki hasarların onarım ve güçlendirilmesi için çatlak genişliklerine ve kubbenin değişik bölgelerine göre en uygun güçlendirme tekniklerinin hangisi olacağı tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada tarihi cami kubbelerinde kullanılan güçlendirme yöntemleri incelenmektedir. Çalışmada yığma birim olarak kesme taş ve bunların aderansını sağlamak için de horasan harcı kullanılmıştır. Kesme taş olarak Kayseri yöresinde bulunan yüksek mukavemetli tüf taşı seçilmiştir.

Kubbe yapımında kullanılan kesme taş 25x15x10 cm^3 boyutlarında olup, derz kalınlığı ortalama 1 cm ‘dir. Taşlar arasında kullanılan horasan harcı ise ağırlıkça % 40 kireç, % 40 taş tozu , % 20 ince kum oranında olup karışıma 2 lt su eklenmiştir. Kubbe kesme taşlar ile şaşırtmalı örgü şeklinde örülmüştür (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kubbe görünümü

Kubbenin çapı 200 cm, yüksekliği ise 100 cm olup kubbe sekizgen kasnak üzerine örülmüştür. Kubbe imalatı için kubbe kalıbı yapılmıştır. Kubbe kalıbı için özel imalat çelik profil kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kubbe kalıbı.

3.1 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

3.1.1 Horasan harcının mekanik özelliklerin belirlenmesi

Kullanılan harcın basınç dayanımının tayini amacıyla TS EN 1015-11' e (2000) uygun olarak 50 x 50 x 50 mm^3 boyutlarındaki kalıplarda 3'er adet harç numunesi alınarak 28 günlük küre tabi tutulmuşlardır. Şekil 3.3'de basınç deneyine tabi tutulmuş 3 adet harç numunesi görülmektedir. Kür süresi boyunca harcın su ile temasından kaçınılarak oda sıcaklığında bekletilmiştir. Yapılan deneyde yük 240 kg/sn ile sabit hızıyla yüklemeye tabi tutulmuştur. Kubbe deneylerinde kullanılan horasan harcının basınç deneyi ve sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Harç numunelerin basınç dayanımları TS EN 1015-11'de (2000) belirtilen şekilde ve aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{1600} \tag{3.1}$$

Burada; σ basınç dayanımını (MPa), P ise uygulanan kuvveti (N) temsil etmektedir.

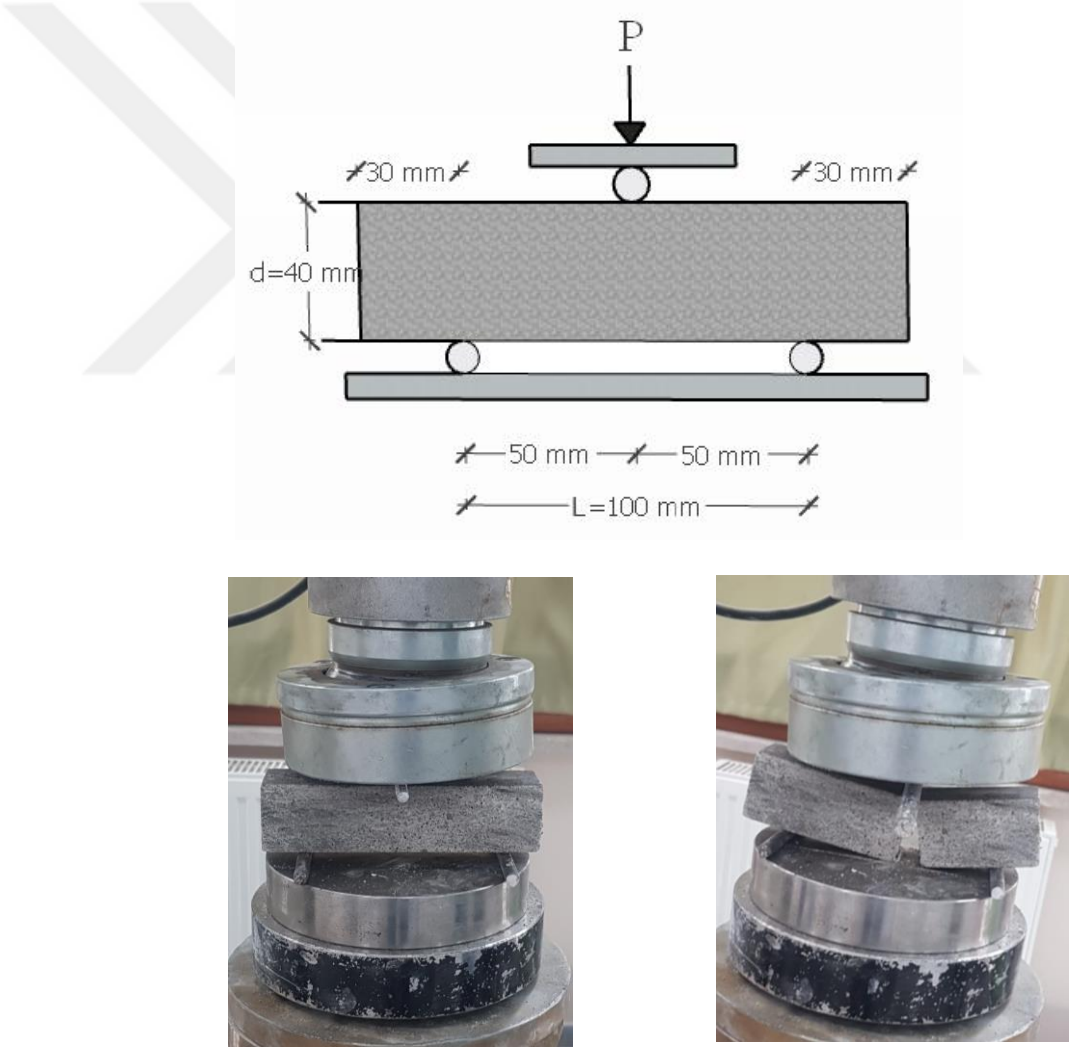
Numune No	HBD 1	HBD 2	HBD 3
Basınç Dayanımı (MPa)			

Şekil 3.3. Kubbe deneylerinde kullanılan horasan harcının basınç deneyi.

Çizelge 3.1. Horasan harcının basınç deney sonuçları.

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)
HBD1	5,45
HBD2	5,07
HBD3	4,79
Ortalama	5,10

Harcın eğilme basınç dayanımı deneyi için TS EN 1015-11'e (2000) uygun olarak 40 x 40 x 160 mm^3 boyutlarındaki kalıplara yerleştirilen 3'er adet harç numunesi 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda eğilmede çekme testine tabi tutulmuştur. Şekil 3.4'de deney düzeneği gösterilmiştir. Deney için harç prizma numunelerinin aralarındaki mesafe 100 mm olan iki silindir üzerine oturtulmuş ve üst yüzeyinin tam ortasına gelen aynı boyutlu silindir numune üzerine koyulmuştur. Deneyde üç noktadan 5 kg/sn hızla yükleme yapılarak numuneler kırılmıştır. Kubbe deneylerinde kullanılan horasan harcının eğilmede çekme deneyi ve sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Eğilmede çekme dayanımı tayininde kullanılan deney düzeneği.

Harç numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarının tayini için TS EN 1015-11'de (2000) belirtilen şekilde ve aşağıdaki bağıntı (3.2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma = 1{,}5\frac{PL}{bd^2} \tag{3.2}$$

Burada; σ eğilme dayanımı (MPa), P prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N), L mesnet silindirlerinin eksenleri arasındaki mesafedir (mm), b numune genişliği (mm), d numune yüksekliği (mm).

Çizelge 3.2. Horasan harcının eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları.

Numune No	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
HÇD 1	0,35
HÇD 2	0,30
HÇD 3	0,28
Ortalama	0,32

3.1.2 Tamir harcının teknik özelliklerinin belirlenmesi

Tamir harcı olarak Master Emaco N 275 TIX ürünü olan doğal hidrolik kireç esaslı, tarihi kâgir yapıların sıvanmasında kullanılan, doğal silis agrega ve inorganik lifler içeren, çimento içermeyen sıva malzemesi kullanılmıştır. Bu harç ile yapılan karışım içinde homojen olarak dağılmış özel inorganik mineral lifler sayesinde rötresiz bir harç elde edilerek geleneksel harçlar ile aynı mekanizmada çalışarak, uygulanan yüzeyde sürekliliği sağlayan bir onarım elde edilir. Harcın içinde suda çözülür tuzlar içermemesinden dolayı tarihi yığma yapıların restorasyonu için kullanılmaktadır. Aşağıda Çizelge 3.3'de tamir harcının teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Tamir harcının teknik özellikleri.

Malzemenin Yapısı	Doğal hidrolik kireç, Silis agrega ve İnorganik lifler içerir
Renk	Kırık beyazdan açık kahverengiye doğru
Basınç Dayanımı (EN 1015-11) (7gün)	> 15 kg/cm^2
Dane Boyutu	0 - 3 mm
Mineral Lifler	Uzunluk : 6 mm
Uygulanacak Zeminin Sıcaklığı	+5℃ +35℃
Kullanma Süresi	30 dakika
Tam Kürlenme Süresi	7 gün

3.1.3 Taşın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Kubbeyi örmek için kullanılan taşlar, Kayseri yöresinde genellikle yığma bina ve cami inşaatlarında kullanılan "tüf taşı" isimli volkanik kökenli bir taş cinsidir. Deney için kullanılan taşın basınç dayanımının tayini için TS EN 771-6'ya (2007) uygun yöntemler kullanılarak yaklaşık 50 x 50 x 50 mm^3 boyutlarında kesilmiş ve oda sıcaklığında kurutulmuştur. Yığma birim numuneleri TS EN 772-1'de (2012) belirtildiği şekilde 6 adet numune olmak üzere basınç dayanımı testleri Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarında yapılmıştır. Aşağıda Şekil 3.5'de yığma birimlerin basınç dayanım testleri ve Çizelge 3.4'de yığma birimlerin basınç dayanımı deney sonuçları gösterilmiştir.

Numune No	Basınç dayanım testi öncesi	Basınç dayanım testi sonrası
TBD		

Şekil 3.5. Yığma birimlerin basınç dayanım testleri.

Çizelge 3.4.Yığma birimlerin basınç dayanım test sonuçları.

Numune No	Basınç Dayanımı (MPa)
TBD 1	18,34
TBD 2	18,21
TBD 3	18,17
TBD 4	17,79
TBD 5	17,52
TBD 6	16,91
Ortalama	17,82

Taşın eğilmede çekme dayanımı deneyi için TS EN 1015-11'e (2000) uygun olarak 40 x 40 x 160 mm^3 boyutlarındaki üçer adet numune eğilmede çekme testine tabi tutulmuştur. Aşağıdaki Şekil 3.6'da yığma birimlerin eğilmede çekme dayanım deneyi gösterilmiştir. Deneyde üç noktadan 5 kg/sn hızla yükleme yapılarak numuneler kırılmıştır ve yığma birimlerin eğilme dayanım testleri sonuç Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Numune No	Eğilme dayanım testi öncesi	Eğilme dayanım testi sonrası
TÇD		

Şekil 3.6. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanım testleri.

Taş numunelerinin eğilmede çekme dayanımlarının tayini için TS EN 1015-11'de (2000) belirtilen şekilde ve aşağıdaki bağıntı (3.2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma = 1{,}5\frac{PL}{bd^2} \tag{3.3}$$

Burada; σ eğilme dayanımı (N/mm^2), P prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N), L mesnet silindirlerinin eksenleri arasındaki mesafedir (mm), b numune genişliği (mm), d numune yüksekliği (mm).

Çizelge 3.5. Yığma birimlerin eğilmede çekme dayanım test sonuçları.

Numune No	Çekme Dayanımı (MPa)
TÇD1	6,15
TÇD2	5,25
TÇD3	5,00
Ortalama	5,47

Seçilen taşın fiziksel ve mekanik analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi, Akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarında yapılmıştır. Buna göre yığma birim olarak seçilen taşın fiziksel ve mekanik analiz sonuçları aşağıdaki Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.6. Kayseri tüf taşının fiziksel deney sonuçları.

Test Türü / Birimi	Sonuç
Birim Hacim Ağırlığı (kg/m$^{3)}$	1960
Porozite (Gözeneklilik Derecesi) (%)	14,05
Pandül Deney Donanımıyla Kayma Direncinin Tayini (Islak Zeminde)	24,50
Ağırlıkça Su Emme Tayini (%)	7,69
Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini (MPa)	7,30
Aşınma Direnci Tayini (mm)	23,99
Don Tesirlerine Dayanıklılık ve Don Sonrası Eğilme Dayanımı Deneyi Eneyi (MPa)	3,9
Don Tesirlerine Dayanıklılık ve Don Sonrası Basınç Dayanımı Deneyi (MPa)	74
Ultrasonik Hız (km/s)	2,65
Kayaç rengi	Gri

Çizelge 3.7. Kayseri tüf taşının mekanik deney sonuçları.

Test Türü / Birimi	Sonuç
Tek eksenli Basınç Dayanımı (MPa)	17,90
Elastisitesi (GPa)	6,41
Nokta Yükü İndeksi Dayanım Değeri (MPa)	4,84
Eğilme Dayanım Değeri (MPa)	5,77
Darbe Dayanım Değeri (kg.cm/cm^3)	16

3.1.4 Çelik kenetin ve sacın mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Dikiş yöntemi için kullanılan çelik kenetlerin U şeklinde olup, 2 mm kalınlığındadır. Kullanılan çelik kenetlerin çekme dayanımının tayini için TS EN ISO 6892-1 (2004) şartları sağlanarak çekme dayanımları aşağıdaki denklem (3.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$R_m = F_m \tag{3.4}$$

Burada; R_m çekme dayanımı (MPa), F_m deney sırasında akma noktası geçildikten sonra deney numunesinin dayandığı en büyük yük olarak ifade edilmektedir. Yapılan kenetlerin çekme dayanımı sonucunda kenetlerin çekme mukavemeti 290 MPa civarında bulunmuştur (Uslu, 2013).

Çekme çemberi uygulaması için kullanılan çelik sac St37-2 EN 1050-2 (2000)'e göre (S235JR) olup alaşımsız kalite yapısal çelik olarak sınıflandırılmaktadır. Buna göre güçlendirme için kullanılan çelik sacın kimyasal özellikleri Çizelge 3.8'de mekanik özellikleri ise Çizelge 3.9'da verilmektedir.

Çizelge 3.8. Çelik sacın kimyasal özellikleri (URL-45).

Çelik Sınıfı	Çelik Sınıfı (Yeni)	Kimyasal Bileşim (max % ağırlık)					
		C	MNmax	Pmax	Smax	Nmax	Almax
St 37-2	S235JR	0,17 max	1,40 max	0,045	0,045	0,009	-

Çizelge 3.9. Çelik sacın mekanik özellikleri (URL-45).

Çelik Sınıfı	Çelik Sınıfı (Yeni)	Mekanik Özellikleri		
		Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Sınırı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
St 37-2	S235JR	360 - 510	235	26

3.1.5 FRP ve epoksinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Yığma kubbelerde meydana gelen orta genişlikteki çatlakların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılan Lif Takviyeli Polimer uygulaması yapının elemanlarına ilave stabilite sağlayan, yenilikçi onarım ve güçlendirme sistemidir. Bu güçlendirme sistemi taşıyıcı elemanların yük taşıma kapasitelerini ve dayanımlarını arttırmak için kullanılmaktadırlar. Yapılan deneylerde kullanılan malzemeler Şekil 3.7'de görüldüğü gibi 2 bileşenli epoksi ve FRP bant kullanılmıştır.



Şekil 3.7. FRP ve 2 bileşenli epoksi.

FRP uygulamasında Sikawrap 230-C/45 ürünü olan tek doğrultulu karbon lifli dokumadır. Bu uygulama ile imalat kusurların giderilebildiği gibi mevcut standartlara uygun yapısal güçlendirme uygulamaları da yapılabilmektedir. Yapılan FRP uygulamalarında malzemenin düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle yapıya ilave yükler gelmez, yüzey geometrisinden bağımsız uygulama imkanı sağlar, kolay işçilik ve ekonomik olması sağladığı avantajlar arasında yer almaktadır. Aşağıda Çizelge 3.10'da FRP bantların malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.10. FRP bantların malzeme özellikleri.

Dokuma Yapısı	Tek doğrultulu
Birim Ağırlık	230 g/m^2
Dokuma Kalınlığı	0,131 mm
Lif Yoğunluğu	1,76 g/cm^3
Çekme Dayanımı	4300 MPa
Elastisite Modülü	234000 MPa
Kopma Uzaması	%1,8 nomina

Epoksi olarak Sikadur 330 epoksi ürünü olan iki bileşenli, tiksotrpik özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcısı kullanılmıştır. Aşağıda Çizelge 3.11'de epoksi yapıştırıcının malzeme özellikleri verilmiştir. Kullanılan epoksi malzemesinin yüksek mekanik özelliklere sahip olması, birçok yüzeyde iyi aderans sağlaması ve kolay uygulanması nedeniyle tercih edilmiştir.

Çizelge 3.11. Epoksi yapıştırıcının malzeme özellikleri.

Yoğunluk	1,3 kg/l (Beyaz Macun + Gri Macun)
Eğilmede E. Modülü	3800 MPa
Çekme Dayanımı	30 MPa
Kopmada Uzama	0,9 %
Uygulama Sıcaklığı	+10 °C min. / +35 °C max.
Karışım Oranı Beyaz Macun	Beyaz Macun : Gri Macun = 4:1

3.1.6 Yığma duvarın mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Yapılan kubbe numunelerinin basınç dayanımlarını bulmak için TS EN 1052-1 (2000) (Kargir deney metodları basınç dayanımı tayini) standartına göre uygun olarak üretilmiş üç adet 405x270x50 mm^3'lük duvar numuneleri basınç testine tabi tutulmuştur. Üretimi yapılan duvar numuneleri Şekil 3.8'de görüldüğü üzere bir adet LVDT yerleştirilmiştir. Yığma duvar numunesinde meydana gelen yer değiştirmeler bu LVDT'ler yardımı ile ölçülmüştür. Bu yer değiştirme verileri duvar numunelerinin ilk boyuna bölünmesiyle birlikte duvar numunelerinde meydana gelen şekil değiştirme hesaplanmıştır. Deneydeki nihai yükün, yığma duvar numunesinin alanına oranlanması ile gerilme değerine ulaşılmıştır. Yığma duvarların basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 3.12'de verilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.8'de yığma duvarların gerilme şekil değiştirme grafikleri verilmiştir. Elastisite modülü-basınç dayanımı oranı TS EN 1996-1-1 (2013) (Donatılı ve donatısız kâgir yapılar için genel kurallar)'te belirtildiği gibi 1000 oranından düşük çıkmıştır.

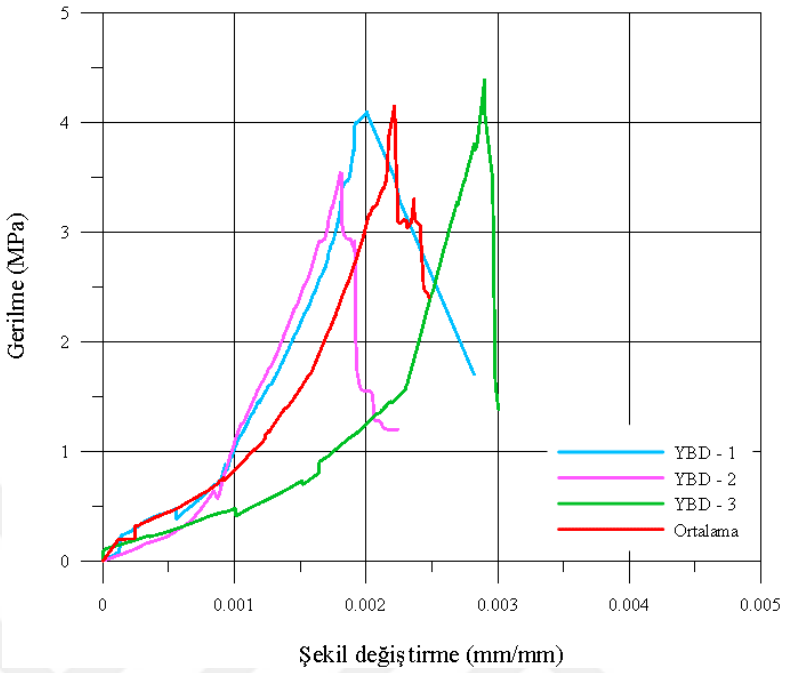
Çizelge 3.12. Yığma duvarların basınç dayanımları.

Numune No	Maksimum yük V (kN)	Basınç dayanımı f (MPa)	Elastisite modulü E (MPa)	Oran E/f
YBD1	81,80	4,09	2038	582
YBD2	70,60	3,53	1947	556
YBD3	87,80	4,39	1514	433
Ortalama	83	4,15	1833	524
f_k=f/1,2		3,5		





(a)



(b)

Şekil 3.8. (a) Yığma duvarın basınç dayanım deney düzeneği, (b) gerilme – şekil değiştirme grafiği.

3.2 Deney Düzeneğinin Oluşturulması

3.2.1 Çelik levha düzeneğinin yapılış aşamaları

Kubbe imalatı için Şekil 3.9'da gösterilen çelik levha düzeneği üretilmiştir. Kubbe imalatı çelik levha üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çelik levha 300 x 300 x 0,5 cm boyutlarındadır. Kubbe imalatında kullanılacak çelik profil kalıbın, çelik levhanın altından çıkarılması için 200 cm çapında bir boşluk bırakılmıştır. Bu boşluk etrafında kubbe imalatı yapılmıştır. Bu çelik levha 7 tane 10x10x110 cm uzunluğunda çelik ayaklar ile alttan desteklenmiştir. Çelik levhanın boşluklara yakın yerlerinden sehim yapmaması için 3x3x300 cm boyutlarında 4 tane çelik çubuk ile yatay olarak desteklenmiştir.



Şekil 3.9. Çelik levha düzeneğinin yapılışı.

3.2.2 Çelik profil kalıbın yapılış aşamaları

Kubbe kalıbı için özel imalat çelik profil Şekil 3.10'daki gibi yaptırılmıştır. Çelik profil kalıbın çapı 200 cm, yüksekliği ise 100 cm boyutlarındadır. 100 cm uzunluğundaki çelik profiller özel çelik bükme makinalarında yay şekli verilerek bükülmüştür. Sonrasında çelik profiller iki eşit parçaya ayırmak için kesilmiştir. Kesilen profiller kalıbın tepe noktasından kaynak yapılarak birleştirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Deney düzeneği üzerine kubbe kalıbının yerleştirilmesi.

3.2.3 Kubbe için beton kasnakların hazırlanma aşamaları

Kubbe, Şekil 3.11'de görüldüğü boyutlarda 10 cm kalınlığında 8 tane beton kütlelerin üzerinde örülmüştür. Beton kütleler için ilk olarak ahşap kalıp hazırlanmıştır. Betonun kalıptan rahat çıkartılabilmesi için yağlanmıştır. C20/25 MPa dayanımında beton kalıbın yarısına kadar dökülmüştür. Bu beton üzerine demir donatı yerleştirilmiştir ve ardından kalıbın geri kalan kısmına beton dökülmüştür.



Şekil 3.11. Beton kasnağı için beton dökümü.

Kasnak çelik profili, beton kasnağının üzerine konularak delinecek yerler işaretlenmiştir. Matkap yardımıyla beton kasnak 5 cm derinliğinde delinmiştir. Bu deliklere epoksi sürülerek 8 cm uzunluğunda sonsuz dişliler yerleştirilmiştir. Sonrasında kasnak profili sonsuz dişlilerin üzerine yerleştirilip somun yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 3.12). Beton kasnakların altına çelik kasnak profiller yerleştirilip sabitlenmesiyle kubbeye uygulanacak yükle karşı hareket bütünlüğü sağlanmıştır.



Şekil 3.12. Beton kasnağını altına çelik kasnak profilinin yerleştirilmesi.

3.2.4 Kubbe tahribat aparatı

Kubbelerde en yaygın olarak görülen hasar türü beden duvarlarının birbirinden ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Bu hasar türü, beden duvarlarının kubbenin ağırlığından dolayı dışarıya doğru yapmış olduğu hareket neticesinde kubbenin etek hizasından başlayarak yukarıya doğru açılması şeklinde gerçekleşmektedir. Bu hasar türünü verebilmek için kubbe tahribat aparatını tasarlayıp imal ettirdik (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Kubbe tahribat aparatı.

Kubbe tahribat cihazında kubbenin tam ortasından geçecek şekilde iki ucunda sonsuz dişli olan 2 cm çapında 130 cm uzunluğunda dairesel profil kullanılmıştır. Dairesel profilin üst kısmı kubbenin tepe noktasından 30 cm daha uzun olacak şekilde yapılmıştır. Bu 30 cm uzunluğundaki kısma sonsuz dişlinin aşağıya doğru hareket edebilmesini sağlamak için Şekil 3.14'de görüldüğü gibi trapez çevirme kolu bulunmaktadır. Yük hücreleri S şeklinde olup ölçüm için karşılıklı olarak 4 adet yerleştirilmiştir.




Şekil 3.14. Trapez çevirme kolu ve yük hücresi.

Kubbenin tepe noktasının hemen altında, dairesel profilin sonsuz dişli kısmına 8 boşluğu olan çelik bir halka yapılmıştır ve bu halkaların ucuna Şekil 3.15'te görüldüğü gibi 8 tane çelik çubuk cıvata ve somun yardımıyla yerleştirilmiştir.




Şekil 3.15. Çelik halka ve sekiz tane çelik çubuk.

Aşağıdaki Şekil 3.16'da görüldüğü şekilde dairesel profilin alt kısmına 8 tane kolu olan çelik halka profil yerleştirilmiştir. Bu 8 tane profilin uçlarına 2x2x30 cm boyutlarında kutu profiller birbirine geçirilerek somun ile sabitlenmiştir. Çelik halkanın altındaki sistemin aşağıya doğru kaymasını engellemek için somun kullanılmıştır.



Şekil 3.16. 8 tane kolu olan çelik halka profil.

Kubbenin üst kısmından 45° açıyla gelen çelik çubuklar lineer ray arabasının üst kısmına somun ve cıvata ile sabitlenmiştir. Lineer ray arabasının alt kısmında daha önce bahsedilen kutu profiller bulunmaktadır. Lineer ray arabası ile kutu profiller birbirine kaynak yardımıyla birleştirilmiştirler. Lineer ray arabasını Şekil 3.17'de görüldüğü gibi çelik kasnak profilin altına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.17. Lineer ray arabası.

Deney düzeneğinde kubbenin üstündeki trapez çevirme kolu saat yönünün tersine döndürüldüğünde çelik halka ve 8 tane çelik çubuk aynı oranda aşağıya doğru hareket etmektedir. Bu çelik çubukları lineer ray arabasını aynı oranda itme kuvveti uygulayacaktır. Lineer arabanın üstünde bulunan kasnak profili ve kubbenin itilen yöne doğru hareketi sonucunda kubbemizde istenen hasarlar elde edilmiştir.

3.2.5 Kubbe örme işlemi

Kubbeyi örmek için yapı malzemesi olarak taş ve harç kullanılmıştır. Harç için tarihi yapılarda kullanılan horasan harcı seçilmiştir. Horasan harcı hacimsel olarak % 40 kireç, % 40 taş tozu ve % 20 ince kumun su ile karıştırılmasıyla yapılan bir harç türüdür. Horasan harcı yığma birimleri bağlamak için kullanılmıştır. Taş malzemesi olarak 25x15x10 cm^3 boyutlarında, dayanımı yüksek olan Kayseri ilinin tüf taşı seçilmiştir. Kubbe örümünde beton kasnak üzerine yaklaşık ıslatılmış tüf taşları harç yardımıyla yerleştirilmiştir. Kubbe için 7 sıra taş örülmüştür. Bu taşların boyutları her sırada farklılık göstermektedir.



Şekil 3.18. Kubbe örümü.

Kubbenin örme işlemi bittikten sonra kubbenin çevresine 25x15x10 cm^3 boyutlarında 2 sıra taş örülerek kubbenin kasnağı tamamlanmıştır (Şekil 3.19). Kubbe ile kasnak arasındaki boşluk dolgu malzemesi ile doldurulmuştur. Dolgu malzemesi olarak kırma taş ve horasan harcı kullanılmıştır (Şekil 3.20). Şekil 3.21'de görüldüğü gibi kubbe ile kasnak arası doldurulmuştur.



Şekil 3.19. Kubbe kasnağının örülmesi.



Şekil 3.20. Kubbe kasnağındaki dolgu malzemeleri.



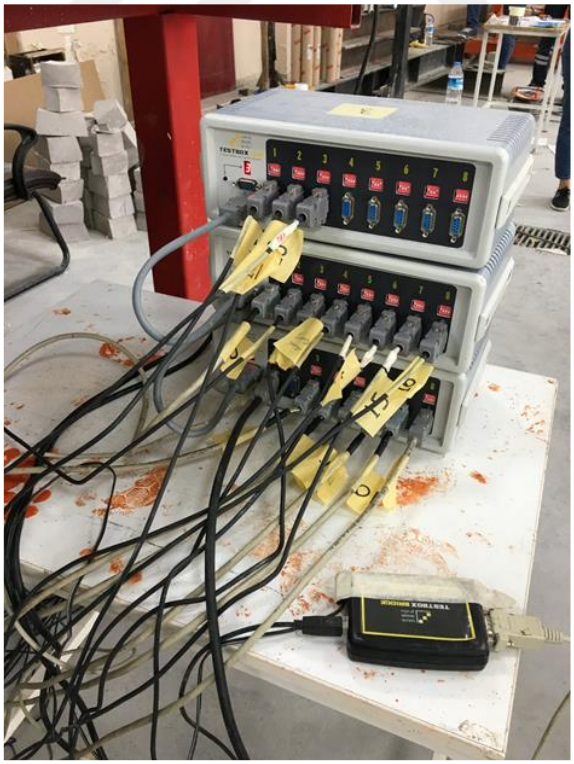
Şekil 3.21. Kubbe kasnağı dolgusu.

3.2.6 Ölçüm aparatları ve yerleştirilmesi

Deneyde kubbedeki deplasmanları ölçebilmek için kullanılan LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ölçüm aleti aşağıdaki Şekil 3.22'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Kubbe deneylerinde meydana gelen boy kısalma ve uzamalarının ölçümleri LVDT dönüştürücüleri ile ölçülmüştür. LVDT'ler, merkez milinin ileri geri hareketi sonucu belirli bir gerilim üretmektedir. LVDT'ler sayesinde 0,01 mm hassasiyet ile okuma yapılabilmektedir. Veri toplama cihazı yük hücresi, LVDT, gerinim ölçer (Strain Gauge)'den gelen verileri saniyede 250 data olarak kaydedip bu verileri bilgisayara aktarmaktadır (Şekil 3.23).



Şekil 3.22. LVDT yerleştirilmesi.



Şekil 3.23. Veri toplama cihazı.

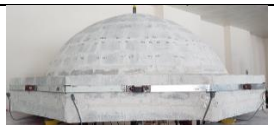
3.3 Yapılan Deneyler

Kubbe örme işleminde taş olarak dayanımı yüksek Kayseri yöresine ait tüf taşı seçilmiş olup bağlayıcı malzeme olarak horasan harcı kullanılmıştır. Kubbe örme işlemi tamamlandıktan sonra kubbe dayanımını alması için 28 gün beklenmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Kubbenin kısımları.

Deney isim kodlamasında "E" harfi deneysel yapıldığını göstermektedir. "Ref" ifadesi kubbe deneyinin referans deney olduğunu belirtmektedir. "C" kubbe deneyinde dikiş yönteminin uygulamasını ifade etmektedir. M harfi ise deneyde tamir harcının kullanıldığını göstermektedir. İsimlendirmede P harfi kubbede FRP uygulamasını göstermektedir. S harfi kubbede eteğini ifade etmektedir. D harfi kubbenin kasnağını göstermektedir. R harfi çekme çemberini olduğunu belirtmektedir (Şekil 3.25).

Deney kodu	Deney Adı	Açıklama	Deney Numunesi
ERef	Referans Deneyi	Güçlendirme yöntemi kullanılmadı	
EC	Dikiş Yöntemi Deneyi	Kenetler kullanılarak güçlendirme	
EM	Tamir Harcı Deneyi	Tamir harcı kullanılarak güçlendirme	
EPD	FRP Kasnak Deneyi	Kasnak hizasına FRP sarılarak güçlendirme	
EPS	FRP Etek Deneyi	Etek hizasına FRP sarılarak güçlendirme	
EPDS	FRP Etek ve Kasnak Deneyi	Kasnak ve Etek hizasına FRP sarılarak güçlendirme	
ERS	Çekme Çemberi Etek Deneyi	Etek hizasına çekme çemberi sarılarak güçlendirme	
ERD	Çekme Çemberi Kasnak Deneyi	Kasnak hizasına çekme çemberi sarılarak güçlendirme	
ERSD	Çekme Çemberi Etek ve Kasnak Deneyi	Kasnak ve Etek hizasına çekme çemberi sarılarak güçlendirme	

Şekil 3.25. Yapılan deney isimleri ve kodlamaları.

3.3.1 ERef numunesi (Experimental reference)

ERef güçlendirme teknikleri kullanılmadan klasik kubbe formunda imalat yapılmış olup referans deney olarak kabul edilmiştir. Referans numunenin yapılış aşamaları 3.2.5 Kubbe örme işlemi başlığı altında anlatılmıştır. Aşağıda Şekil 3.26'da ERef deney numunesinin görülmektedir.



Şekil 3.26. ERef deney numunesi.

3.3.2 EC numunesi (Experimental clamp)

Dikiş yöntemi, kubbede 8 mm'den büyük düşey çatlaklar için uygulanan güçlendirme yöntemidir (Mahrebel, 2006). Bu yöntemde paslanmaz çelik kenet kullanılması gerekmektedir. Çatlağın sağındaki ve solundaki taşlar 5 cm mesafe bırakılarak matkap yardımıyla delinmiş ve deliklerin içinde kalan tozlar hava püskürtme tabancasıyla temizlenmiştir. Taşta delik açılan bölümlere önce kenetler yerleştirilmiş, daha sonra kalan boş kısımlar hazırlanan tamir harcı ile doldurulmuştur. Tamir harcının özellikleri Bölüm 1.5.2.'de verilmiştir. Yapılan bu işlemler aşağıdaki Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de sırasıyla verilmektedir.

EC deney numunesinde paslanmaz çelik kenetlerde meydana gelen gerilmelerin kaydedilebilmesi amacıyla üzerlerine çekme gerilmesi doğrultusunda birer tane gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Bu numunede toplamda 5 adet kenet kullanılmıştır. EC deney numunesinin görünüşü Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.27. Kubbe taşının delinmesi ve tamir harcının doldurulması.



Şekil 3.28. Dikiş yönteminin uygulanması.



Şekil 3.29. EC deney numunesi.

3.3.3 EM numunesi (Experimental mortar)

EM kubbe deneyinde önceden hasar verilmiş olan numunedeki çatlaklar (MasterEmaco S 285 TIX) tarihi yapılar için geliştirilmiş, puzolanik kireç esaslı, çimento içermeyen, yüksek mukavemetli, tiksotropik onarım harcı ile doldurulmuştur. Tamir harcı ile tamamlanan derzler Şekil 3.30'da işaretlenmiştir. Tarihi yapı onarım harcının basınç dayanımı 15-20 N/mm^2 'dir.



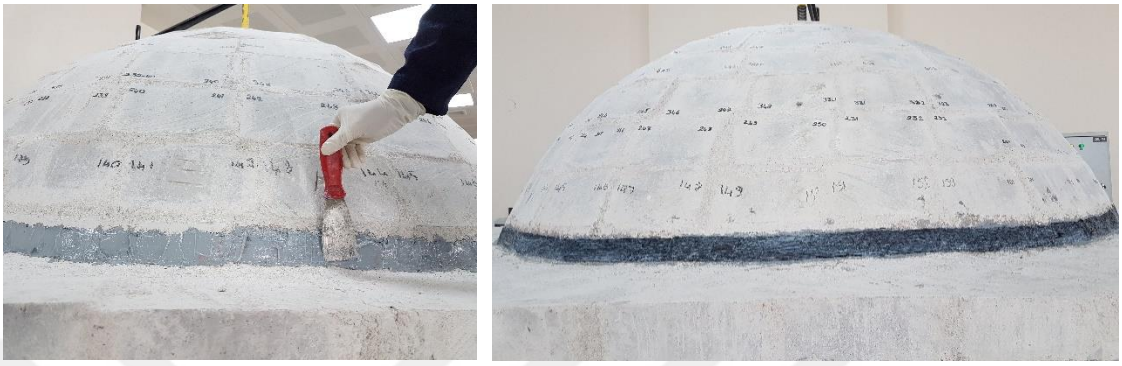
Şekil 3.30. EM deney numunesi ve tamir harcı uygulanan bölgeler.

3.3.4 EPS numunesi (Experimental polimer skirt)

Kubbelerde uygulan güçlendirme yöntemlerinden bir diğer de Lif Takviyeli Polimer (FRP)'dir. Kubbelerde içten veya dıştan FRP bant uygulanabilmektedir. FRP bant uygulamalarında güçlendirme araçları, bölgesel ve/veya yüzeysel olarak doğrudan elemanların üzerine yerleştirilip, elemanların dayanımını artırmaktadır.

Yapılan EPS deneyinde onarım/güçlendirme malzemesi olarak FRP kullanılmıştır (Şekil 3.31). EPS deney numunesinin görünüşü Şekil 3.32'de verilmiştir.

FRP kubbe eteği hizasından sarılmış olup, gerilme ölçümü almak amacıyla 4 adet gerinim ölçer kubbe eteği üstüne sarılan FRP üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.31. Kubbenin etek hizasına FRP uygulaması.



Şekil 3.32. EPS deney numunesi.

3.3.5 EPD numunesi (Experimental polimer drum)

FRP bantların kasnağa sarılabilmesi için 50 mm genişliğinde, 9450 mm uzunluğunda kesilmiştir. FRP bant uygulanacak yüzeye 2 bileşenli epoksi uygulaması yapılmış olup epoksi sürülen yüzeye FRP bant sarılmıştır (Şekil 3.34).

Kubbede FRP bant uygulaması Şekil 3.33'de gösterilmiştir. Hazırlanan numunede FRP kubbe kasnağı hizasından sarılmış olup, 8 tane gerinim ölçer FPR'nin kasnak köşesine yakın yerlerine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.33. Kubbede FRP bant uygulaması.



Şekil 3.34. EPD deney numunesi.

3.3.6 EPSD numunesi (Experimental polimer skirt and drum)

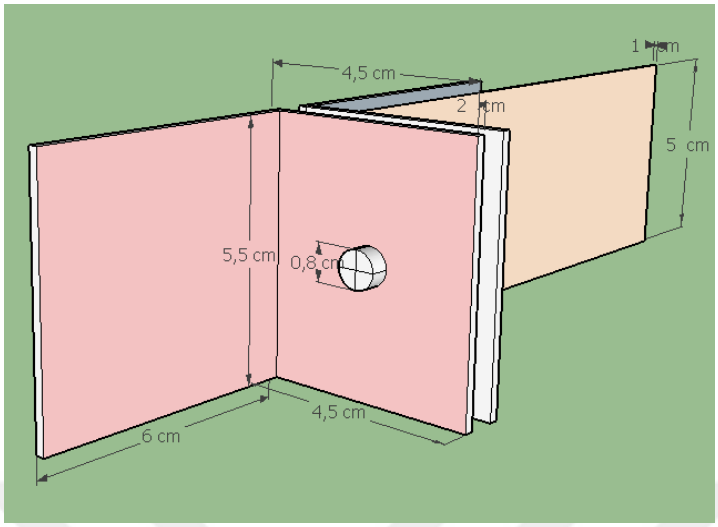
Hazırlanan numune, FRP hem kubbe kasnağından hem de kubbenin etek hizasından sarılmıştır. EPSD numunesinde 4 adet etek hizasından, 8 adet de kasnak hizasından olmak üzere toplamda 12 adet gerinim ölçer ölçüm için yerleştirilmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. EPSD deney numunesi.

3.3.7 ERS numunesi (Experimental ring skirt)

Kubbeler; düşey yükler, mesnet çökmeleri, deprem gibi etkiler nedeniyle hasar görmektedirler. Kubbede oluşan hasarları gidermek için kullanılan onarım ve güçlendirme yöntemlerinden bir tanesi de çekme çemberi uygulamasıdır. Çekme çemberi uygulamasıyla, kubbede oluşan çekme gerilmeleri önemli miktarda azalmakta ve kubbe yüzeyinde daha düzgün bir gerilme dağılışı görülmektedir. Çekme çemberi St-37 çelik sacından en kesiti (1x50) mm boyutlarında yaptırılmıştır. Birleşimlerde M08 yüksek mukavemetli bulonlar kullanılmıştır. Bulonların sıkılması neticesinde çekme çemberinin boşluğu alınarak bir miktar öngerilme verilmiştir. Çekme çemberine ilişkin bazı imalat detayları Şekil 3.36'da verilmiştir.





Şekil 3.36. Çekme çemberi imalat detayları.

Etek hizasına sarılan çekme çemberinin üzerine karşılıklı 4 adet gerinim ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.37). Bu ölçüm işlemi yapılırken gerinim ölçer malzemesinin direnç değişimi hesaplanarak malzemenin uzama katsayısı ortaya çıkartılır.



Şekil 3.37. Kubbe eteğine çekme çemberi ve gerinim ölçer yerleştirilmesi.

3.3.8 ERD Numunesi (Experimental ring Drum)

Cami kubbelerinde oluşan radyal çatlakların nedeni kubbe eteğinde oluşan çekme gerilmelerinin taşınamamasıdır. Bu sebeple cami kubbelerinde oluşan çatlaklarda kubbenin genel stabilitesini sağlamak amacıyla, kubbe eteği kotunda çekme çemberi uygulaması yapılmaktadır. Çekme çemberi için paslanmaz çelik kullanılması önerilmektedir. Aksi durumda zaman içerisinde çekme çemberine korozyon bakımının yapılması gerekmektedir. Kubbenin etek hizasında sarılan çekme çemberinin üzerine 8 adet gerinim ölçer yerleştirilip ölçüm alınmıştır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38. ERS deney numunesi.

3.3.9 ERSD numunesi (Experimental ring skirt drum)

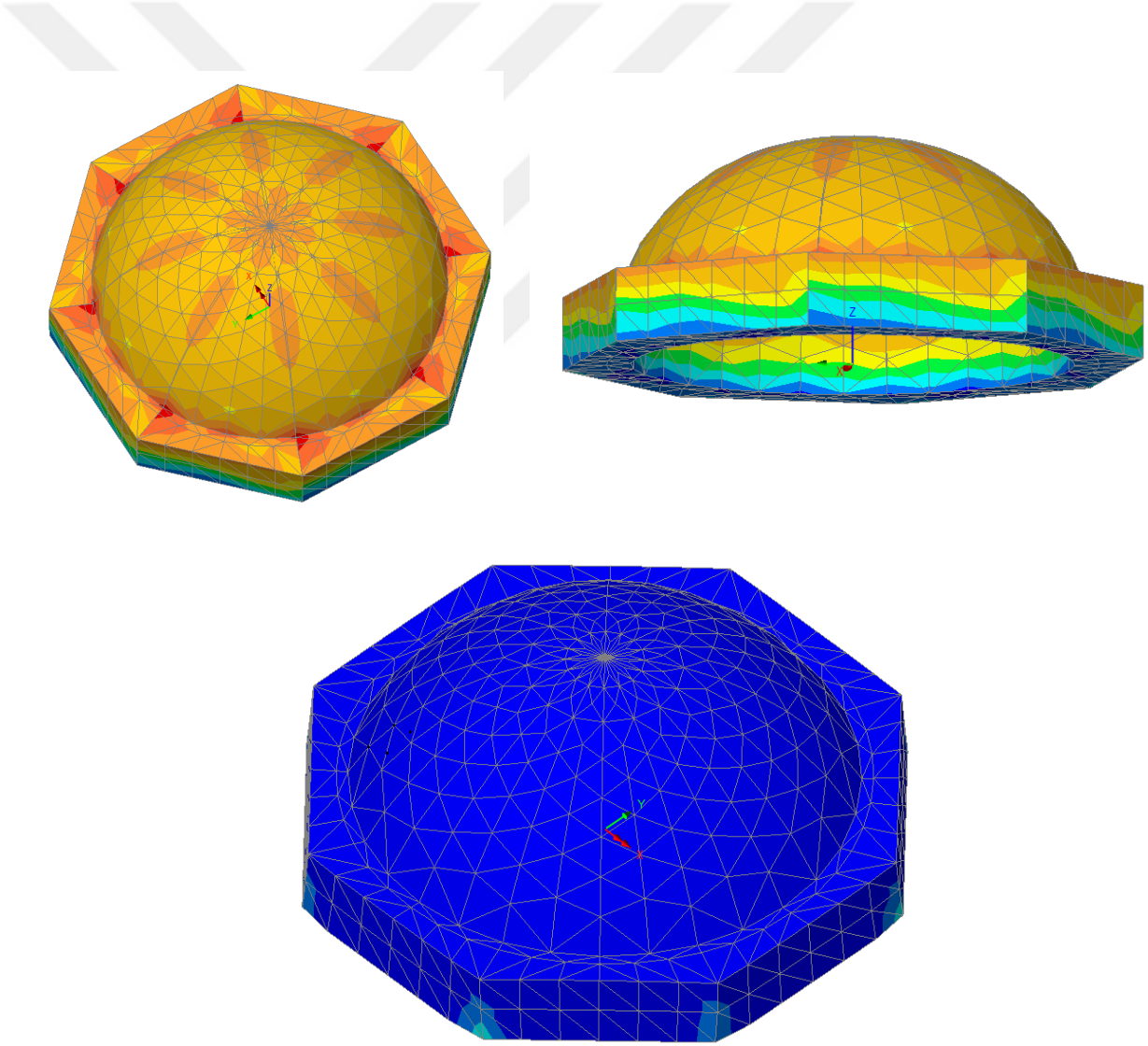
ERSD numunesi için çekme çemberi uygulaması hem kubbe kasnağından hem de kubbenin etek hizasından yapılmıştır. 4 tane etek hizasından 8 tane de kasnak hizasından olmak üzere toplamda 12 adet gerinim ölçer ölçüm almak için yerleştirilmiştir (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. ERSD deney numunesi.

3.4 Sonlu Elemanlar Modeli

Deneysel çalışmaları yapılan kubbelerin 3 boyutlu matematiksel modelini oluşturmak için sonlu elemanlar yöntemini esas alan LUSAS yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3.40). Modellemelerde her düğüm noktasında 3 serbestliği bulunan 10 düğüm noktalı üç boyutlu dörtyüzlü (tetrahedral) sonlu elemanlar kullanılmıştır. Modelleme yaklaşımı olarak makro modelleme tekniği kullanılarak doğrusal olmayan statik analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.13'te kubbenin l modellerinde kullanılan malzemelerin doğrusal ve doğrusal olmayan özellikleri verilmiştir.



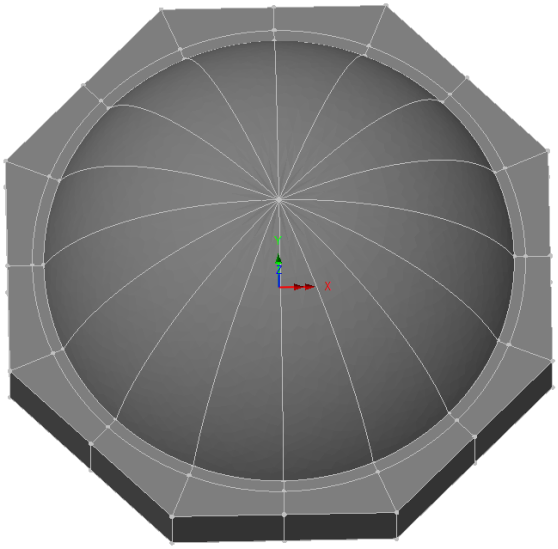
Şekil 3.40. Kubbenin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi.

Çizelge 3.13. Sayısal modellere ait tanımlanan malzeme özellikleri.

Malzemeler	Özellikler	Değerler
Yığma Duvar	Elastisite modulü (MPa)	1850
	Poisson oranı	0,2
	Kohezyon (MPa)	2,5
	İçsel sürtünme açısı	25
	Çekmede kohezyon eğimi	0,0
	Sürtünme geriliminin eğimi	0,0
	Plastik şekil değiştirme	0,001
Çekme Çemberi ve Kenet	Elastisite modulü (MPa)	203704
	Poisson oranı	0,3
	Tek eksenli akma gerilmesi (MPa)	275
	Çekmede pekleşme eğimi	212,1
	Plastik şekil değiştirme	1,0
FRP	Elastisite modulü (MPa)	234000
	Poisson oranı	0,3
	Çekme dayanımı (MPa)	4300
	Nihai çekme şekil değiştirmesi	0,018
	Plastik şekil değiştirme	1,0
Epoksi reçine yapıştırıcı	Elastisite modulü (MPa)	3800
	Poisson oranı	0,34
	Nihai çekme dayanımı (MPa)	30
	Nihai çekme şekil değiştirmesi	0,009

3.4.1 ERef Analizi (Analysis reference)

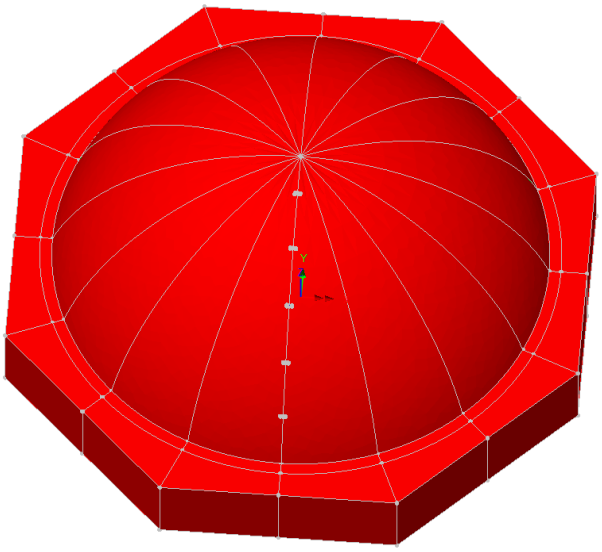
ERef analiz modelinin sonlu elemanlar modelini oluşturmak için 3464 eleman ve 1208 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. ERef analizi.

3.4.2 EC Analizi (Analysis clamp)

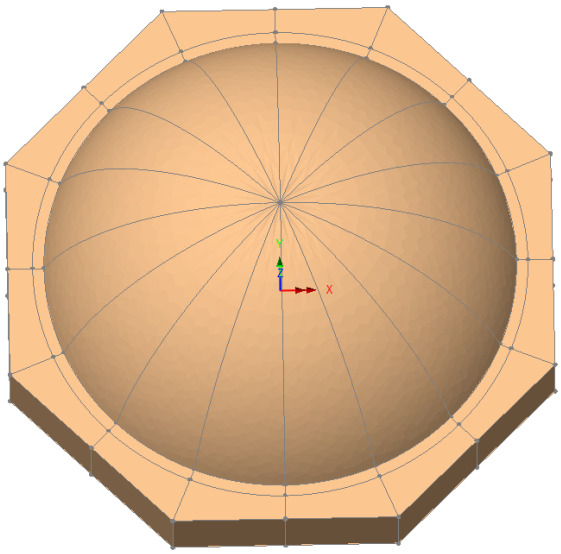
EC modelinin sonlu elemanlar analizinde 3503 eleman ve 1216 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.42).



Şekil 3.42. EC analizi.

3.4.3 EM Analizi (Analysis mortar)

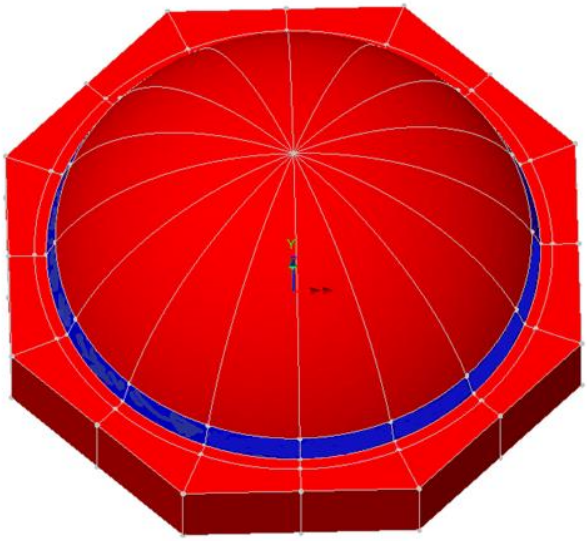
EM analizinin sonlu elemanlar modeli sonucunda 3464 eleman ve 1208 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.43).



Şekil 3.43. EM analizi.

3.4.4 EPS Analizi (Analysis polimer skirt)

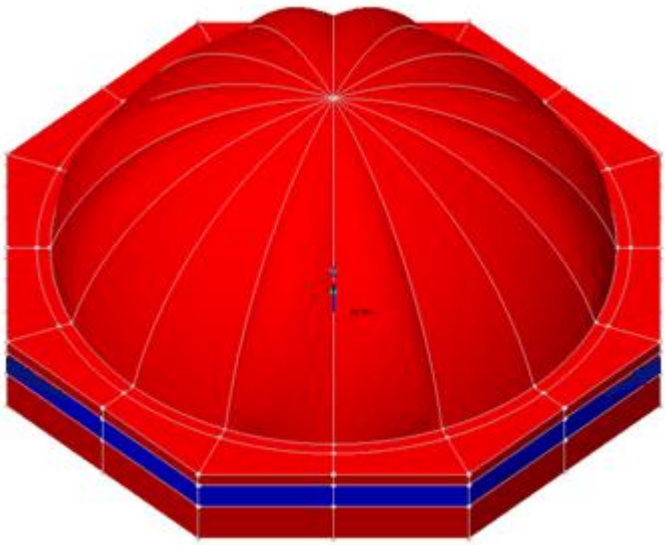
EPS sonlu elemanlar analiz modelinde 3608 eleman ve 1240 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.44).



Şekil 3.44. EPS analizi.

3.4.5 EPD Analizi (Analysis polimer drum)

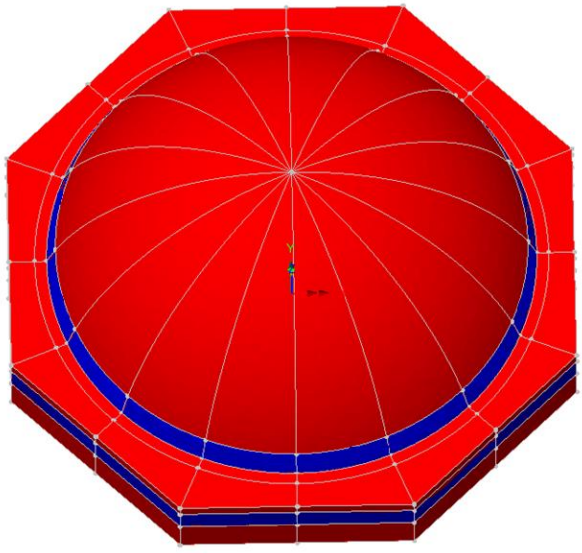
EPD analiz modelinin sonlu elemanlar modelinde 3468 eleman ve 1208 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.45).



Şekil 3.45. EPD analizi.

3.4.6 EPSD Analizi (Analysis polimer skirt and drum)

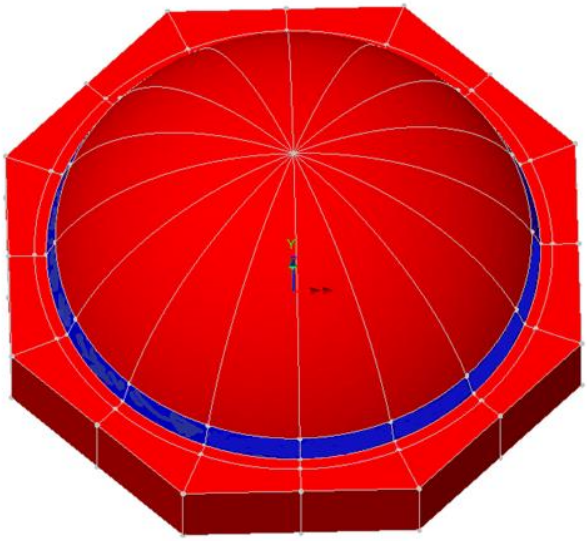
EPSD analizinin sonlu elemanlar analiz sonucunda 4396 eleman ve 1464 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.46).



Şekil 3.46. EPSD analizi.

3.4.7 ERS Analizi (Analysis ring skirt)

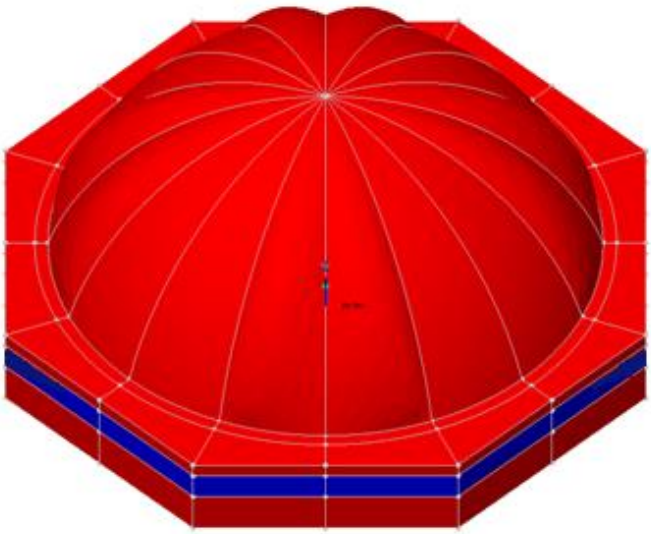
ERS analiz modelinin sonlu elemanlar analizine göre 3608 eleman ve 1240 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. ERS analizi.

3.4.8 ERD Analizi (Analysis ring drum)

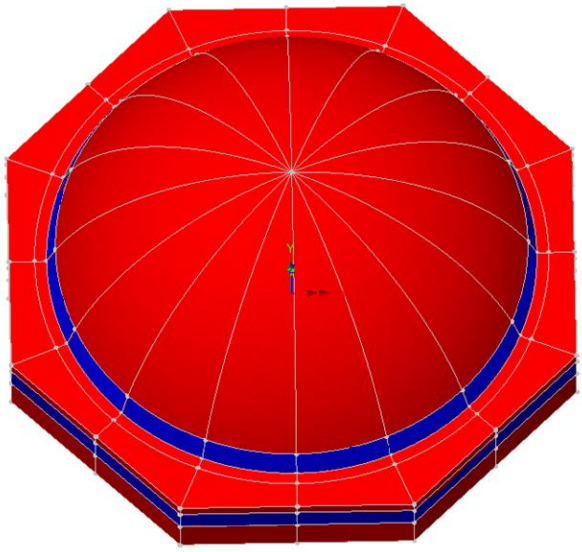
ERD analiz modelinin sonlu eleman modelinde 3468 eleman ve 1208 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.48).



Şekil 3.48. ERD analizi.

3.4.9 ERSD Analizi (Analysis ring skirt and drum)

ERSD analizi sonlu elemanlar analiz sonucunda 5860 eleman ve 1464 düğüm noktası kullanılmıştır (Şekil 3.49).



Şekil 3.49. ERSD analizi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

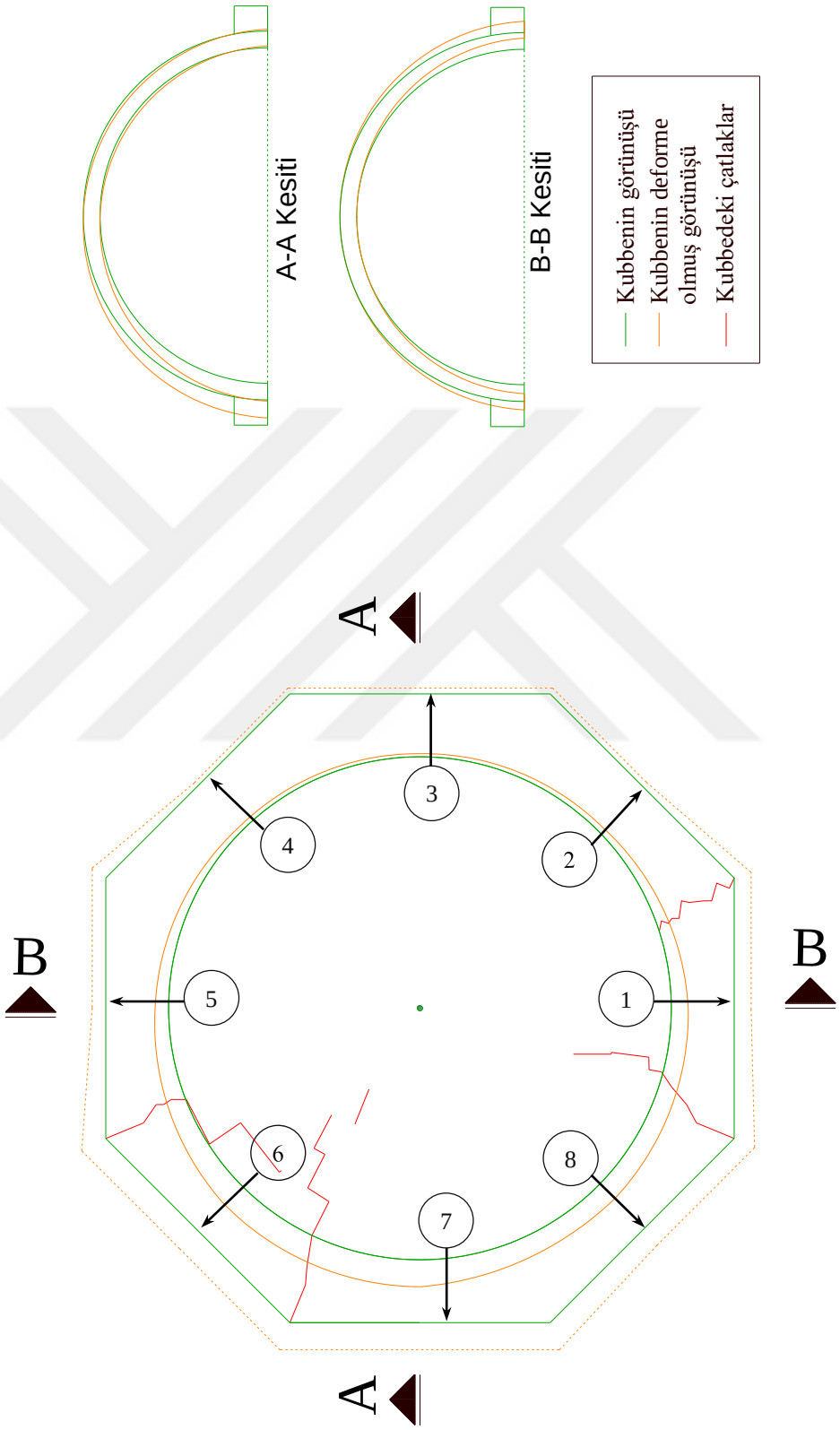
Yapılan deney ve analiz grafiklerinde deney sonucunda ortaya çıkan deplasmanların ortalamaları alınarak kullanılmıştır.

4.1 ERef Numune Sonucu

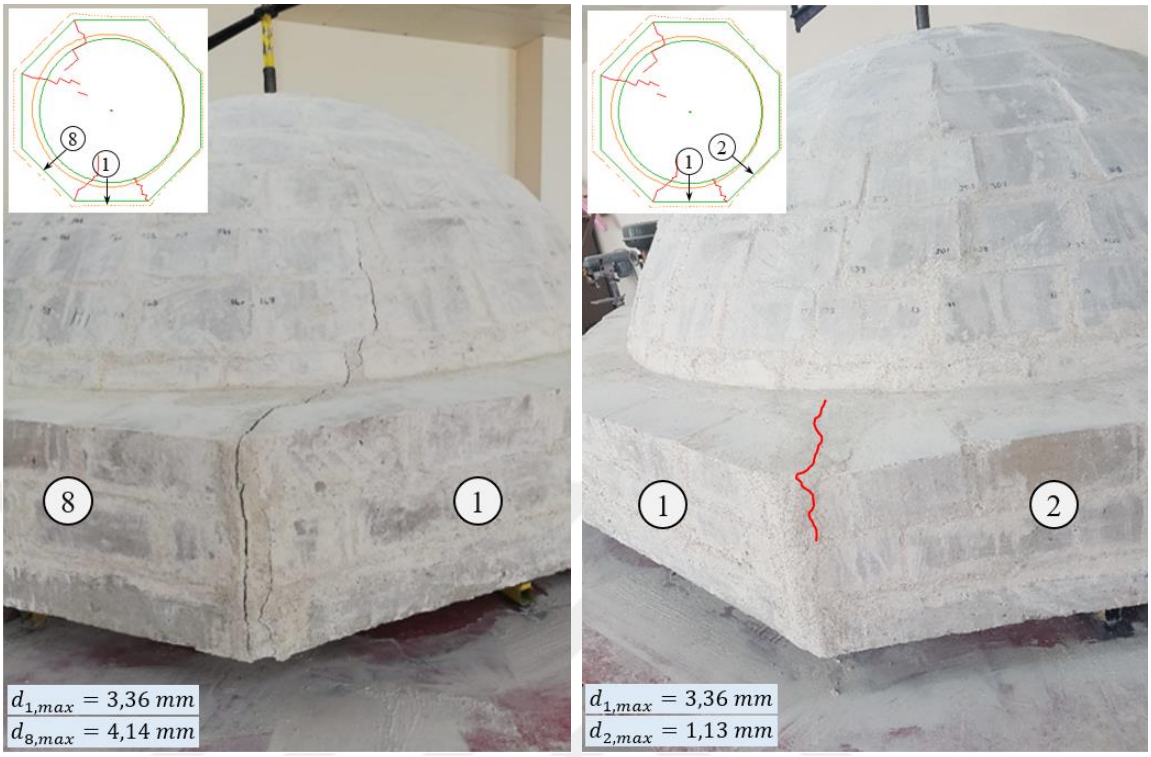
Gerçekleştirilen ERef deney sonucunda kubbe üzerinde meydana gelen çatlaklar Şekil 4.1'de kubbe referans yöntemi deformasyon eğrisinde verilmiştir. Meydana gelen çatlakların kubbenin kasnağından yukarıya doğru azalarak ilerlediği gözlemlenmiştir. ERef numunesindeki deney sonucuna göre kubbenin basınç ve çekme bölgelerinde 3 adet büyük, 2 adet küçük çatlak meydana gelmiştir.

İlk büyük çatlak kubbe deney düzeneğinin 6. ve 7. kolları arasında gelişmiştir (Şekil 4.4). Bu çatlak kubbe kasnağının köşesinden başlayarak kubbenin basınç bölgesine kadar ilerlemiştir. İkinci büyük çatlak kubbenin 5. ve 6. kolları arasında meydana gelmiştir. Aşağıdaki Şekil 4.3'de 5,08 mm ile meydana gelen çatlaklar görülmüştür. Üçüncü büyük çatlak 1. ve 8. kollar arasında oluşarak maksimum 4,14 mm deplasman ölçülmüştür. Bu kollar arasında oluşan çatlak kubbe kasnağının köşesinden başlayarak çekme bölgesine kadar ilerlemiştir (Şekil 4.2). ERef numunesi deney sonucunda iki tane küçük çatlak olmuştur. Bunlardan ilki maksimum 5,08 mm deplasman ile kubbenin 5. ve 6. kollar arasında oluşmuştur ve bu çatlak kubbe kasnağının köşesinde başlayıp etek hizasına kadar çıkmıştır (Şekil 4.3). İkincisi kılcal çatlak olup kubbenin 1. ve 2. kolları arasında 3,36 mm kadar deplasman yapmıştır (Şekil 4.2).

ERef deneyinde kubbede oluşan çatlaklar harçta meydana gelmiş olup taşlar üzerinde hasar oluşmamıştır. Yapılan deney sonucunda kubbe maksimum 0,92 kN yük taşımıştır ve en çok deplasman 5,38 mm ile 7. kol üzerine bağlanan LVDT 7'de ölçülmüştür. Aşağıda Şekil 4.5'den Şekil 4.12'ye kadar ERef numunesinin yük - deplasman grafikleri yer almaktadır. Aşağıda Şekil 4.13'te ERef numunesine uygulanan maksimum 0,92 kN yüke ulaştığında kubbedeki birim şekil değiştirme 0,00162 mm/mm olmuştur. Yükün artmasıyla kubbedeki çatlaklar açılmaya başlamıştır. Kubbedeki şekil değiştirme 0,00275 mm/mm olduğu zaman kubbede çatlaklar gözlenmiştir.



Şekil 4.1. ERef numunesi deformasyon eğrisi.



(a) (b)

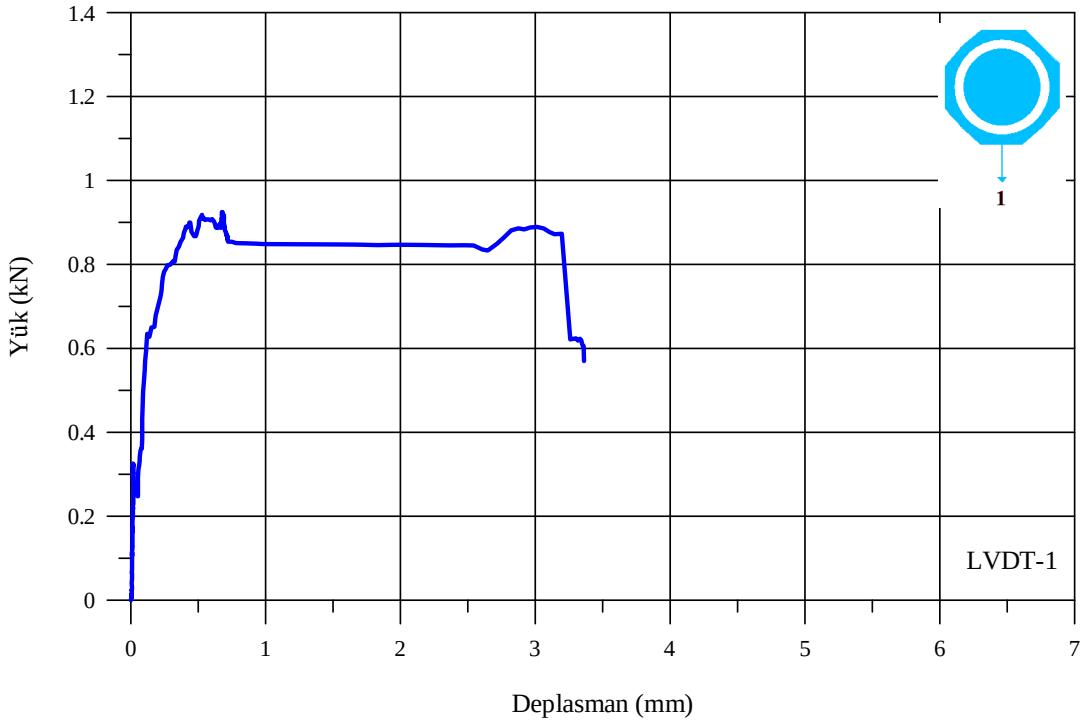
Şekil 4.2. ERef numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar.



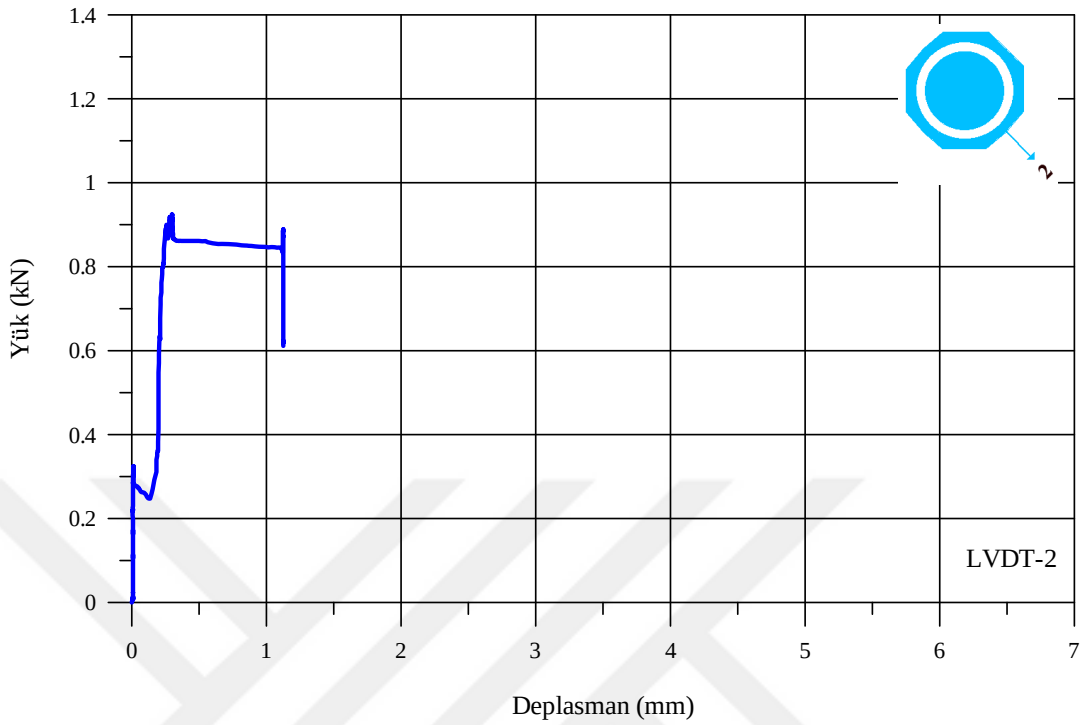
Şekil 4.3. ERef numunesinde 5. ve 6. kolları arasında oluşan çatlak.



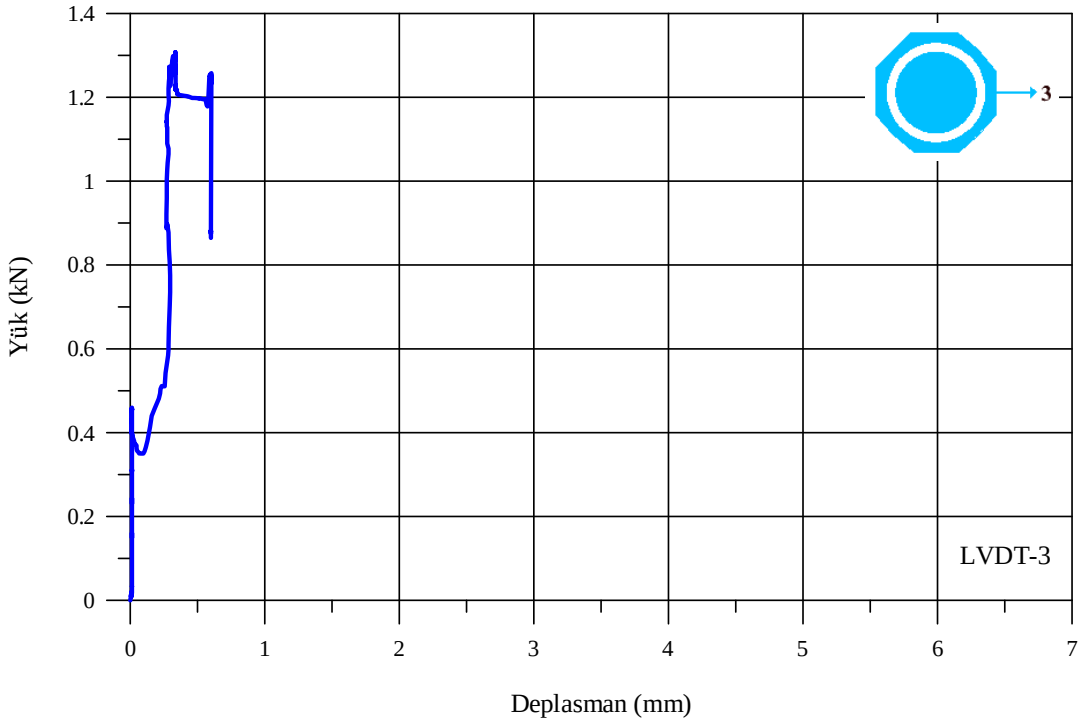
Şekil 4.4. ERef numunesinde 6. ve 7. kolları arasında oluşan çatlak.



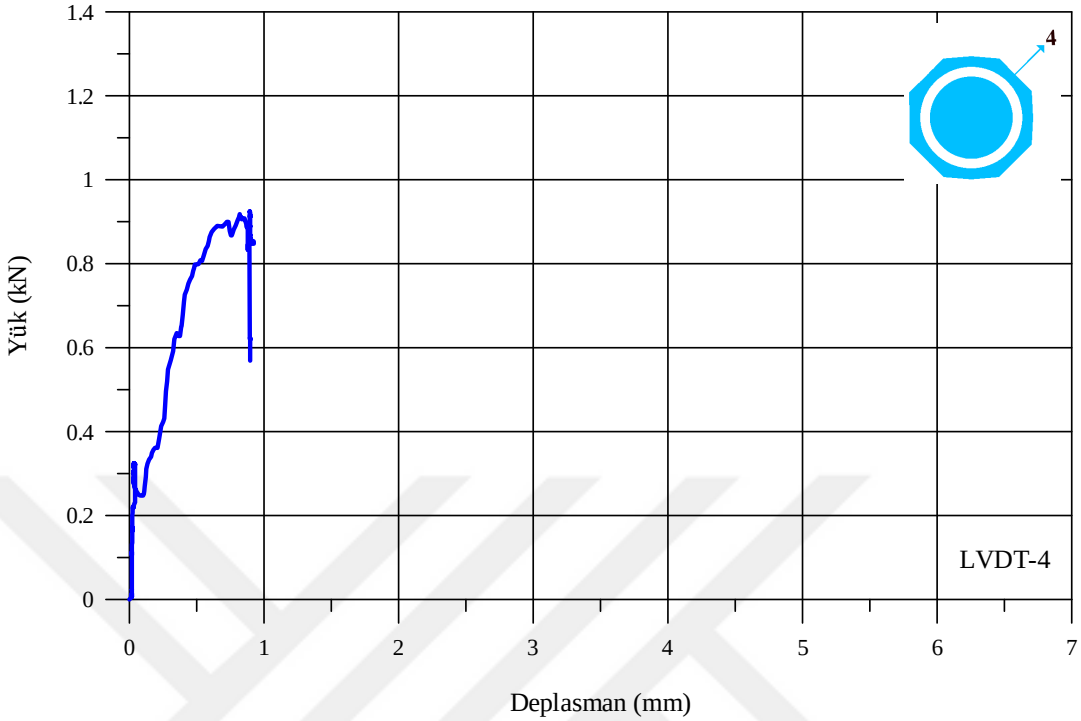
Şekil 4.5. ERef numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



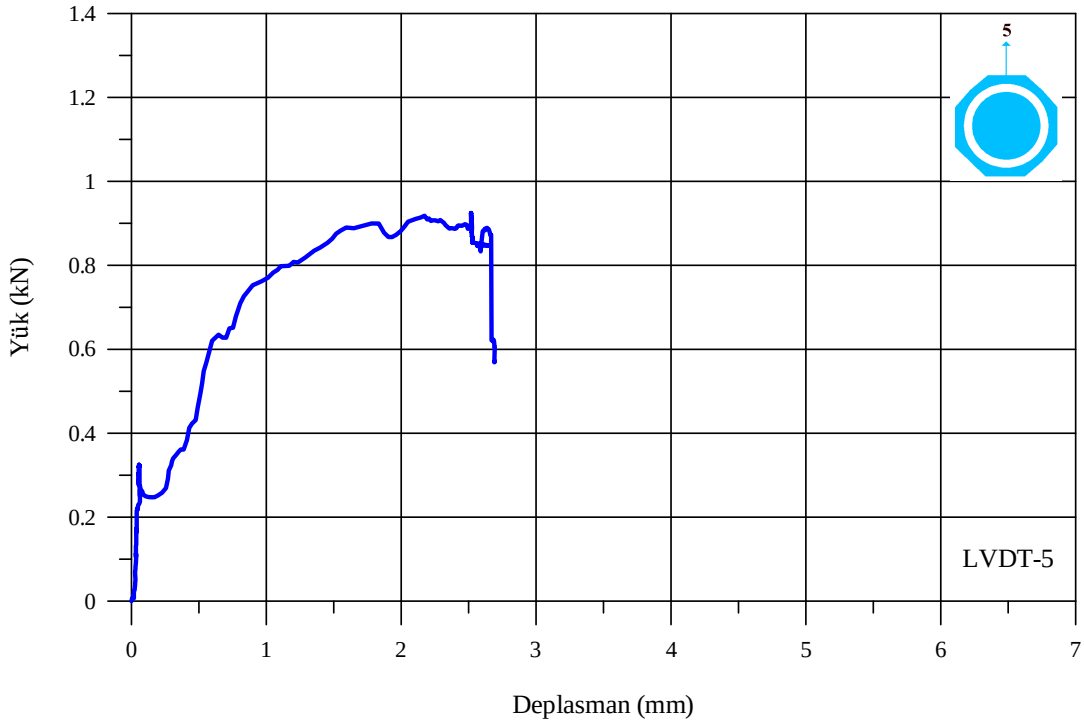
Şekil 4.6. ERef numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



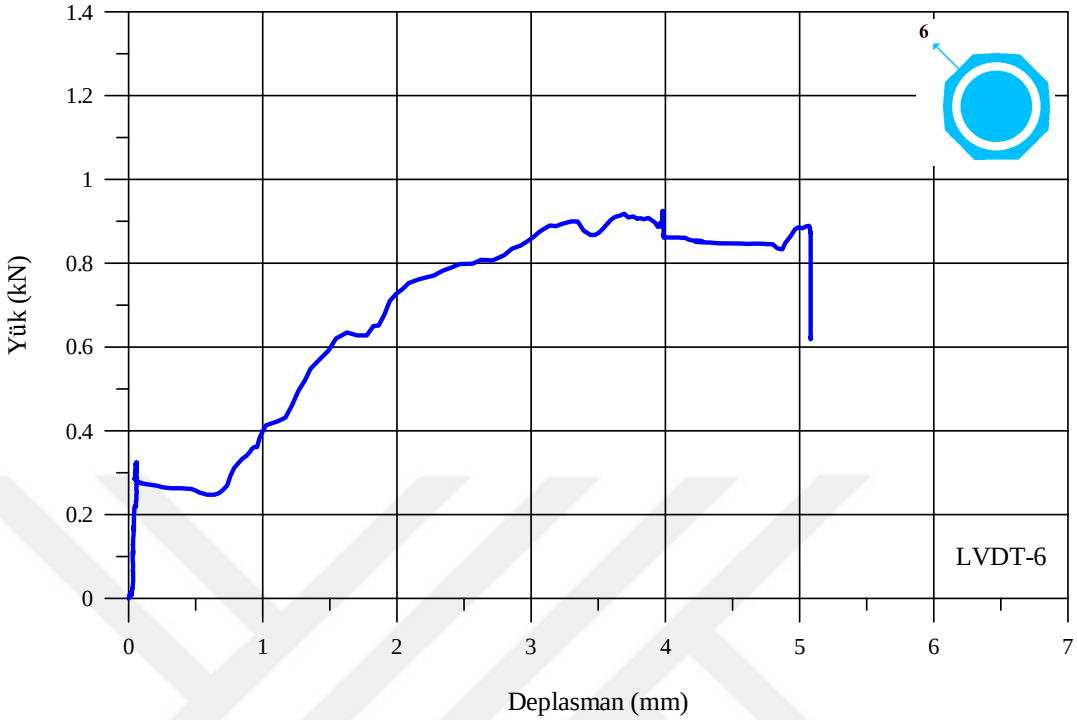
Şekil 4.7. ERef numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



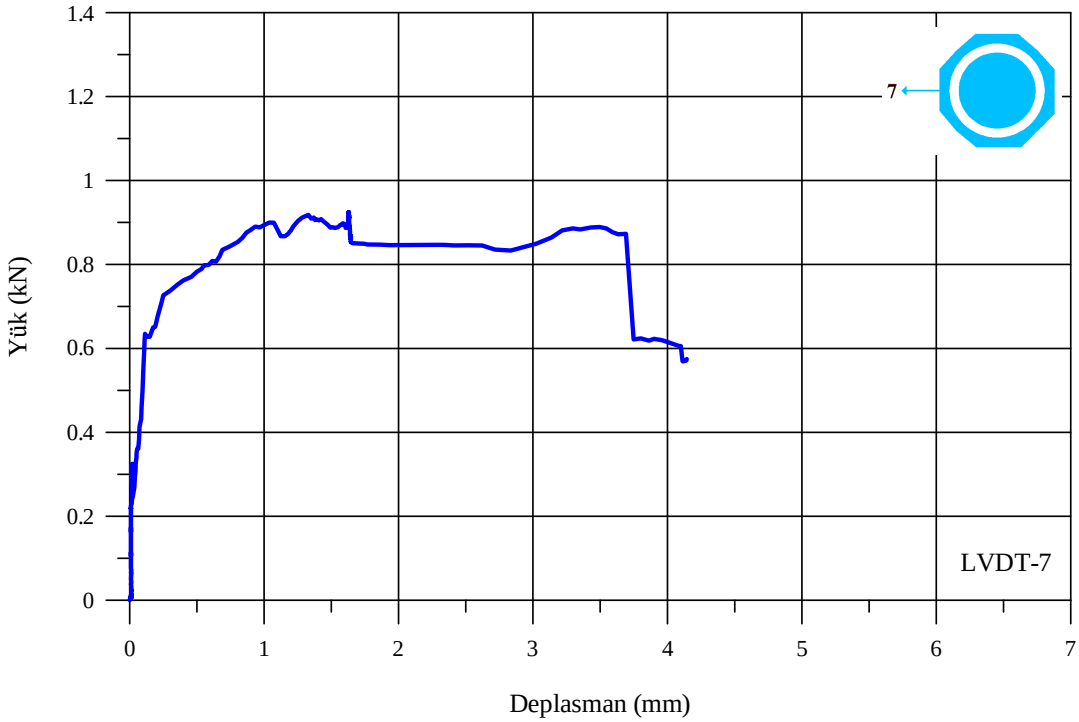
Şekil 4.8. ERef numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



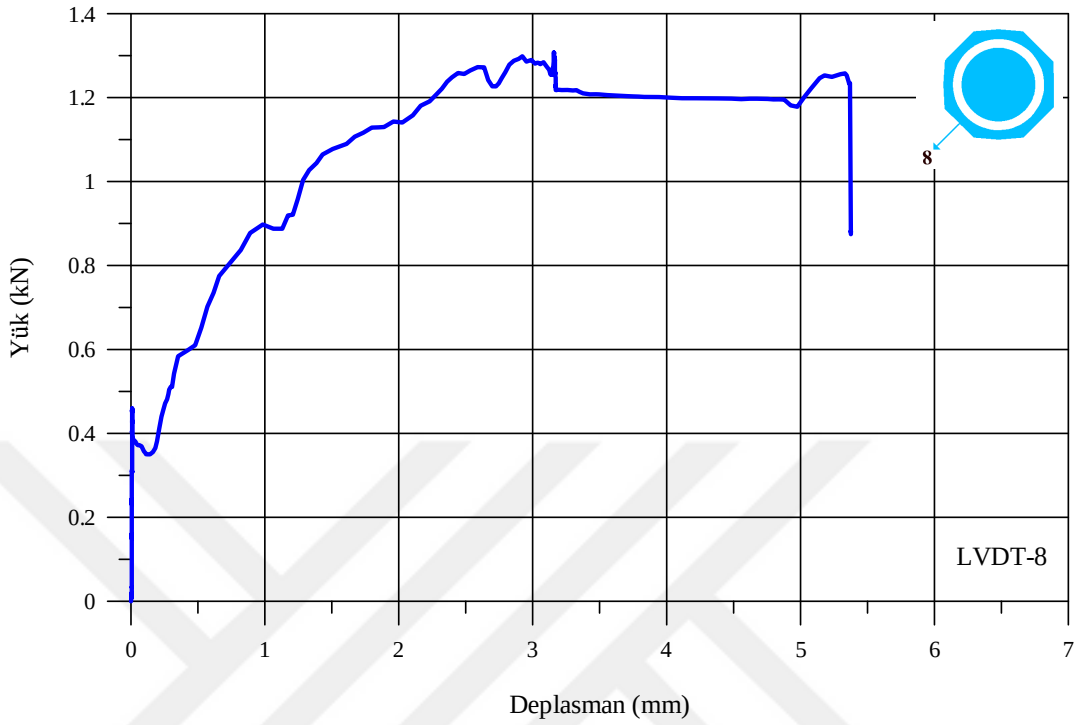
Şekil 4.9. ERef numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



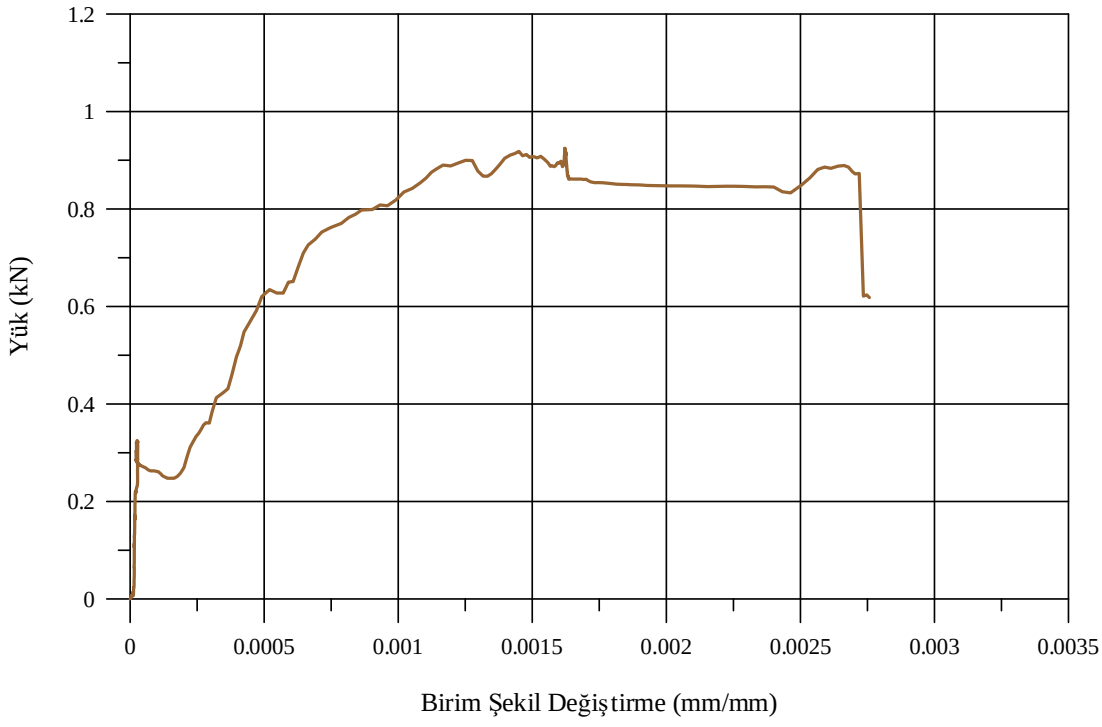
Şekil 4.10. ERef numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.11. ERef numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.12. ERef numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



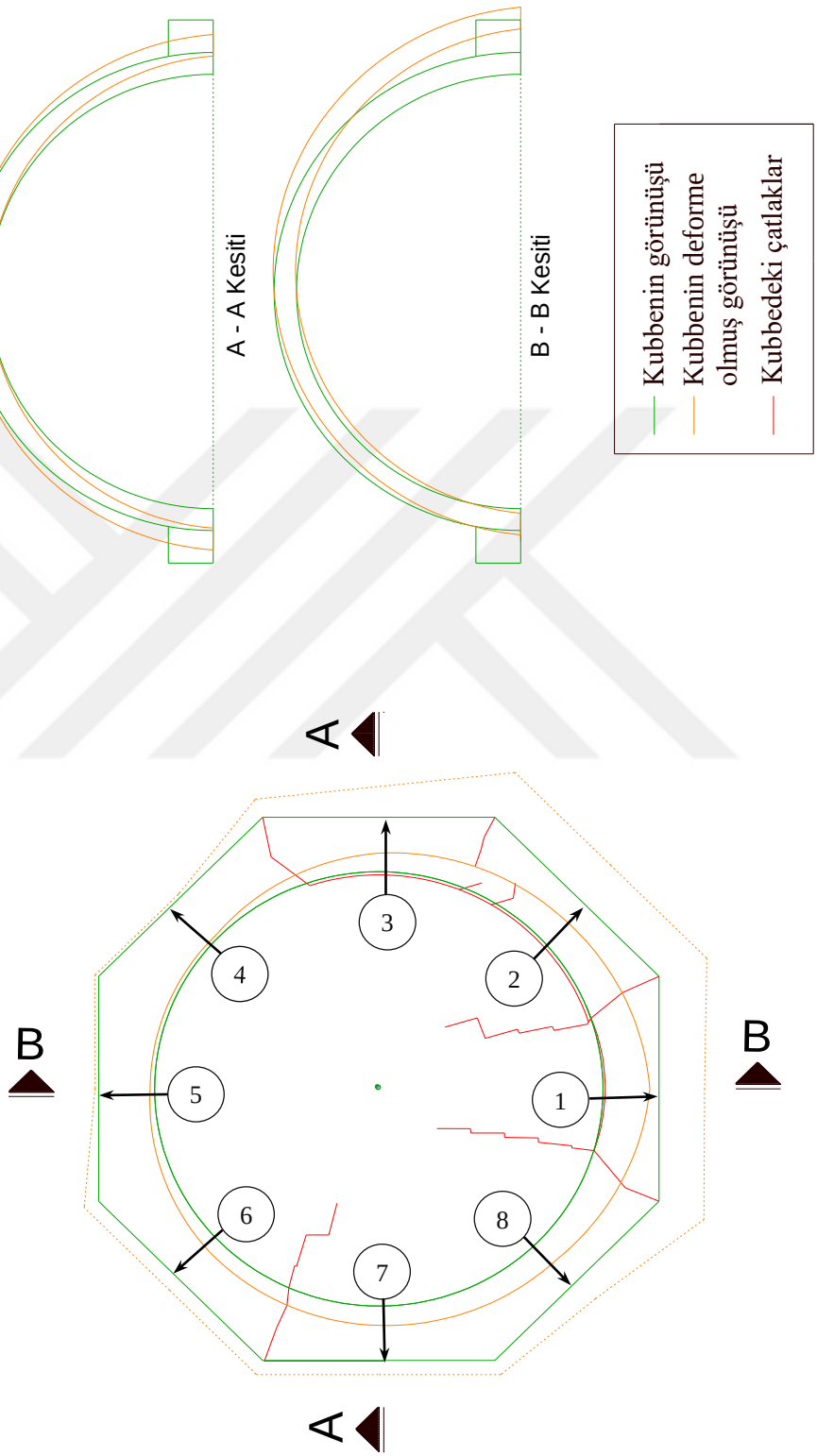
Şekil 4.13. ERef numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

4.2 EC Numune Sonucu

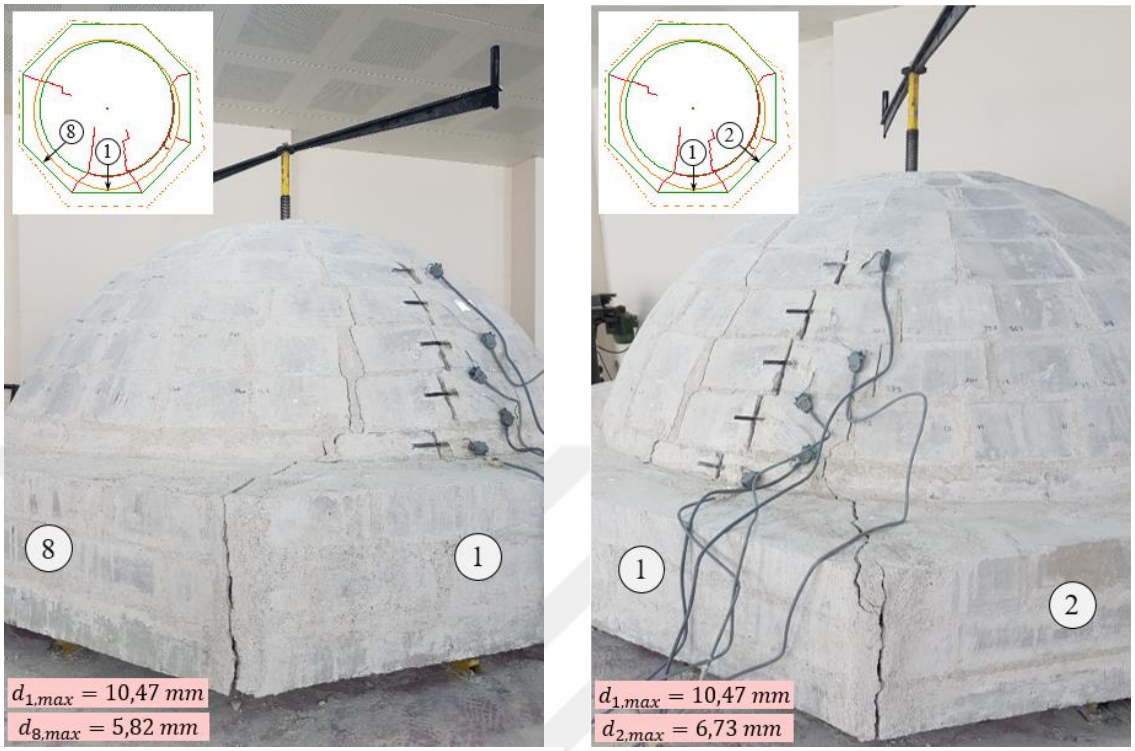
Kubbedeki çatlakları dikiş yöntemi ile güçlendirildikten sonra yapılan EC deneyinde en çok hasar dikiş atılan bölgenin sağında ve solunda olmuştur. Bu çatlaklar kubbenin üzerinde radyal şeklinde meydana gelmiştir. Kubbedeki çatlaklar harçta meydana gelerek taşlarda herhangi bir hasar görülmemiştir.

Deney sonucunda kubbe üzerinde oluşan çatlaklar Şekil 4.14'de EC deformasyon eğrisinde gösterilmiştir. En büyük çatlak deney düzeneğinin 1. ve 8. kolları arasında meydana gelmiştir. Bu çatlak beden duvarından başlayarak yukarıya doğru, basınç bölgesinin ortasına kadar ilerlemiştir. Bu kollar arasındaki en büyük deplasman 10,47 mm ile LVDT 1 ile oluşmuştur. İkinci büyük çatlak 1. ve 2. kollar arasında olup yine aynı şekilde beden duvarı ile basınç bölgesi arasında oluşmuştur. Aşağıda Şekil 4.15'te kubbe üzerindeki büyük çatlaklar görülmektedir. Üçüncü çatlak kubbenin 6. ve 7. kolları arasında 4,45 mm ile LVDT 7'de olup, kubbe çatlakları beden duvarından başlayarak çekme bölgesine kadar ilerlemiştir (Şekil 4.18). EC numunesi deney sonucunda 2. ve 3. kollar üzeninde beden duvarında küçük bir çatlak oluşmuştur (Şekil 4.16). Aşağıda Şekil 4.17'de görüldüğü gibi 3. ve 4. kollar arasındaki çatlak maksimum 4,16 mm deplasman ile LVDT 4 meydana gelmiş olup, bu kolların köşelerinden başlayarak etek hizasına kadar ilerlemiştir.

EC deney sonucunda elde edilen maksimum yük miktarı 0,36 kN, mesnetlerde meydana gelen maksimum yatay deplasman ise 10,47 mm ile LVDT 1'de ölçülmüştür. Aşağıda Şekil 4.19'dan Şekil 4.26'ya kadar EC numunesinin yük - deplasman grafikleri yer almaktadır. Aşağıda Şekil 4.27'de EC numunesine uygulanan maksimum yüke (0,36 kN) ulaşıldığında kubbedeki şekil değiştirme 0,00412 mm/mm olmuştur. Yükün artması ile kubbedeki çatlaklar da açılmaya başlamıştır. Kubbedeki birim şekil değiştirme 0,00438 mm/mm olduğunda 1. - 8., 1. - 2., ve 6. - 7. kollar arasında çatlaklar oluşmuştur. Aşağıda Şekil 4.28'de EC numunesi gerinim ölçerlerin (Strain Gauge) grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00019 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.

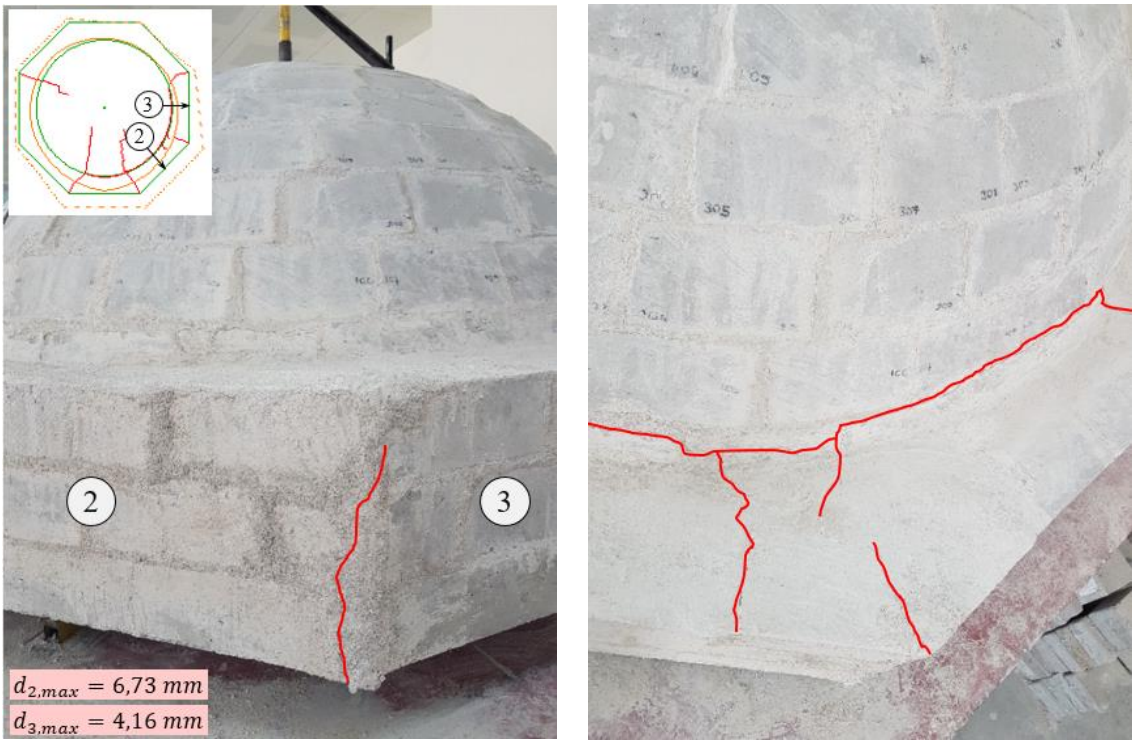


Şekil 4.14. EC numunesi deformasyon eğrisi.



(a) (b)

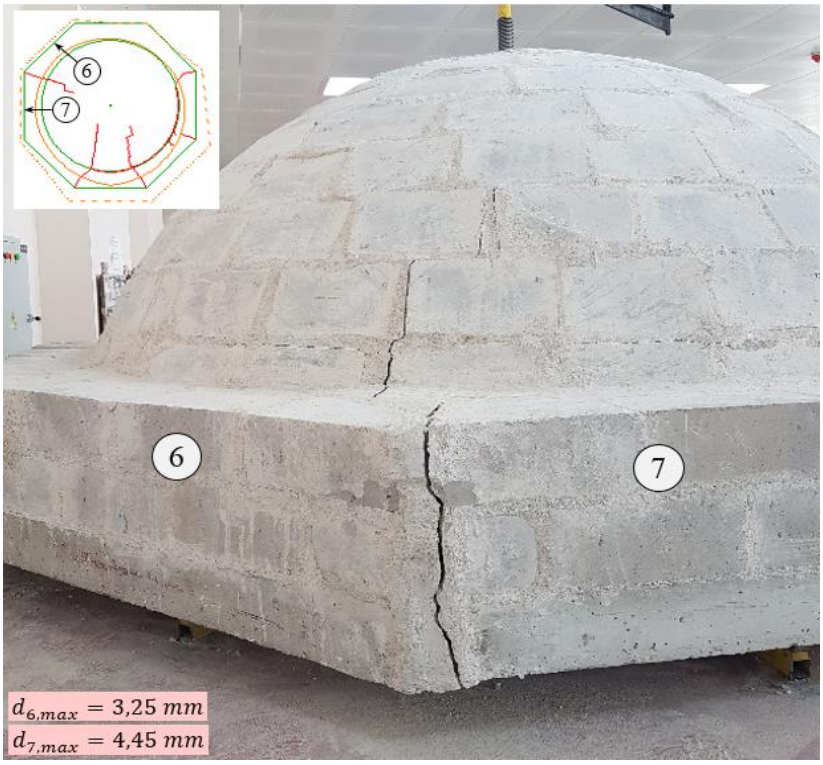
Şekil 4.15. EC numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar.



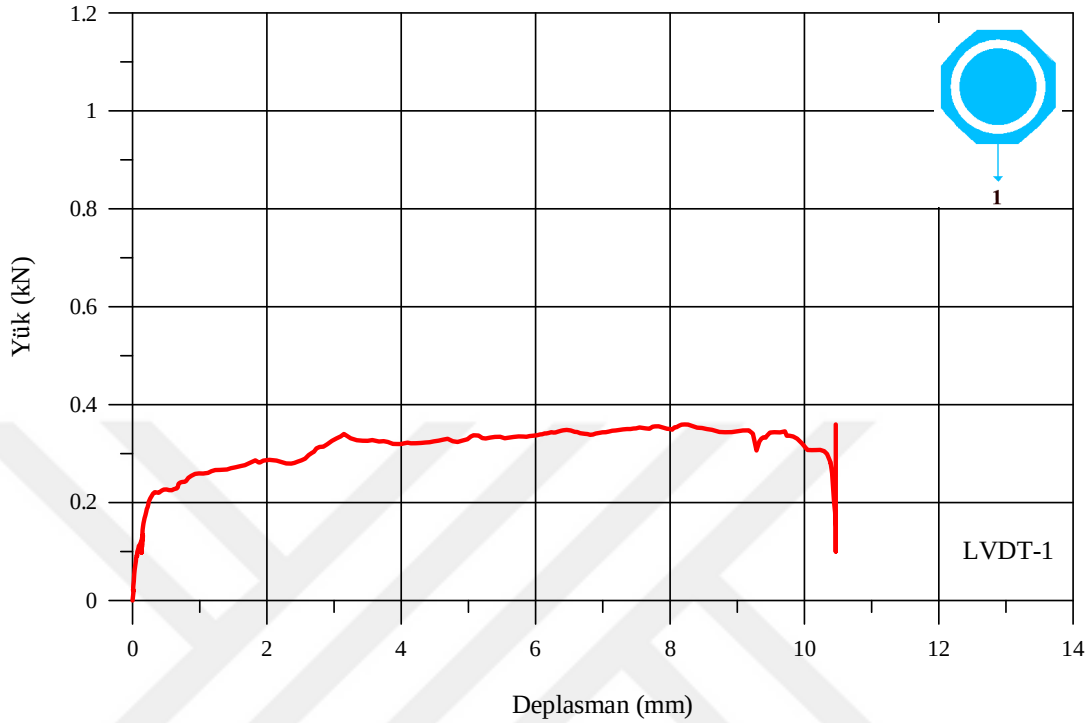
Şekil 4.16. EC numunesinin 2. ve 3. kolları arasında oluşan çatlaklar.



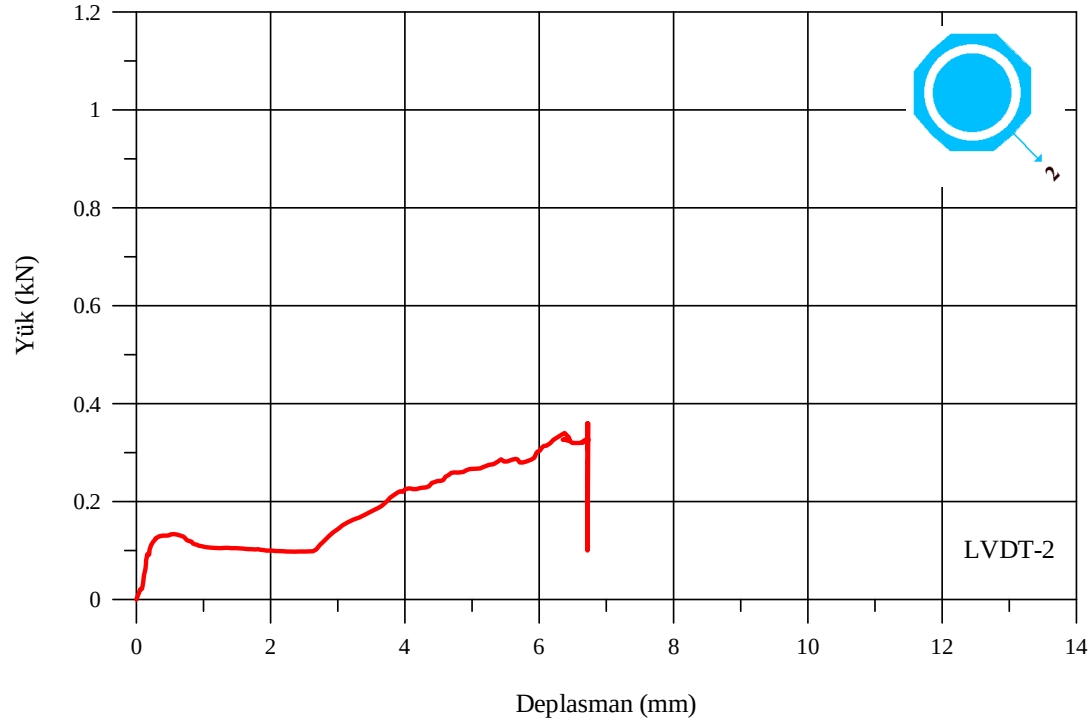
Şekil 4.17. EC numunesinin 3. ve 4. kolları arasında oluşan çatlaklar.



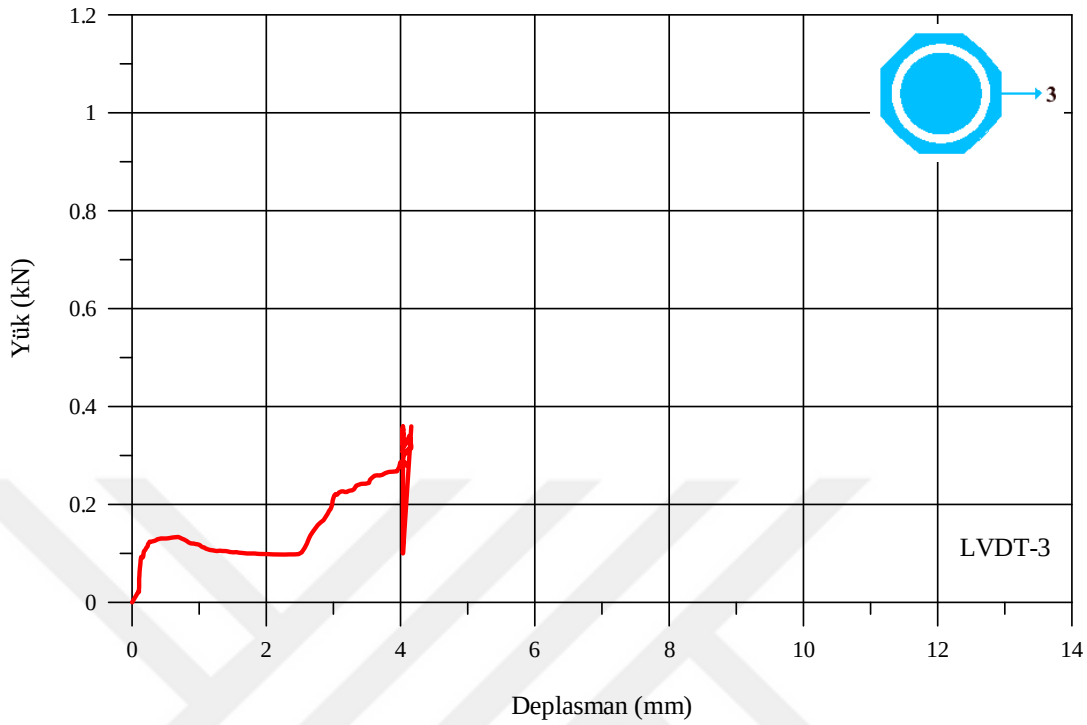
Şekil 4.18. EC numunesinin 6. ve 7. kolları arasında oluşan çatlaklar.



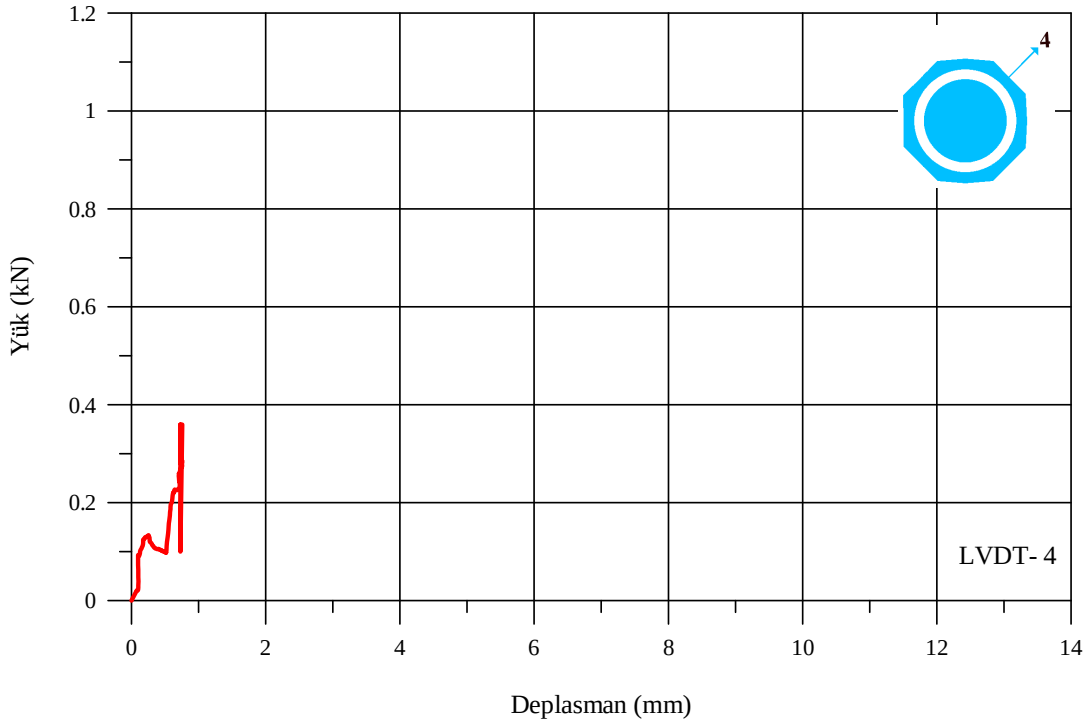
Şekil 4.19. EC numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



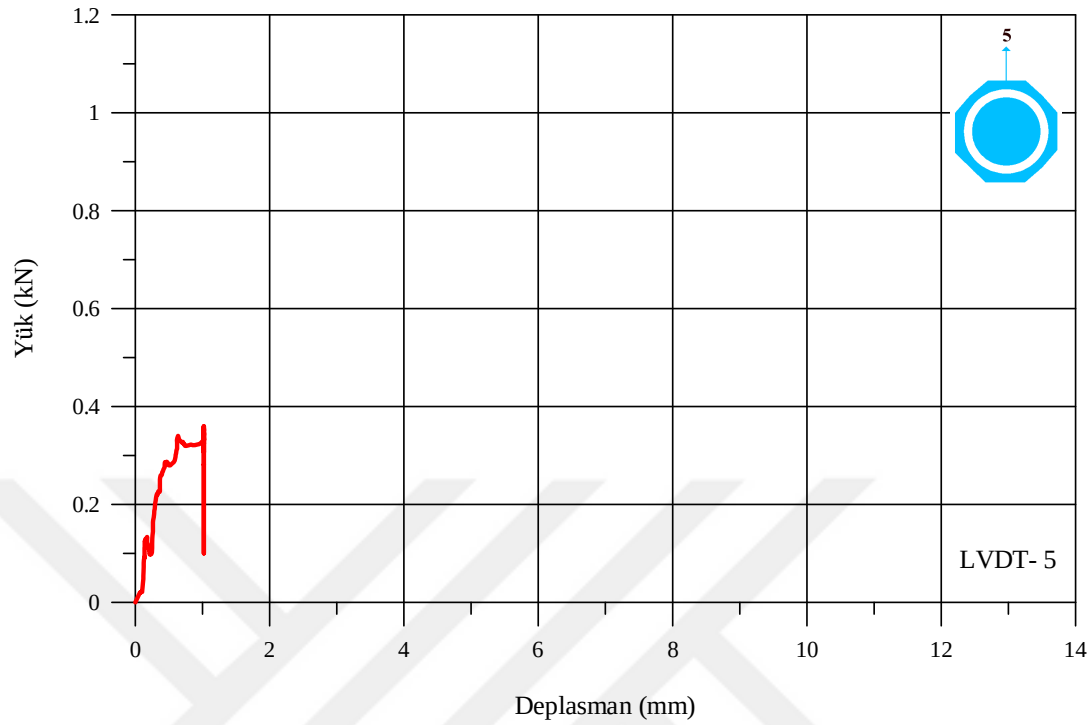
Şekil 4.20. EC numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



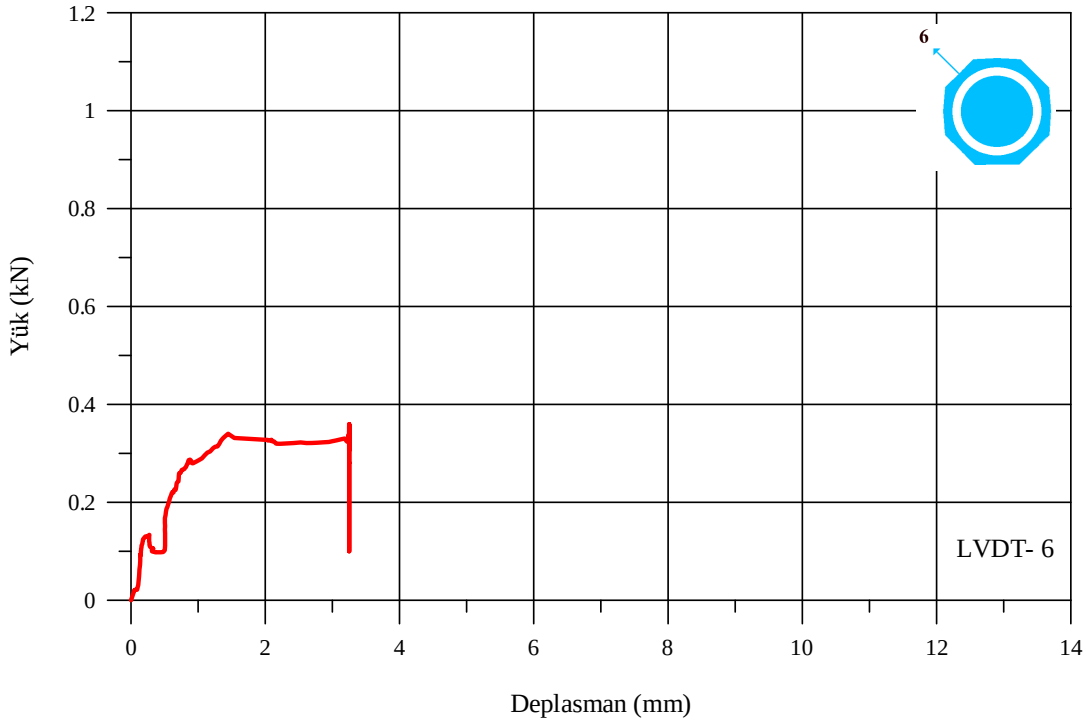
Şekil 4.21. EC numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



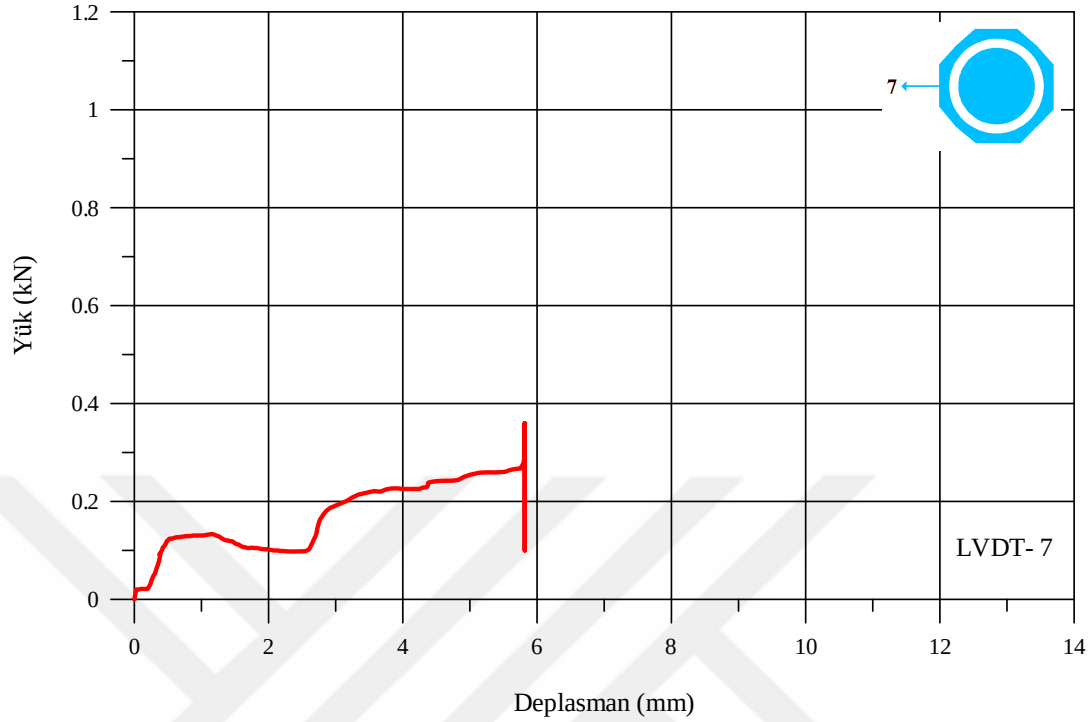
Şekil 4.22. EC numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



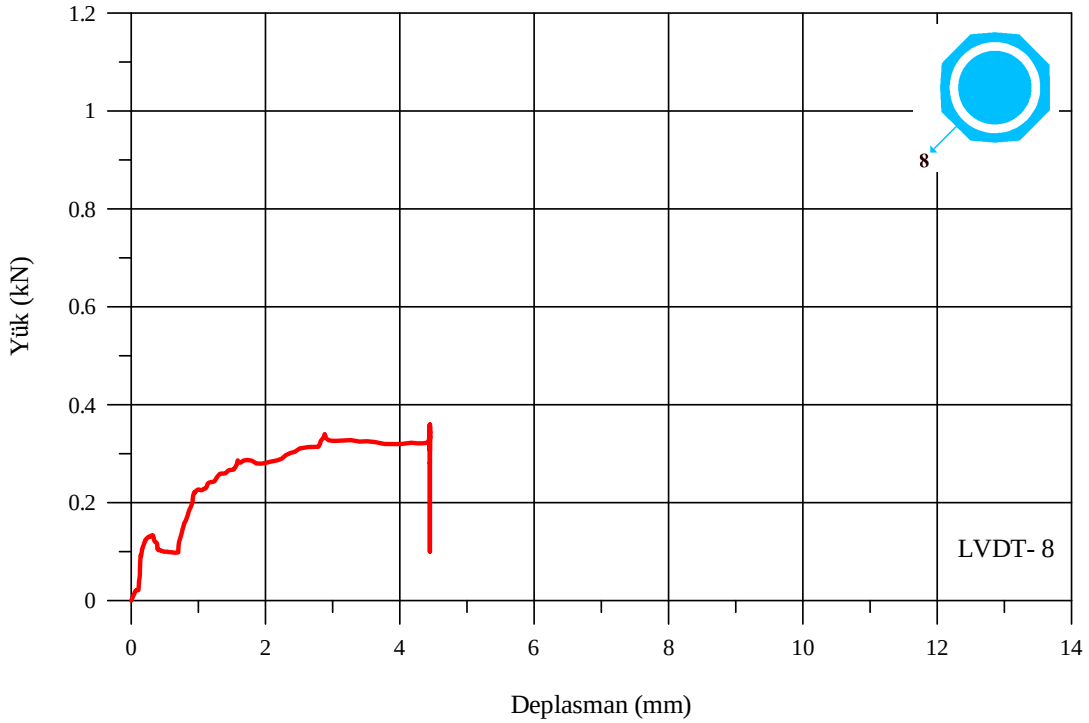
Şekil 4.23. EC numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



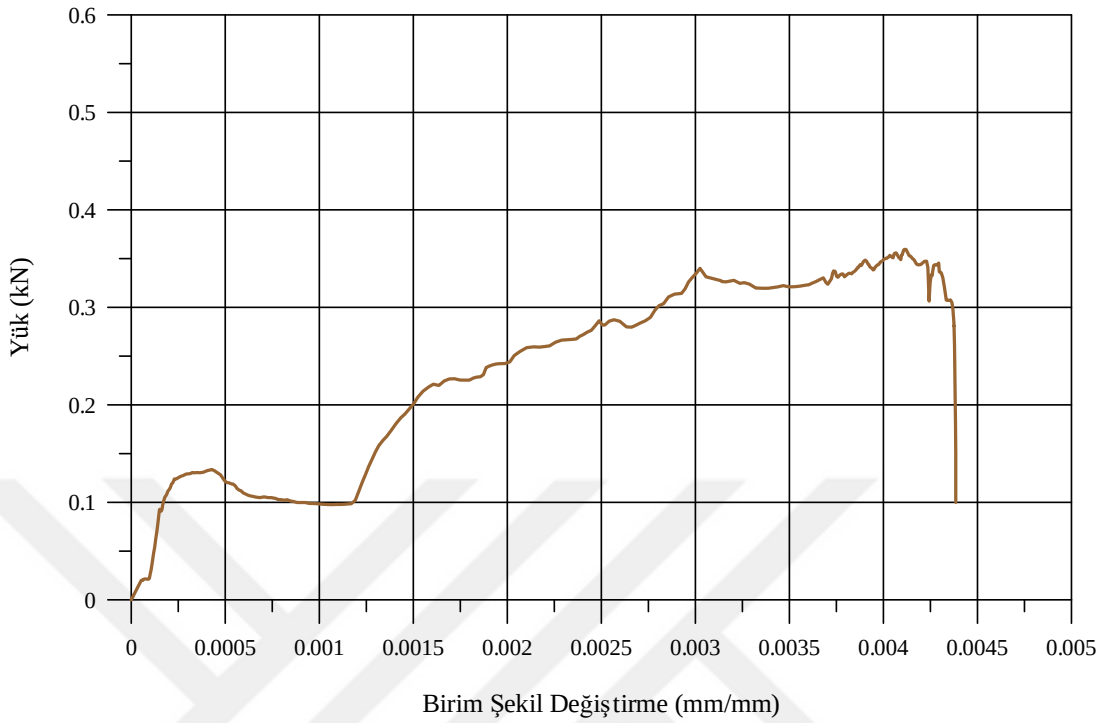
Şekil 4.24. EC numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



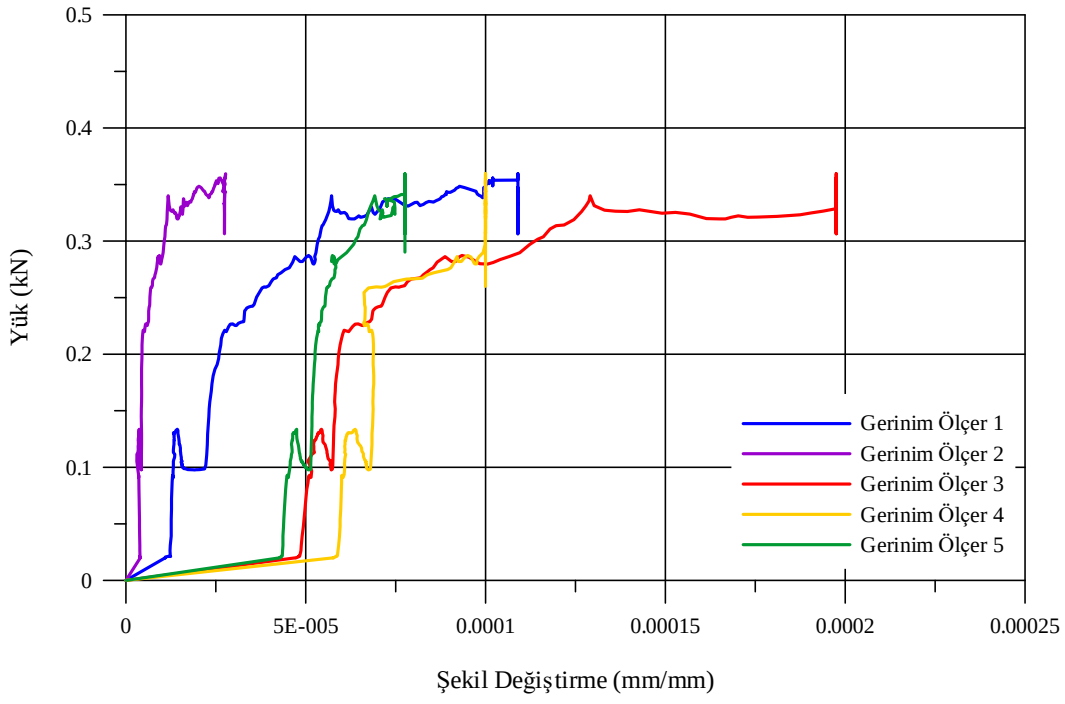
Şekil 4.25. EC numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.26. EC numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.27. EC numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

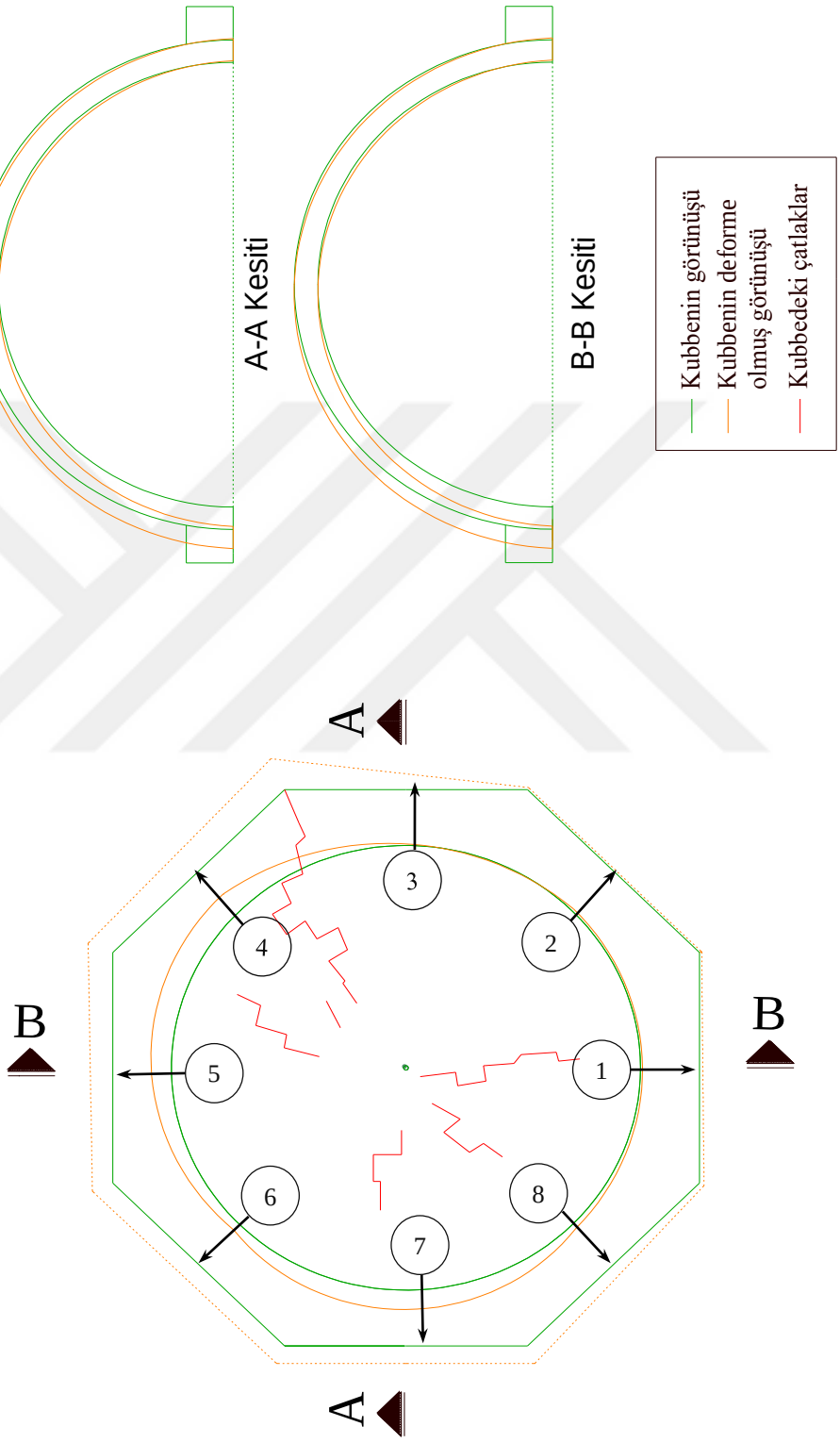


Şekil 4.28. EC numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

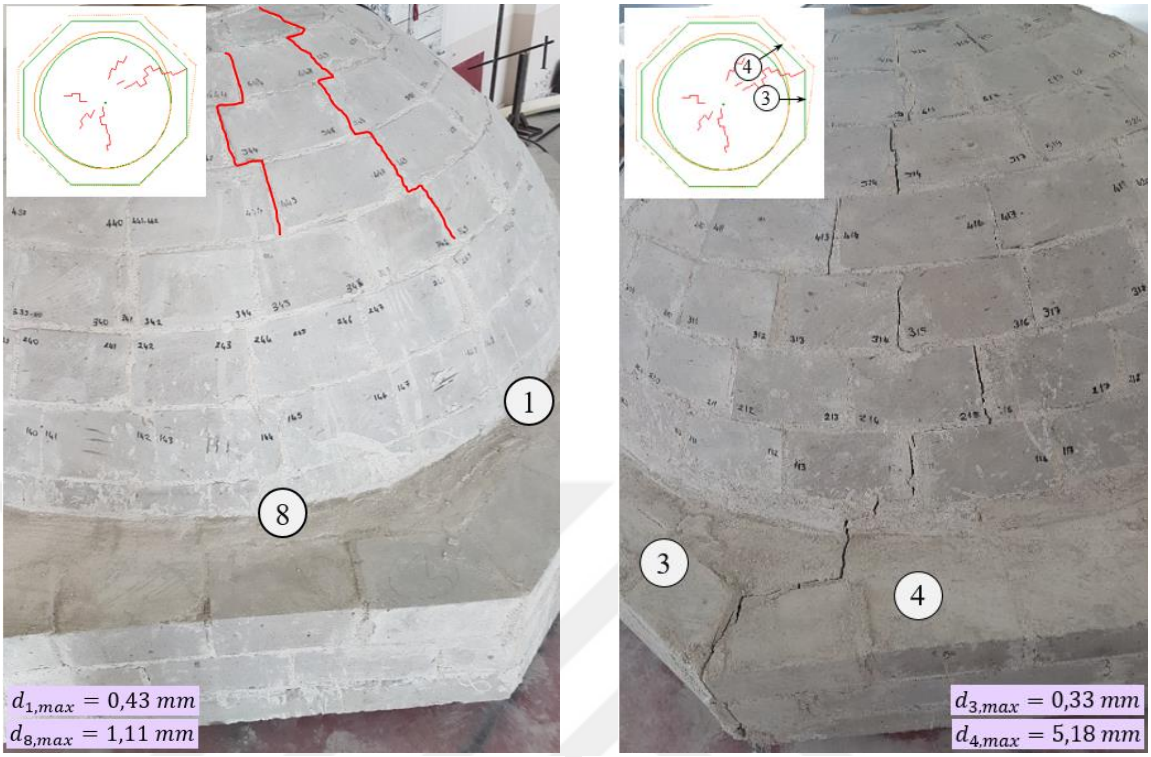
4.3 EM Numune Sonucu

EM deney sonucunda kubbenin çeşitli bölgelerinde toplam dört tane çatlak meydana gelmiştir. Şekil 4.29'da EM numunesinde oluşan çatlaklar gösterilmiştir. Deney sonucuna göre meydana gelen en büyük çatlak 3. ve 4. kollar üzerinde oluşmuş olup 5,18 mm deplasman gerçekleştirmiştir. Bu kollar arasındaki beden duvarının köşesinden başlayarak kubbesin tepesine kadar ilerlemiştir (Şekil 4.30). Deney sonucuna göre ikinci büyük çatlaklar ise maksimum 1,11 mm deplasman ile 1. ve 8. kollar üzerinde meydana gelmiştir. Bu kollar üzerindeki çatlaklara bakıldığında kubbenin tepe noktasına yakın olup, basınç bölgesinde görülmektedir (Şekil 4.30). Bu deneyde iki tane küçük çatlak oluşmuştur. Birincisi Şekil 4.3'de görüldüğü gibi 4. ve 5. kollar arasında olup maksimum 5,18 mm deplasman ile kubbenin basınç bölgesinde oluşmuştur. İkinci küçük çatlak ise 3,93 mm ile 6. ve 7. kollar arasında olup yine çatlaklar basınç bölgesinde meydana gelmiştir (Şekil 4.31).

EM numunesi deney sonucuna göre maksimum açıklık 4. kol üzeninde oluşmuştur. Deney sonucunda elde edilen maksimum yük miktarı 1,30 kN, mesnetlerde meydana gelen maksimum yatay deplasman ise 5,18 mm ile LVDT 4'te ölçülmüştür. Aşağıda Şekil 4.32'den Şekil 4.39'a kadar EM numunesinin yük deplasman grafikleri yer almaktadır. Aşağıda Şekil 4.40'da EM numunesine uygulanan maksimum 1,30 kN yük altında 0,001523 mm/mm birim şekil değiştirme meydana gelmiştir. Kubbeye uygulanan yükün artmasıyla kubbedeki çatlaklar açılmaya başlamıştır. Kubbedeki şekil değiştirme 0,00184 mm/mm olduğu zaman kubbede çatlaklar gözlenmiştir.

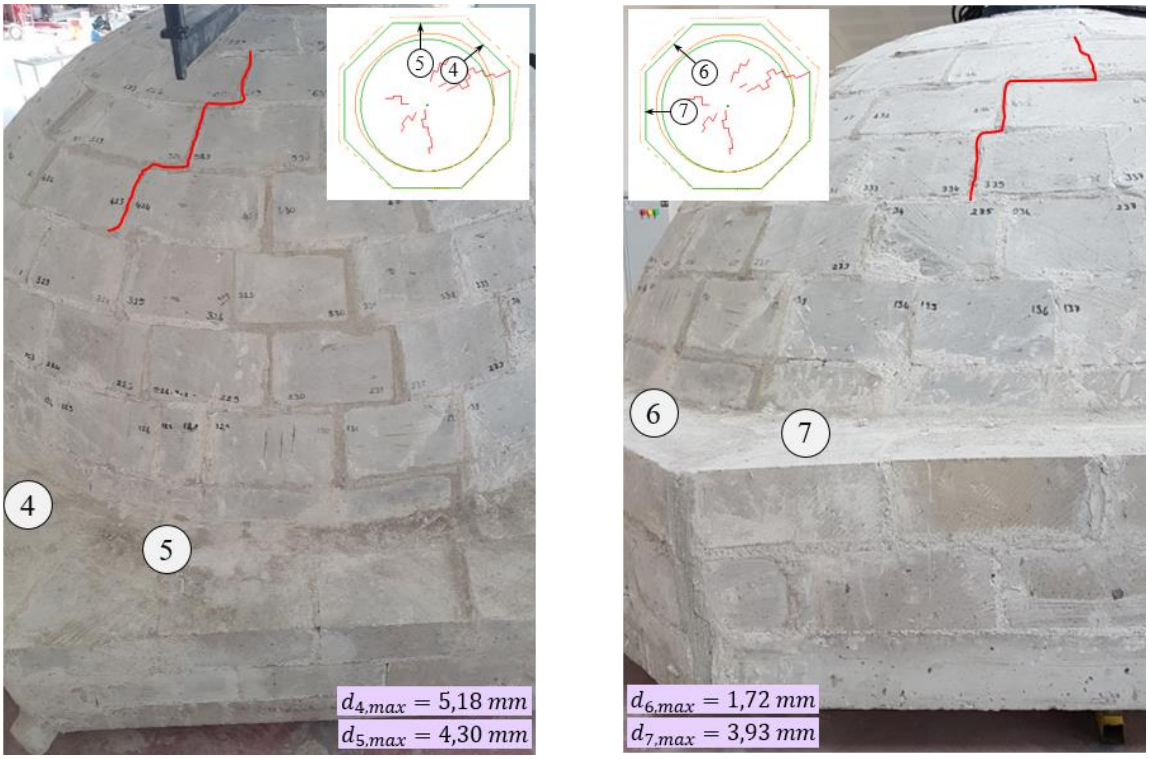


Şekil 4.29. EM numunesi deformasyon eğrisi.



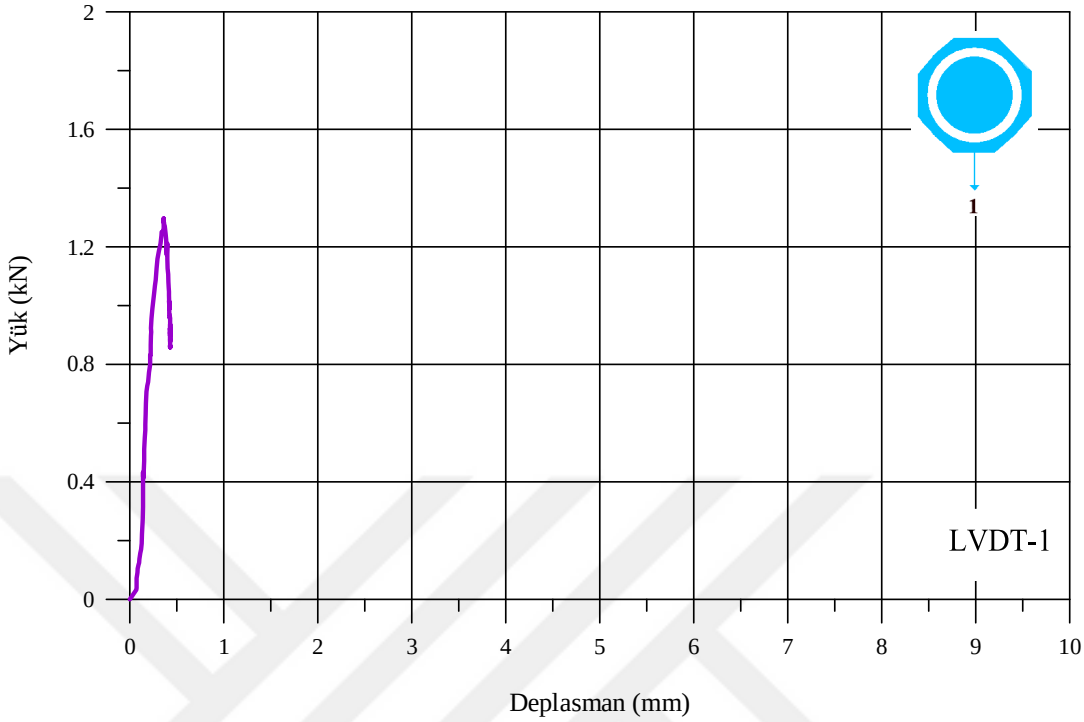
(a) (b)

Şekil 4.30. EM numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 3-4 kollar arası çatlaklar.



(a) (b)

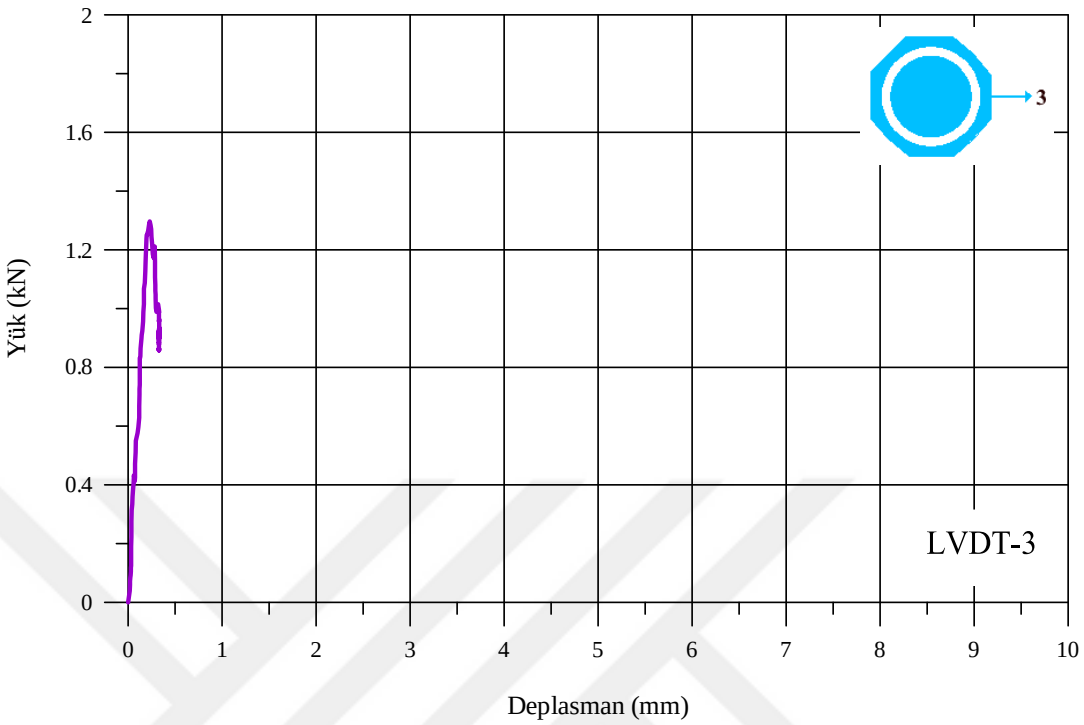
Şekil 4.31. EM numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 4-5 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.



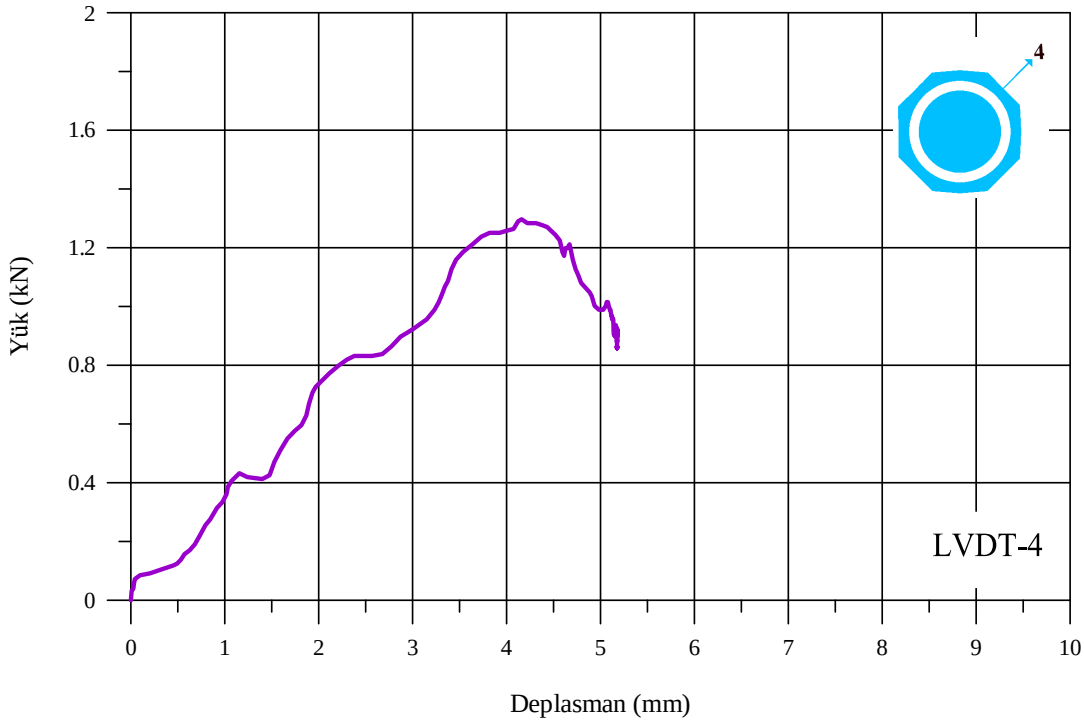
Şekil 4.32. EM numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



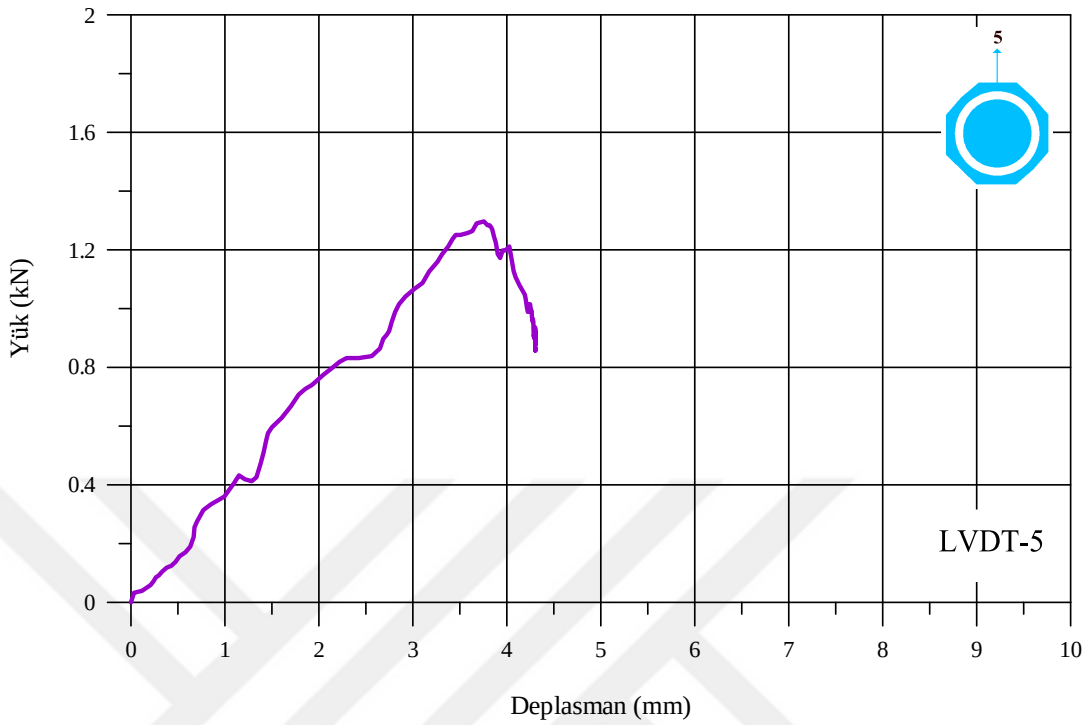
Şekil 4.33. EM numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



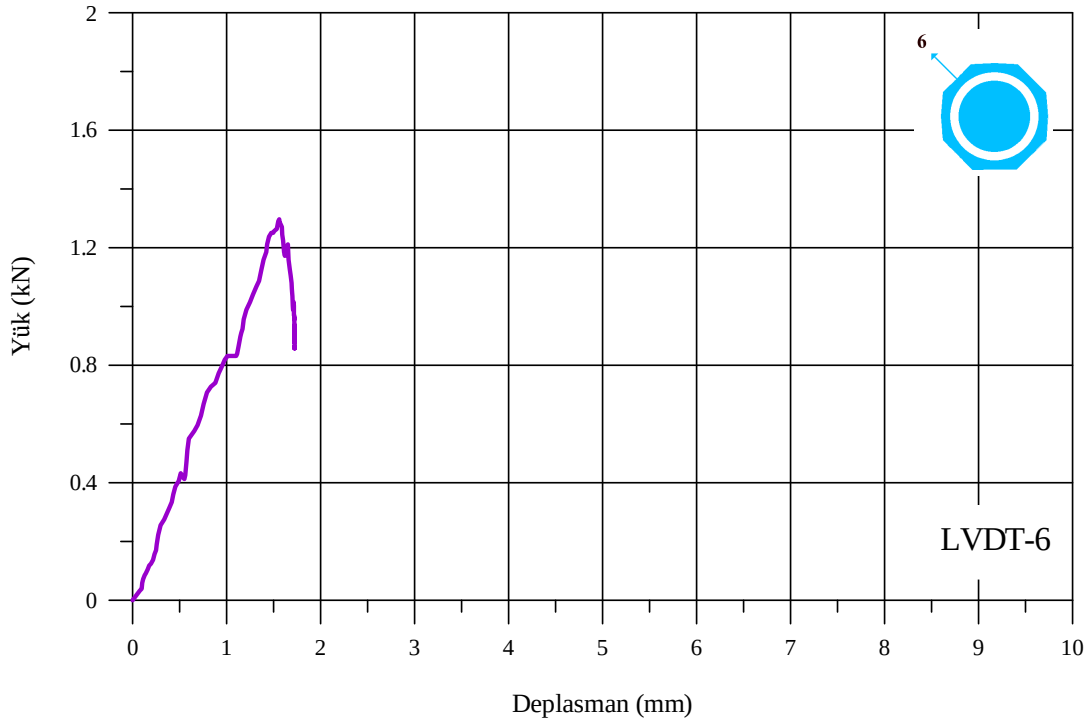
Şekil 4.34. EM numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



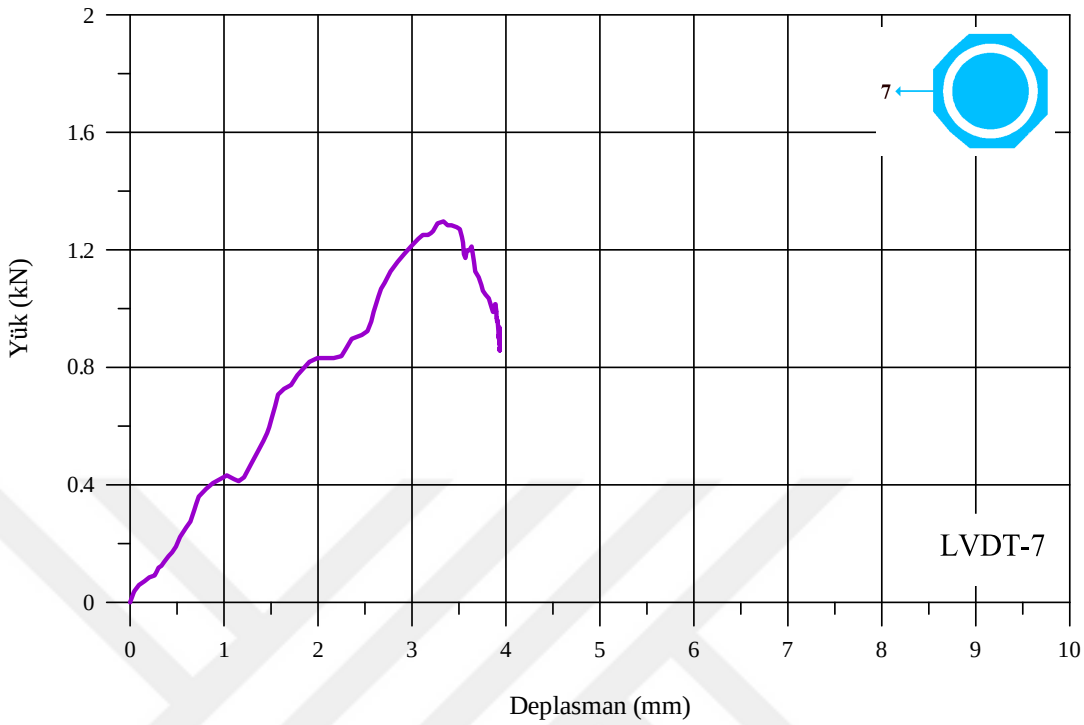
Şekil 4.35. EM numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



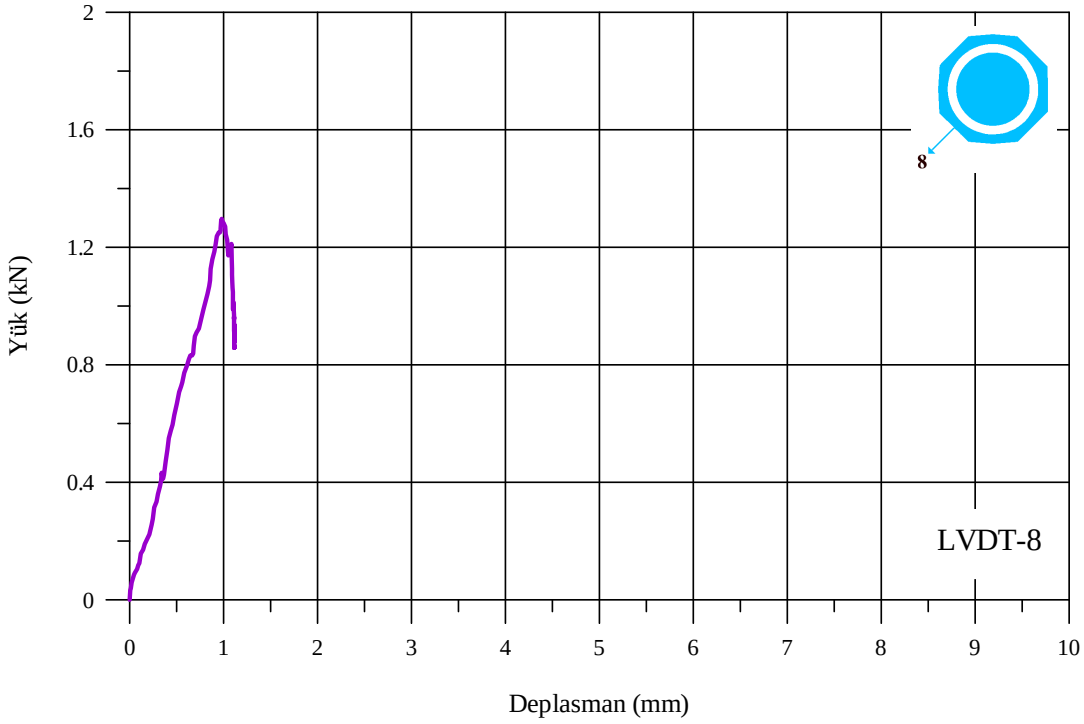
Şekil 4.36. EM numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



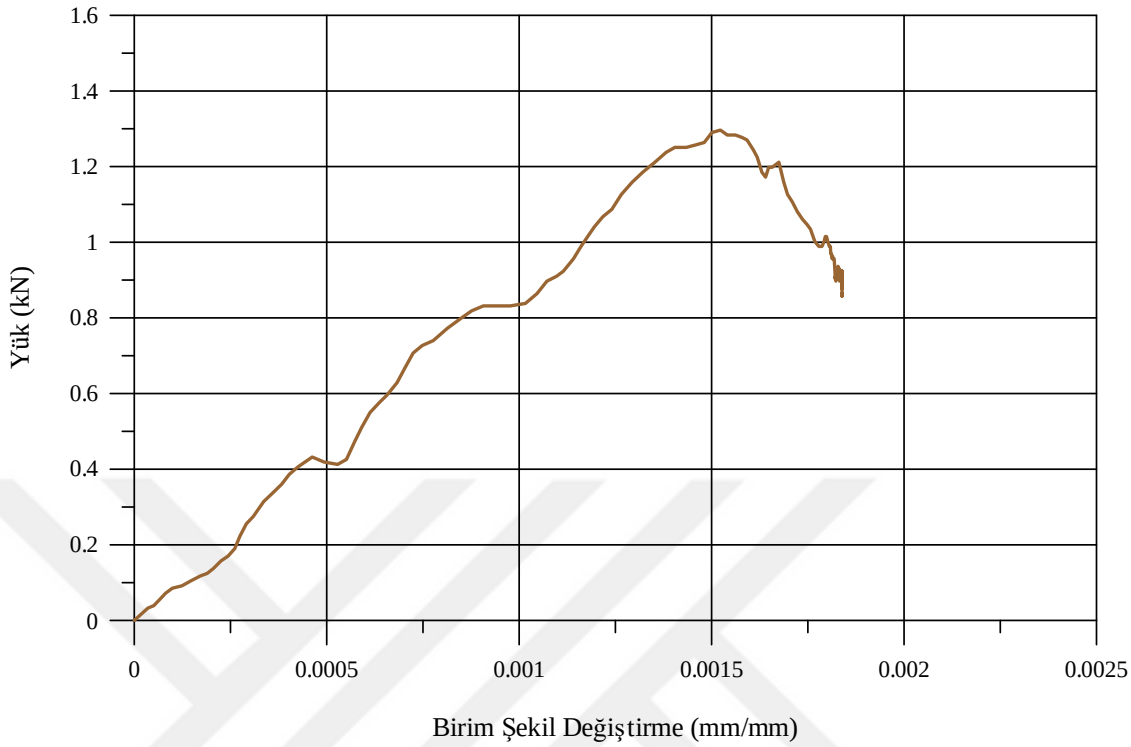
Şekil 4.37. EM numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.38. EM numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.39. EM numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



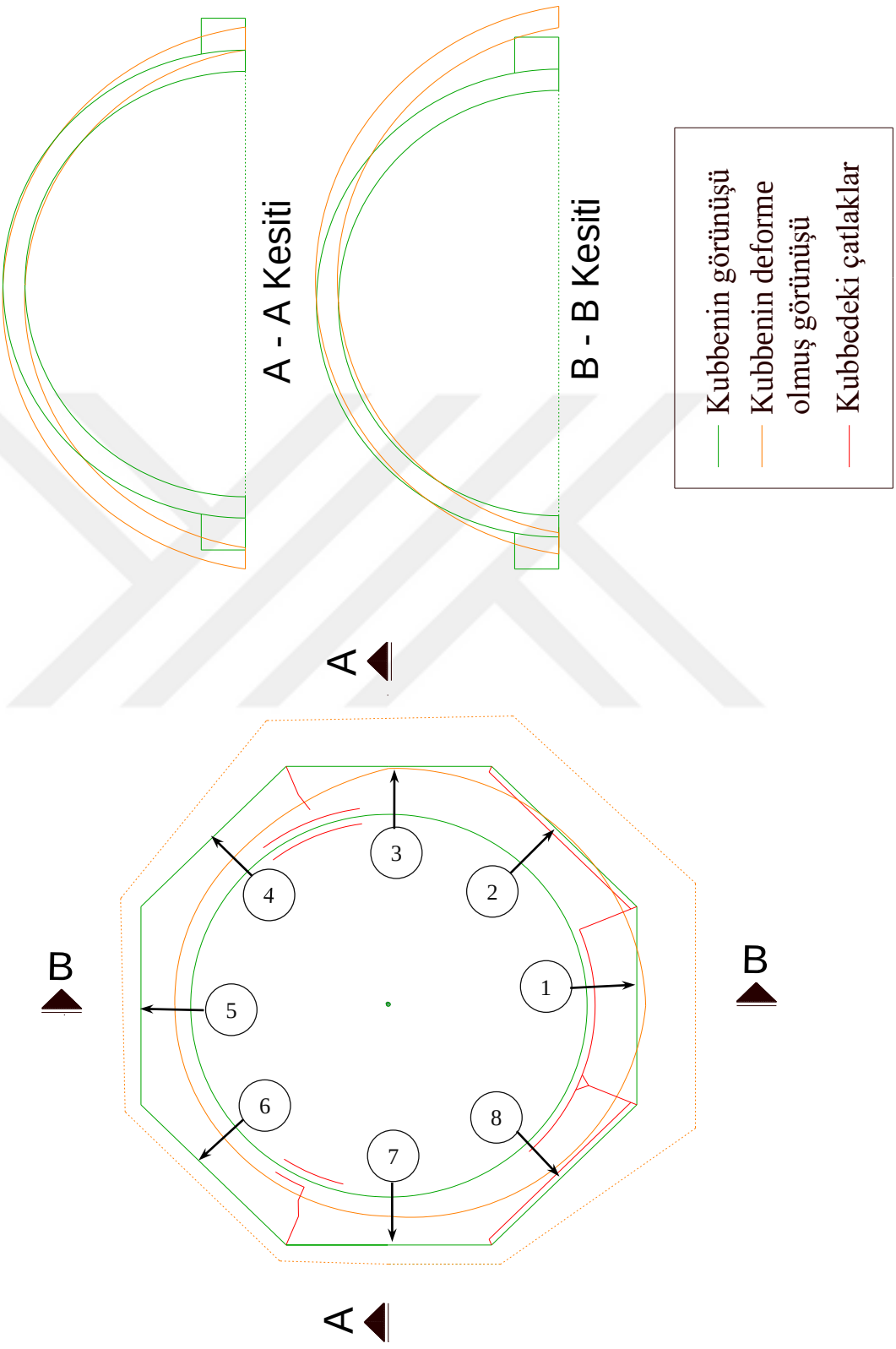
Şekil 4.40. EM numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

4.4 EPS Numune Sonucu

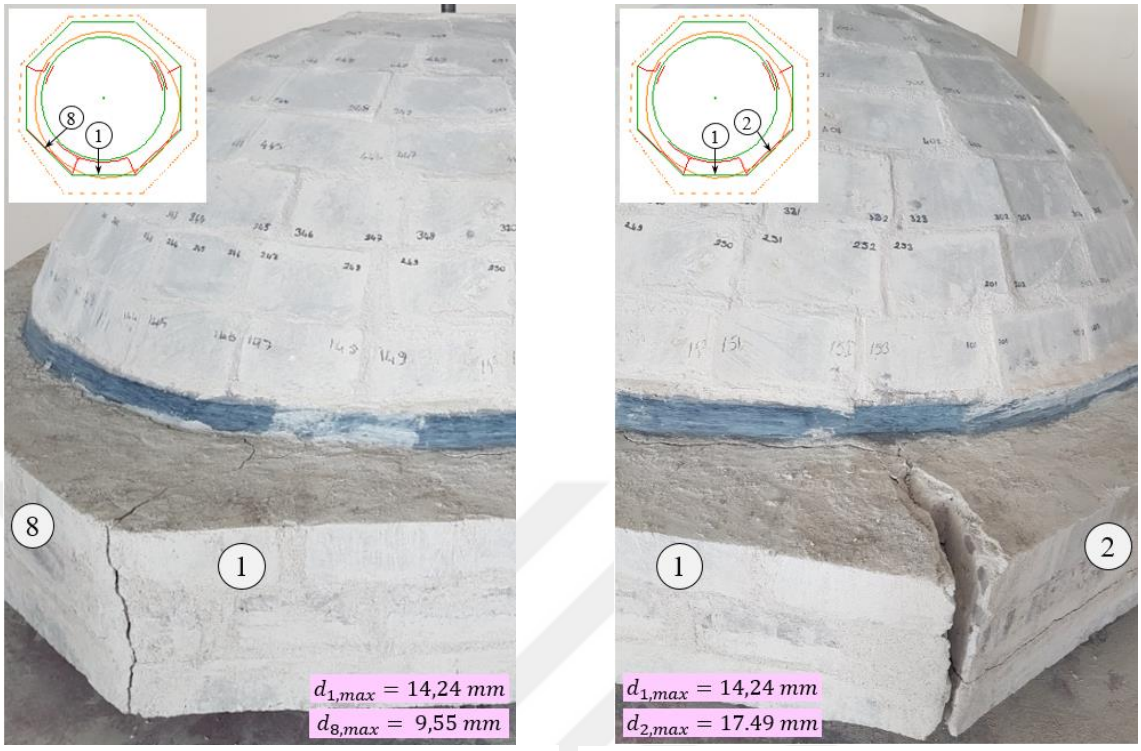
Kubbe eteği çevresine yapılan FRP onarım/güçlendirme uygulamasından sonra yapılan deneyde kubbede en fazla hasar, etek hizasının alt kısmında görülmüştür. Kubbede en yaygın çatlaklar beden duvarının üstünde ve kubbe köşelerinde meydana gelmiştir. Aşağıda EPS numunesinin deformasyon eğrisi Şekil 4.41'de verilmiştir. EPS numunesinde en geniş çatlak 17,49 mm deplasman ile 1. ve 2. kollar arasında olup, beden duvarından başlayıp etek hizasına kadar ilerlemiştir. Bunun yanında 2. kol üzerinde, kasnak ile beden duvarı birleşim yerinde oluşan en geniş çatlaklar beden duvarı boyunca meydana gelmiştir (Şekil 4.42). 1. ve 8. kollar arasında maksimum 14,24 mm deplasman gerçekleşerek ikinci çatlağı oluşturmuştur. Bu çatlak da yine beden duvarı ve etek hizası arasında meydana gelmiştir (Şekil 4.42). Ayrıca 8. kol üzerindeki beden duvarı ve kasnak arası birleşim yeri yatay olarak beden duvarı boyunca çatlamıştır (Şekil 4.44). Üçüncü çatlak ise 16,65 mm deplasman ile 3. ve 4. kol arasında olup beden duvarından başlayarak etek hizasına kadar ilerlemiştir. Aşağıdaki Şekil 4.43'te 6. ve 7. kollarının birleştiği köşede kasnak boyunca birleşen köşenin kasnağında küçük çatlaklar görülmüştür. Böylece

kubbede oluşan çatlaklar harçta meydana gelmiş olup gelerek kubbe taşları üzerinde herhangi bir hasar oluşmamıştır.

EPS deney numunesi yaklaşık olarak 1,55 kN yük taşımıştır ve ölçülen en büyük deplasman 17,49 mm ile LVDT 2'de meydana gelmiştir. Yük - deplasman grafikleri aşağıdaki Şekil 4.45'den Şekil 4.52'ye kadar verilmiştir. EPS numunesine uygulanan maksimum yüke (1,48 kN) ulaşıldığında kubbedeki şekil değiştirme 0,00956 mm/mm olmuştur. Yükün artması ile kubbedeki çatlaklar da açılmaya başlamıştır. Kubbedeki birim şekil değiştirme 0,00963 mm/mm olduğunda 1. – 8., 1. - 2., 3. - 4. ve 6. - 7. kollar arasında çatlaklar oluşmuştur (Şekil 4.53). Aşağıda Şekil 4.54'de EPS numunesinin gerinim ölçerlerinin grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00045 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.

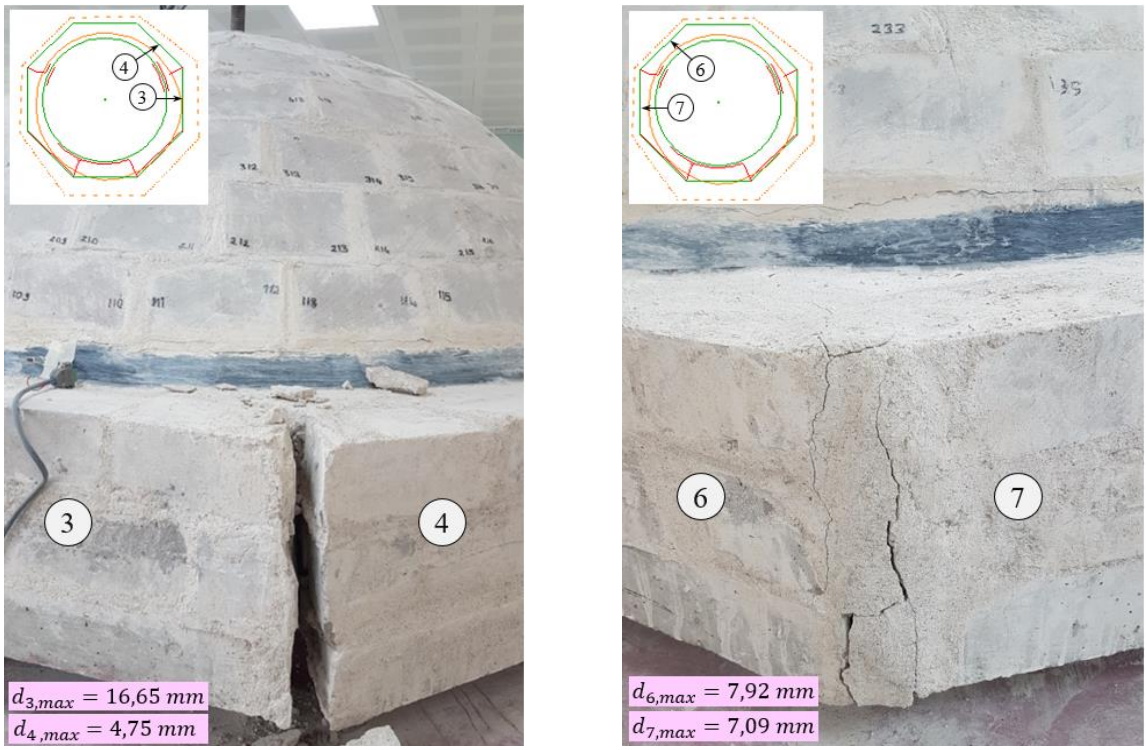


Şekil 4.41. EPS numunesi deformasyon eğrisi.



(a) (b)

Şekil 4.42. EPS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar.

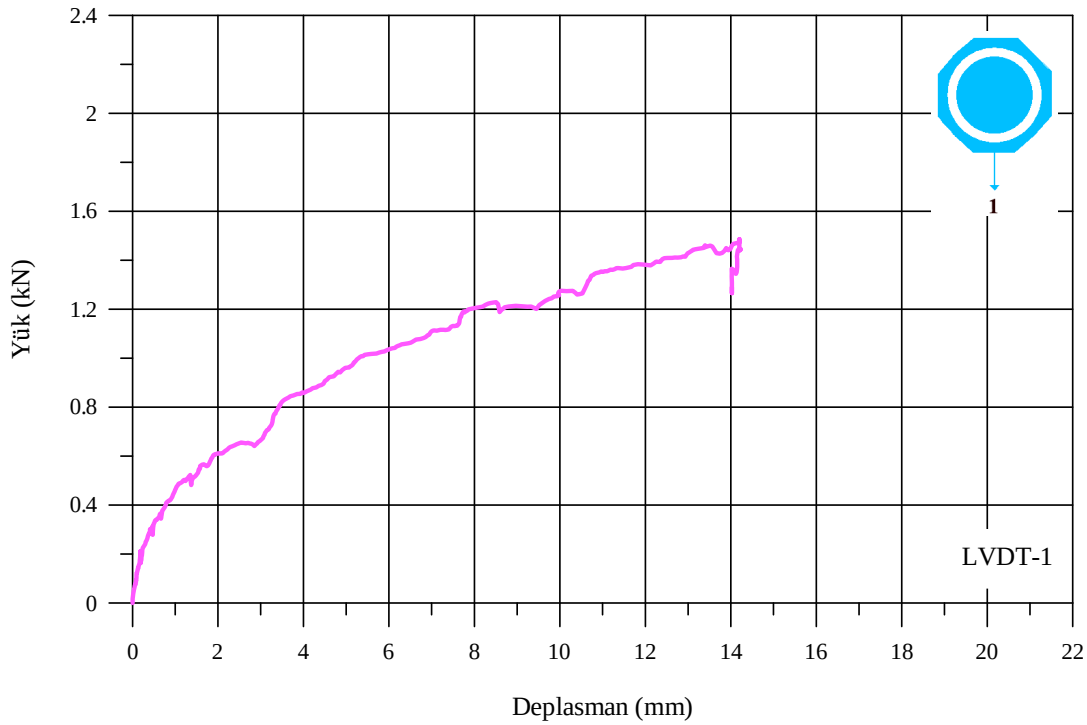


(a) (b)

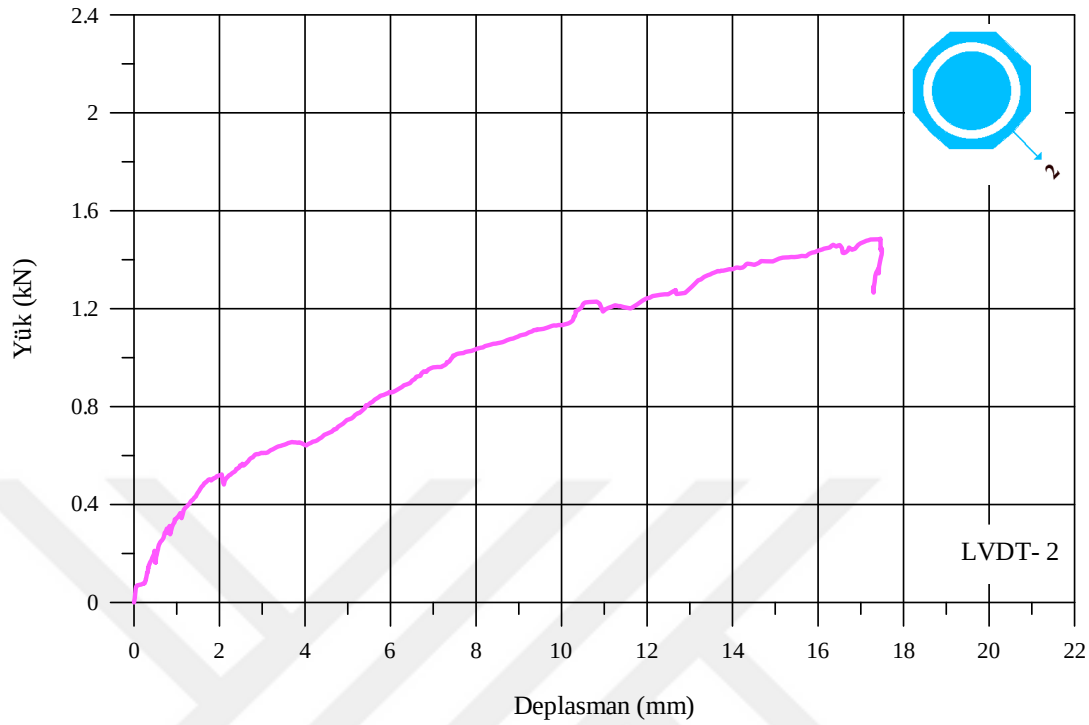
Şekil 4.43. EPS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 3-4 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.



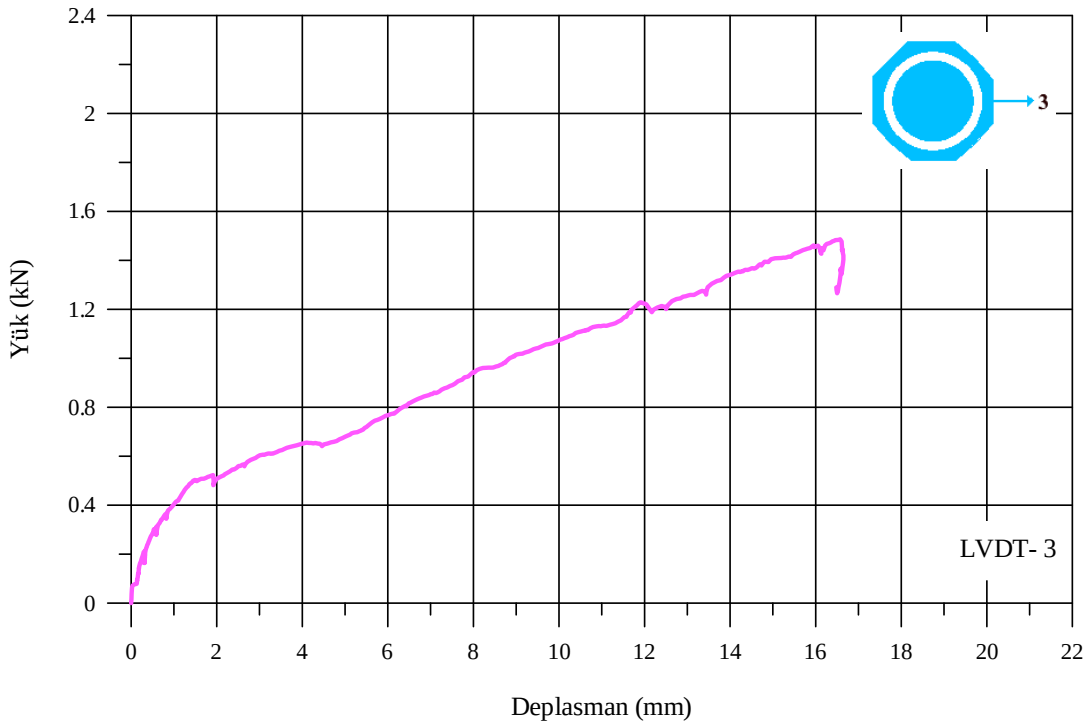
Şekil 4.44. EPS numunesinde oluşan çatlaklar; 7-8 kollar arası çatlaklar.



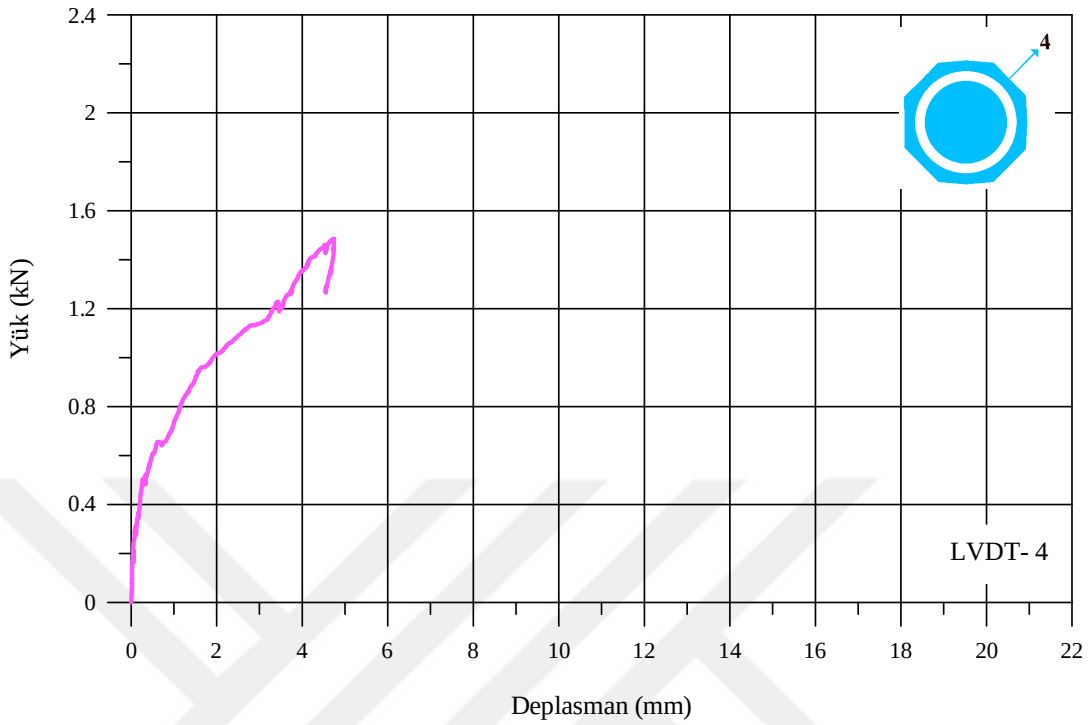
Şekil 4.45. EPS numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



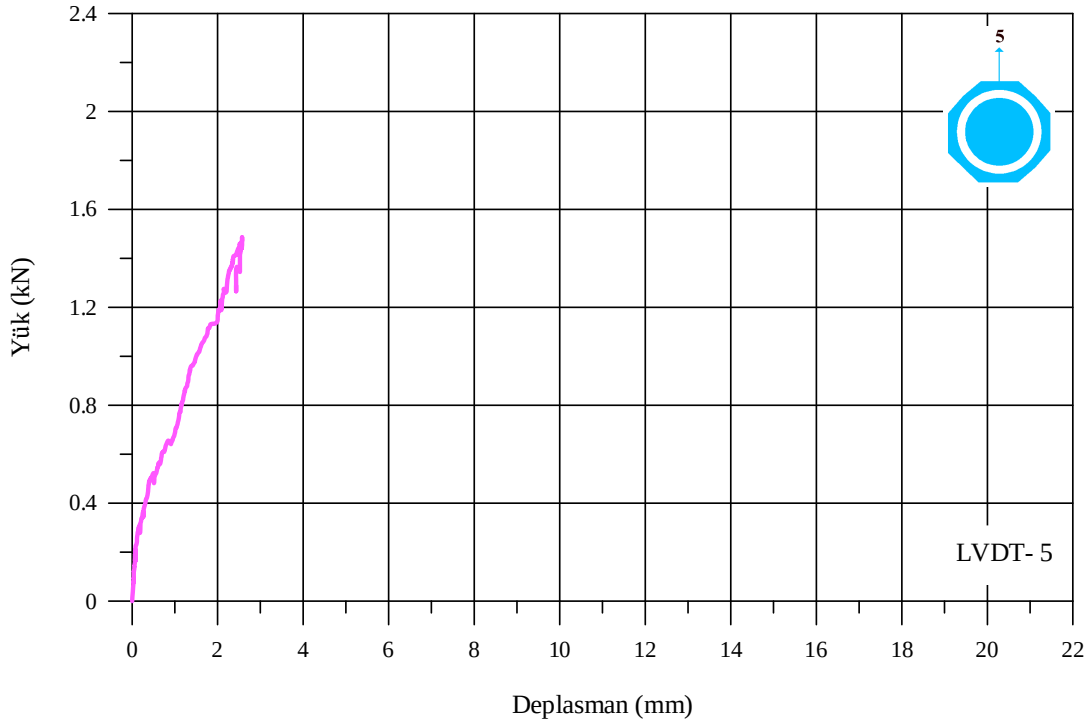
Şekil 4.46. EPS numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



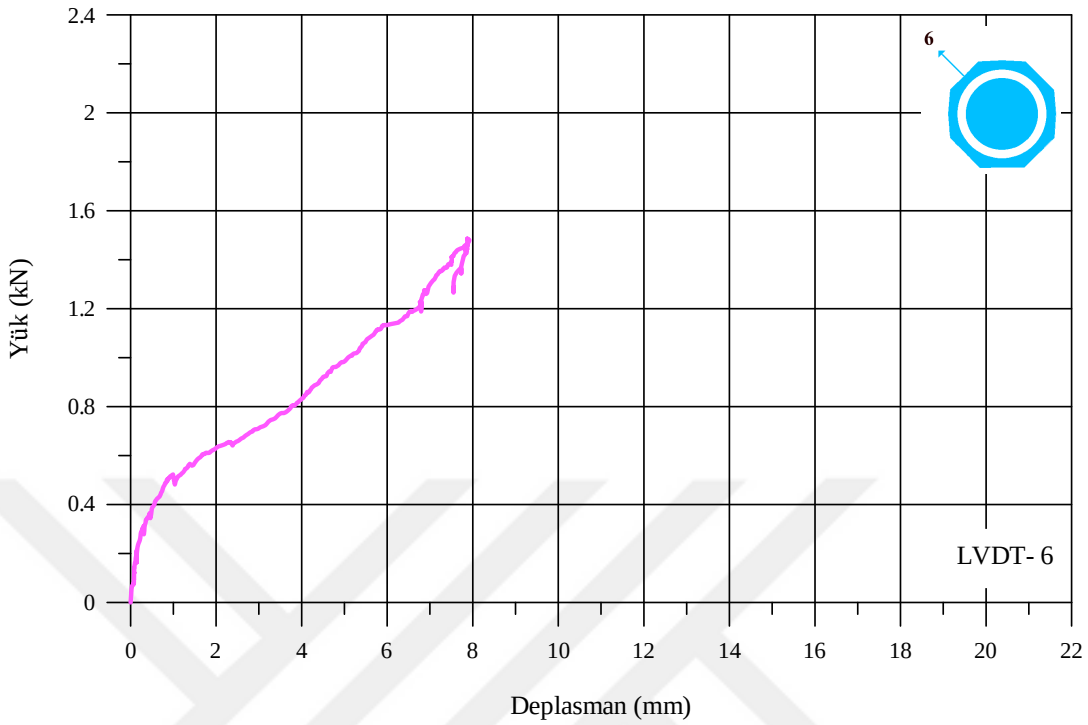
Şekil 4.47. EPS numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



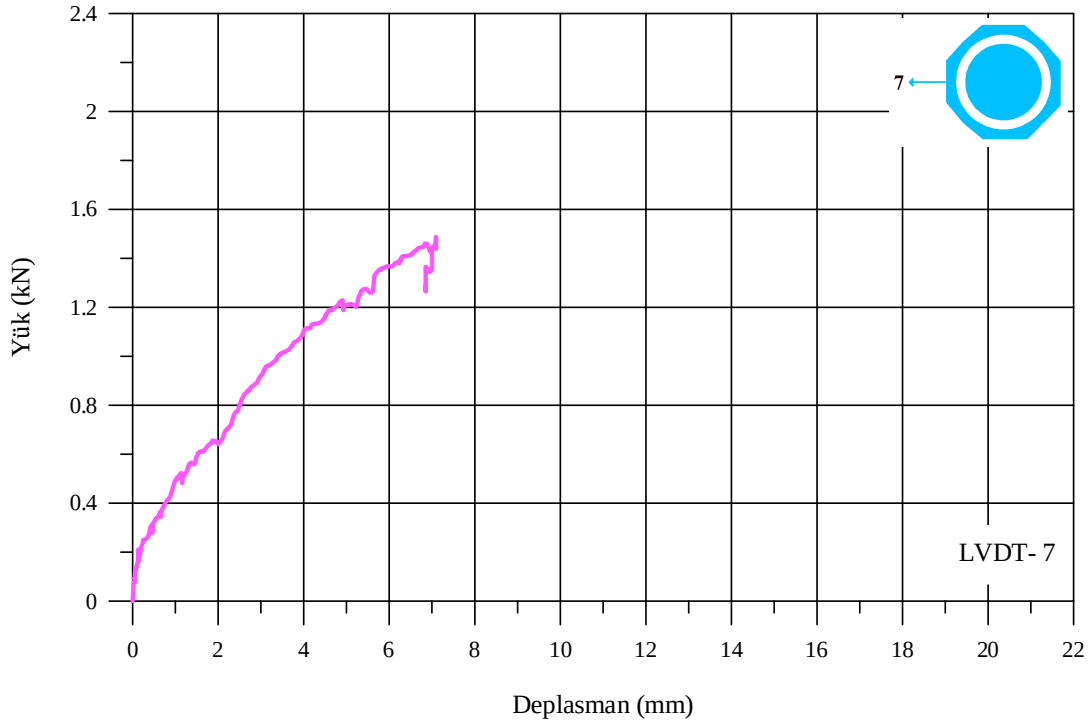
Şekil 4.48. EPS numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



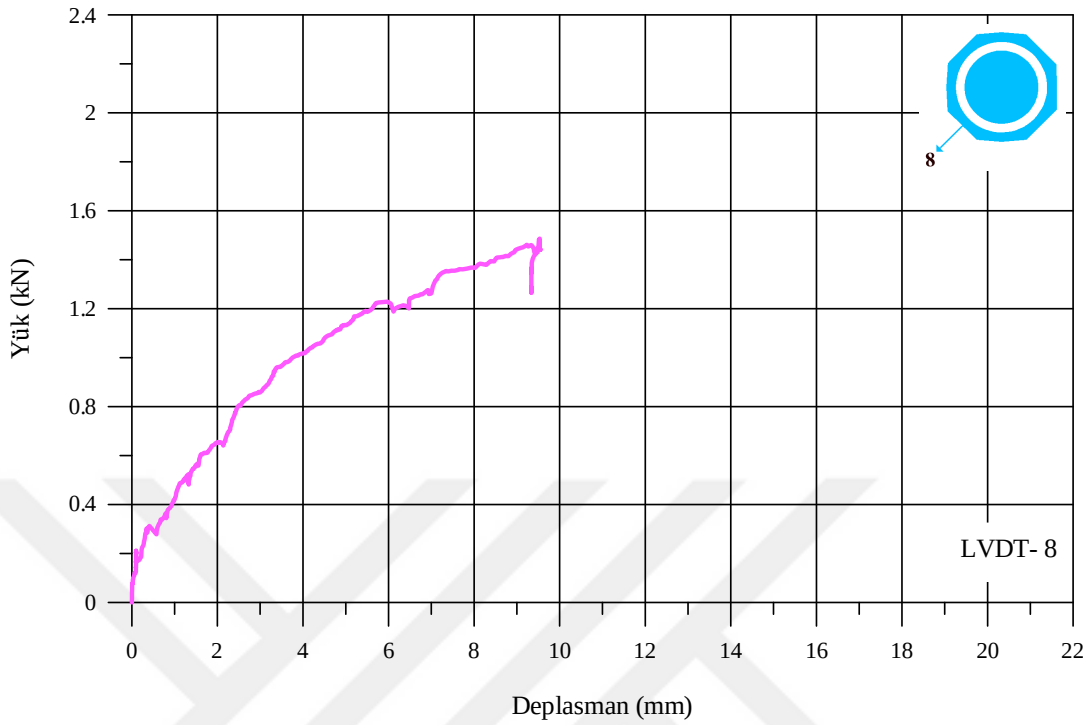
Şekil 4.49. EPS numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



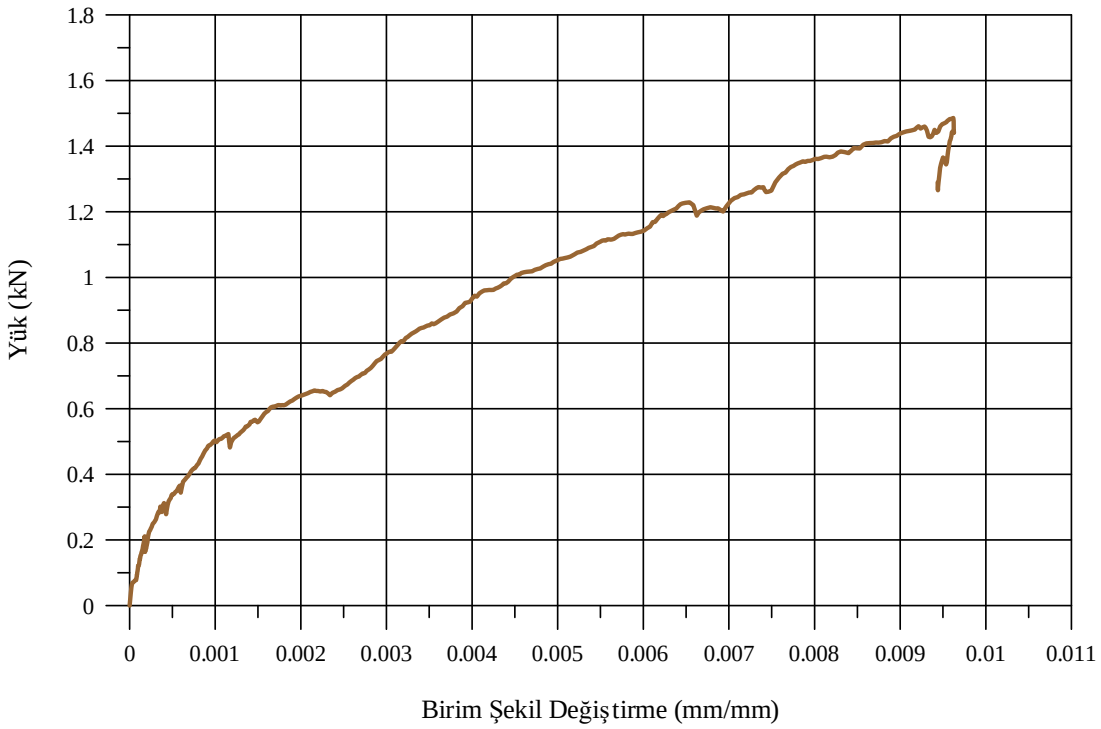
Şekil 4.50. EPS numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



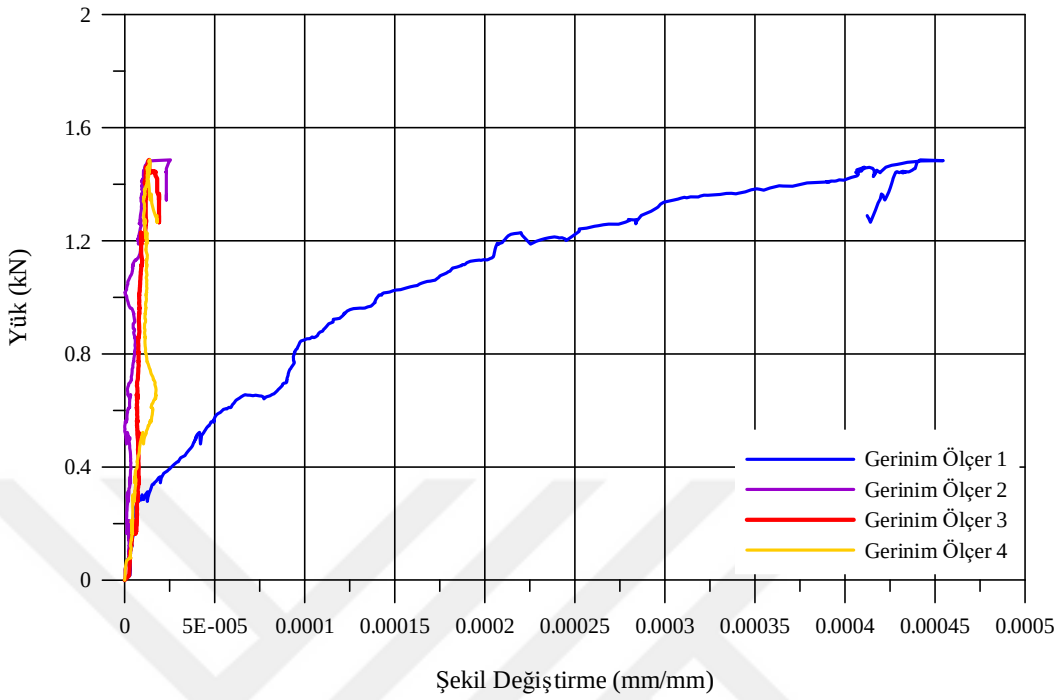
Şekil 4.51. EPS numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.52. EPS numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.53. EPS numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

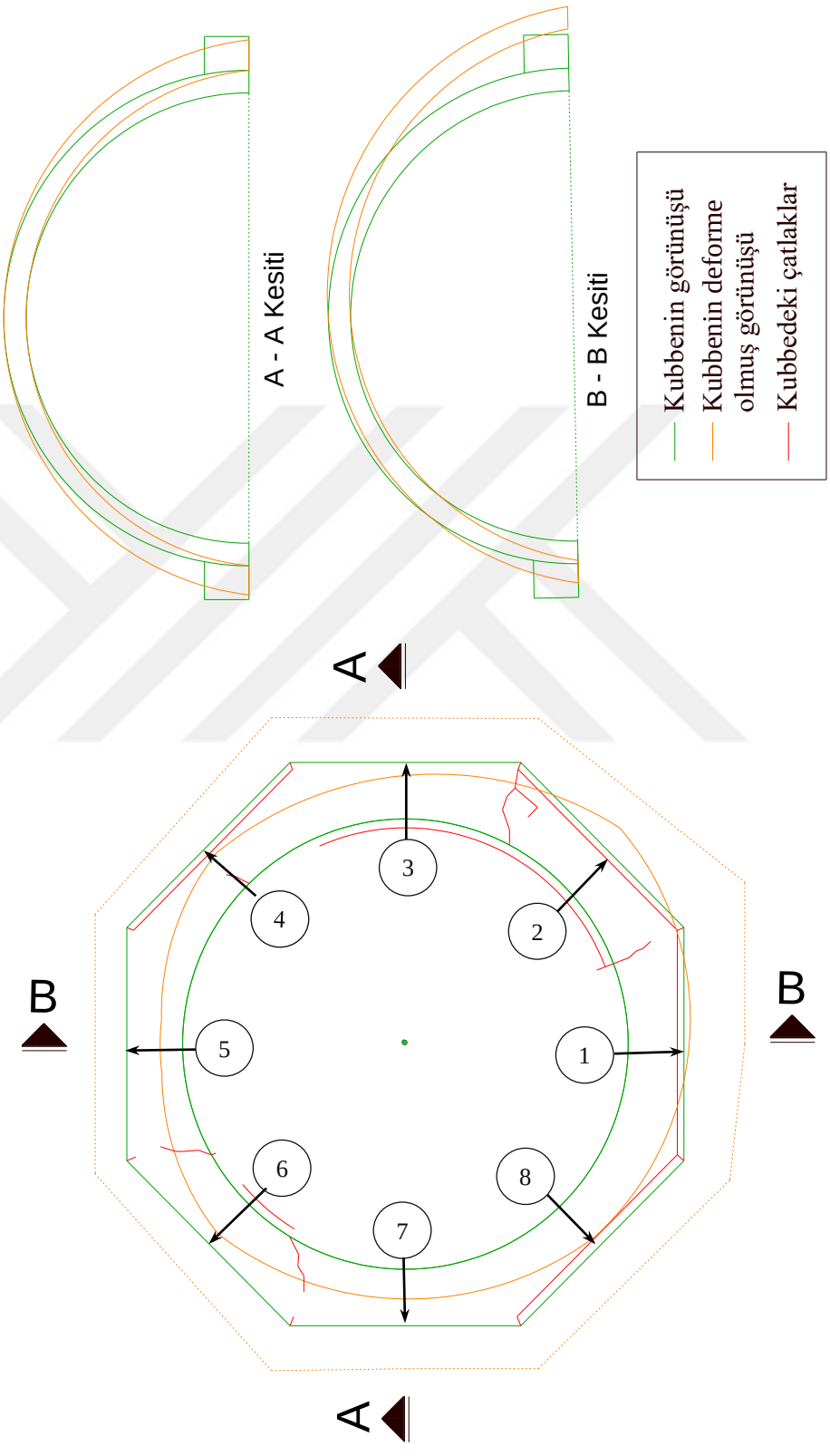


Şekil 4.54. EPS numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

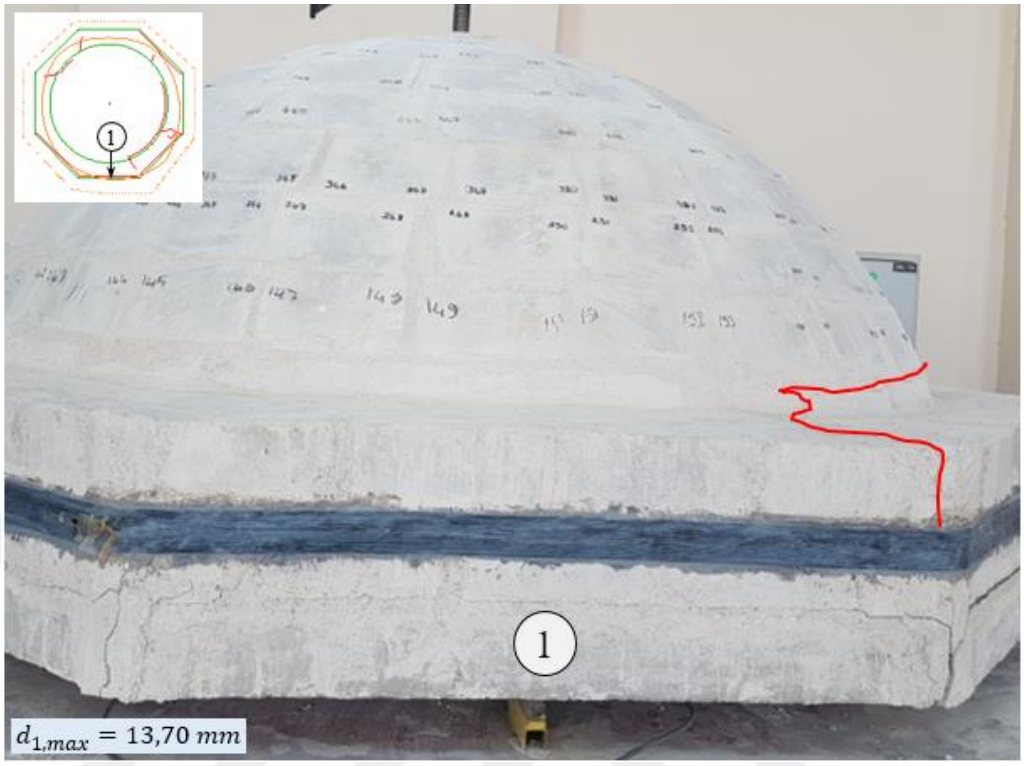
4.5 EPD Numune Sonucu

EDP numunesi üzerinde yapılan deney sonucunda meydana gelen çatlaklar, beden duvarı ile FRP bandı arasında oluşmuş olup Şekil 4.55'de gösterilmiştir. En geniş çatlak kubbe deney düzeneğinin 2. kolu üzerinde meydana gelip 16,03 mm deplasman yapmıştır (Şekil 4.57). Bu çatlak beden duvar köşelerinden başlayarak beden duvarı ve kasnak hizası boyunca ilerlemiştir. İkinci geniş çatlak kubbenin 8. kolu üzerinde olup 10,32 mm deplasman meydana gelmiştir (Şekil 4.60). Deney sonucu meydana gelen çatlaklar yine beden duvarının köşelerinden başlayıp kasnak hizası boyunca devam etmiştir. Üçüncü geniş çatlak ise 9,99 mm deplasman ile 4. kol üzerinde oluşmuştur (Şekil 4.58). Deneyde oluşan çatlaklar beden duvarı ve kasnak arasındaki harçta meydana gelmiştir. İnce çatlak aşağıdaki Şekil 4.56'da görüldüğü üzere 1. kol üzerinde oluşmuş olup çatlak beden duvarı ve kasnak arasındadır. Küçük çatlaklar ise 5. - 6. ve 6. - 7. kolların köşelerinde meydana gelişmiş olup beden duvarı hizasına kadar ilerlemiştir (Şekil 4.59).

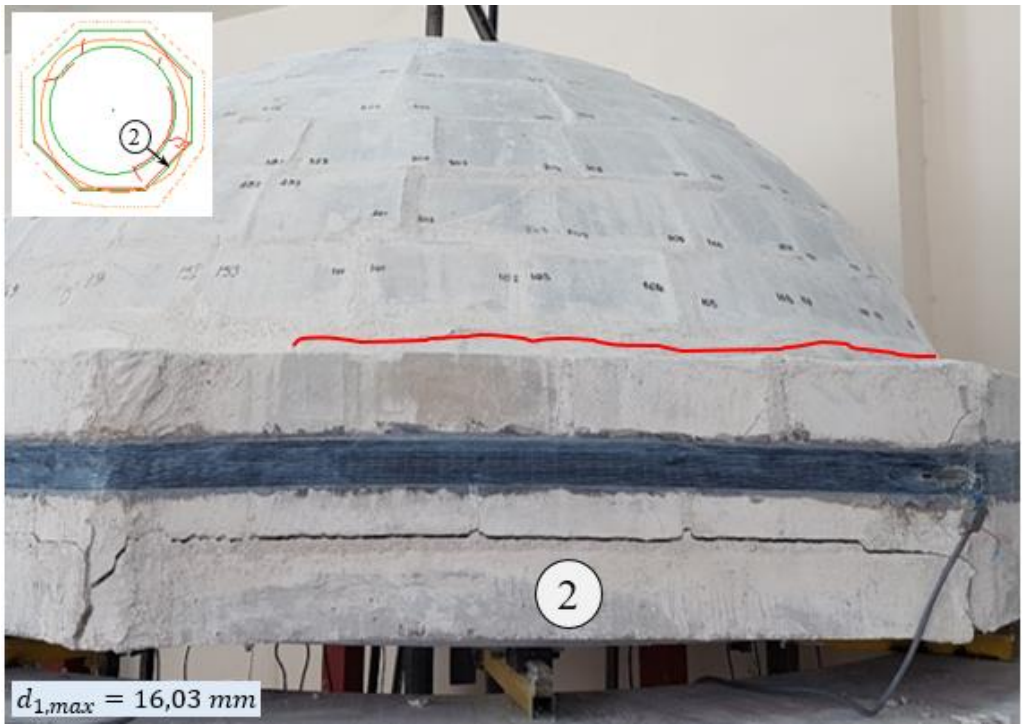
EPD deneyi sonunda elde edilen maksimum yük miktarı 2,86 kN, mesnetlerde meydana gelen maksimum yatay deplasman ise 16,03 mm olarak 2. kol üzerindeki LVDT 2'de ölçülmüştür. Deneyde oluşan çatlaklar sadece harçta meydana gelmiştir. Harçta meydana gelen çatlaklar ile ilgili grafikler Şekil 4.61'den Şekil 4.68'e kadar verilmiştir. EPD numunesine uygulanan maksimum 2,86 kN yük altında 0,00779 mm/mm birim şekil değiştirme meydana gelmiştir. Kubbeye uygulanan yükün artmasıyla kubbedeki çatlaklar açılmaya başlamıştır. Kubbedeki şekil değiştirme 0,00927 mm/mm olduğu zaman kubbede çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 4.69). Aşağıda Şekil 4.70'de EPD numunesinin gerinim ölçerlerinin grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00109 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.



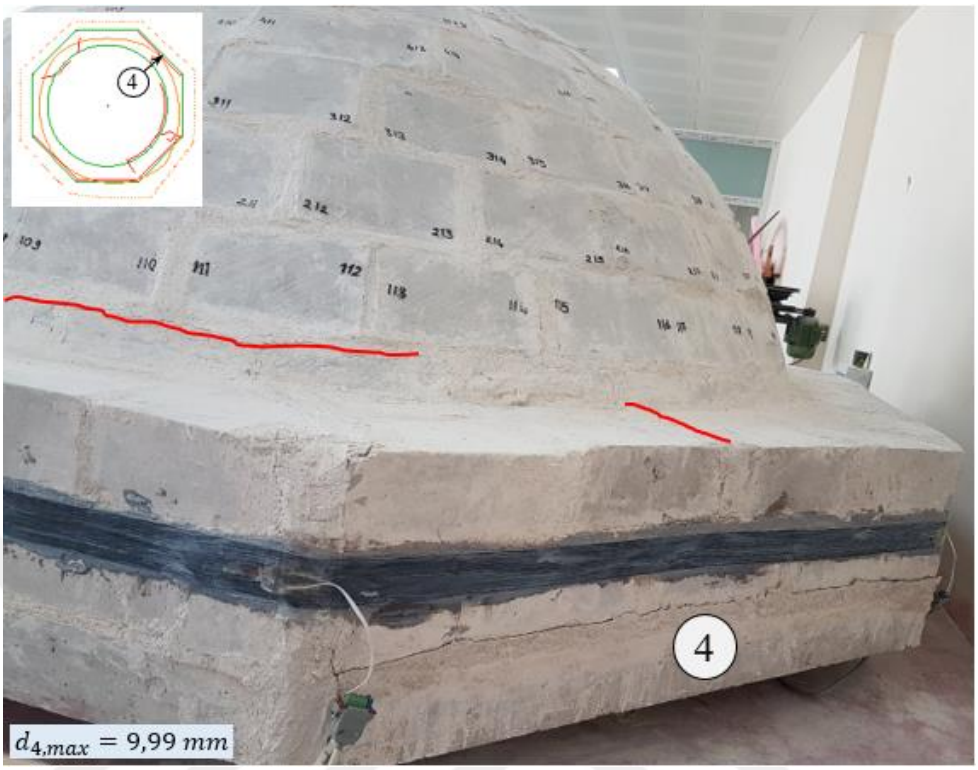
Şekil 4.55. EPD numunesi deformasyon eğrisi.



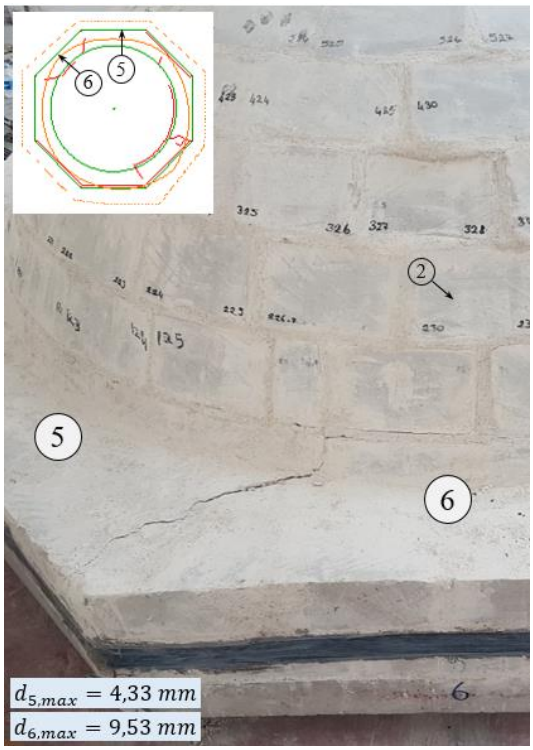
Şekil 4.56. EPD numunesinin 1. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



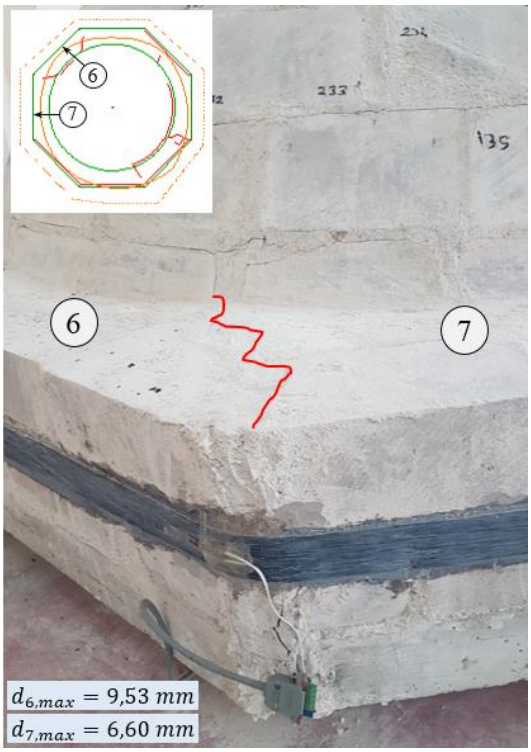
Şekil 4.57. EPD numunesinin 2. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



Şekil 4.58. EPD numunesinin 4. kol üzerinde oluşan çatlaklar.

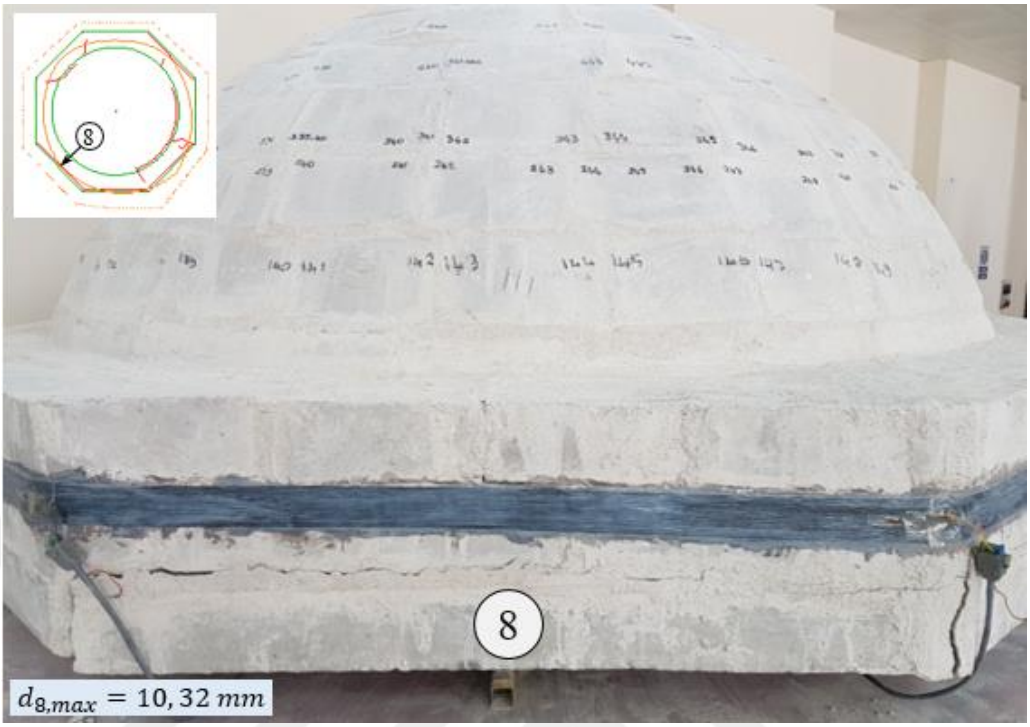


(a)

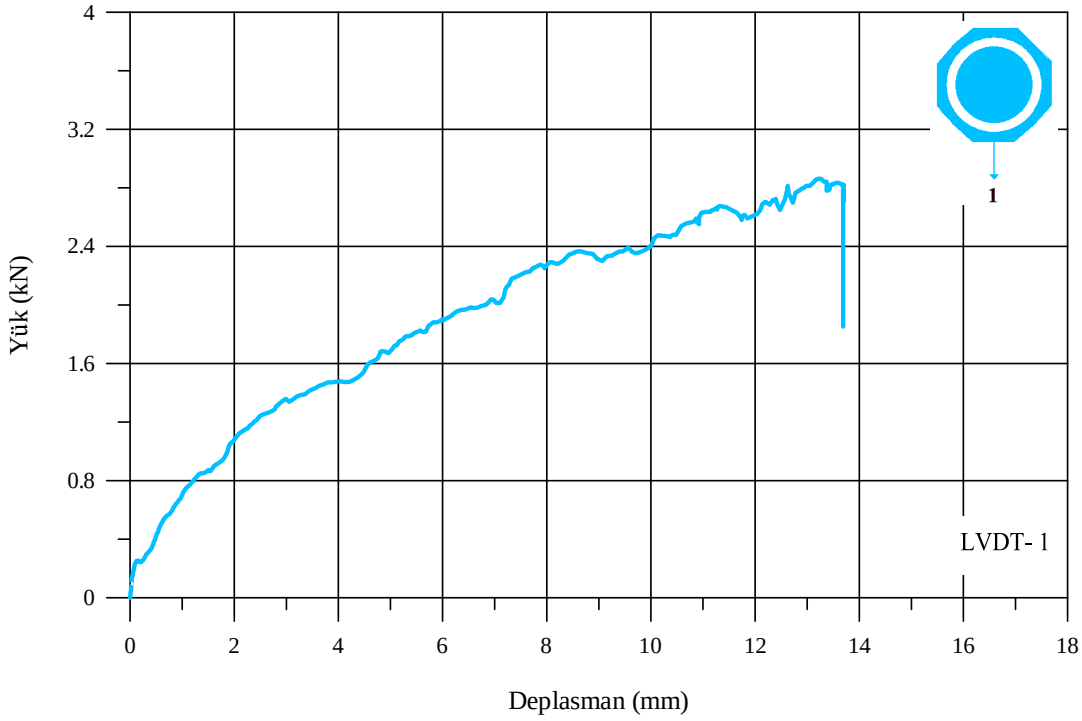


(b)

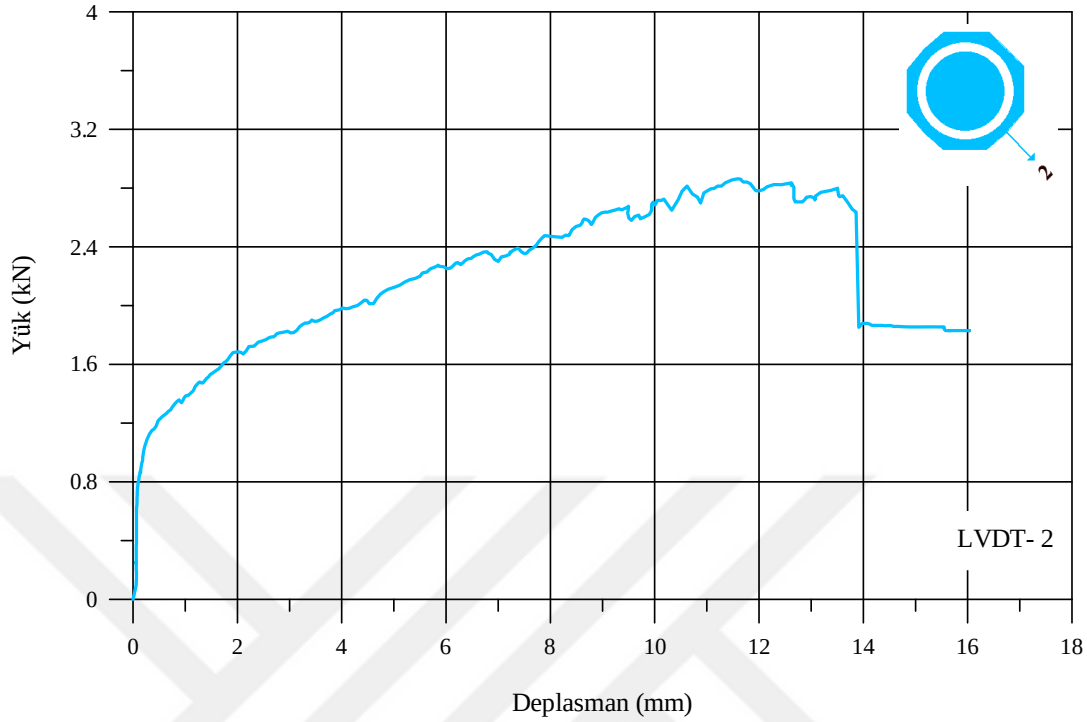
Şekil 4.59. EPD numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 5-6 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.



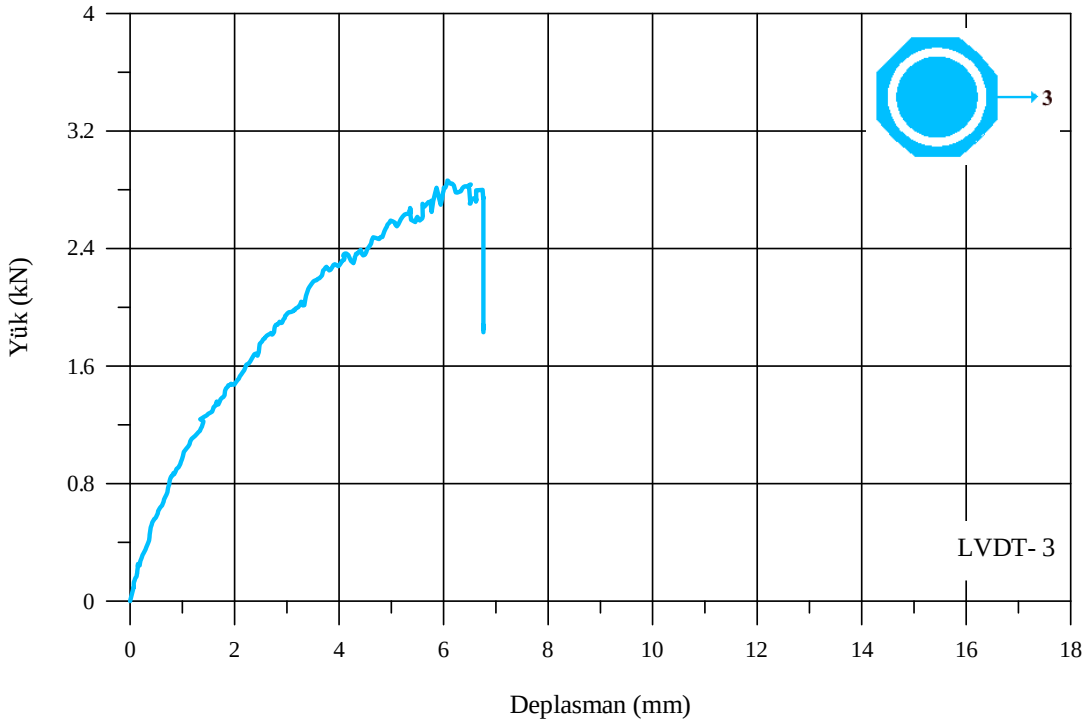
Şekil 4.60. EPD numunesinin 8. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



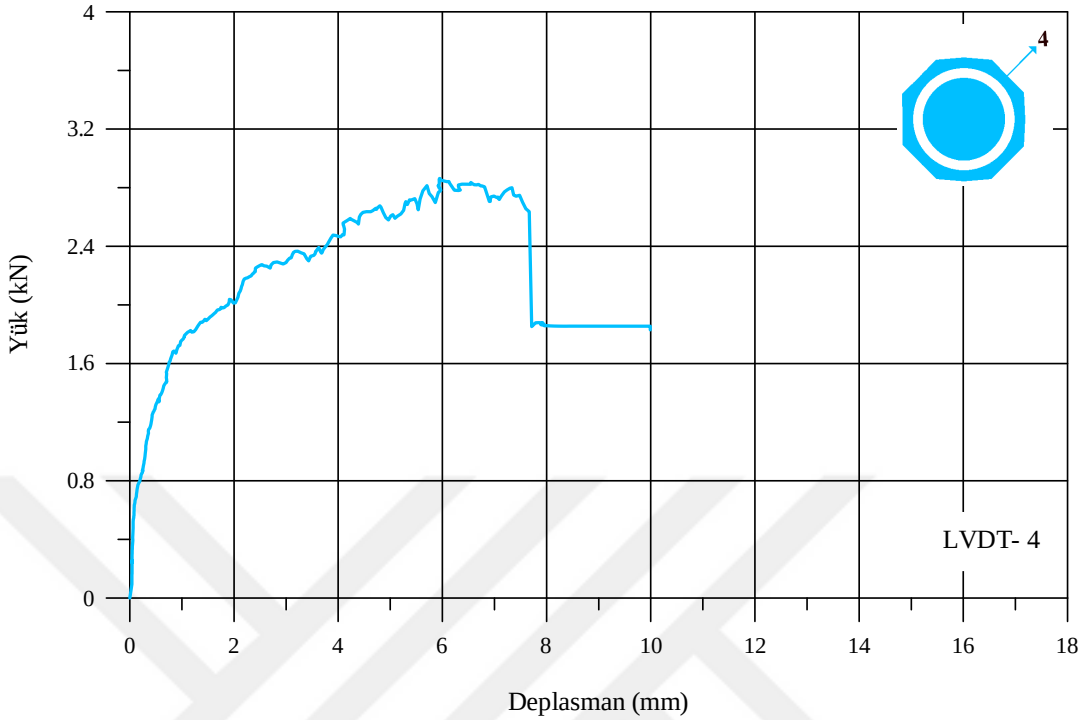
Şekil 4.61. EPD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



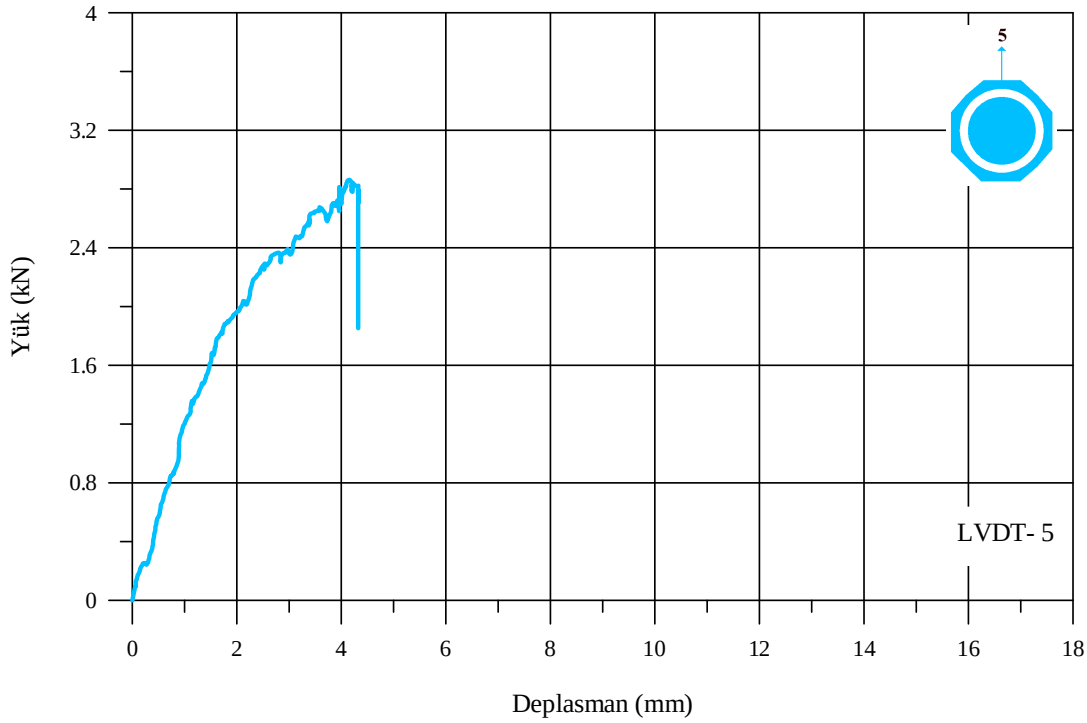
Şekil 4.62. EPD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



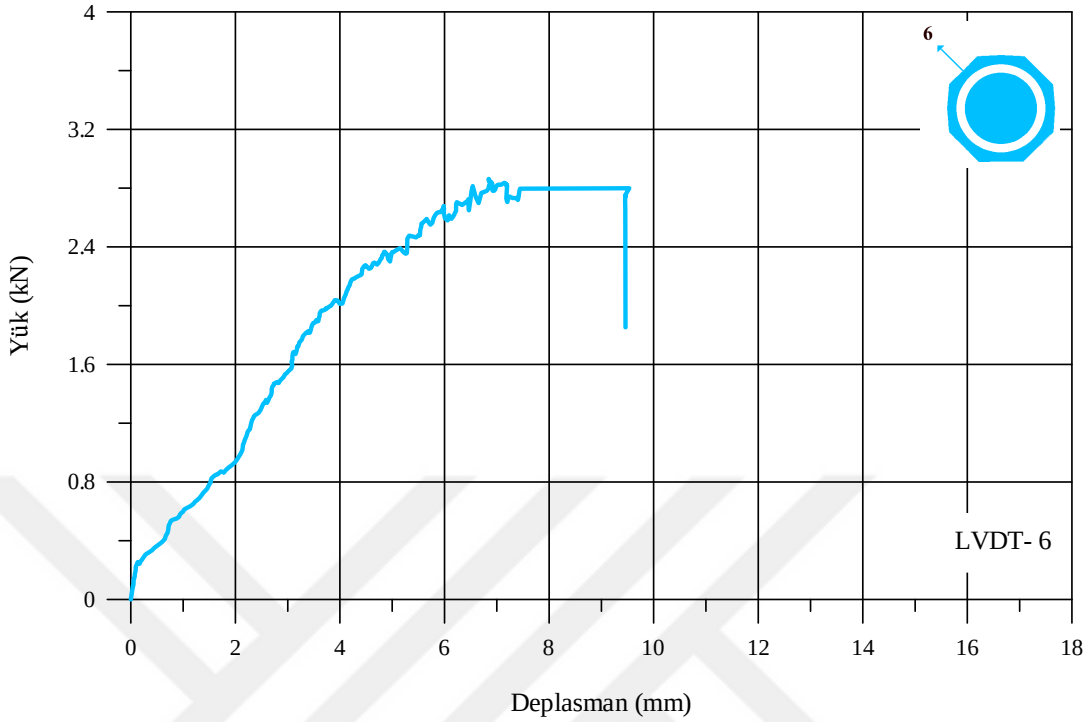
Şekil 4.63. EPD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



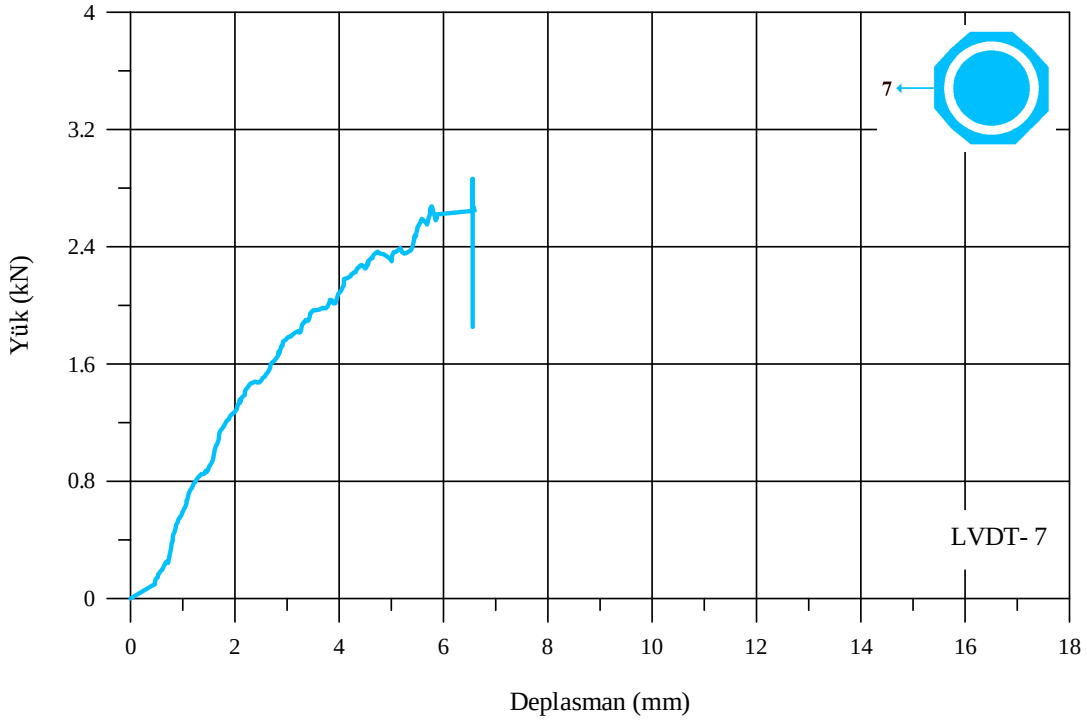
Şekil 4.64. EPD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



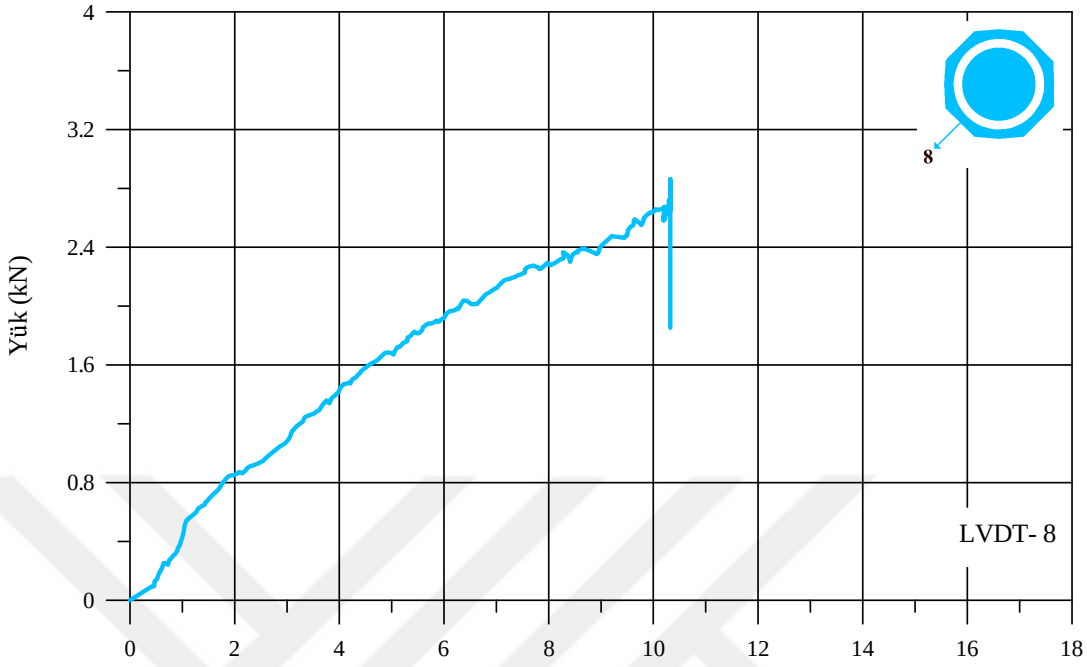
Şekil 4.65. EPD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



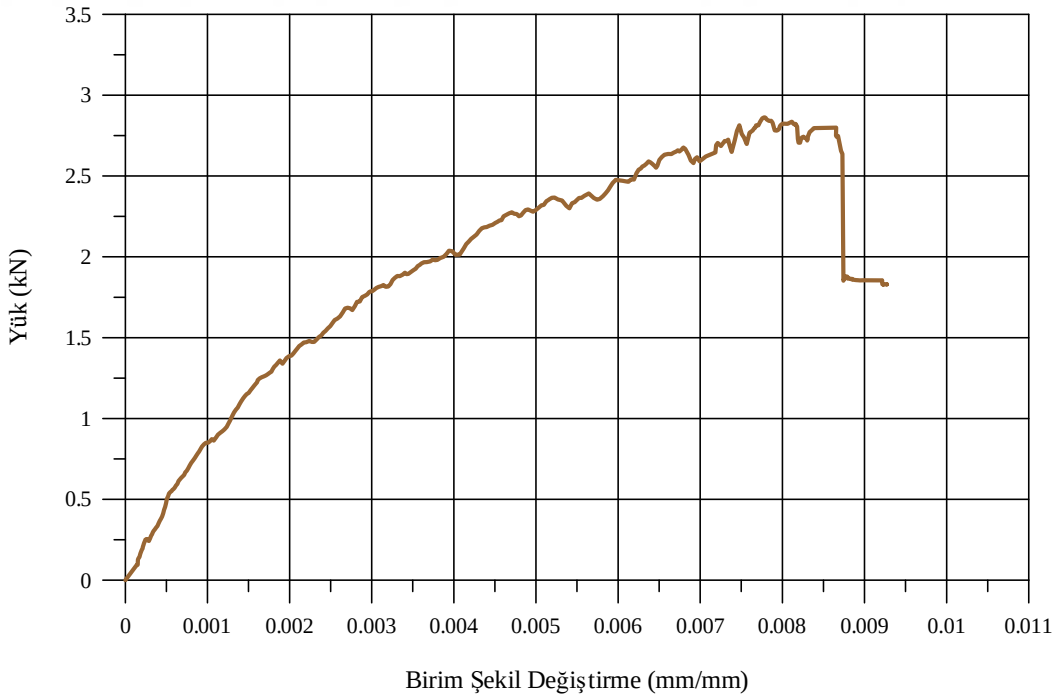
Şekil 4.66. EPD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



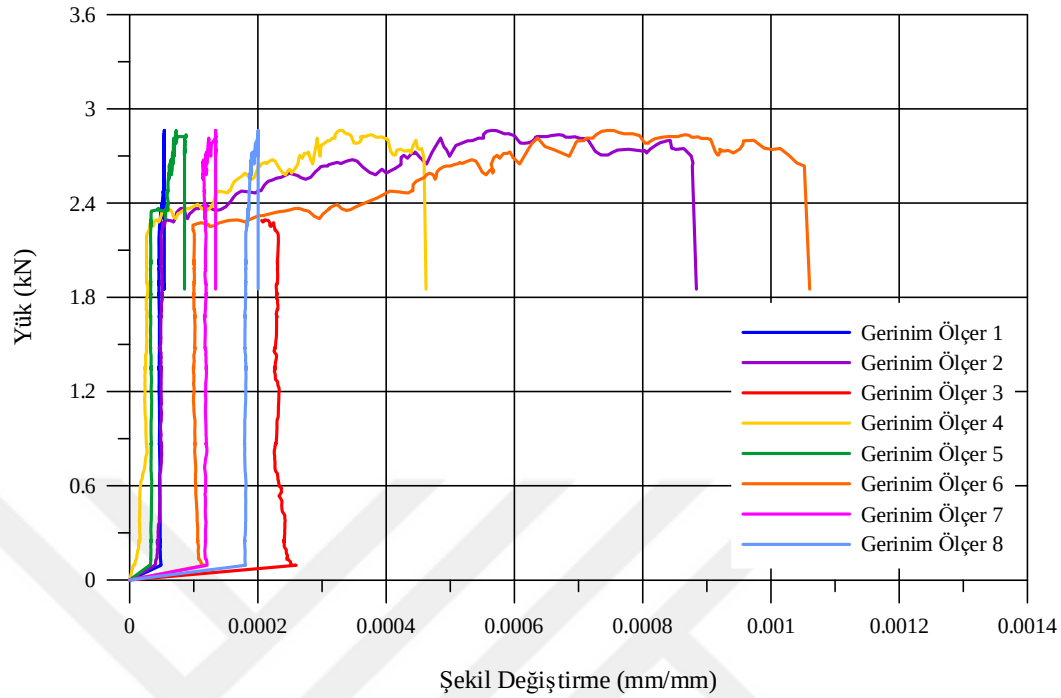
Şekil 4.67. EPD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.68. EPD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.69. EPD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4.70. EPD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

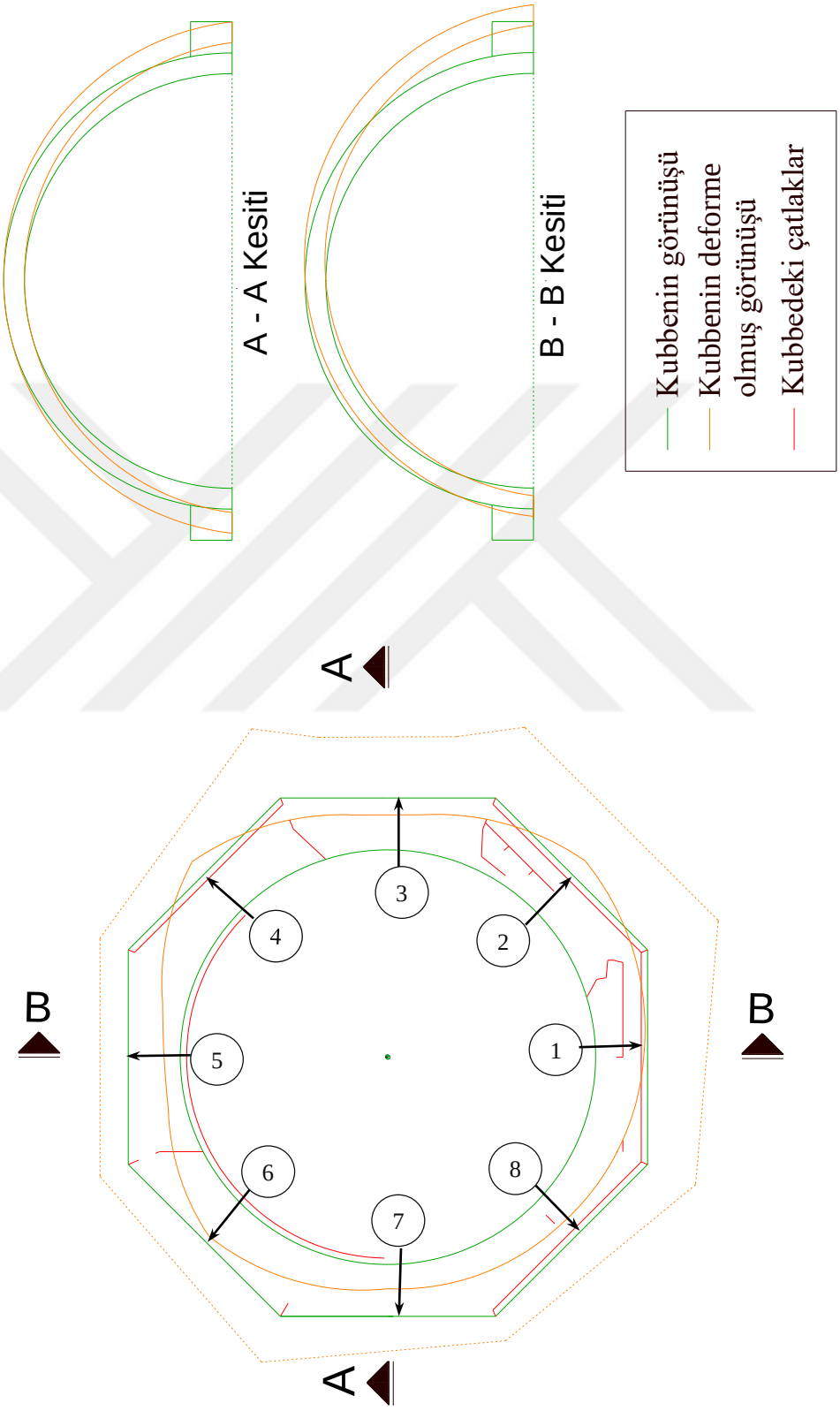
4.6 EPSD Numune Sonucu

Bu deneyde kubbe çok az hasar görmüştür. Kubbede oluşan hasarlar kasnaktaki çekme çemberinin altında ve beden duvarının üstünde oluşmuştur. Deney sonucunda kubbede oluşan çatlaklar aşağıdaki Şekil 4.71'de deformasyon eğrisinde gösterilmiştir. En büyük çatlak, deney düzeneğinin 2. kolu üzerinde oluşmuş olup 17,05 mm deplasman gerçekleştirmiştir. Deneyde oluşan düşey çatlaklar beden duvarının köşelerinden başlayarak alttaki FRP banda kadar ilerlemiştir. FRP bant arasında kalan bölgede iki tane düşey çatlak oluşmuştur. Yatay çatlaklar ise beden duvarı ve kasnağın birleşim yerindeki olan harçta meydana gelmiştir (Şekil 4.72).

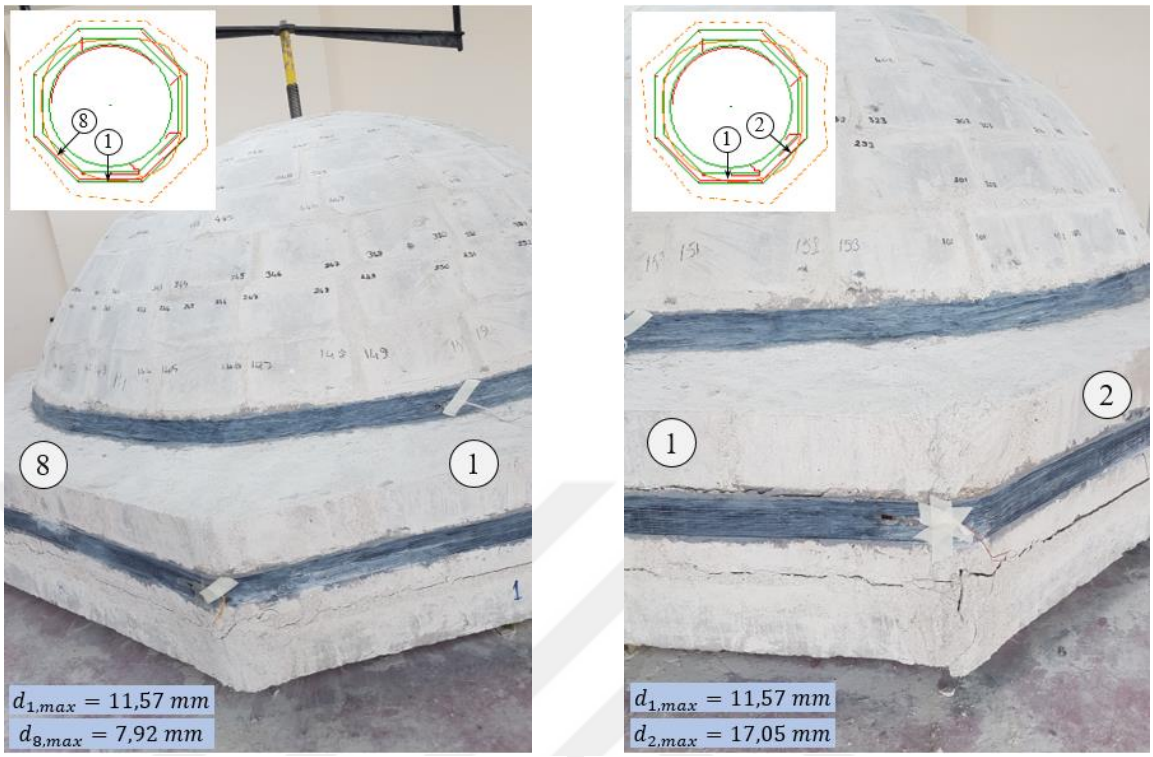
Deneydeki ikinci büyük çatlak ise 16,66 mm deplasman ile 4. kol üzerinde gerçekleşmiştir. Bu kol üzerindeki çatlağa bakıldığında, beden duvarı ile kasnağın birbirinden ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca iki FRP arasında 4. kolun ortasında küçük çatlak da oluşmuştur (Şekil 4.73). Üçüncü büyük çatlak ise kubbenin 8. kol üzerinde, 7,92 mm deplasman ile LVDT 8'de meydana gelmiştir. Deneyde oluşan bu çatlak beden duvarının köşelerinden başlayarak, kasnak ve beden duvarı arasında yatay olarak

ilerlemiştir. Ayrıca 8. kol ortasında meydana gelen düşey çatlaklar kasnak yüksekliği boyunca ilerleyerek FRP' yi kaldırmıştır (Şekil 4.72). 6. ve 7. kollar arasında oluşan maksimum 11,00 mm deplasman gerçekleşmiştir. Bu kollar arasında oluşan ilk çatlak alttaki FRP banda kadar ilerleyip kolların birleştiği köşede oluşmuştur. 3. - 4. ve 6. - 7. kollar arasındaki ikinci çatlak ise, etek hizasındaki FRP bandın hemen üstünde oluşmuş olup, beden duvarı boyunca yatay olarak çatlamıştır (Şekil 4.73).

EPSD numunesi deney sonucunda maksimum açıklık 2. kol üzeninde olup beden duvarı ve kasnak arasında oluşmuştur. Deney sonucunda elde edilen maksimum yük miktarı 2,06 kN, mesnetlerde meydana gelen maksimum yatay deplasman ise 17,05 mm ile LVDT 2'de ölçülmüştür. Aşağıda Şekil 4.74'den Şekil 4.81'e kadar EPDS numunesinin yük - deplasman grafikleri yer almaktadır. EPSD numunesinin yük şekil değiştirme grafiği Şekil 4.82'de verilmiş olup kubbeye uygulanan maksimum yük (2,06 kN) ulaşıldığında kubbedeki şekil değiştirme 0,00949 mm/mm olmuştur. Yükün artması ile kubbedeki çatlaklar da açılmaya başlamıştır. Kubbedeki birim şekil değiştirme 0,00952 mm/mm olduğunda beden duvarı ile kasnak arasında ve etek bölgesinde çatlaklar oluşmuştur. Aşağıda Şekil 4.83'de EPSD numunesinin gerinim ölçerlerin grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00289 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.

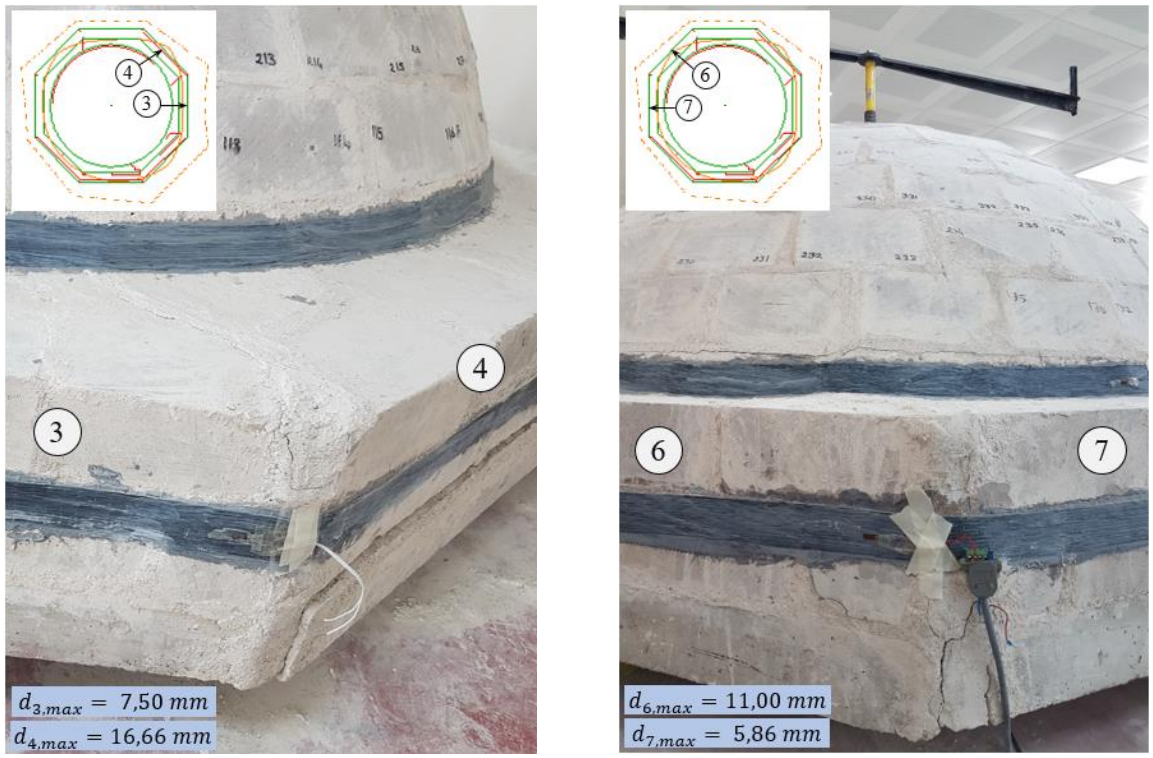


Şekil 4.71. EPSD numunesi deformasyon eğrisi.



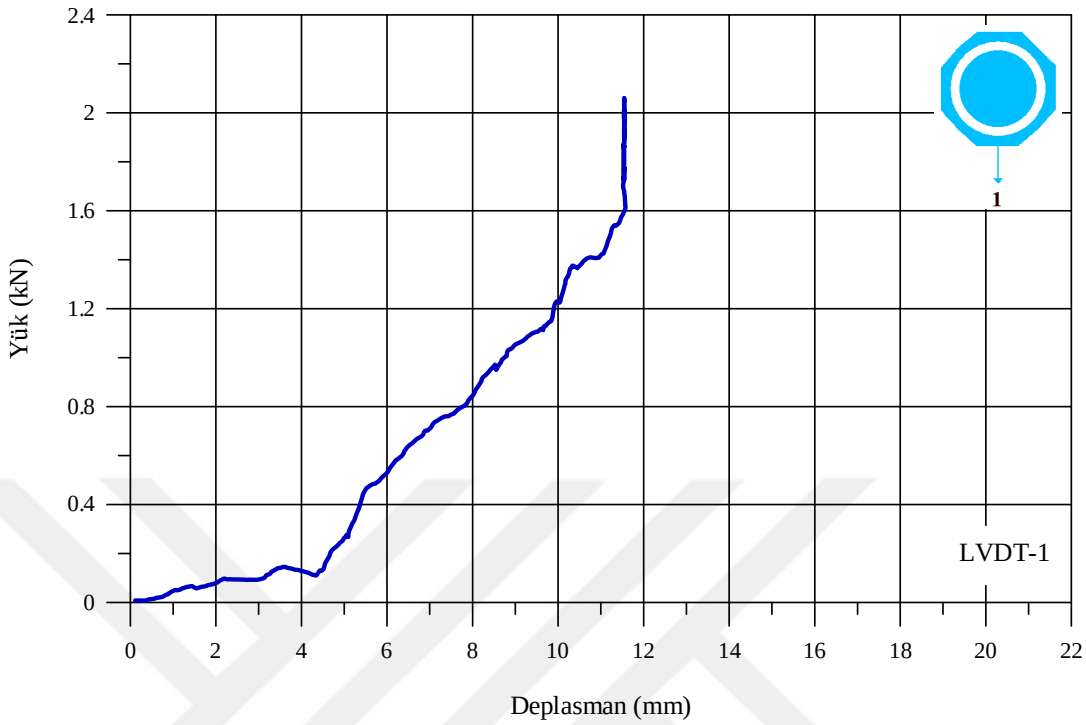
(a) (b)

Şekil 4.72. EPSD numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar.

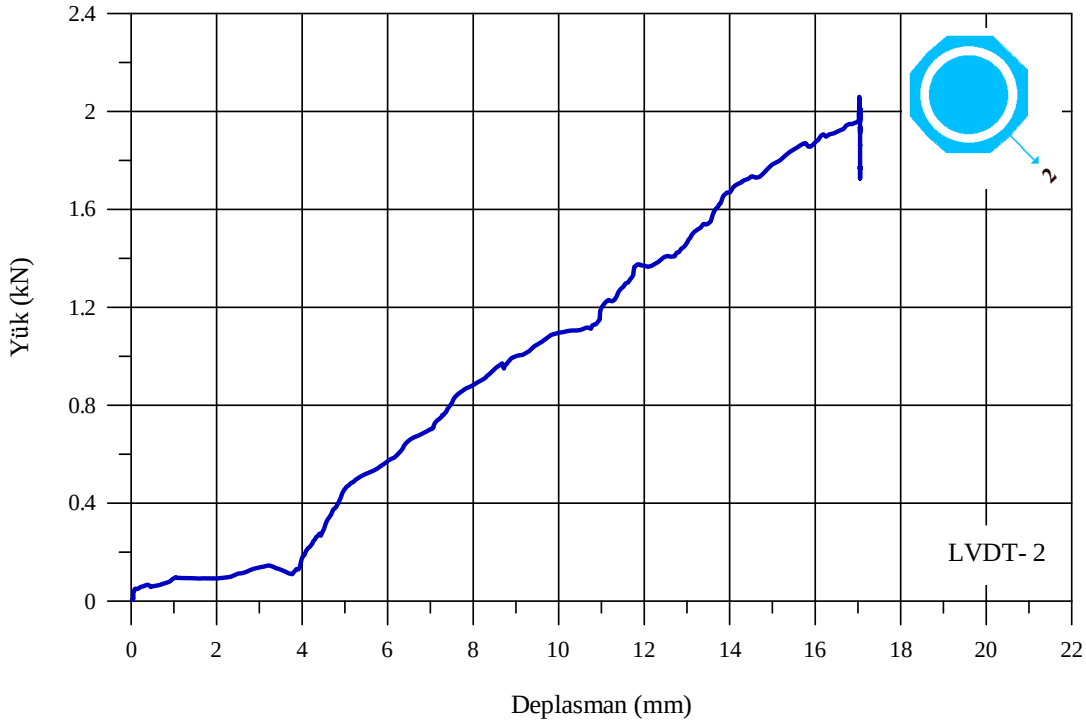


(a) (b)

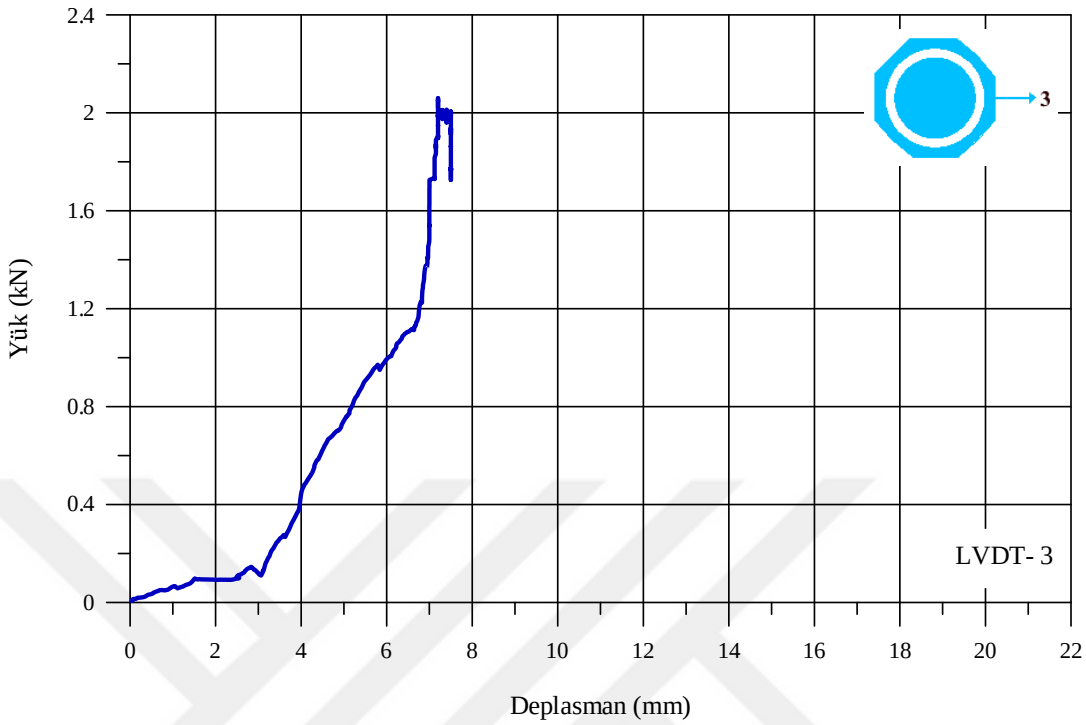
Şekil 4.73. EPSD numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 3-4 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.



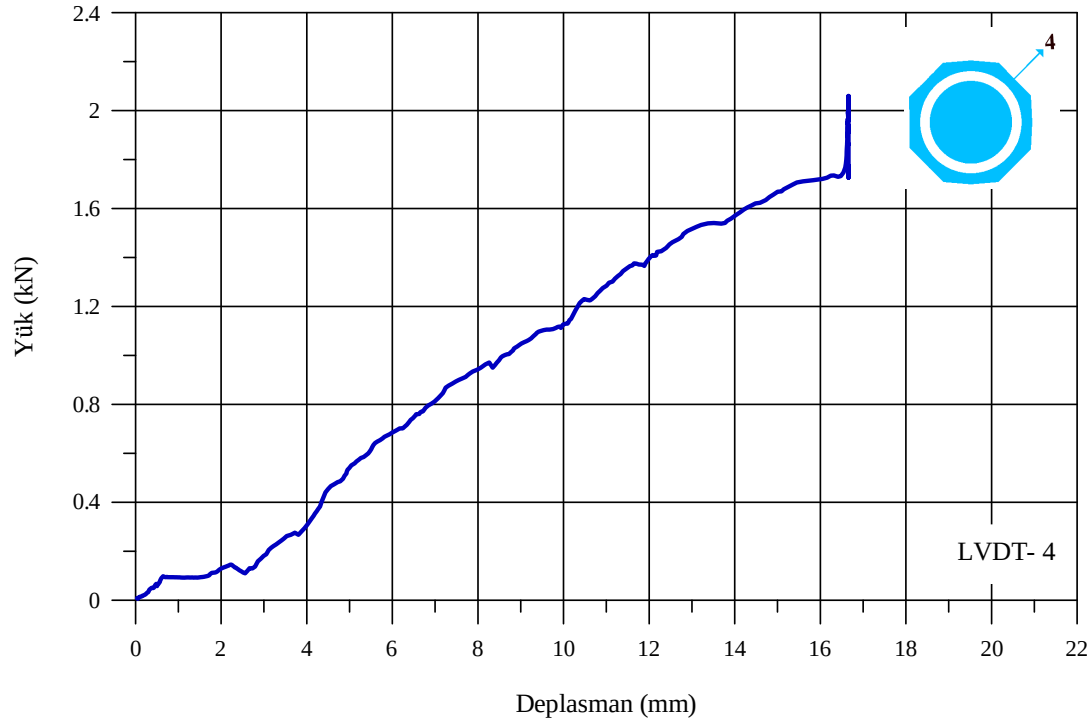
Şekil 4.74. EPSD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



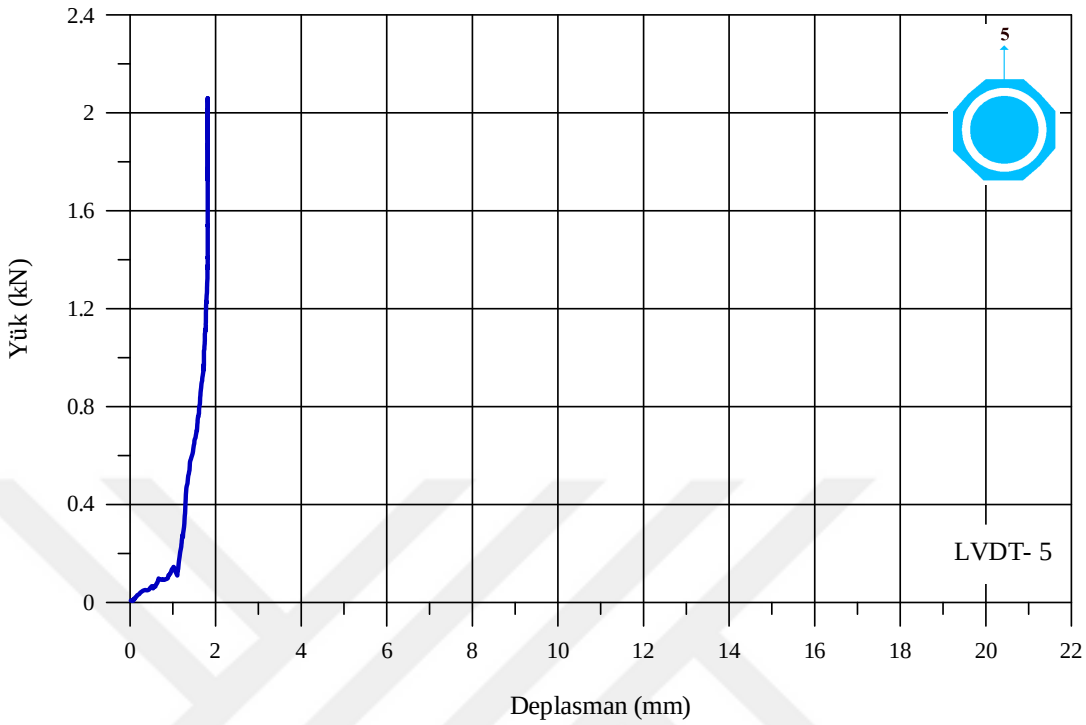
Şekil 4.75. EPSD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



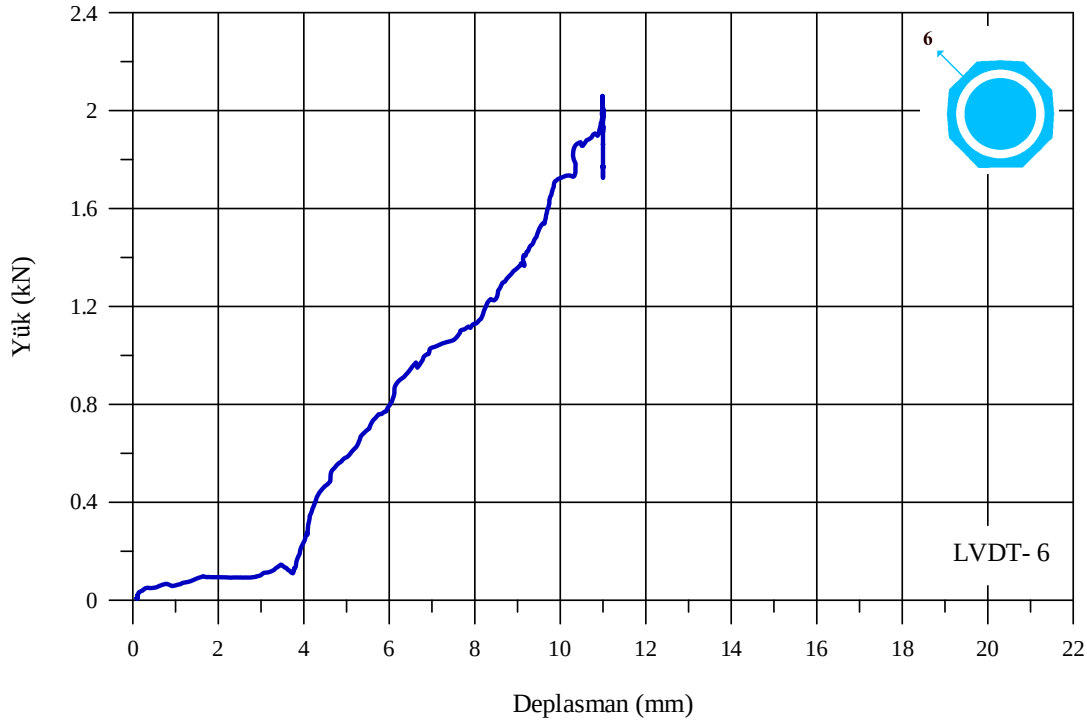
Şekil 4.76. EPSD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



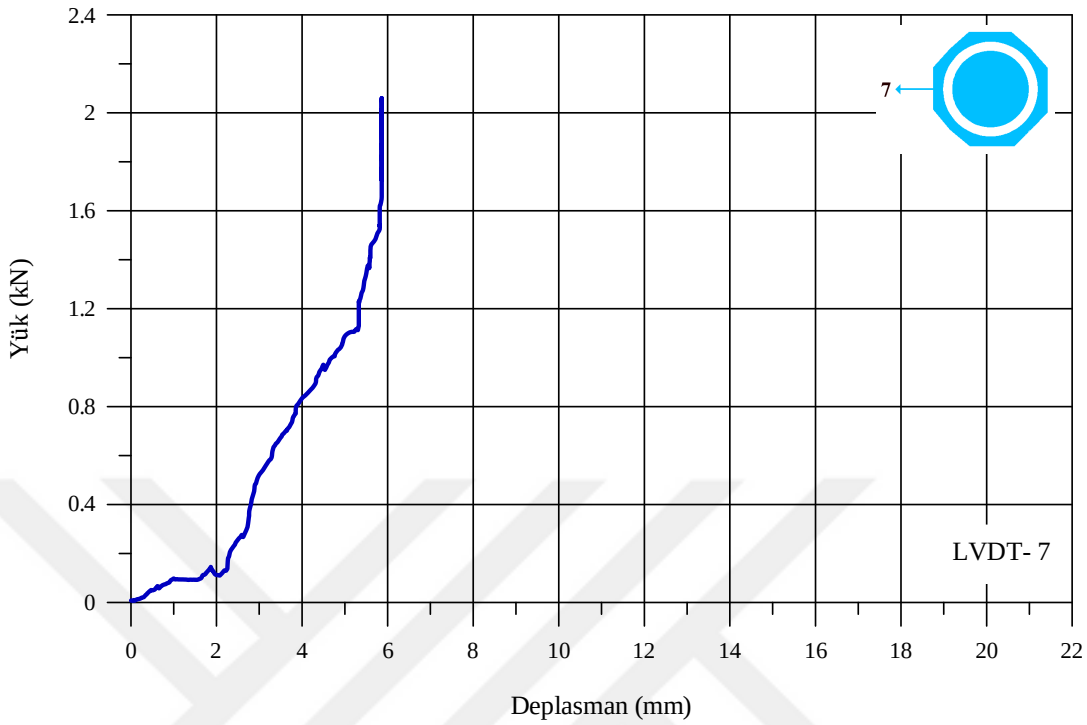
Şekil 4.77. EPSD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



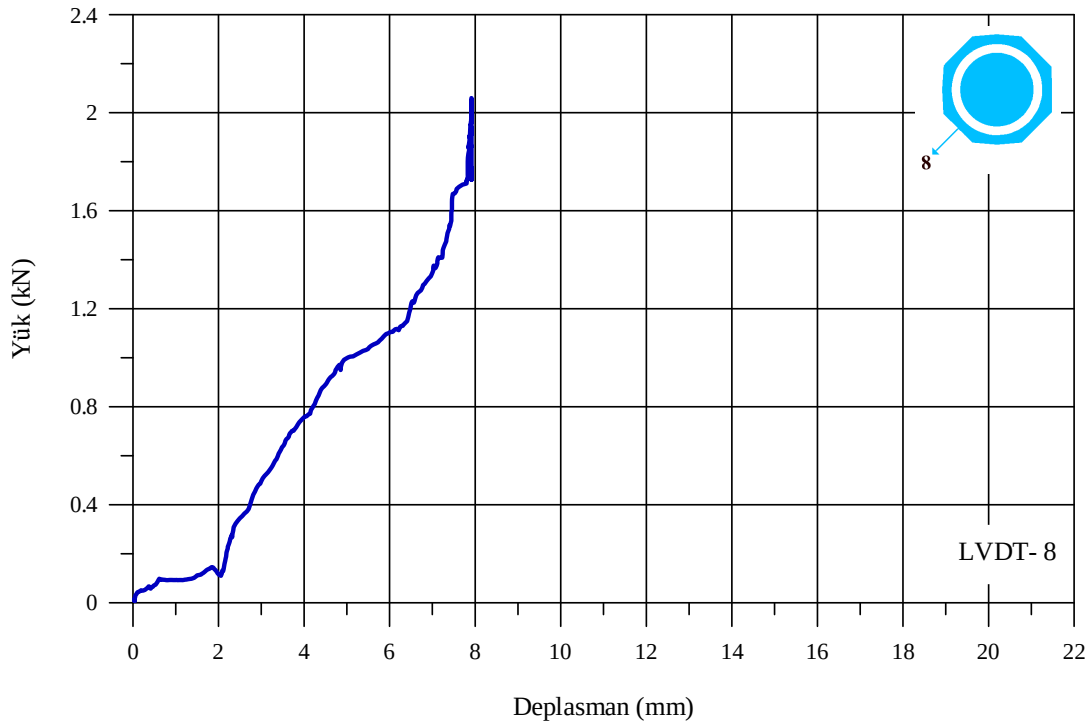
Şekil 4.78. EPSD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



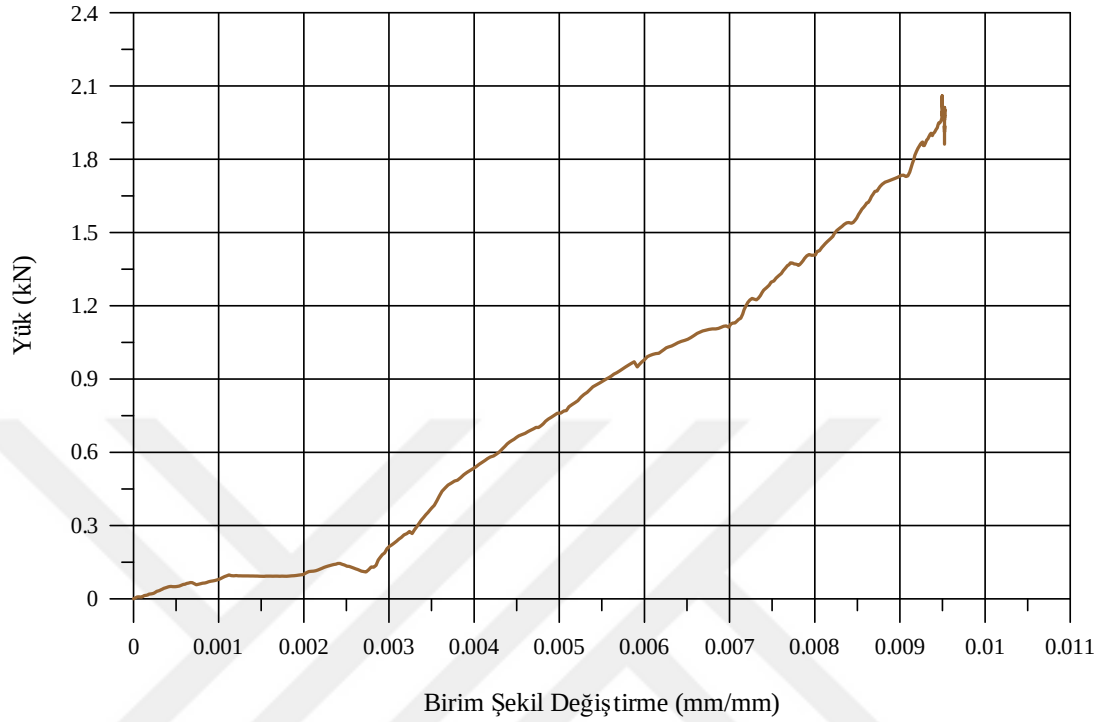
Şekil 4.79. EPSD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



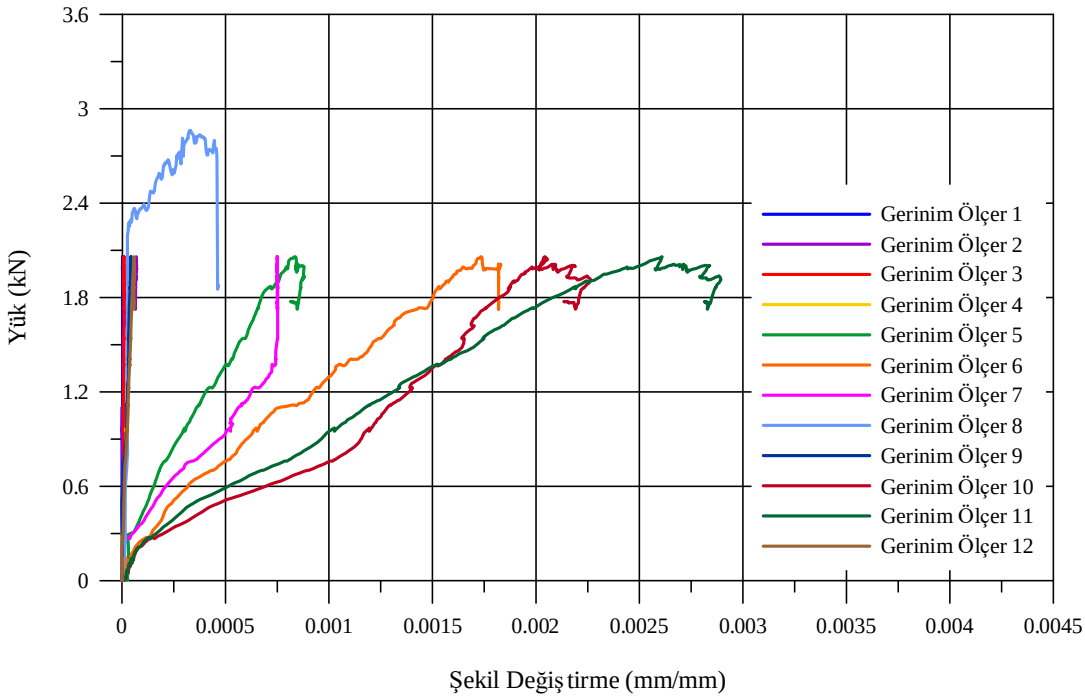
Şekil 4.80. EPSD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.81. EPSD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.82. EPSD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

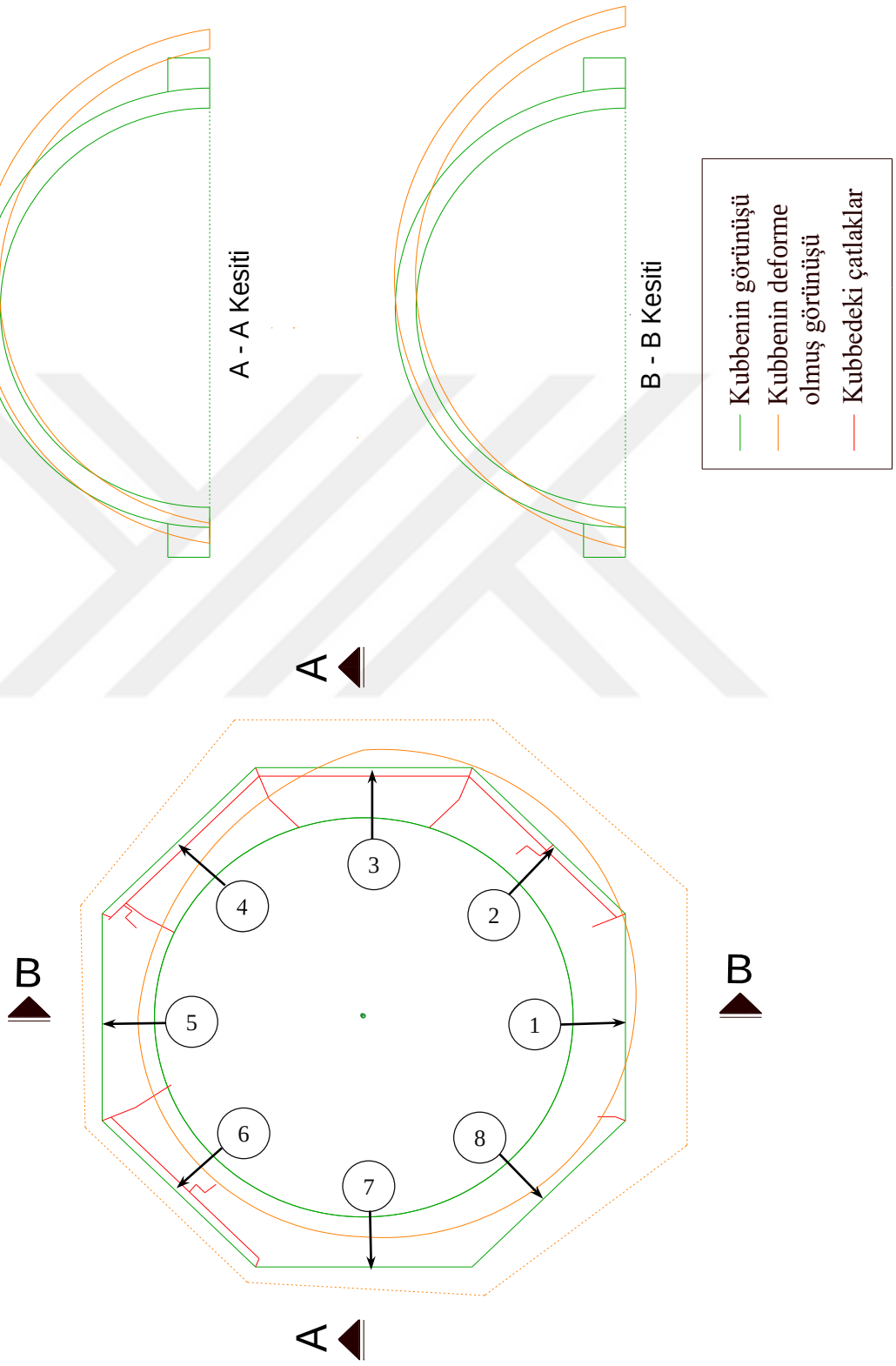


Şekil 4.83. EPSD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

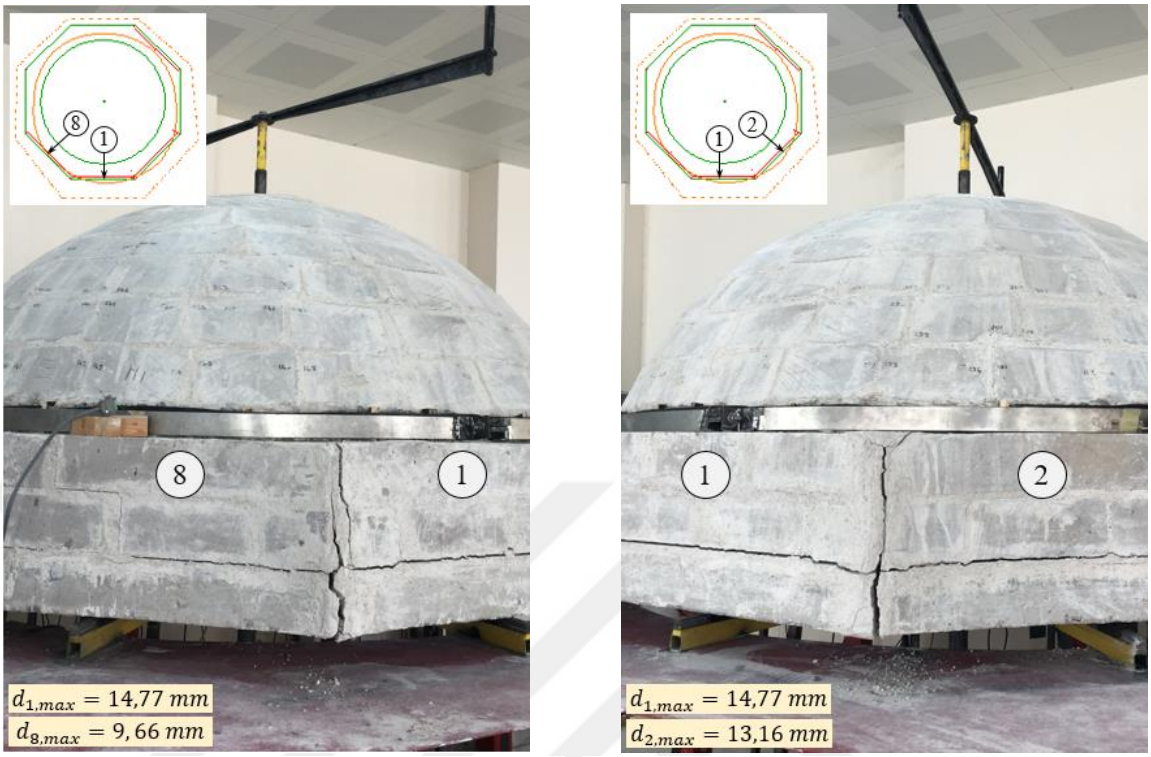
4.7 ERS Numune Sonucu

ERS numunesinde onarım ve güçlendirmesi uygulaması olarak çekme çemberi kullanılmıştır. Kubbe eteği çevresine yapılan çekme çemberi uygulamasında kubbede en fazla hasar etek hizasının alt kısmında görülmüştür. Kubbede en yaygın çatlaklar beden duvarının üstünde ve kubbe köşelerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.84). ERS deney numunesindeki en çok çatlak 1. ve 2. kol üzerinde olup maksimum 14,77 mm deplasman ile LVDT 1'de gerçekleşmiştir. Deney sonucu oluşan çatlak, kolların birleşim yerinde olup beden duvarı ile etek hizası arasında dikey bir şekilde ilerlemiştir. Bir diğer çatlak 2. kol üzerinde beden duvarının köşelerinde başlayarak kasnak ve beden duvarı arasında yatay olarak oluşmuştur (Şekil 4.85). İkinci büyük çatlak aşağıdaki Şekil 4.85'de görüldüğü gibi 1. ve 8. kollar arasında olup maksimum 14,77 mm deplasman yapmıştır. Çatlaklar yine aynı şekilde kolların birleşim yerinde olup beden duvarından başlayarak yukarıya doğru etek hizasına kadar ilerlemiştir. 1. ve 8. kollar üzerindeki çatlaklar aynı olup beden duvarı ve kasnak hizası arasında meydana gelmiştir (Şekil 4.85). Bir diğer çatlak ise 3. ve 4 kol üzerinde olup maksimum 11,98 mm deplasman yaparak kolların köşelerinde ve beden duvarı ile kasnağın birleşim yerinin yarısında oluşmuştur (Şekil 4.86). Şekil 4.86'da 6. ve 7. kollar arasında 4,99 mm deplasman ile bu kollar arasındaki köşede çatlak meydana gelmiştir.

Kubbede oluşan çatlaklar harçta meydana gelmiş olup kubbe taşları üzerinde herhangi bir hasar oluşmamıştır. ERS numunesi 1,55 kN yük yük taşıyarak en fazla deplasman 14,77 mm ile LVDT 1'de meydana gelmiştir. Aşağıdaki Şekil 4.87'den Şekil 4.94' e kadar yük – deplasman grafikleri verilmiştir. Şekil 4.95' te ERS numunesine uygulanan maksimum 1,55 kN yüke ulaştığında kubbedeki birim şekil değiştirme 0,00696 mm/mm olmuştur. Yükün artmasıyla kubbedeki çatlaklar açılmaya başlamıştır. Kubbedeki şekil değiştirme 0,00699 mm/mm olduğu zaman beden duvarı ve kasnak bölgesi ile kasnak köşelerinde çatlaklar gözlenmiştir. Aşağıda Şekil 4.96'da ERS numunesinin gerinim ölçerlerin grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00175 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.

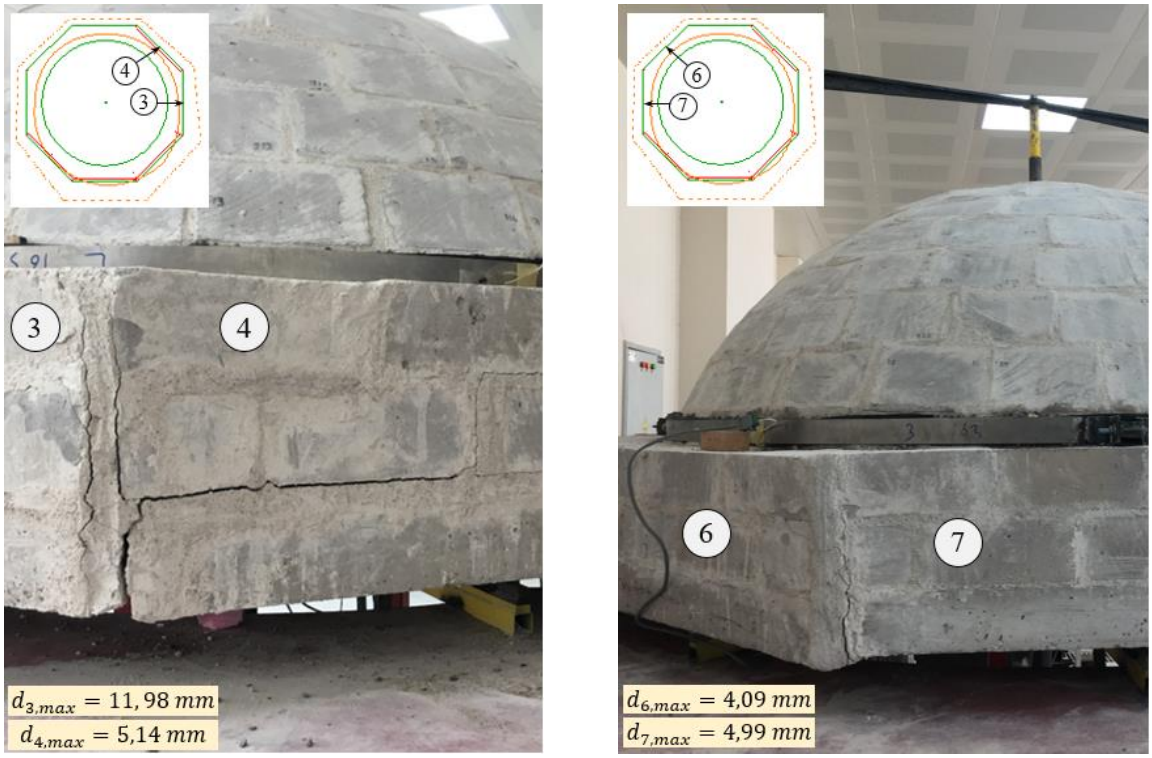


Şekil 4.84. ERS numunesi deformasyon eğrisi.



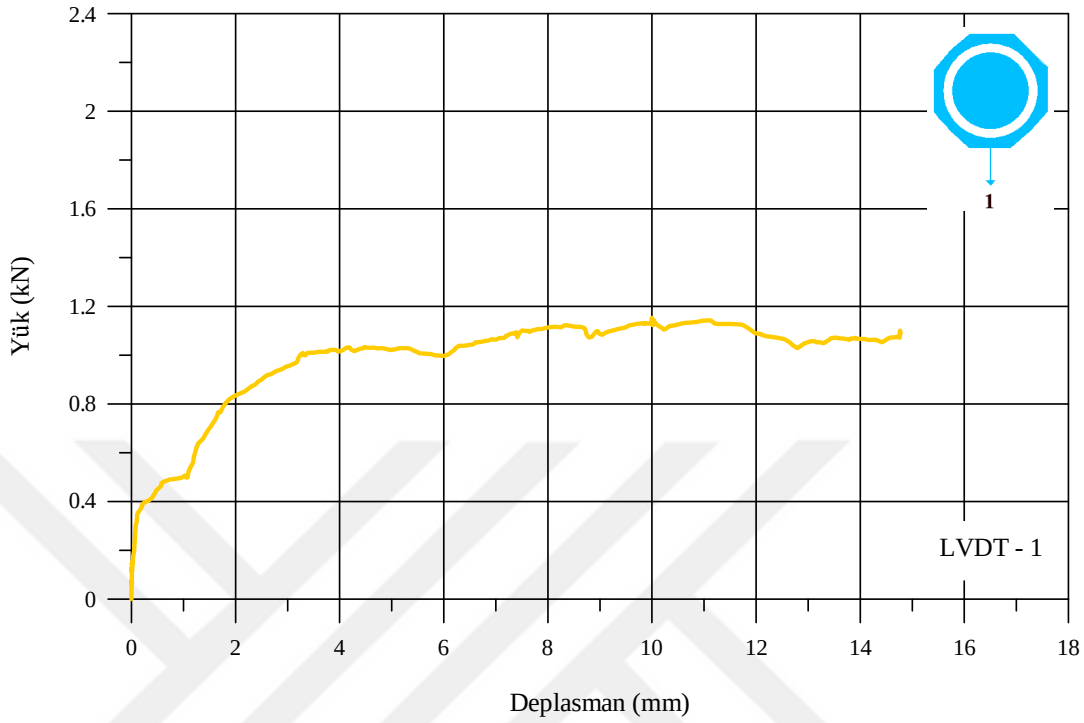
(a) (b)

Şekil 4.85. ERS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 1-8 (b) 1-2 kollar arası çatlaklar.

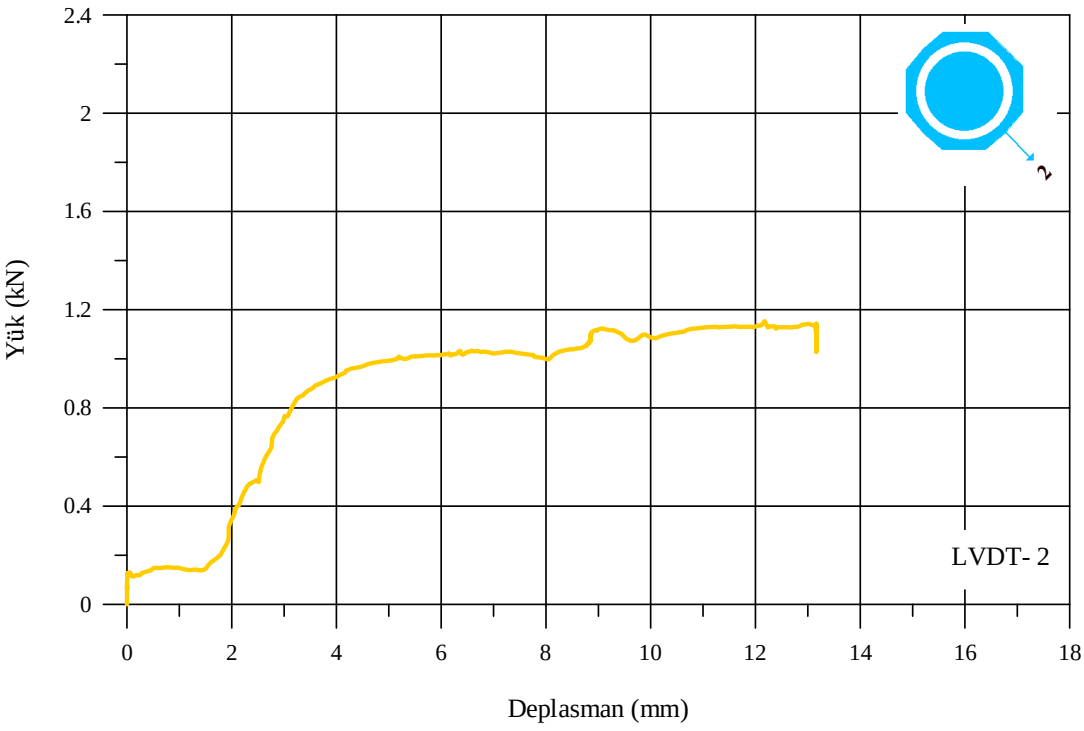


(a) (b)

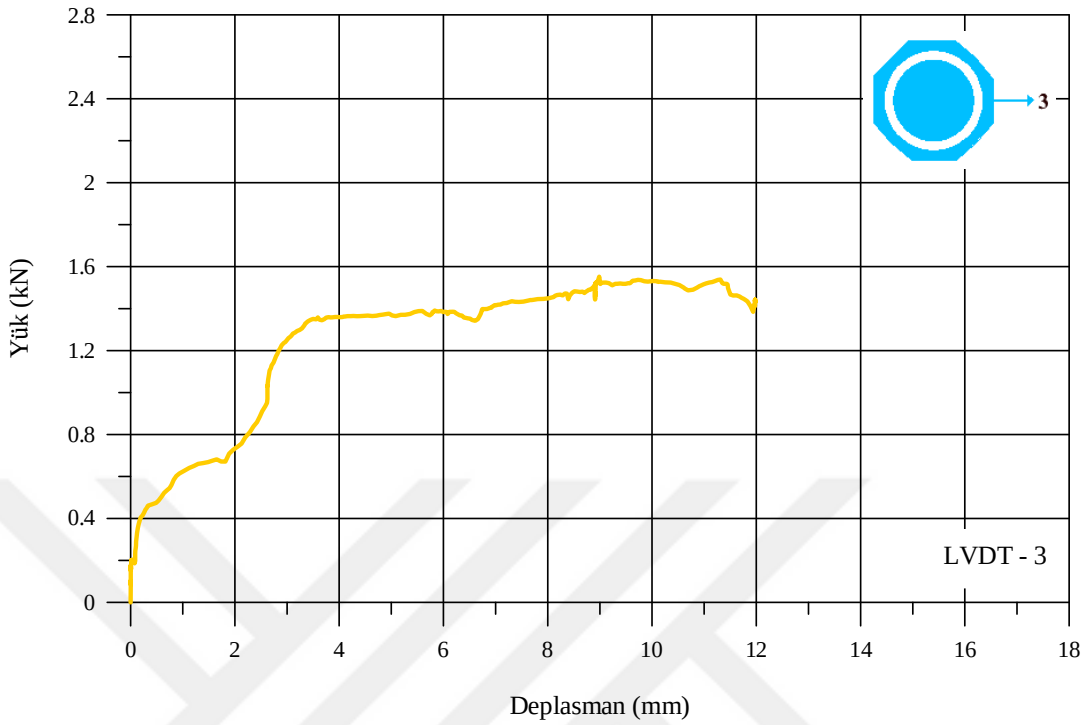
Şekil 4.86. ERS numunesinde oluşan çatlaklar; (a) 3-4 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.



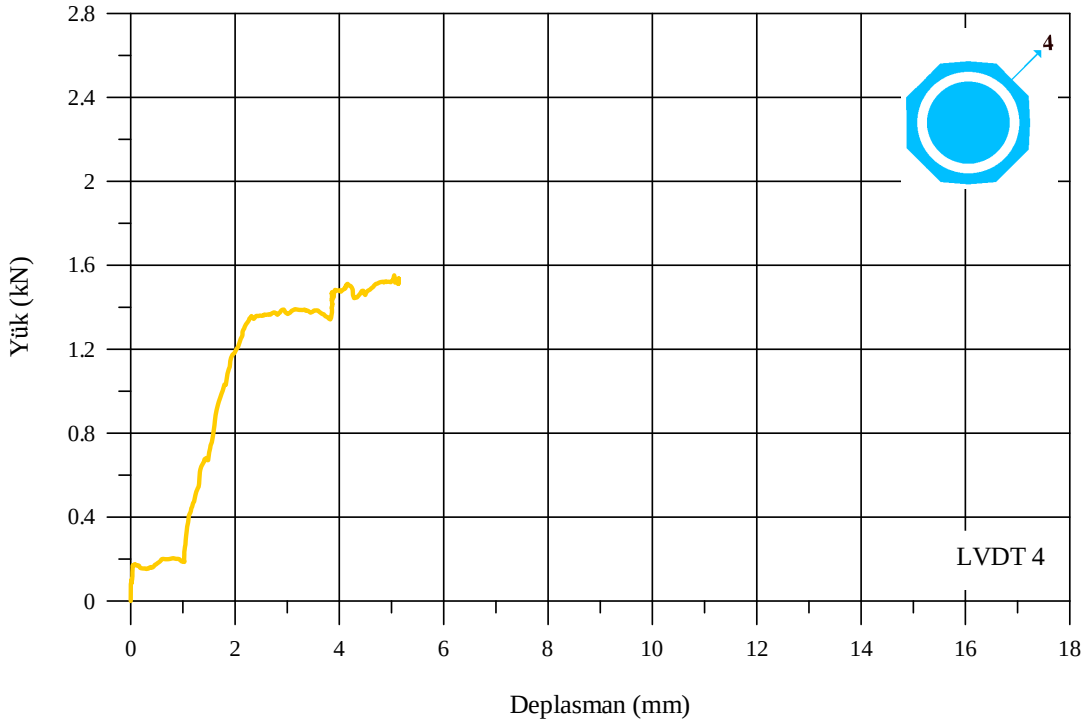
Şekil 4.87. ERS numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



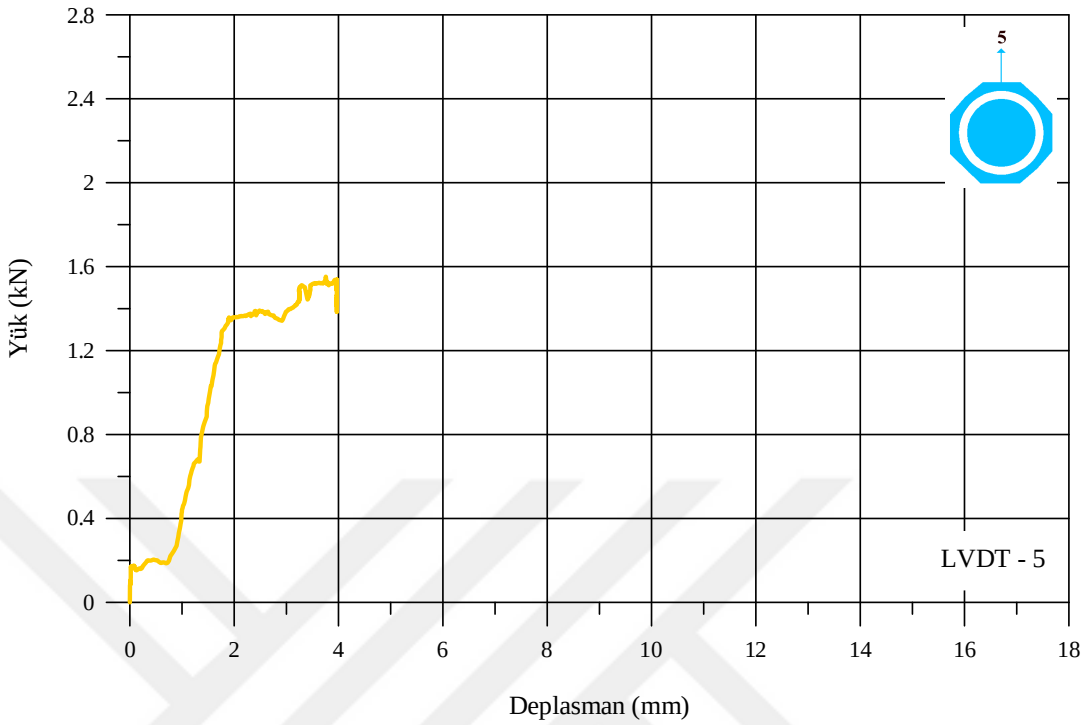
Şekil 4.88. ERS numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



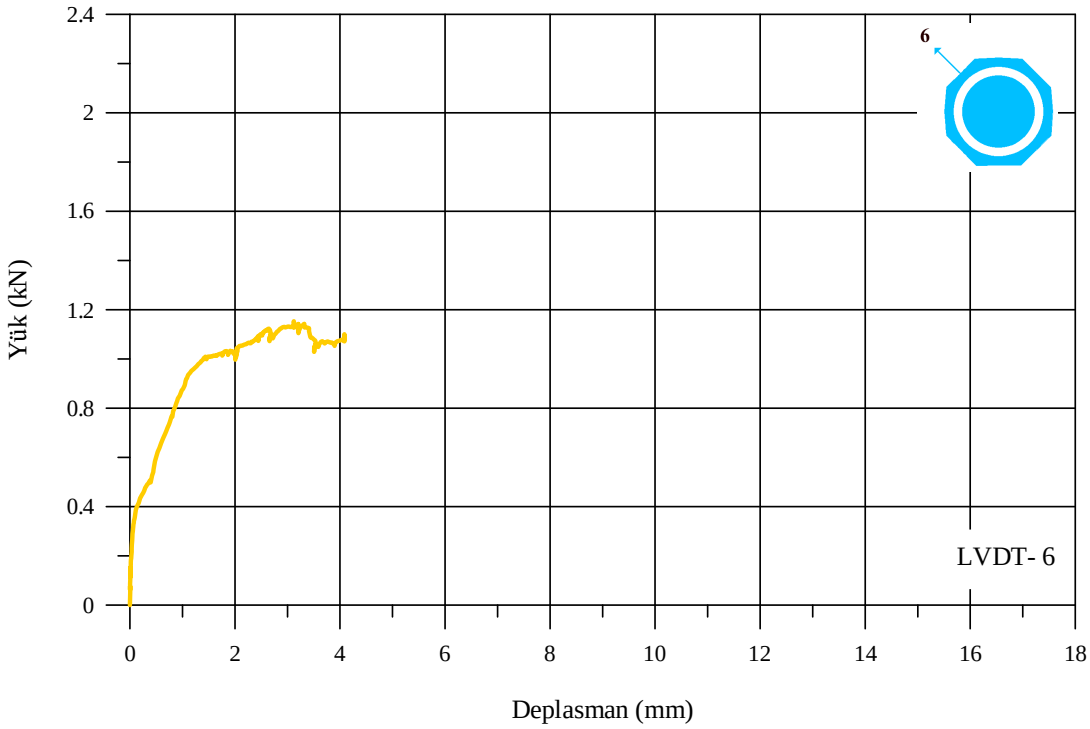
Şekil 4.89. ERS numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



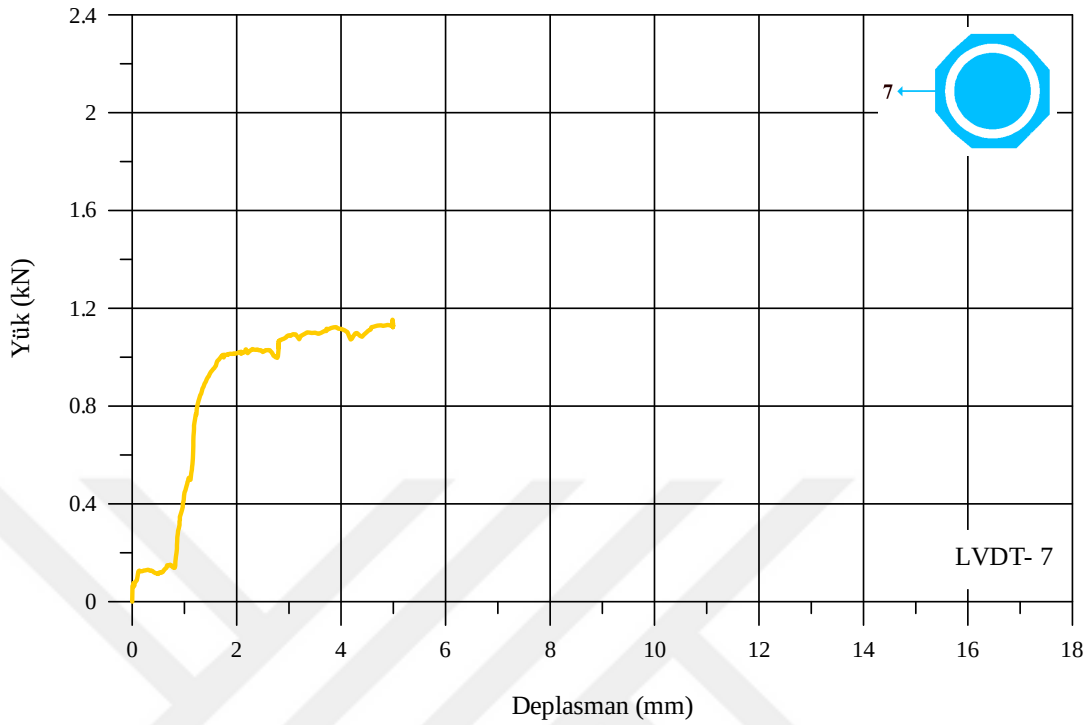
Şekil 4.90. ERS numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



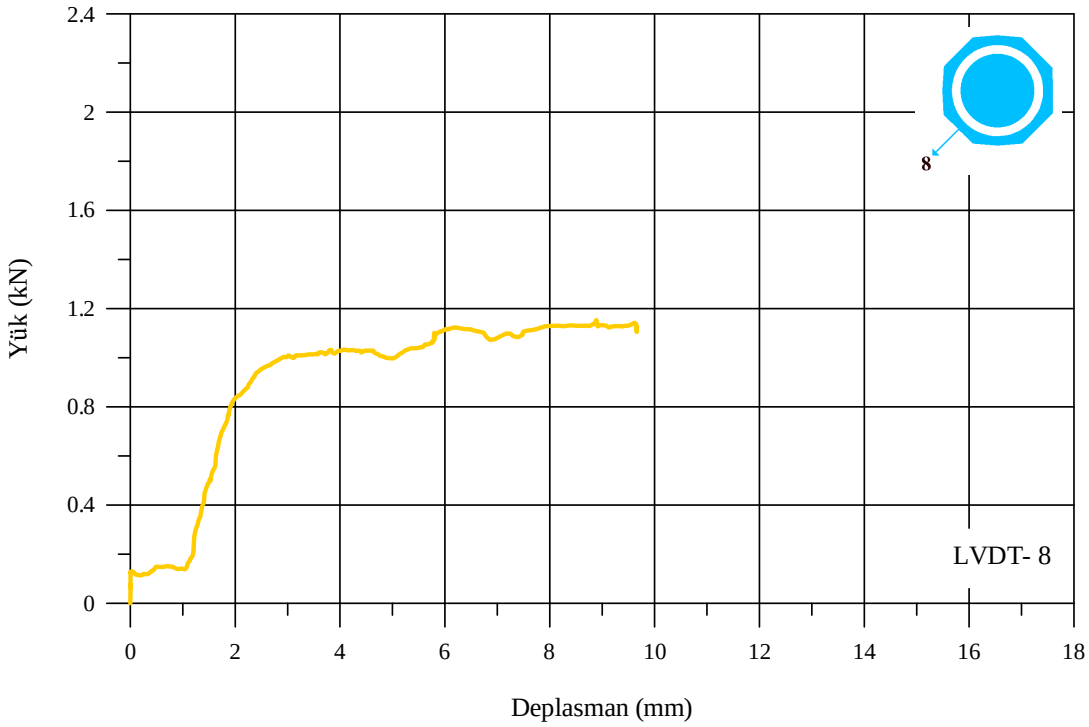
Şekil 4.91. ERS numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



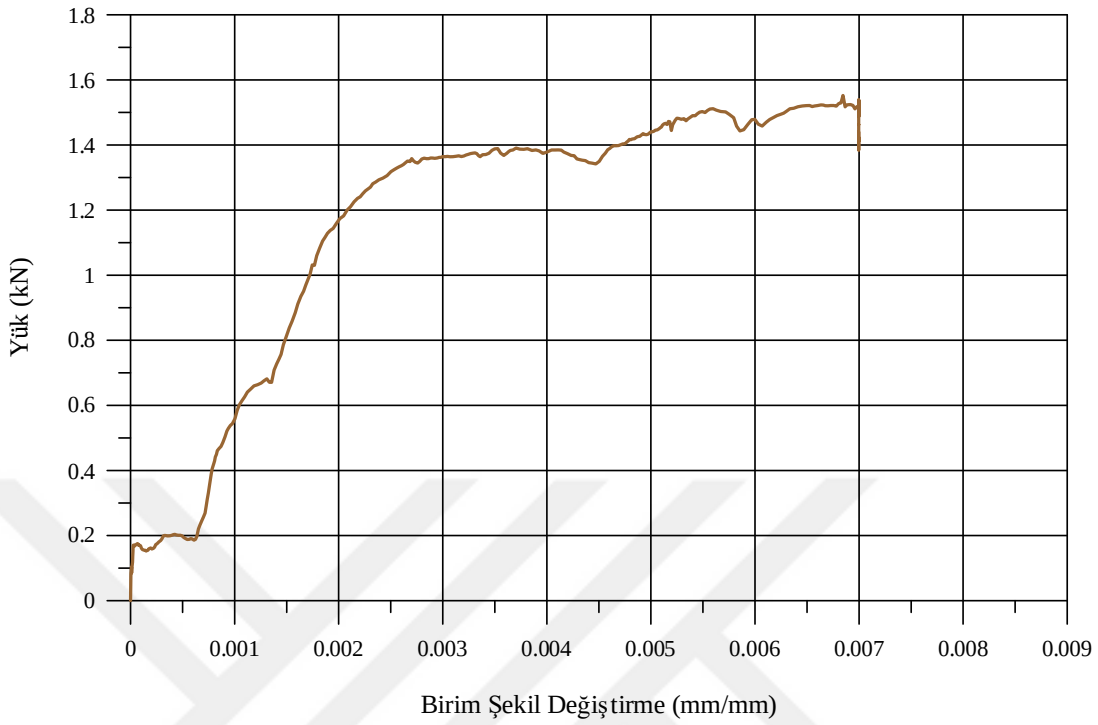
Şekil 4.92. ERS numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



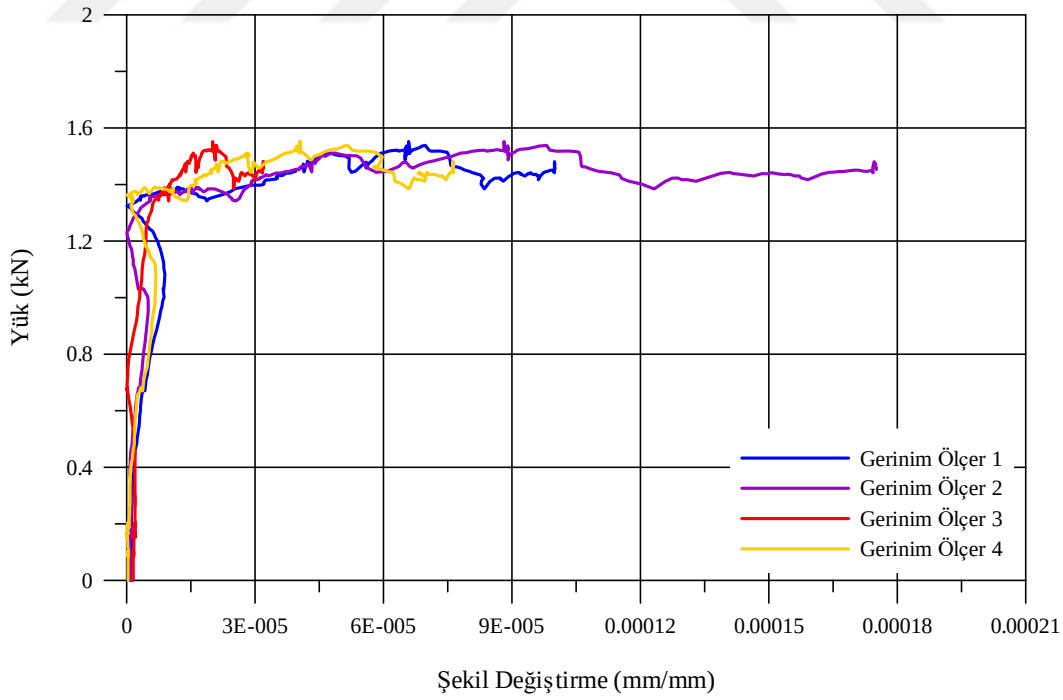
Şekil 4.93. ERS numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.94. ERS numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.95. ERS numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

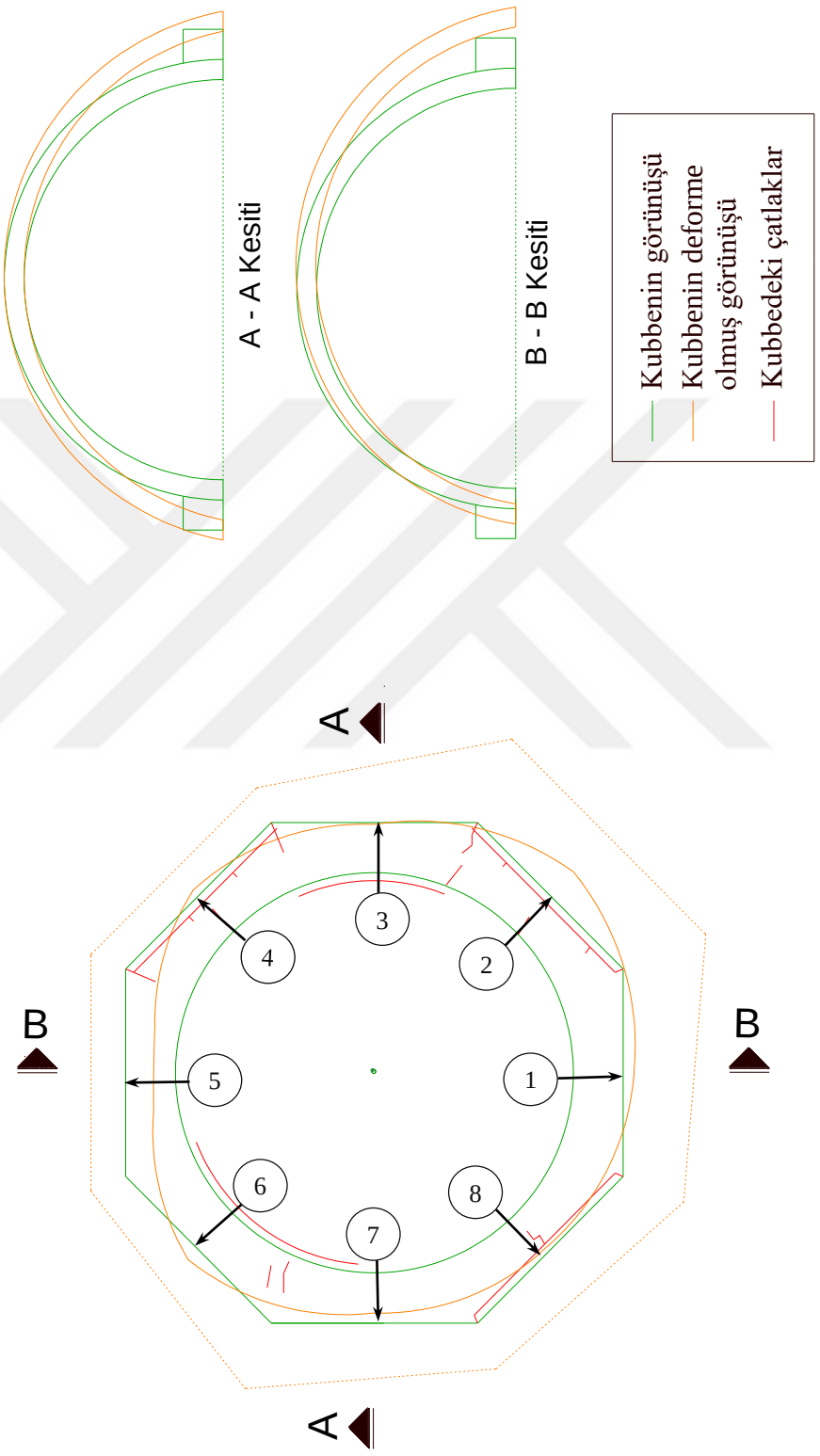


Şekil 4.96. ERS numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

4.8 ERD Numune Sonucu

Kubbe kasnağı etrafına yapılan çekme çemberi uygulamasında kubbede en fazla hasar etek hizasının hemen üst kısmında görülmüştür (Şekil 4.97). Deney sonunda görün en geniş çatlak 2. kol üzerinde meydana gelip 20,87 mm deplasman yapmıştır. Bu çatlak beden duvar köşelerinden başlayarak beden duvarı ve kasnak hizası boyunca ilerlemiştir (Şekil 4.98). İkinci geniş çatlak ise 15,25 mm deplasman ile 8. kol üzerinde meydana gelmiştir (Şekil 4.101). Deney sonucunda oluşan çatlaklar yine beden duvarının köşelerinden başlayıp kasnak hizası boyunca devam etmiştir. Üçüncü çatlak ise 4. Kol üzerinde olup 14,50 mm deplasman göstererek LVDT 4'de oluşmuştur. Deneyde meydana gelen çatlaklar beden duvarı ve kasnak arasındaki harçta meydana gelmiştir (Şekil 4.99). Aşağıdaki Şekil 4.100'de 6. ve 7. kollar arasındaki köşede 16,13 mm deplasman ile kasnak yüksekliğince çatlaklar oluşmuştur.

Yapılan ERD deneyi sonunda elde edilen maksimum yük miktarı 2,40 kN, mesnetlerde meydana gelen maksimum yatay deplasman ise 20,87 mm olarak 2. kol üzerindeki LVDT 2'de ölçülmüştür. Kubbede oluşan çatlaklar harçta meydana gelmiştir. Dolayısı ile kubbe taşları üzerinde hasar oluşmamıştır. Söz konusu çatlaklar ile ilgili grafikler Şekil 4.102'den Şekil 4.109'a kadar verilmiştir. ERD numunesine uygulanan maksimum yüke (2,40 kN) ulaşıldığında kubbedeki şekil değiştirme 0,01252 mm/mm olmuştur. Yükün artması ile kubbedeki çatlaklar da açılmaya başlamıştır. Kubbedeki birim şekil değiştirme 0,01254 mm/mm olduğunda, beden duvarı ile kasnak arasında ve etek bölgesinde çatlaklar oluşmuştur (Şekil 4.110). Aşağıda Şekil 4.111'de ERD numunesinin gerinim ölçer grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00055 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.



Şekil 4.97. ERD numunesi deformasyon eğrisi.



Şekil 4.98. ERD numunesinin 2. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



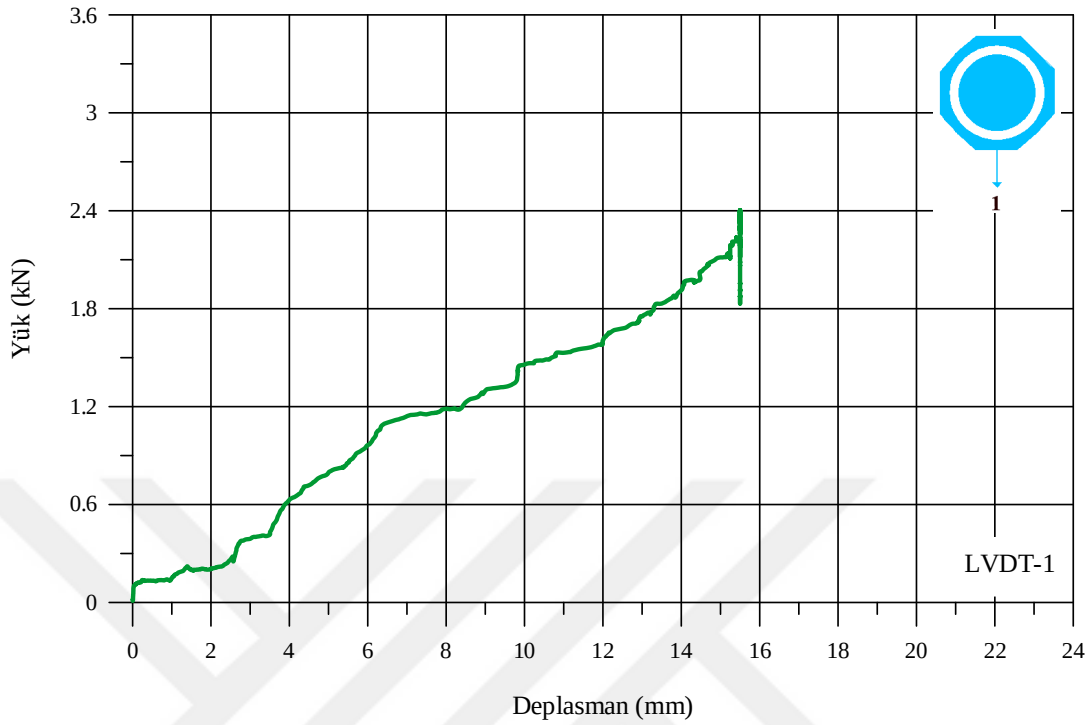
Şekil 4.99. ERD numunesinin 4. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



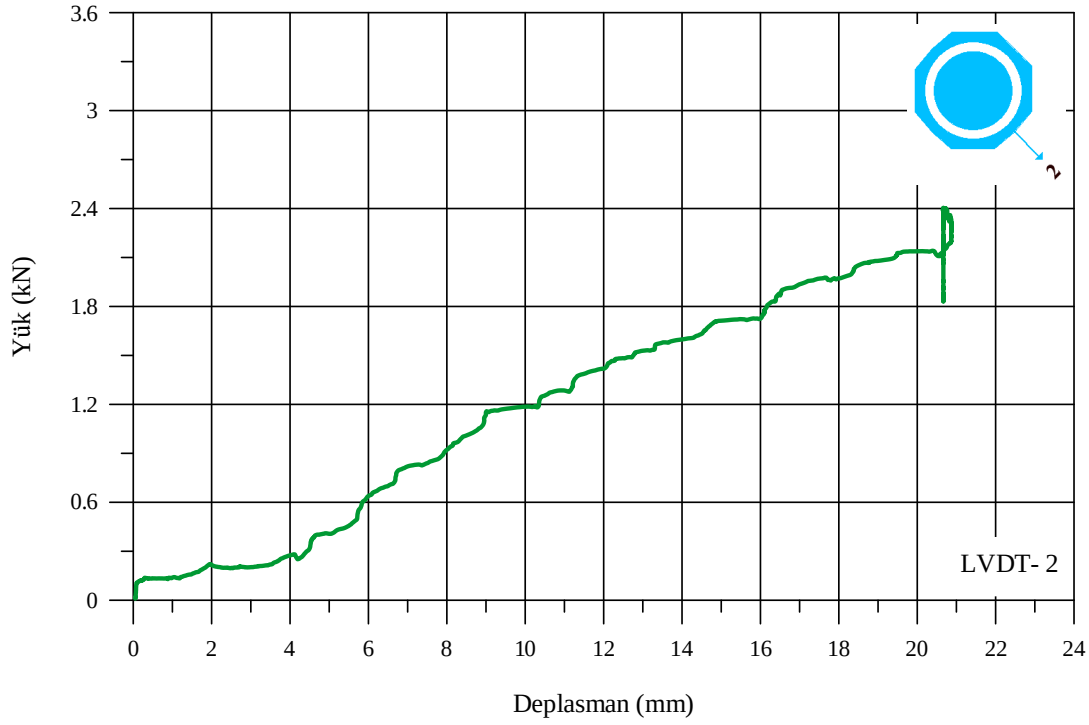
Şekil 4.100. ERD numunesinin 6. ve 7. kolları arasında oluşan çatlaklar.



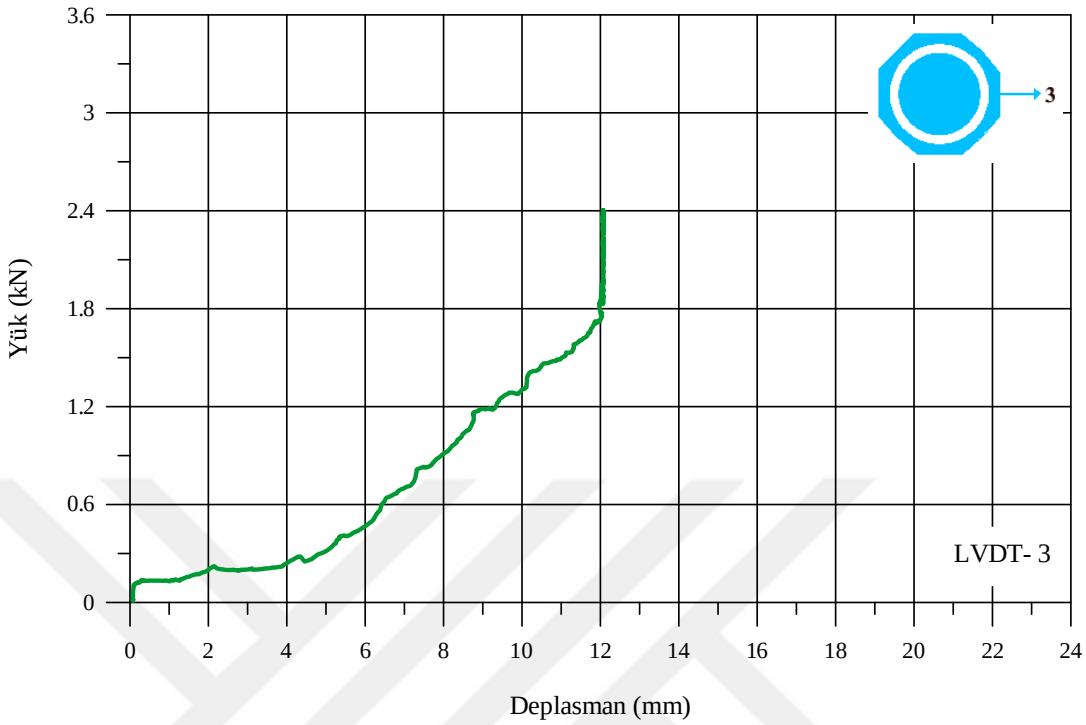
Şekil 4.101. ERD numunesinin 8. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



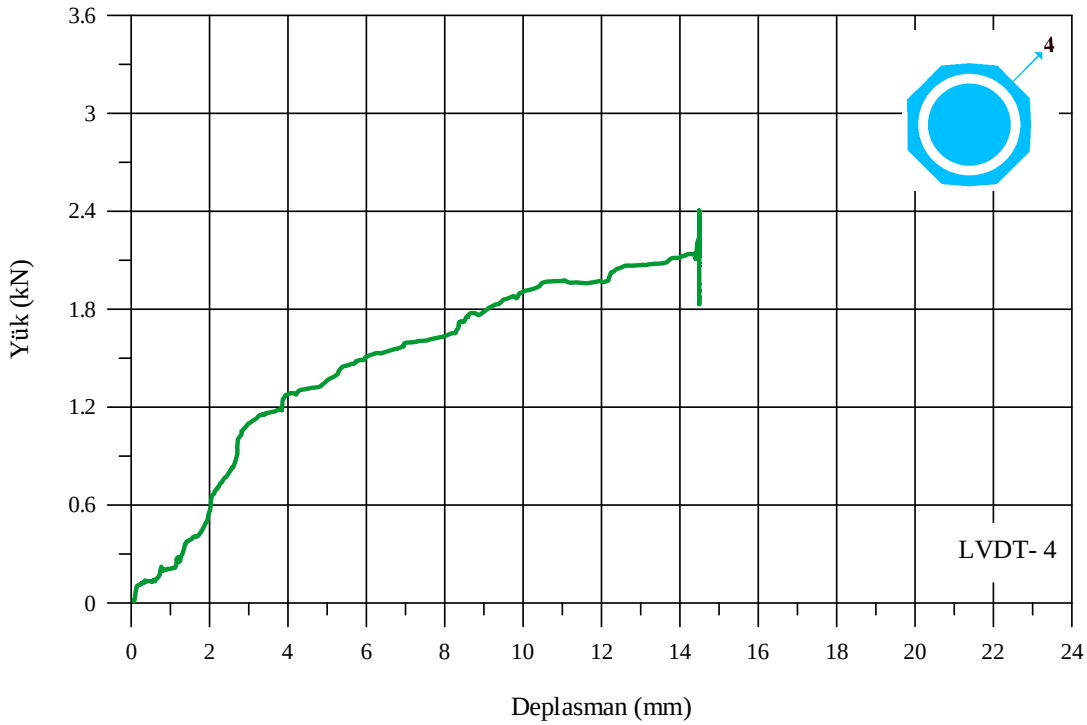
Şekil 4.102. ERD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



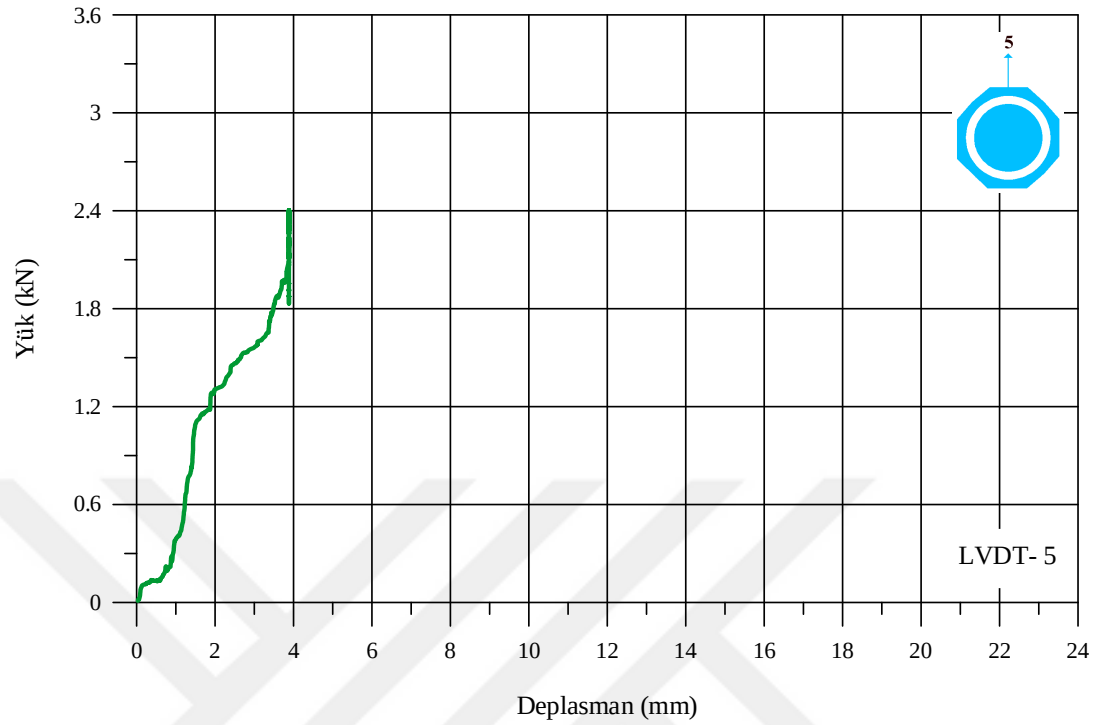
Şekil 4.103. ERD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



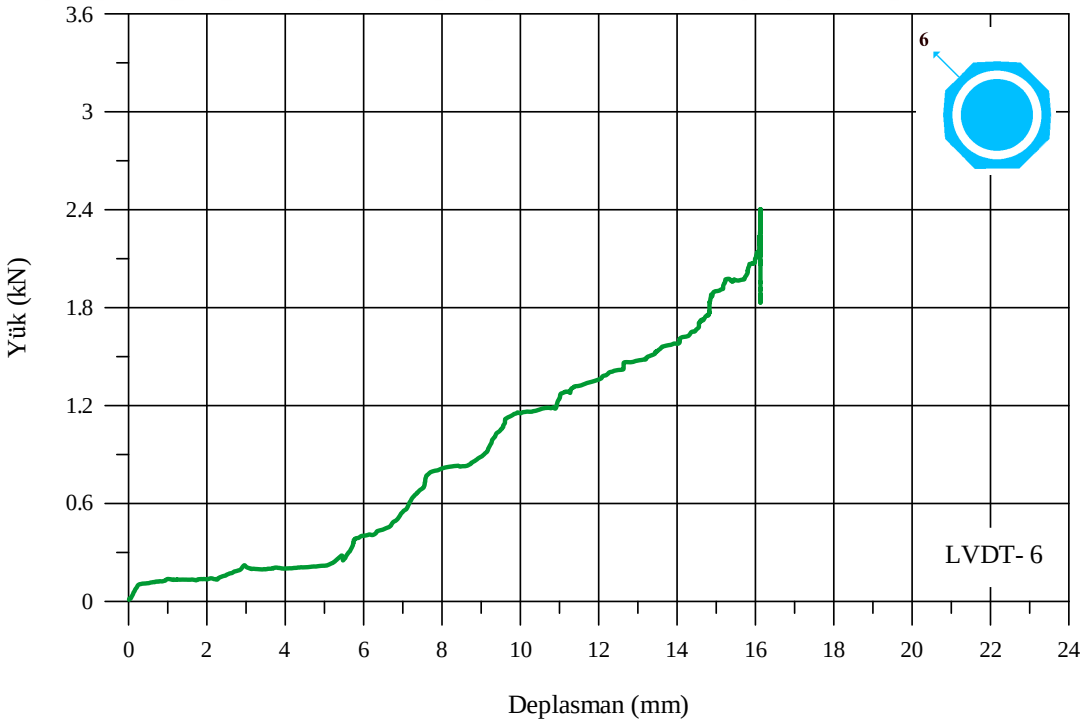
Şekil 4.104. ERD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



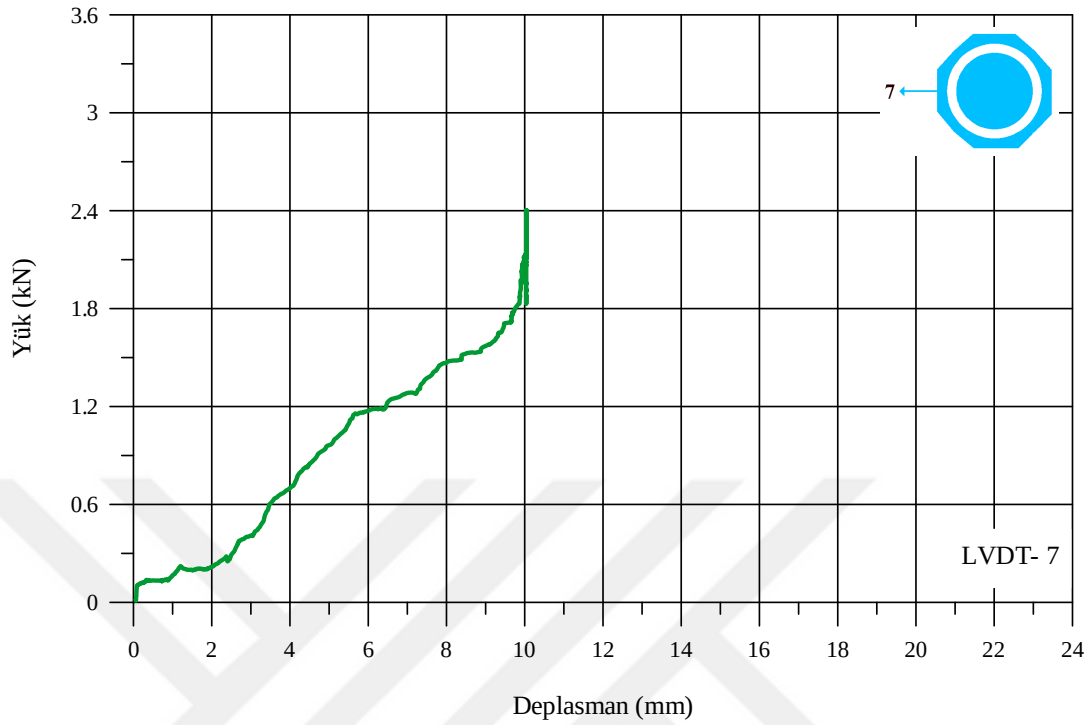
Şekil 4.105. ERD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



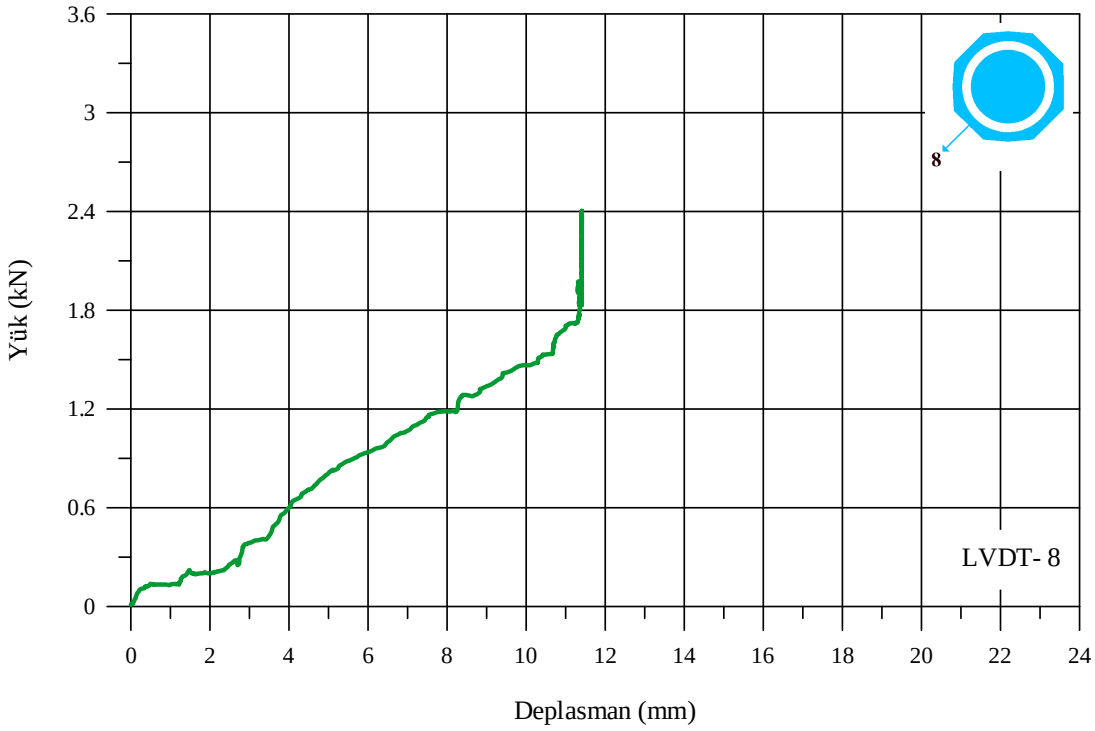
Şekil 4.106. ERD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



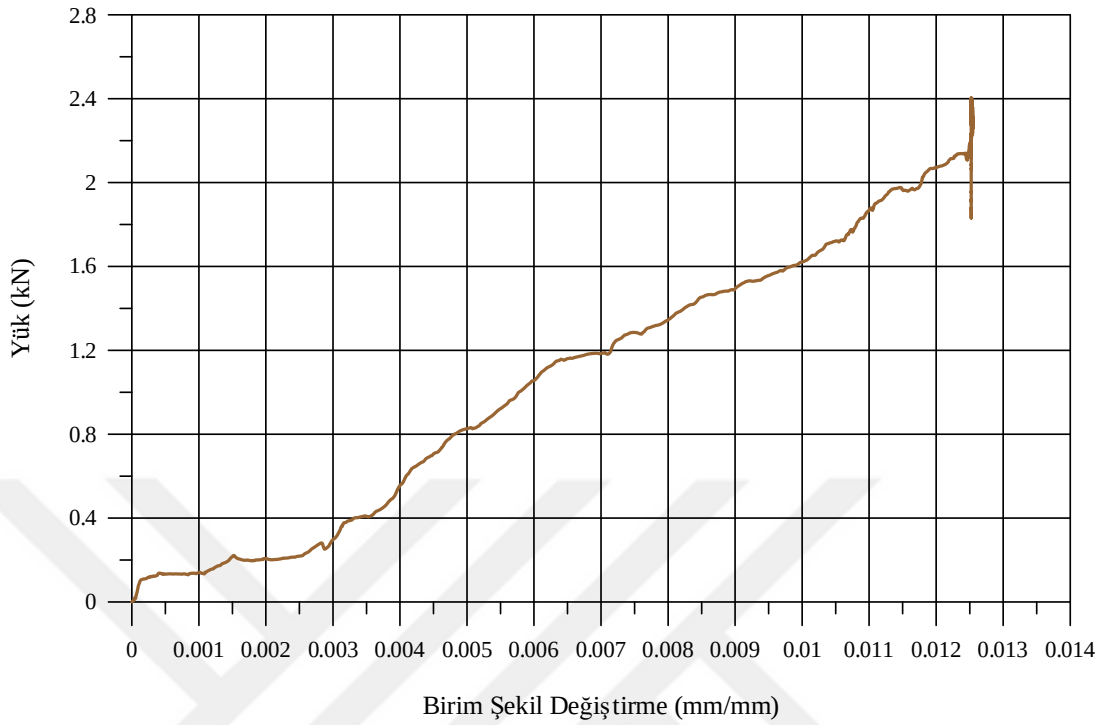
Şekil 4.107. ERD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



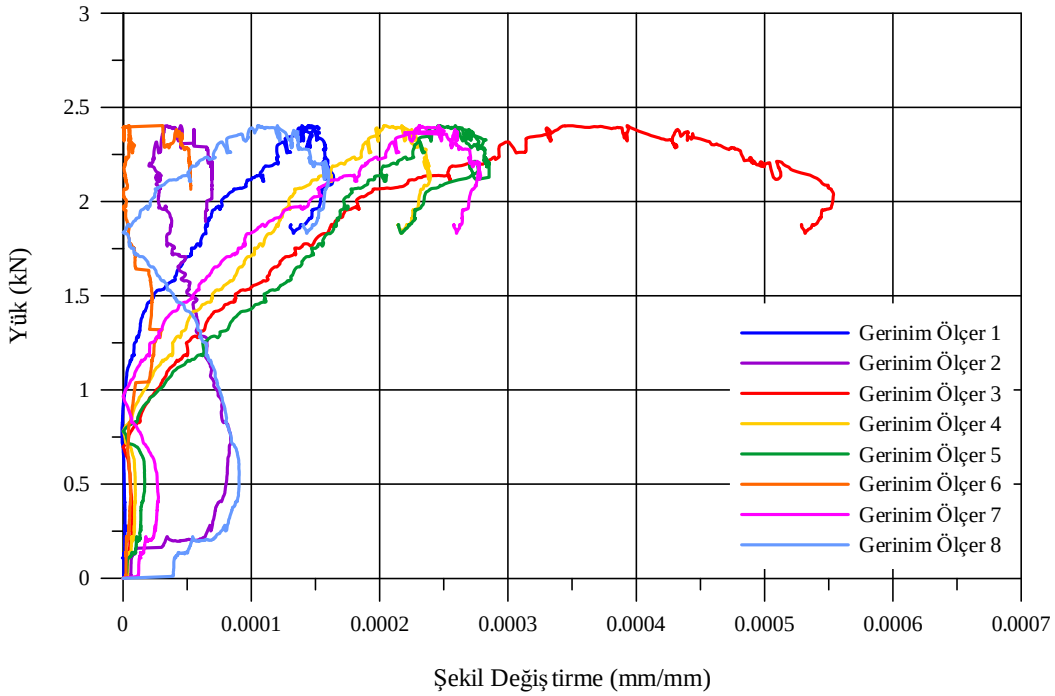
Şekil 4.108. ERD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.109. ERD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.110. ERD numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.

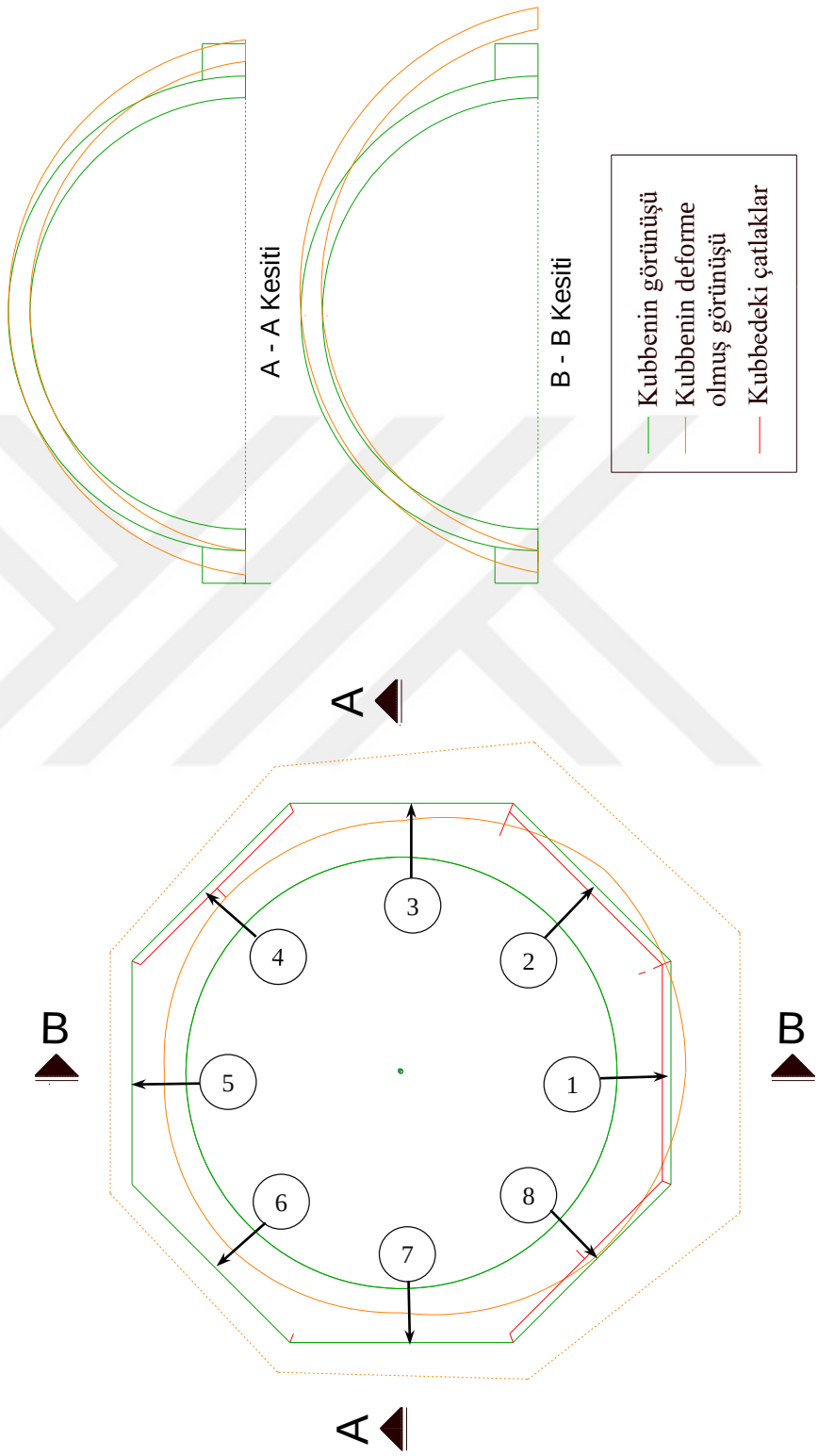


Şekil 4.111. ERD numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

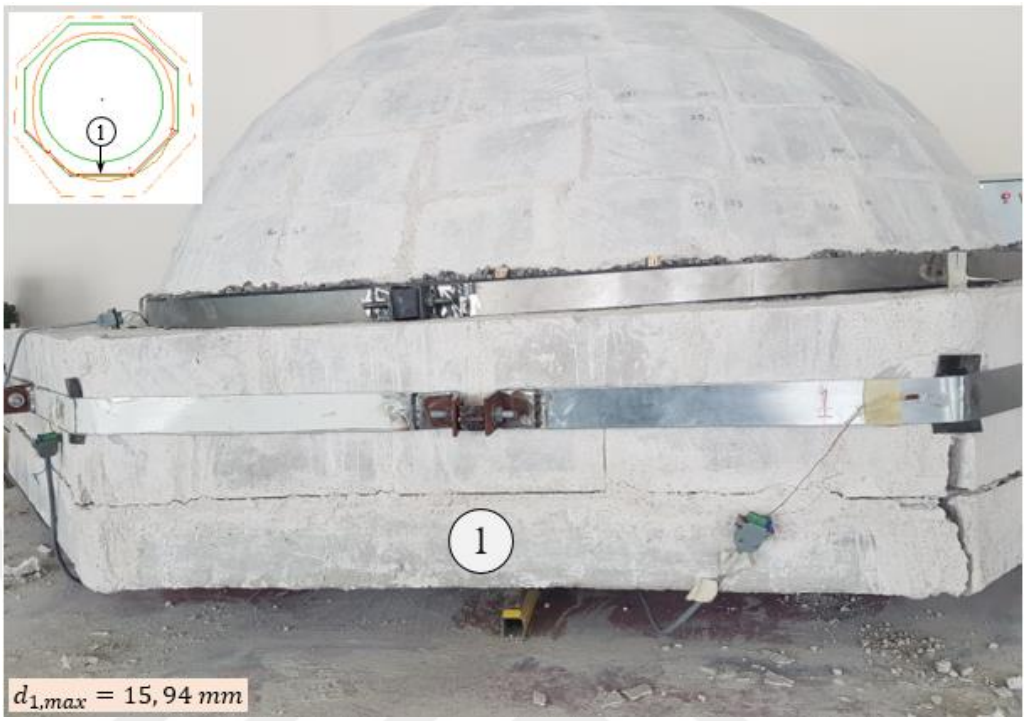
4.9 ERSD Numune Sonucu

ERSD deney sonucunda kubbede çok az hasar oluşmuştur. Kubbede oluşan hasarlar kasnaktaki çekme çemberinin altında ve beden duvarının üstünde meydana gelmiştir. Şekil 4.112'de ERSD numunesinde oluşan çatlaklar gösterilmiştir. Deney sonucuna göre meydana gelen en büyük çatlak 2. kolu üzerinde oluşmuş olup 16,61 mm deplasman gerçekleştirmiştir. Bu kol üzerindeki çatlak beden duvarı ve kasnağın birleşim yeri olan harçta meydana gelmiş olup köşelerdeki çatlaklar ise kasnaktaki çekme çemberine kadar ilerlemiştir. Deney sonucuna göre ikinci büyük çatlak ise 15,94 mm deplasman ile 1. kol üzerinde meydana gelmiştir. Bu kol üzerindeki çatlağa bakıldığında beden duvarı ve kasnağın birbirinden ayrıldığı görülmektedir (Şekil 4.113). Ayrıca 1. ve 2. kolların birleşim köşelerinde beden duvarı ile kasnak çekme çemberi arasında dikey çatlak meydana gelmiştir. Deneydeki üçüncü çatlak ise kubbenin 8. kollu üzerinde 11,86 mm deplasman ile LVDT 8'de oluşmuştur. Bu kol üzerindeki çatlak beden duvarının köşelerinden başlayarak kasnak ve beden duvarı arasında yatay olarak ilerlemiştir (Şekil 4.117). ERSD numunesinde bütün köşelerinde beden duvarı ve kasnaktaki çekme çemberi kadar olan alanda çatlaklar oluşmuştur. Aşağıdaki Şekil 4.116'da 5.- 6. ve 6. - 7. kollar arasında kubbe köşelerinde çatlaklar görülmüştür.

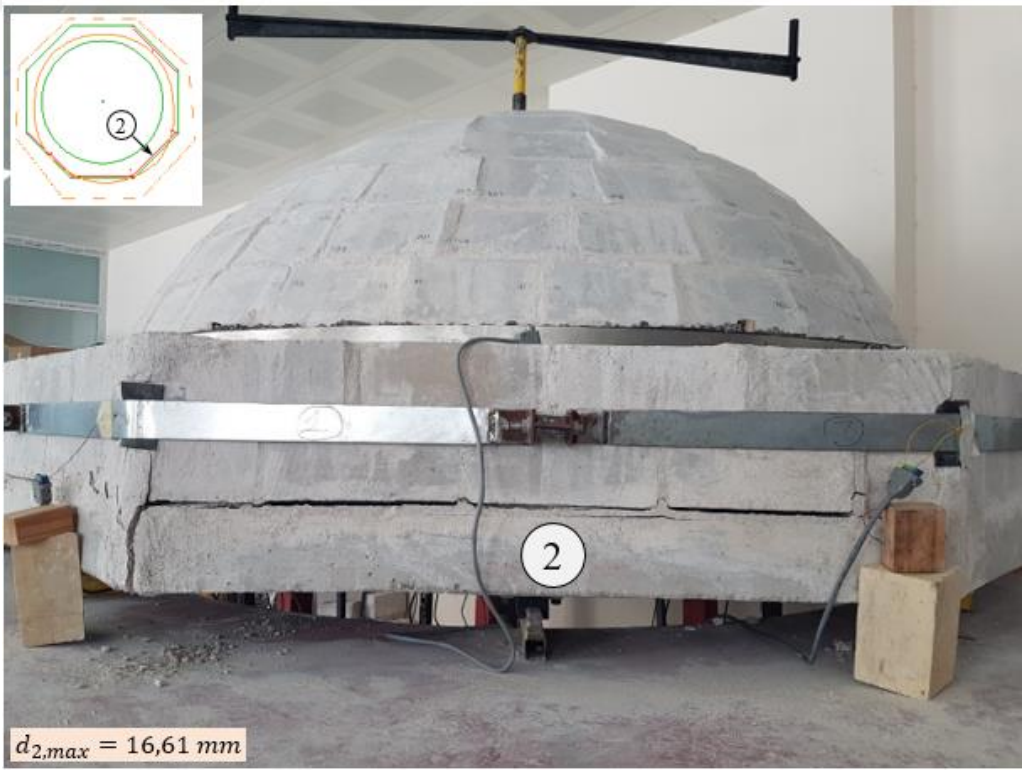
ERSD numunesi deney sonucuna göre maksimum açıklık 2. kol üzeninde olup beden duvarı ve kasnak arasında oluşmuştur. Deney sonucunda elde edilen maksimum yük miktarı 3,17 kN, mesnetlerde meydana gelen maksimum yatay deplasman ise 16,60 mm ile LVDT 2'de ölçülmüştür. Aşağıda Şekil 4.118'den Şekil 4.125'e kadar ERDS numunesinin yük deplasman grafikleri yer almaktadır. ERSD numunesine uygulanan maksimum 3,17 kN yüke ulaştığında kubbedeki birim şekil değiştirme 0,00931 mm/mm olmuştur. Yükün artmasıyla kubbedeki çatlaklar açılmaya başlamıştır. Kubbedeki şekil değiştirme 0,00931 mm/mm olduğu zaman beden duvarı ile kasnak bölgesi ve kasnak köşelerinde çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 4.126). Aşağıda Şekil 4.127'de ERSD numunesinin gerinim ölçerlerin grafiği verilmiş olup maksimum yük altında 0,00055 mm/mm maksimum şekil değiştirme yapmıştır.



Şekil 4.112. ERSD numunesi deformasyon eğrisi.



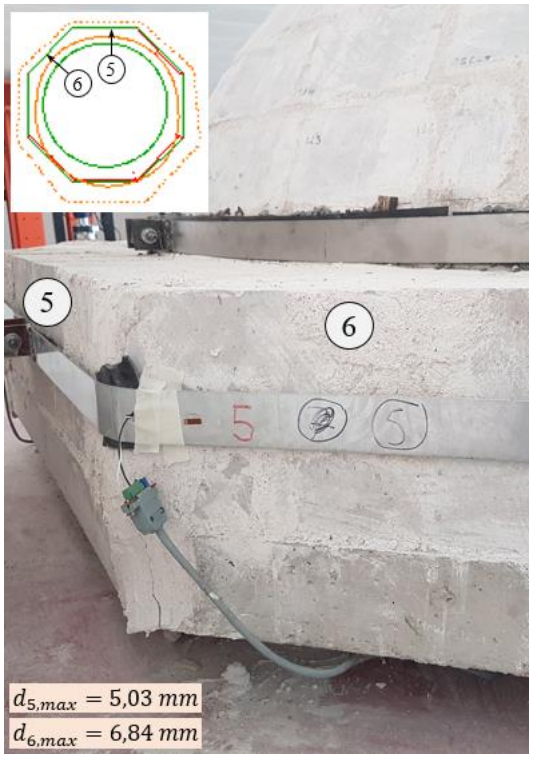
Şekil 4.113. ERSD numunesinin 1. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



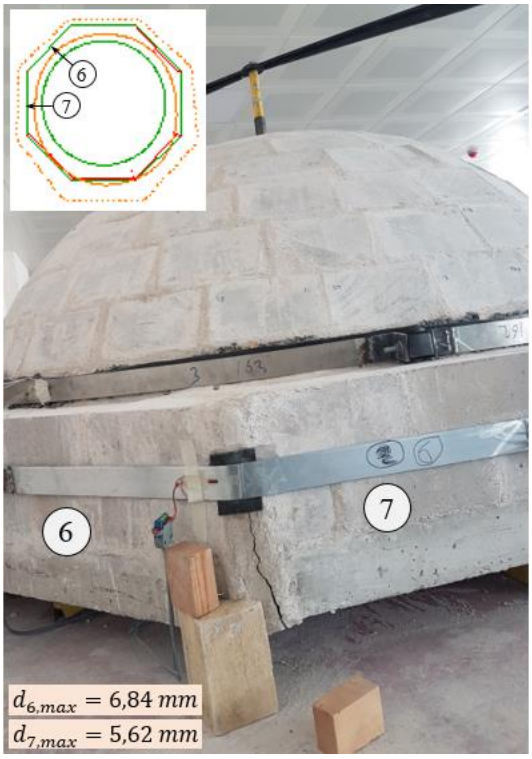
Şekil 4.114. ERSD numunesinin 2. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



Şekil 4.115. ERSD numunesinin 4. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



(a)

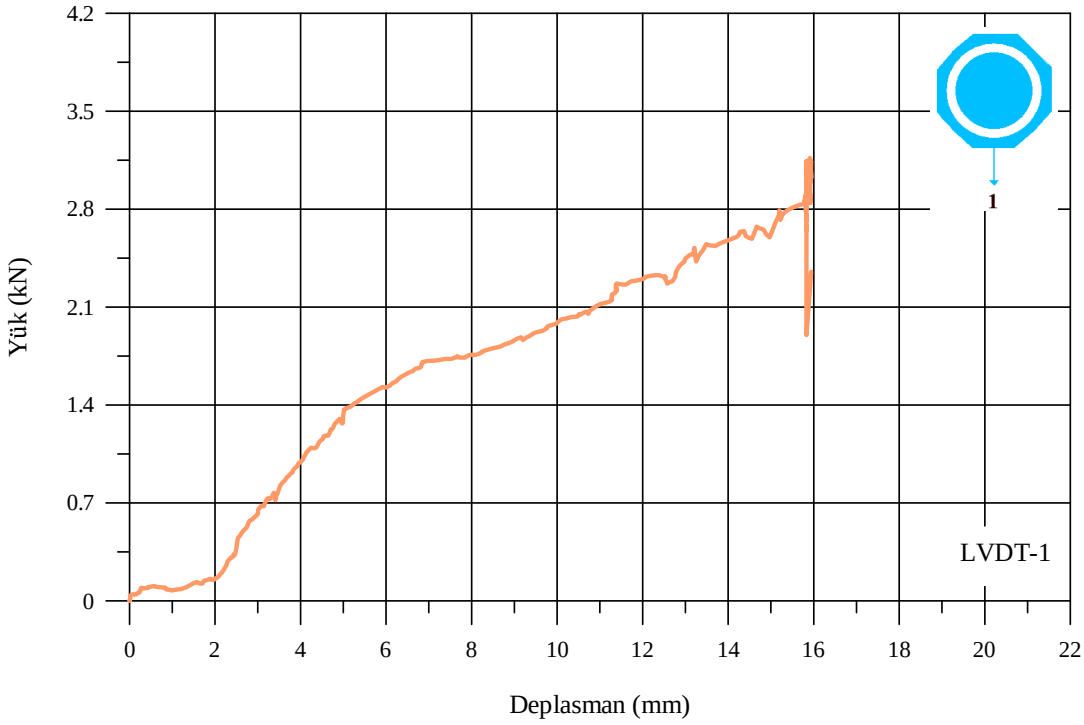


(b)

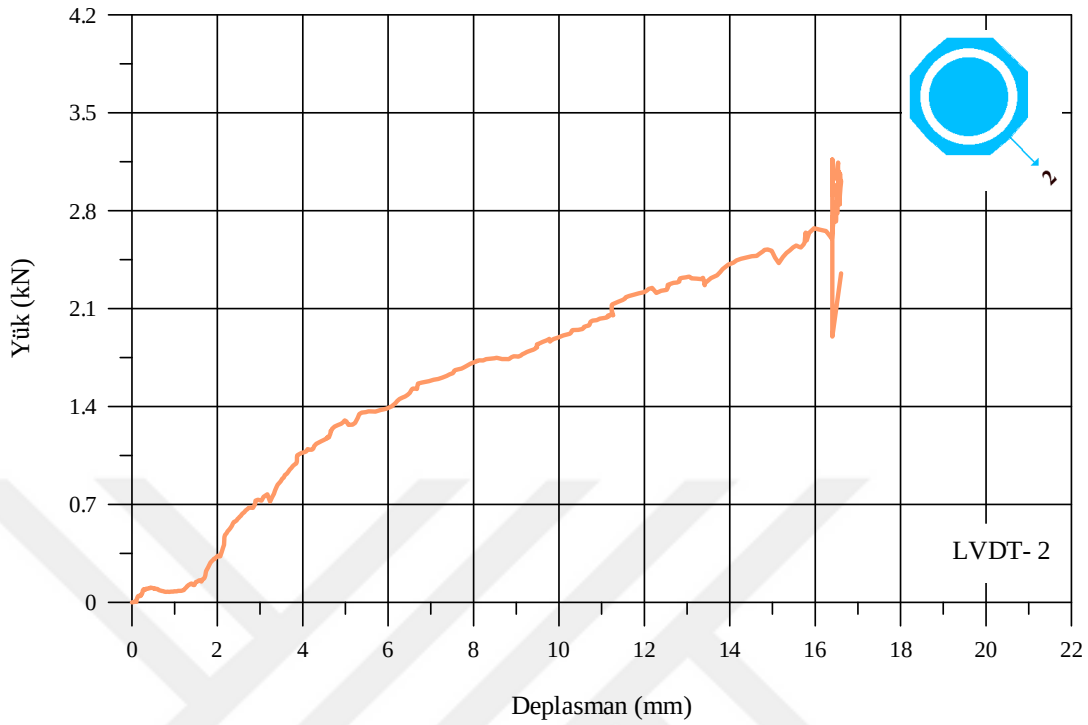
Şekil 4.116. ERSD deneyinde oluşan çatlaklar; (a) 5-6 (b) 6-7 kollar arası çatlaklar.



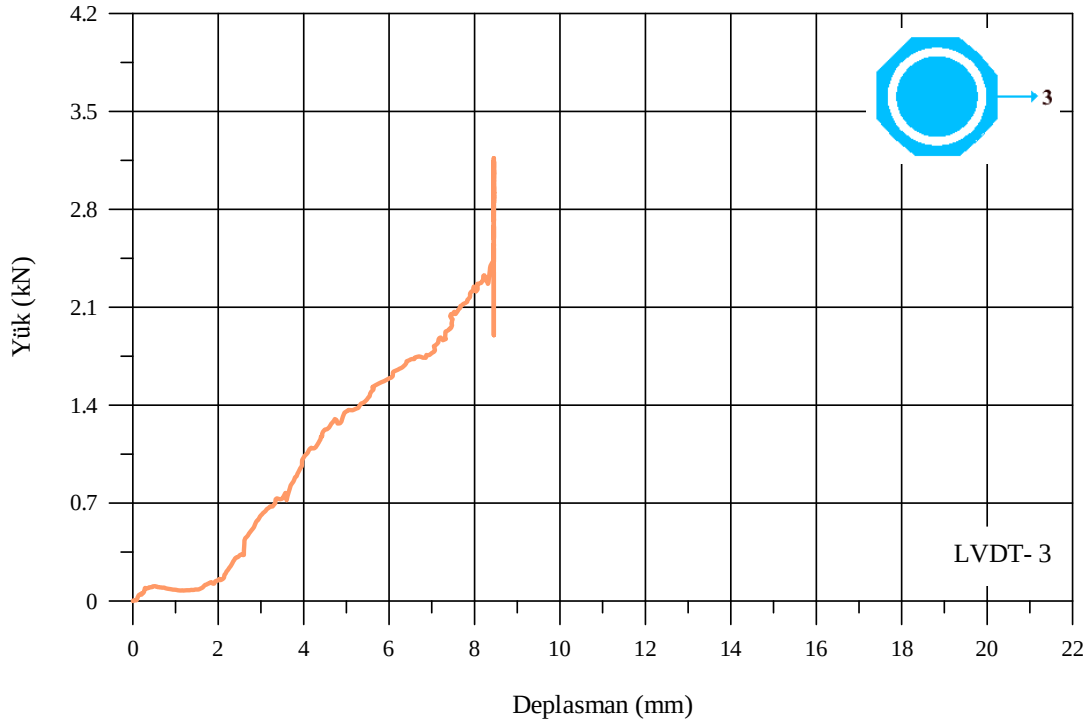
Şekil 4.117. ERSD numunesinin 8. kol üzerinde oluşan çatlaklar.



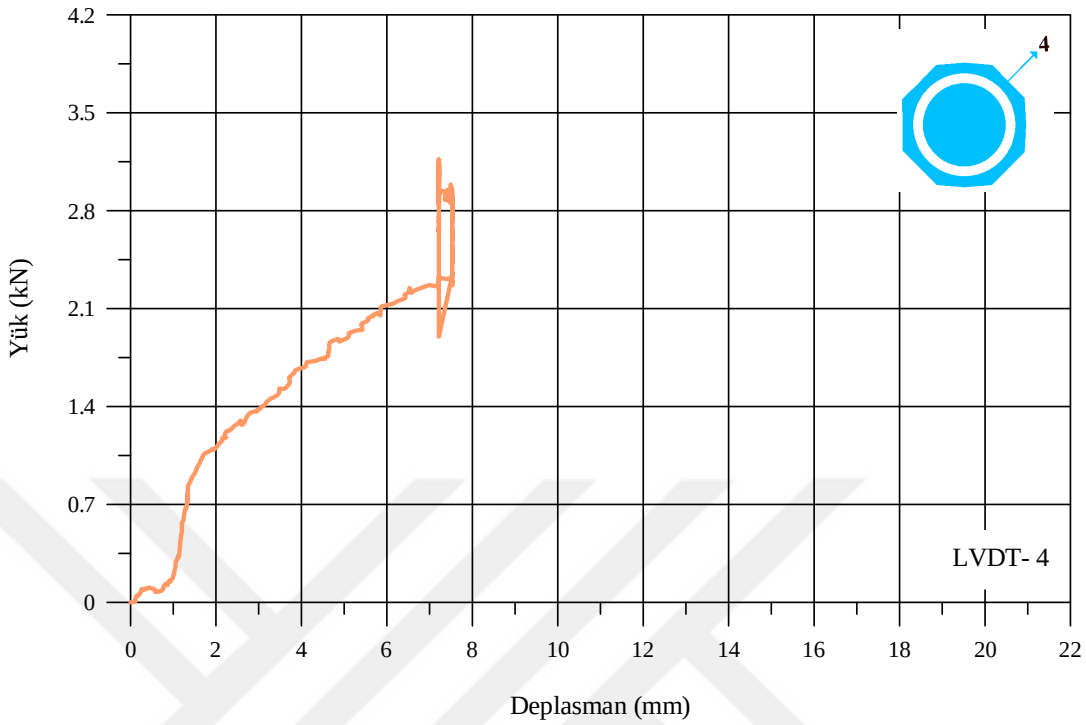
Şekil 4.118. ERSD numunesi LVDT 1 Yük - deplasman grafiği.



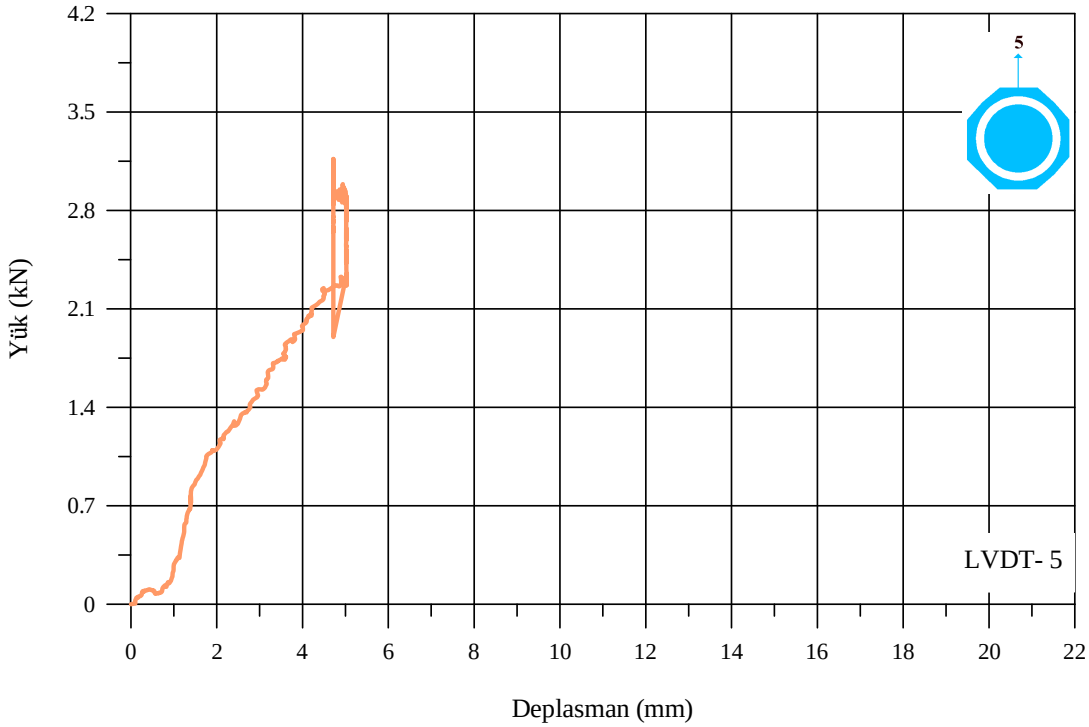
Şekil 4.119. ERSD numunesi LVDT 2 Yük - deplasman grafiği.



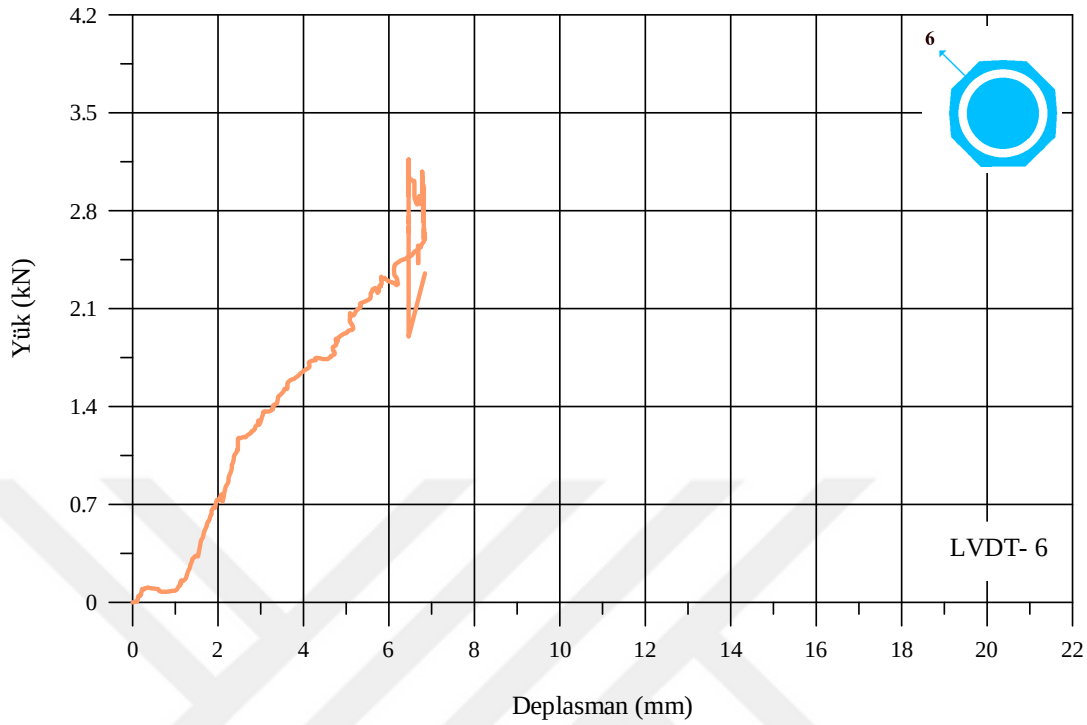
Şekil 4.120. ERSD numunesi LVDT 3 Yük - deplasman grafiği.



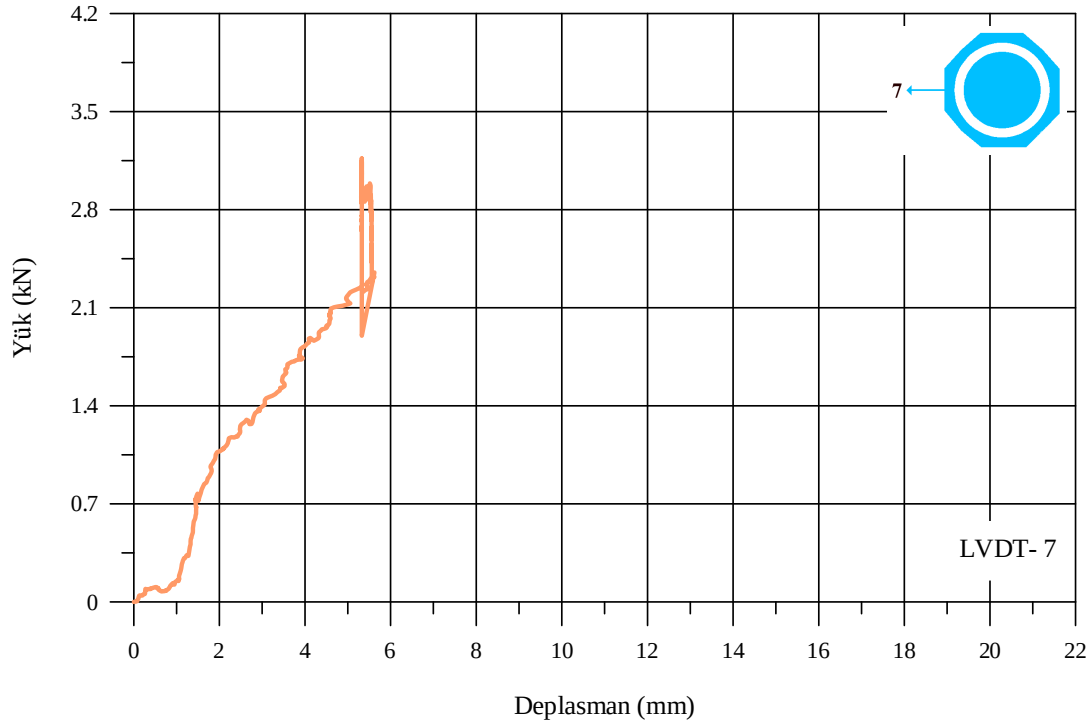
Şekil 4.121. ERSD numunesi LVDT 4 Yük - deplasman grafiği.



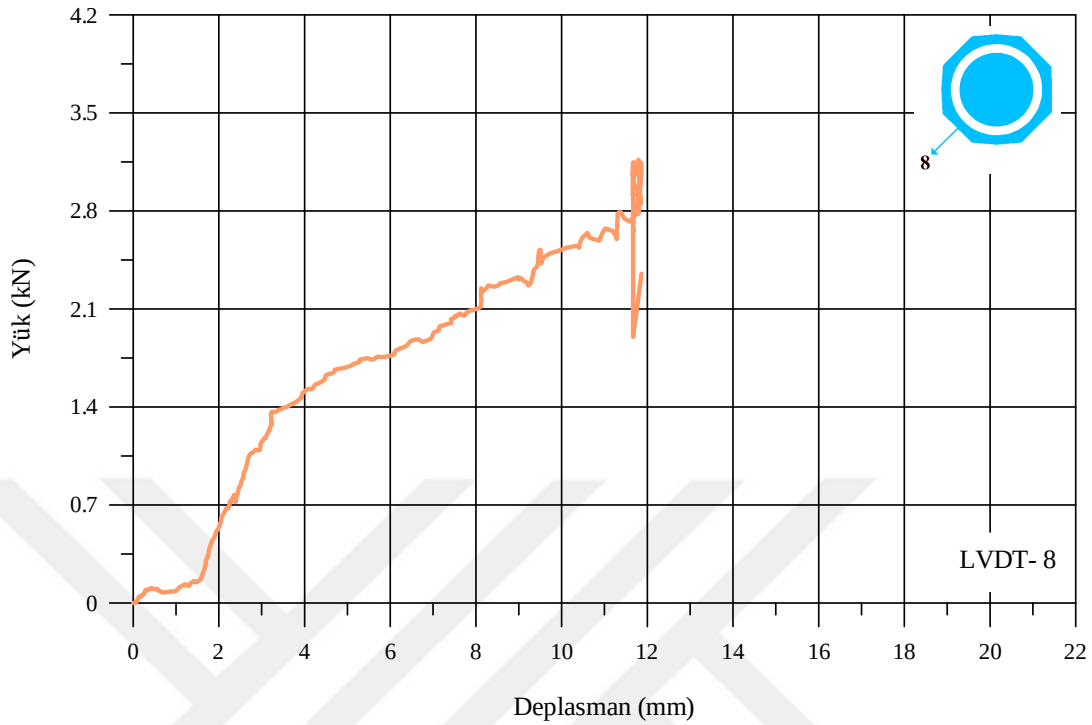
Şekil 4.122. ERSD numunesi LVDT 5 Yük - deplasman grafiği.



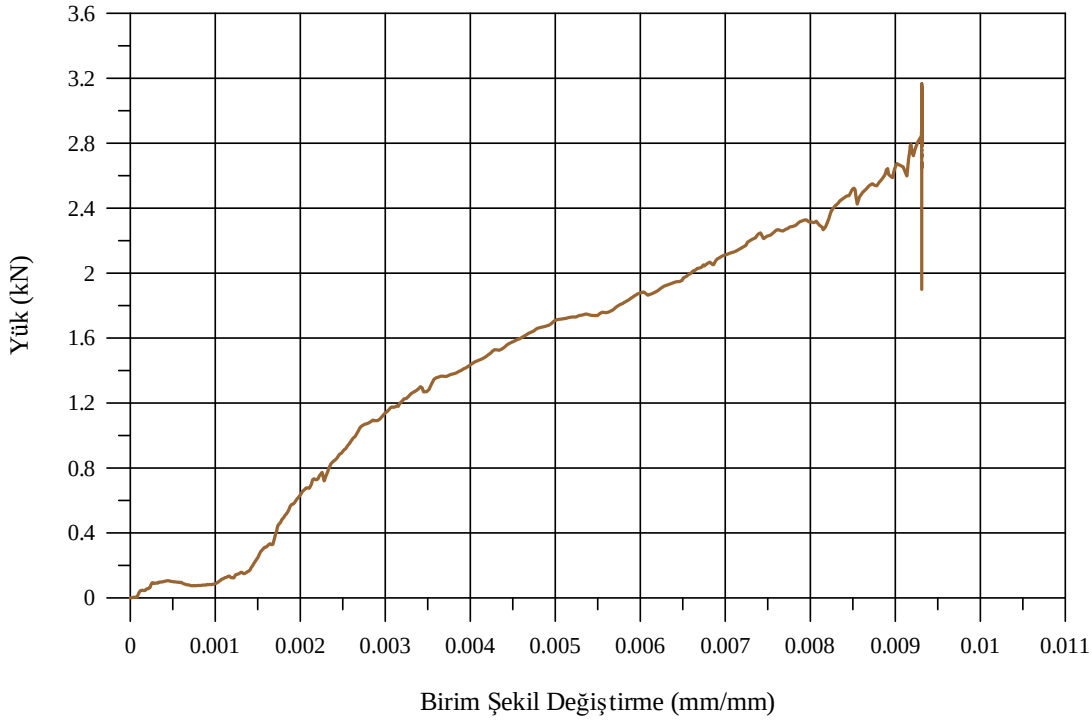
Şekil 4.123. ERSD numunesi LVDT 6 Yük - deplasman grafiği.



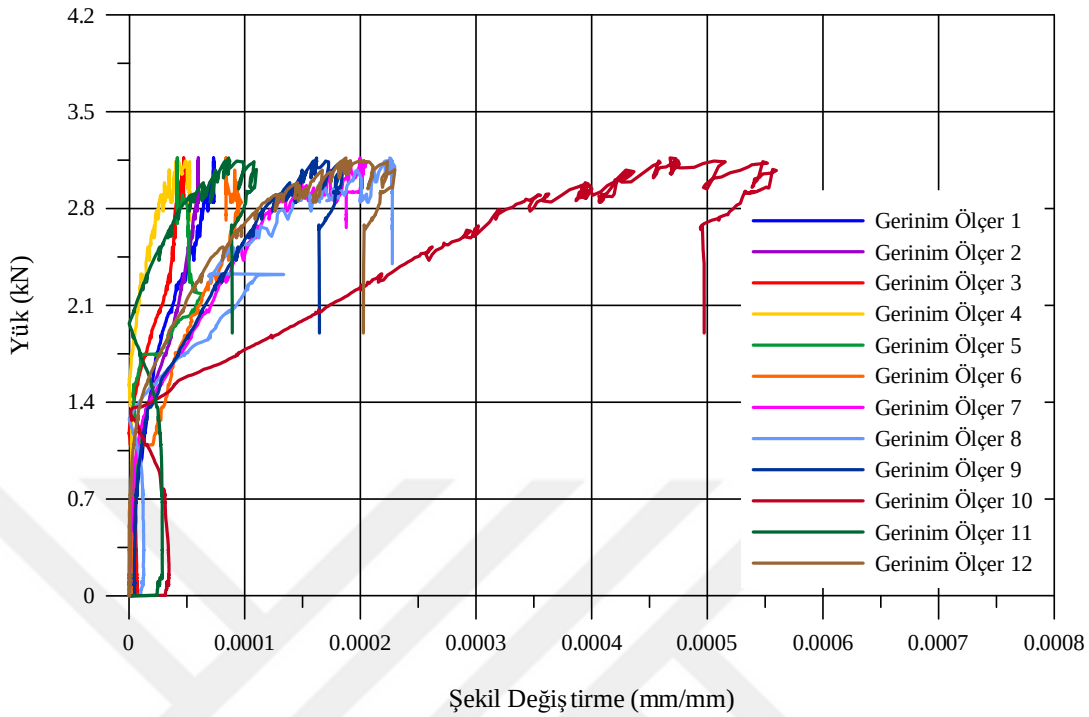
Şekil 4.124. ERSD numunesi LVDT 7 Yük - deplasman grafiği.



Şekil 4.125. ERSD numunesi LVDT 8 Yük - deplasman grafiği.



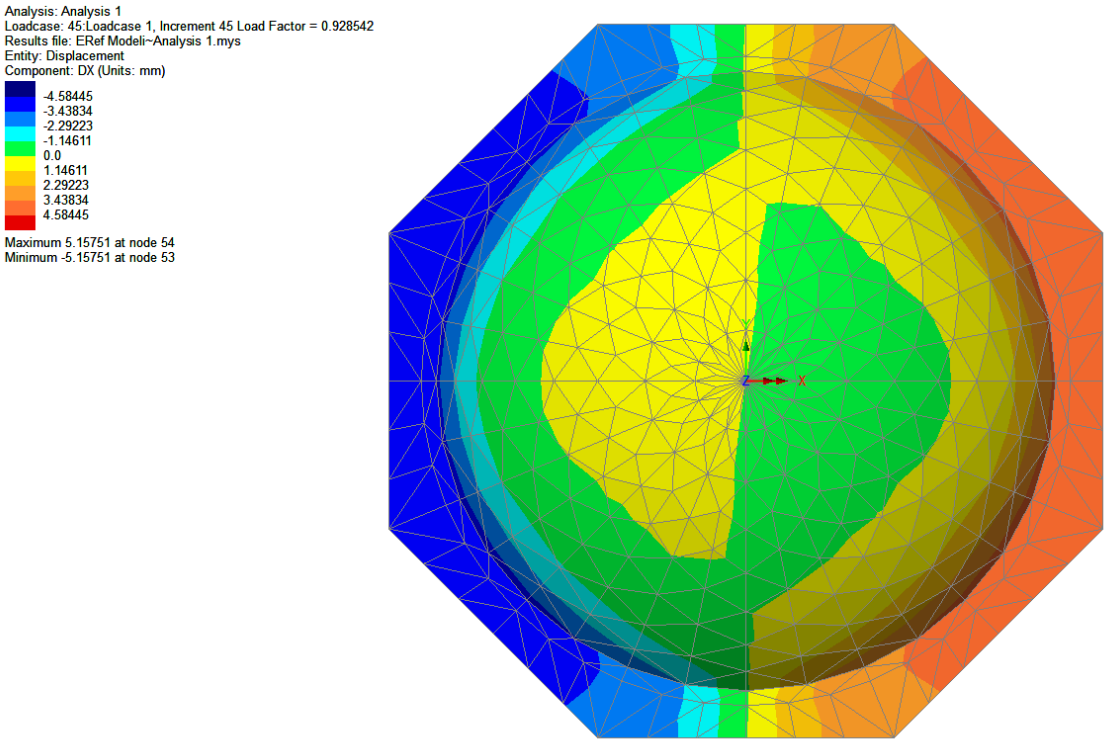
Şekil 4.126. ERDS numunesi Yük – birim şekil değiştirme grafiği.



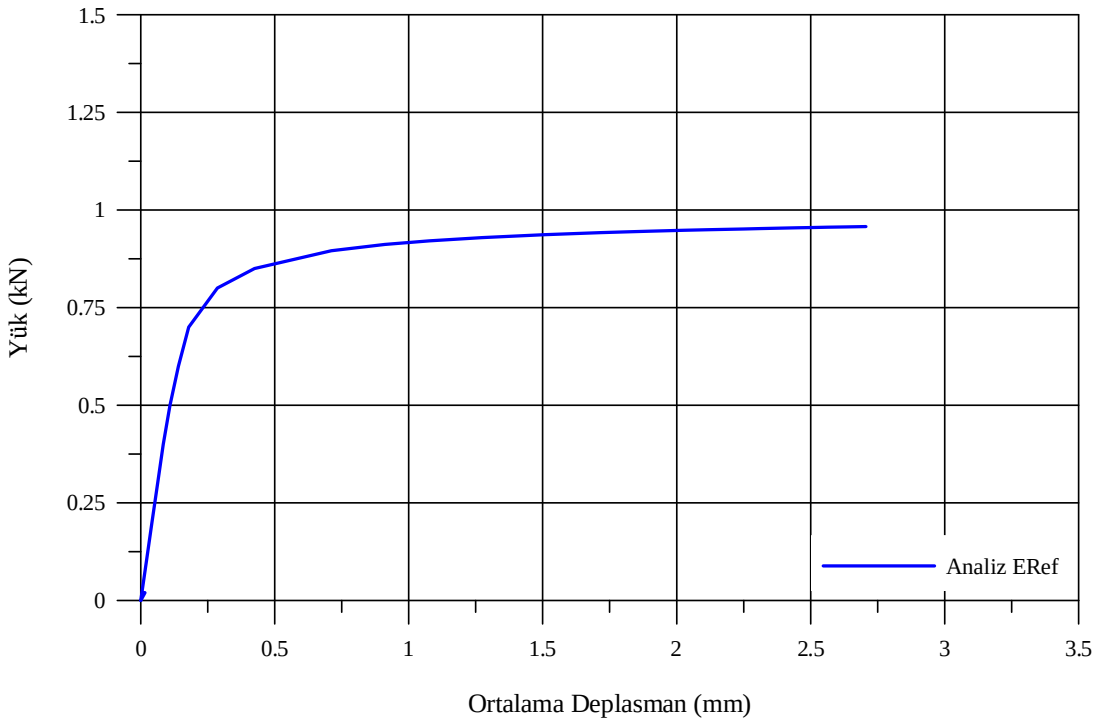
Şekil 4.127. ERDS numunesi gerinim ölçerlerin grafiği.

4.10 ERef Analiz Sonucu

ERef analizinin sonlu elemanlar modelini Şekil 4.128'de gösterilmiştir. ERef analiz modelinde 0,92 kN yük altındaki maksimum deplasman 5,15 mm'dir. ERef modeli rijit davranış göstermiştir. Şekil 4.129'da ERef sonlu elemanlar analiz grafiği verilmiştir.



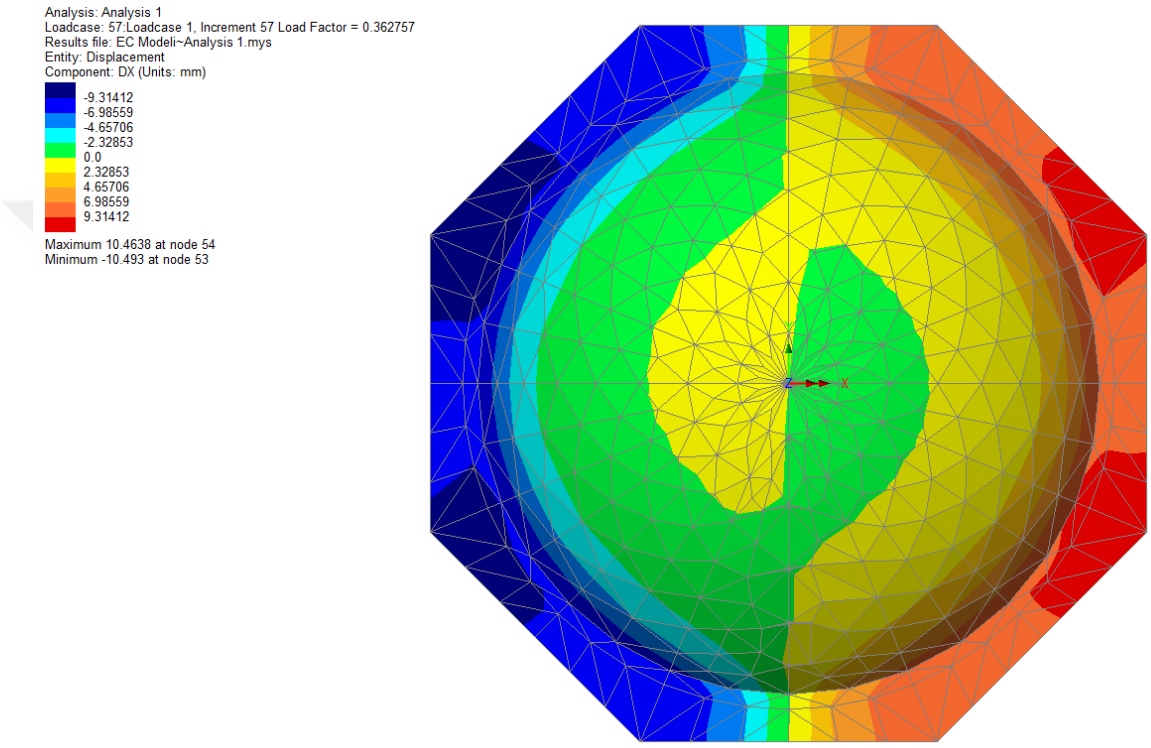
Şekil 4.128. ERef sonlu elemanlar analizi.



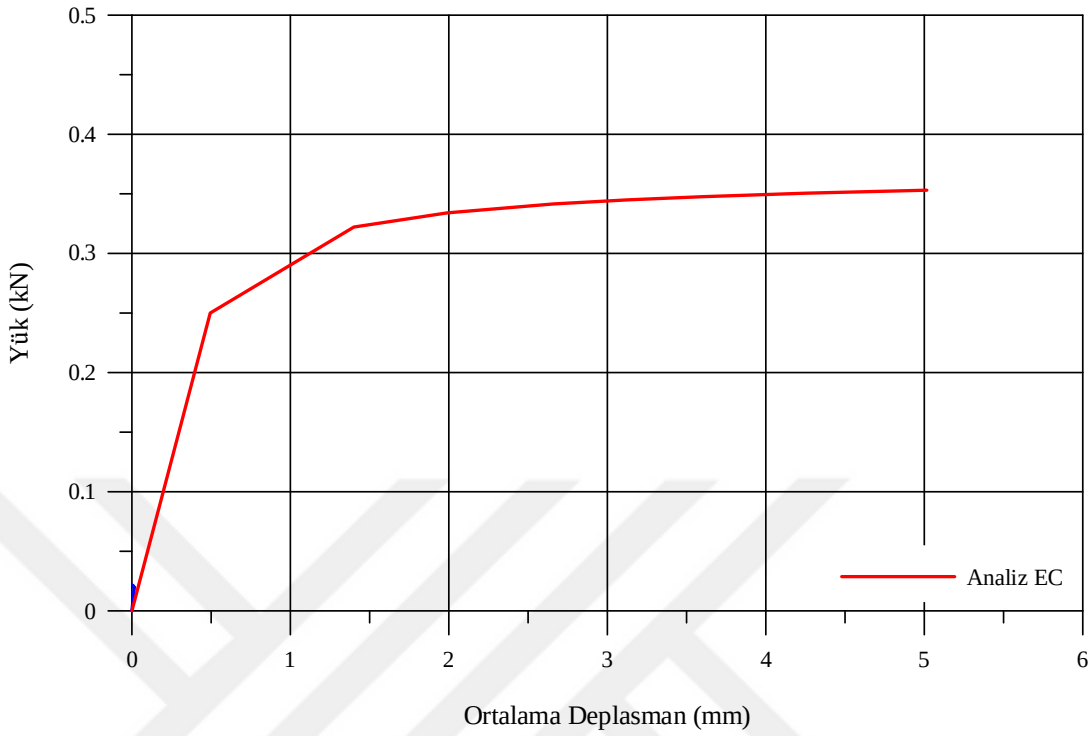
Şekil 4.129. ERef sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.11 EC Analiz Sonucu

EC modelinin Şekil 4.130'daki sonlu elemanlar analizinde görüldüğü gibi 0,36 kN maksimum yük altında maksimum 10,46 mm deplasman yapmıştır. Şekil 4.131'de görüldüğü üzere model rijit davranış sergilemiştir.



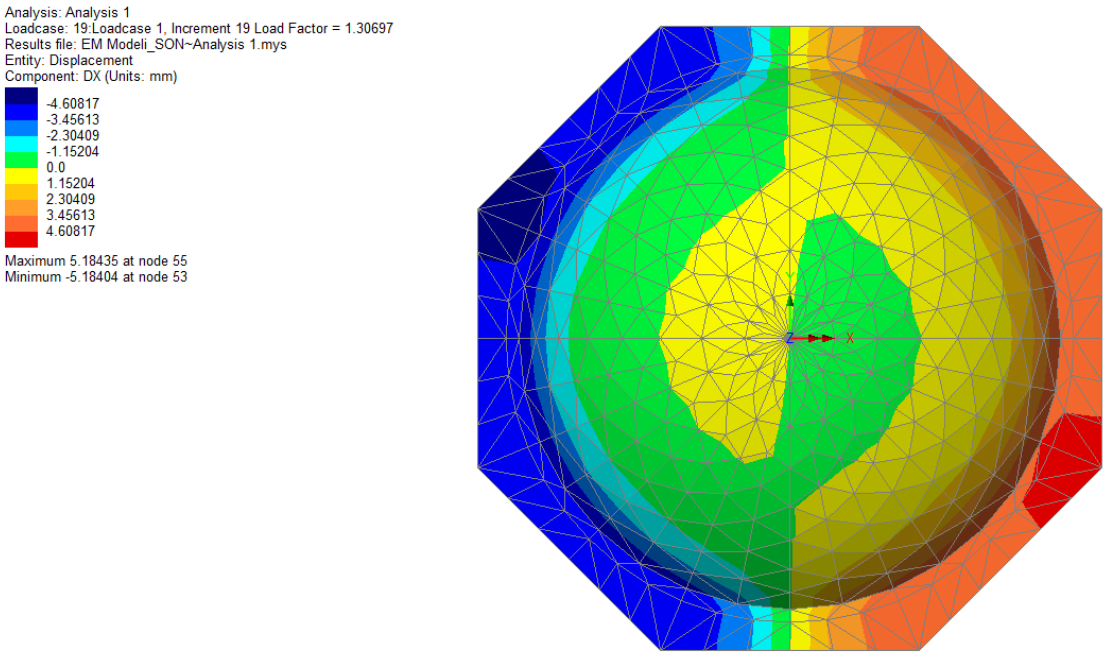
Şekil 4.130. EC sonlu elemanlar analizi.



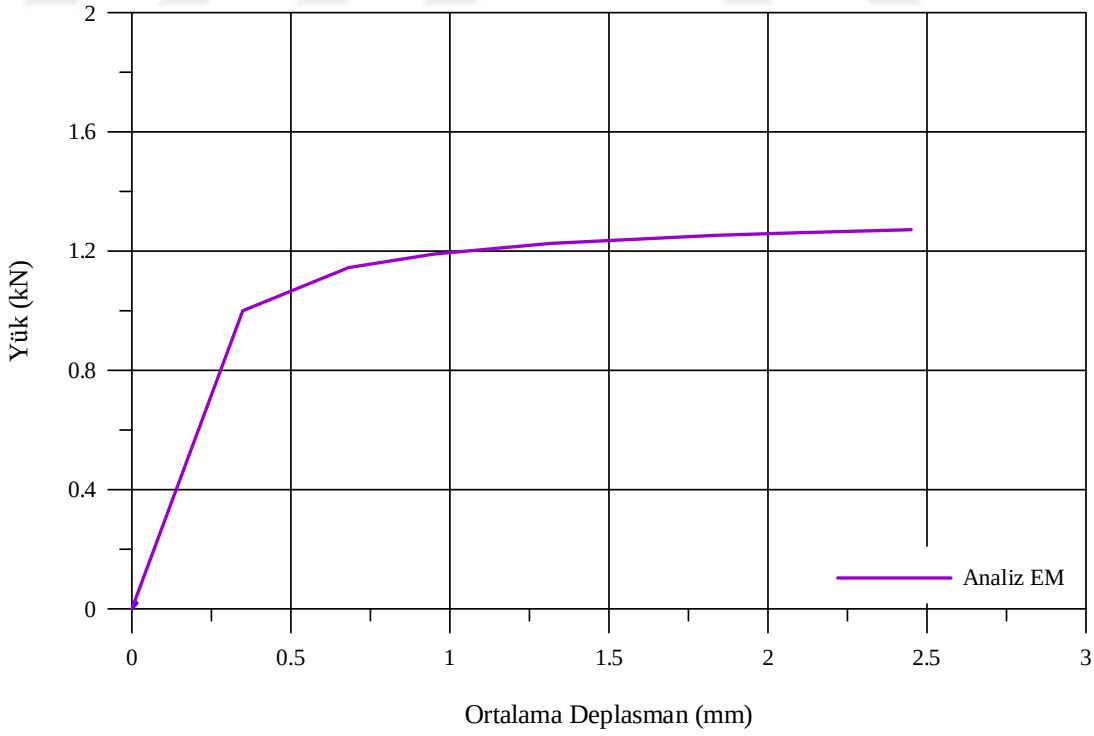
Şekil 4.131. EC sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.12 EM Analiz Sonucu

EM analizinin sonlu elemanlar modelinde maksimum 1,30 kN yük altındaki maksimum deplasman 5,18 mm olmuştur (Şekil 4.132). Şekil 4.133'de EM modelinin sonlu elemanlar analiz grafiği gösterilmiş olup rijit davranış sergilemiştir.



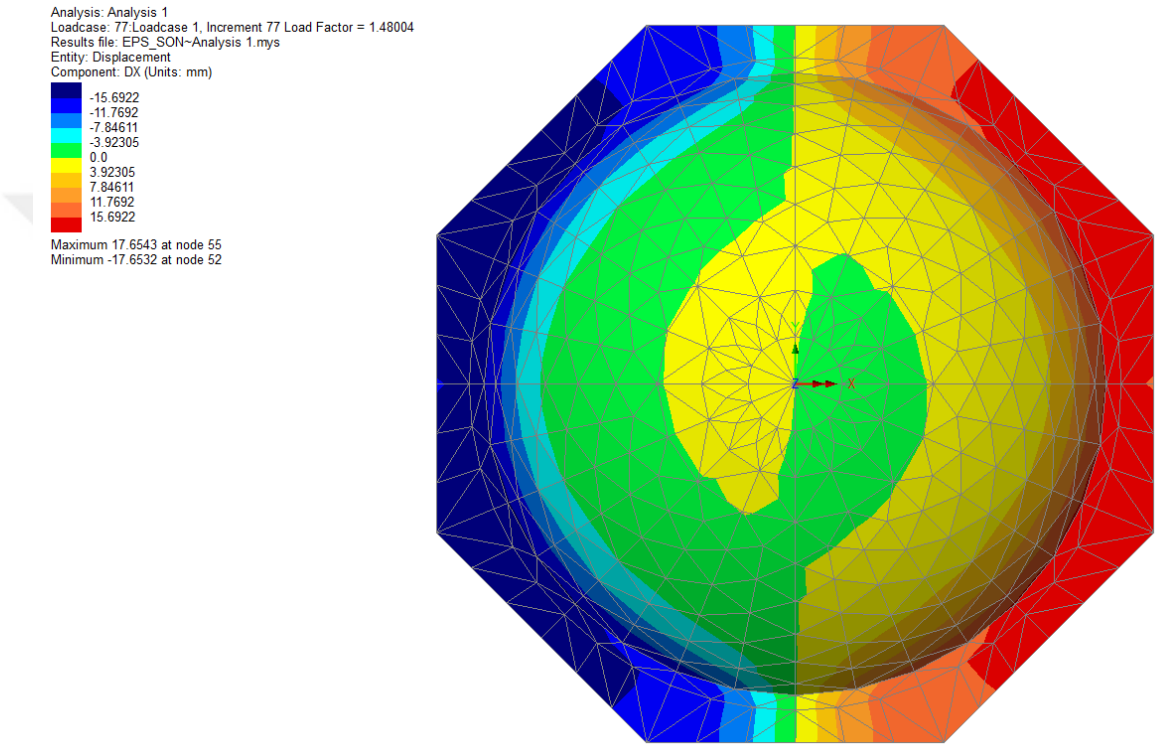
Şekil 4.132. EM sonlu elemanlar analizi.



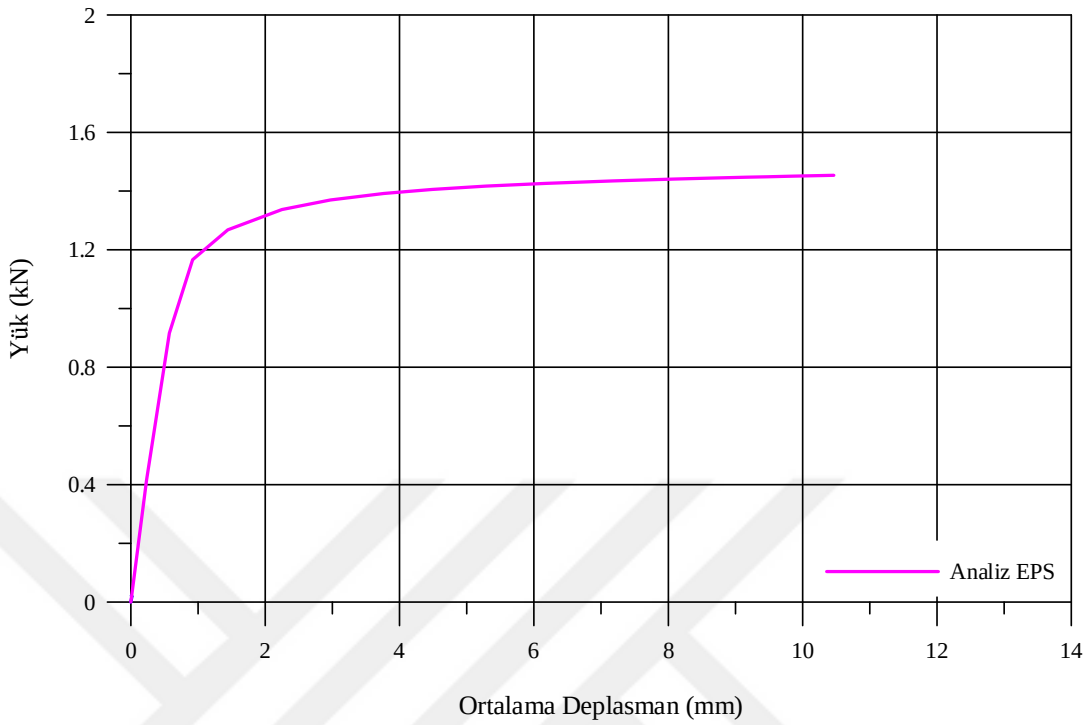
Şekil 4.133. EM sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.13 EPS Analiz Sonucu

EPS sonlu elemanlar analiz modelinde Şekil 4.134'de 1,48 kN maksimum yük altındaki maksimum deplasman 17,65 mm'dir. Şekil 4.135'de EPS modelinin rijit davranış sergilediği görülmektedir.



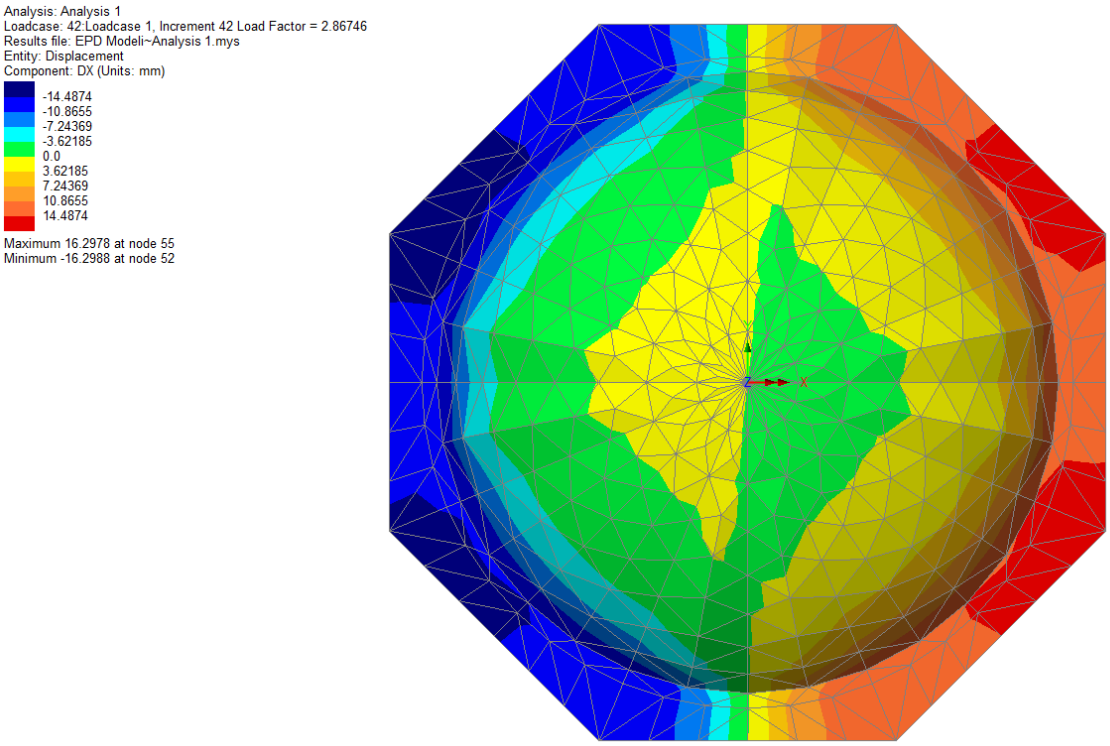
Şekil 4.134. EPS sonlu elemanlar analizi.



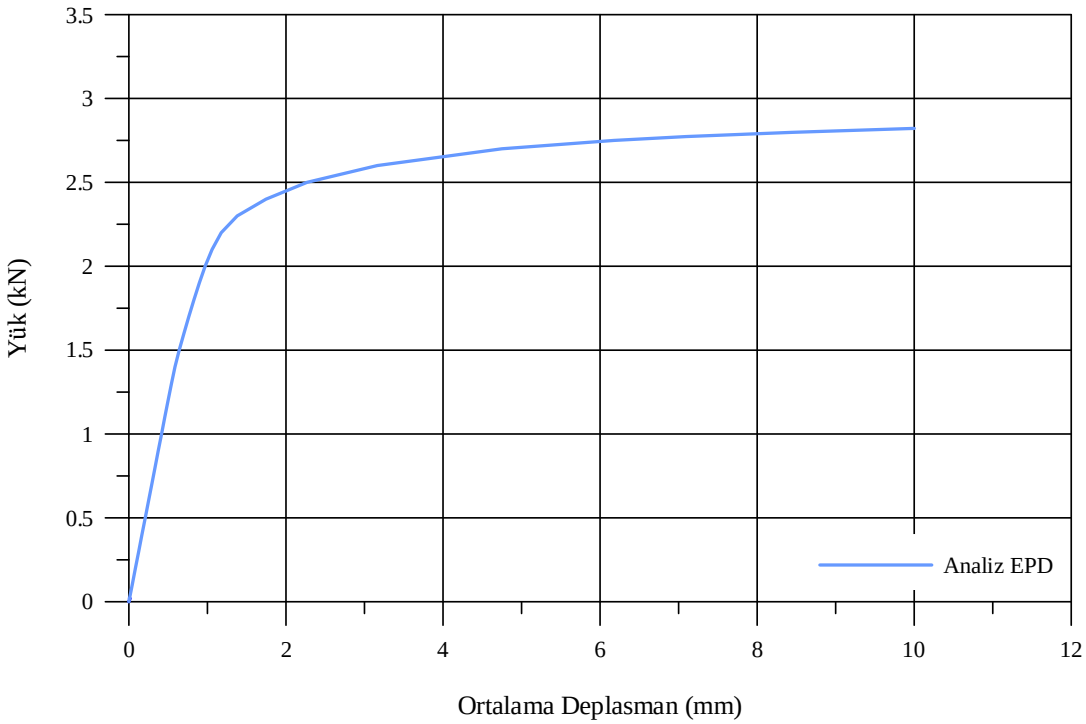
Şekil 4.135. EPS sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.14 EPD Analiz Sonucu

EPD analiz modelinin sonlu elemanlar modelinde maksimum 2,86 kN yük altında 16,29 mm deplasman göstermiştir (Şekil 4.136). Şekil 4.137'de EPD modelinin sonlu elemanlar grafiğinde modelin rijit davranış gösterdiği görülmektedir.



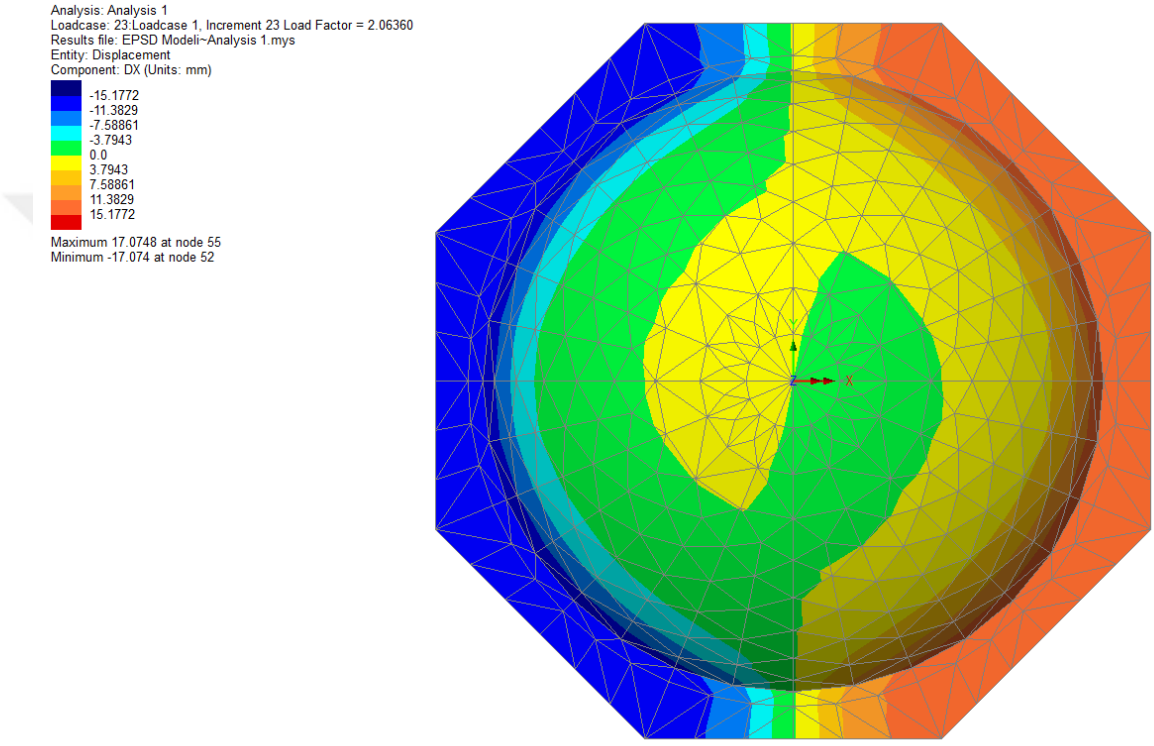
Şekil 4.136. EPD sonlu elemanlar analizi.



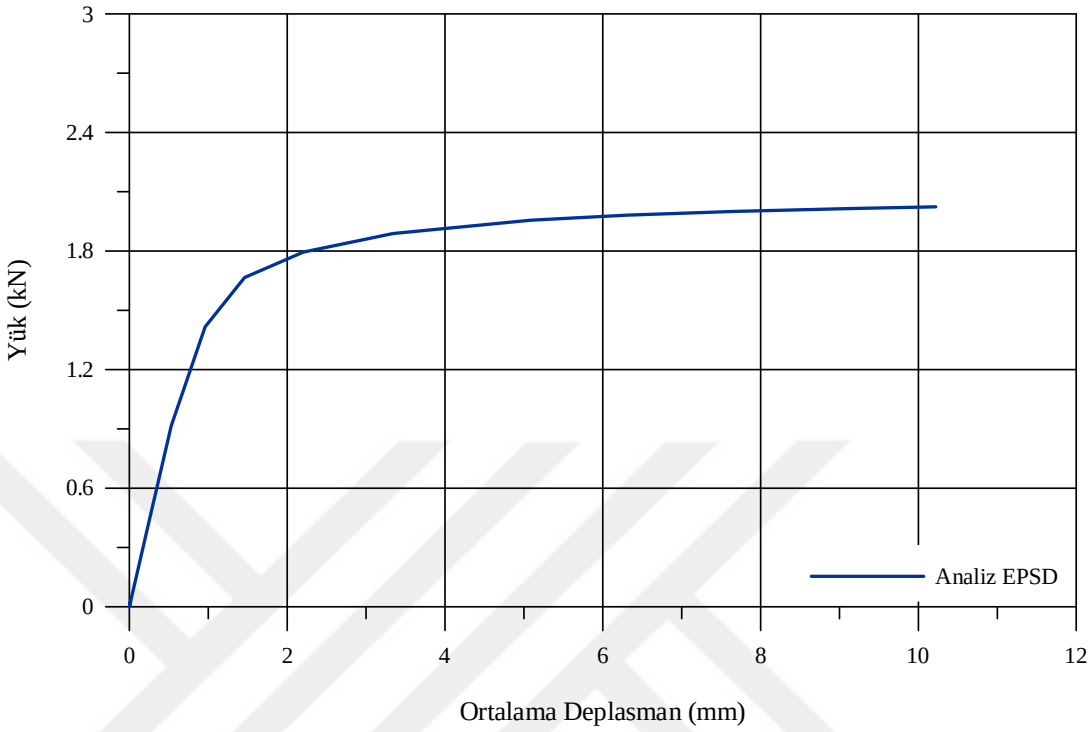
Şekil 4.137. EPD sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.15 EPSD Analiz Sonucu

EPSD analizinin Şekil 4.138'deki sonlu elemanlar modelinde 2,06 kN maksimum yük altında 17,07 mm deplasman yapmıştır. Şekil 4.139'daki grafikte EPDS modelinin rijit davranış sergilediği görülmektedir.



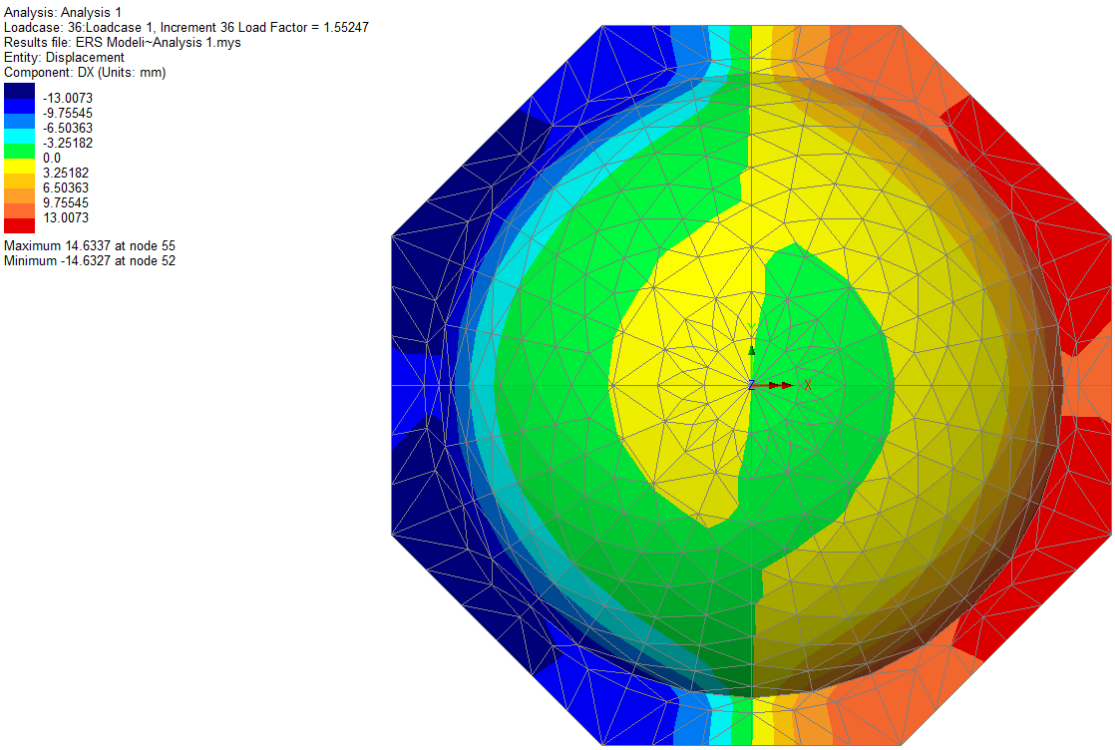
Şekil 4.138. EPSD sonlu elemanlar analizi.



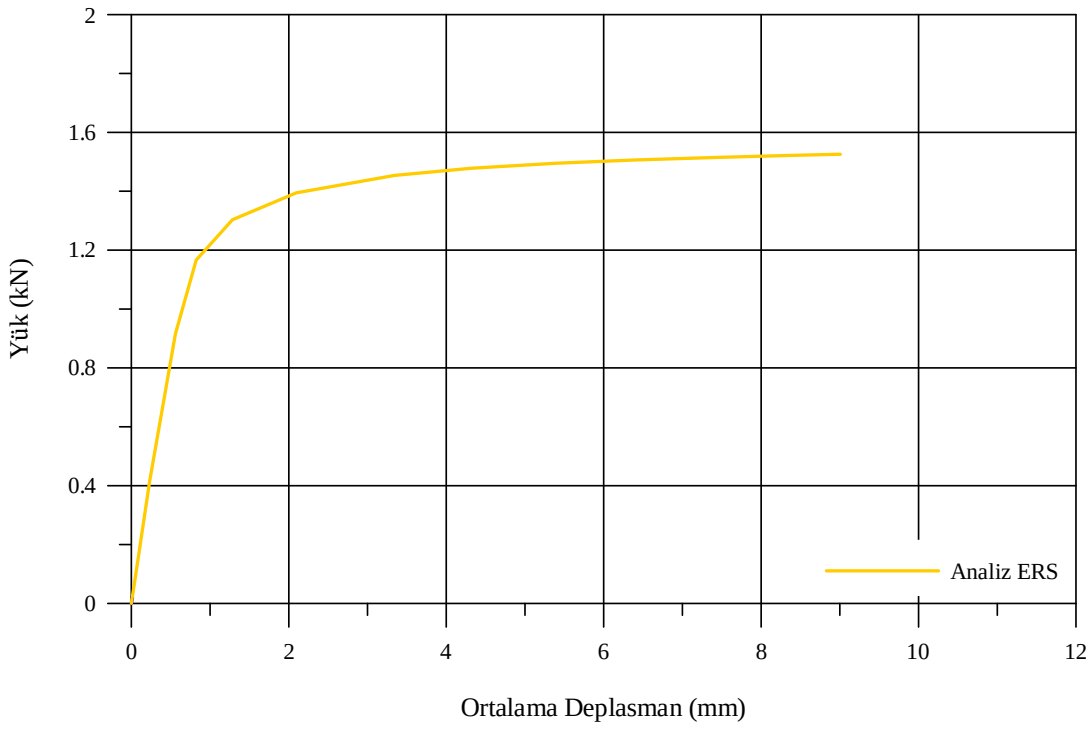
Şekil 4.139. EPSD sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.16 ERS Analiz Sonucu

ERS analiz modelinin sonlu elemanlar analizinde maksimum 1,55 kN yük altında yaptığı maksimum deplasman 14,63 mm'dir (Şekil 4.140). Şekil 4.141'de ERS modelinin sonlu elemanlar grafiğinde modelin rijit davranış gösterdiği görülmüştür.



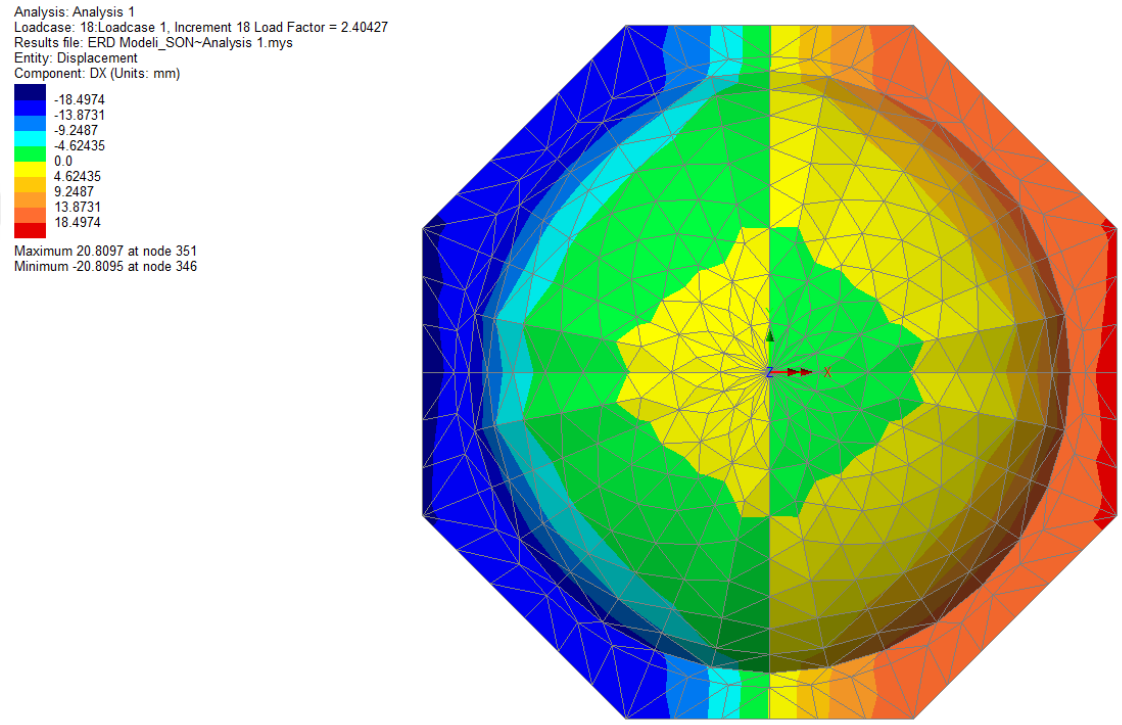
Şekil 4.140. ERS sonlu elemanlar analizi.



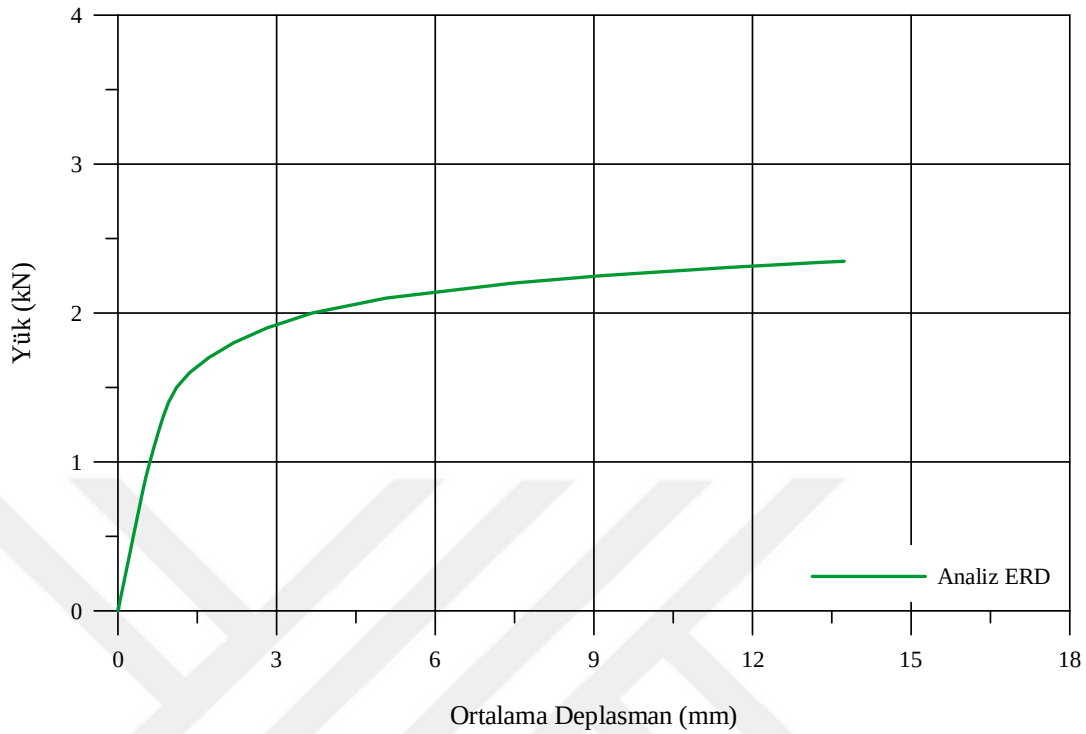
Şekil 4.141. ERS sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.17 ERD Analiz Sonucu

ERD analiz modelinin sonlu eleman modelinde Şekil 4.142'de görüldüğü üzere maksimum 2,40 kN yük altındaki maksimum deplasmanı 20,80 mm'dir. ERD analizinin grafiği rijit bir davranış sergilemiştir (Şekil 4.143).



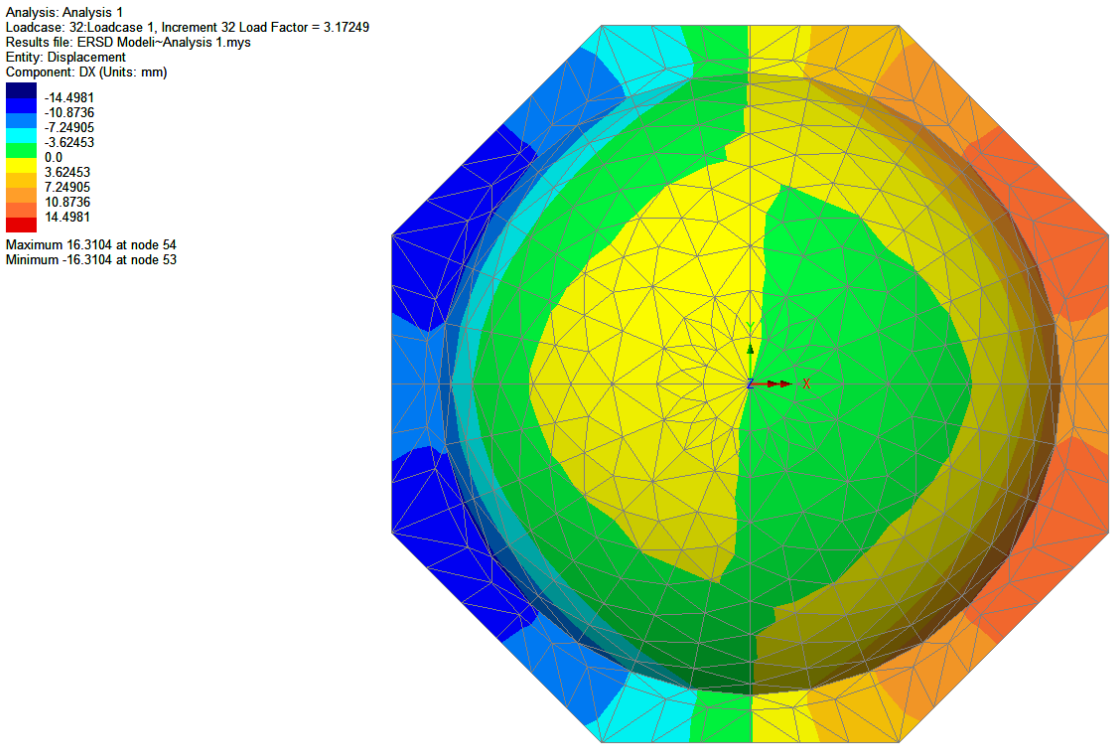
Şekil 4.142. ERD sonlu elemanlar analizi.



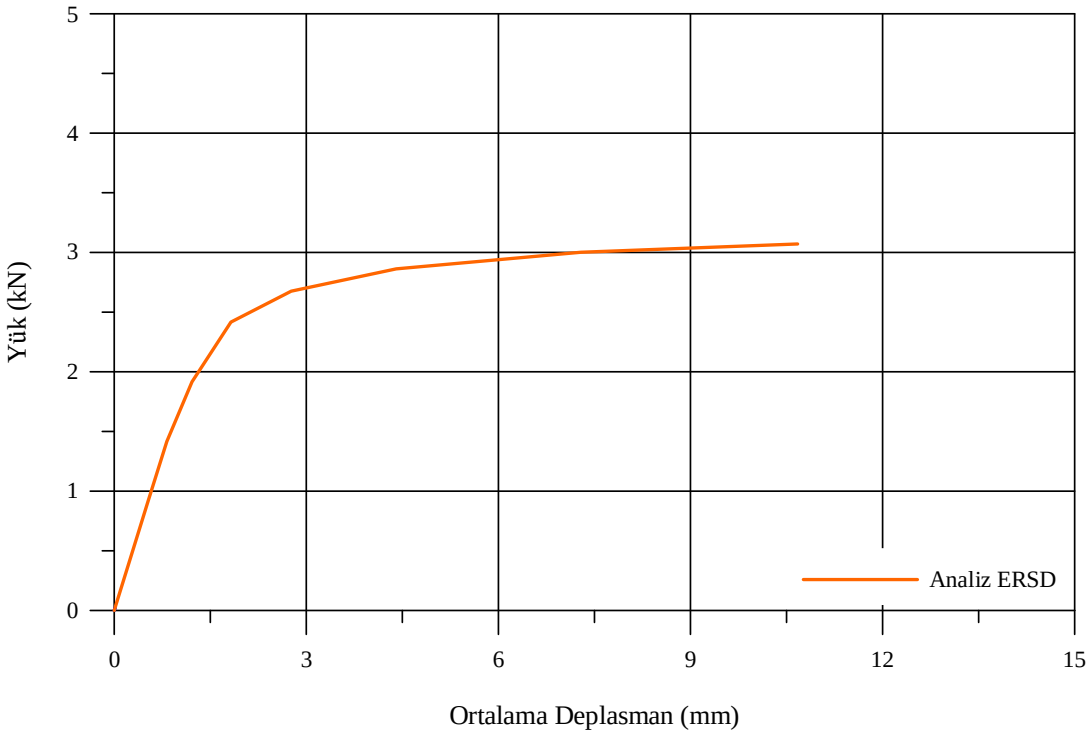
Şekil 4.143. ERD sonlu elemanlar analiz grafiği.

4.18 ERSD Analiz Sonucu

ERSD analizi sonlu elemanlar analiz sonucunda maksimum 3,17 kN yük altındaki maksimum deplasman 16,31 mm olmuştur (Şekil 4.144). ERSD analizinin sonlu elemanlar analiz grafiği Şekil 4.145. ERSD sonlu elemanlar analiz grafiği.



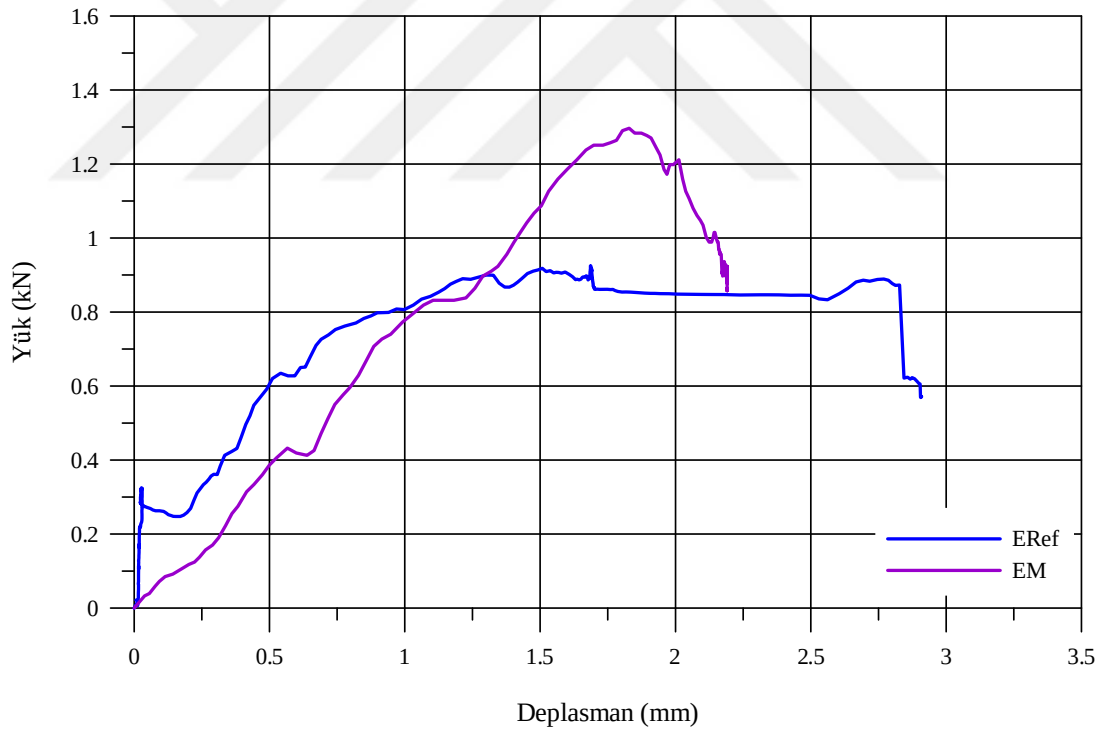
Şekil 4.144. ERSD sonlu elemanlar analiz grafiği.



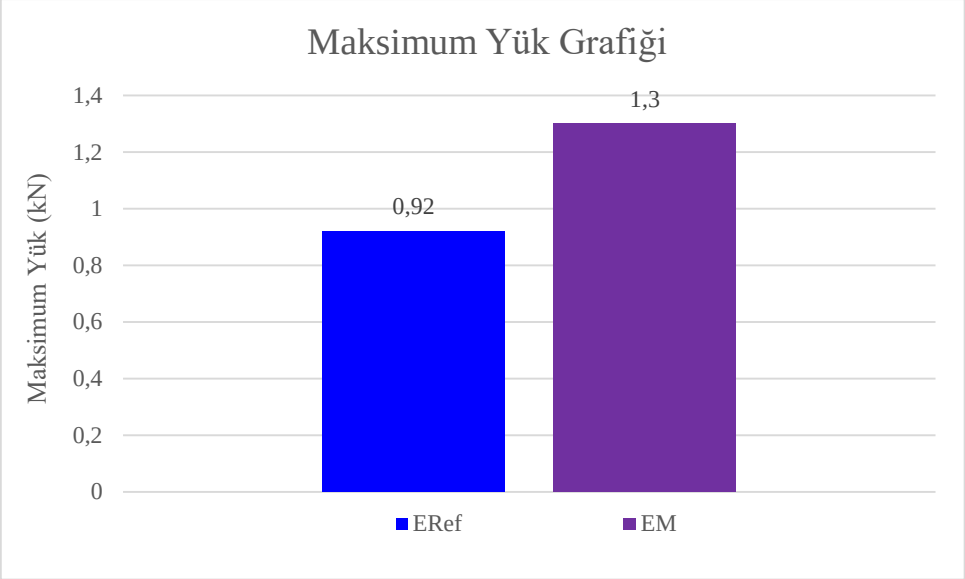
Şekil 4.145. ERSD sonlu elemanlar analiz grafiği.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

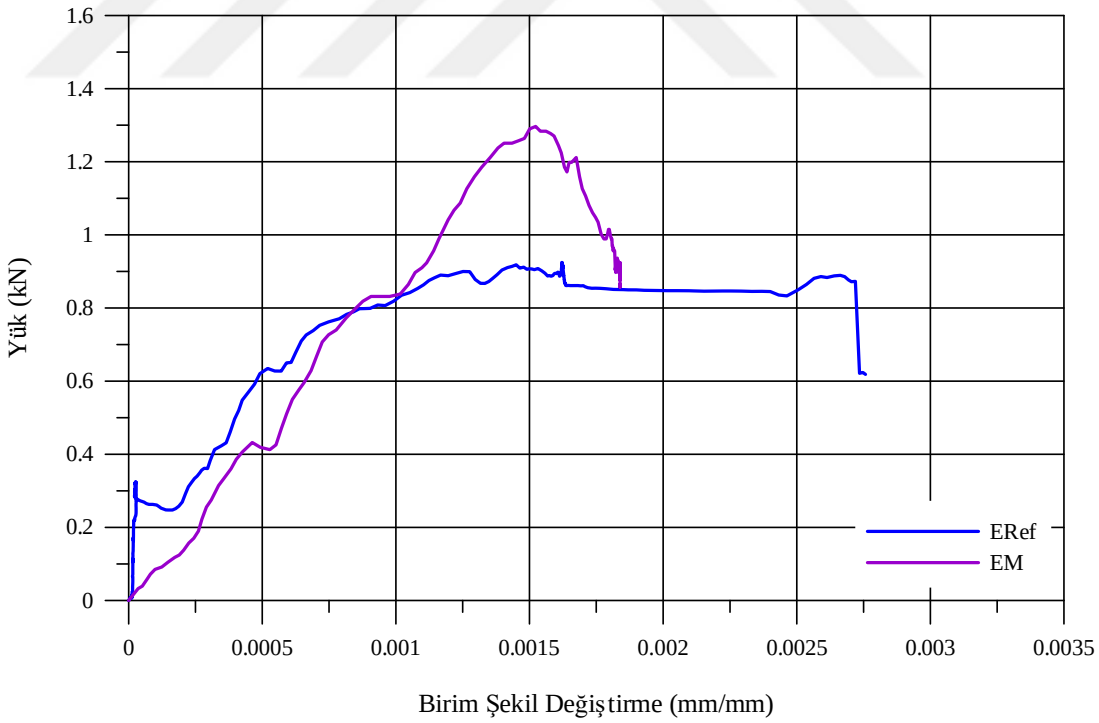
Referans deneyi (ERef) ve tamir harcı (EM) kullanılarak yapılan deneyler sonucunda en fazla deplasman, 1,30 kN ile Şekil 5.1'de görüldüğü gibi EM deneyinde gerçekleşmiştir. Bunun yanında EM numunesi ise ERef numunesine göre daha rijit bir davranış sergileyerek maksimum 5,18 mm deplasman yapmıştır. ERef ve EM deneyleri karşılaştırıldığında % 41,30 bir artış ile EM deneyinin daha iyi sonuç verdiğini söyleyebilirken dayanım konusunda ise EM numunesi 7 günde 15 kN dayanım almaktadır. Aşağıda Şekil 5.2'de 1,30 kN ile EM deneyi, 0,92 kN ile ERef deneylerinin maksimum yük değerleri verilmiştir. Yük - deplasman değerleri ile yük – birim şekil değiştirme değerleri birbiri ile örtüşmektedir. EM deneyi ERef deneyinden daha rijit bir davranış sergilemiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.1. ERef ve EM deney grafikleri.



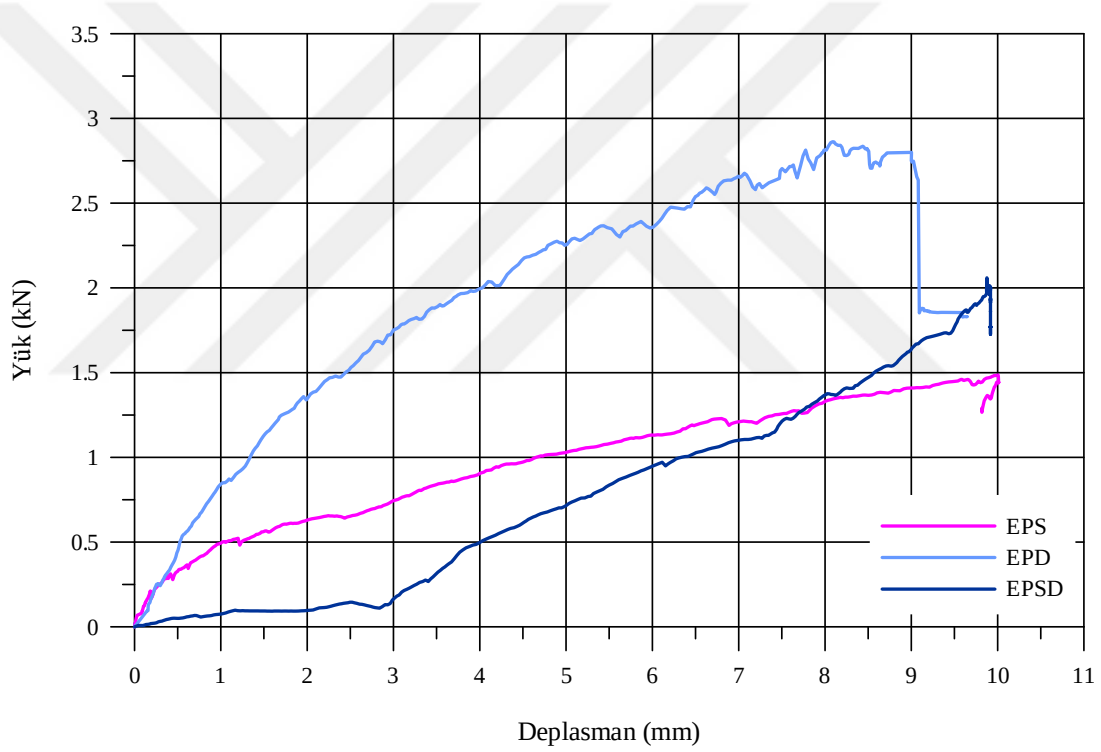
Şekil 5.2. ERef ve EM maksimum yük grafiği.



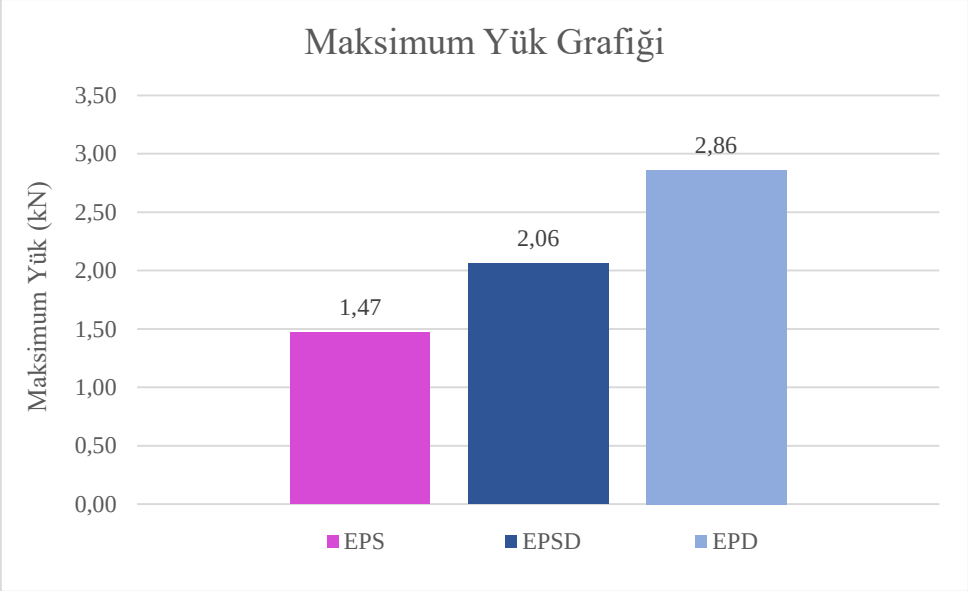
Şekil 5.3. ERef ve EM birim şekil değiştirme grafikleri.

FRP uygulaması ile yapılan onarım/güçlendirme deneylerinde maksimum yük 2,86 kN ile EPD deneyinde görülmüştür (Şekil 5.4). En düşük yükü 1,48 kN ile EPS deney numunesi taşımıştır. FRP güçlendirme deneylerinde maksimum deplasmanlar birbirine yakın çıkmıştır.

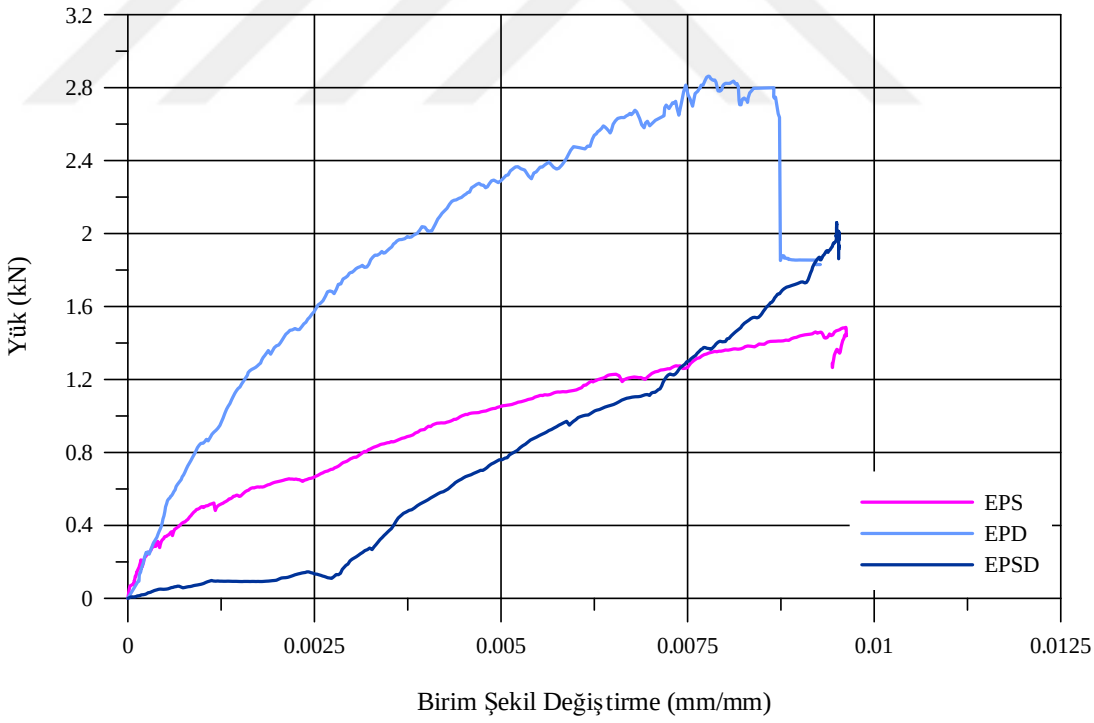
Aşağıdaki Şekil 5.5'de görüldüğü gibi kasnak bölgesinde yapılan FRP uygulaması, diğer bölgelere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Şekil 5.6'da FRP uygulamalarında elde edilen yük – birim şekil değiştirme grafikleri verilmiş olup maksimum şekil değiştirme EPS numunesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.4. EPS, EPD ve EPSD deney grafikleri.

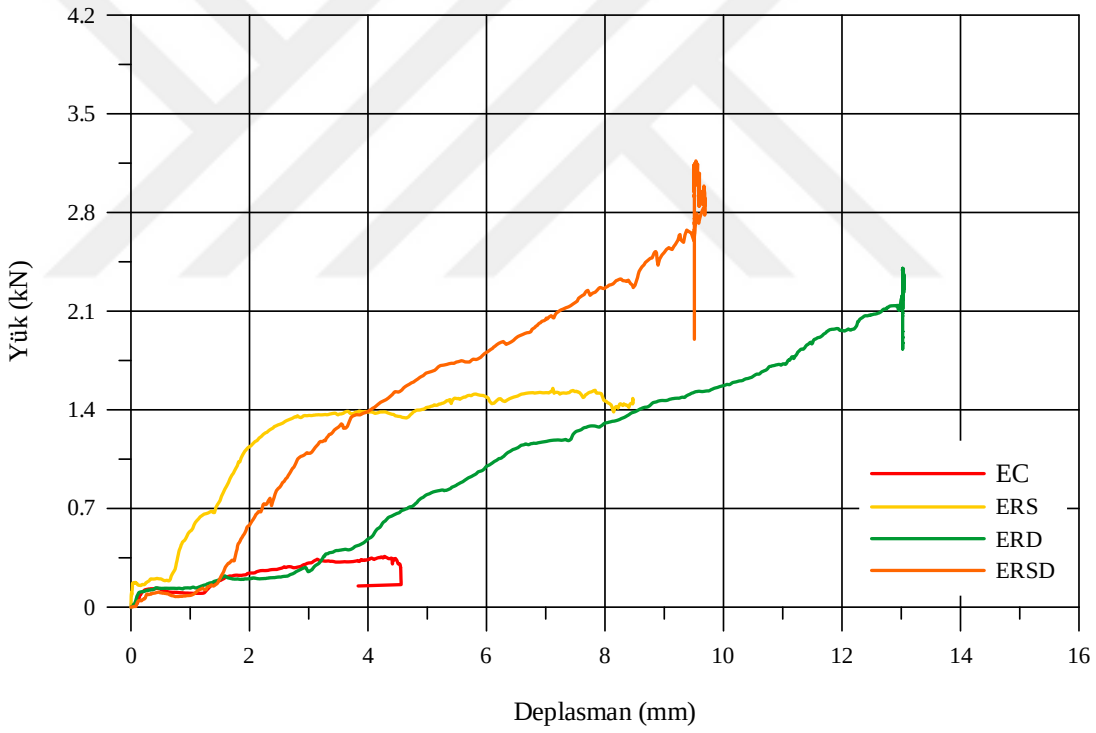


Şekil 5.5. EPS, EPD ve EPSD maksimum yük grafiği.

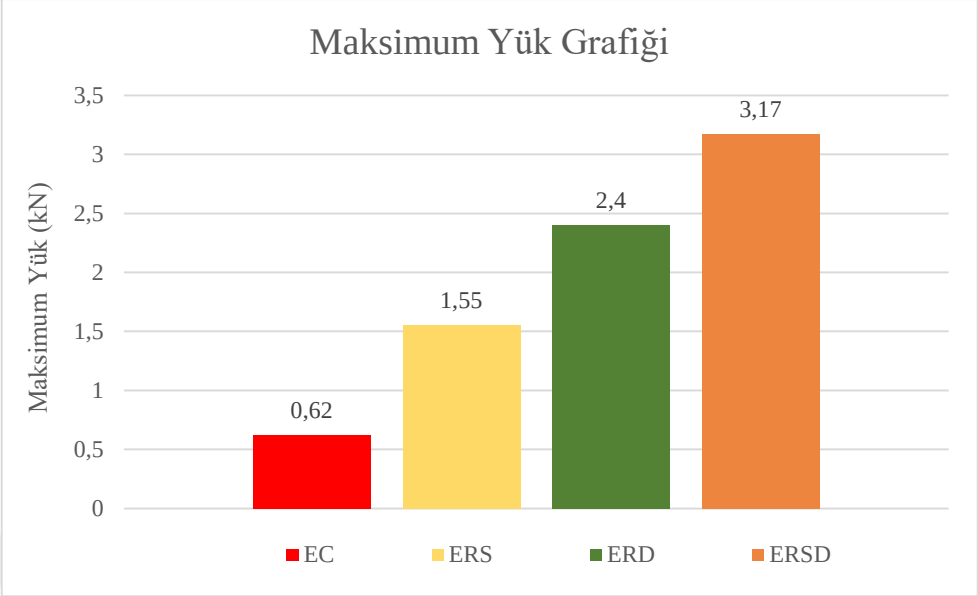


Şekil 5.6. EPS, EPD ve EPSD birim şekil değiştirme grafikleri.

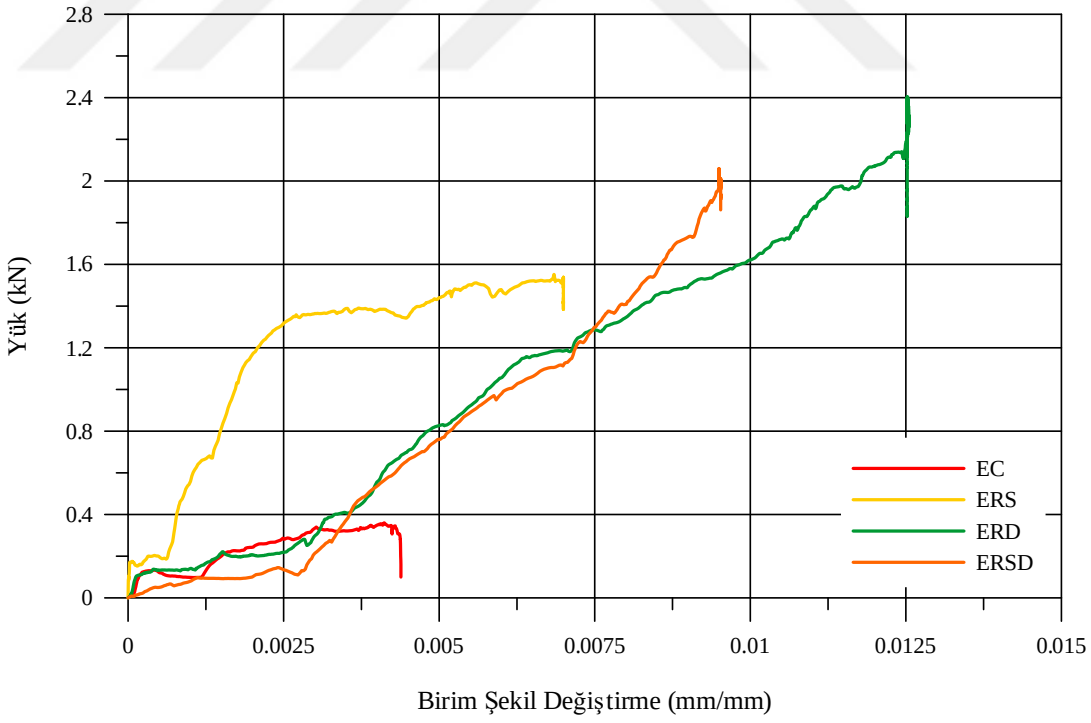
Çelik uygulanarak yapılan onarım ve güçlendirme deneylerinde, 3,17 kN ile maksimum yükü ERSD deney numunesi taşımıştır (Şekil 5.7). İkinci olarak maksimum yük, 2,40 kN ile ERS numunesinde gerçekleşmiştir. En düşük yük 0,36 kN ile en düşük deplasmanı 10,47 mm olarak EC numunesinde görülmüştür. Aşağıdaki Şekil 5.8'de görüldüğü üzere yapılan çelik uygulamalarının etek ve kasnak bölgesi, diğer bölgelere oranla daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. İkinci olarak en iyi sonucu kasnak bölgesinde yapılan çekme çemberi uygulaması vermiştir. Çelik uygulamaları deney sonuçlarına göre yük – birim şekil değiştirme grafikleri ve yük – deplasman grafikleri birbirine benzemektedir. Bu grafikte maksimum şekil değiştirmeyi ERD numunesinde numunesi yaparken minimum şekil değiştirmeyi ise EC numunesi yapmıştır (Şekil 5.9).



Şekil 5.7. EC, ERS, ERD ve ERSD deney grafikleri.

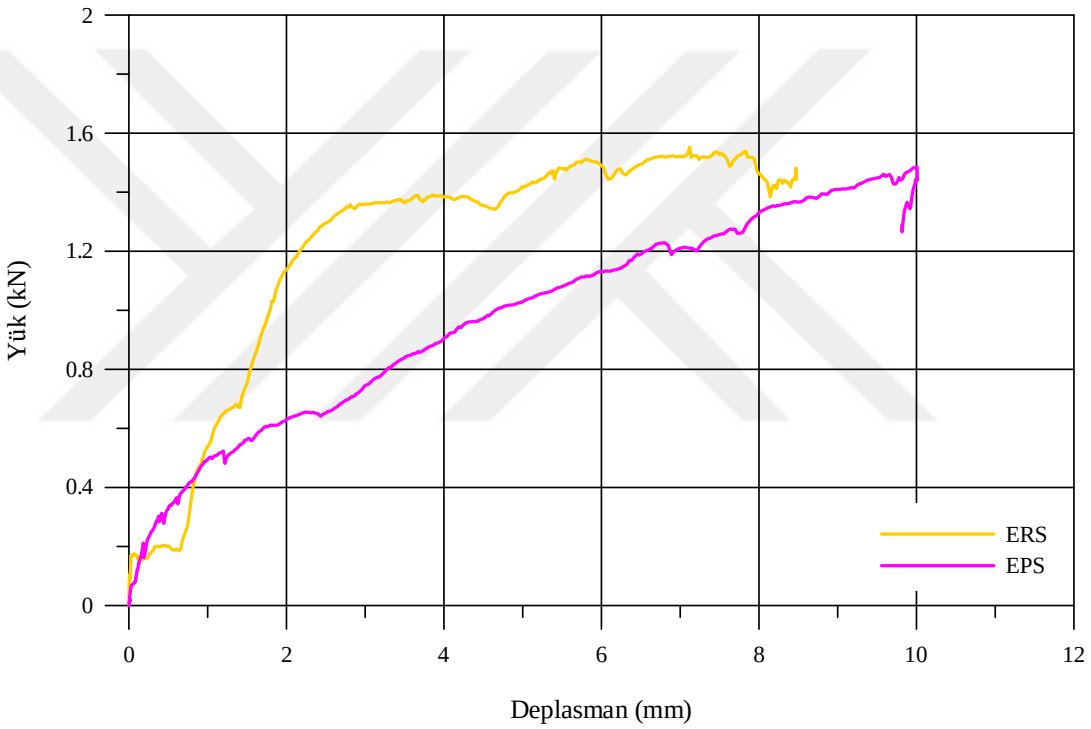


Şekil 5.8. EC, ERS, ERD ve ERSD maksimum yük grafiği.

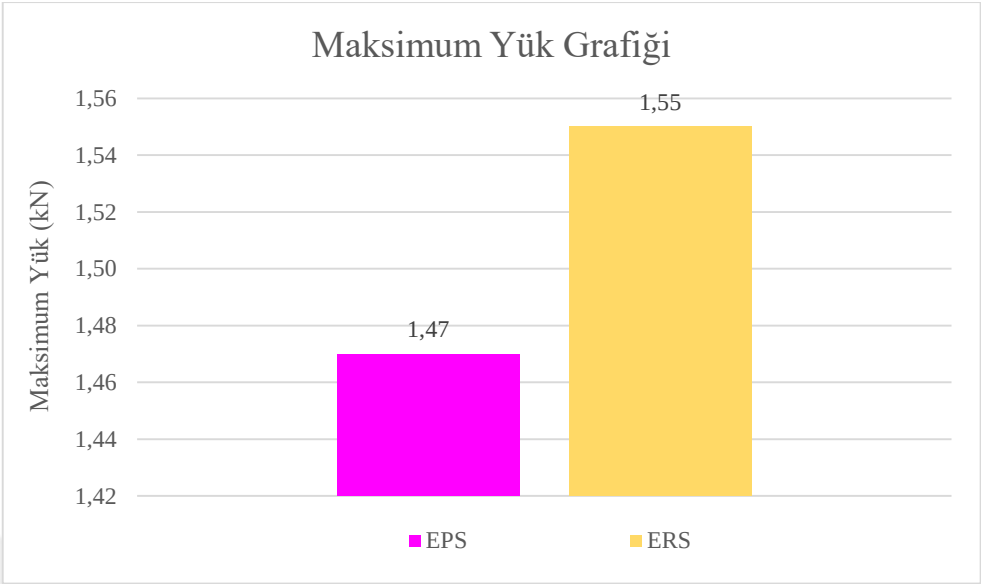


Şekil 5.9. EC, ERS, ERD ve ERSD birim şekil değiştirme grafikleri.

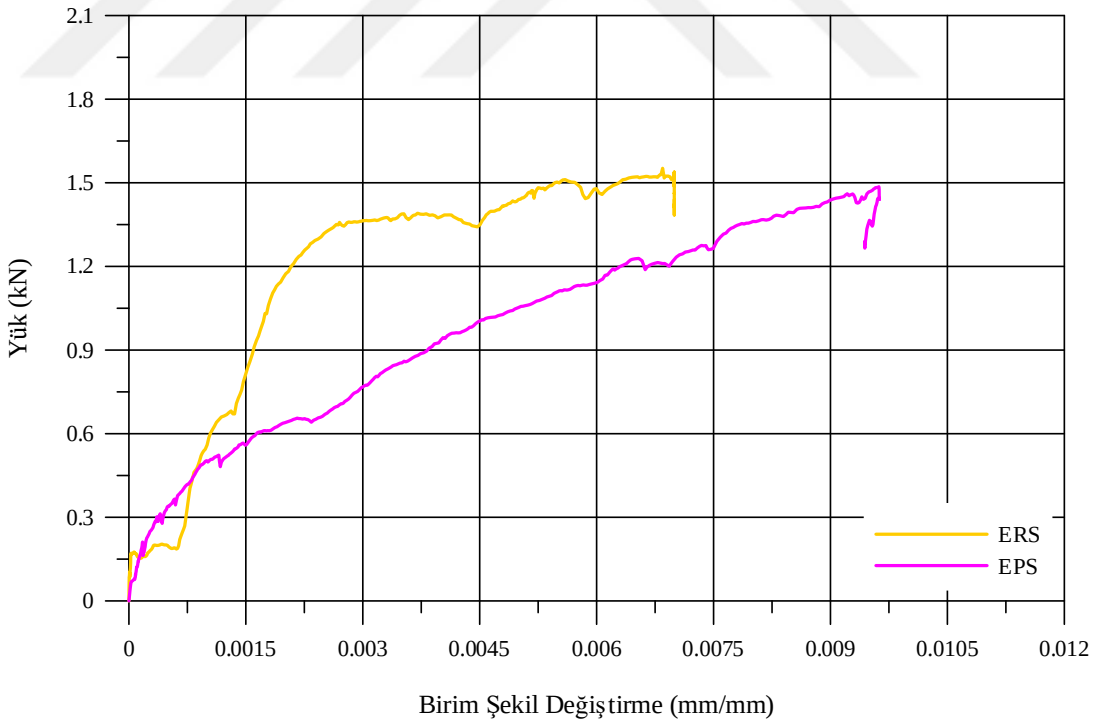
Kubbenin etek bölgesinde yapılan onarım/güçlendirme uygulamalarında, maksimum yükü 1,55 kN ile ERS numunesi taşımıştır (Şekil 5.10). Buna rağmen maksimum deplasman, 17,49 mm ile EPS numunesinde gerçekleştirmiştir. Şekil 5.11'de görüldüğü gibi etek bölgesinde yapılan güçlendirme uygulamalarında yükler birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.12'de görüldüğü üzere en büyük birim şekil değiştirmeyi ERS numunesi yapmıştır.



Şekil 5.10. Kubbe etek bölgesi güçlendirme grafikleri.

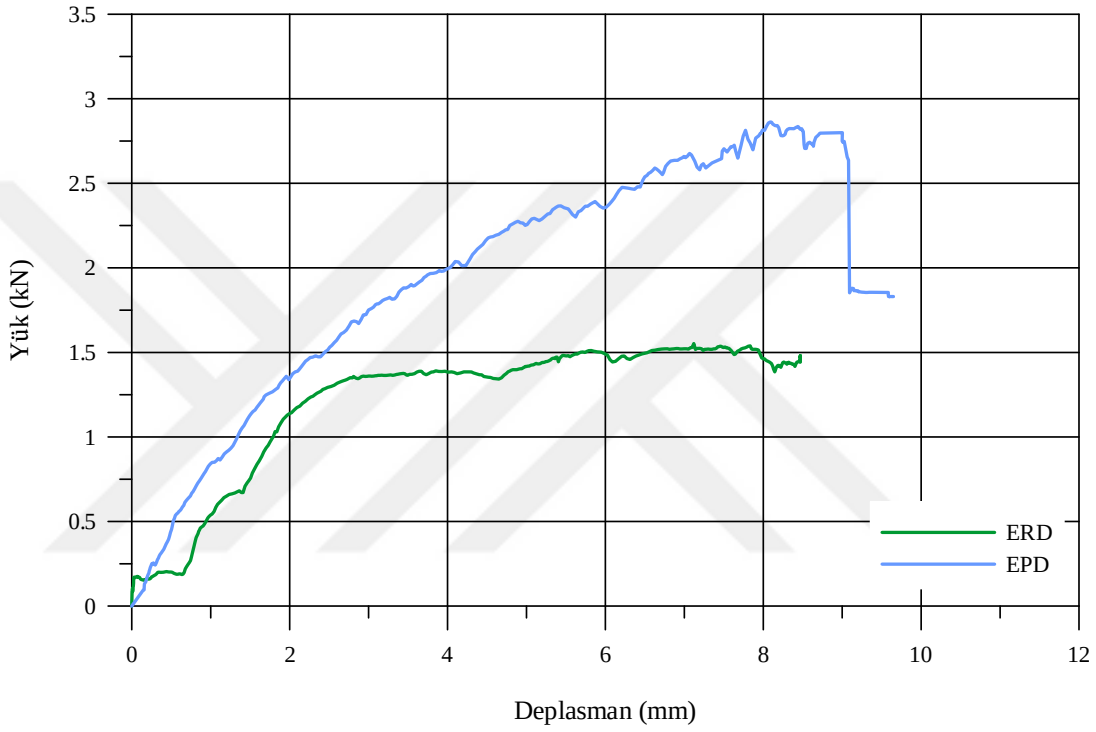


Şekil 5.11. Kubbe etek bölgesi maksimum yük grafiği.

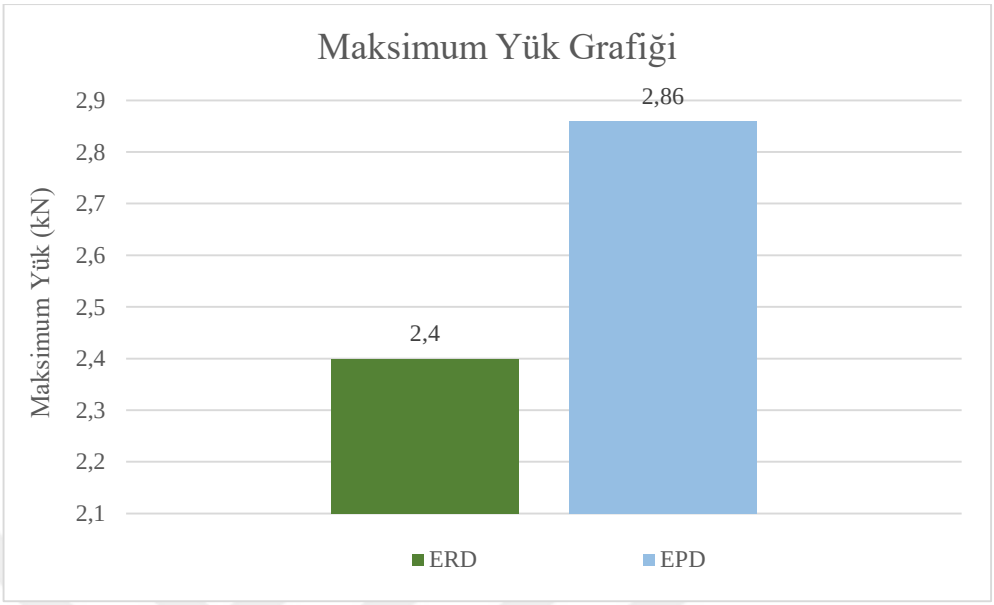


Şekil 5.12. Kubbe etek bölgesi birim şekil değiştirme grafikleri.

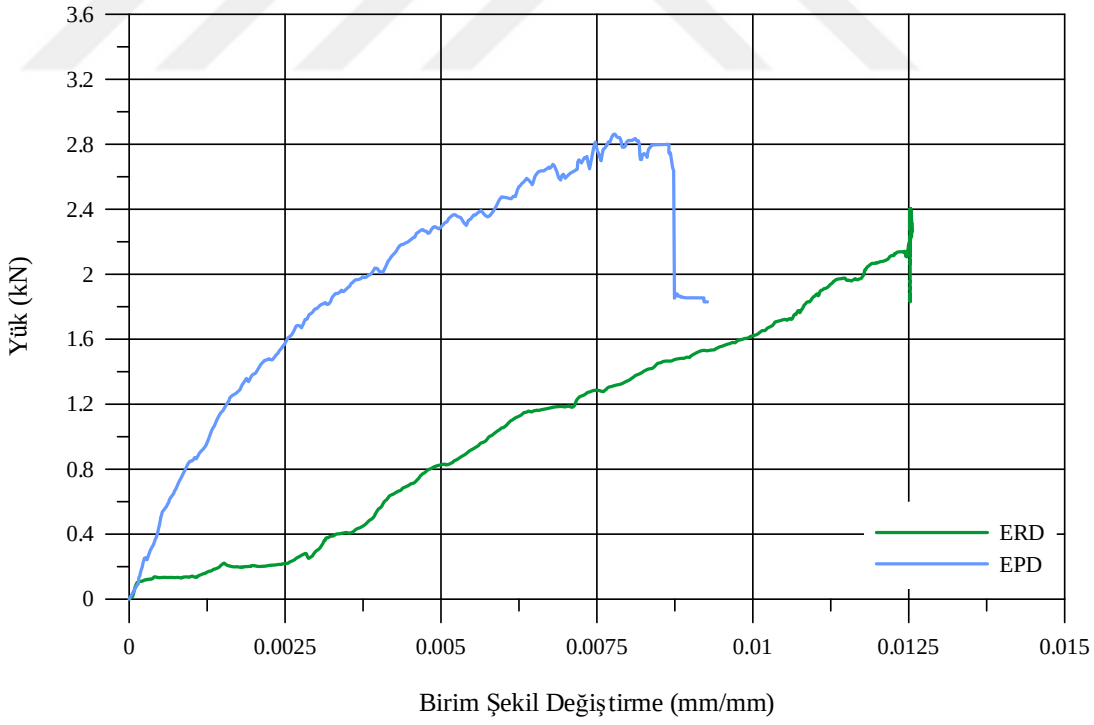
Kubbenin kasnak bölgesinde yapılan onarım ve güçlendirme uygulamalarında, EPD numunesinde 2,86 kN ile maksimum yük gerçekleşmiştir (Şekil 5.13). Aşağıdaki Şekil 5.14'de görüldüğü gibi kasnak bölgesinde yapılan güçlendirme uygulamalarında, FRP uygulaması daha fazla yük taşımıştır. Kubbe kasnak bölgesinde meydana gelen en büyük birim şekil değiştirmeyi ERS numunesi gerçekleştirmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.13. Kubbe kasnak bölgesi grafikleri.

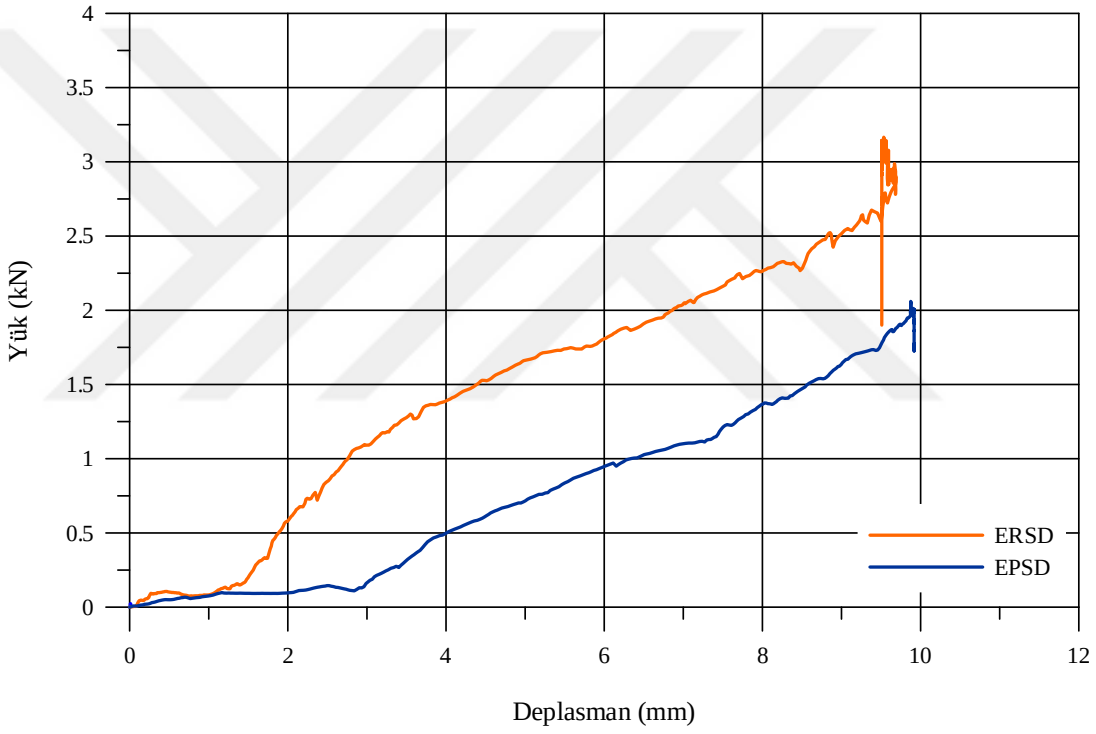


Şekil 5.14. Kubbe kasnak bölgesi maksimum yük grafiği.

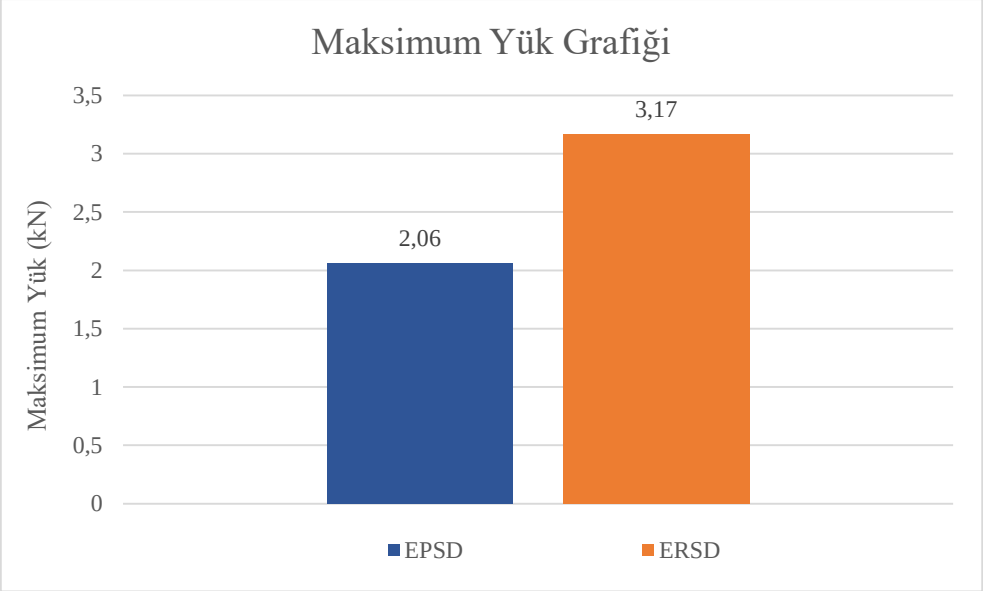


Şekil 5.15. Kubbe kasnak bölgesi birim şekil değiştirme grafikleri.

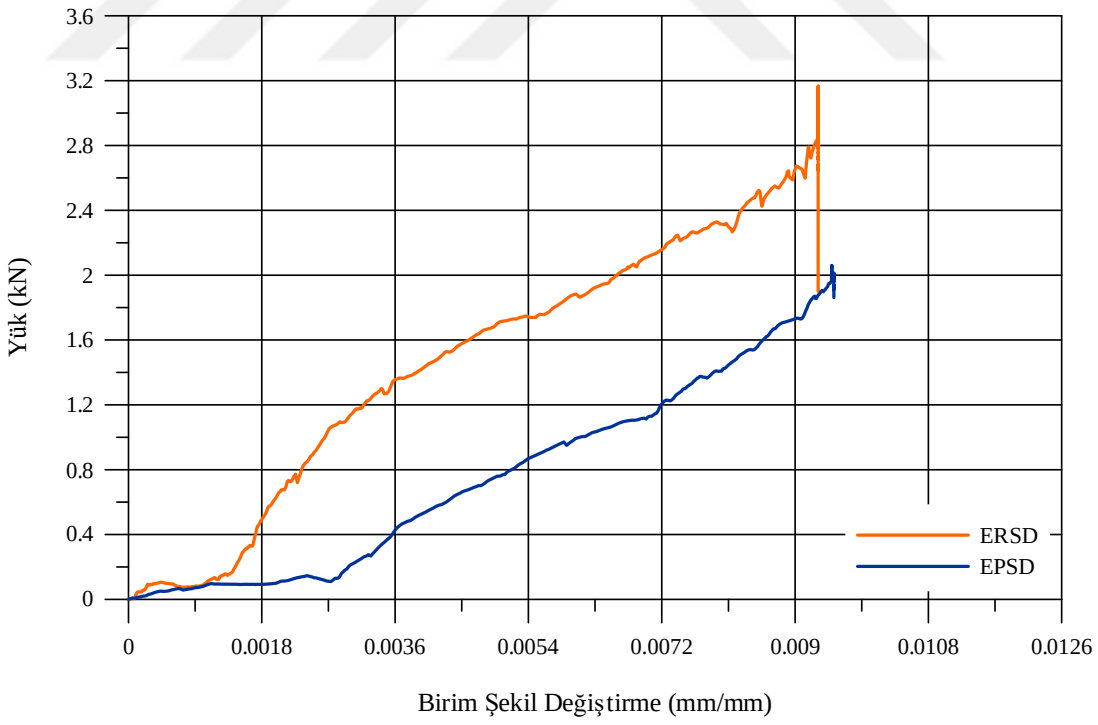
Kubbenin etek ve kasnak bölgelerinde yapılan onarım/güçlendirme uygulamalarında, maksimum yükü 3,17 kN ile ERSD numunesi taşımıştır (Şekil 5.16). Deneylerin sonuçlarına göre maksimum deplasmanlar birbirlerine yakın çıkmıştır. Şekil 5.17'de görüldüğü gibi etek ve kasnak bölgelerinde yapılan onarım ve güçlendirme uygulamalarında, çekme çemberi uygulaması daha fazla yük taşımıştır. Aşağıdaki Şekil 5.18'de görüldüğü üzere yük – deplasman ve yük – birim şekil değiştirme grafikleri birbiri ile örtüşmekte olup şekil değiştirme değerleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır.



Şekil 5.16. Kubbe etek ve kasnak bölgesi grafikleri.



Şekil 5.17. Kubbe etek ve kasnak bölgesi maksimum yük grafiği.



Şekil 5.18. Kubbe etek ve kasnak bölgesi birim şekil değiştirme grafikleri.

Çizelge 5.1. Deney sonuçlarının karşılaştırılması.

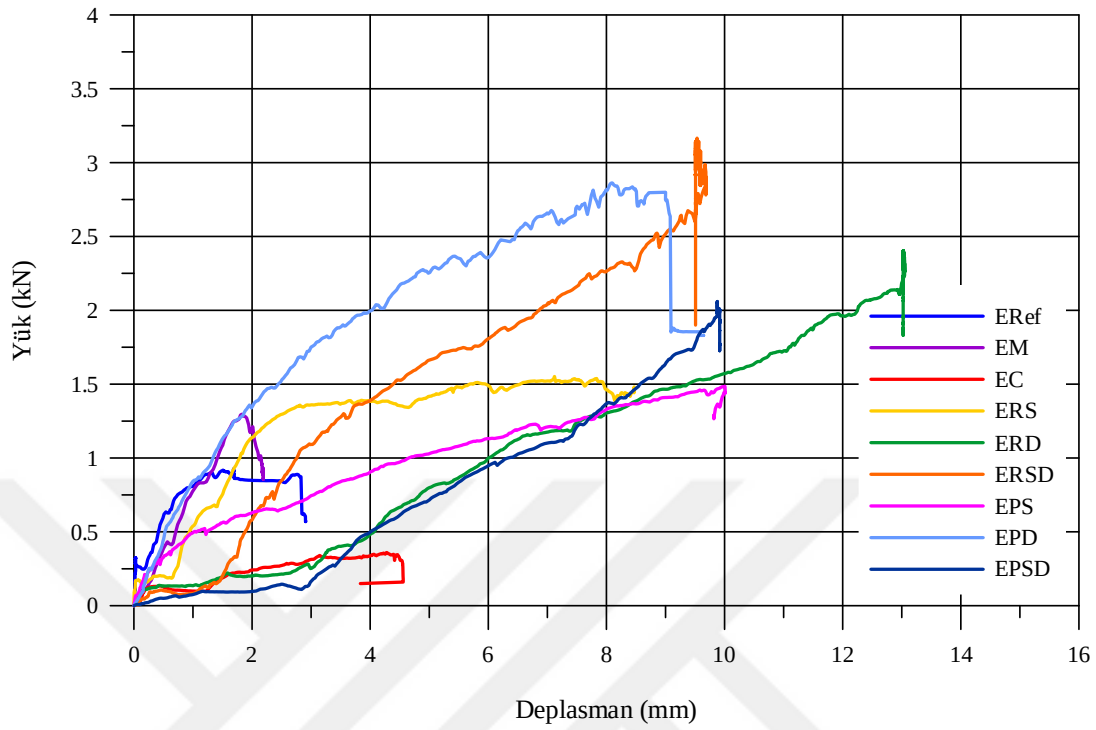
Deney Adı	Maksimum Yük (kN)	Artış[a] (%)	Maksimum Deplasman (mm)
ERef Deneyi	0,92	0	5,08
EC Deneyi	0,36	-39,13	10,47
EM Deneyi	1,30	141,30	5,18
EPS Deneyi	1,48	160,87	17,49
EPD Deneyi	2,86	310,87	16,03
EPSD Deneyi	2,06	223,91	17,05
ERS Deneyi	1,55	168,48	14,77
ERD Deneyi	2,40	260,87	20,66
ERSD Deneyi	3,17	344,57	16,60

[a] Modellerin ERef numunesine göre maksimum yükün yüzdelik artış miktarı

Aşağıda Şekil 5.19'da yük - optimum deplasman grafiği çizilmiştir. Deney sonuçlarına göre en fazla yükü 3,17 kN ERSD deney numunesi taşmıştır. Bunun yanında EPS numunesi 2,86 kN ile ERD numunesi 2,4 kN yük taşıdığı görülmektedir. Deney numunelerinden en düşük yükü 0,36 kN ile EC numunesinin taşıdığı anlaşılmaktadır

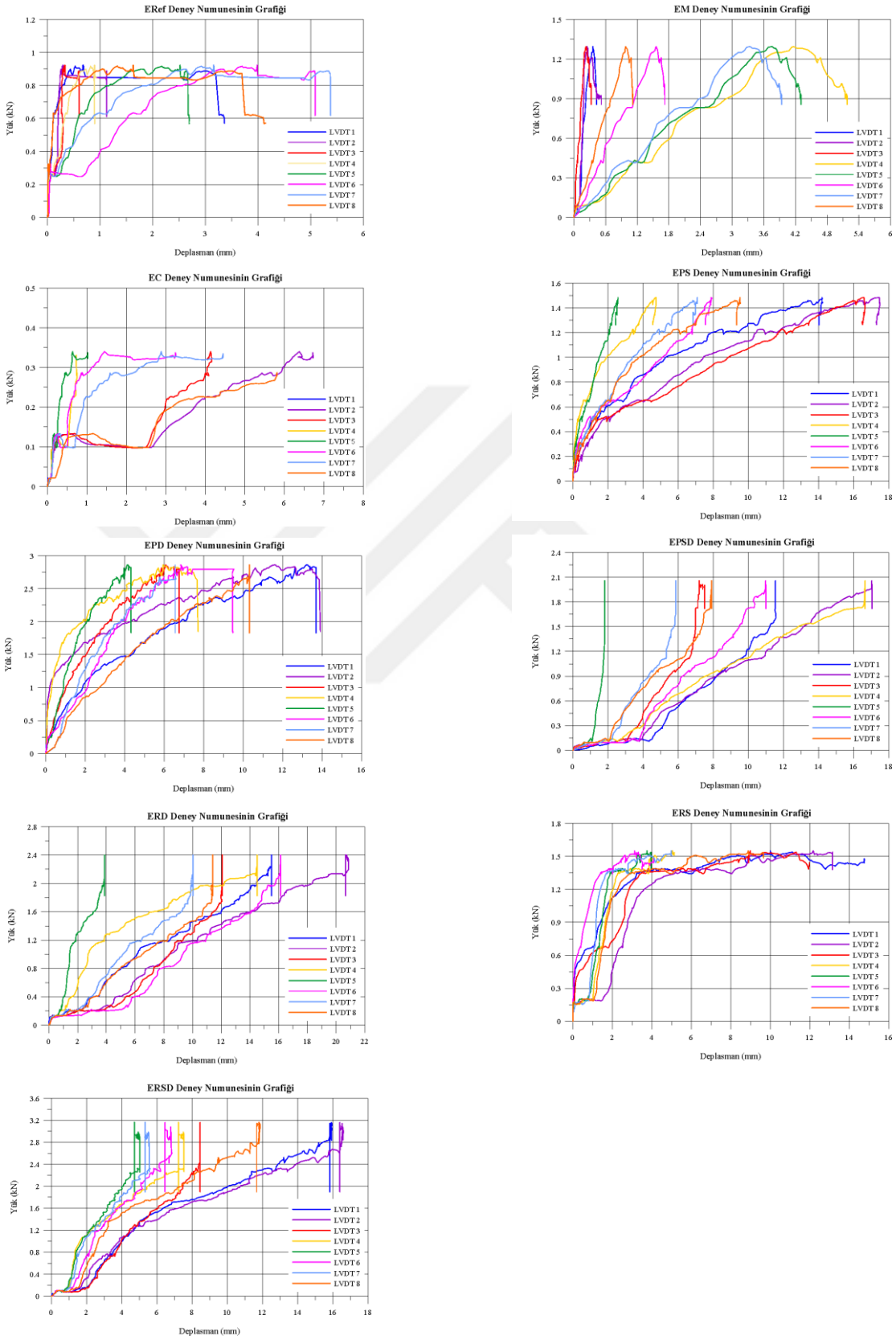
FRP ve çelik uygulamalarını taşıdığı yük açısından kıyasladığımızda en düşük yükler kubbenin etek bölgesinde oluşmuş olup yüklerin bir birine yakın olduğu görülmüştür. Kubbe deney sonuçlarına göre FRP ile çelik uygulamaların gerçekleştirdiği deplasmanlar kıyaslandığında FRP güçlendirme uygulamalarının daha az deplasman yaptığı görülmüştür. Sonuç olarak FRP uygulaması kubbe rijitlik katarak, kubbenin açılmasını engellemektedir.

EC numunesi olarak adlandırılan dikiş yöntemi ERef numunesinden çok daha düşük yük taşımıştır. Bunun nedeni dikiş uygulaması yapılırken taşlara delikler açılıp taşın dayanımını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak güçlendirme yöntemi olarak uygulanan dikiş yönteminin yapılması tavsiye edilmemektedir.



Şekil 5.19. Kubbe deney grafikleri.

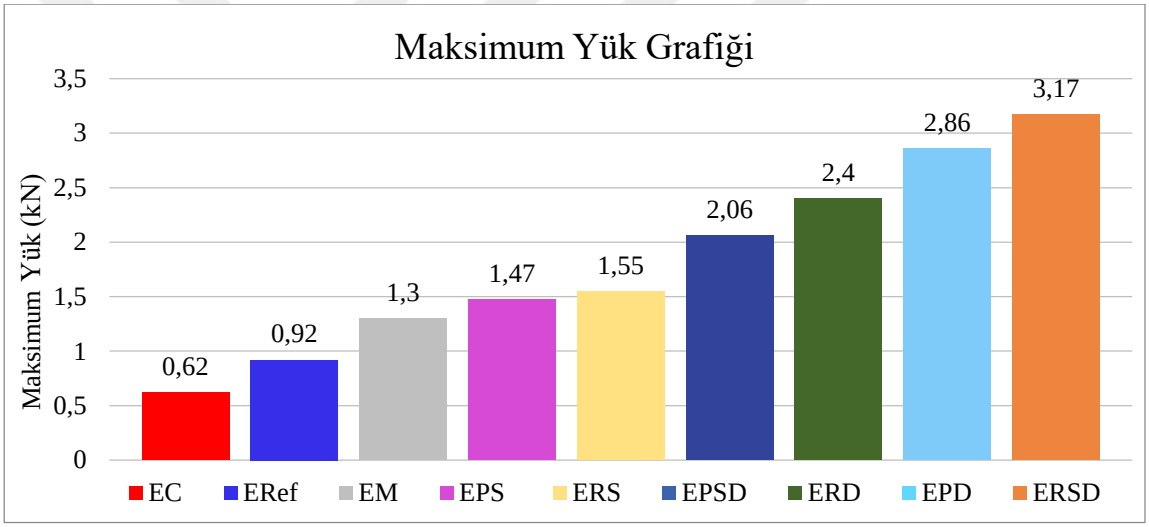
Şekil 5.20'de yapılan bütün deneylerin yük – deplasman grafikleri verilmiştir. Deney grafiği sonucunda ERSD, ERD ve EPSD numunelerinin yaptığı rijitlikler birbirine benzer olup en rijit deney numuneleri olarak görülmektedir. EPS ve EPD numunelerinin sergilediği rijitlikler de birbirine benzemektedir. Deney grafiklerde numunelerinin gösterdiği süneklik açısından ERef ve ERS numunelerinin davranışları birbirine benzemektedir.



Şekil 5.20. Toplam yük - deplasman sonuçları.

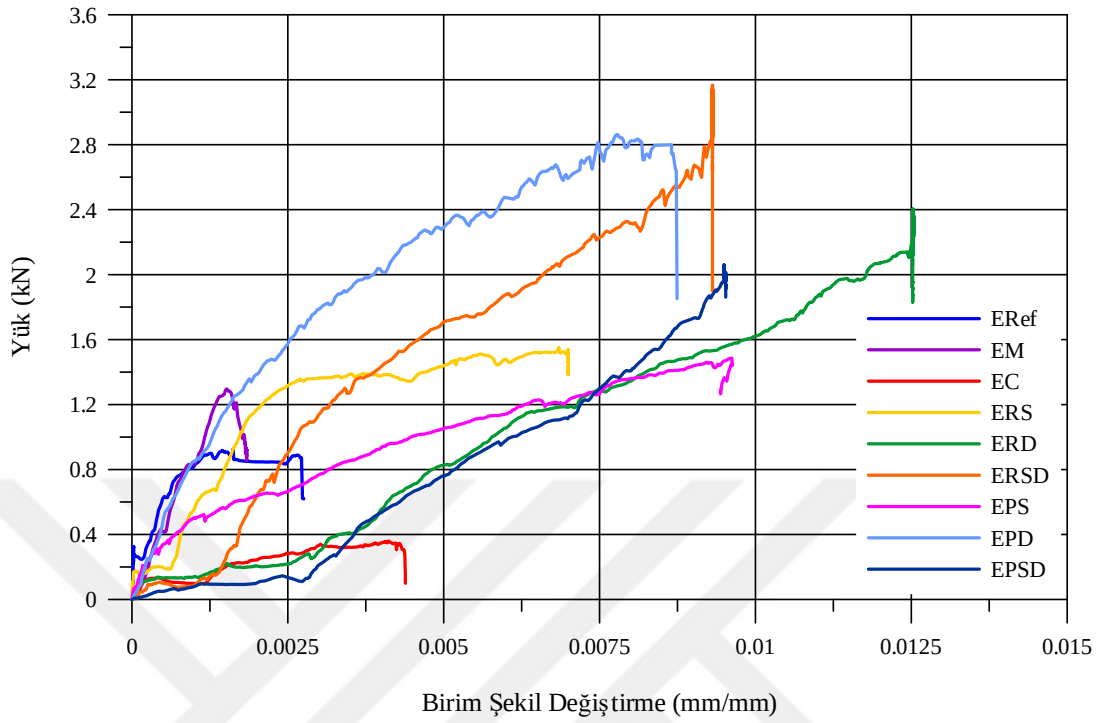
Aşağıdaki Şekil 5.21'de görüldüğü gibi maksimum yük, 3,17 kN ile kasnak ve etek bölgelerinde yapılan çekme çemberi uygulaması sonucunda görülmüştür. İkinci olarak en yüksek yük, kasnak bölgesinde yapılan FRP uygulaması neticesinde 2,86 kN yük görülmüştür. Kasnak bölgesinde yapılan çekme çemberi uygulaması sonucunda 2,4 kN yük ile üçüncü sırada yer almaktadır. Kasnak ve etek bölgelerinde yapılan FRP uygulamaları neticesinde 2,06 kN yük görülmüştür.

Etek bölgesinde yapılan çekme çemberi uygulaması ile FRP uygulaması değerleri birbirine yakın değerler çıkmıştır. En düşük yük 0,36 kN ile dikiş uygulamasında görülmüştür.



Şekil 5.21. Maksimum yük grafiği.

Aşağıdaki Şekil 5.22'de kubbede yapılan deneylerin yük – birim şekil değiştirme grafikleri gösterilmektedir. En fazla birim şekil değiştirmeyi ERD numunesi gerçekleştirmiştir. EPSD ve EPD numuneleri birbirine oldukça yakın değerler olup ikinci maksimum birim şekil değiştirme olmuştur. Üçüncü olarak ERS ve ardından ERSD numunesi gelmektedir. ERef ve EPS numunelerinin birim şekil değiştirme değerleri birbirlerine yakındır. En düşük birim şekil değiştirmeyi EM numunesinin yaptığı görülmektedir.



Şekil 5.22. Toplam yük – birim şekil değiştirme grafiği.

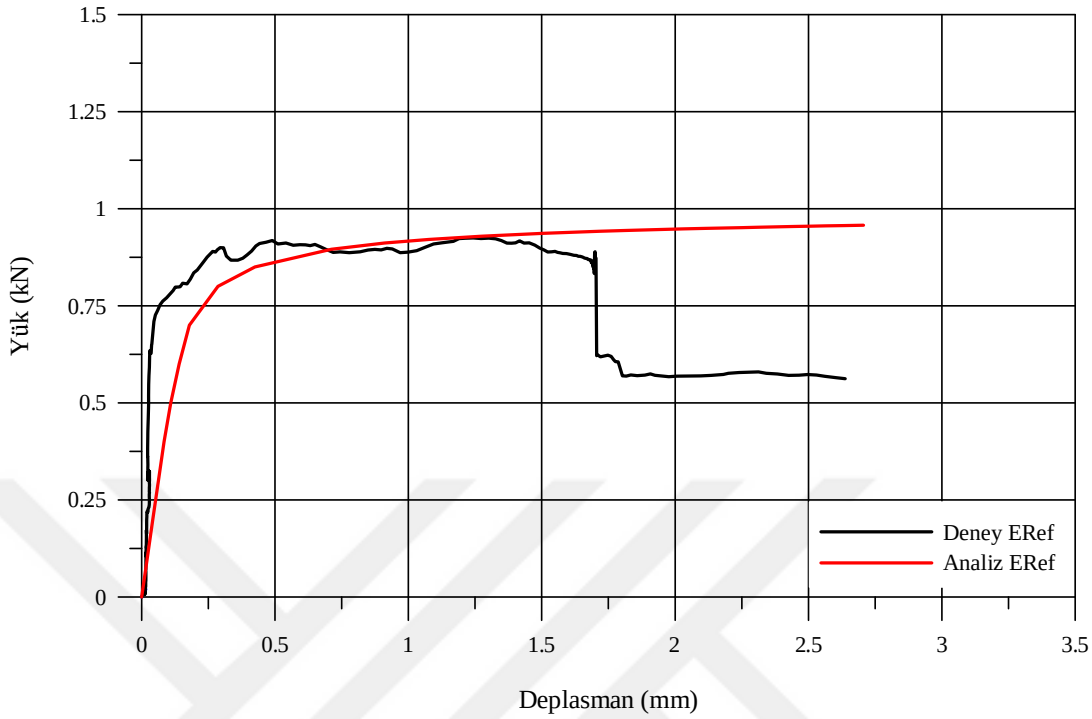
Aşağıdaki Şekil 5.24'den Şekil 5.31'e kadar kubbenin deney ve analiz sonuçlarının grafikleri gösterilmiştir.

ERef modelinde deney ve analiz grafikleri birbirine yakın çıkıp maksimum yükleri 0,92 kN 'dur (Şekil 5.23). ERef modelinde maksimum yüke karşı gelen maksimum deplasman 5,08 mm'dir.

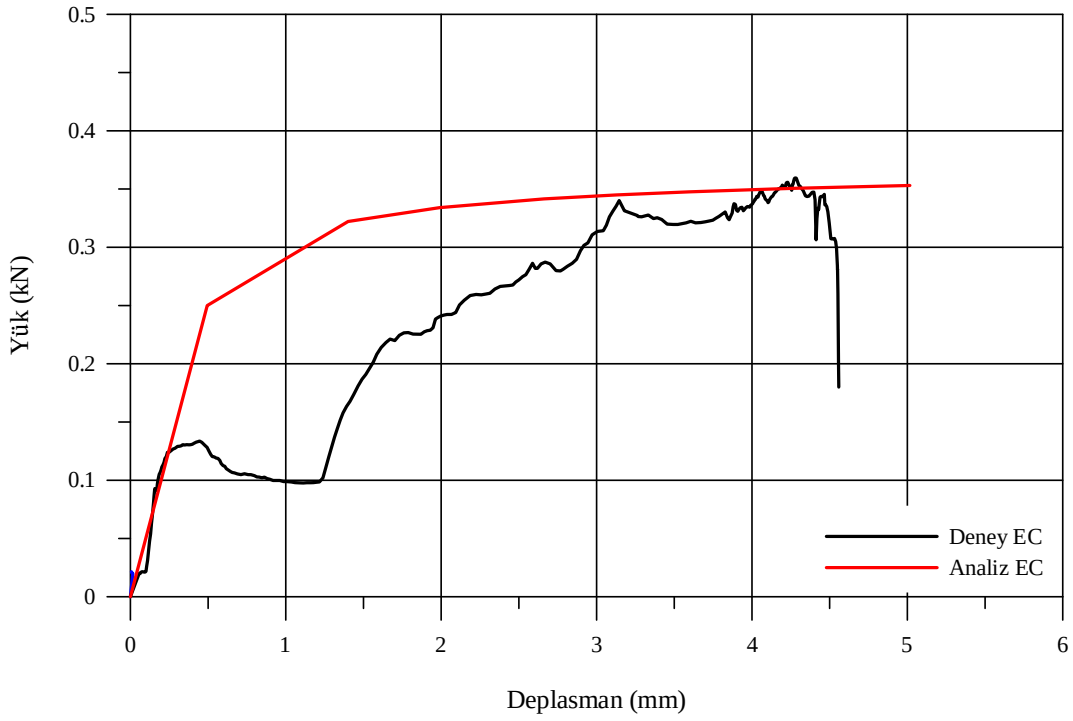
EC modelinde Şekil 5.24'de görüldüğü gibi analiz grafiğinde maksimum yük 0,36 kN'dur. EC modelinde maksimum yük yaklaşık gelen maksimum deplasman yaklaşık 10,47 mm'dir.

EM modelinin analiz ve deney grafiğinde maksimum yük 1,30 kN olup grafik çizgileri birbirine oldukça yakındır (Şekil 5.25).

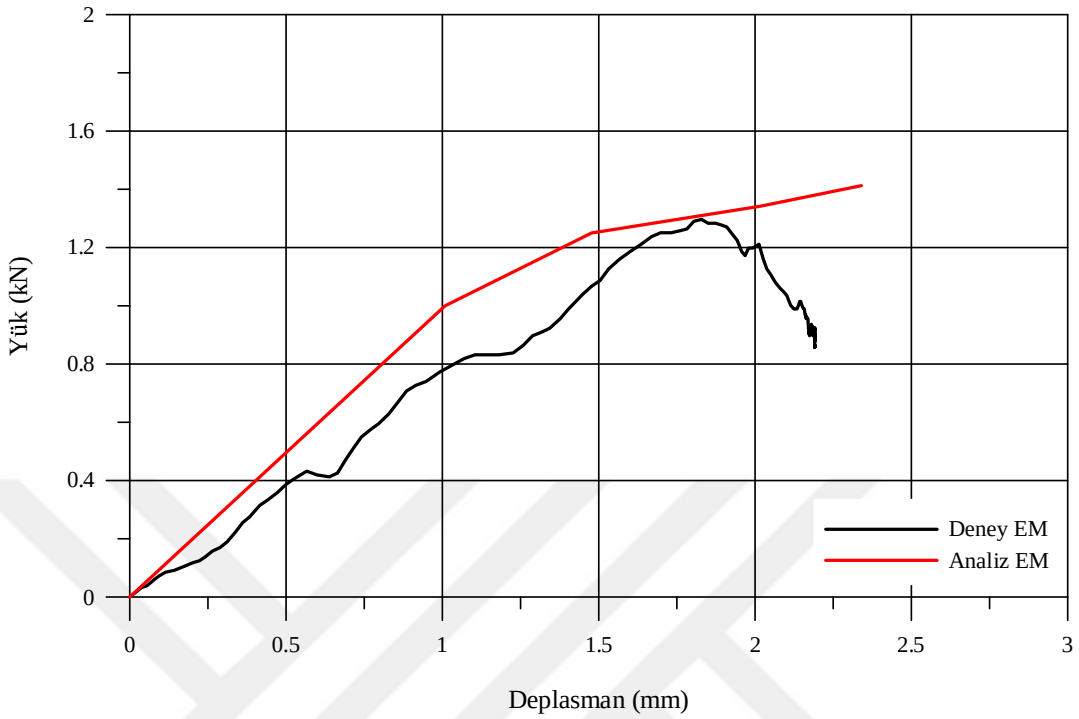
EPS modelinde Şekil 5.26'da görüldüğü gibi maksimum yük 2,86 kN'dur. EPS analiz ve deney grafiğinde maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerleri de aynıdır.



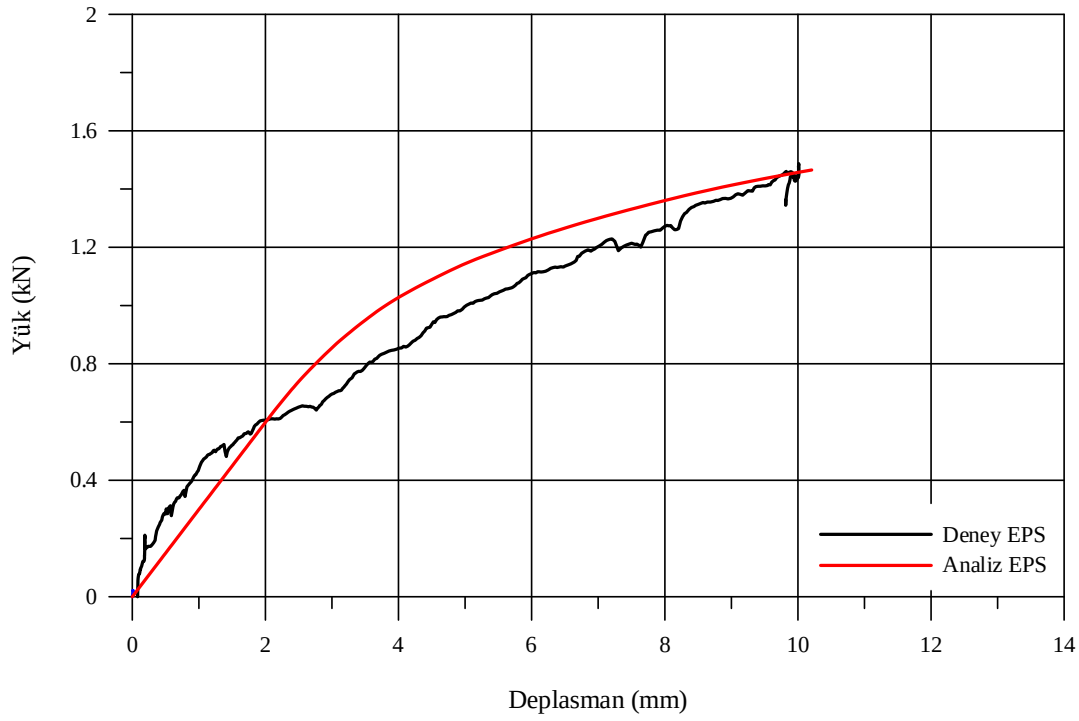
Şekil 5.23. ERef deney ve analiz sonuç grafiği.



Şekil 5.24. EC deney ve analiz sonuç grafiği.



Şekil 5.25. EM deney ve analiz sonuç grafiği.

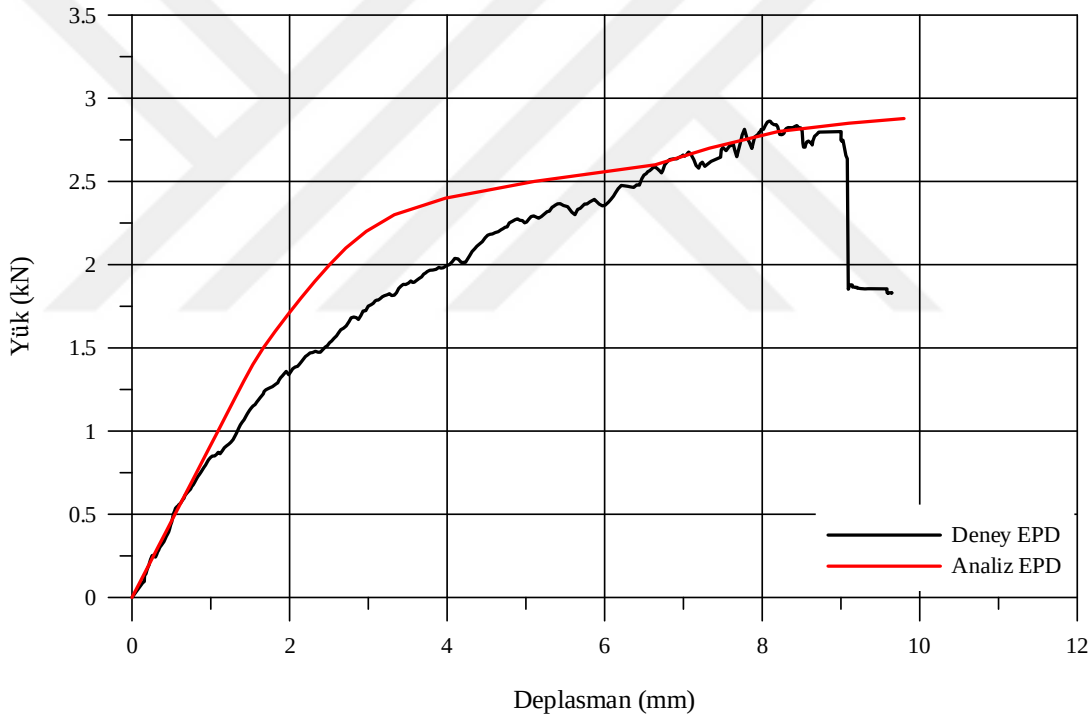


Şekil 5.26. EPS deney ve analiz sonuç grafiği.

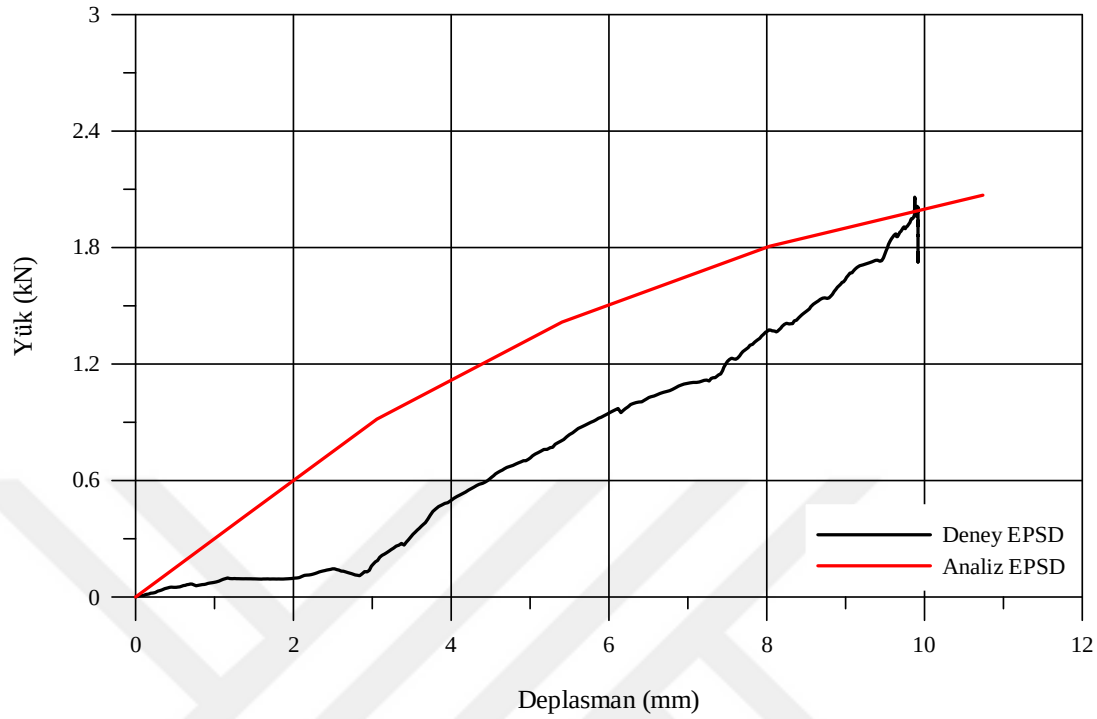
EPD modelinde analiz ve deney grafikleri birbirine oldukça yakın olup maksimum yük 2,86 kN'dur (Şekil 5.27). EPD modellerinde yükün artması ile deplasman da artmıştır ve maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerleri de aynıdır.

EPSD modelinde Şekil 5.28'de görüldüğü gibi maksimum yükler 2,06 kN olup grafikte maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerleri de aynıdır.

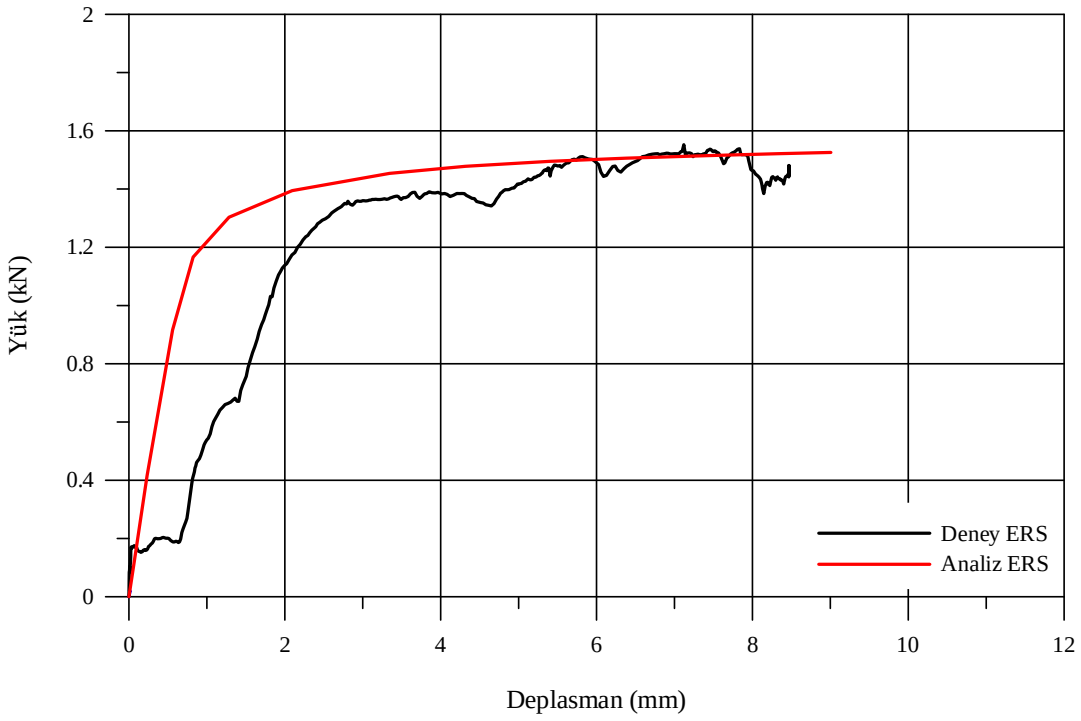
ERS modelinin analiz ve deney grafiğinde maksimum yük 1,55 kN olup grafikler birbirine oldukça yakın çıkmıştır (Şekil 5.29). ERS modelinin yük ile birlikte deplaman değeri de artmış olup rijit bir davranış sergilemiştir.



Şekil 5.27. EPD deney ve analiz sonuç grafiği.



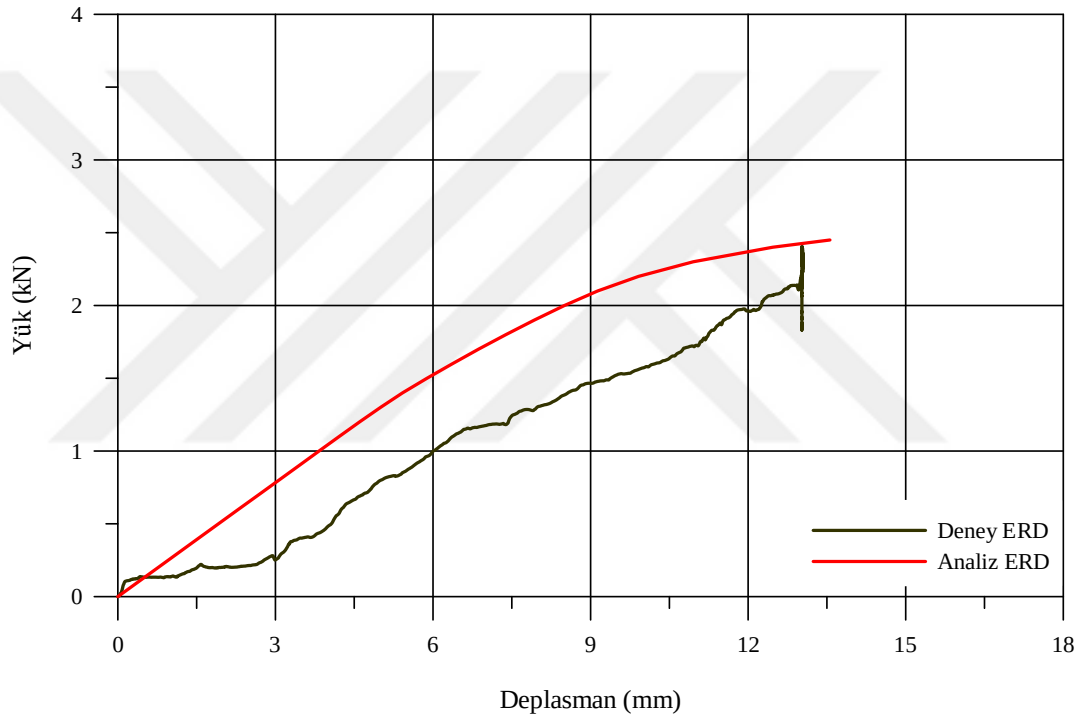
Şekil 5.28. EPSD deney ve analiz sonuç grafiği.



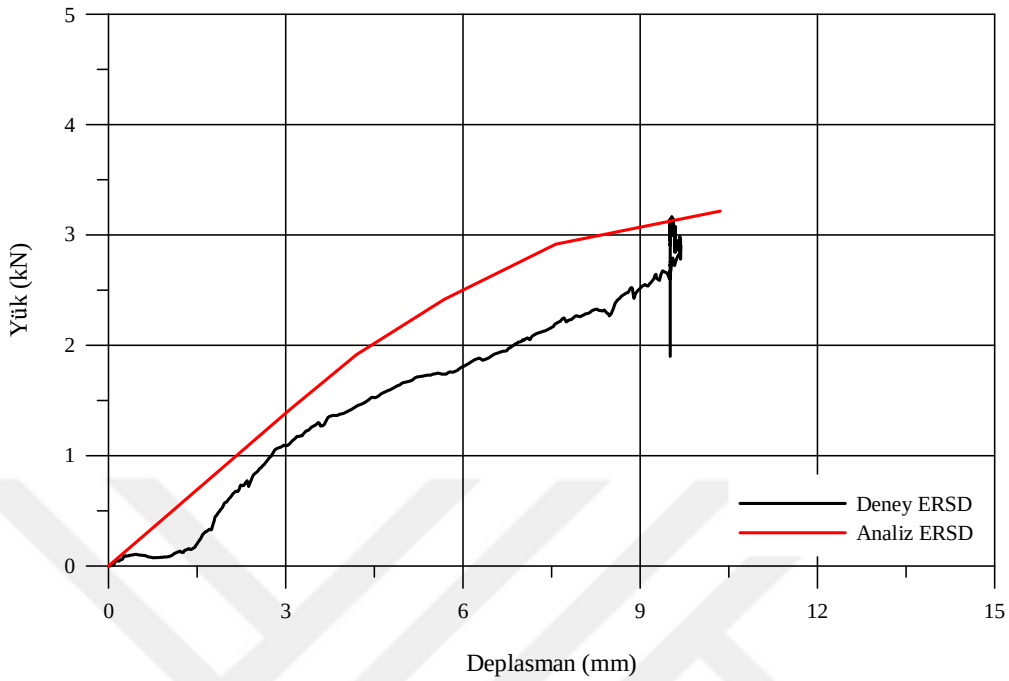
Şekil 5.29. ERS deney ve analiz sonuç grafiği.

ERD modelinde Şekil 5.30'de görüldüğü üzere maksimum yükler 2,40 kN olup grafikte maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerleri aynıdır.

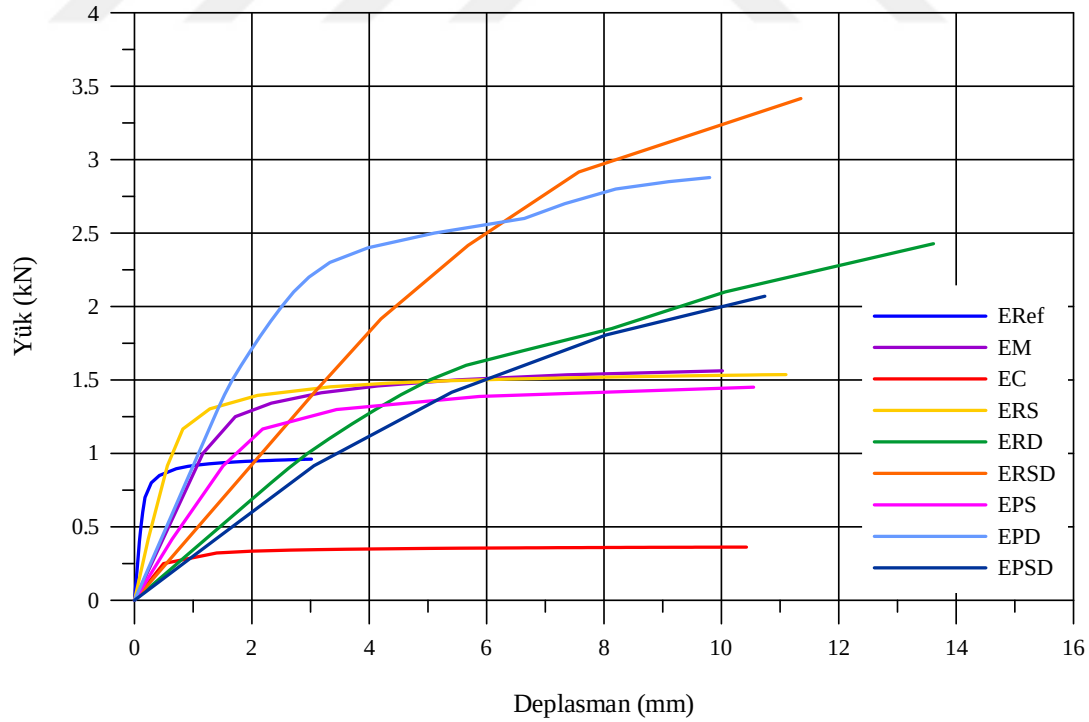
ERSD modelinin analiz ve deney grafiğinde maksimum yük 3,17 kN olup grafikler birbirine oldukça yakın çıkmıştır (Şekil 5.31). ERSD modelinin yük ile birlikte deplaman değeri de artmış olup maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerleri de aynıdır. Şekil 5.32'de yapılan analiz modellerinin yük deplasman grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.30. ERD deney ve analiz sonuç grafiği.



Şekil 5.31. ERSD deney ve analiz sonuç grafiği.



Şekil 5.32. Analiz modellerinin yük - deplasman grafikleri.

ERef numunesindeki çatlaklar kubbenin köşelerinde radyal şeklinde olup kubbenin çekme ve basınç bölgelerinde meydana gelmiştir. EC numunesinde ise çatlaklar genellikle dikiş uygulamasının sağında ve solunda radyal çatlaklar şeklinde oluşmuş olup çekme ve basınç bölgelerine kadar ilerlemiştir. EM numunesindeki deformasyon çatlakları meridyen şeklinde olup kubbenin çekme ve yoğun olarak da basınç bölgesinde görülmüştür. EPS numunesindeki çatlakların kubbenin etek hizasının altına kadar ilerlediği görülmüştür. Bu çatlaklar beden duvarının üstünde ve kubbe köşelerinde meydana gelmiş olup çatlaklar sadece çekme bölgesinde oluşmuştur. EPD numunesindeki deformasyon çatlakları beden duvarı üstünde, etek hizasında ve etek köşelerinde oluşmuş olup çatlaklar çekme bölgesinde meydana gelmiştir. EPSD numunesindeki hasarlar beden duvarının üstünde, kasnak köşelerinde ve etek hizasında gerçekleşmiş olup çatlaklar sadece çekme bölgesinde oluşmuştur. ERS numunesinde ise en çok çatlak etek hizasının alt kısmında görülmüştür. Kubbede oluşan en yaygın çatlaklar beden duvarının üstünde ve kubbe köşelerinde meydana gelmiş olup çekme bölgesinde çatlaklar gözlenmiştir. ERD numunesinde en fazla hasar etek hizasının hemen üst kısmında görülmüştür. Bu hasarlar beden duvarının üstünde ve kasnak köşelerinde oluşmuş olup hasarlar çekme bölgesinde meydana gelmiştir. ERSD numunesinde ise meydana gelen çatlaklar kasnaktaki çekme çemberinin altında görülmüştür. Bu çatlaklar beden duvarının üstünde ve kasnak köşelerinde meydana gelmiştir ve çatlaklar sadece çekme bölgesinde görülmüştür.

Deneysel çalışmaların sonuç ve önerileri,

- Horasan harcı (ERef) ve tamir harcı (EM) kullanılarak yapılan deneyleri karşılaştırdığımızda tamir harcının kısa sürede çok daha yüksek dayanım sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak 2 mm genişliğinden küçük çatlaklarda tamir harcının kullanılması tavsiye edilmektedir. Tamir harcının yapısındaki homojen olarak dağılan inorganik mineral lifler sayesinde harçta çatlaklar oluşmamaktadır. Tamir harcı geleneksel harçlar ile aynı mekanizmada çalışarak uygulandığı yüzey üzerinde sürekliliği devam ettirerek yapının birlikte çalışmasını sağlamaktadır. Ayrıca tamir harcının çimento içermemesi nedeniyle tarihi yapının orijinalliğini bozmamaktadır.

- Horasan harcı (ERef) ile dikiş yöntemi (EC) deneyleri karşılaştırıldığında; ERef numunesinin EC numunesine göre yaklaşık 2,6 kat daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Bunun sebebi dikiş yöntemi uygulanmasında çelik kenetlerin taşlara girebilmesi için delikler açılmasından kaynaklanmaktadır. Böylece dikiş uygulaması taşa zarar vererek taşın dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca bu uygulamada taşlara delik açılırken, yapılan darbeler sonucunda taşın çevresindeki harçlarda çatlaklar ve dökülmeler meydana gelmektedir. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre kubbede dikiş yöntemi uygulamasının yapılması önerilmemektedir.
- FRP kasnak (EPD) numunesi, FRP etek ve kasnak (EPSD) numunesine göre ve EPSD numunesi de FRP etek (EPS) numunesine göre 1,4 kat daha fazla yük taşımıştır. Kubbedeki FRP uygulamaları kıyaslandığında en etkili FRP uygulamasının kubbenin kasnak bölgesinde yapıldığı görülmüştür. Buna göre; FRP uygulamalarının kubbenin dairesel bölgesine oranla köşeli bölgelerde daha etkili olup sistemin yük taşıma kapasitesini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca FRP'nin köşeli bölgelerde uygulanması dairesel bölgelere göre daha rahat ve kolay yapılmaktadır.
- Çekme çemberi etek ve kasnak (ERSD) numunesi çekme çemberi kasnak (ERD) numunesine oranla 1,3 kat fazla yük taşırken, ERD numunesi çekme çemberi etek (ERS) numunesine oranla 1,5 kat fazla yük taşımıştır. ERSD numunesi, ERS numunesinden yaklaşık % 105 ve EC numunesinden % 781 fazla yük taşımıştır. Kubbede yapılan çelik uygulamalarda en iyi sonucu etek ve kasnak bölgesine yapılan çekme çemberi uygulaması vermiştir. Sonuç olarak yapılan çekme çemberi uygulamalarında kubbenin köşeli bölgesine oranla dairesel bölgesinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş olup yük taşıma kapasitesini arttırmıştır.
- Etek bölgesinde yapılan güçlendirme uygulamalarında yükler birbirine oldukça yakın çıkmıştır. ERS numunesi EPS numunesine göre %5 daha fazla yük taşımıştır. Bu durum kubbenin etek bölgesinde yapılan onarım ve güçlendirme uygulamalarında çelik uygulamasının daha etkili olduğunu göstermektedir.
- Kasnak bölgesinde yapılan onarım ve güçlendirme uygulamalarında EPD numunesi ERD numunesine göre % 19 fazla yük taşımıştır. Bu sonuca göre

kubbenin kasnak bölgesinde yapılan güçlendirme uygulamalarında FRP uygulamasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

- Etek ve kasnak bölgesinde yapılan güçlendirme uygulamaları incelendiğinde ERSD numunesinin EPSD numunesine göre % 54 fazla yük taşıdığı görülmüştür. Böylece kubbenin etek ve kasnak bölgesinde yapılan onarım ve güçlendirme uygulamalarında çelik uygulamasının daha etkili sonuçlar doğurduğu görülmektedir.
- Horasan harcı (ERef), tamir harcı (EM) ve dikiş uygulaması (EC) numunelerindeki deformasyon şekilleri birbirine benzemektedir. Kubbelerde meydana gelen çatlaklar radyal şeklinde olup kubbelerin çekme ve basınç bölgelerinde meydana gelmişlerdir.
- FRP uygulaması yapılan kubbelerde deformasyonlar sadece çekme bölgesinde oluşmuştur. FRP uygulanan numunelerde çatlaklar etek bölgesinde, beden duvarının üstünde ve kubbe köşelerinde meydana gelmiş olup çatlak genişlikleri deney numunelerine göre değişiklik göstermiştir. EPSD numunesi en az hasar meydana gelirken, en çok hasarı EPS numunesi almıştır. EPSD numunesi kubbeyi etek ve kasnak bölgelerinden sararak kubbenin açılmasına engel olmuştur.
- Çekme çemberi uygulaması yapılan kubbelerde deformasyonlar çekme bölgesinde meydana gelmiş olup çatlaklar genellikle beden duvarının üstünde ve kasnak köşelerinde görülmüştür. Çekme çemberi numunelerinde beden duvarları üstünde oluşan çatlakların genişlikleri değişiklik göstermiştir. ERSD numunesi en az hasarı alırken en çok hasarı ERS numunesinde meydana gelmiştir. ERSD numunesi kubbenin etek ve kasnak bölgelerinden kuşatarak kubbenin açılmasına engellemiştir.
- Etek bölgesi deformasyonlarını incelediğimizde EPS numunesinin köşesindeki çatlaklar, ERS numunesine göre daha geniş ve derin oluşmuştur. Bunun yanında ERS numunesinde meydana gelen, beden duvar üstündeki çatlaklar ve bu çatlakların genişlikleri EPS numunesinden çok daha fazladır. Etek bölgesinde yapılan deney sonuçlarına göre ERS numunesinin, EPS numunesine göre çatlakları biraz daha fazla önlediği gözlenmiştir.

- Kasnak bölgesindeki deformasyonlarda, EPD numunesinin etek köşesinde oluşan çatlakların ERD numunesine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte ERD numunesinde beden duvarı üstünde oluşan çatlakların genişliği EPD numunesinden daha fazladır. Böylece ERD numunesinde çatlakların kubbenin üst kısma ilerlemesi, EPD numunesine göre daha çok engellediği görülmüştür.
- Etek ve kasnak bölgesindeki deformasyonları incelediğimizde ise EPSD numunesinin etek hizası ve etek köşelerinde çatlaklar gözlemlenirken ERSD numunesinde çatlaklar oluşumu görülmemiştir. Sonuçta etek ve kasnak bölgesinde ERSD numunesi, EPSD numunesinden daha etkili olduğu gözlenmiştir.

Deneysel ve sonlu elemanlar modellerinin sonuç ve önerileri,

- Deney ve analiz modellerinde yük ile birlikte deplasman değeri de artmış olup maksimum yük altındaki deplasman değerleri de aynıdır.
- Deney ve analiz modellerinin grafikleri birbiri ile örtüşmektedir.

Yapılan tez çalışması sonucunda daha sonraki çalışmalar için önerilen tavsiyeler,

- Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların analitik çalışması yapılabilir.
- Onarım ve güçlendirme için kullanılan çelik ve lif takviyeli polimer (FRP) malzemelerinin boyutları değiştirilerek kubbede kullanılan onarım ve güçlendirme malzemelerinin boyut etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

Akbulut, D.E., Gökyiğit Arpacı, E.Y., Oktay, D. ve Yüzer, N., 2018. Tarihi yığma yapıların onarımında kullanılan enjeksiyon yönteminin ve kireç esaslı enjeksiyon malzemesinin zaman içerisinde gelişimi, Megaron Dergisi, 13, 1, 156-168.

Akdeniz, Ö., 2011. Tarihi yapıların lineer olmayan dinamik analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Aköz, A.H., 2008. Deprem etkisi altındaki tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aköz, A.H., 2008. Akan, A. ve Özen, Ö., 2005. Bursa yeşil türbenin sonlu elemanlar yöntemi ile deprem analizi, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, Bildiriler Kitabı, 758-762.

Aktuğ Kolay, İ., 1999. Batı anadolu 14. yüzyıl beylikler mimarisinde yapım teknikleri, Atatürk Kültür Merkezi Yayınevi, İstanbul.

Alemdaroğlu Orulkaya, H., 2019. Mevcut yığma yapıların deprem yüklerine karşı güçlendirilmesinde püskürtme beton kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Altın, M., 2010. Pantheon'dan günümüze kubbelerin gelişimi, Yalın yayıncılık, İstanbul.

Anagnostopoulou, M., Bruneau, M. ve Gavin, H.P., 2010. Performance of churches during the darfield earthquake of September 4, 2010, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 43, 4, 374-381.

Anzani, A., Binda, L., Carpinteri, A., Invernizzi, S. ve Lacidogna, G., 2010. A multilevel approach for the damage assessment of historic masonry towers, Journal of Cultural Heritage, 11, 4, 459-470.

Aslanapa, O., 2016. Türk sanatı, Remzi Kitapevi, İstanbul.

Aşık, F.M., 2018. Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar için onarim ve güçlendirme teknikleri, zenburi mescidinin model analizi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Atamtürktür, S., Asce, M. ve Sevim, B., 2012. Seismic performance assessment of masonry tile domes through nonlinear finite-element analysis, Journal of Performance of Constructed Facilities, 26, 4, 410-423.

Atamtürktür, S. ve Boothby, T., 2007. The development of finite-element models and the horizontal thrust of guastavino domes, APT Bull, 38, 4, 21–29.

Atamtürktür, S., Li, T., Ramage, M., H. ve Farajpour, I., 2012. Load carrying capacity assessment of a scaled masonry dome: simulations validated with non-destructive and destructive measurements, Construction and Building Materials, 34, 418-429.

Batur, A. 1980. Osmanlı camilerinde eğrisel örtüler ve geçiş öğeleri, Doçentlik Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

BASF, 2018. Tarihi yapılası onarım ve güçlendirme rehberi, BASF Gurubu, İstanbul, 1-52.

Bayraktar, A., 2005. Tarihi yığma yapıların depreme karşı güçlendirilmesi, Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı, Ankara, Çalıştay Kitabı, 51-59.

Beckmann, P., 1995. Structural aspects of building conservation, McGraw-Hill International, UK.

Beyen, K., 2007. Structural ıdentification for post-earthquake safety analysis of the fatih mosque after the 17 august 1999 kocaeli earthquake, Journal of Engineering Structures, 30, 8, 2165-2184.

Brencich, A., Gambarotta, L. ve Ghia, A., 2014. History-based assessment of the dome of the basilica of s. maria of carignano in genoa, International Journal of Architectural Heritage, 8, 5, 690-717.

Bortolo B., 2006. Experimental and numerical analysis for the strengthening ıntervention of the bell-tower of st. sisto's church in bergamo, 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, Proceeding Book, 1381 -1388.

Carpentieri, G., Fabbrocino, F., De Piano, M., Berardi, V.P., Feo, L. ve Fraternali, F., 2016. Minimal mass design of strengthening techniques for planar and curved masonry structures, In 7th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Italy, Proceeding Book, 2210-2219.

Cavalagli, N. ve Gusella, V., 2015. Dome of the basilica of santa maria degli angeli in assisi: static and dynamic assessment, International Journal of Architectural Heritage, 9, 2, 157-175.

Ceylan, O. ve Ocakcan, T., 2013. Fatih Camii 2007-2012 restorasyonu uygulamaları, Vakıflar Restorasyon Yıllığı, 7, 44-63.

Chamaky, R.Y., 2014. Tarihi yığma yapıların deprem analizi ve uygun güçlendirme teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Chiorino, A., Roberto, R. ve Claudio, D., 2006. Monitoring and modelling strategies for the world's largest elliptical dome at vicoforte, 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, Proceeding Book, 167-1176.

Chiozzi, A., Grillanda, N., Milani, G., ve Tralli, A., 2018. An adaptive limit analysis nurbs-based program for the automatic assessment of partial failure mechanisms in masonry churches, Engineering Failure Analysis, 85, 201-220.

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.

Corbusier, L., 2010. Bir mimarlığa doğru, Yapı Kredi Yayınları, İstanbul.

Croci, G., 2000. General methodology for the structural restoration of historic buildings: the cases of the Tower of Pisa and the Basilica of Assisi, Journal of Cultural Heritage, 1, 1, 7-18.

Çalık, İ., Bayraktar, A., Türker, T., Hökelekli, E. ve Ayan, A.O., 2017. Trabzon ortahisar fatih camii restorasyonuna yönelik onarım ve güçlendirme çalışmaları, 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 69-78.

Çamlıbel, N., 1998. Sinan mimarlığında yapı strüktürünün analitik incelenmesi, Doçentlik Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çebi, M.Y., 2010. Bir restorasyon öyküsü pertevniyal valide sultan camii, Restorasyon Yıllığı Dergisi, 1, 67-82.

Çetinarslan, M., 2013. Hünkar mahfillerinin ortaya çıkışı, gelişimi ve osmanlı dönemi örnekleri, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 29, 61-74.

Çılı, F., 2011. Süleymaniye camii taşıyıcı sisteminin onarımı ve güçlendirme çalışmaları, Vakıf Restorasyon Yıllığı, 3, 37-48.

Çılı, F. ve Yıldız, H., 2013. Fatih camii ve ı. mahmut kütüphanesi güçlendirme çalışmaları, Vakıflar Restorasyon Yıllığı, 7, 66-84.

Dabanlı, Ö., 2016. Nur-u osmaniye camii'nin deprem performansinin belirlenmesi ve koruma önerileri, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Danieli, M., Aronchik, A. ve Bloch, J., 2014. An original method for strengthening ancient stone domes in seismic regions and solving corresponding problems of stress–strain state analysis, International Journal of Research in Engineering and Technology, 3, 10, 1-15.

Demir, C., 2012. Çok tabakalı tarihi taş yığma duvarların deprem yükleri altında davranışı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Doğangün, A., Tolay, A. ve Acar, R., 2011. Erzurum bardız camisi'ndeki hasarların incelenmesi ve yapısal restorasyon çalışmaları, Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, 7, 20-25.

Döndüren, M.S., Demiröz, A. ve Şişik, Ö. 2019. Tarihi yığma tütünsüz baba türbesinin mekaniksel davranışının incelenmesi, Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi, 17, 24-28.

Ekinci, O., 2011. Mevlana müzesinde oluşan hasar nedenlerinin araştırılması ve uygun temel güçlendirme sisteminin seçilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Eren, C., 2018. Osmanlı'da kubbe gelişimi ve osmanlı mimarisinde görülen kubbe içi süslemenin plastik değerler açısından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Giresun.

Eriş, İ., Yüzeroğlu, U. ve Demir, N., 2013. Atik valide sultan külliyesi 2011-2013 yılları restorasyonu ve uygulamaları, Vakıf Restorasyon Yıllığı, 6, 100-114.

Ersen, A., Olgun, N., Akbulut, S.S. ve Yıldırım, B.Ş., 2011. Süleymaniye Camii 2007-2010 yılları restorasyonu ve restorasyon kararları, Vakıf Restorasyon Yıllığı, 3, 8-27.

Fahjan, Y. ve Keypour, H., 2006. Effects of dome system on the seismic behaviour of ottomans historical structures, 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, Proceeding Book, 1-8.

Gedik Y.H., 2008. Tarihi yığma yapıların modellenmesi, analizi ve güçlendirilmesi: mehmet ağa camii örneği, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gürsoy, Ş., Yılmaz, A. ve Cengiz, B., 2018. Köprülü Mehmet paşa caminin bakım, onarım, güçlendirme ve restorasyon çalışmalarının irdelenmesi. Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 6, 8-15.

Güzel, C.N., 2019. Urla helvacılar camindeki hasarin temel sebebinin yapisal model bazlı araştırılması ve güçlendirme önerisi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir.

Hamdy, G., Kamal, O., Al-Hariri, O. ve El-Salakawy, T., 2018. Plane and vaulted masonry elements strengthened by different techniques–testing, numerical modeling and nonlinear analysis, Journal of Building Engineering, 15, 203-217.

Hasol, D., 1998. Ansiklopedik mimarlık sözlüğü, Yapı-Endüstri Merkezi Yayınları, İstanbul.

Hökelekli, E., 2015. Manisa hafsa sultan camii deprem davranışının operasyonel modal analiz yöntemiyle incelenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.

Işık, N. ve Halifeoğlu, F.M., 2019. Tarihi diyarbakır camilerinde tespit edilen taşıyıcı sistem hasarları ile güçlendirme önerileri, Anadolu I. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi, Bildiriler Kitabı, 359-376.

İlbasan, Ş., 2019. Güçlendirilmiş yığma yapının performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kaderli, L., 2014. Kültürel miras koruma yaklaşımlarının tarihsel gelişimi, TÜBA-KED, 12, 29-41.

Kara, H.G., 2009, Tarihi yığma yapıların taşıyıcı sistemleri, güvenliğinin incelenmesi, onarımı ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Karakus, F., 2019. Investigation of the repairing and strengthening methods in historical structures, International Journal of Scientific and Technological Research, 5, 5, 90-107.

Kırlangıç, A.S., 2008. Re-evaluation of earthquake performance and strengthening alternatives of hagia sophia, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Koseoglu, G.C., ve Canbay, E., 2015. Assessment and rehabilitation of the damaged historic cenabı ahmet pasha mosque, Engineering Failure Analysis, 57, 389-398.

Krstevska, L., Tashkov, L., Gramatikov, K., Landolfo, R., Mammana, O., Portioli, F. ve Mazzolani, F., 2010. Large-scale experimental investigation on mustafa pasha mosque, Journal of Earthquake Engineering, 14, 6, 842-873.

Kula Say, S., 2007. Erken dönem osmanli hamamlarinda eğrisel örtüye geçiş sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Küçük, C., 2010. Filibe cuma camii'nin yapısal restorasyonu, Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, 5, 40-47.

Lau, W.W., 2006. Equilibrium analysis of masonry domes, Post Graduate Thesis, Massachusetts Institute of Technology, İnstitute of Science, Massachusetts.

Li, T. ve Atamturktur, S., 2013. Fidelity and robustness of detailed micromodeling, simplified micromodeling, and macromodeling techniques for a masonry dome, Journal of Performance of Constructed Facilities, 28, 3, 480-490.

LUSAS, 2013. Finite element analysis software products. United Kingdom: finite element system, FEA Ltd.

Mahrebel, H.A., 2006.Tarihi yapılarda taşıyıcı sistem özellikleri, hasarlar, onarım ve güçlendirme teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Martynenko, A., 2017. Vernacular values in architectural heritage, the case of vale de poldros, Architecture and Urban Planning, 13, 1, 15-23.

Milani, G., Simoni, M. ve Tralli, A., 2014. Advanced numerical models for the analysis of masonry cross vaults: A case-study in Italy, Engineering Structures, 76, 339-358.

Milani, G. ve Valente, M., 2015. Failure analysis of seven masonry churches severely damaged during the 2012 Emilia-Romagna (Italy) earthquake: Non-linear dynamic analyses vs conventional static approaches, Engineering Failure Analysis, 54, 13-56.

Mustafaraj, E. ve Yardım, Y., 2013. Repair and strengthening of historical structures: Naziresha's Mosque in Elbasan, In 3rd Annual International Conference on Civil Engineering, 10-13.

Mustafaraj, E. ve Yardım, Y., 2013. Strengthening and restoration of historical structures-mirahor ılyas beg mosque in korça, International Conference on Architecture and Urban Design,Albania, Proceeding Book, 289-298.

Mülayim, S., 2002. Kubbe, Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi, 26, 300-303.

Ocakcan, T.K., 2013. Sultan I. Mahmut Kütüphanesi 2007-2012, Restorasyonu Vakıflar Restorasyon Yıllığı, 7, 128-143.

Okçuoğlu, T., 1995. Anadolu selçuklu mescitlerinde kubbeye geçiş alanının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Oliveira, D.V., Lourenço, P.B., Garbin, E., Valluzzi, M,.R. ve Modena, C., 2006. Experimental investigation on the structural behaviour and strengthening of three-leaf stone masonry walls, Structural Analysis of Historical Constructions, 1, 2, 817-826.

Ottoni, F., 2015. Dome strengthening by encircling ties: a monitored experiment, International Journal of Architectural Heritage, 9, 1, 82-95.

Ottoni, F. ve Blasi, C., 2016. Hooping as an ancient remedy for conservation of large masonry domes. International Journal of Architectural Heritage, 10, 164-181.

Öztaş, V., 2009. Yığma yapıların güçlendirilmesi ve bir yığma yapı örneğinde güçlendirme analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Pehlivan, N.Ç., 2019. CFRP ile güçlendirilmiş yığma kubbelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

Pesciullesi, C., Rapallini, M., Tralli, A. ve Cianchi, A., 1997. Optimal spherical masonry domes of uniform strength, Journal of Structural Engineering, 123, 2.

Rossi, M., Barentin, C.C., Van Mele, T., ve Block, P., 2017. Experimental study on the behaviour of masonry pavilion vaults on spreading supports, In Structures, 11, 110-120.

Rossi, M., Calderini, C. ve Lagomarsino, S., 2016. Experimental testing of the seismic in-plane displacement capacity of masonry cross vaults through a scale model, Bulletin of Earthquake Engineering, 14, 1, 261-281.

Rossi, M., Calderini, C., Lagomarsino, S. ve Milani, G., 2014. Seismic response of masonry vaulted structures: experimental and numerical modelling, In 9th International Masonry Conference IMC9, 1-12.

Rossi, M., Calvo Barentin, C., Van Mele, T. ve Block, P., 2017. Collapse analysis of unreinforced masonry vaults using 3d-printed scale-model testing, 7th International Conference on Progresses Made in Experimental Structural Engineering, İtaly, Proceeding Book, 355-373.

Roth, L.M., 2000. Mimarlığın öyküsü: öğeleri, tarihi ve anlamı, Kabalacı Yayınevi, İstanbul.

Russo, V., 2006. Static history and structural assessment of masonry domes: the treasure of st. gennaro's chapel in naples, 7 th. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, Proceeding Book, 1471-1478.

Sav, M. ve Kuşüzümü, K.H., 2010. Restorasyon Çalışmaları Çerçevesinde Mihrimah Sultan Camii.

Sallıo, N., 2005. Mevcut yığma yapıların deprem bakımından incelenmesi ve güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Sesigür, H. ve Çılı, F., 2014. Edirnekapı mihrimah sultan camisinde yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları, Restorasyon Yıllığı Dergisi, 9, 73-79.

Sözen, Ş., Çavuş, M. ve Öztoprak, B., 2018. Tokat garipler camisinin sismik davranışının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmesi, Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 7, 27-37.

Şeker, B.Ş., 2011. Mimar sinan camilerinin statik ve dinamik yükler etkisinde davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Şimşek, H., 2010. Erken osmanlı mimarisinde kubbeye geçiş sistemlerinden üçgenler kuşağı, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Van.

Şişik, Ö., 2017, Edirne'de bulunan 15.yy ve 16.yy'da inşaa edilmiş tarihi cami ve türbelerin taşıyıcı sistem analizi ve çözüm önerileri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Tuncer, O.C., 1980. Anadolu selçuklu yapılarında açıklıkların örtülmesi ve sorunları, Hacettepe Üniversitesi Sosyal ve İdari Bilimler Fakültesi, Beşeri Bilimler Dergisi, Özel Sayı, Ankara.

Turan, Ş.N., 2018. Türk mimarisinde kullanılan kubbeye geçiş elemanları; 13.yy. anadolu selçuklu dönemi konya mahalle mescitleri örneği, Yüksek Lisans Tezi, NEÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Türkekul H., 2019. Yarım kubbeli tarihi medreselerin dinamik davranışlarının incelenmesi: tokat yağıbasan (çukur) medrese örneği, Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

Uçak, Ş., 2012. Tarihi yığma kubbelerin dinamik davranışlarının operasyonal modal analiz yöntemiyle belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Uslu, S., 2013. Tarihi yığma yapılarda kullanılan metal bağlantı elemanlarının deneysel metotlarla incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

Valente, M., Barbieri, G. ve Biolzi, L., 2017. Seismic assessment of two masonry baroque churches damaged by the 2012 emilia earthquake. Engineering Failure Analysis, 79, 773-802.

Yavuzer, M.N., 2016. Zal mahmut paşa camii yapısal davranışı ve geçmiş hasarların incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yazgan, İ.O. ve Ünay, A.İ., 2019. Bursa, yenişehir sinan paşa külliyesi imaretinin sayısal modellenmesi ve yapısal analizi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8, 1193-1203.

Yılmaz, İ., 2012. Osmanlı dönemi mimarlık eserleri restorasyon inşaat maliyetlerinin Yapay zeka yöntemleriyle tahmini, Doktora Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Zakar, L., 2013. Restorasyon uygulamalarında kullanılan çağdaş teknikler, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Zessin, J.F., 2012. Collapse analysis of unreinforced masonry domes and curving walls, Post Graduate Thesis, Massachusetts Institute of Technology, İnstitute Of Science, Massachusetts.

URL-1 < http://informadik.blogspot.com/p/ayasofya.html>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-2 < https://en.wikipedia.org/wiki/Pantheon,_Rome>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-3 < https://islamansiklopedisi.org.tr/ayasofya>, 15.02.2020.

URL-4 < https://en.wikipedia.org/wiki/Florence_Cathedral> Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-5 < https://en.wikipedia.org/wiki/St_Paul%27s_Cathedral> Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-6 < http://www.selcuklumirasi.com/architecture-detail/sultan-sencer-turbesi>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-7 < http://www.selcuklumirasi.com/architecture-detail/isfahan-cuma-camii>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-8 < http://www.mustafacambaz.com/details.php?image_id=4364>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-9 < https://tr.wikipedia.org/wiki/Üç_Şerefeli_Cami > Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-10 < https://tr.wikipedia.org/wiki/Selimiye_Camii>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-11 < https://tr.wikipedia.org/wiki/Nuruosmaniye_Camii>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-12 < http://www.mustafacambaz.com/details.php?image_id=33059>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-13 < https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Kostroma_resurrection.jpg>, Erişim tarihi: 07.02.2020.

URL-14 < https://en.wikipedia.org/wiki/Ivan_the_Great_Bell_Tower>, Erişim tarihi: 07.02.2020.

URL-15 < https://en.wikipedia.org/wiki/St_Andrew%27s_Church,_Kiev>, Erişim tarihi: 07.02.2020.

URL-16 < https://tr.wikipedia.org/wiki/Tac_Mahal 10.02.2020>, Erişim tarihi: 07.02.2020.

URL-17 < https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Putrajaya_mosque_at_dusk.jpg>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-18 < https://www.tarihlisanat.com/ilk-kubbeli-yapi-kubbetus-sahra> Erişim tarihi: 30.01.2020.

URL-19 < https://id.wikipedia.org/wiki/Masjid_Nasional_Abuja>, Erişim tarihi: 12.02.2020.

URL-20 < https://www.ensonhaber.com/galeri/617-dunyanin-en-guzel-50-camisi>, Erişim tarihi: 12.02.2020.

URL-21 < https://www.sahapedia.org/the-qutb-complex-and-the-arcuate-system-of-construction-india>, Erişim tarihi: 30.01.2020.

URL-22 < https://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/projects/stadium/004.html> Erişim tarihi: 12.02.2020.

URL-23 < https://en.wikipedia.org/wiki/Aldar_Headquarters_building >, Erişim tarihi: 12.02.2020.

URL-24. < https://architecturelive.in/cybertecture-the-new-hybrid-in-architecture/>, Erişim tarihi: 12.02.2020.

URL-25 < https://hdc.com.mv/photo-gallery/4403>, Erişim tarihi: 12.02.2020.

URL-26 < https://epito.bme.hu/sites/default/files/page/SimonBagi_Oval_2016>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-27 < https://structurae.net/en/photos/285849-burgos-cathedral>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-28 < https://en.wikipedia.org/wiki/Seville_Cathedral>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-30 < https://tr.wikipedia.org/wiki/Reichstag>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-31 < https://www.turktoyu.com/turk-hukumdar-tarafindan-yaptirilan-petersburg-camisi>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-32 < https://www.anugerahkubah.com/masjid-agung-al-mujahidin-selong-lombok-timur/>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-33 < https://en.wikipedia.org/wiki/St._Peter%27s_Basilica>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-34 < https://www.timeturk.com/dunyanin-en-guzel-kubbeli-camileri/fotogaleri-2924/>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

URL-35 < https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Samsun_Merkez_Camii.jpg> Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-36 < https://ast.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Superdome>, Erişim tarihi: 13.02.2020.

URL-37 < https://en.wikipedia.org/wiki/Evoluon>, Erişim tarihi: 13.02.2020.

URL-38 < https://www.lankwaifong.com/five-amazing-photos-visit-finland-elaine-li/>, Erişim tarihi: 13.02.2020.

URL-39 < https://en.wikipedia.org/wiki/Samara_Arena>, Erişim tarihi: 13.02.2020.

URL-40 < https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Mexican_operas> Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-41 < https://tr.wikipedia.org/wiki/St._Louis_County,_Missouri>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-42 < https://en.wikipedia.org/wiki/Frederik%27s_Church>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-43 < https://structurae.net/en/structures/izumo-dome>, Erişim tarihi: 15.02.2020.

URL-44 < https://onedio.com/haber/ecdadimizin-kemikleri-sizliyor-restorasyon-konusunda-cag-atladigimizin-ispati-20-mimari-facia-845260>, Erişim tarihi: 19.02.2020.

URL-45 < URL- http://www.hascometal.com/teknik-bilgiler.aspx?ID=71>, Erişim tarihi: 10.03.2020.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Tülin ÇELİK

Doğum Tarihi ve Yeri : 1984 - Pazar

E-posta adresi : tulinsandikci@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Gazi Üniversitesi Yapı Öğretmenliği-2009

Yüksek Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği-2014

Doktora : Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği-2020

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1) Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi (2011-…)