
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

TARİHİ YAPILARIN STRÜKTÜREL ANALİZİNDE FOTOGRAMETRİK MODELLEME TEKNİĞİ KULLANIMININ ARTUKLU DÖNEMİ ESERLERİNDEN MELİK MAHMUT CAMİ VE MARDİN ULU CAMİ ÖRNEKLERİ ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

İzzettin KUTLU

DOKTORA TEZİ
MİMARLIK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İzzettin KUTLU

27/10/2023

TARİHİ YAPILARIN STRÜKTÜREL ANALİZİNDE FOTOGRAMETRİK MODELLEME TEKNİĞİ KULLANIMININ ARTUKLU DÖNEMİ ESERLERİNDEN MELİK MAHMUT CAMİ VE MARDİN ULU CAMİ ÖRNEKLERİ ÜZERİNDEN DEĞERLENDİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

İzzettin KUTLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2023

ÖZET

Tarihi yapılar, genellikle karmaşık ve özgün geometrilere sahiptir. Tez çalışmasında, bu karmaşık yüzeyleri modellemeye imkan tanıyan fotogrametrik modelleme tekniğinin, tarihi yapıların strüktürel performansının belirlenmesine yönelik kullanımını tüm yönleriyle değerlendirmek amaçlanmaktadır. Strüktürel model oluşturma sürecinde, Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) etkisi altında bulunan Artuklu dönemi eserlerinden Melik Mahmut Cami ile Mardin Ulu Cami yapıları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Model oluşturma süreçleri sırasında karşılaşılabilecek sorunların önceden tespit edilebilmesi amacıyla, öncelikle basit yapı elemanları üzerinden tümevarım yöntemi şeklinde çalışılmış ve ardından büyük ölçekli yapılar modellenmiştir. Tezde fotogrametrik modellerin, dış mekan resimlerinden elde edilmesi sonucunda iç mekan verilerinin oluşturulamaması, yapının gerçek davranışının simüle edilebilmesi adına kapalı hacime sahip yapılar için klasik modelleme tekniği ile entegre bir süreci zorunlu kılmıştır. Klasik modelleme tekniği ile camilerin iç mekanında bulunan taşıyıcı elemanlar, fotogrametrik modellere entegre edilmiştir. Entegre modellere analizler gerçekleştirilmiş ve ortaya çıkan değerlere yer verilmiştir. Özellikle modal analiz sonuçlarındaki periyot değerlerinin, klasik modeller yaklaşık %95 oranında yakınlık göstermiştir. Analiz sonuçları ile birlikte, farklı modelleme tekniklerinin hangi durumlarda avantaj sağlayacağı hangi durumlarda dezavantaja neden olacağına dair değerlendirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak uzun yıllardır gelişmelerin yaşandığı tarihi yapıların strüktürel davranışlarını doğru analiz etme yöntemleri açısından, araştırmacılara farklı bir modelleme yaklaşımına dair bilgiler sunulmuştur. Fotogrametrik modelleme tekniği, klasik modelleme tekniğine entegre olabilmesi ve güncel veriler sağlayabilmesi açısından günümüz teknolojisinin sağladığı önemli bir belgeleme ve modelleme yöntemi olarak değerlendirilmiştir. Tarihi yapılar gibi yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin analizinin zor olması ve yapım tekniklerinin strüktürel davranışa etkilerinin tam olarak tahmin edilememesi nedeniyle, standardize edilmiş bir strüktürel model sürecinin yönetilmesi mümkün olmamaktadır. Dolayısıyla sürece hızlı veri sağlayabilecek yöntemler ve teknikler geliştirmek önem arz etmektedir. Anadolu coğrafyasında birçok tarihi yapı doğal afetler, vandalizm, zamana bağlı bozulmalar gibi etkiler nedeniyle tehlikededir. Bu açıdan teknolojinin sunduğu imkanlar dahilinde belgelenmeleri ve korunmalarına yönelik stratejilerin geliştirilmesi, mimarlık ve mühendislik etiği açısından mesleki bir sorumluluktur.

Bilim Kodu	:	80115
Anahtar Kelimeler	:	Fotogrametrik model, sonlu elemanlar modeli, strüktürel analiz, yapısal davranış, Artuklu mimarisi
Sayfa Adedi	:	309
Danışman	:	Doç. Dr. Asena SOYLUK

EVALUATION OF THE USE OF PHOTOGRAMMETRIC MODELLING TECHNIQUE IN STRUCTURAL ANALYSIS OF HISTORICAL BUILDINGS ON THE EXAMPLES OF MELIK MAHMUT MOSQUE AND MARDIN GREAT MOSQUE OF ARTUQID PERIOD

(PhD. Thesis)

İzzettin KUTLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2023

ABSTRACT

Historical buildings generally have complex and unique geometries. This thesis aims to evaluate the use of photogrammetric modelling technique for the determination of the structural performance of historical buildings in all aspects. In the structural modelling process, Melik Mahmut Mosque and Mardin Ulu Mosque, two Artuqid buildings under the influence of the Eastern Anatolian Fault System (EAFS), were considered in detail. In order to identify the problems that can occur during the modelling process, firstly simple structural elements were analysed by inductive method and secondly large-scale structures were modelled. In the thesis, photogrammetric models were obtained from exterior images and therefore no interior data were generated. This situation necessitated an integrated process with the classical modelling technique in enclosed structures for simulating the real behaviour of the building. Using the classical modelling technique, the structural elements in the interior of the mosques were integrated into the photogrammetric models. Analyses were performed on the integrated models and the resulting values were presented. Especially, the period values in the modal analysis results showed approximately 95% similarity with the classical models. With the results of the analysis, it was determined and evaluated in which cases different modelling techniques would provide advantages and in which cases would cause disadvantages. As a result, information on a different modelling approach has been presented to the researchers in terms of the methods of accurately analysing the structural behaviour of historical buildings. Photogrammetric modelling technique has been evaluated as an important documentation and modelling method enabled by today's technology, not only determining the structural behaviour of historical buildings, but also integrated into classical modelling techniques and provide current data. Because of the difficulty in identifying the physical, chemical and mechanical properties of historical building materials and the inability to predict the effects of construction techniques on structural behaviour, a standardised structural modelling process cannot be managed. Therefore, it is crucial to develop methods and techniques that can provide fast data to the process. Many historical buildings in Anatolia are under threat due to natural disasters, vandalism and time-related deterioration. In this regard, it is a professional responsibility in terms of architectural and engineering ethics to develop strategies for their documentation and preservation within the possibilities offered by technology.

Science Code	:	80115
Key Words	:	Photogrammetry, finite element model, structural analysis, structural behavior, Artuqid architecture
Page Number	:	309
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Asena SOYLUK

TEŞEKKÜR

Enstitüye ilk kayıt tarihim olan 2019'dan bu yana desteğini her zaman hissettiğim ve değerli katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Doç. Dr. Asena SOYLUK'a çok teşekkür ederim. Bu süreçte özellikle sizinle hızlı bir iletişime sahip olmak benim için çok kıymetliydi. İyi ki sizinle çalışma fırsatı yakaladım. Tez izleme komitesinde yer alan fakat bir komite üyesinden çok daha büyük destekleri bulunan, yol gösteren, mesleki olarak kendilerini örnek aldığım değerli hocalarım Prof. Dr. Ali İhsan ÜNAY ve Prof. Dr. Aslı ER AKAN'a katkılarından dolayı minnettarım. Bununla birlikte savunma jürisinde yer alan ve değerli görüşleriyle katkı sağlayan Doç. Dr. Saadet TOKER-BEESON ve Doç. Dr. Esra ÖZKAN YAZGAN'a da teşekkürlerimi arz ederim. Ayrıca, süreç içerisindeki her an ve koşulsuz desteklerinden dolayı Doç. Dr. Zeynep Yeşim İLERİSOY'a da çok teşekkür ederim.

Çalışma sürecimde katkılarını esirgemeyen pek çok insan oldu. Aslında bu tez, tek yazarı ben olduğum bir eser değil; beni destekleyen birçok insanın ortak eseridir. Süreçte zorluklar ile karşılaştığım her an neşesiyle, enerjisiyle ve gösterdiği değer ile zorlukları unutturan ve birlikte yol alarak birçok şeyin üstesinden geldiğimiz Arş. Gör. Deryanur ŞİMŞEK'e yoğun teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım. Ekim 2021, araştırma görevlisi kadrosunu iyi ki sen hak ederek kazandın! Beraberinde 2019'da başladığım Mardin serüveninde, öğrencim olarak tanıştığım fakat şuan arkadaşlığından olağanüstü keyif aldığım Büşra ŞIK ve taze mezunumuz Muhammed KARAASLAN'a, emekleri için teşekkür ederim.

Mardin ve Ankara arasında yaklaşık 7 yıllık gidiş-gelişlerimi güzelleştiren ve bana kapılarını açan çok kıymetli canım diş hekimi arkadaşlarım Hasan Ali ÖZTAŞ, Kadir KAYMAZ ve Mehmet Akif AKBIYIK'a şükranlarımı sunarım. Gazi Üniversitesini keyifli hale getiren yüksek lisans döneminden başlayan arkadaşlığımızın sonsuz olmasını dilediğim Arş. Gör. Ayşegül SONDAŞ ve Arş. Gör. Saliha ERDURMUŞ'a her şey ama her şey için çok teşekkür ederim. Artık arkadaşlığımızın bir ekip oluşturduğu Arş. Gör. İrem BEKAR ve Arş. Gör. Ruşen ERGÜN'e destekleri için teşekkürler. Daha çok çalışacağız!

Tez sürecindeki zorlu zamanlarda program ve mühendislik bilgisi desteği ile Dr. Öğr. Üyesi Saeid ZARDARİ, desteğini her zaman yanımda hissettiğim Öğr. Gör. Mehmet PINAR ve arkadaştan öte canım Dr. Öğr. Üyesi Aslan NAYEB'e içtenlikle çok teşekkür ederim.

Son olarak, annem Sultan KUTLU ve ablam Peyrüze KUTLU ALTUN'a ayrı parantez açarak tüm aileme ve yeğenlerime ne kadar teşekkür etsem az. Canım ailem, bir sayfanın yetemeyeceği kadar büyük bir teşekkürü hak ediyorsunuz. Hepiniz iyi ki varsınız.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xvii

RESİMLERİN LİSTESİ xxvi

HARİTALARIN LİSTESİ xxviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xxix

1. GİRİŞ 1

2. ARTUKLU DÖNEMİ MİMARLIĞI 41

2.1. Doğu Anadolu Fay Hattının Günümüz Durumunun İncelenmesi 44

2.2. Artuklu Dönemi Yapıları 49

2.3. Artuklu Dönemi Camilerinde Mekânsal Gelişim ve Strüktürel Özellikler 54

2.4. Mardin Melik Mahmut Cami 56

2.4.1. Mekansal kurgu ve cephe özellikleri 57

2.4.2. Malzeme özellikleri 61

2.4.3. Yapım tekniği ve taşıyıcı sistem özellikleri 62

2.5. Mardin Ulu Cami 66

2.5.1. Mekansal kurgu ve cephe özellikleri 68

2.5.2. Malzeme özellikleri 73

2.5.3. Yapım tekniği ve taşıyıcı sistem özellikleri 74

Sayfa

3. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN STRÜKTÜREL ANALİZİ VE FOTOGRAMETRİK MODELLEME 81

3.1. Tarihi Yığma Yapıların Strüktürel Davranışı 82

3.2. Klasik Modelleme Teknikleri 87

3.2.1. Mikro modelleme 89

3.2.2. Makro modelleme 90

3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modelleme 91

3.3. Fotogrametrik Modelleme 97

3.3.1. Fotogrametrinin sınıflandırılması 99

3.3.2. Fotoğraflama 103

3.3.3. Fotoğraf çeşitleri ve çözünürlük 105

3.3.4. Üç boyutlu nokta bulutu 110

3.4. Modellerde Gerçekleştirilebilecek Analiz Yöntemleri 114

3.4.1. Modal analiz 116

3.4.2. Statik analiz 116

3.4.3. Dinamik analiz 117

3.4.4. Eşdeğer deprem yükü yöntemiyle analiz 117

3.4.5. Mod birleştirme yöntemiyle analiz 118

3.4.6. Tek modlu itme yöntemleriyle analiz 118

3.4.7. Çok modlu itme yöntemleriyle analiz 118

3.4.8. Zaman tanım alanında analiz 118

3.5. Yığma Yapı Elemanlarının Mekanik Özellikleri 119

3.5.1. Basınç dayanımı 121

3.5.2. Çekme dayanımı 122

3.5.3. Kayma dayanımı 122

Sayfa

4. YÖNTEME İLİŞKİN ANALİZLER 125

4.1. Sonlu Elemanlar Modelinde Eleman Kullanımının Analizi 125

4.1.1. Birinci model (MGM-162) 127

4.1.2. İkinci model (MGM-164) 129

4.1.3. Üçüncü model (MGM-166) 130

4.1.4. Analiz sonuçları 130

4.1.5. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi 132

4.2. Sonlu Elemanlar Modelinde Eleman Boyutlarının Analizi 136

4.2.1. Analiz sonuçları 137

4.2.2. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi 138

4.3. Sonlu Elemanlar Modelinde Ağırlık Merkezi 139

4.3.1. Analiz sonuçları 142

4.3.2. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi 144

5. STRÜKTÜREL PERFORMANSIN BELİRLENMESİNDE FOTOGRAMETRİK MODELLEME TEKNİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ 147

5.1. Fotogrametrik Model Oluşturma Süreci 147

5.2. Fotogrametrik Modelin Yapısal Analiz Programına Aktarılması 152

5.2.1. Ölçeklendirme 153

5.2.2. Temizleme 154

5.2.3. Ağ kusurlarını kaldırma 154

5.2.4. Tamamlama 155

5.2.5. Yeniden ağ oluşturma 158

5.2.6. Katman ayarı 158

5.2.7. Yapısal analiz süreçlerinde ortak tanımlamalar 162

Sayfa

5.3. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Yığma Duvar Üzerinden İncelenmesi 163

5.3.1. Fotogrametrik yöntem ile yığma duvar modeli 164

5.3.2. Klasik yöntem ile yığma duvar modeli 169

5.3.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan yığma duvar modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi 173

5.4. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Tek Açıklığa Sahip L Plan Tipi Yığma Duvar Üzerinden İncelenmesi 177

5.4.1. Fotogrametrik yöntem ile L plan tipi duvar modeli 178

5.4.2. Klasik yöntem ile L plan tipi duvar modeli 183

5.4.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan L plan tipi duvar modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi 187

5.5. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Melik Mahmut Cami Güney Duvarı Üzerinden İncelenmesi 191

5.5.1. Fotogrametrik yöntem ile Melik Mahmut Cami güney duvarı modeli 193

5.5.2. Klasik yöntem ile Melik Mahmut Cami güney duvarı modeli 199

5.5.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi 201

6. FOTOGRAMETRİK VE KLASİK YÖNTEMİN ENTEGRE MODEL ÜRETİMİ 205

6.1. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Melik Mahmut Cami Üzerinden İncelenmesi 206

6.1.1. Fotogrametrik yöntem ile Melik Mahmut Cami modeli 207

6.1.2. Klasik yöntem ile Melik Mahmut Cami modeli 215

6.1.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan Melik Mahmut Cami modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi 217

6.2. Fotogrametrik Modelleme Yönteminin Mardin Ulu Cami Üzerinden İncelenmesi 225

6.2.1. Fotogrametrik yöntem ile Mardin Ulu Cami modeli 226

Sayfa

6.2.2. Klasik yöntem ile Mardin Ulu Cami sonlu elemanlar modeli 236

6.2.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan Melik Mahmut Cami sonlu eleman modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi 238

7. DEĞERLENDİRME 243

7.1. Fotogrametrik ve Klasik Modelleme Tekniği Yakınlık Değerlerinin ve Kullanım Durumlarının Değerlendirilmesi 243

7.2. Yapısal Analiz Sürecinde Çubuk, Kabuk ve Katı Eleman Kullanımının Değerlendirilmesi 253

7.3. Gerilme ve Yer Değiştirme Değerlerinin Yapısal Analiz Sürecinde Etkilerinin Değerlendirilmesi 257

7.4. Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Caminin Strüktürel Davranışlarının Değerlendirilmesi 264

8. TARTIŞMA 271

9. SONUÇ VE ÖNERİLER 281

KAYNAKLAR 289

ÖZGEÇMİŞ 305

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. DAFS hattında gerçekleşen depremler sonrası hasar gören tarihi yapı örnekleri 47

Çizelge 2.2. Artuklu dönemi yapıları ve inşa tarihleri 50

Çizelge 2.3. Artuklu dönemi camilerinin özellikleri 54

Çizelge 2.4. İncelenen yapılarda günümüz mekansal kurgu, taşıyıcı malzeme ve taşıyıcı sistem özelliklerinin karşılaştırılması 79

Çizelge 3.1. Yığma yapılarda çatlak genişliğine göre hasar derecesi 86

Çizelge 4.1. Farklı elemanlar ile oluşturulan üç model 127

Çizelge 4.2. Üç modelin yapısal analizinin sonuçlarının özeti 132

Çizelge 4.3. Melik Mahmut Cami – Kare ve üçgen ağ modelleri 137

Çizelge 4.4. Modellerin yapısal analizinin sonuçlarının özeti 138

Çizelge 4.5. Üçgen ve dörtgen ağ modellerinde oluşan gerilmelerin doğu duvarı üzerinden karşılaştırılması 139

Çizelge 4.6. Oluşturulan üç farklı model 142

Çizelge 4.7. Modellerin yapısal analizinin sonuçlarının özeti 143

Çizelge 4.8. Modellerde gerilme değerlerinin karşılaştırılması 144

Çizelge 4.9. Modeller arasında oluşan deplasman değerlerinin karşılaştırılması 145

Çizelge 5.1. Geomagic Wrap programının arayüzünde fotogrametrik model ağlarının düzenlenmesi üzere kullanılan komutların konumları, simgeleri ve açıklamaları 157

Çizelge 5.2. DXF/DWG varlıklarının içe aktarılmadan önce SAP2000 ile koordine edilmesi gereken katmanları 159

Çizelge 5.3. Tezde oluşturulan sonlu elemanlar modelleri üzerine tanımlanan malzeme özellikleri 162

Çizelge 5.4. MAÜ avlu duvarı - Fotogrametrik modelin periyot ve ötelenme değerleri 168

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.5. MAÜ avlu duvarı - Fotogrametrik modelin ilk üç moda ait mod şekilleri 169

Çizelge 5.6. GMODEL-1 periyot ve ötelenme değerleri 170

Çizelge 5.7. GMODEL-1 ilk üç moda ait mod şekilleri 171

Çizelge 5.8. GMODEL-2 periyot ve ötelenme değerleri 172

Çizelge 5.9. GMODEL-2 ilk üç moda ait mod şekilleri 172

Çizelge 5.10. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen yığma avlu duvarının modal analiz sonuçları 173

Çizelge 5.11. MAÜ avlu duvarı - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 174

Çizelge 5.12. MAÜ avlu duvarı - X düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 175

Çizelge 5.13. MAÜ avlu duvarı - Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 176

Çizelge 5.14. MAÜ avlu duvarı - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm) 177

Çizelge 5.15. L plan tipi duvar - Fotogrametrik modelin periyot ve ötelenme değerleri 183

Çizelge 5.16. L plan tipi duvar - Fotogrametrik modelin ilk üç moda ait mod şekilleri 183

Çizelge 5.17. GMODEL-3 periyot ve ötelenme değerleri 185

Çizelge 5.18. GMODEL-3 ilk üç moda ait mod şekilleri 185

Çizelge 5.19. GMODEL-4 periyot ve ötelenme değerleri 186

Çizelge 5.20. GMODEL-4 ilk üç moda ait mod şekilleri 187

Çizelge 5.21. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen L plan tipi duvarın modal analiz sonuçları 187

Çizelge 5.22. L plan tipi duvar - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 188

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.23. L plan tipi duvar - X düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 189

Çizelge 5.24. L plan tipi duvar - Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 190

Çizelge 5.25. L plan tipi duvar - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm)..... 191

Çizelge 5.26. Melik Mahmut Cami güney duvarı fotogrametrik modelinin modal analiz sonucu periyot ve ötelenme değerleri..... 198

Çizelge 5.27. Melik Mahmut Cami güney duvarı fotogrametrik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri..... 199

Çizelge 5.28. Melik Mahmut Cami güney duvarı klasik modelinin periyot ve ötelenme değerleri..... 200

Çizelge 5.29. Melik Mahmut Cami güney duvarı klasik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri..... 201

Çizelge 5.30. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen Melik Mahmut Cami güney duvarının modal analiz sonuçları 201

Çizelge 5.31. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 202

Çizelge 5.32. Melik Mahmut Cami güney duvarı - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 203

Çizelge 5.33. Melik Mahmut Cami güney duvarı - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm) 204

Çizelge 6.1. Tezde oluşturulan sonlu elemanlar modelleri üzerine tanımlanan malzeme özellikleri..... 205

Çizelge 6.2. Melik Mahmut Cami entegre modelinin modal analiz sonucu periyot ve ötelenme değerleri..... 214

Çizelge 6.3. Melik Mahmut Cami entegre modelinin ilk üç mod şekilleri..... 215

Çizelge 6.4. Melik Mahmut Cami klasik modelinin periyot ve ötelenme değerleri..... 216

Çizelge 6.5. Melik Mahmut Cami klasik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri..... 217

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.6. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen Melik Mahmut Cami'nin modal analiz sonuçları 217

Çizelge 6.7. Melik Mahmut Cami - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 218

Çizelge 6.8. Melik Mahmut Cami – Yatay yük analizleri sonucu gerilme değerleri ... 219

Çizelge 6.9. Melik Mahmut Cami - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm) 220

Çizelge 6.10. Melik Mahmut Cami - Entegre model ve klasik model oluşum sırasında yaklaşık zaman kullanımı 221

Çizelge 6.11. EMA-2 periyot ve ötelenme değerleri 222

Çizelge 6.12. EMA-2 ilk üç moda ait mod şekilleri 223

Çizelge 6.13. Melik Mahmut Cami - EMA-2 sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 223

Çizelge 6.14. Melik Mahmut Cami – EMA-2 yatay yük analizleri sonucu gerilme değerleri 224

Çizelge 6.15. Melik Mahmut Cami – EMA-2 X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm) 224

Çizelge 6.16. Mardin Ulu Cami entegre modelinin modal analiz sonucu periyot ve ötelenme değerleri..... 235

Çizelge 6.17. Mardin Ulu Cami entegre modelinin ilk üç mod şekilleri 236

Çizelge 6.18. Mardin Ulu Cami klasik modelinin periyot ve ötelenme değerleri 237

Çizelge 6.19. Mardin Ulu Cami klasik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri 238

Çizelge 6.20. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen Mardin Ulu Cami'nin modal analiz sonuçları 238

Çizelge 6.21. Mardin Ulu Cami - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri 239

Çizelge 6.22. Mardin Ulu Cami – Yatay yük analizleri sonucu gerilme değerleri..... 240

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.23. Mardin Ulu Cami - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm) 241

Çizelge 6.24. Mardin Ulu Cami - Entegre model ve klasik model oluşum sırasında yaklaşık zaman kullanımı 242

Çizelge 7.1. Analizler sonucu fotogrametrik ve klasik modelleme tekniklerinden ortaya çıkan yakınlık değerleri..... 249

Çizelge 7.2. Fotogrametrik modelin oluşma süreçlerini etkileyen değişkenlere genel değerlendirilmesi..... 251

Çizelge 7.3. Tarihi yapı gözlem çalışmalarının değerlendirilme süreci 253

Çizelge 7.4. Kargir yapılar için performans kriterleri..... 262

Çizelge 7.5. Uluslararası yönetmeliklerde yer alan kargir yapıların performans seviyeleri 263

Çizelge 7.6. Mardin kireç taşına dair yapılan çalışmalarda ortaya çıkan değerler 266

Çizelge 7.7. Maksimum yer değiştirme noktalarının göreli ötelenme oranları 269

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Tez akış diyagramı 3

Şekil 1.2. Artuklu Beyliği haritası ile etkisi altında olduğu Doğu Anadolu Fay Hattı haritasının birleştirilmesi 10

Şekil 1.3. ASRix doğrultucu yazılımında fotoğrafının dönüştürülmesi 29

Şekil 1.4. Tarihi Yarımada'nın silüet haritası 29

Şekil 1.5. ASRix doğrultucu yazılımında kolajları üretilen sokak çalışması 31

Şekil 1.6. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen ortofotolar ve cephe çizimleri 31

Şekil 1.7. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen tarihi sokağa cephe çizimleri ve üç boyutlu modeli 32

Şekil 1.8. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen üç boyutlu nokta bulutu modelleri 33

Şekil 1.9. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen cephe görüntüleri..... 33

Şekil 1.10. Sahip Ata Külliyesi fotogrametri tekniği sonucu oluşan nokta bulutu görünümleri 34

Şekil 1.11. Kaşgar'ın eski kenti Gaotai'nin belirli bir bölümünün devam eden fotogrametrik modeli ve İHA ile alınmış görüntü 35

Şekil 1.12. Leblebi Anıtı fotogrametrik modeli ve 3D yazıcıdan üretilmiş modeli 36

Şekil 1.13. Proje kapsamında gerçekleştirilen nokta bulutu çalışması 37

Şekil 1.14. Kulenin fotogrametrik modeli ve yapısal analiz görünümleri 39

Şekil 1.15. Kulenin fotogrametrik modeli, ağ düzenleme işlemi ve yapısal analiz sonucu görünümleri 40

Şekil 2.1. 1900-2023 yılları arasında DAFS'de gerçekleşen hasar yapıcı depremler ... 45

Şekil 2.2. Deprem şiddeti ve büyüklüğü 49

Şekil 2.3. Melik Mahmut Cami – Kitabelerin cami içerisindeki konumları..... 57

Şekil 2.4. Melik Mahmut Cami – Mekânsal ilişkinin tanımlandığı plan..... 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.5. Melik Mahmut Cami – Düşey taşıyıcıların tanımlandığı plan 62

Şekil 2.6. Melik Mahmut Cami – Eğri eksenli taşıyıcıların tanımlandığı plan 63

Şekil 2.7. Melik Mahmut Cami – Destek elemanlarının tanımlandığı plan 64

Şekil 2.8. Melik Mahmut Cami – Destek elemanlarının tanımlandığı plan 64

Şekil 2.9. Melik Mahmut Cami – Kubbenin dıştan çözümlenmesi 65

Şekil 2.10. Melik Mahmut Cami – Örtü elemanlarının tanımlandığı plan 66

Şekil 2.11. Mardin Ulu Cami – Kitabelerin cami içerisindeki konumları 68

Şekil 2.12. Mardin Ulu Cami restitüsyon çalışması 69

Şekil 2.13. Mardin Ulu Cami – Mekânsal ilişkinin tanımlandığı plan 71

Şekil 2.14. Mardin Ulu Cami – Düşey taşıyıcıların tanımlandığı plan..... 75

Şekil 2.15. Mardin Ulu Cami – Eğri eksenli taşıyıcıların tanımlandığı plan..... 76

Şekil 2.16. Mardin Ulu Cami – Tek geçiş elemanı olarak kullanılan tromp 76

Şekil 2.17. Mardin Ulu Cami – Destek elemanlarının tanımlandığı plan..... 77

Şekil 2.18. Mardin Ulu Cami – Dilimli kubbenin dıştan çözümlenmesi..... 78

Şekil 2.19. Mardin Ulu Cami – Örtü elemanlarının tanımlandığı plan 78

Şekil 2.20. Camilerin mihrap önü kubbe kesitlerinin karşılaştırılması – dışta Mardin Ulu Cami, içerde Melik Mahmut Cami..... 79

Şekil 3.1. Deprem kuvvetinin ve yapıların depreme karşı gösterdiği atalet kuvvetinin şematik açıklanması 84

Şekil 3.2. Deprem anında yapılar için öngörülen taşıyıcı sistem deformasyonları 87

Şekil 3.3. Örnek yığma duvar modeli 88

Şekil 3.4. Yığma duvar modelleme tekniği – Detaylı mikro model 89

Şekil 3.5. Yığma duvar modelleme tekniği – Basitleştirilmiş mikro model..... 90

Şekil 3.6. Yığma duvar modelleme tekniği – Makro model..... 91

Şekil 3.7. Bir boyutlu çubuk eleman örnekleri 93

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.8. İki boyutlu düzlem eleman örnekleri 93

Şekil 3.9. Üç boyutlu katı eleman örnekleri 94

Şekil 3.10. Sistemi temsil eden bir ağ örneği..... 94

Şekil 3.11. Çubuk elemana ait serbestlik dereceleri 96

Şekil 3.12. Kabuk elemana ait serbestlik dereceleri 97

Şekil 3.13. Üç boyutlu problemler için katı eleman 97

Şekil 3.14. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak fotogrametrinin gelişimi ve kullanılan araçlar..... 102

Şekil 3.15. Kamera sistemi ve objektiften aynaya yansıyarak vizöre giden optik yol .. 104

Şekil 3.16. Analog ve dijital resim..... 107

Şekil 3.17. Piksel sayı farkının fotoğraf çözünürlüğünde etkisi 108

Şekil 3.18. Dijital görüntülerde PPI ve DPI ayrımı 109

Şekil 3.19. Çin'in Kaşgar ilinde yer alan eski kentteki dar yollardan çekilmiş olan 2 boyutlu fotoğraflardan üretilen 3 boyutlu modelin diyagramı..... 110

Şekil 3.20. İzdüşüm yöntemleri 111

Şekil 3.21. Dijital fotogrametrik araştırmadan bir üç boyutlu yapısal modelin üretilmesi için yönetim sistemi 114

Şekil 3.22. Rijit yapılarda yanal yükler sonucu oluşabilecek hasarlar 120

Şekil 3.23. Basınç, çekme ve kesme kuvvetleri sonucunda ortaya çıkan gerilimlerin şematik gösterimi 123

Şekil 4.1. Mardin Ulu Cami kısmi modellerinin oluşturulduğu bölüm 126

Şekil 4.2. Kabuk elemanlarının merkezi eksenlerine göre düğümlere dayanan analitik modelde ortaya çıkan eksantriklik 127

Şekil 4.3. Eksantriklik probleminin üstesinden gelmek için rijit çubuk eleman kullanımı 128

Şekil 4.4. Kemer özelliklerinin kütlesini ve rijitliğini belirlemek için değişen boyutlardaki çubuk elemanlar..... 129

Şekil 4.5. Rijit bir eleman tanımına gerek duyulmayan katı eleman modeli 130

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.6. Dikey yükler nedeniyle Δz yer değiştirmelerinin tonoz eğrisi üzerindeki değişimi 133

Şekil 4.7. Global X ekseni yönündeki yatay yükler nedeniyle Δx yer değiştirmelerinin tonoz eğrisi üzerindeki değişimi 133

Şekil 4.8. Global Y ekseni yönündeki yatay yükler nedeniyle Δx yer değiştirmelerinin tonoz eğrisi üzerindeki değişimi 134

Şekil 4.9. Birinci Modelde (MGM-162) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların gerilme değişimi 134

Şekil 4.10. İkinci Modelde (MGM-164) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların gerilme değişimi 135

Şekil 4.11. Birinci Modelde (MGM-162) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların meridyen yönündeki gerilme değişimi 135

Şekil 4.12. İkinci Modelde (MGM-162) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların meridyen yönündeki gerilme değişimi 136

Şekil 4.13. Farklı geometrilerin ağırlık merkezini koordinatlarının kütle ve koordinat noktalarına göre hesaplanması 140

Şekil 4.14. Yapısal analiz programında ortaya çıkan yığma birim ağırlık merkezi farkı 141

Şekil 5.1. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programından elde edilen kamera hizalama aşamaları ve oluşan nokta bulutu örnekleri 148

Şekil 5.2. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programından elde edilen yoğun nokta bulutu örnekleri 149

Şekil 5.3. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) örnekleri 149

Şekil 5.4. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programına tanıtılan fotoğraf açılarından elde edilen dokuların modele aktarıldığı örnekler 150

Şekil 5.5. Geomagic programında gerçekleştirilebilen ağ kusurlarını giderme işlemi örneği 155

Şekil 5.6. Tamamlama seçeneklerinin kullanılabileceği bölgelerin temsili 157

Şekil 5.7. Katman ayarlarının yapılması ve örnek bir model 160

Şekil 5.8. Fotoğraf verilerinin yapısal analize aktarılma sürecinin akış şeması 161

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.9. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu 164

Şekil 5.10. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından elde edilen yoğun nokta bulutu 164

Şekil 5.11. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) 165

Şekil 5.12. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından fotoğraf açılarından elde edilen dokuların modele aktarılması 165

Şekil 5.13. MAÜ avlu duvarı - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi 166

Şekil 5.14. MAÜ avlu duvarı - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü 167

Şekil 5.15. Fotogrametrik modelleme tekniği aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan avlu duvarı modeli 168

Şekil 5.16. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan 0,6 x 0,6 m boyutunda ağlardan oluşturulan GMODEL-1 170

Şekil 5.17. 0,075 x 0,075 m boyutunda ağlardan oluşturulan GMODEL-2 171

Şekil 5.18. L plan tipi duvara ait plan ve cephe ölçüleri 178

Şekil 5.19. L plan tipi duvar - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu 179

Şekil 5.20. L plan tipi duvar - Metashape programından elde edilen yoğun nokta bulutu 179

Şekil 5.21. L plan tipi duvar - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) 179

Şekil 5.22. L plan tipi duvar - Metashape programından fotoğraf açılarından elde edilen dokuların modele aktarılması 180

Şekil 5.23. L plan tipi duvar - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi 181

Şekil 5.24. L plan tipi duvar - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası pencere etrafının model görünümü 181

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.25. Fotogrametrik modelleme tekniği aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan L plan tipine sahip duvar modeli 182

Şekil 5.26. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan 0,6 x 0,6 m boyutunda büyük ağlardan oluşturulan GMODEL-3 184

Şekil 5.27. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan 0,075 x 0,075 m boyutunda küçük ağlardan oluşturulan GMODEL-4..... 186

Şekil 5.28. Modeli oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı planı ve cephesi ... 192

Şekil 5.29. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu 193

Şekil 5.30. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından elde edilen 3D yoğun nokta bulutu..... 193

Şekil 5.31. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) 194

Şekil 5.32. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından farklı açılardan elde edilen dokuların modele aktarılması..... 194

Şekil 5.33. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi..... 195

Şekil 5.34. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" öncesi model görünümü 196

Şekil 5.35. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü 196

Şekil 5.36. Melik Mahmut Cami güney duvarı - AutoCAD programında ağ ve katman ayarlarının yapılması..... 197

Şekil 5.37. Fotogrametrik modelleme tekniği aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan Melik Mahmut Cami güney duvarı modeli 198

Şekil 5.38. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı 200

Şekil 6.1. Melik Mahmut Cami - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu..... 207

Şekil 6.2. Melik Mahmut Cami - Metashape programı ile elde edilen 3D yoğun nokta bulutu 208

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.3. Melik Mahmut Cami - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) 208

Şekil 6.4. Melik Mahmut Cami - Farklı açılardan elde edilen dokuların modele aktarılması..... 209

Şekil 6.5. Melik Mahmut Cami - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi..... 210

Şekil 6.6. Melik Mahmut Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" öncesi model görünümü..... 210

Şekil 6.7. Melik Mahmut Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü 211

Şekil 6.8. Üst örtüsü temizlenerek klasik model ile entegrasyona hazır fotogrametrik model..... 212

Şekil 6.9. Entegre model üretimi aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan Melik Mahmut Cami sonlu eleman modeli 214

Şekil 6.10. Melik Mahmut Cami - Klasik modelleme tekniği ile sonlu eleman modeli 216

Şekil 6.11. Yığma birimlerin ağırlık merkezine doğru taşınmadan gerçekleştirilen model..... 222

Şekil 6.12. Mardin Ulu Cami kesiti 225

Şekil 6.13. Mardin Ulu Cami - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu..... 227

Şekil 6.14. Mardin Ulu Cami - Metashape programından elde edilen 3D yoğun nokta bulutu 228

Şekil 6.15. Mardin Ulu Cami - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) 228

Şekil 6.16. Mardin Ulu Cami - Metashape programından farklı açılardan elde edilen dokuların modele aktarılması..... 229

Şekil 6.17. Mardin Ulu Cami - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi..... 230

Şekil 6.18. Mardin Ulu Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" öncesi model görünümü..... 230

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.19. Mardin Ulu Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü 231

Şekil 6.20. Mardin Ulu Cami - Üst örtüsü temizlenerek klasik model ile entegrasyona hazır fotogrametrik model 232

Şekil 6.21. Mardin Ulu Cami – AutoCAD programında katman ayarlarının gerçekleştirilmesi ve ağ kontrollerinin tamamlanması sonrası model..... 233

Şekil 6.22. Mardin Ulu Cami – AutoCAD programında katman ayarlarının gerçekleştirilmesi ve ağ kontrollerinin tamamlanması sonrası model..... 233

Şekil 6.23. Entegre model üretimi aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan Melik Mahmut Cami sonlu eleman modeli 235

Şekil 6.24. Mardin Ulu Cami - Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli..... 237

Şekil 7.1. Avlu duvarı periyot değerlerinin karşılaştırılması..... 244

Şekil 7.2. Tek açıklıklı L plan tipi periyot değerlerinin karşılaştırılması 245

Şekil 7.3. Melik Mahmut Cami güney duvarı periyot değerlerinin karşılaştırılması 246

Şekil 7.4. Melik Mahmut Cami entegre ve klasik model periyot değerlerinin karşılaştırılması..... 247

Şekil 7.5. Mardin Ulu Cami entegre ve klasik model periyot değerlerinin karşılaştırılması..... 248

Şekil 7.6. Eleman kullanımının analizi için oluşturulan MGM-162, MGM-164 ve MGM-166 modellerinin periyot değerleri 254

Şekil 7.7. Eleman boyutlarının analizi için oluşturulan üçgen ve dörtgen ağ modellerinin periyot değerleri..... 256

Şekil 7.8. Düğüm noktalarından parçalara bölünebilecek eleman modeli..... 257

Şekil 7.9. Kabuk elemanı iç kuvvetler/stresler sonuç kuralları 259

Şekil 7.10. Kabuk elemanlarda oluşan gerilmeler 259

Şekil 7.11. Kargir yapılarda performans seviyeleri 261

Şekil 7.12. Camilerin Global FZ yönündeki taban kesme kuvveti değerleri..... 265

Şekil 7.13. Camilerin HRZ-X yönündeki Smax ve Smin gerilme değerleri 267

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.14. Camilerin HRZ-Y yönündeki Smax ve Smin gerilme değerleri 267

Şekil 7.15. Modellerde ortaya çıkan maksimum yer değiştirme değerleri 268

Şekil 8.1. İnsansız hava araçlarından olan drone ile görüntü elde etme süreci 274

Şekil 8.2. Iphone LİDAR sensörü ve modelleme 276

Şekil 8.3. Fotogrametrik modellerin birçok etkileşimli ortamda kullanılabileceğine dair görünümler..... 277

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Artuklu dönemi külliye görünümleri - Emineddin Külliyesi 51

Resim 2.2. Artuklu dönemi cami görünümleri 52

Resim 2.3. Artuklu dönemi medrese görünümleri..... 52

Resim 2.4. Artuklu dönemi hamam görünümleri 53

Resim 2.5. Artuklu dönemi köprü görünümleri..... 53

Resim 2.6. Melik Mahmut Cami - Doğu yönünde bulunan taç kapısı 58

Resim 2.7. Melik Mahmut Cami - Giriş eyvanı ve tonozu..... 58

Resim 2.8. Melik Mahmut Cami tek açıklıktan oluşan harim mekânı 59

Resim 2.9. Melik Mahmut Cami – a) Mihrap önü kubbe, b) Harim kuzey cephesi ve harim mekanına giriş kapısı, c) Selsebil ve imam odaları, d) Minare 61

Resim 2.10. Mardin Ulu Cami yivli kubbe, harim duvarı, avlu ve revaklı bölüm genel görünüm 69

Resim 2.11. Mardin Ulu Cami – Avlu günümüz görünümü..... 70

Resim 2.12. Mardin Ulu Cami harim mekânı..... 70

Resim 2.13. Mardin Ulu Cami yivli kubbe..... 72

Resim 2.14. Cami güney cephesinde bulunan payandalar..... 73

Resim 3.1. Nicéphore Niepce'in 1826 yılında çektiği karşı evin çatılarını gösteren ve fotoğrafçılık alanında bilinen ilk fotoğraf..... 98

Resim 3.2. 1855'de Saint-Louis'de balondan çekilen ilk hava fotoğrafı 99

Resim 3.3. Uzak mesafe yersel fotogrametride kullanılabilecek Mardin'e ait hava fotoğrafı..... 106

Resim 3.4. Tower Bridge nokta bulut modeli..... 112

Resim 3.5. Mardin'de bir evde yer alan dikiş makinesinin çekilen fotoğraflar üzerinden 3 boyutlu modele dönüştürülmüş hali..... 112

Resim 3.6. Mardin Cumhuriyet Meydanı 2020 yılına ait durumunu gösteren 3 boyutlu modele dönüştürülmüş hali..... 113

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Modeli oluşturulan duvarın planı ve görünümleri (kesikli sınır içerisinde kalan duvarın analizi gerçekleştirilmiştir.) 163

Resim 5.2. Modeli oluşturulan L duvarın görünümleri (kesikli sınır içerisinde kalan duvarın analizi gerçekleştirilmiştir.) 178

Resim 5.3. Mardin Melik Mahmut Cami güney duvarı 192

Resim 6.1. Tripod ile kubbe fotoğraflarının çekilmesi 227

Resim 8.1. Fotoğraf çekiminde kullanılabilecek farklı cihazlar 275

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita **Sayfa**

Harita 2.1. Birinci Dönem Anadolu Beyliklerinin sınırları 41

Harita 2.2. Karlıova'da Kuzey Anadolu Fay Sistemi ile kesişen ve Hatay'a kadar uzanan DAFS haritası 43

Harita 2.3. Doğu Anadolu Fay Sisteminin ana segmentleri ve tarihi zarar veren depremler 44

Harita 2.4. DAFS üzerinde 1900 yılı sonrası M≥4.0 gerçekleşen depremler ve konumları 45

Harita 2.5. Mardin Ulu Cami ve Mardin Melik Mahmut Cami'nin yakın zamanda gerçekleşen deprem merkezlerine mesafeleri 48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
cm	Santimetre
E	Elastisite modülü
F	Kuvvet
kN	Kilonewton
km	Kilometre
mm	Milimetre
m	Metre
m²	Metrekare
M	Magnetüt
Md	Enerji ölçeği
ML	Richter ölçeği
Ms	Yüzey dalgası ölçeği
Mw	Moment magnitüd ölçeği
MPA	Megapascal
S11	Yerel 1 ekseni kabuk ve katı elemanlar için gerilme
S22	Yerel 2 ekseni kabuk ve katı elemanlar için gerilme
Smin	Minimum gerilme
Smax	Maksimum gerilme
sn	Saniye
U1	X yönünde yer değiştirme değeri
U2	Y yönünde yer değiştirme değeri
Δ	Yer değiştirme
x,y,z	Üç boyutlu koordinat sistemi eksenleri

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
1D	Bir boyutlu

Kısaltmalar	Açıklamalar
2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AR	Arttırılmış gerçeklik
ASCE/SEI	Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CBS	Coğrafi bilgi sistemi
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
CSI	Computer and Structures Incorporated
DAFS	Doğu Anadolu Fay Sistemi
DKVKK	Diyarbakır Kültür Varlıklarını Koruma Kurulu
DL	Düşey yükler
DPI	İnç başına düşen nokta sayısı (dots per inch)
DSLR	Dijital tek lensli yansıma
DTS	Deprem tasarım sınıfı
DWG	Drawing format
DXF	Drawing exchange format
EN	Avrupa Standartları
FAA	Federal Havacılık İdaresi
FEMA	Federal Acil Durum Yönetim Kurumu
FM	Fotogrametrik model
HRZTL	Horizontal
HRZ-X	X yönünde yatay yükler
HRZ-Y	Y yönünde yatay yükler
ICCROM	Uluslararası Koruma Çalışmaları Merkezi ve Kültür Varlıklarının Restorasyonu
İHA	İnsansız hava aracı
KAFS	Kuzey Anadolu Fay Sistemi
KM	Klasik model
LIDAR	Light detection and ranging
MAÜ	Mardin Artuklu Üniversitesi
MP	Megapiksel

Kısaltmalar	Açıklamalar
NTC08	İtalyan Ulusal Sismik Yasaları
NZSEE	Yeni Zelanda Deprem Mühendisliği Birliği
PPI	İnç başına düşen piksel sayısı (pixel per inch)
PVC	Polivinil klorür
SAP2000	Structural analysis programme
SFM	Structure from motion
STL	Standard triangulation language
T	Periyot
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

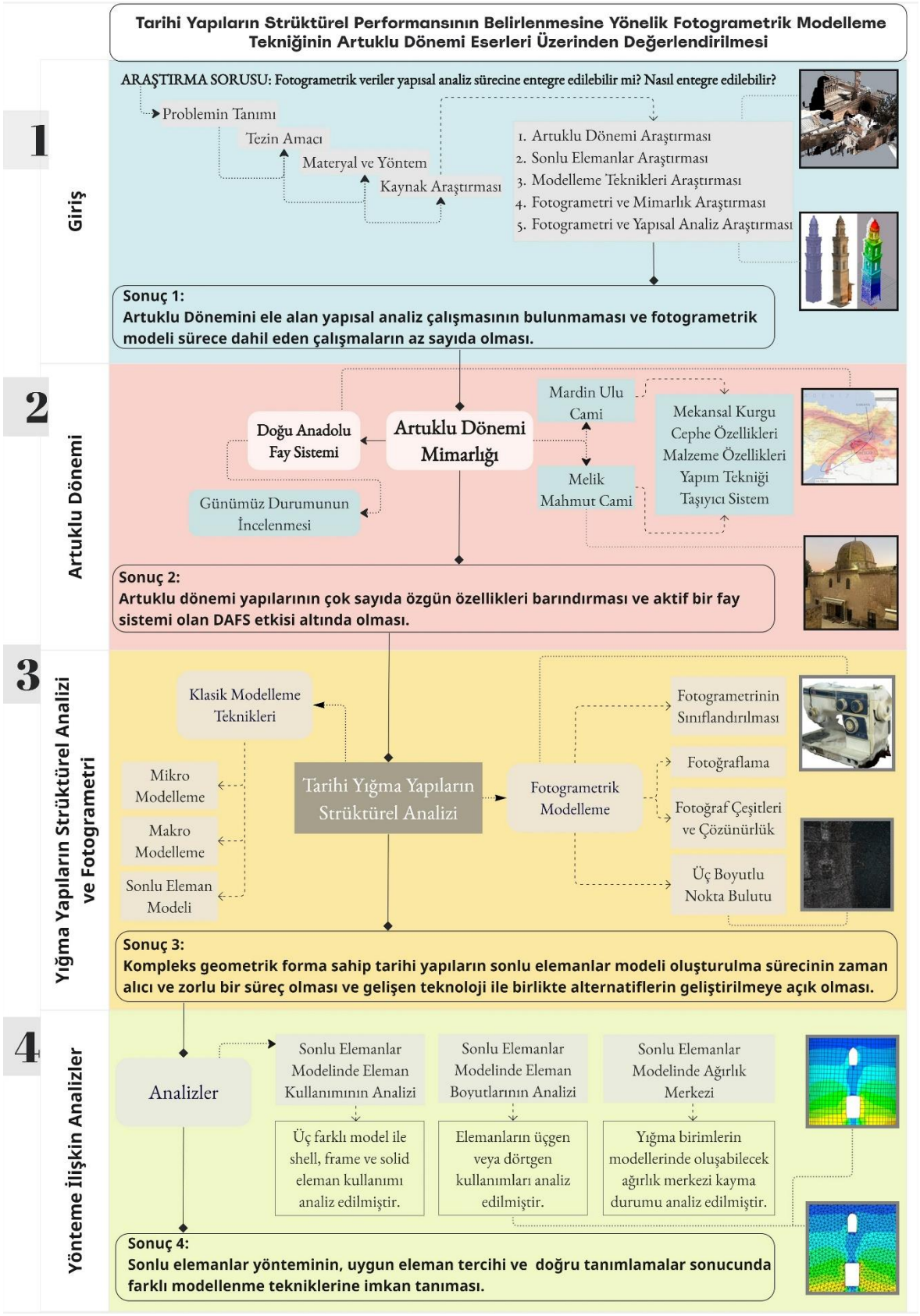
1. GİRİŞ

Kültürel mirasın korunması, birbiriyle ilişkili ve bağımlı adımların entegre bir süreci olarak görülmelidir. Bu süreç yapıların özgün özelliklerinin mümkün olduğunca uzun süre korunmasında etkili olan tüm yeni teknolojileri kullanarak tarihi yapıların korunmasını içermekte ve genellikle mirasın geometrik araştırması, incelenmesi ve belgelenmesi ile ilişkilendirilmektedir. Tarihi yapı araştırmaları, üç boyutlu (3D) bir nesnenin/yapının mevcut durumunun ve grafik sunumunun genellikle iki boyutlu planlarda envantere alınması ve kaydedilmesi olarak tanımlanmaktadır. Ancak günümüzde, tarihi yapılar gibi karmaşık nesnelerin geometrik üç boyutlu kaydı, bilgisayar destekli veri kayıt sistemleri kullanılarak çoklu görüntülü fotogrametrik prosedürleri ve lazer tarayıcı kombinasyonları ile yüksek düzeyde bir doğrulukla gerçekleştirilebilmektedir.

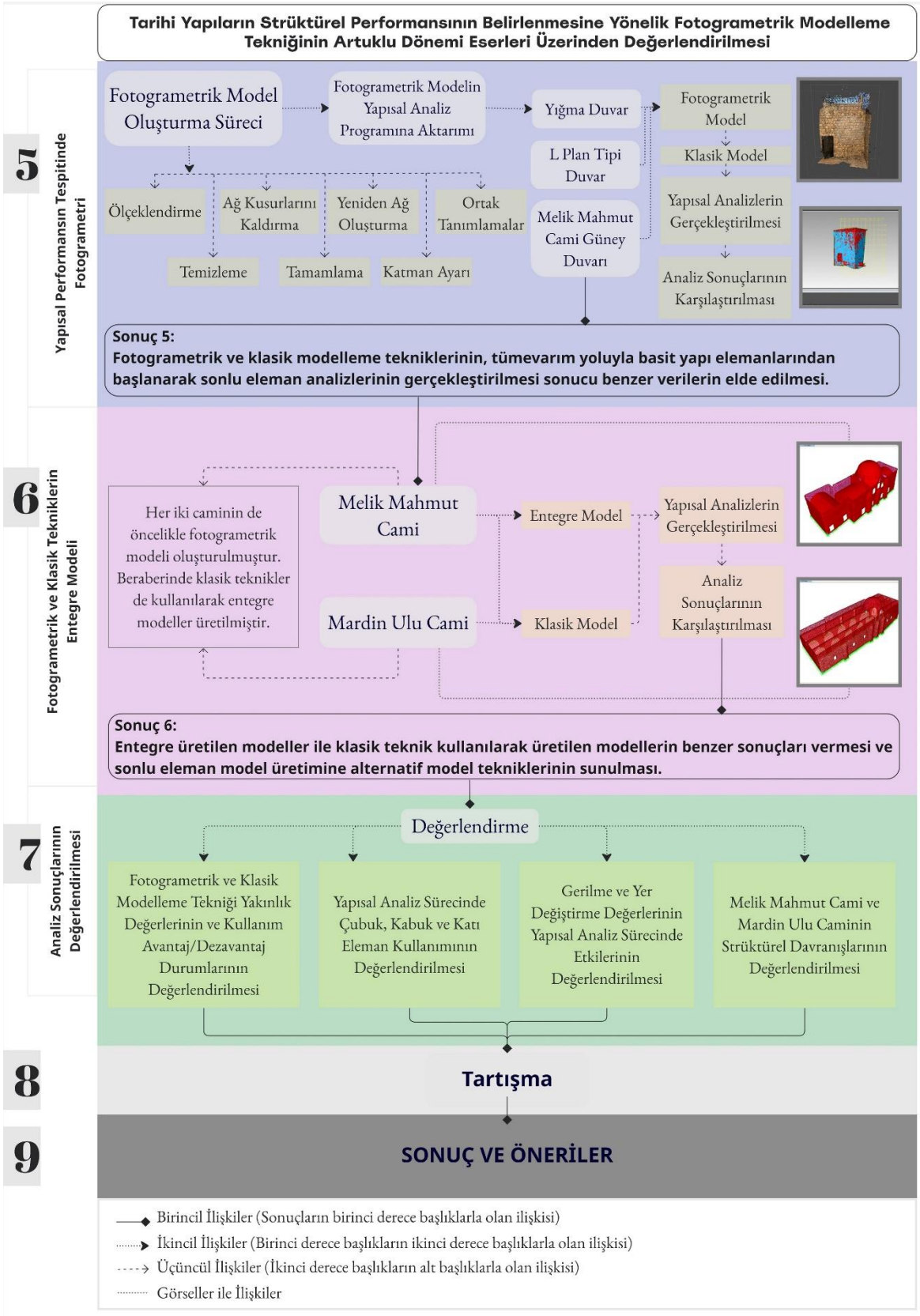
Bir kültürel mirasın zamana maruz kaldığı tarihsel bilgi birikimi, yalnızca değişimleri ve dönüşümleri anlamak için değil, aynı zamanda karakterize edildiği unsurları eleştirel olarak analiz etmek için de önem taşımaktadır. Özellikle bölgeye özgü belgeleme çalışmaları için gerçekleştirilen analizler ve modeller rastlantısal olmamakla birlikte, mimari karakterlerden bölgeye ait geometrik unsurlara, analiz edilen yapıların gösterdiği deformasyonlara kadar farklı değişen nedenleri yansıtmaktadır. Tez kapsamında ele alınan Artuklu eserlerinin de bulunduğu Anadolu topraklarında, asırlar boyunca birçok farklı medeniyet yaşamıştır. Türkler, 1071'de Malazgirt Zaferi ile bu topraklara birçok beylik kurarak yerleşmişlerdir. Beyliklerden biri Artuklu Beyliğidir ve üç kol halinde (Hasankeyf, Mardin, Harput) Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde hüküm sürmüşlerdir. Bölgede, Artuklu sanatı ve mimarisi XII. ve XIV. yüzyıllar içinde gelişmiş ve uzun yıllar etkili olmuştur. Sağlam bir ekonomik politika ve farklı kültürel yansımalar, çok sayıda dini ve sivil mimari eserlerin inşa edilmesine sebep olmuştur. Çarşı, köprü, cami, medrese gibi bölgede çok sayıda bulunan bu eserler, günümüzde hem Artuklu döneminin hem de Anadolu topraklarının geçmişine dair bilgiler içermekte ve inşa dönemine ilişkin sosyal, ekonomik, kültürel birçok özellikleri barındırmaktadır. İnsanlığın yerleştiği her bölgede iklim, jeolojik ve topografik özellikler, yerel malzemeler vb. farklılıklara bağlı olarak yapım gelenekleri ve teknikleri bölgelere göre değişiklikler göstermiş ve özgün eserler inşa edilmiştir. Bu nedenle özgün tarihi değerler barındıran eserlerin korunması, bölgenin kültürel ve tarihi özelliklerinin gelecek nesillere aktarılması açısından büyük önem taşımaktadır. Nesiller arası aktarım,

bölgenin kültürel ve sosyal yaşantısının yanı sıra mimari eserlerin teknik özelliklerinin de aktarılmasını sağlamaktadır. Bu aktarım, zaman içerisinde malzeme ve yapım tekniğinin süreklilik göstererek birbirinden etkilenmesine ve gelişimine de katkı sunmaktadır. 18. yüzyılda Sanayi Devrimi ile beraber modern tekniklerde yaşanan hızlı gelişmeler, zamanla geleneksel yapım tekniklerin daha az kullanılmasına, restorasyon ve güçlendirme sırasında hatalı tekniklerin tercih edilmesine ve gelecek nesillere özgün yapım tekniğinin aktarılması açısından kesintilere yol açmıştır. Ancak kültürel varlığın en önemli bileşenlerinden biri olan mimari eserlerin, özgünlüğü ile gelecek nesillere aktarılması gerekmektedir. Mimari eserin ve bulunduğu tarihi çevrenin özgün aktarımı, kültürel devamlılığı da sağlamaktadır.

Geçmiş ile geleceği anlamlı halde bağlayan mimari eserlerin korunması, öncelikle yapının ayakta kalmasını sağlayan taşıyıcı sistemin durumuna ve performansına bağlıdır. Ancak tarihi yapıların taşıyıcı sistem ile mimari elemanlar arasındaki ilişki genellikle bütünlük göstermektedir ve bu nedenle, yapısal koruma ve mimari koruma birlikte ele alınmalıdır. Günümüzde koruma süreçlerinde, malzeme, yapım tekniği ve yapı davranışı açısından birçok belirsizlik içeren sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu belirsizliklerin araştırmalar, incelemeler, analizler, tartışmalar ve kapsamlı değerlendirmeler sonucu olabildiğince açık bir süreç haline dönüştürülmesi; yapısal ve mimari restorasyon uygulamalarının doğruluğunu tanımlayan en önemli etmendir. Başka bir deyişle yapısal koruma; taşıyıcı sistem ve yapım tekniği araştırılması, yapı ve malzeme analizleri gibi birçok sonucu barındıran bir süreç olarak yürütülmelidir. Dolayısı ile detaylı çalışmalar gerektiren yapısal koruma sürecini hızlı kararlar alabilecek düzeye indirgemek, mevcut klasik teknikler ile kullanılabilecek yeni tekniklerin avantaj ve dezavantaj durumlarını ortaya koymak, koruma ve restorasyon stratejileri geliştirmek açısından büyük önem arz etmektedir. Tarihi yapıların strüktürel performansının belirlenmesinde fotogrametrik modelleme tekniğini ele alan bu tez, uzun yıllardır yapısal analiz süreçlerinde en yoğun ve zaman alıcı kısım olan modelleme tekniklerine yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Günlük rutin fotoğraflama işlemleri ile oluşturulabilecek bir fotogrametrik modelin, karmaşık geometriye sahip tarihi yapılardan nasıl daha kolay veriler elde edilebileceği ve strüktürel modellemede klasik tekniklere nasıl entegre olabileceği tartışılmaktadır. Bu doğrultuda tezde, basit yapı elemanlarından büyük ölçekli camilere, strüktürel modellerinin oluşum süreçleri ele alınmaktadır. Teknolojik gelişmeler ile birlikte yeni modelleme tekniklerinin sürece avantaj sağlayacak kısımlarda dahil edilmesi gerektiğini ve dezavantaj durumlarının da ortaya konulduğu tezin akış diyagramı Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Tez akış diyagramı



Şekil 1.1 (devam). Tez akış diyagramı

Problem durumu / Konunun tanımı

Çalışmada öncelikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan Artuklu dönemi eserleri ele alınmıştır ve etkisi altında bulunduğu Doğu Anadolu Fay Sisteminin (DAFS) günümüz durumu incelenmiştir. Gerçekleşen son büyük sismik hareketlere ve etkilerine değinilerek Artuklu yapılarının mevcut kullanım durumları değerlendirilmiştir. Beraberinde hem modelleri üretilecek hem de mevcut durum analizi yapılacak olan Artuklu beyliğine ait olan eserler ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelenmiş ve DAFS etkisi altında bulunan ve yaklaşık olarak bin yıllık tarihi değerlere sahip Artuklu dönemi eserlerinin mimarlık-mühendislik disiplini ile birlikte ele alındığı ve strüktürel performanslarının belirlendiği herhangi bir çalışmanın yapılmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda, alan çalışmasını oluşturan Artuklu dönemi yapıları detaylandırılmıştır ve Mardin Ulu Cami ve Melik Mahmut Cami mimari ve strüktürel özellikleri incelenmiştir. Tarihi yığma yapıların strüktürel analizi ve modelleme tekniklerinin incelendiği tez çalışmasında, öncelikle kullanılan sonlu elemanlar yöntemine ilişkin analizler gerçekleştirilmiş ve ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda modelleme tanımlamaları geliştirilmiştir. İlk olarak tümevarım yöntemi kullanılarak basit yığma yapı elemanlarının modelleri oluşturulmuş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Tümevarım yönteminin kullanılmasındaki en önemli etken, karmaşık geometrilere sahip yapıların modellenmesi sürecinde oluşabilecek hataların ve problemlerin, daha küçük yapı elemanları üzerinden tespit edilerek sürecin ilerletilebilmesidir. Avlu duvarı, tek açıklıklı L duvar ve Melik Mahmut Cami güney duvarı örnekleri üzerinden bu süreç tamamlanmış ve analiz sonuçları detaylandırılmıştır. Yapılan analizler ve incelemeler ile birlikte Artuklu döneminin en özgün eserleri arasında bulunan Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami'nin strüktürel performanslarının belirlenmesinde, klasik modelleme tekniği ve fotogrametrik modelleme tekniği olmak üzere iki farklı yöntem ile modeller oluşturulmuştur. Her iki modelleme tekniğinin entegre kullanıldığı süreçler de yönetilmiş ve klasik teknik ile oluşturulan model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu süreçte, her iki modelleme tekniğinin de farklılıkları tespit edilmiş ve süreçlerine detaylı olarak yer verilmiştir. Klasik modelleme yönteminin tamamlayıcısı ve süreci kolaylaştırabilecek bir veri sağlayıcısı olarak fotogrametrik modelleme değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonrası pratik ve mühendislik bilgisi gerektirmeyen bir modelleme yöntemi olan fotogrametrik modellemenin ve entegre modellerin hassasiyet oranları ortaya konmuştur. Analiz sonuçlarının farklı başlıklar altında değerlendirilmesi ile bu alanda yapılabilecek çalışmalara alternatif öneriler sunularak çalışma tamamlanmıştır.

Çalışmada yaklaşık 1000 yıllık kültürel değerleri barındıran Artuklu dönemi eserlerinin seçilme nedenleri;

- Doğu Anadolu Fay Sistemi etkisi altında olmasına rağmen, Artuklu dönemi yapıları özelinde strüktürel davranışlarının belirlendiği çalışmanın yapılmamış olması,
- Artuklu döneminde inşa edilen eserlerin, ilerleyen dönemlerde Anadolu topraklarında inşa edilen başka eserlere örnek teşkil etmiş olması,
- Artuklu döneminde farklı işlevde birçok önemli eserlerin inşa edilmiş olması nedeniyle araştırma ve geliştirme çalışmalarına elverişli olması,
- Mimari yapıların yöreye özgü ancak kendi içinde ayrışan malzeme ve teknik ile inşa edilmiş olmasının strüktürel davranışlarına etkilerinin araştırılması gerektiği,
- Yığma yapım tekniği ile inşa edilmiş eserlerin zamana bağlı bozulmalar nedeniyle yapısal özelliğinin zayıflamış olma ve yıkılma ihtimali,
- Bölge hakkında bu denli tarihi, kültürel ve sosyal bilgi birikimine sahip yapıların, gelişen teknoloji ile birlikte üç boyutlu olarak da belgelenerek gelecek nesillere etkileşimli bir ortam sunulması gerekliliğidir.

Çalışmada alan çalışması olarak Mardin Ulu Cami ve Melik Mahmut Cami yapılarının seçilme nedenleri ise;

- Aynı dönem içerisinde inşa edilmiş olmaları,
- Aynı aktif fay hattı üstünde bulunmaları,
- Artuklu döneminde inşa edilen diğer eserlere ait benzer özellikleri barındırmasının yanı sıra özgün niteliklere de sahip olmaları,
- Mardin Ulu Cami'nin Artuklu dönemi eserleri içerisinde oldukça geniş kubbe açıklığına sahip olması ve strüktürel olarak analiz edilmesi gerekliliği,
- Melik Mahmut Cami'nin Artuklu dönemi içerisinde, modelleme tekniklerini değerlendirmek için tek açıklıklı bir kütleye sahip olması,
- Konumlandıkları Mardin tarihi kent bölgesi itibariyle yakın çevrelerinde tarihi değerlerinin yüksek olması,
- Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami ile ilgili strüktürel davranışlarının tespit edildiği herhangi bir çalışmanın literatürde yer almaması,
- Çalışmada sunulan fotogrametrik modelleme tekniği ile strüktürel performansı belirleme sürecinin, farklı büyüklükteki yapılar için ortaya çıkabilecek değişiklikleri tespit etmenin amaçlanmasıdır.

Bu kapsamda çalışma aşağıda yer alan problemleri cevaplamayı amaçlamaktadır:

- Yıllardır Doğu Anadolu Fay Sistemi etkisinde olan Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami nasıl bir strüktürel davranış sergilemektedirler?
- Klasik modelleme tekniği ve fotogrametrik modelleme tekniği ile gerçekleştirilen tarihi yapıların strüktürel analizinde, modelleme yöntemlerinin oluşturacağı avantaj/dezavantaj durumları ve sağlayacağı zorluklar/kolaylıklar nelerdir?
- Modelleme sürecini daha anlaşılabilir düzeye indirgeyeceği düşünülen fotogrametrik modelleme tekniği, tarihi yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde hangi süreçlerden geçerek kullanılacaktır/kullanılmalıdır?
- Fotogrametrik modelleme tekniğinin kullanılamayacağı durumlar nelerdir? Bu durumların ortaya çıkması sonucu, klasik teknik ile entegre edilerek sürecin yönetilmesi mümkün müdür?
- Fotogrametrik modelleme tekniği ile elde edilen veriler, strüktürel modelleme sürecinde kullanılmasa dahi klasik modelleme tekniğine nasıl avantajlar sağlayabilecektir?
- Farklı ölçekteki tarihi yapıların strüktürel davranışlarında, fotogrametrik modellerden alınacak verilerin strüktürel davranış farklılık değerleri hangi ölçüde değişiklik gösterecektir?

Araştırmanın amacı

Artuklu beyliği, üç asır boyunca egemen olduğu Doğu ve Güneydoğu Anadolu'da önemli eserler inşa etmiştir. Bu eserlerin 12. yüzyıl sonrası bölgede benzer işlevlerle inşa edilmiş eserlere örnek teşkil ettiği ve Anadolu Türk mimarisine önemli katkılarının olduğu görülmektedir (Kutlu ve Soyluk, 2021). Söz konusu eserlerin incelenerek mimari özelliklerinin ortaya çıkarılması, mevcut durumlarının tespit edilerek belgelenmesi ve strüktürel performanslarının belirlenerek gerekli duyulması halinde müdahale kararlarının alınması büyük önem arz etmektedir.

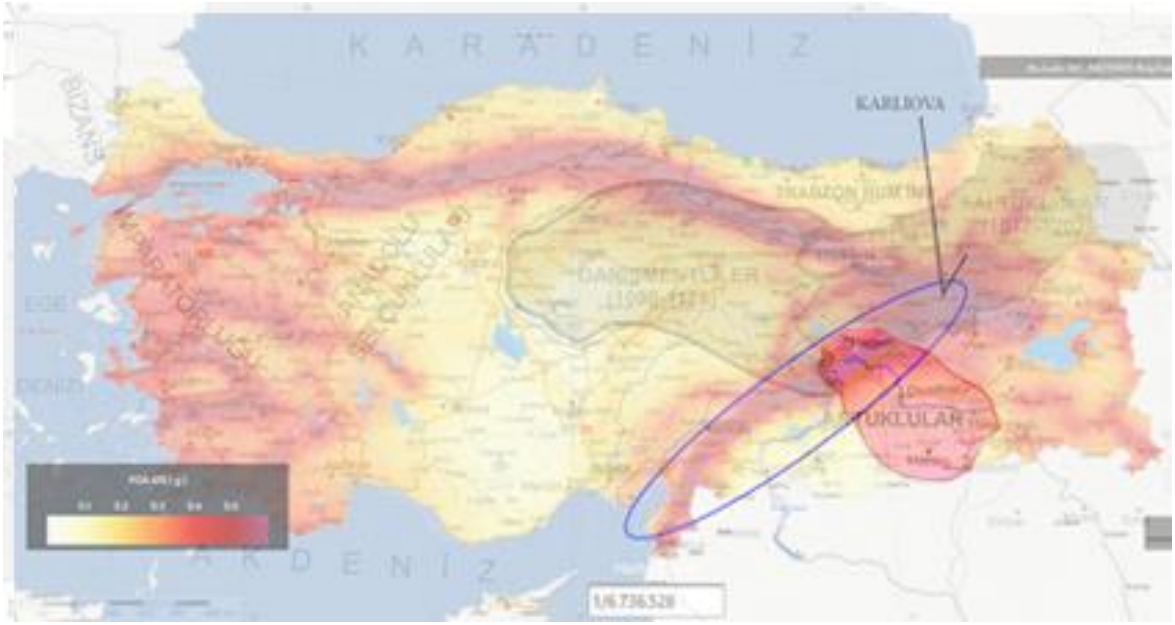
Bu tezin amacı, mimarisi ve yapım tekniği ile Anadolu topraklarında önemli eserler inşa eden Artuklu dönemine ait eserlerin yapısal özelliklerinin detaylı incelenmesi sonucunda, strüktürel davranışlarını tespit etmeye yönelik fotogrametrik modelleme yönteminin uygulanabilirliğini tüm yönleriyle değerlendirmektir. Tarihi yapıların deprem davranışlarını analiz etme tekniklerinde son yıllarda büyük gelişmeler yaşanmıştır ancak bu gelişmeler

içerisinde en büyük sorun ve zaman alıcı kısım genellikle tarihi yapının modellenme sürecidir (Can, Kubin ve Ünay, 2012). Tez kapsamında, tarihi yapıların strüktürel performansının belirlenmesi sürecinde mühendislik ve mimarlık disiplinlerine sıkıntı yaratan sayısal modelleme problemini kolaylaştırabilecek ve yoğun mühendislik bilgisi gerektirmeden çözümleyebilecek öneriler geliştirmek hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, uzun yıllardır farklı teknolojilerde ve çalışmalarda kullanılan fotogrametrik modelleme tekniği ele alınmıştır. Artuklu eserleri örneğinden strüktürel davranışı belirleme sürecine fotogrametrik modelleme tekniği entegre edilmiş, yapısal analiz sürecinin daha etkin yönetilmesi ve hızlı kararlar alabilecek düzeye indirgenebilmesi için değerlendirmeler yapılmıştır.

Süreç içerisinde öncelikle Artuklu dönemi yapılarının mekânsal kurgu ve cephe özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım tekniği ve taşıyıcı sistem özellikleri ortaya konmuştur. Yapısal davranışları öncesinde yapıların detaylı incelenmesi ve özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Beraberinde kullanılan SAP2000 programına ilişkin analizler gerçekleştirilmiştir. Yönteme ilişkin analizlerde ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda, tezde oluşturulan modellemelere yönelik tanımlamalar yapılmıştır. Basit yığma elemanlar ile başlayan strüktürel analizler, Artuklu dönemi camileri ile devam etmiş ve klasik modelleme teknikleri ile fotogrametrik modelleme tekniği arasında ortaya çıkan analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Modeller üzerindeki aynı noktalarda ortaya çıkan gerilme ve deformasyon değerleri incelenmiştir. İki farklı modelleme tekniği arasındaki farklılıklar tartışmaya açılmış ve süreç içerisinde sağladıkları avantaj/dezavantaj durumları ortaya konulmuştur. Farklılıkların ortaya konması ile birlikte, fotogrametrik modelleme tekniği ile koruma sürecinde acil ve ön müdahale gerektirebilecek yapılar için hızlı kararlar alınabileceği düşünülmektedir. Ayrıca koruma, belgeleme ve hasar tespiti gibi çalışma alanlarında gerçekleştirilmesi gereken daha detaylı analiz veya strüktürel modelleme süreçleri için de detaylı bir üç boyutlu veri sağlayan fotogrametrik modelden yararlanılabilecektir.

Tez kapsamında öncelikle üç farklı basit yapı elemanı ele alınarak modellenmiştir. Basit yapı elemanı modellerinde ortaya çıkabilecek problemler en aza indirgenerek programlar arası geçişlere detaylı bir şekilde yer verilmiştir. Yapı ölçeğinde ise Artuklu dönemi eserleri olan Melik Mahmut Cami ile Mardin Ulu Cami özelinde iki farklı modelleme yöntemi uygulanmıştır ve bu modellerde statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Karmaşık geometriye sahip tarihi yığma yapıların yük aktarımında kullanılan kemer, tonoz, ayak gibi

yapısal elemanların fotogrametrik model ile entegre edilebilen ilişkisine yer verilmiştir. Analitik model oluşturma süreçlerinde, en önemli durum yapının gerçek davranışının doğru simüle edilmesidir. Yapıların sahip olduğu taşıyıcı sistem özellikleri incelenerek en doğru idealleştirmeler yapılmalıdır. Bu doğrultuda kimi zaman fotogrametrik modelleme tekniği yetersiz kalmış ve klasik modelleme tekniği ile entegre edilerek sürece dahil edilmiştir. Oluşturulan entegre modeller ile hassasiyet sonuçları belirlenmiştir. Sonuçlar ile birlikte tez kapsamında, sonlu eleman ve matematiksel modelleme sürecini yoğun mühendislik bilgisi gerektirmeyen, farklı disiplinler için daha anlaşılabilir düzeye indirgeyen ve tarihi yapının davranışını daha hızlı bir süreç yönetimi ile ortaya çıkaran bir model önerisi sunulmuştur. Bu model önerisinin avantaj ve dezavantaj durumları değerlendirilmiştir. Oldukça detaylı çalışmaları, deneyleri ve analizleri gerektiren tarihi yapılar için bu model önerisi özellikle strüktürel davranış süreçlerinde her zaman avantaj sağlamamaktadır. Her tarihi yapının kendine özgü fiziksel ve mekanik özellikleri düşünüldüğünde, fotoğraflar üzerinden otomatikleştirilen bir strüktürel model süreci yönetilmesi mümkün değildir. Fakat, fotogrametrik model oluşturulurken tarihi yapılarda erişilmesi zor geometrik özellikler üç boyutlu olarak modellenebilmektedir ve bu model, klasik modelleme tekniğine, belgeleme çalışmalarına, hasar tespit süreçlerine gibi birçok alanda ve birçok süreçte oldukça yardımcı olabilecek veriler sağlamaktadır. Verilerin birçok alanda kullanılabilecek olması, bu modelleme tekniğinin sağladığı en önemli avantajdır ve tarihi yapıların strüktürel analiz süreci için de acil karar alınması gereken durumlara yardımcı olması beklenmektedir. Üç boyutlu bir hacmi oluşturmayan, ağır hasar almış veya bir bölümü yıkılmış yapıların fotogrametrik olarak modellenmesi ile strüktürel analizi hızlı bir süreci içerebilmektedir. Üç boyutlu hacmi oluşturan yapılarda ise klasik modelleme tekniğine veri sağlayarak veya tezde değinildiği üzere modelleme tekniklerini entegre biçimde kullanarak strüktürel analiz süreçleri işletilebilmektedir. Tez kapsamında bu modelleme süreçleri için özellikle 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen depremleri ve 2020 yılında Elazığ-Sivrice depremi ile birlikte, aktif bir fay hattı olduğunu devamlı olarak gösteren ve günümüzde halen depremlerin sık yaşandığı DAFS sistemi üzerinde yer alan Artuklu dönemi yapıları ele alınmıştır. Bu yapılara ilişkin strüktürel davranış çalışmalarının literatürde bulunmaması ve DAFS gibi acil müdahale gerektirebilecek bir risk etkisi altında olması, bu çalışmanın önemini göstermektedir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Artuklu Beyliği haritası ile etkisi altında olduğu Doğu Anadolu Fay Hattı haritasının birleştirilmesi

Materyal ve yöntem

Çalışmada öncelikle kapsamlı kaynak araştırmaları yapılmıştır. Artuklu dönemi yapıları hakkında kapsamlı literatür taraması gerçekleştirilmiş ve güncel kaynaklardan elde edilen bilgilere yer verilmiştir. Sonlu elemanlar ile ilgili yapılmış çalışmalar incelenmiş, modelleme tekniklerine yer veren kaynaklar ele alınmıştır. Fotogrametrik modelleme tekniğini mimarlık alanında ve strüktürel analiz sürecine dahil eden az sayıdaki çalışmalara da yer verilerek kaynak araştırması tamamlanmıştır. Beraberinde Artuklu dönemi mimarlığının etkisi altında olduğu DAFS ele alınmış ve günümüz durumu ve yaşanan depremler incelenmiştir. İnceleme ile birlikte, Artuklu dönemi camilerinin, plan tipi, mihrap önü kubbe, kubbe geçiş elemanı, kubbe iç çapı, avlu durumu, taç kapı ve malzeme özellikleri ele alınmıştır ve tablolar ile açıklanmıştır. Genel dönemsel özellik araştırması sonrasında, çalışmada ele alınan Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami mekânsal kurgusu ve cephe özellikleri, malzeme özellikleri ve yapım tekniği ile taşıyıcı sistem özellikleri tanımlanmıştır. Camilerin bulunduğu Güneydoğu Anadolu Bölgesi geçmişten günümüze depremler nedeniyle çok fazla can ve mal kaybına uğramış, sismisitesi yüksek bir bölgedir. 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkez üssünde gerçekleşen M 7,7 ve M 7,6 büyüklüğündeki depremler ve öncesindeki 24 Ocak 2020 tarihinde M 6,9 büyüklüğünde Elazığ-Sivrice depreminin gerçekleşmesi, bu fay hattının yoğun bir şekilde aktif olduğunu

göstermiştir. Dolayısı ile gerçekleşebilecek depremlere karşı önlemler alınmalı ve bölgedeki tarihi yapıların strüktürel davranışları olası yıkılma tehlikelerine karşı incelenmelidir. Geçmişe ait bilgileri geleceğe aktararak arada kültürel bir bağlantı sağlayan tarihi yapıları korumak ve davranışlarını belirleyerek gerekli müdahalelerde bulunmak, alınabilecek birtakım önlemlerin başında gelmektedir.

Çalışmada, bu bölgede bulunan Artuklu dönemi özelinde tarihi yapıların strüktürel davranışlarını değerlendirmek ve değerlendirme sürecinde, tarihi yapıların modelini oluşturmak için klasik modelleme teknikleri ile tarihi yapıların analiz sürecine yeni entegre edilecek olan fotogrametrik modelleme tekniği ele alınmaktadır. Klasik modelleme teknikleri ile modeli oluşturulacak yapı detaylı incelenerek doğrusal elemanlar (çubuk-frame), iki boyutlu elemanlar (kabuk-shelll) veya tamamen üç boyutlu elemanlardan (katı-solid) farklı şekillerde idealize edilmektedir. Genellikle mikro modelleme, makro modelleme ve sonlu elemanlar ile modelleme olmak üzere üç farklı şekilde klasik modelleme tekniği uygulanabilmektedir. Fotogrametrik modelleme tekniği ile yapısal davranış süreci ise, günümüzde gelişen fotoğraflama teknikleri ve yüksek çözünürlüklü fotoğraf üretebilen araçlar sayesinde, sırasıyla (1) akıllı telefonlarla/fotoğraf makineleriyle/drone ile havadan gerçekleştirilecek fotoğraf çekme teknikleri, (2) çekilen fotoğrafları fotogrametri yazılımına yükleyerek 3 boyutlu yapı modelleme teknikleri ve (3) modelin yapısal davranış tespiti gerçekleştiren programlara aktarılması tekniklerini içeren bir süreçten oluşmaktadır. Çalışmada, bu sürecin birinci kısmı, fotoğraf çekimi yöntemleri günümüzde akıllı telefonların yaygınlaşmasıyla her yerde rutin olarak gerçekleştirilebilen bir işlemden oluşmaktadır. Fotoğraflardan 3 boyutlu dijital modeller üretebilmek için fotoğraf karelerinde çok parlak ve çok karanlık yüzeylerden uzak durulması, farklı boyutlarda olmaması gibi önemli hususlar bulunmaktadır. Kültürel mirasın dijitalleştirilmesi ve haritalama gibi alanlar başta olmak üzere çoğunlukla kullanımda olan fotogrametrik modelleme yazılımları, çekilen fotoğrafların yazılıma yüklenmesi sonucu fotoğrafları tanımakta ve 3 boyutlu ölçülü modellere dönüştürmektedir. İkinci kısımda oluşturulan üç boyutlu yapı modeli, üçüncü kısımda ağ problemlerini ortadan kaldırma, temizleme, ölçeklendirme gibi işlemlerin ardından yapısal analiz programına aktarılabilecek duruma gelmektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında basit yapı elemanlarının, klasik ve fotogrametrik yöntemler ile oluşturulmuş modellerinin strüktürel davranışları incelenmiştir. Bu aşamada, fotogrametrik

modelin yetersiz kaldığı durumlar tespit edilmiş ve klasik model ile entegre model oluşturma süreci incelenmiştir. Çalışmada, yapıların dış cephelerinden çekilen fotoğraflar ile oluşturulan fotogrametrik modeller, iç mekanlarda bulunan kemer, tonoz, ayak gibi taşıyıcı sistemlerin modelini oluşturamamaktadır. Dolayısıyla bu taşıyıcı sistemler, klasik teknikler kullanılarak fotogrametrik modelin içerisine entegre edilmiştir. Ortaya çıkan entegre model ile Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Caminin yapısal modeli oluşturulmuştur. Ayrıca camilerin tamamı klasik modelleme tekniği kullanılarak da modeli oluşturularak entegre modeller ile analiz sonuçları incelenmiştir.

Fotogrametrik modelleme ile yapısal davranış analizi öncelikle, dijital görüntülerin fotogrametrik işlemesini gerçekleştiren ve Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Caminin dijital kamerayla çekilen fotoğraflarını üç boyutlu uzamsal veri işleyen dijital bağımsız bir yazılım programına yüklemekten oluşmaktadır (Metashape üretici firma Agisoft). Ardından, oluşan modelin ağ (mesh) kusurlarının ortadan kaldırmılması amacıyla oluşturulan üç boyutlu model, ağ düzenleme yazılımına aktarılmaktadır (Geomagic Wrap). Bu yazılım, nokta bulutunun ve ağın düzenlenmesine izin vermektedir. Ayrıca, üç boyutlu veri işlenmesine ek olarak, gelişmiş yüzey düzenleme işlevleri (örn. ölçeklendirme, tamamlama, temizleme vb.) sağlamaktadır. Son olarak, düzenlenen model bir yapısal analiz programına aktarılabilmektedir (SAP2000 version 21). Sonuç olarak, yapının oluşturulan modeli yerçekimi ve statik ve dinamik yükleri altındaki davranışını araştırmak için doğrusal statik ve dinamik analizler yapılmaya imkân tanır hale gelmektedir.

Melik Mahmut Cami, tek açıklığa sahip içerisinde taşıyıcı ayakların bulunmadığı Artuklu dönemi cami özelliklerini yansıtmaktadır. Mardin Ulu Cami ise Artuklu dönemi en büyük strüktürel açıklıklara sahip eserlerdendir. İki farklı ölçekteki camilerin ele alınması, fotogrametrik modelleme tekniğinin büyük ve küçük ölçekli yapılarda ortaya çıkaracağı avantajları ve dezavantajları ayrı ayrı değerlendirmeyi sağlamıştır. Doğrusal elastik hesaplama yöntemleri, çalışmada incelenen ölçekteki yapıların genel strüktürel davranışı hakkında bilgi sahibi olmak için yeterli olmaktadır. Dolayısı ile tarihi yapıların strüktürel davranışı hakkında hızlı fikir sahibi olunması ve farklı modelleme tekniklerinin bir arada kullanımı için bir yöntem arayışında olunan tez çalışmasında, doğrusal elastik hesap yöntemleri kullanılmıştır. Daha detaylı sonuçlar elde edinmek istendiği durumlarda, mikro modelleme teknikleri kullanılarak doğrusal olmayan yöntemlerin kullanılması ve deneysel

çalışmalardan elde edilen verilere göre modellerin oluşturulması ve analiz edilmesi tavsiye edilmektedir.

Sonuç olarak, uzun yıllardır gelişmelerin yaşandığı tarihi yapıların strüktürel davranışlarının incelenmesi teknolojisinde, araştırmacılara klasik modelleme yönteminin tamamlayıcısı veya süreci kolaylaştırabilecek bir veri sağlayıcısı olarak fotogrametrik modelleme tekniğinin sürece entegre edilmesi konusunda katkı sağlanacaktır. Fotogrametrik verilerin sürece dahil edilmesi ile tarihi yapılara uygulanabilecek hızlı müdahalelere ilişkin acil bir durumun gerekip gerekmediği üzerine fikir sahibi olunacaktır. Bu süreç yoğun mühendislik bilgisi gerektirmemesi nedeniyle multidisipliner bir model üretme çalışma ortamını da sağlayabilecektir. Ayrıca fotogrametrik modeller sayesinde tarihi yapıların günümüze kadar gelmiş özgün değerleri, dijital ortamlarda üç boyutlu halde arşivlenebilmektedir. Özellikle karmaşık geometrik özelliklere sahip tarihi yapılarda rölöve çalışmalarının zorluğu, fotogrametrik modellerin ölçüm süreçlerine de entegre edilebileceğini göstermektedir. Üç boyutlu model üzerinden elde edilebilecek ortofotolar, iki boyutlu çizimlerin üretilebilmesi için oldukça yeterli veriler sağlamaktadır. Bu durum yapıların hem iki boyutlu çizimlerinin ortaya çıkarılmasına hem de üç boyutlu olarak takip edilebilir bir hasar-müdahale süreç yönetimine katkı sunmaktadır.

Kaynak araştırması

Çalışmada 5 farklı alt başlıkta kaynak taraması yapılmıştır. Öncelikle Artuklu dönemi ile ilgili yapılmış çalışmalar ele alınmış ve DAFS etkisi altında bulunan bu dönem eserleri ile ilgili yapısal analizleri konu alan bir çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir. İkinci olarak, tez kapsamında yapısal analiz gerçekleştirmek amacıyla kullanılan sonlu elemanlar yöntemi üzerine yapılan yaklaşık son 30 yıllık çalışmalar ele alınmıştır ve Anadolu topraklarında birçok farklı döneme ait eserlerin yapısal analizlerinin gerçekleştirildiği; ancak, Artuklu dönemi eserleri özelinde bir sonlu eleman modeli ile ilgili çalışmanın olmadığı belirlenmiştir. Üçüncü alt başlıkta ise yapısal analiz süreçlerinde oluşturulan modelleme sürecine yer veren çalışmalara değinilmiştir. Bu bölümde, yapısal analiz modelleme sürecinin oldukça zaman alıcı ve zor bir süreç olduğuna, ayrıca çoğunlukla mühendislik etiğine sahip uzmanlar tarafından gerçekleştirilebileceğine dair değerlendirmelerin bulunduğu çalışmaların olduğu görülmüştür. Bu durumlara paralel olarak tez kapsamında, yapısal analiz ve modelleme tekniği üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş ve fotogrametrik

modelleme yönteminin yapısal analiz süreçlerine entegre edilme durumu araştırılmıştır. Dolayısı ile dördüncü alt başlıkta da fotogrametrik modelleme tekniği ile ilgili yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte bu teknik üzerine yapılan çalışmaların sayısı ve alan çeşitliliğinin arttığı görülmüştür. Özellikle mimarlık disiplininde ve koruma çalışmalarında gerçekleştirilen fotogrametrik çalışmaların olduğu tespit edilmiştir. Fakat, her ne kadar fotogrametrik modelleme tekniği üzerinde çalışmaların sayısı artsa da Artuklu dönemini ele alan bir model çalışması günümüzde halen bulunmamaktadır. Kaynak araştırmasının son alt başlığında ise fotogrametrik modelleme tekniği ile yapısal analiz gerçekleştiren çalışmalar ele alınmıştır. Literatürde mevcut dört araştırmaya rastlanmıştır. Mevcut dört çalışmada da fotogrametrik modelleme tekniği kullanılarak yapısal analizler gerçekleştirilmiş ve aynı yapı örneği üzerinde klasik modelleme tekniği kullanılmadan, doğrudan fotogrametrik model üzerinden analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Dolayısıyla modelleme teknikleri arasında ortaya çıkabilecek olumlu ve olumsuz durumlara yer verilmemiştir.

Bu kapsamda tezin, Artuklu dönemini ele alarak yapısal davranışlarının belirlenmesi sürecinde fotogrametrik ve klasik modelleme tekniklerinin avantaj/dezavantaj durumlarını tespiti ile literatürdeki mevcut boşluğu doldurması hedeflenmektedir. Mevcut çalışmalarda, Artuklu dönemi eserleri ile ilgili herhangi bir yapısal davranış analizinin gerçekleştirilmemiş olması, kültürel belgeleme bağlamında fotogrametrik modellerinin oluşturulmamış olması; ayrıca mevcut fotogrametrik modelleme tekniği ile gerçekleştirilen çalışmaların tek yapı özelinde ve tek modelleme tekniği ile gerçekleştirilmiş olması, ilgili alanda çalışmalara ihtiyacın olduğunu destekler niteliktedir.

Artuklu dönemi ile ilgili yapılmış çalışmalar

Çalışmada ele alınan Artuklu dönemi eserleri ile ilgili yapılmış olan çalışmalara yer verilmiştir. Özellikle, tez kapsamında ele alınan Mardin Ulu Cami ve Melik Mahmut Cami ile ilgili doğrudan ele alınmış çalışma sayısı çok azdır. Ancak Artuklu Dönemi ile ilgili dolaylı olarak bu yapıların da ele alındığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu başlık altında, bu yapıları ele alan çalışmalar kronolojik olarak incelenmiştir.

Harput Artukoğullarına ait kitabeler isimli eserinde Ardıç (1939), Artuklular döneminde inşa edilen Harput Ulu Cami ve Harput Kalesinde bulunan kitabeler çözümlenmiş ve yapılar

hakkında kitabeler ile paralel olarak tarihi bilgilere yer verilmiştir. Benzer bir çalışma Oral (1967) tarafından *Harput Ulu Camii duvarındaki vergi kitabesi* isimli tam metin bildirisinde, yapıda yer alan kitabenin Arapça ve Türkçe olmak üzere detaylı anlatıldığı çalışma bulunmaktadır. Savcı (1956) tarafından kitabeler üzerine yazılan bir diğer eser *Silvan tarihi: Mafarkın âbide ve kitabeleri* isimli Silvan Ulu Cami kitabelerini de kapsayan çalışmadır.

Sunguroğlu (1958), *Harput yollarında* isimli Elazığ şehrini kapsayan 4 ciltlik kitabının ilk cildinde Harput Ulu Cami'nin, mekânsal tanımlamalarına yer vermiştir. Caminin tipolojik özelliklerine değinilmiştir. *Harput'ta Ulu Cami* isimli makalesi ile Akçay (1966) ise, caminin mevcut durumu üzerinden detaylı olarak planına, minaresine ve mimari elemanlarına değinmiştir.

Altun (1971a), *Mardin'deki Türk devri mimarisi* eserinde, Mardin şehri özelinde anlattığı kitabında Artuklu dönemi eserlerinin planlarını ve yapısal özelliklerini ele almıştır. Beraberinde Mardin Ulu Cami üzerine yapılan çalışmaları Altun (1971b), *Mardin Ulu Camii ve Çifte Minareler üzerine birkaç not* başlığı altında caminin görsellerine ve güncel durumunu anlatan mekânsal tanımlamalarına yer vermiştir. Altun (1973), *Harput Ulu Camiinin durumu* isimli yazısında ise tez kapsamında incelenecek olan Harput Ulu Caminin restorasyon ve dönüşüm süreçlerini ele almıştır. Yapının malzemesi, planı ve mimarisi ile Artuklu devrinden daha farklı bir karaktere sahip olduğuna ve bu farklılıkların neler olduğuna değinmiştir.

Anadolu'da hüküm süren devletler üzerine araştırmalar yapan Turan (1973), *Doğu Anadolu Türk Devletleri Tarihi* isimli Türklerin Anadolu'ya geliş sürecini ele aldığı eserinde, Artuklu dönemini de konu kapsamına dahil etmiştir. Devletin siyasi ve idari kadrosu, iktisadi yükseliş ve şehirler, inşa ve imar faaliyetleri, yezidiler ve siyasi bolleri, etnik durum ve münasebetleri alt başlıklarında Artukluların tarihini ele almıştır. İnşa ve imar faaliyetleri başlığında Artuklu döneminin ilk mimari eserlerine yer vermiştir.

Altun (1978) *Anadolu'da Artuklu devri Türk Mimarisi'nin gelişmesi* isimli kitabında, Artuklu döneminde inşa edilen yapılarda yer alan kitabelerin açıklamalarına, malzeme kullanımlarına, yapım tekniklerine, restorasyon süreçlerine, görsellerine ve planlarına yer vermiştir. Kitap, Artuklu dönemi yapıları hakkında bilgiler aktarması açısından mimarlık tarihinde önemli bir yer edinmektedir.

Bakırer (1980), *Harput Ulu Camii Minaresi* adlı makalesinde, öncelikle yapı ile ilişkili tarihleme sorununa değinmiş, ardından çalışmanın esas konusu olan minarenin yapımında malzeme seçimlerine ve gerçekleştirilen örgü tiplerine yer vermiştir. Minare özelinde yapılmış ilk çalışmadır.

Aslanapa (1991), *Anadolu'da İlk Türk mimarisi başlangıç ve gelişmesi* isimli kitabında, Malazgirt zaferinden sonra Anadolu'ya hakim olma süreci ile başlayan Türklerin cami yapılarını ele almıştır. Artuklu camilerinin üslubundan ve karakteristik özeliklerinin birbirine olan benzerliğine değinmiştir.

Alptekin (1991), *Artuklular* isimli eserinde, Artuklu beyliğinin "Hısınkeyfa, Mardin, Harput" olmak üzere kollarını ayırarak ele almış ve bu kollarda ortaya çıkan teşkilatlanma biçimlerine ve mimari eserlere yer vermiştir. Farklı Artuklu kollarında gelişen mimari eserlerin tespit edilmesinde kolaylık sağlamıştır.

Artuklu dönemi üzerine birçok çalışması olan Altun, 1991 yılında *Artuklu sanatı* isimli eserinde dönemin hamam, medrese, cami vb. gibi bütün fonksiyonların sanatına genel hatlarıyla yer verdiği çalışmasını yayınlamıştır. Altun'un yaptığı çalışmalar, Artuklu dönemi eserleri hakkında birçok bilgiye erişimi kolaylaştırması ve eserlerin yazıldığı dönemde kayıt altına alınmış olması açısından büyük önem arz etmektedir.

Durukan (1995), *Artuklu mimarisinin düşündürdükleri* isimli yazısında Artuklu beyliğinin gelişimi ile beraber ortaya çıkan mimari yapısına değinmiştir. Surlar, köprüler, camiler, mederseler, hamamlar, saray ve köşkler, hanlar, külliyeler olarak yapı tiplerini incelemiştir. Özellikle Silvan Ulu Cami'nin rölöve planlarına ve kesitlerine yer vererek cami ile ilgili belgeleri genişletmiştir. Camilerin mimari açıdan değişimini belgeleyen Durukan (1999), *Harput Ulu Cami'nin düşündürdükleri* yazısında ise caminin yapısal özelliklerini detaylı olarak tanımlamış ve rölöve, restitüsyon planlarına yer vermiştir. Harput Ulu Cami hakkında restitüsyon çalışmasına tamamen ayrı başlık açan tek kaynak olmasından dolayı önemli bir yere sahiptir.

12. Yüzyıl Anadolu Türk Camileri adlı makalesinde Güler ve Aktuğ Kolay (2006), Anadolu'da cami yapılarının ilk devrini oluşturan 12. yüzyıl camilerini ele almışlardır. Tez kapsamında ele alınan Mardin Ulu Cami'nin de bulunduğu çalışmada, camilerin mimari

olarak değerlendirilmesine ve cami mimarisinin gelişim sürecine yer verilmiştir. Çalışmada, kronolojik olarak camilerin inşa tarihleri de detaylandırılmış halde yer almaktadır.

Çetin (2008), *Silvan Ulu Camii'nin plan bakımından bir değerlendirmesi ve Anadolu Türk cami mimarisine katkıları* adlı eserinde Artuklu dönemi cami tipolojisinde önemli bir yeri olan Silvan Ulu Cami'yi konu almıştır. Artuklu camilerinin ve özellikle Silvan Ulu Cami'nin döneminden sonra inşa edilen Anadolu Türk Cami mimarisinde köprü görevi gördüğüne ve birçok cami örneğinde etkisinin görülebileceğine değinmiştir.

Mimari yapılarda süsleme alanında çalışmaları bulunan Baş (2009), *Silvan Ulu Cami mimari süslemeleri* adlı eserinde yapıya hangi dönemlerde nasıl süslemelerin eklendiğini tespit etmiş ve süslemelerin çizimlerine yer vermiştir.

Şimşek (2010), *Harput Ulu Cami* isimli yüksek lisans tezinde, caminin tipolojik bilgilerine, malzeme-teknik-süsleme özelliklerine değinmiştir. İlk olarak Artuklu dönemi içerisindeki yeri ve önemi belirlenmiş, ardından Anadolu'da ve çevresinde benzer örnekler ile karşılaştırılarak değerlendirmesi yapılmıştır.

Denknalbant (2012), *Ulucami (Silvan Ulu Cami)* eserinde cami yapısının mekânsal ve yapısal tanımlamalarına ve dönem içerisinde aldığı hasarlara yer vermiştir. Aynı cilt içerisinde Uluçam (2012a) *Ulucami (Mardin)* ve Uluçam (2012b) *Ulucami (Harput Ulu Cami)* adlı eserlerinde Artuklu dönemi camileri hakkında önemli yapısal ve mekânsal tanımlamalara yer vermiştir.

17. yüzyılda Harput Ulu Cami isimli makalesinde Uzun (2014), caminin kısa mimari özellikleri ile vakıfları hakkında bilgilere yer vermiştir.

Saylan (2014), *Artuklu dönemi camilerindeki bezemeler* başlıklı yüksek lisans tezinde, mimari üslubu ve planı bakımından Silvan Ulu Cami ile Artuklu dönemi camilerinin başladığını belirtmiş ve camilerde yer alan bezemeleri detaylandırarak incelemiştir. Artuklu dönemi camilerinin malzemesi ve mimarisi gibi detaylı bilgilere de yer verilmiştir. Aynı yıl Turan (2014), *Artuklu dönemi tarihi yapılarındaki figürlü süslemeler ve Orta Asya kültürünün etkileri* başlıklı tezinde Artukluların hakimiyet sürdüğü bölgelerin kültürel etkileşimlerinin yansımalarını karşılaştırarak sanatsal anlayışlarını incelemiştir.

Erdal (2017), *Mardin Ulu Cami üzerine yeni görüşler* isimli yazısında yapıdaki tarihlendirme sorununu ele almış ve cami hakkında yazılan eserleri camide bulunan kitabeler ile beraber incelemiştir. İnceleme sonunda hem vakifiyelere göre hem de kitabelere göre yapının 573/1178 yılından önce yaptırıldığı ve 1170li yıllarda, sonuç olarak her koşulda Artuklu döneminde yapıldığı sonucuna varmıştır.

Çağlayan (2017a), Mardin anıtsal yapılarını ele aldığı doktora tezinde, özellikle Mardin Ulu Cami'nin detaylı bilgilerine ve görsellerine yer vermiştir. Artuklulardan Osmanlılara, Osmanlılardan Cumhuriyete ve Cumhuriyetten günümüze kadarki dönemlerde yapının geçirdiği müdahaleleri ele almış ve çizimler üzerine işlemiştir. Dönemler arası geçişlerde yapılan yanlış tamamlamaları ve müdahaleleri tanımlamıştır. Özellikle Mardin Ulu Cami'nin restitüsyon çalışmasına detaylı çizimler ile yer veren nadir çalışmalardandır. Çağlayan (2017b), *Mardin Ortaçağ anıtları ve yapım teknikleri* başlıklı kitabında ise Ortaçağ anıtı olarak Artuklu dönemi eserlerinden Mardin Ulu Caminin detaylı analizlerine yer vermiştir. *Ortaçağ'dan günümüze bir anıt: Mardin Ulu Cami* adlı makalesi ile de Çağlayan (2018), Ulu Cami özeline ilişkin yaptığı tespitlere ve çalışmalara yenilerini eklemiştir.

Ergin ve Dal (2019) çalışmalarında, Silvan Ulu Cami'nin mevcut durumunun konstrüksiyon sistemi, yapım malzemeleri ve teknikleri hakkında bilgiler yer almaktadır.

Kutlu ve Soyluk (2021) çalışmalarında, Artuklu dönemi mimarisinin Anadolu cami tipolojisindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, toplumsal bellekte ve hüküm sürdüğü bölgede önemli yer edinen Artuklu dönemi mimrasinin Anadolu topraklarında Selçuklu döneminden başlayarak Osmanlı İmparatorluğu ve Cumhuriyet Dönemi yapıları üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Tez konusu olan Artuklu dönemi eserleri ile Mardin Ulu Cami ve Melik Mahmut Cami yapıları hakkında yapılan mevcut çalışmalar incelendiğinde; yapı malzemesi, yapım tekniği, yapısal sistem özellikleri ve taşıyıcı sistem davranışları açısından mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin beraber değerlendirildiği bütüncül bir çalışmanın olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmanın içerisinde mevcut çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında camilerin inşa edildiği tarihler incelendiğinde, Artuklu dönemi yapılarının birçoğunun DAFS üstünde bulunduğu görülmüştür. Camilerin, dönemler içerisinde fay sistemi üzerinde yaşanan yıkıcı depremlere

rağmen ağır hasarlar almadan günümüze kadar gelmeleri, dikkat çekici noktalardan biri olmuştur. Tez kapsamında, camilerin fay hattına yakın mesafelerde bulunmalarına rağmen yaklaşık 1000 yıl süreyle ağır hasar almadan atlatmasını sağlayan yapım teknikleri ve taşıyıcı sistem özelliklerinin araştırılması gerektiği düşünülmüştür. Yapıların strüktürel davranışlarının belirlenmesi, dönemler içerisinde sismik aktiviteler karşısında nasıl davrandığına dair yorumlar yapılmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, bölgede gerçekleşebilecek bir sismik aktivite sırasında Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Caminin gösterecekleri strüktürel davranışların hem yapısal analiz programları için veri sağlayarak hem de dijital olarak belgelenerek bir pratik yöntem ile belirlenmesi önem arz etmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili yapılmış çalışmalar

Tarihi binaların strüktürel davranışlarının ve performanslarının değerlendirilmesi, yapının kayıp riskinin yanı sıra küresel veya kısmi bir çöküş durumunda kültür ve ekonomi üzerindeki potansiyel etkisi nedeniyle önemli ve güncelliğini kaybetmeyen bir konudur. Dolayısıyla, bu tür kültürel miras yapılarını korumak için deprem gibi yıkıcı etkileri olan afetler sırasında uzun süreli hasarların önlenmesi gerekmektedir. Önlemlerin doğru bir şekilde alınabilmesi için yapıların gerçeğe yakın davranışlarının simülasyonları gerçekleştirilmelidir. Oluşturulan modeller ve yük tanımlamaları ile yapının, yoğun gerilme ve deformasyon bölgeleri tespit edilmektedir. Bu bölgelere göre, her an gerçekleşme ihtimali olan doğal afetler öncesinde önlemler almak mümkündür.

Yapısal modellerin oluşturulması sürecinde, uzun yıllardır sonlu elemanlar yöntemi önemli bir yer tutmaktadır. Literatürde yer edinmiş, tarihi binaların yapısal davranışlarının klasik modelleme tekniği ile modellenerek belirlendiği yöntemler kronolojik olarak ele alınmıştır. Teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak bilgisayar sistemleri ve kullanılan yardımcı programlar arasındaki veri aktarımlarının kolaylaşmasının, sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı süreçlerin de kolaylaştırılmasına ve hızlandırılmasına fırsatlar sunabileceği düşünülmektedir.

A Study of structural behavior of the Şehzade Mehmet Masque başlıklı yüksek lisans tezinde Ünay (1988), Şehzade Mehmet Cami'nin yapısal davranışını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmiştir.

Mele ve De Luca (1970), *Behaviour and modelling of masonry church buildings in seismic regions* başlıklı çalışmalarında, yığma sistemli kilise yapısının sismik davranışlarını analiz etmişlerdir. Yapının sismik davranışının bölgelere göre belirlendiği çalışmada, üç boyutlu modelde tanımlanan ve kiliseyi oluşturan farklı 2D elemanlar üzerindeki elastik analizin sonuçları, elemanların nihai kapasitesi ile karşılaştırılmıştır.

Küçük Ayasofya Camii'nin doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerini Koçak (1999), sonlu elemanlar yöntemine dayalı LUSAS analiz programını kullanarak statik ve dinamik yükler altında gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucunda 14 maddeden oluşan modelleme, deney ve analiz süreçleri ile ilgili örneklemesi üzerinden verilere yer vermiştir.

Lourenço (2002) makalesinde, tarihi yapıların analiz olanaklarını ele almış ve bir dizi yapısal modelleme tekniğinde kılavuz olabilecek yöntemler önermiştir. Çalışmada, farklı yapısal elemanların modellenmesine yer veren Lourenço, doğrusal olmayan analizlerde uzman kişilerin de sürece dahil edilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Giordano, Mele ve De Luca (2002)'de, yığma yapıların analizi için farklı sayısal tekniklerin uygulanabilirliğini araştırmış ve sonuçları yığma bir numune üzerinde elde edilen deneysel test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Üç farklı sayısal teknik analizlerinden biri olarak sonlu elemanlar yöntemi de ABAQUS programından faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, her modelde ortaya çıkan birtakım kısıtlara rağmen, test edilen örneklerin genel davranışının bir dereceye kadar doğru aktarılabildiği ve böylece yığma yapı elemanlarının incelenmesinde etkin bir kullanıma sahip olabileceği tespit edilmiştir.

Türkmen ve Bilgin (2002) farklı kubbe sistemlerinin statik yükler altındaki analizlerini, sonlu eleman modeline dayalı SAP2000 programını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda, örtü sisteminde taşıyıcı olan elemanların (kubbe, kemer, yarım kubbe ve pandantif) birbirleriyle olan yapısal etkileşimi belirlenmiştir. Bu elemanların yapısal davranışları, sayısal veriler ile ortaya konmuştur.

Bilgin (2006), *Mimar Sinan yapılarında kubbeli örtü sistemlerinin yapısal analizi* isimli çalışmasında, Mimar Sinan camilerinin dörtgen, altıgen ve sekizgen taşıyıcı sistemle desteklenen kubbelerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak statik yükler altında analiz etmiştir. Çalışmadaki modeller, taşıyıcı kemerlerin sütunlara oturduğu seviyeler için

oluşturulmuştur. Bunun nedeni, modelde oluşabilecek karışıklığı önlemek ve analiz sürecini kolaylaştırmak içindir. Analizler sonucunda, üst örtü sisteminde taşıyıcı elemanların yapısal etkileşimleri belirlenerek her sistemin davranışı incelenmiştir.

Öztaş (2009), yüksek lisans tezinde yığma yapılarda hasar nedenlerini ele almıştır. Ardından yığma yapıların güçlendirme yöntemleri güçlendirilmesi incelenmiş ve örnek bir yığma yapıda güçlendirme analizi yapılmıştır. Yapının malzeme özellikleri belirlenerek Sta4-CAD programı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda ise yapının mevcut duruma güçlendirme önerileri sunulmuştur.

Küçükdoğan, Kubin ve Ünay (2010), İstanbul'un tarihi yapılarının ve anıtlarının yapısal durum değerlendirmesine yönelik hazırlanan çalışmada, Stoudios manastırının sismik direncini gelecekteki etkilere karşı değerlendirmek amaçlanmıştır. SAP2000 programı kullanılarak modeller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, duvarları ayakta olan manastır yapısının çatlamaya veya kısmi çökmelere yol açabilecek aşırı çekme gerilmeleri nedeniyle hasara meyilli olduğunu ortaya koymuştur.

Şeker (2011), sonlu elemanlar yöntemi ile 28 adet Mimar Sinan camisinin statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Mimar Sinan camilerinin, ANSYS programı ile modelleri oluşturulmuş ve çeşitli oranlara bağlı parametreler belirlenerek yapıların davranışı belirlenmiştir. Çalışmada, Sinan camilerinin dış yükler altında yeterince dayanım gösterdiği ve sağlam olduğu, kubbelerin ise deprem sırasında önemli ölçüde etkilenebileceği ve hazırlanan modellerde camilerin davranışlarının yeterince doğru ve gerçeğe uygun yansıttığı sonucuna varılmıştır.

Korkmaz, Çarhoğlu, Usta ve Toker (2013), *Tarihi kiliselerin deprem davranışının Van Akdamar Kilisesi Örneğinde incelenmesi* başlıklı çalışmalarında, Türkiye 2007 deprem yönetmeliğinde 1. derece deprem bölgesinde bulunan tarihi kilisenin, deprem davranışını incelemişlerdir. Kilisenin yapısal analiz programı sap2000 ile modeli oluşturulmuş ve 23 Ekim 2011 tarihinde merkez üssü Van olan depreme ait ivme değerleri uygulanmıştır. Elde edilen analiz değerleri, Van Akdamar Kilisesinin Van depreminden etkilendiği ve daha büyük depremlerin olma ihtimaline karşı önlemlerin alınması gerektiği ortaya konmuştur.

Çarhoğlu, Zabin ve Korkmaz (2014), kümbet yapısının farklı deprem yükleri etkisindeki davranışlarını incelemişlerdir. Kars'ta bulunan kümbet, SAP2000 programı ile modellenmiş ve zaman tanım alanı yöntemi kullanılarak doğrusal elastik analizler gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan farklı 20 deprem yükü sonucunda yer değiştirme, gerilme ve kesme kuvvetleri değerlendirilmiştir.

Asteris vd. (2014), çalışmalarında depreme dayanıklı tasarım veya yığma yapı sistemlerinin değerlendirilmesi için bir metodoloji sunmuşlardır. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği, yığma yapıları etkileyen riskleri farklı depremsellik seviyelerine sahip Yunanistan, Portekiz ve Kıbrıs olmak üzere üç ülkede mevcut yığma binaların analizleri yoluyla kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile yapılarının deprem anında deformasyonunu azaltmak amacıyla müdahale tekniklerinin faydalı sonuçlar çıkardığı görülmüştür.

Korkmaz, Zabin, Çarhoğlu ve Nuhoğlu (2014), SAP2000 programı kullanılarak Rize'deki Kurşunlu Cami'nin modelini oluşturmuş ve 3 farklı deprem yükü uygulamışlardır. Model üzerinde zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir ve her bir ivme kaydı için yer değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Tarihi yığma yapının analiz sonuçları doğrultusunda taşıyıcı sistemine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır.

Chamaky (2014), *Tarihi yığma yapıların deprem analizi ve uygun güçlendirme teknikleri* başlıklı yüksek lisans tezinde, üç farklı tarihi yığma yapının güçlendirilmesini ele almıştır. Çalışmada İstanbul'da Çinili Karakolu, Kredi Han Binası ve Fatih İlköğretim Okulu örneklerinden yola çıkılarak sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve SAP2000 programı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Düzgün, Hatipoğlu, Artar, Yurdakul ve Öner (2015), Bayburt Zahit Efendi Cami'nin çeşitli deprem yükleri altında taşıyıcı sistem davranışını belirlemişlerdir. SAP2000 programıyla caminin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve çeşitli deprem yükleri uygulanmıştır. Bayburt merkeze yakın yerlerde gerçekleşen depremlerde yapının dayanımının yeterli olduğu ancak Düzce depremi etkisinde yeterli olmadığı görülmüştür. Analiz sonuçları Bayburt ve civarında Düzce depremi şiddetine yakın depremlerin gerçekleşmesi durumunda yapının hasar alabileceğini göstermiştir.

Dan, Herban ve Ionescu (2016), sismik bölgelerdeki tarihi yapılar için analiz, yeniden tasarım ve güçlendirme çözümlerine odaklanmıştır. Romanya'da eski malt binasına güçlendirme çözümleri tasarlanmış ve uygulanmıştır. Çalışmada odaklanılan çözümler maliyet, kolaylık, uygulama gibi kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda, aynı yapıda farklı durumlara göre farklı güçlendirme teknikleri uygulanmıştır.

Dabanlı (2016), doktora tezinde, Nur-u Osmaniye Cami'nin malzeme ve yapım tekniği araştırmaları sonucu yatay ve düşey yükler altındaki davranışını araştırmıştır. Cami'nin SAP2000 programı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve strüktürel davranışın belirlenebilmesi için yükler tanımlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda yapı için günümüzde herhangi bir taşıyıcı sistem müdahalesine ihtiyaç duyulmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Aksoy ve Aydoğmuş (2017), çalışmada çeşitli yapı malzemelerine ve düzensiz geometriye sahip Antalya Kargı Han'ın deprem etkisi altında yapacağı davranışı analiz edilmiştir. Yapının, sonlu elemanlar modeli SAP2000 programı oluşturulmuştur. Karmaşık geometriye sahip yapıların, bir bütün olarak modellenmesinin ve doğrusal elastik hesap yöntemlerinin kullanılmasının yeterli olduğuna değinilmiştir. Analizler sonucunda ise Kargı Han'ın depreme karşı dayanımının yeterli olmadığı tespit edilmiştir.

Çavuş ve Sözen (2018), araştırma makalesinde, çelik payandalarla güçlendirilmiş yığma yapının sismik analizini yapmışlardır. Analiz sonuçlarına göre de güçlendirmek amacıyla yapılan çelik payandalar incelenmiştir. Tokat Deveci Hanı'nı ele alan çalışmada, bulunduğu bölgenin deprem ve zemin durumu özelliklerine göre spektrum eğrileri dikkate alınmış ve yapı SAP2000 programında modellenmiştir. Yapıyı güçlendirmek amacıyla eklenen çelik payandaların deprem etkisinde yapıyı koruyamayacağı ancak yapıda oluşacak büyük hasarlarda duvarların devrilmesini önleyebileceği sonucuna varılmıştır.

Erdoğan (2018), sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Türk minarelerinin deprem performanslarını karşılaştırmıştır. Farklı devirlere ait en belirgin yedi örnek seçilerek analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle minareler modellenmiş ve 1999 Kocaeli depremi kayıtları kullanılarak zaman-tanım analizleri gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, Kalyan Minaresi (Buhara), Jam Minaresi (Afganistan), Ulu Cami (Sivas), İnce Minare (Konya), Ulu Cami (Bursa), Selimiye ve Üç Şerefeli Cami (Edirne) minareleri modellenmiştir. Çalışmanın

sonucunda yığma minarelerin deprem, taşıyıcı sistem ve yanal yüklerin karşılanması, strüktürel zorunluluklar ve daha birçok nedenlerle minarelerde önlemler alındığı görülmüştür.

Aslay ve Okuyucu (2020) çalışmalarının temel amacı, Erzincan Değirmenliköy kilisesinin apsis kaybının dinamik davranışını ve teknik nedenini anlamaktır. Bu bağlamda çalışmada, yapı hakkında teknik bilgiler incelenmiş ve makro modelleme tekniği ile mevcut durumu temsil eden bir yapısal model oluşturulmuştur. Günümüzde yıkık olan kilise apsisi de modellenmiştir ve gerçekleşmiş olan deprem kayıtları kullanılarak dinamik analizler uygulanmıştır. Daha sonra hesaplanan deformasyon ve gerilme değerleri üzerinden kilisenin sismik davranışı değerlendirilmiştir. Çalışmada kilise apsisinin deprem sırasında yapının tüm gövdesi ile bağlantı bölgeleri üzerinde hasar görmüş ve zamanla yapıdan ayrılmış olabileceği sonucuna varılmıştır.

Yazgan ve Ünay (2019), *Bursa, Yenişehir Sinan Paşa Külliyesi İmaretinin sayısal modellenmesi ve yapısal analizi* başlıklı çalışmalarında 16. yüzyıl Osmanlı Dönemi özellikleri taşıyan Bursa Sinan Paşa Külliyesinin sayısal modelini, SAP2000 programı kullanarak oluşturmuşlardır. İmaret yapısının özgün durumunda birçok kuvvete karşı dayanıklı olduğu ancak günümüzde yapıya zemin kotu altında eklenen betonarme mekanların, yapının zemin ve düşey yük dengesini bozduğu sonucuna varılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, yapının düşük kuvvetteki sismik hareketlerde dahi yıkılabileceği görülmüştür.

Gönül ve Sakcalı (2019), *Tarihi Irgandı köprüsünün deprem performansı* başlıklı çalışmalarında, tarihi Bursa Irgandı Köprüsünün deprem performansını incelemişlerdir. Sonlu elemanlar modeli ANSYS programında oluşturulmuş ve modal ve lineer dinamik analizleri yapılmıştır. 7 adet deprem kaydı uygulanan analizler sonucunda, köprüde oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları incelenmiştir.

Erdemir ve Başar (2019), Konya Merkez'de bulunan Hasbey Dar'ül Mescit yapısının deprem davranışlarını ele almışlardır. SAP2000 programında modellenen yapıda sabit yükler ve bölgeye özgü deprem spektrumuna ait yükler altında analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yapıda oluşan gerilme değerleri, yapının malzeme özelliklerinin

dayanım göstereceği sınır değerlerin altındadır. Dolayısıyla yapının günümüzde herhangi bir yıkım tehlikesinin bulunmadığı sonucuna varılmıştır.

Kocaman, Okuyucu ve Kazaz (2019), çalışmalarında Erzurum Lala Mustafa Paşa Cami'nin mevcut yığma malzeme modelleri incelenmiş ve teorik bir yaklaşım sunmuşlardır. SolidWork ve ANASYS programlarında yapısal modeller oluşturulmuştur. Teorik modal analizi, operasyonel modal analizi ile deneysel modal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre yapının 1992 Erzincan Depremi benzeri bir yer hareketinin meydana gelmesi durumunda yıkım tehlikesiyle karşı karşıya kalabileceği görülmüştür.

Sonlu elemanlar yönteminde modelleme tekniği ilgili yapılmış çalışmalar

Tarihi binaların strüktürel davranışlarının sayısal modellenmesi son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Gelişen bilgisayar teknolojisi, bu alanda farklı yaklaşımların da gelişmesine ve farklı yöntemlerin ortaya konmasında etkili olmuştur. Yığma yapılar gibi karmaşık geometrik özelliklere sahip yapılarda, yapım tekniği nedeniyle birden fazla malzemenin bir araya getirilmesi ve farklı doğrultuda farklı davranışlar sergileyebilmesi modelleme sürecini zorlaştırabilmektedir. Modellemede önemli olan husus yapının gerçek davranışının doğru bir şekilde temsil edilebilmesidir. Bu doğrultuda modeller üzerinde birtakım idealleştirmelere ve basitleştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla, modelleme süreci zaman alıcı olabileceği gibi bilgisayarların işlem ve hafıza kapasitelerine de zorlayabilmektedir. Uzun yıllardır teknolojide yaşanan gelişmelere rağmen sonlu elemanlar yönteminde model oluşturma süreci, en zorlu aşamaların başında gelmektedir ve literatürdeki birçok çalışmada bu durum ele alınmaktadır.

Chiostrini, Foraboschi ve Vignoli (1992), çalışmalarında yığma yapıların sayısal modelleme sürecinin, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve statik-dinamik yüklere karşı doğrusal olmayan davranış göstermesi nedeniyle karmaşık bir süreç olduğuna değinmiştir. Bununla birlikte, çalışmada farklı pratik uygulamalar incelenmiştir. Bunun sonucunda, sayısal yöntemler kullanılarak yapıların davranışının analiz edilmesinin, en etkili sonuçlara ulaşmanın tek uygun yolu olduğu belirtilmiştir.

Armstrong (1994), *Modelling requirements for finite-element analysis* başlıklı çalışmasında yapısal analiz sürecinde sonlu problemin doğru modellenebilmesi için yapının geometrisinin

önemli ölçüde idealleştirilmesi gerektirdiğine değinmiştir. İdealleştirme sürecinin zorlu ve zaman alıcı olduğundan bahsedilen çalışmada, geometrik modellerin oluşturulduğu sırada alternatif idealleştirme yöntemleri geliştirilmiştir.

Lourenço (1998), *Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry* isimli çalışmasında, tarihi yapıların analizinde, çok sayıda bilinmeyen etki faktörü olması nedeniyle zor bir iş olduğuna değinmiştir. Bu tür yapıların davranışını anlamak ve farklı etki faktörlerinin önemini kontrol etmek için gelişmiş analiz ve modelleme tekniklerinin kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

Augusti, Ciampoli ve Giovenale (2001), *Seismic vulnerability of monumental buildings* başlıklı çalışmalarında, anıtsal yapıların, tanımları gereği, herhangi bir standart yapısal şemaya indirgenemeyecek benzersiz binalar olduğundan ve bu durumun sismik güvenilirliklerini değerlendirmeyi zorlaştırdığından söz etmişlerdir. Prensip olarak, anıtsal binaların yapısal davranışının tahmini, diğer inşa edilmiş yapılardan farklı olmadığını ancak, yapıların kendilerine özgün geometrisi ve malzeme özellikleri nedeniyle daha zorlu olduğu belirtilmiştir.

Ünay (2002), *Tarihi yapıların depreme dayanımı* başlıklı kitabında, tarihi yapıların strüktürel sisteminin genellikle çok karmaşık üç boyutlu formlara sahip olduğunu ve bu durumun yapının strüktürel davranışının belirlenmesini zorlaştırdığını belirtmiştir. Bu durumda, tarihi yapılar için mevcut strüktürel davranışının tespitinde en etkili tekniğin nümerik analiz olduğuna ve en iyi yöntemlerden birinin sonlu eleman analizi olduğuna değinmiştir. Ancak tarihi yapıların çoğunlukla çok karmaşık bir davranış sergilediğini ve yapıyı modellemek için birçok idealleştirmenin yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu gereklilik sonucu oluşacak olan modellemelerin de yapısal davranış belirleme sürecinde en zorlu ve zaman alıcı olan süreç olduğunu ifade etmiştir.

Lourenço (2002), çalışmasında yığma sistemli yapıların, strüktürel modellerinin oluşturulmasındaki zorluklara ve tarihi yapıların karmaşık geometrisinde idealleştirmelerin yapılması gerektiğine değinmiştir. Yapılan idealleştirmelere uygun olacak şekilde sonlu eleman tiplerinin tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca tarihi yapıların modellenmesi sürecindeki zorluklara maddeler halinde yer vermiştir. Çalışmada farklı yığma yapı bileşenleri ayrı ayrı modellenmiş ve yapısal davranışları incelenmiştir. Son

yıllarda tarihi yapıların yapısal analizi alanında büyük ilerlemeler gözlemlenmiş olsa da, başarılı ve uygun maliyetli bir müdahalenin gerçek bir zorluk olmaya devam ettiği sonucuna varılmıştır.

Akan ve Özen, (2005), Bursa Yeşil Türbe'nin strüktürel davranışını analiz ettiği çalışmalarında, tarihi yapıların günümüzde inşa edilen yapıların strüktürel sisteminden farklı olması nedeniyle analizinin oldukça zor olduğuna değinmişlerdir. Sonlu eleman modeli oluşturulan türbenin, fiziksel-mekanik özellikleri nedeniyle model oluşturma sırasında idealleştirmelerin ve malzeme özelliklerinin tanımlanmasının zorluğuna yer verilmiştir.

Dabanlı (2008), tarihi yapıların gerçek davranışlarının model aracılığıyla elde edilebilmesi için bazı idealleştirmelere ve basitleştirici varsayımlara gereksinim duyulduğunu belirtmiştir. Farklı idealleştirmeler ve modelleme ilkeleri kullanılarak kabul edilen yaklaşımın sınırları dahilinde hesaplamaların yapılabileceğine değinilmiştir. Ayrıca, strüktürel davranışın değerlendirildiği bu süreçte, harcanacak zamanın ve bütçenin de belirleyici olduğu vurgulanmıştır.

Betti ve Vignoli (2008), Romanesk üslubuna sahip bir kilisenin modelinin oluşturulduğu çalışmalarında, tarihi yığma yapıların ve özellikle kilise gibi düzensiz geometrilere sahip yapıların sismik davranışının analizinin; duvar malzemesinin doğrusal olmayan davranışının zor sayısal modellemesi, duvar yapı elemanlarının mekanik özelliklerinin eksik deneysel karakterizasyonu ve geometrik konfigürasyonun karmaşıklığından dolayı oldukça zor bir süreç olduğuna değinmiştir. Çalışmada, doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılarak tarihi yapıların statik ve dinamik analizlerini gerçekleştirmek üzere sonlu eleman metodolojisi tanımlanmış ve kilisenin modellenmesi ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Can vd., (2012), *Düzensiz geometrik şekile sahip tarihi yığma binaların sismik davranışı* başlıklı çalışmalarında tarihi yapıların deprem davranışlarını analiz etme tekniklerinde büyük gelişmeler yaşanmasına rağmen halen en önemli ve zaman alıcı aşamanın tarihi yapının modellenme süreci olduğuna değinmişlerdir. Çalışmada, Küçük Mustafa Paşa Hamamı'nın yapısal analiz programı ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli üzerinde iki ayrı yükleme durumu uygulanmıştır.

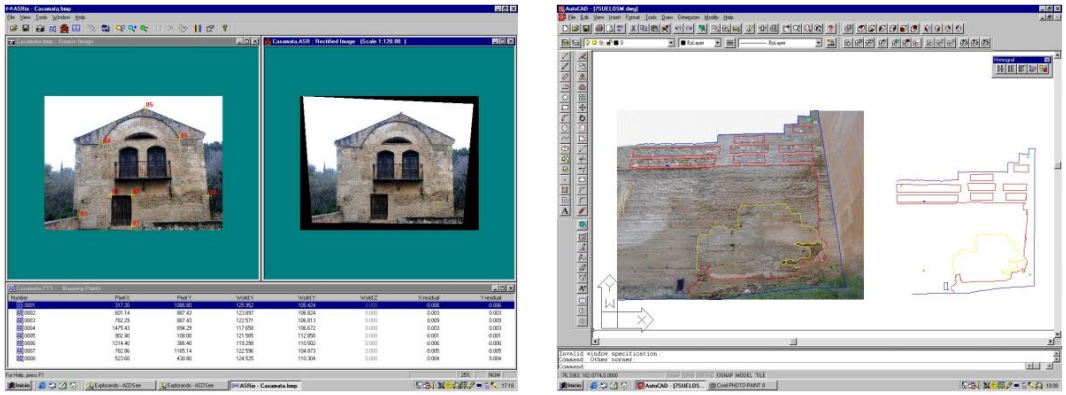
Fotogrametrik modelleme tekniğinin mimarlık alanında kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmalar

Uzun yıllardır farklı alanlarda kullanılan fotogrametrinin mimarlık alanında da kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Hava fotoğraflarının çekilmesi ile kentsel ölçekte de gerçekleştirilebilen bu süreç, günümüzde koruma gibi daha hassas detayların gerektiği çalışmalara da entegre edilmeye başlanmıştır. Teknolojik gelişmeler ile birlikte yeni gelişmelere açık olan fotogrametrik modelleme tekniğinin kullanımının birçok farklı alanda yaygınlaşabileceği ve bu teknik ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların sayısının artması gerektiği düşünülmektedir.

Blachut ve Burkhardt (1989), fotogrametrinin 20. yüzyılın ortalarında coğrafi bilgi sistemi (CBS) için birincil kaynak verileri sağladığını ve zamanla fotogrametrik tekniklerin mimarlık, mühendislik, arkeoloji vb. gibi birçok alanda gelişim gösterdiğine değinmişlerdir.

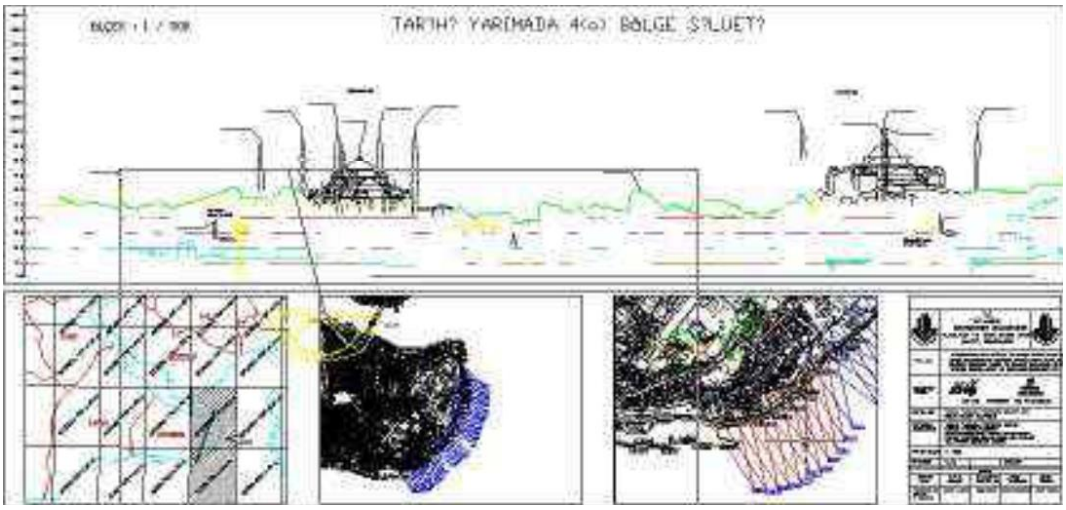
Hemmleb ve Wiedemann (1997) çalışmalarında, dijital düzeltme, parametrik yüzeylerin sarmalanması ve diferansiyel düzeltme yöntemleri gibi tek görüntü fotogrametrik tekniğine farklı bir bakış sunmuşlardır. Düşük maliyetli kişisel bilgisayarlarda bile dijital görüntü işleme yöntemlerini kullanarak ortogörüntülerin üretilebileceğine değinilmiş ve tarihi Halle Doğu Kulesi üzerinde bu üretime yer vermişlerdir. Çalışmanın sonucunda, sunulan yaklaşımlarla oluşturulan temsillerin, geometrik çözümler ile birleştirilmesi ile ilgili alana çok büyük miktarda bilgi sağlayacağını vurgulanmış ve bu teknik ile üretimlerin mimari görselleştirme ve belgeleme alanında daha fazla kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Almagro (2001), çalışmasında Nickerson ve Streilein tarafından geliştirilen ASRix doğrultucu yazılımını (digital image rectifier) kullanmıştır. Yazılım ile tarihi bir binanın cephesi için çekilen fotoğraf düzenlenerek çizim aşamalarında kullanılmıştır. Tek bir cephe için sekiz kontrol noktası ölçülmüştür (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. ASRix doğrultucu yazılımında fotoğrafının dönüştürülmesi (Almagro, 2001)

Kentsel ölçekte fotogrametrik tekniklerin kullanıldığı 1/500 ve 1/1000 ölçekli dokümantasyon çalışmaları da bulunmaktadır. Külür, Altan, Duran ve Kardas (2003), fotogrametrik yöntemler kullanarak İstanbul'un tarihi yarımadasının belgelendiği çalışmada, 1/500 ölçeğinde silüetler elde edilmiştir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Tarihi Yarımada'nın silüet haritası (Külür vd., 2003)

Duran ve Toz (2003), çalışmalarında dijital fotogrametri ile CBS'nin birlikte kullanılabileceği ve ilgili kişilerin erişebileceği bir ortam oluşturmayı amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda tarihi binaların fotogrametri tekniği ile üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve görselleştirilmiştir. Oluşturulan veriler ara programlar kullanılarak sanal ortama aktarılmıştır. Çalışmada, CBS ve fotogrametri tekniğinin sürekli güncelleştirilmeye açık ve sağladığı olanaklar düşünüldüğünde beraber kullanıma elverişli olduğu sonucuna varılmıştır.

Turan (2004), çalışmasında mimari fotogrametri alanındaki çağdaş gelişimleri değerlendirmiştir. Çalışmanın amacı, fotogrametri tekniğinin çağdaş araç ve teknikleri ile uygulama alanındaki farklılıklarını tespit etmek ve ortaya çıkan sonucu mimari koruma alanındaki gereklilikler için yorumlamaktır. Çalışmada konu ile ilgili literatür araştırmaları yapılmış, kişiler ve kuruluşlar ile görüşülmüş, kullanım ile ilgili bilgiler sınıflandırılmıştır. Güncel fotogrametrik teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen belgeleme sürecinde ortaya çıkan verilerin, analog tekniklere oranla daha zengin olduğu ve yalnızca iki boyutlu üretimlerin değil, üç boyutlu modellerin de büyük faydalar sağladığı sonucuna varılmıştır.
Fotogrametrinin tarihi yapıların rölövelerinin hazırlanması ve belgelenmesi sürecine dahil edilmesi konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Erdoğan (2005) çalışmasında, 7 adet tarihi çeşmenin restorasyon projesinde altlık olarak kullanılması amacıyla fotogrametri tekniği ile hazırlanan rölöve çizimlerine ve fotogrametrinin klasik ölçme tekniklerine göre avantajlarına yer vermiştir.

Avşar (2006) yüksek lisans tezinde, Mimar Sinan'ın eserlerinden biri olan Kapuağası Köprüsü'nü fotogrametrik tekniklerle iki ve üç boyutlu verilerinin üretilmesini amaçlamıştır ve fotogrametrik tekniklerle gerçekleştirilen belgeleme çalışmalarının avantajlarını ortaya koymuştur.

Yakar ve Yılmaz (2008) çalışmalarında, Tarihi Horozluhan'ın fotogrametrik teknikler ile belgelenerek veriler üzerinden yapının rölövelerini ve üç boyutlu modelini elde etmişlerdir. Photomodeler ve AutoCAD programlarının entegre kullanıldığı çalışmada başarılı sonuçlar alındığı vurgulanmıştır.

Baltacı ve Yeğin (2011), *Mimari fotogrametri yöntemlerinin rölöve çalışmaları açısından değerlendirilmesi* başlıklı çalışmalarında rölöve çalışmalarında kullanılan mimari fotogrametri tekniği ile geleneksel tekniklerin performans değerlerini karşılaştırmışlardır. Avantaj ve dezavantajlara değinilen çalışmanın sonucunda, modern belgeleme tekniklerinin belgeleme çalışmalarına dahil edilmesinin vazgeçilmez olacağını ve lisans ve lisansüstü eğitimlerde müfredatlara dahil edilmesi gerektiğine yer verilmiştir.

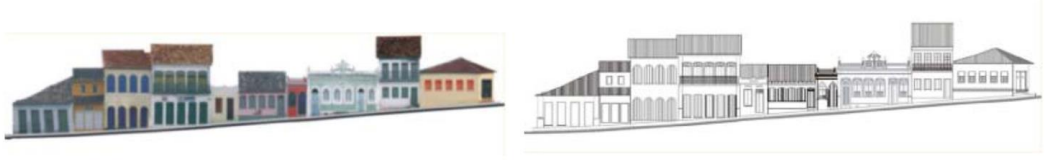
Nickerson ve Chapiro (2005), ASRix yazılımının basit bir dijital görüntü doğrultucu olarak potansiyelini göstermiş ve tarihi mekânda bir dizi yapı serisinin görüntülerini yazılım sayesinde modele dönüştürmüşlerdir (Şekil 1.5). Çalışma, düzeltme yazılımı ASRix

tanıtılmaktadır. Rektifikasyon yazılımlarının karmaşık ölçme araçları olduğu düşünüldüğü için mimar restoratörler tarafından kullanılmadığı belirtilmiş ve sanılanın aksine fotoğraflama tekniği ile cephe belgelemelerinin kolay bir kullanım olduğu vurgulanmıştır. Program, bir Uluslararası Koruma Çalışmaları Merkezi ve Kültür Varlıklarının Restorasyonu (ICCROM), kursu sırasında Roma'daki bir dizi tarihi sokakta test edilmiştir ve ICCROM'un belgeleme derslerinde bir dijital düzeltme programının kullanılması, düzeltme tekniğinin tarihi bina cephelerinin uluslararası bir belgeleme tekniği olarak kabul edildiğini kanıtlamaktadır.



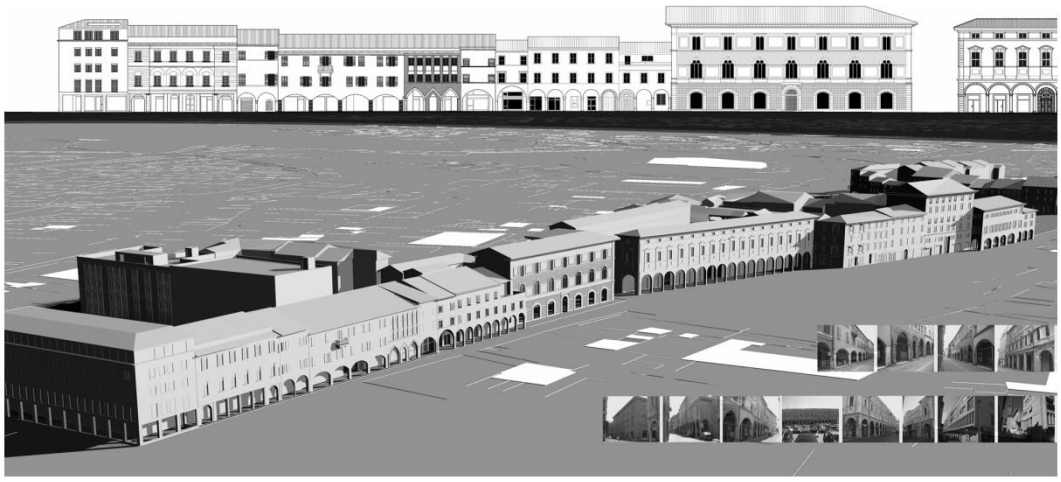
Şekil 1.5. ASRix doğrultucu yazılımında kolajları üretilen sokak çalışması (Nickerson ve Chapiro, 2005)

Topografik araştırma, dijital fotogrametri, CBS, üç boyutlu modelleme ve lazer tarama gibi bir dizi dijital teknolojinin deneyimlendiği Amorim (2007) çalışmasında, miras belgelemede birleştirilmiş teknikler kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, seçilen tarihi şehir merkezi için kapsamlı bir veri bankası oluşturmaktır. Brezilya'da tarihi bir şehir merkezindeki bir dizi bina cephesinin ortofotoları, PhotoModeller programıyla oluşturulmuştur (Şekil 1.6). Ortofotoları geliştirmek için Adobe Photoshop programından faydalanılmış ve AutoCAD programında vektörel çizim haline dönüştürülmüştür. Sırasıyla caddede yer alan tarihi yapı cephelerinin kotları elde edilmiş ve çalışmanın sonucunda koruma amaçlı imar planının karar aşamasında PhotoModeller'da düzeltilen görüntülerden yola çıkılarak hazırlanan ölçekli çizimlerin yeterli olabileceğine değinilmiştir.



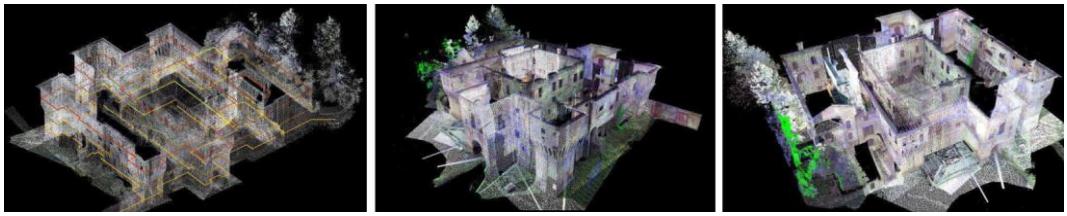
Şekil 1.6. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen ortofotolar ve cephe çizimleri (Amorim, 2007)

Ballabeni, Angelillo ve Modde (2007) çalışmasında, İtalya, Cesena şehir merkezinde kentsel tarihi mirasın temsili için bir dizi belgeme tekniğini birleştirmişlerdir. Dijital fotogrametri, doğrudan ve dolaylı metodolojiler kullanılmıştır (Şekil 1.7). Çalışmanın problemi, bina yüksekliklerinin yol genişliğine oranı olarak belirtilmiştir ve geniş açılar kullanılarak tüm cephenin fotoğrafını çekmek zorluk çıkarmıştır. Bu özel problem, her bina için fotoğraf sayısında bir artış gerektirmiş ve hem fotoğraf sayısını azaltmak hem de daha nitelikli sonuçlar elde etmek amacıyla balık gözü lens kullanılmıştır. Problem için ikinci bir geliştirilen teknik de lazer teodolit kullanımı ile sadece fotoğrafların düzeltilmesi için gerekli kontrol noktaları değil, cephelerin genel hatları ile yükseklikleri ölçülmüştür. Düzeltilen her görüntü, parlaklık ve kontrast için kırpılıp dengelenmiş, ardından genel anahatla ilgili kontrol noktaları yardımıyla tüm sokak cephesinin dijital bir fotogrametrik görüntüsü oluşturulmuştur. Çalışmada, fotogrametri ile edilmiş cephe görüntüsü üretimlerinin sokak cephelerinin siluetinin belgelenmesinde önemi vurgulanmıştır.



Şekil 1.7. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen tarihi sokağa cephe çizimleri ve üç boyutlu modeli (Ballabeni vd., 2007)

Oreni, Fassi, Brumana, Prandi ve Tuncer (2007), koruma ve restorasyon projelerinin geliştirilmesinden önce tarihi yapıların belgelenmesinde farklı tekniklerle toplanan farklı geometrik verilerin entegrasyonunun her zaman düşünülmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, tarihi bir şehir merkezinin belgelenmesi için lazer tarama, topografik araştırma ve fotogrametrik araştırma teknikleri birleştirilmiştir (Şekil 1.8). Büyük ölçekli yapılarda iç ve dış mekanların belgelenmesi için lazer tarayıcı ile nokta bulutlarının elde edilmesi; ancak, küçük ölçeklilerde farklı tekniklerin kullanılmasının uygun olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.8. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen üç boyutlu nokta bulutu modelleri (Oreni vd., 2007)

Yılmaz, Yakar, Gulec ve Dulgerler (2007), *Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage* isimli çalışmalarında öncelikle, kültürel mirasın gelecek nesillere aktarılmasındaki en önemli durumun hassas bir belgeleme olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada fotogrametri tekniği kullanılarak tarihi yapıların ölçülü çizim projelerine katkısı değerlendirilmiştir. Konya'da iki kez yangına maruz kalan tarihi bir yapının fotoğraflanarak yangın öncesi ve sonrası durumu ortaya konulmuştur. Ayrıca binanın cephe çizimleri ve 3 boyutlu modeli fotogrametri tekniği kullanılarak tamamlanmıştır.

Saygı (2009), çalışmasında İzmir'de bulunan Necatibey Bulvarı'nı fotogrametrik teknikler ile belgelemiştir (Şekil 1.9). Çalışmada, 1/200 ölçekli koruma çalışmalarında karar alma sürecini yönlendirebilecek belgelerin oluşumuna katkı sağlamak amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında bulvar üzerindeki cephelerin fotoğrafları çekilerek görüntüler oluşturulmuştur. Bunun sonucunda sokak kesitinin tarihine yönelik dönüşümler ve değişimler değerlendirilmiştir. Çalışmada, koruma alanında hızlı ve pratik bir şekilde fotogrametrik tekniğinin kullanılabileceği ve dijital fotogrametrinin birçok açıdan veri oluşturması nedeniyle elverişli olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.9. Dijital belgeleme teknikleri kullanılarak elde edilen cephe görüntüleri (Saygı, 2009)

Korumaz, Dülgerler ve Yakar (2011), çalışmalarında, koruma ve belgeleme sürecinin önemine değinmiş ve belgeleme çalışmalarında kullanılan çağdaş tekniklere yer vermişlerdir. Çalışma kapsamında Konya Karatay ve Sırçalı Medresesi fotogrametrik teknik ile belgelenerek rölöve çizimleri oluşturulmuştur. Farklı belgeleme teknikleri ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. Uygulanan fotogrametrik tekniğin kültürel mirasların gelecek nesillere aktarılması sürecinde yapılacak belgeleme çalışmalarında kullanımının arttırılması gerektiği belirtilmiştir.

Westoby, Brasington, Glasser, Hambrey ve Reynolds (2012), çalışmalarında, farklı ölçeklerde yüksek çözünürlüklü bilgi birikimleri oluşturabilmek amacıyla maliyeti düşük, kullanıcı dostu olduğu ifade edilen Structure From Motion (SFM) fotogrametrik tekniğini kullanmıştır. Farklı topografik ortamların modelinin oluşturulduğu çalışmada paylaşılan sonuç ve deneyimler, fotogrametrik tekniğin karmaşık topografyayı modellemeye yönelik düşük maliyetli, etkili ve esnek bir yaklaşım olduğunu sonucunu göstermiştir.

Yakar, Orhan, Ulvi, Yiğit ve Yüzer (2015) zengin bir tarihi ve kültürel mirasa sahip Konya Meram'da Sahip Ata Külliyesi'nin fotogrametrik teknikler kullanarak iki ve üç boyutlu verilerini üretmişlerdir (Şekil 1.10). Çalışmada, fotogrametrik tekniklerin nitelikli kullanımı sağlanması durumunda doğruluk, zaman ve maliyet açısından faydaları belirtilmiştir.



Şekil 1.10. Sahip Ata Külliyesi fotogrametri tekniği sonucu oluşan nokta bulutu görünümleri (Yakar vd., 2015)

Aydın ve Schnabel (2015), çalışmalarında, Çin'in en batısında bir tarihi şehir olan Kaşgar'a odaklanan ve devam eden bir dijital miras araştırmasının ilerlemesini göstermişlerdir. Çalışma, Kaşgar mimarisini temsil eden somut özellikler yardımıyla somut olmayan mirasın kodunu çözmeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda bir mimari oyun aracılığıyla Kaşgar'ın mimarisi ve canlı sokak yaşamı temelinde "tasarım-gramerleri (design-

grammars)" geliştirilen çalışmada, Kaşgar'ın eski kenti Gaotai'nin belirli bir bölümünün fotogrametrik modellerini ve insansız hava aracı (İHA) ile alınmış görüntülerini ortaya koymuştur (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Kaşgar'ın eski kenti Gaotai'nin belirli bir bölümünün devam eden fotogrametrik modeli ve İHA ile alınmış görüntü (Aydın ve Schnabel, 2015)

Önal, Bozdağ, ve Ersoy (2017), çalışmalarında İzmir Agora'da bulunan Roma Dönemi hamam yapısını fotogrametrik teknik ile üç boyutlu modellenmesi sürecine yer vermişlerdir. Çalışmada ilerleyen süreçlerde yapılacak restorasyon çalışmalarında referans alınabilecek mevcut durum modeli oluşturmak amaçlanmıştır. Model sürecinde, dijital fotogrametrik teknikte fotoğraf tabanlı Structure From Motion (SFM) tekniğinden faydalanılmıştır ve çalışmanın sonucunda da bu tekniğin avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir.

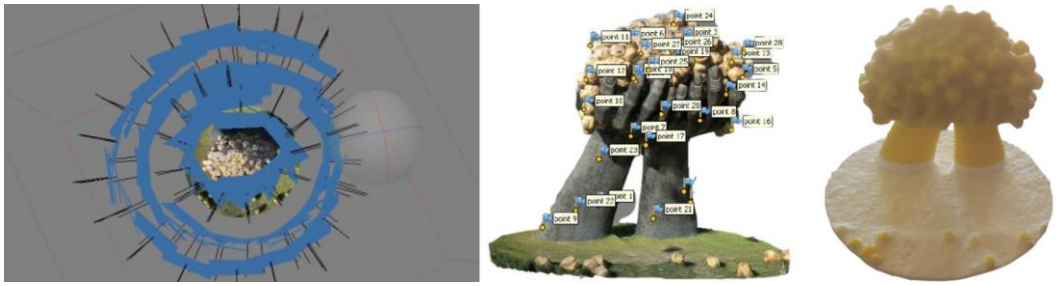
Ulvi ve Yiğit, (2019), *Kültürel mirasın dijital dökümantasyonu: Taşkent Sultan Çeşmesinin fotogrametrik teknikler kullanarak 3B modelinin yapılması* başlıklı çalışmalarında, yersel fotogrametri tekniğini kullanarak Taşkent Sultan Çeşmesinin üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Çalışmada, dijital kameralar kullanılarak fotoğraflar elde edilmiş ve üç boyutlu modelleme imkânı tanıyan Photoscan (üretici firma Agisoft) yazılımı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, tarihi yapıların belgelenmesinde sadece vektörel çalışmaların yeterli olmadığı, ileri belgeleme tekniklerinin de bu alanda kullanılması gerektiğine değinilmiştir. Ayrıca fotogrametri tekniği ile karmaşık geometrili bölümlerin rölövesinin kesin doğruluk ile ortaya çıkarılabildiği ifade edilmiştir.

Ulvi, Yakar, Yiğit ve Kaya (2020), İHA ile elde edilen görüntülerden Aksaray'da Kızıl Kilise'nin üç boyutlu nokta bulutunu üretmişlerdir. Çalışmada, belgeleme amaçlı fotogrametrik teknikler kullanılarak yapının rölövesinin elde edilme sürecine yer verilmiştir. Fotogrametrik model üretim sürecinde Photomodeler ve PhotoScan (üretici firma Agisoft) programları kullanılmıştır. Alınan görüntüler sonucu oluşturulan ölçekli 2D çizimler, üç

boyutlu model ve nokta bulutları sayısal fotogrametrinin kültürel mirasın belgelenmesi sürecine dahil edilmesi ile zaman ve maliyet açısından büyük kolaylıklar ve imkanlar sağladığına değinilmiştir.

Erdoğan, Kabadayı ve Akin (2021), Yozgat'ta Osmanlı dönemine tarihlenen Karabıyık Köprüsü'nün fotogrametri tekniği ile modelini oluşturmuşlardır. İHA kullanılarak alınan görüntüler Pix4D programı ile üç boyutlu nokta bulutuna dönüştürülmüştür. Çalışmanın sonucunda fotogrametri tekniğinin geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı, hassas, güvenli ve düşük maliyetli üretimlerin gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca, tarihi ve kültürel değer barındıran tarihi yapıların üç boyulu modellenmesi ile restorasyon projesine katkı sağlayacağına değinilmiştir.

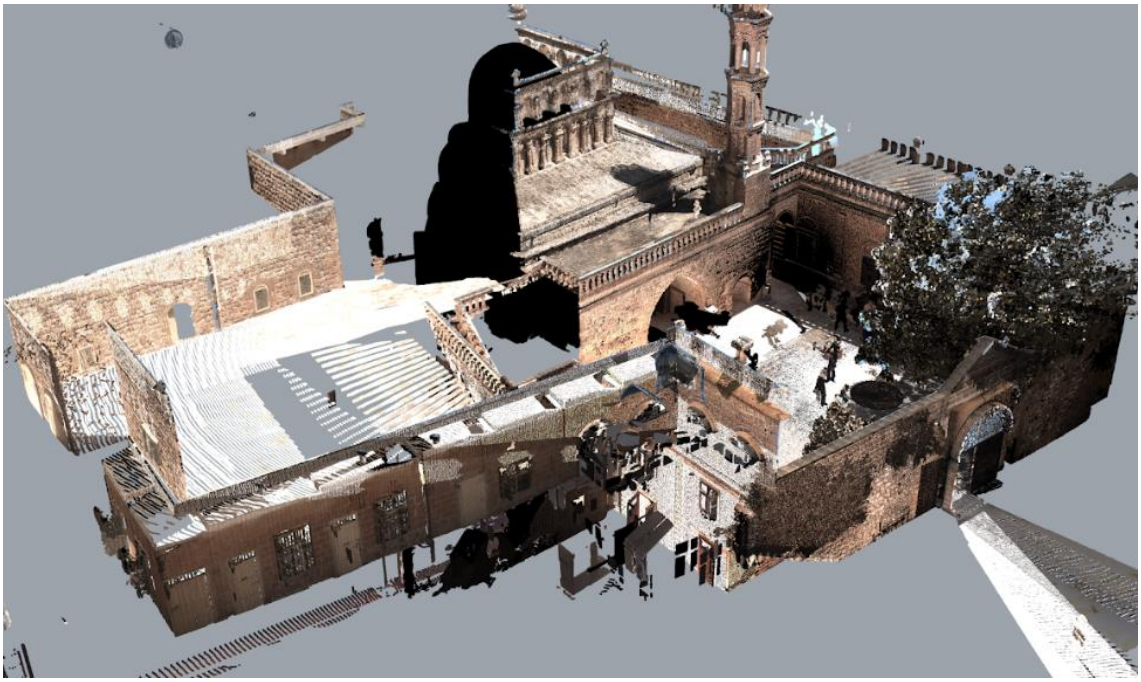
Uslu (2021), *Fotogrametri tekniğine dayalı üç boyutlu baskı uygulaması: Leblebi Anıtı örneği* çalışmasında fotogrametrik teknikler kullanarak nesnelerin üç boyutlu dijital modellerinin hızlı bir şekilde oluşturulabildiğine değinmiştir. Beraberinde, Kütahya'da Leblebi Anıtı öncelikle 3D dijital olarak modellenmiş, oluşturulan model üzerinde düzenlemeler yapılarak 3D baskı işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.12). Çalışmada, fotogrametriye dayalı 3D baskı teknolojilerinin çeşitli yeni fırsatlar sunduğu ve farklı deneyimler ortaya çıkarabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 1.12. Leblebi Anıtı fotogrametrik modeli ve 3D yazıcıdan üretilmiş modeli (Uslu, 2021)

Mardin Artuklu Üniversitesi (MAÜ) Mimari Proje Üretimi Uygulama ve Araştırma Merkezi (Merkez müdürü; Serdar Aydın, Merkez müdür yardımcıları; İzzettin Kutlu ve Berat Çelebioğlu), 2021 yılında Mardin'de Süryanilerin geride bıraktığı kırsal yerleşim alanlarındaki kültürel mirası konu edinen atölyeler düzenlemişlerdir. Mardin'de, Midyat'a bağlı Anıtlı (Hâh), İzbırak (Zaz) ve Savur'a bağlı Dereiçi (Kıllıt) Mahallerinde somut ve somut olmayan kültürel mirasın, fotogrametrik teknikler kullanarak 3D dijital modellere ve

artırılmış gerçeklik teknikleri ile hikayelere dönüştürülmek üzere çalışmalar yürütmüştür. Goethe Institut-Istanbul'un ana yürütücüsü olduğu Kültür İçin Alan hibe programı tarafından desteklenen *Şlomo: Göç Edenlerin Ardından* projesinde, fotogrametrik ve 3D modelleme teknikleri ile dijital arşiv kayıtları, drone ve 360 derece panoramik görüntüler ile sanal turlar, artırılmış gerçeklik ile etkileşimli sahneler, sanal gerçeklik gözlükleri ile gerçeğe yakın deneyimler ve lidar lazer tarama ile yüksek çözünürlükte işlenmiş ortamlar üretilmiştir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Proje kapsamında gerçekleştirilen nokta bulutu çalışması (Mardin Artuklu Üniversitesi Mimari Proje Üretimi Uygulama ve Araştırma Merkezi, 2021)

Kutlu, Soyluk ve Ünay (2022) çalışmalarında, fotogrametrik modelleme tekniği kullanarak Artuklu dönemi eseri olan Melik Mahmut Cami'nin dijital dökümantasyonunu ele almışlardır. Teknolojik gelişmeler ile birlikte koruma ve belgeleme çalışmalarındaki fotogrametrik modelleme tekniğinin etkin kullanımının arttırılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Fotogrametrik modelleme tekniğinin yapısal analizi ile ilgili yapılmış çalışmalar

Tez kapsamında önerilen fotogrametrik modelleme tekniği ile tarihi yapıların strüktürel davranışı hakkında literatürde mevcut dört çalışma bulunmuştur. Tezden üretilen çalışmalar

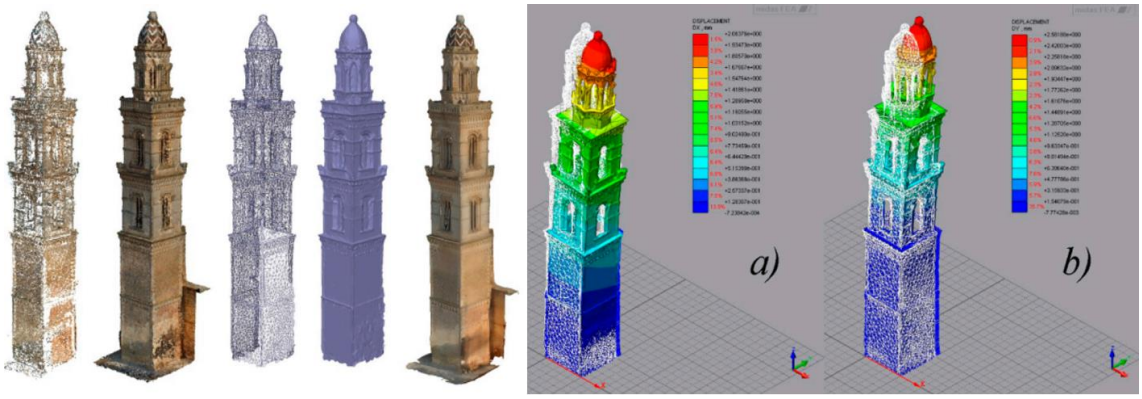
dışında, kalan dört çalışma sayısının geçtiğimiz yüzyılda hızla teknolojik gelişmelerin yaşandığı ve dijital çağ olarak adlandırılan 21. yüzyıl için oldukça yetersiz olduğu düşünülmektedir. Özellikle fotogrametri gibi teknolojinin gelişimine paralel olarak kullanımının da farklılaşabileceği ve birçok anlam kazanabileceği bir modelleme tekniğinin, farklı alanlarda entegre bir şekilde kullanımı incelenmeye ve geliştirilmeye açık bir konudur. Literatürdeki mevcut çalışmalarda, fotogrametrik modelin yapısal analiz programına aktarım süreci ele alınsa da oluşturulan model ile klasik modelleme yöntemleri arasındaki farklılıklar ortaya konmamış ve iki modelleme tekniği arasındaki hassasiyet durumları tespit edilmemiştir. Dolayısıyla, hangi modelleme tekniğinin hangi durumlarda zaman kazandıracağı veya hangi tekniğin hangi kullanımlarda daha büyük avantajlara sahip olacağı konusu aydınlatılmamıştır. Bu durum, fotogrametrik modelleme tekniği üzerine gerçekleştirilecek çalışmaların sayısının arttırılması gerektiğini göstermektedir.

Vatan (2005), *Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasında fotogrametrik verilerin kullanılması* başlıklı yüksek lisans tez çalışmasında, fotogrametrik verilerden faydalanarak yapısal analiz modelinin oluşturulması sürecini ele almıştır. Lazer tarama ile elde edilen fotogrametrik modelin, sonlu elemanlar yöntemine dayalı yapısal analiz programına aktarılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, dijital fotogrametri, mimarlık ve mühendislik disiplinlerinin ortak çalışmalar gerçekleştirilerek tarihi değerlerin daha hızlı ve hassas olarak belgelenmesinin sağlanabileceği ve özellikle gelişen bilgisayar sistemleri ile fotogrametrik üretimlerden faydalanılarak tarihi yapıların sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Barrile, Bilotta, D'Amore, Meduri ve Trovato (2016), *Structural modeling of a historic castle using close range photogrammetry* başlıklı yazılarında, İtalya'da 15-16. yüzyılda inşa edilmiş yığma sistemli tarihi bir kalenin yapısal analiz programına fotogrametrik modelleme tekniği ile aktarılmasını ele almışlardır. Aşama aşama modelleme ve yapısal analiz programına aktarımın anlatıldığı çalışmada, fotogrametrik model oluşturmak amacıyla PhotoScan, ağların düzeltme aşamasında Geomagic, katman ayarları için AutoCAD ve yapısal analiz işlemleri için SAP2000 programları kullanılmıştır. Düzenlenen ve SAP2000 programına aktarılan model üzerinde yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, fotogrametrik modellemeler ağ sisteminin karmaşık olmasına rağmen SAP2000 programına aktarılan modelin, bu süreçte kullanılabileceği sunulmuştur. Çalışmada ağ

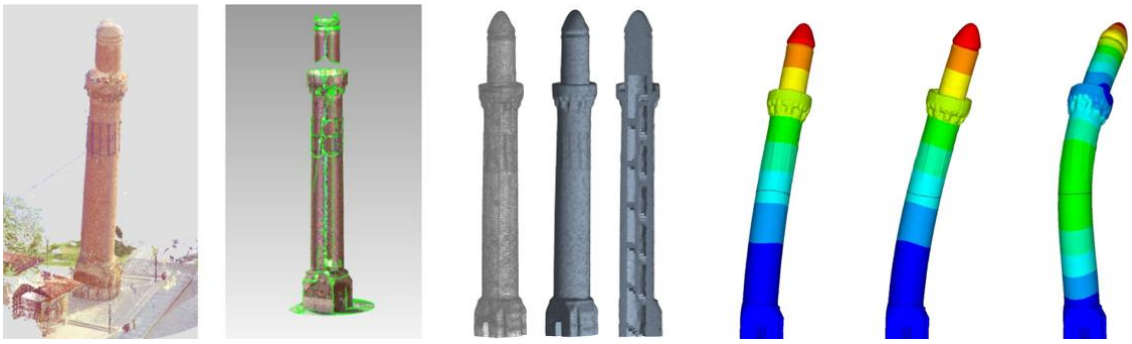
sistemlerinin kontrol edilmesine dair bir öneri gerçekleştirilmemiş ve ağ sayılarının fazla olması nedeniyle oluşabilecek hataları birkaç aşamada kontrol ederek analizlerin gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Micelli, Cascardi ve Aiello (2020), *Seismic capacity estimation of a masonry bell-tower with verticality ımperfection detected by a drone-assisted survey* başlıklı yazılarında, 14. yüzyılda inşa edilen kulenin geometrisini ve modelini, drone destekli dijital fotogrametri ile elde etmişlerdir. Fotogrametrik model yapısal analiz programı MIDAS FEA'ya aktarılmış ve model üzerinde lineer statik, lineer dinamik ve lineer olmayan statik (itme) yapısal analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.14). Kulenin yanal sismik kuvvetlere karşı kapasitesini değerlendirmenin ana amaç olduğu çalışmada, geometrik ve yapısal araştırma için kullanılan drone destekli yeni bir teknik ele alınmıştır.



Şekil 1.14. Kulenin fotogrametrik modeli ve yapısal analiz görünümleri (Micelli vd., 2020)

Korumaz vd. (2017), fotogrametrik teknik ile oluşturulan Aksaray'da Eğri Minare modeli üzerinde sonlu eleman analizi gerçekleştirmişlerdir. Yersel lazer tarama tekniği ile oluşturulan üç boyutlu ağlardan oluşan model sonlu eleman programına aktarılmadan, Geomagic programında ağ sorunları giderilmiştir (Şekil 1.15). Çalışmanın sonucunda yüksek doğruluk içeren fotogrametri tekniğinin yapısal analiz sürecine entegrasyonunun tarihi yapıların davranışının değerlendirmesi ve analizi için umut verici bir metodoloji olabileceğine değinilmiştir.



Şekil 1.15. Kulenin fotogrametrik modeli, ağ düzenleme işlemi ve yapısal analiz sonucu görünümleri (Korumaz, vd., 2017)

Kutlu, Soyluk ve Aydın (2023), *A review of the usability of photogrammetry technique for studying the structural behavior of historical buildings* başlıklı çalışmalarında, fotogrametrik modelleme tekniğinin yapısal analiz sürecinde yer aldığı literatürdeki çalışmalara yer vermişlerdir. Çalışmanın sonucunda gelişmeye açık olduğu düşünülen bu modelleme tekniği ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarının sayısının arttırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kutlu ve Soyluk (2023) *A comparative approach to using photogrammetry in the structural analysis of historical buildings* başlıklı çalışmalarında, fotogrametrik modelleme tekniği kullanarak yığma avlu duvarı örneği üzerinden yapısal analizler gerçekleştirmiştir. Fotogrametrik modelin sunabileceği avantaj ve dezavantajları belirlemek adına aynı duvarın klasik modelleme tekniği ile sayısal modeli oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Farklı iki modelleme tekniğinden elde edilen değerler, fotogrametrik modelleme tekniğinin sürece entegrasyonu açısından umut verici olduğu tespit edilmiştir.

2. ARTUKLU DÖNEMİ MİMARLIĞI

Malazgirt zaferi ile 1071 yılında Anadolu sınırları içerisine yerleşen Türkler, kısa sürede bu topraklar üzerinde kimi kısa kimi uzun ömürlü beylikler kurmuşlardır. İmparatorluktan ve devletten küçük sınırlara sahip olan bu beylikler, Anadolu'yu fethetmek üzere görevlendirilmiş Türk komutanlar tarafından, kurucularının isimlerini almışlardır. Sınırlar ele alındığında Erzurum'da Saltuklular, Erzincan'da Mengücekler, Yeşilırmak Havza'da Danişmendliler, Van Gölü Havza'sında Sökmenliler, Diyarbakır'da İnaloğulları ve Dilmaçoğulları, Elazığ'da önce Çubukoğulları ardından Harput Artukluları, Mardin'de ise Mardin ve Hısn-ı Keyfa Artuklu beylikleri etkili olmuşlardır (Harita 2.1). Bu beylikler, iki yüzyıl süresince Anadolu topraklarının kaderini belirlemişlerdir (Günay, 2012: 290). Malazgirt Zaferi'nden sonra Güneydoğu ve Doğu Anadolu sınırları içerisindeki beyliklere '*Birinci Dönem Anadolu Beylikleri'* adı verilmektedir. Zamanla bölgede egemen bir devlet haline gelen Anadolu Selçuklu Devleti'nin 1318 yılı ile birlikte zayıflama ve yıkılma döneminde kurulan beyliklere ise *'İkinci Dönem Anadolu Beylikleri'* denilmektedir (Haldon vd., 2023).



Harita 2.1. Birinci Dönem Anadolu Beyliklerinin sınırları

Anadolu beyliklerinde, aralarındaki askeri mücadeleye rağmen, XIV ve XV. yüzyılları boyunca ekonomik gelişmeler ile birlikte bilimsel ve entelektüel yaşam da devam etmiştir. Bu gelişmeler, zaman içerisinde Anadolu şehirlerinin bilim merkezleri haline gelmesini

sağlamıştır. Çeşitli ilim adamlarını kent merkezlerine getirerek himaye, destek ve yardımlar ile teşvik eden Anadolu hükümdarları, öğrenci yetiştirmek için medreseler, kütüphaneler, imaret ve misafirhaneler inşa etmeye büyük önem vermişlerdir. Bu dönemde, hükümdarların yakın ilgi ve teşvikleri sayesinde tıp, astronomi, edebiyat, tasavvuf ve din alanlarda pek çok önemli eserler üretilmiştir (Yıldız, 1991: 139).

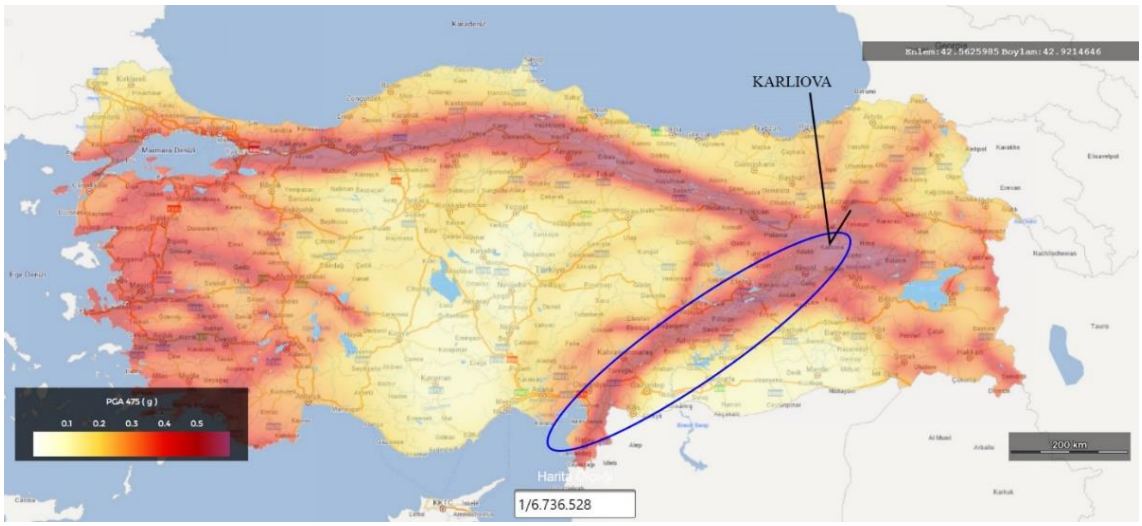
Batı Anadolu ve Marmara bölgeleri dışında Anadolu'nun neredeyse tamamını Türk beylikleri fethettiği dönemde; Artuklu Beyliği, Güneydoğu ve Doğu Anadolu'da hüküm sürmüştür. Beylik, 1102-1409 yılları arasında, dönemin en önemli Anadolu Selçuklu komutanlarından biri ve kurucusu olan Artuk Bey'in adıyla anılmaktadır. Artuk Bey, Anadolu Selçuklularda özellikle Alparslan ve Melik Şah dönemlerinde büyük kahramanlıklar göstermiştir (Sunguroğlu, 1958: 110). Artuklular, Artuk Bey'in ölümünün ardından Harput kolu (1113-1134), Mardin kolu (1108-1409) ve Hısnı Keyfa kolu (1101-1231) olmak üzere üç farklı merkeze dağılmışlardır. Haçlı seferlerinde ise İslam dünyasına örnek olabilecek birlik ve beraberlik kurmalarına rağmen Eski Türk devletlerinin sistemleri ile benzerlik gösteren bir anlayış sonucu devleti hanedan üyelerinin ortak malı olarak kabul etmişlerdir. Bu nedenle merkezi bir sistem kuramamış ve resmiyette tek bir devlet düzenine gelememişlerdir (Köprülü, 1941).

Uzun ömürlü nadir beyliklerden biri olan Artuklular, ayrı kollara sahip olsalar da hâkim oldukları çevrelerde oldukça gelişmiş bir kent dokusu getirmişlerdir. Bu dokuya da Bizanslıları, Arap sülaleleri, Süryani toplulukları vb. gibi farklı etnik grupları da dahil etmişlerdir. Üç ayrı beylikte ortak olarak yönetilen bu özellik, şehir yaşantısının kentte bulunan yollar ve kurumlar ile beraber şekillenen bir anlayışın var olmasıyla sağlanmıştır. İnsanların kent yaşamını şekillendiren ve önemli işlevlere sahip yapılar, kent merkezinde birbirleriyle çok yakın ilişki içinde yer almıştır. Günümüz Artuklu kentleri incelendiğinde, ulaşım ağlarının, meydanların ve kurumsal yapıların kent içindeki konumu bu durumun somut bir göstergesidir. Bu durum merkezi otoritenin gücü, ileri ekonomik düzey ve yüksek refah seviyesinin yanı sıra imar ve inşaat işlerinin doğrudan yansıdığı kent yaşamında da hissedilmektedir (Durukan, 1995: 51).

Artuklular ekonomik yönetimde, temel olarak İslami gerekliliklere göre bir anlayış izlemişlerdir. Örneğin toprak sahiplerinden üretilen tarım ürünleri için öşür vergisi almışlardır ancak diğer vergi yüklerini mümkün olduğunca uygulamamaya gayret

göstermişlerdir. Şehir merkezlerinde ticari üretim olarak kullanılan ürünlerden alınan vergileri kaldırmışlardır. Böylece Artuklu dönemi şehir merkezleri önemli ticari kavşak noktaları haline gelmiştir. Şehirlerde ticari faaliyetlerin gelişmiş olması ve vergilerin mümkün olduğunca düşük tutulması sebebiyle, kentteki refah seviyesi yüksek olmuştur (Turan, 1973: 206-212). Artuklu yönetimindeki düşük vergiler, Müslüman nüfusun Diyarbakır ve Mardin gibi Artuklu merkezlerine göç etmesine neden olmuştur. Bu durum Artuklu hâkimiyeti altındaki şehirlerde ekonomik hayatı canlandırmıştır (Alptekin, 1991: 417). Günümüzde halen izlerine sıklıkla rastlanan dönemin imar ve inşa faaliyetleri, köprüleri, kervansarayları, hanları, hamamları, camileri, medreseleri vb. yapıları, Artuklu yönetiminin ekonomik gücünün birer göstergeleridir.

Çalışma kapsamında incelenen Artuklu Beyliği, Anadolu topraklarında Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde hüküm sürmüştür. Bu bölge ve dolayısı ile Artukluların geride bıraktığı mimari eserler, Doğu Anadolu Fay hareketliliği etkisi altındadır. Doğu Anadolu Fay Sistemi kuzey yönüne hareket eden Arap Levhası ile batı yönüne hareket eden Anadolu Bloğu arasında, yaklaşık 30 km genişliğe ve 580 km uzunluğa sahiptir. DAFS, Kuzeydoğu gidişli sol yanal doğrultu atımlı bir transform fay hattıdır. Son yıllarda bu hat üzerinde gerçekleşen yıkıcı depremler, bu bölgenin sismisitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), ülkemiz için büyük tehditler oluşturan fay hatlarının güncel haritalarını paylaşmaktadır (Harita 2.2).

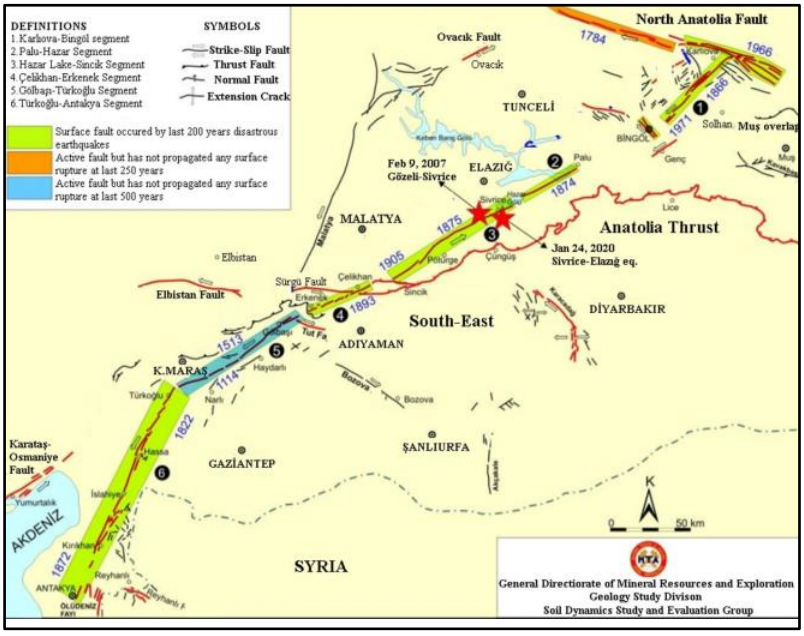


Harita 2.2. Karlıova'da Kuzey Anadolu Fay Sistemi ile kesişen ve Hatay'a kadar uzanan DAFS haritası (AFAD'dan geliştirilmiştir.)

2.1. Doğu Anadolu Fay Hattının Günümüz Durumunun İncelenmesi

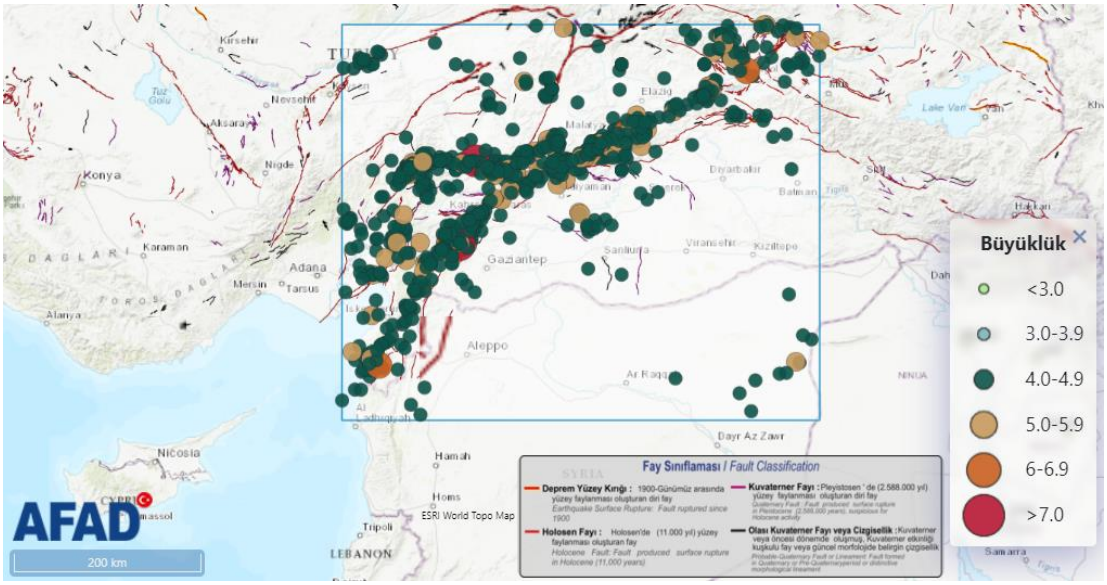
Ülkemiz, dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır (Pampal, 1999). Bu nedenle Türkiye'de çok sayıda yapısal hasarlara/göçmelere sebebiyet veren depremler gerçekleşmektedir.

Son 31 yılda 13 Mart 1992 tarihinde Ms=6.8 Erzincan, 1 Kasım 1995 tarihinde ML=5.9 Dinar, 27 Haziran 1998 tarihinde Ms=6.3 Ceyhan, 17 Ağustos 1999 tarihinde Ms=7.8 İzmit, 12 Kasım 1999 tarihinde Ms=7.3 Düzce, 6 Haziran 2000 tarihinde Mw=6.0 Çankırı, 3 Şubat 2002 tarihinde Md=6.0 Sultandağı, 27 Ocak 2003 tarihinde Ms=6.2 Pülümür, 1 Mayıs 2003 tarihinde Ms=6.4 Bingöl, 23 Ekim 2011 tarihinde Mw=7.2 Van, 20 Temmuz 2017 tarihinde Mw=6.6 Bodrum-Kos, 24 Ocak 2020 tarihinde Mw 6.8 Elazığ, 30 Ekim 2020 tarihinde Mw=6.9 İzmir, 06 Şubat 2023 tarihinde iki adet Mw=7,7 ve Mw=7,6 Kahramanmaraş ve son olarak 20 Şubat 2023 tarihinde iki adet Mw=6,4 Hatay Yayladağı ve Mw=5,8 Hatay Samandağ olmak üzere 17 adet yapısal hasarlara ve yıkımlara bağlı olarak can ve mal kaybına neden olan depremler gerçekleşmiştir (Çelik, Bal, Atasever, Emanet ve Koca, 2020). Ülkemizde kuzeydoğu yönünde Karlıova ile başlayan, güneybatıda Hatay'a kadar uzanan DAFS, uzunlukları yaklaşık olarak 50 ile 145 km arası değişkenlik gösteren 6 segmentten oluşmaktadır (Demirtaş ve Erkmen, 2019; Harita 2.3).



Harita 2.3. Doğu Anadolu Fay Sisteminin ana segmentleri ve tarihi zarar veren depremler (Sayın vd., 2021)

DAFS etkisinde Doğu Anadolu Bölgesinde, 1900 yılından 2023 yılının başlarına (21 Şubat 2023) kadar 947 adet M≥4.0 deprem meydana gelmiştir (Harita 2.4). Bu depremlerin 32'sinde can ve mal kaybı kayıtlara geçmiştir (Şekil 2.1). İlki Pütürge-Malatya merkezli 12 Nisan 1905 tarihinde gerçekleşen Mw=6,8 büyüklüğündeki depremdir. Ayrıca 1900 yılından önce gerçekleşen bölgeye ait 40 adet tarihi deprem kaydı bulunmaktadır.



Harita 2.4. DAFS üzerinde 1900 yılı sonrası M≥4.0 gerçekleşen depremler ve konumları (AFAD)

12.04.1905 Pütürge-Malatya	15.12.1934 Bingöl	20.03.1945 Ceyhan-Adana	02.04.1950 Kığı-Bingöl	04.08.1951 İskenderun-Hatay	22.10.1952 Misis-Adana
Mw: 6,8 Can Kaybı: 15	Mw: 4,9 Can Kaybı: 12 Ağır Hasar: 200	Mw: 6,0 Can Kaybı: 10 Ağır Hasar: 650	Mw: 4,6 Can Kaybı: 20 Ağır Hasar: 100	Mw: 5,7 Can Kaybı: 6 Ağır Hasar: 13	Mw: 5,5 Can Kaybı: 10 Ağır Hasar: 511
14.06.1964 Malatya	31.08.1965 Karlıova-Bingöl	24.09.1968 Elazığ	22.05.1971 Bingöl	30.06.1981 Antakya-Hatay	05.05.1986 Sürgü-Malatya
Mw: 6,0 Can Kaybı: 8 Ağır Hasar: 678	Mw: 5,6 Can Kaybı: 1500	Mw: 5,1 Can Kaybı: 2	Mw: 6,7 Can Kaybı: 878 Ağır Hasar: 5617	Mw: 4,4 Can Kaybı: 2	Mw: 5,8 Can Kaybı: 8 Ağır Hasar: 824
06.06.1986 Sürgü-Malatya	22.01.1997 Antakya-Hatay	13.04.1998 Karlıova-Bingöl	27.06.1998 Ceyhan-Adana	01.05.2003 Bingöl	13.07.2003 Doğanyol-Malatya
Mw: 5,6 Can Kaybı: 1 Ağır Hasar: 1174	Mw: 5,5	Mw: 5,0 Can Kaybı: 69	Mw: 5,9 Can Kaybı: 145	Mw: 6,1 Can Kaybı: 184 Ağır Hasar: 7800	Mw: 5,7
26.02.2004 Adıyaman	03.03.2004 Bingöl	11.08.2004 Sivrice-Elazığ	12.03.2005 Karlıova-Bingöl	14.03.2005 Karlıova-Bingöl	26.11.2005 Pütürge-Malatya
Mw: 5,1	Mw: 5,0	Mw: 5,3	Mw: 5,6 Can Kaybı: 760	Mw: 5,9	Mw: 5,2
21.02.2007 Sivrice-Elazığ	09.02.2007 Elazığ	08.03.2010 Kovancılar-Elazığ	24.01.2020 Sivrice-Elazığ	06.02.2023 Pazarcık,Ekinözü	20.02.2023 Defne,Samandağ
Mw: 5,4	Mw: 4,7	Mw: 6,0 Can Kaybı: 42 Ağır Hasar:6771	Mw: 6,8 Can Kaybı: 41 Ağır Hasar:14366	Mw: 7,7 & Mw: 7,5 Can Kaybı: 50096 Ağır Hasar: 518009	Mw: 6,8 & Mw: 5,8 Can Kaybı: 6

Şekil 2.1. 1900-2023 yılları arasında DAFS'de gerçekleşen hasar yapıcı depremler (Demirtaş ve Erkmen, 2019; Çağlar, Kırtel, Vural, Sümer ve Sarıbıyık. 2020; Sunkar, 2011; Strateji ve Bütçe Başkanlığı 2023 ve AFAD'dan geliştirilmiştir.)

DAFS, 1971 Bingöl depremi dışında, geçtiğimiz yüzyılda "durgun" olarak adlandırılan bir dönem yaşamış ve yüzey kırığı oluşturacak kadar büyük bir deprem yaşamamıştır. Ancak, 24 Ocak 2020 Cuma günü yerel saatle 20:55'te merkez üssü Elazığ-Sivrice ilçesinde Mw 6.8 (M_L 6.6) büyüklüğünde çok şiddetli bir deprem gerçekleşmiştir. Bu depremin yarattığı kuvvetli yer hareketi etkisi, merkez üssünü etkilemek ile sınırlı kalmamıştır. Elazığ-Merkez, Malatya-Kale, Pütürge ve Doğanyol ilçelerinde de yıkım ve yapısal hasarlar nedeniyle can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Deprem sonrası, bölgede büyüklükleri en çok Mw=5.4 olan 6424 adet artçı deprem kaydedilmiştir. Deprem, Türkiye'deki önceki pek çok deprem gibi sığ bir deprem olarak değerlendirilmiş, son yapılan hesaplar sonucunda yerin 12 km aşağısında meydana geldiği anlaşılmıştır. Depremin etkilerinin önemli bir göstergesi olan şiddeti ise merkez üstünde 7=VII, Elazığ merkezde 6=VI, Malatya merkezde ise 5=V olarak belirlenmiştir (AFAD).

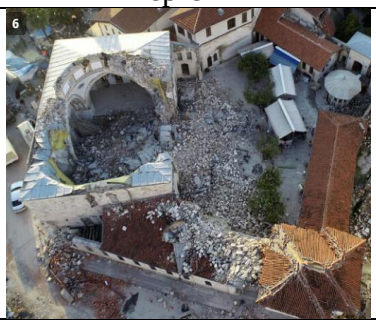
Bir diğer çok şiddetli deprem ise 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelmiştir. DAFS hattı üzerinde, Maraş Sismik Boşluğu olarak bilinen sismik boşluğun içerisinde oluşmuştur. İlk Mw=7,7 ve saati 04:17'de olmak üzere 9 saat arayla ikincisi Mw=7,6 ve saati 13:24'te gerçekleşmiştir. DAFS üzerinde bu depremlerin olduğu Maraş sismik boşluğunda en son 1114 ve 1513 depremlerinde kırılmış olduğu tespit edilmiştir. Bölge, bu iki çok şiddetli deprem sonrası en büyüğü Mw=6,7'lik şiddetli artçı ile beraber çok sayıda artçı deprem ile sallanmaya devam etmektedir. DAFS ve Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS), Anadolu Levhası'nın batıya doğru hareketini üstlenen ve çoğunlukta büyük yıkıcı depremler üreten kıtasal doğrultu atımlı faylardır (Şengör vd 2005; Ambraseys 2009; Duman ve Emre 2013). KAFS ile DAFS arasında bir etkileşim olduğu da gerçekleştirilen analitik gerilme modellemelerinden de gözlemlenebilmektedir (Utkucu, Durmuş, Uzunca ve Nalbant, 2023). DAFS oluşan depremler ile KAFS'da oluşan depremlerin meydana geliş biçimleri benzerdir ve birbirini tetikleme ihtimali bulunmaktadır.

> Türkiye'de genellikle Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu fayları üzerindeki yıkıcı depremlerden fayları tanımaktayız ve bu faylar doğrultu atımlı faylardır. Doğrultu atımlı faylar üzerinde yanal hareketler söz konusudur. Yanal hareketlerle plakalar birbirlerinden uzaklaşırken binaların yaptığı salınımlar yanaldır ve bunlar binaların yıkım etkisini artırıcı hareketlerdir. Ters faylarda ise daha farklı hareketlenme olur. (Köse, 2011).

20 Şubat 2023 tarihinde saat 20:04'te merkez üsleri Hatay'ın Yayladağı (Mw=6,4) ve Samandağ (Mw=5,8) ilçeleri olan ve 3 dakika arayla gerçekleşen depremler bu bölgedeki

sismik aktivitenin öngörülemez olduğunu ve her an yıkıcı depremlerin gerçekleşebileceğini göstermiştir. Can ve mal kaybının da yaşandığı deprem, Kahramanmaraş depreminin ardından hasar almış yapıların tamamen yıkılmasına neden olmuştur. Gerçekleşen bu deprem, Kahramanmaraş depremi nedeniyle fay hattındaki enerjinin boşalmanın uzun süre deprem oluşmayacağı anlamına gelmediğini göstermiştir. Depremlerin büyüklükleri, etki alanları ve sosyo-ekonomik yaşamda yol açtıkları bozulmalar ve tarihte büyük depremlerin birbiri ardına meydana gelmiş olması, Türkiye'deki deprem tehlikesinin büyüklüğünü ortaya koymaktadır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. DAFS hattında gerçekleşen depremler sonrası hasar gören tarihi yapı örnekleri

Sivrice Depremi	Pazarcık Depremi	Ekinözü Depremi
		
Akminare Cami – Malatya (İhlas Haber Ajansı)	Habibi Neccar – Antakya (Demirören Haber Ajansı)	Kurtuluş Cami – Gaziantep (Demirören Haber Ajansı)

DAFS ile ilgili yapılan çalışmalarda faylar üzerinde yoğun deprem aktivitesi meydana gelmesine rağmen faylar üzerindeki sismik boşlukların, tarihsel dönemlerde meydana gelen depremlere benzer veya yakın zamanda meydana gelen depremlerden daha büyük depremlere neden olabileceğini göstermektedir (Demirtaş ve Erkmen, 2019; İmamoğlu ve Çetin, 2007). Ayrıca bu depremlerin, fay hattında kırılmalara neden olduğunu ve Elazığ-Sivrice, Kahramanmaraş-Pazarcık ve Ekinözü, Hatay-Yayladağı depremlerinin Mardin'e yaklaşık 180-300 km uzakta olmasına rağmen bu kadar şiddetli hissedilmesinin, kırılan fay ucunun Mardin'e kadar gelme ihtimalini gösterdiğini ifade eden Jeoloji Mühendisi Fahri Çelik (2020), Mardin'i de depremin beklediğini ve depremden ağır bir şekilde etkilenme ihtimalinin olduğunu belirtmektedir (URL-1).

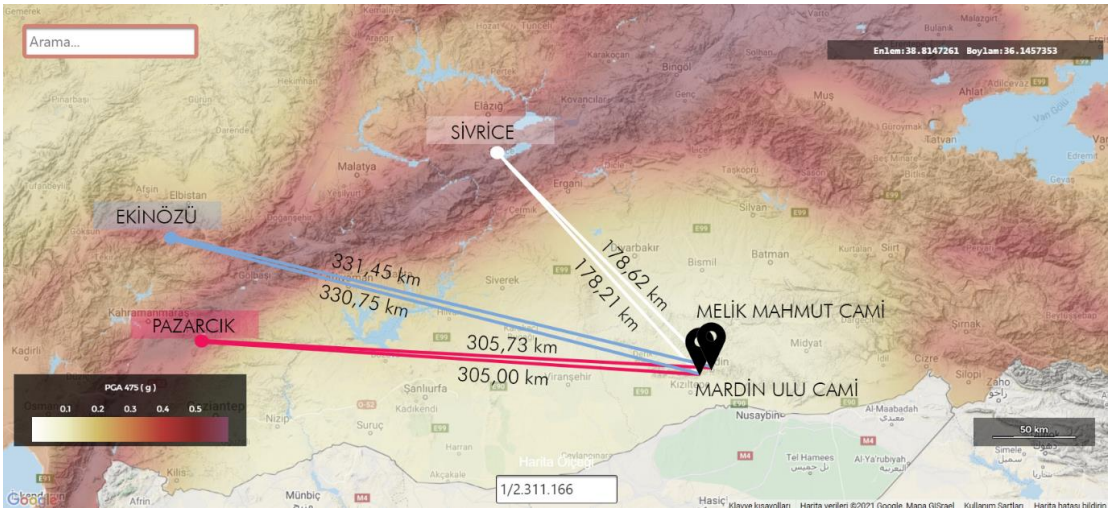
Son veriler DAFS ne kadar aktif olduğunu ve olabilecek risklere karşı tedbirlerin alınması gerekliliğini göstermektedir. 2023 yılında gerçekleşen sismik aktiviteler fay hattının yoğun sismik hareketler barındırabileceğini ve önlemler alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen deprem sonrası bölgede 2

haftalık zaman diliminde yaklaşık 7300 artçı deprem gerçekleşmiş ve halen gerçekleşmeye devam etmektedir. Bu artçıların bazıları 6 büyüklüğünü geçmiş ve artçı deprem olmadıkları, yeni bir deprem hareketinin oldukları belirtilmektedir. Sismisitesi çok yüksek bir bölge olan Doğu Anadolu'da depremler nedeniyle çok fazla can ve mal kaybı ile birlikte birçok tarihi yapı da yıkılmıştır veya yıkılma tehdidi ile karşı karşıyadır. Bu depremlerden fay hattı üzerinde olmayan bölgelerde etkilenmektedir.

Deprem etkisi, deprem merkez üssü uzaklığına, derinliğine, deprem dalgasının geliş yönüne, büyüklüğüne, süresine, frekansına, ivmesine, jeolojik şartların özelliğine, baskın yer titreşim periyoduna, yeraltı su doygunluğuna ve derinliğine, zemin türüne ve ana kaya derinliğine bağlıdır. Ayrıca gerçekleşen depremlerde şehrin, merkez üssüne olan uzaklıklarına göre;

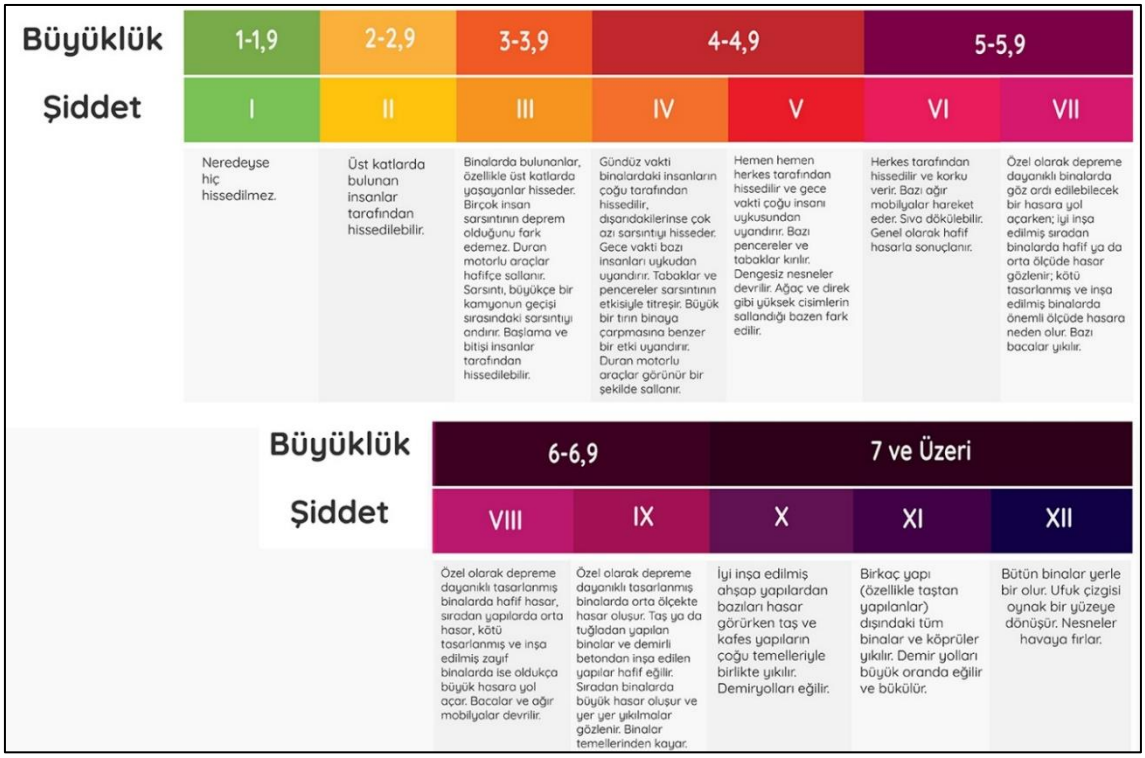
- 100 km'den daha az bir mesafede gerçekleşen yerel depremler;
- 100 – 1000 km arasında bir mesafede gerçekleşen yakın depremler;
- 1000 – 5000 km arasında bir mesafede gerçekleşen bölgesel depremler;
- 5000 km'den daha uzak bir mesafede gerçekleşen uzak depremler olmak üzere 4 şekilde sınıflandırılmaktadır (Korkmaz, 2006; Gül ve Bayram, 2014).

Çalışma kapsamında ele alınan Artuklu dönemi Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami yapıları da DAFS etkisi altındadır. Bölgede yakın tarihlerde gerçekleşen deprem merkez üslerine göre yapıların mesafeleri ölçülmüştür (Harita 2.5). Çıkan sonuçlar, yapıların yakın deprem etkisi altında ve şiddetli depremlere karşı risk altında oldukları açıkça görülmektedir.



Harita 2.5. Mardin Ulu Cami ve Mardin Melik Mahmut Cami'nin yakın zamanda gerçekleşen deprem merkezlerine mesafeleri

Bir depremin büyüklüğü, belirli bir süre boyunca kaydedilen bir sismogram üzerindeki deprem dalga genliğinin logaritması olarak tanımlanmaktadır. Bir depremin şiddeti ise, ortaya çıkan sarsıntılar sonrası insan, yapı ve doğa üzerinde gözlenen etkilerden referans alınarak ölçülmektedir. Merkez üssü uzaklığına ve ana kayanın türüne bağlı olarak deprem şiddeti, etkilenen alan içinde farklılaşabilmektedir. Deprem şiddeti, etki alanındaki deprem derecesini tanımlayan Mercalli ölçeğine göre belirlenmektedir. Mercalli ölçeği, Roma rakamlarıyla (I-XII) işaretlenen ve hissedilemeyen sarsıntıdan çok sayıda yıkıma kadar artan 12 adet şiddet aralığından oluşmaktadır (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Deprem şiddeti ve büyüklüğü (Torun, 2023)

2.2. Artuklu Dönemi Yapıları

Artuklu sanatı ve mimarisi XII. ve XIII. yüzyıllarda Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde gelişim göstermiştir. Büyük Selçuklu şehir anlayışını, devlet yönetim tarzını ve kurumsal sistemini devam ettiren Artukluların güneydoğu coğrafyasındaki varlığı, Anadolu Selçukluları dönemi ve sonrasında pek çok alanda etkin olmuştur. Siyasi etkinliğini, hüküm sürdüğü bölgelerde inşa ettiği eğitim, ulaşım, ticaret, sağlık, savunma ve ibadet yapıları ile devam ettirmişlerdir. Anadolu'da Mardin, Harput, Hasankeyf, Amid, Silvan ve Urfa'da

hakimiyeti devam ettirirken aynı zamanda Kuzey Suriye ve Irak'a kadar etkilerinin uzandığı da görülmektedir (Turan, 2014: 107). Üç farklı kolda hüküm süren Artuklular ile ilgili Alptekin (1991: 418), "*Artuklu sanatını ve mimarisini, Artuklu siyası tarihinde olduğu gibi bölgelere ayırarak incelemeye gerek yoktur. Çünkü bölgelere göre farklılıklar, küçük ayrıntılarda görülen bazı mahalle özelliklerden ibarettir."* ifadelerini kullanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, Artuklular sağlam bir ekonomik politik anlayış benimseyerek bölgede ticari hayatı canlı tutmak amacıyla çarşılar, köprüler, kervansaraylar, camîler, medreseler, hamamlar, külliyeler gibi birçok mimari eser inşa etmişlerdir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Artuklu dönemi yapıları ve inşa tarihleri (Altun, 1978; Nayır, 2010; Turan, 2014; Kutlu ve Soyluk, 2021'den referans alınmıştır.)

	Eser	Yer	İnşa Kitabesi	İnşa Yılı	Mevcut Kullanım
Külliye	Emineddin Külliyesi	Mardin	Mevcut değil	1108–1122	Kısmi olarak kullanımda
	Necmeddin (Câmi'ül Asfâr) Külliyesi	Mardin	Mevcut değil	1122/23	Kısmi olarak kullanımda
Cami	Mardin Ulu Cami	Mardin	Mevcut	1108-1144	Cami
	Silvan (Meyyafarikin) Ulu Cami	Diyarbakır	Mevcut	1152-1157	Cami
	Harput Ulu Cami	Elazığ	Mevcut değil	1144-46	Cami
	Kızıltepe (Dunaysır) Ulu Cami	Mardin	Mevcut	1204	Cami
	Harput Alacalı Cami	Elazığ	Mevcut değil	1202-1204	Cami
	Melik Mahmut Cami	Mardin	Mevcut	14.yüzyıl	Cami
	Latifiye Cami	Mardin	Mevcut	1371	Cami
Medrese	Zinciriye Medresesi	Diyarbakır	Mevcut değil	1198-1199	İbadet yapısı
	Mesudiye Medresesi	Diyarbakır	Mevcut	1198-1223	İbadet yapısı
	Marufiye Medresesi	Mardin	Mevcut değil	12.yüzyıl	İşlevsiz
	Şehidiye Medresesi	Mardin	Mevcut	1202	İbadet yapısı
	Hatuniye (Sitti Radviyye) Medresesi	Mardin	Mevcut	Ocak 1206	İbadet yapısı
	Harzem Tâceddin Mesud Medresesi	Mardin	Mevcut	1211	Kalıntı
	Melik Mansur Medresesi	Mardin	Mevcut değil	13.yüzyıl	İbadet yapısı
	Altunboğa Medresesi	Mardin	Mevcut değil	1343/44	İşlevsiz
	Sultan İsa (Zinciriye) Medresesi	Mardin	Mevcut	1392	İbadet yapısı
Hamam	Emir Necmeddin, Emineddin Hamamı	Mardin	Mevcut değil	1108–1122	Hamam
	Hatuniye (Sitti Radviyye) Hamamı	Mardin	Mevcut	1176-1185	Hamam
	Yenikapı Hamamı	Mardin	Mevcut değil	1258-1285	Kalıntı
	Harput (Dere) Hamamı	Elazığ	Mevcut	1301	Kalıntı
	Ulu Cami Hamamı	Mardin	Mevcut	1312–1364	Kalıntı
	Hasankeyf Hamamı	Hasankeyf	Mevcut değil	-	Kullanılamamakta
Köprü	Hasankeyf Köprüsü	Hasankeyf	Mevcut değil	1116/1117	Kullanılamamakta
	Malabadi Köprüsü	Diyarbakır	Mevcut	1146	Köprü
	Çermik (Haburman) Köprüsü	Diyarbakır	Mevcut	1179	Köprü
	Devegeçidi Köprüsü	Diyarbakır	Mevcut	1218	Köprü
Sivil ve Askeri	Hasankeyf Sarayı	Hasankeyf	Mevcut değil	1116/17	Kalıntı
	Harput Kalesi	Elazığ	Mevcut değil	1205	Kalıntı
	İç Kale (Artuklu) Sarayı	Diyarbakır	Mevcut	1206/1207	Kalıntı
	Ulu Beden Burcu	Diyarbakır	Mevcut	1208	Burç
	Yedi Kardeş Burcu	Diyarbakır	Mevcut değil	13.yüzyıl	Burç
	Firdevs Köşkü	Mardin	Mevcut değil	1285-1312	Köşk/konut

Artukluların mimari eserleri ele alındığında, inşa edilen iki külliyenin de Mardin'de yer aldığı görülmektedir. Anadolu Türk mimarisinde bilinen ilk külliye olan ve 12. yüzyılın başında inşa edilen Emineddin Külliyesi ile Necmeddin Külliyesi, bir avlu etrafında çevrelenen mekanlardan oluşan yapılar grubu olarak karşımıza çıkmaktadır (Altun, 1978:

268; Açıkyıldız, 2017). Bölgeye özgü sarı kireç taşı ile inşa edilen yapıların büyük bölümü günümüzde harap durumdadır (Resim 2.1).



Resim 2.1. Artuklu dönemi külliye görünümleri - Emineddin Külliyesi (İzzettin Kutlu arşivi, 2020)

Anadolu Türk mimarisinde az sayıdaki 12. yüzyıl camileri arasında, yöresine özgü bir plan tipi ve yapım tekniğine sahip Artuklu camileri dikkatle araştırılmaya ve incelenmeye değer özellikler taşımaktadır (Kutlu ve Soyluk, 2021). Bu dönemde, enine dikdörtgen planlı cami tipi ilk kez Anadolu Türk mimarisinde ortaya çıkmış ve yayılmaya başlamıştır. Elazığ, Mardin ve Diyarbakır'da örnekleri bulunan Artuklu camilerine genellikle zengin taş işçiliği barındıran anıtsal taç kapılardan girilmektedir. Camiler, genellikle bölgeye özgü kesme taşlar ile inşa edilmiştir ancak Silvan ve Harput Ulu Camilerinde tuğla kullanımı da görülmektedir (Resim 2.2). İlk kez mihrap önü kubbelerin bu kadar vurgulandığı Artuklu dönemi camileri, zaman içinde Anadolu Türk mimarisinde inşa edilen pek çok eseri de etkilemiştir (Altun, 1978: 269; Kutlu ve Soyluk, 2021).



Resim 2.2. Artuklu dönemi cami görünümleri (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Artuklu medreseleri, avlulu düzende inşa edilmişlerdir (Resim 2.3). Yapının merkezi bir parçası olan avlularda, Anadolu Selçukluları ve İran etkileri dikkat çekmektedir (Turan, 2014: 108). Konya Karatay Medresesi, Tokat Yağıbasan Medresesi vb. gibi avlu üzeri kubbe ile örtülmüş tipte medrese bu dönemde inşa edilmemiştir. Açık avlulu plan tipine sahip ilk medrese yapıları, Artuklular dönemine tarihlendirilmektedir (Alptekin, 1991: 418). Artuklu medrese mimarisinin Anadolu Türk Mimarisine en önemli etkisi, açık avlulu olma özelliğidir.



Resim 2.3. Artuklu dönemi medrese görünümleri (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Anadolu'da erken dönem örneklerinden olan Artuklu hamamları, plan tipolojileri açısından dikkat çekmektedir. Altun (1978: 278)'e göre, Emineddin Hamamının Anadolu'nun ilk Türk Hamamı olması muhtemeldir. Bu dönem hamamlarının ortak özelliğinin haçvari plan şeması olduğu kabul edilmektedir (Resim 2.4).



Resim 2.4. Artuklu dönemi hamam görünümleri (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Yapıldıkları dönemde sosyal hayatın en önemli ve vazgeçilmez unsurlarından biri olan ve ulaşımı sağlamak amacıyla inşa edilen Artuklu köprülerinde, dönemin teknik sınırları en iyi şekilde kullanılmıştır. Özellikle orta kemerin 40 m, iki kemerin 22 m, en küçüğünün ise 15 m olduğu yaklaşık 100 metre açıklıklı ve toplam dört sivri kemerli Hasankeyf köprüsü ile 38,6 m açıklığın tek kemerle geçildiği Malabadi köprüsünde bu sınırların zorlandığı açıkça görülmektedir (Durukan, 1995: 54, Resim 2.5).



Resim 2.5. Artuklu dönemi köprü görünümleri (İzzettin Kutlu arşivi, 2018)

Artuklu döneminden günümüze ulaşan sivil ve askeri yapılar arasında Diyarbakır İç Kale Sarayı ve Mardin Firdevs Köşkü sayılabilmektedir. Eyvanlı ve avlulu plan şemaları, Artuklu döneminin hemen hemen tüm yapı tiplerinde rastlanabilen tipolojinin bir devamı olarak kabul edilmektedir. Yapıların eyvanlı ve avlulu geleneklere dayanması, çeşme, selsebil ve havuzun iklim koşullarına uygun olarak düşünülmüş olması, Anadolu köşk ve sarayları arasında özel bir konuma sahip olmasına neden olmuştur (Durukan, 1995: 54; Altun, 1978: 281). Firdevs köşkü günümüzde kullanılabilecek durumdayken İç Kale Sarayı'nda restorasyon süreci devam etmektedir.

2.3. Artuklu Dönemi Camilerinde Mekânsal Gelişim ve Strüktürel Özellikler

Uzun yıllar etkisini sürdüren Artuklu döneminde özellikle cami ve medreseler, erken dönem Anadolu Türk sanatında bu yapı türlerinin gelişimi açısından önemli bir yere sahiptir (Aslanapa, 1991; Güler ve Aktuğ Kolay, 2006).

Artuklu cami mimarisi, bölgeye özgü bir malzeme olan sarı kireç taşı ile yığma mimariyi en iyi şekilde örneklemektedir. Genellikle mihrap önü kubbe, enine gelişim gösteren dikdörtgen plan ve geniş bir avlu anlayışı ile inşa edilen Artuklu cami tipleri, yapıldıkları dönemde kapalı bir bölge üslubu olarak kalmıştır. İkinci Dönem Anadolu Beylikleri döneminde bu cami tipi, Anadolu mimarisini büyük ölçüde etkilemiş, farklı bölgelerde ve beyliklerde de bu anlayış ile camiler inşa edilmiştir (Alptekin, 1991: 418). Anadolu cami mimarisinde Danişmentliler Beyliği'ne ait Sivas Ulu Cami dışında dikdörtgen (enine) planlı bir cami tipine rastlanmamakta, enine planın Artuklu dönemi ile birlikte sürekli olarak uygulandığı ve geliştirildiği kabul edilmektedir (Altun, 1978: 269, Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Artuklu dönemi camilerinin özellikleri

Artuklu Dönemi Camileri	Plan tipi	Mihrap önü kubbe	Kubbe geçiş elemanı	Kubbe iç çapı (m)	Avlu	Taç kapı	Malzeme
Mardin Ulu Cami	Dikdörtgen (enine) plan tipi	Mevcut	Tromp	8,34 (Çağlayan, 2017b)	Mevcut	Mevcut	Kesme sarı kalker taşı
Silvan (Meyyafarikin) Ulu Cami	Dikdörtgen (enine) plan tipi	Mevcut	Mukarnaslı Tromp	13,50 (Çetin, 2008)	Kalıntı	Mevcut	Kesme sarı kalker taşı ve tuğla
Harput Ulu Cami	Dikdörtgen (enine) plan tipi	Mevcut	Pandantif	4,00 (Durukan, 1999: 314)	Mevcut	Mevcut	Kesme sarı kalker taşı ve tuğla
Kızıltepe (Dunaysır) Ulu Cami	Dikdörtgen (enine) plan tipi	Mevcut	Tromp	9,75 (Aslanapa, 1991)	Mevcut	Mevcut	Kesme sarı kalker taşı
Latifiye Cami	Dikdörtgen (enine) plan tipi	Mevcut	Tromp		Mevcut	Mevcut	Kesme sarı kalker taşı
Melik Mahmud Cami	Dikdörtgen plan tipi	Mevcut	Tromp	7,10	Mevcut	Mevcut	Kesme sarı kalker taşı
Harput Alacalı Cami	Dikdörtgen (enine) plan tipi	-	-	-	-	-	Kesme taş

Genellikle harim bölümünün kuzeyinde yer alan avlular, çoğunlukla yapıdan ayrılarak bağımsız olarak kullanılmış, bazen de küçültülerek yapıya dâhil edilmiştir.

İç mekânlarda ise çok sayıda taşıyıcı ayak ve bu ayakları bağlayan kemerler mevcuttur. Bu nedenle harimlerde mekânsal bütünlükten bahsetmek oldukça güç olmaktadır (Güler ve Aktuğ Kolay, 2006: 86). Bu durum camilerin en önemli bölümlerinin orta sahın ve mihrap önü birimleri olmasına sebebiyet vermiştir. Mihrap önü kubbeler, tüm yapıya hâkim bir konumda inşa edilmişlerdir. Harimler mihrap önü kubbe ile örtülürken, enine ve boyuna sahınlar çoğunlukla beşik tonozla örtülmüştür. Mihrap önü kubbe geçiş elemanı olarak tromp ve pandantifler kullanılmıştır. Bu bölümde sınırlı sayıda mukarnasların da kullanıldığı görülmüştür. Cephe görünümlerinden mihrap önü kubbelerin, sekizgen veya onikigen kasnaklar üzerine oturduğu gözlemlenebilmektedir. Kubbe dışında, diğer sahınlar ise kar ve yağmur suyunu tahliye etmek amacıyla sıkıştırılmış düz toprak çatı şeklinde inşa edilmiştir. Zamanla gerçekleştirilen müdahaleler sonucu toprak çatının, farklı malzemeler ile kaplandığı görülebilmektedir.

Genellikle kesme ve moloz taş kullanılarak inşa edilen camilerde, kemerlerde ve üst örtülerde bazen tuğlaya rastlanmaktadır. Bölgede, yerel taş malzemenin sağladığı avantajlardan da faydalanılmış ve yapılarda zengin süslemelere de yer verilmiştir.

Cami cephelerinde en önemli unsur anıtsal taç kapıdır. Zengin taş işçiliği ile süslenen taç kapılar, cami cephelerinin en hareketli ve dikkat çekici olan bölümüdür. Artuklu dönemi cami cephelerinde açıklık sayısı genellikle oldukça azdır. Bu durum dikkatlerin anıtsal taç kapılara veya farklı teknikler ile inşa edilen kubbelere çekilmesine neden olmuştur. Bir yapıda cephe düzenlemesinin temsil ettiği sembolik ağırlığın taç kapı üzerinde yoğunlaşması, Kuban (2002) tarafından Anadolu Selçuklu döneminin en karakteristik özelliği ile benzerlik gösterdiği belirtilmiştir.

Camilerdeki pencere açıklıklarının genellikle üst kotlarda konumlandığı ancak aydınlatma amaçlı olarak az sayıda da olsa düşük kotlarda da yer aldığı görülmektedir. Mihrap önü kubbenin oturduğu kasnaklar üzerinde genelde karşılıklı ve dört yöne konumlandırılan aydınlatma pencereleri de bulunmaktadır. Pencere açıklıkları, çoğunlukla dönemin gerekliliği olan kemer ile geçilmiştir. Bu kemerlerin üzerinde ince taş işçiliği ile işlenmiş süslemelere de rastlanmaktadır.

Camilerin özgün hallerinde minaresiz inşa edildiği ve genellikle onarım sürecinde yapılara minarelerin eklendiği düşünülmektedir. Artuklu dönemine ait özgün minare, 12. yüzyıla

tarihlenen Harput Ulu Camii minaresidir. Tuğla ile inşa edilen minare silindir formdadır ve günümüzde gövde kısmından eğilmeye başladığı açıkla gözlenebilmektedir (Güler ve Aktuğ Kolay, 2006: 86). Özmen (2007: 67), ise Anadolu'daki ilk çifte minarenin kesin olmamakla birlikte bu dönemde yapıldığını belirtmektedir. Altun (1971b: 199), Mardin Ulu Cami'nin kuzey batı tarafında ikinci bir minarenin kaide izlerinin bulunduğunu ve Mardin Ulu Cami'nin Anadolu'daki ilk çifte minareli camilerden biri olduğunun kabul edilmesi gerektiğini ifade etmektedir.

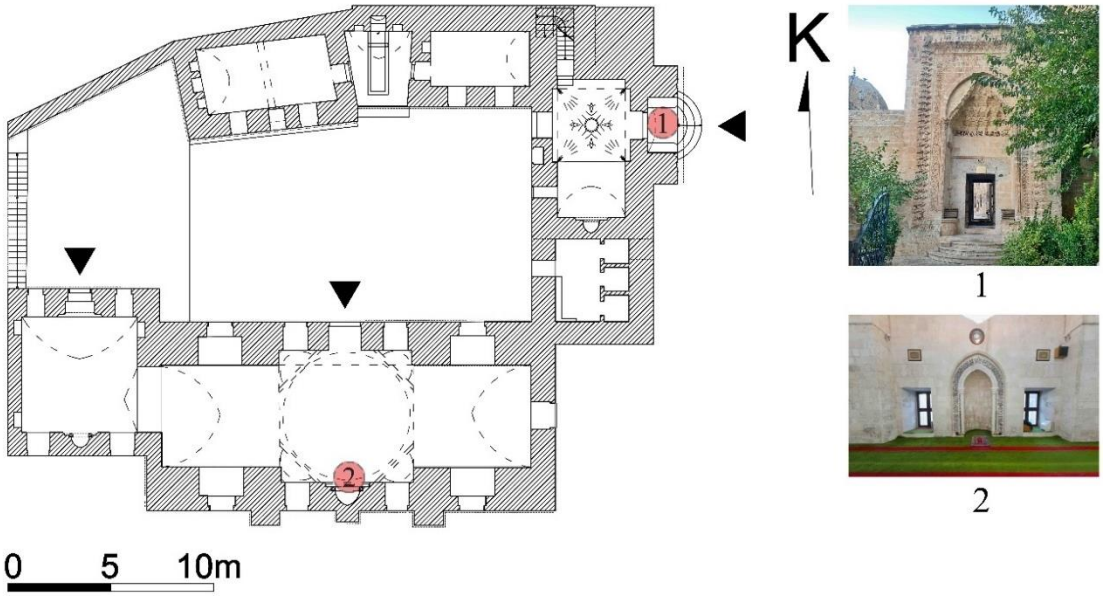
Artuklular döneminde, Anadolu Türk Mimarisine yön veren ve birçok yapı tipolojisinde etkisi görülebilen en önemli yapı türü camilerdir. Özellikle 12. yüzyılda bulundukları bölgeye özgü yapım tekniğine ve özgün plan tiplerine sahip olmaları, bu yapıları dikkatle çalışılması gereken bir konu haline getirmiştir.

2.4. Mardin Melik Mahmut Cami

Melik Mahmud Cami, Mardin'in merkez ilçesi olan Artuklu'da, Savur Kapı Mahallesi'nde Birinci Cadde üzerinde yer almaktadır. Tapu kadastral kaydında 163 ada 7 numaralı parsele kayıtlı olan Melik Mahmut Cami, Mardin dağının eteklerinde geniş bir arazi üzerinde, 1.167,00 metrekarelik tapu alanında konumlanmıştır (Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü).

Caminin inşa tarihini içeren taç kapı nişinde yer alan kitabe *"...ed din Ahmed bin Sultan el-Melik es Salih Şems ed Dünya veddin bin Artuk adını ve sonunda...sene 7..."* ifadelerden, caminin Hicri 7. yüzyıl, Miladi 14. yüzyılda yapıldığı anlaşılmaktadır (Altun, 1978: 110). Harim mekanının güney iç duvarında mihrap nişini çevreleyen Ayet-el Kürsi'nin yazılı olduğu bir kitabe daha yer almaktadır (Şekil 2.3).

Yapıldığı ilk yıllardan günümüze çeşitli onarım ve müdahalelerle ulaşabilen caminin bugünkü durumunda, enine gelişmiş harim mekanı, avlusu, mihrap önü kubbesi ile özgün Artuklu dönemi cami özelliklerini barındırdığı görülmektedir.



Şekil 2.3. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Kitabelerin cami içerisindeki konumları

2.4.1. Mekansal kurgu ve cephe özellikleri

Günümüzde cami, enine gelişim gösteren dikdörtgen planlı harim bölümü, avlu, sebil, giriş eyvanı ve farklı boyutlardaki (imam odası vb.) mekanlardan oluşmaktadır.

Caminin doğu yönünde bulunan ve camiye tek giriş açıklığı olan anıtsal taç kapısı ile camiye erişim sağlanmaktadır. Taç kapı, caminin beden duvarından daha yüksekte ve öne doğru çıkıntılı şekilde konumlandırılmıştır (Resim 2.6). Tamamen kesme taştan inşa edilen taç kapı dikdörtgen bir forma sahiptir ve üzerinde değinildiği üzere kitabe yer almaktadır. Kitabe ile birlikte taç kapı üzerinde birçok özgün taş içliği oluşturulan süslemeler görülmektedir. Giriş kapısında iki adet seki bulunmaktadır. Üç basamaklı bir merdivenden erişilen taç kapının ardından yıldız tonozla örtülü kare bir giriş mekânına erişilmektedir.

Yapının avlusuna girişi sağlayan eyvan, kare plan tipine sahiptir. Giriş eyvanının sağında minare girişi, solunda ise farklı boyutlarda tonozlarla örtülü iki mekân bulunmaktadır. Günümüzde bu mekanlardan birinde ıslak hacimler yer almaktadır. Ayrıca bu giriş mekânının geçiş elemanı olan tonozun merkezinde, özgün taş işçiliği ile ortaya konmuş bir süslemeli rozet bulunmaktadır (Resim 2.7).



Resim 2.6. Melik Mahmut Cami - Doğu yönünde bulunan taç kapısı (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)



Resim 2.7. Melik Mahmut Cami - Giriş eyvanı ve tonozu (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Giriş eyvanından geçilmek ile birlikte ulaşılan avlunun kuzey yönünde, ortada geleneksel Mardin ibadet yapılarında yer alan sebil ve sebilin iki yanında tonozlar ile örtülü birer mekan; güneyinde harim mekanı, batısında ise kubbeye erişim sağlayan merdiven bulunmaktadır. Zemin döşemesi de kesme taştan oluşturulan avludan, iki adet kapı ile harim mekanına ulaşılmaktadır.

Harim mekânı mihraba paralel tek sahından oluşur. Ana mekân yaklaşık olarak 27 x 9 m boyutlarında doğu-batı doğrultusunda konumlandırılmıştır. İç mekân tek açıklık/tek sahın ile geçilmiş, mekân içerisinde herhangi bir taşıyıcı eleman bulunmamaktadır (Resim 2.8).

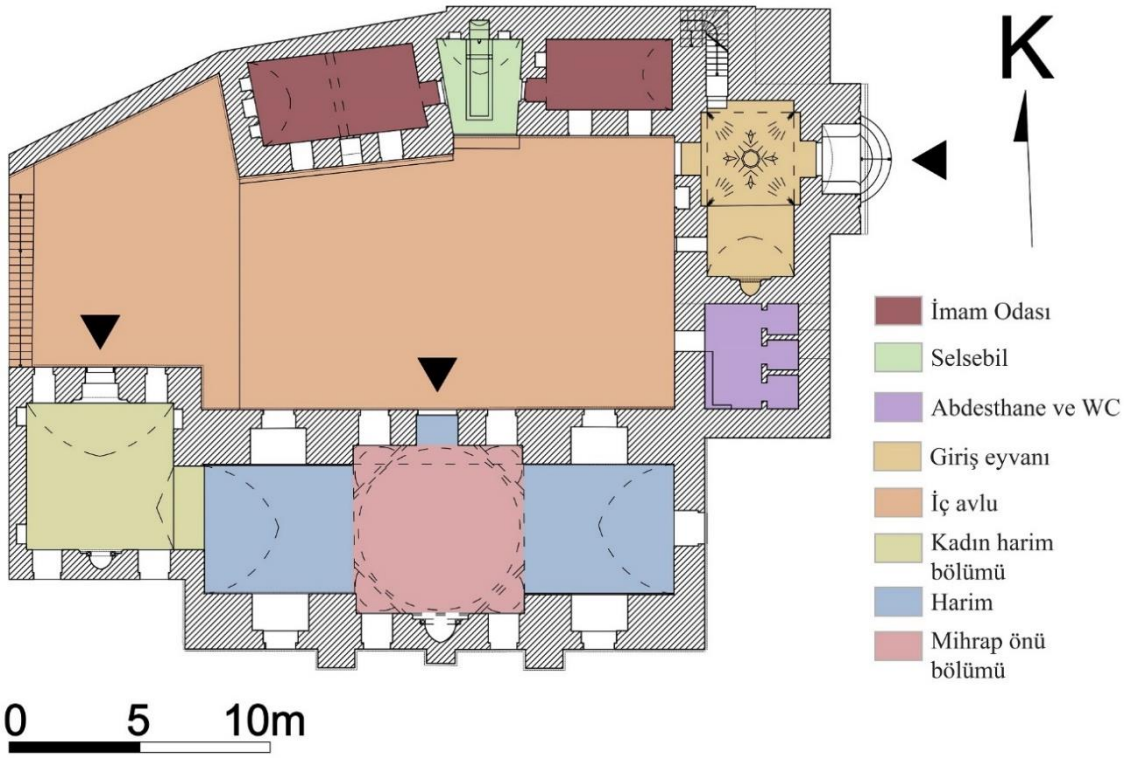


Resim 2.8. Melik Mahmut Cami tek açıklıktan oluşan harim mekânı (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Mihrap önü kubbesi bulunan yapıda, kubbenin doğu ve batı yönünde ise beşik tonozlar ile geçilmiştir. Böylece Artuklu dönemi yakın çevresinde inşa edilen enine düzenli, mihrap önü kubbeli harim tipi oluşmuştur. Mihrap önü kubbesi, tromplar üzerine oturtulmuştur. Kubbe, Artuklu dönemi yapılarında olduğu gibi bütün harim alanında en vurgulu mimari elemandır. Harimde, ana kubbe altında mihrap bulunurken ayrıca günümüzde kadınlar mescidi olarak kullanılan ve ana harim mekânı ile bitişik ancak yaklaşık 3 m kuzey yönüne kaydırılmış mekânda da bir adet mihrap nişi bulunmaktadır. Harim mekanının güney cephe duvarında, kubbe sınırı ile aynı hizada üç adet payanda bulunmaktadır.

Harim mekanına giriş, kuzey cephe duvarının ortasında ve günümüzde kadınlar bölümü olarak kullanılan mekânda bulunan toplamda iki adet kapı ile sağlanmaktadır. Her iki kapının da yanında iki adet pencere bulunmakta, toplamda ise avluya bakan 6 adet pencere açıklığı yer almaktadır. Camide bulunan iki adet mihrabın, ikisi de kesme taştan inşa edilmiş ve iki yanında bulunan sütuncelerle taşınmaktadır.

Mardin Melik Mahmut Cami'nin sahip olduğu mekanlar arası organizasyon Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Mekânsal ilişkinin tanımlandığı plan

Yapının düşey tek taşıyıcı elemanları olan ve cepheleri oluşturan beden duvarları, tamamen yöreye özgü Mardin kesme taşından örülmüştür. Cephede görülen yükseklikler mekanlar arası farklılık göstermektedir. Mihrap önü kubbenin yer aldığı harim mekânı ile günümüzde kadınların harim mekânı olarak kullanılan bölümde yükseklik farkı bulunmaktadır (Resim 2.9a).

Caminin batı beden duvarı, başka bir yapı ile bitişik nizamlı inşa edilmiştir. Caminin en sade cephesi ise doğu cephesidir ve sadece harim mekânından açılan bir adet pencere ile yapının taç kapısı bulunmaktadır. Güney cephesi ise bulunan 3 adet payanda ve payandaların dilimli yarım kubbe düzeni dikkat çekmektedir. Kuzey cephesinde ise yer alan harim mekanının açıklıkları avluya bakmaktadır (Resim 2.9b). İmam odalarının kuzeye bakan cephesi ise kot farkından dolayı toprağa gömülüdür (Resim 2.9c). Caminin minaresi ise taç kapının sağında bulunmaktadır ve kare bir kaide üzerinde kesme taşlar ile inşa edilmiş silindirik bir gövdeye sahiptir (Resim 2.9d).



a b c d

Resim 2.9. Melik Mahmut Cami – a) Mihrap önü kubbe, b) Harim kuzey cephesi ve harim mekanına giriş kapısı, c) Selsebil ve imam odaları, d) Minare (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

2.4.2. Malzeme özellikleri

Caminin günümüz durumu ele alındığında; bölgeden çıkarılan sarı kireç taşı ile inşa edildiği, mimari elemanlarda ise ahşap, PVC, bakır, çelik, demir ve kurşunun da kullanıldığı görülmektedir.

Melik Mahmut Cami bölgedeki taş ocaklarından çıkarılan sarı renkli, gözenekli, çıkarıldığı an kolay işlenebilen ve zamanla dayanımı artan kireç taşından inşa edilmiştir. Kireç taşı, çoğunlukla kesme taş biçiminde kullanılmış, yer yer kaba yonu şekline de rastlanılmıştır. Ocaktan çıkarıldıktan sonra işlenen taşlar, çoğunlukla 50-55 cm yükseklikte ve 20-25 cm derinlikte tercih edilmiştir.

Günümüzde çatı örtüsü ise çimento şapı, avlu zemin döşemesi ise kesme taş ile kaplıdır. Dönemin yerel malzeme imkanları ele alındığında, özgün durumunda çatının sıkıştırılmış toprak dolgusu ile örtülü olduğu düşünülmektedir.

Camide yer alan tüm kapı ve pencere kanatlarında ahşap kullanılmıştır. Özellikle anıtsal taç kapının, uzun yıllardır ayakta olduğu ve önemli tarihi özellikler barındırdığı görülmektedir. Bu açıklıkların parmaklıklarında ve kenetlerinde demir, demir kenetlerin bağlantısında da kurşun kullanılmıştır. Kubbe aleminde ise bakır kullanılmıştır.

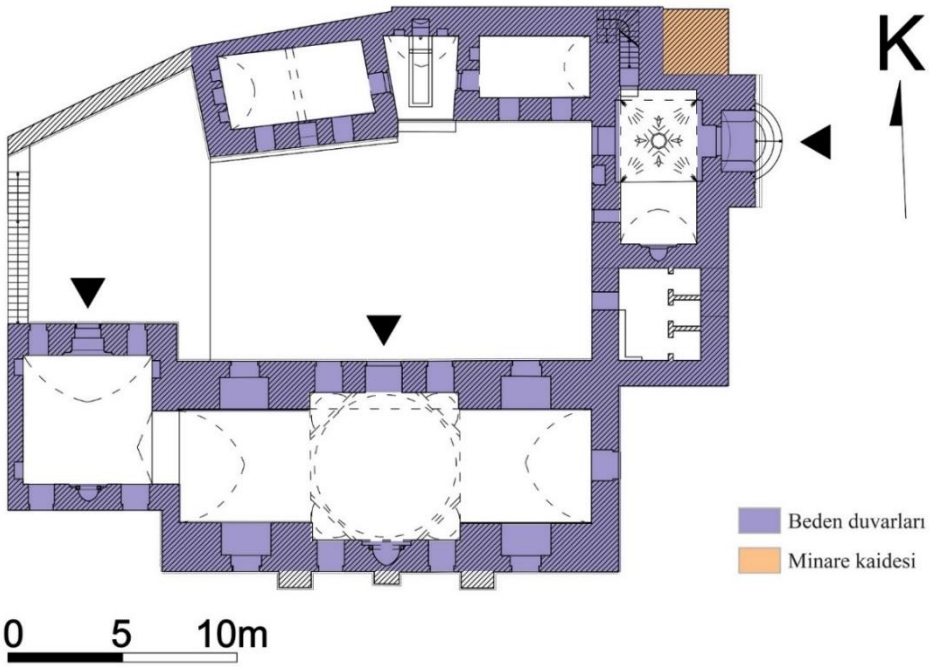
PVC malzemeye ise imam odalarında bulunan pencere açıklıklarında, ahşap desen görünümlü PVC pencere doğramalarının yer aldığı görülmüştür.

2.4.3. Yapım tekniği ve taşıyıcı sistem özellikleri

Camide taşıyıcı sistem elemanları; dikey/düşey taşıyıcılar, eğri eksenli taşıyıcılar, geçiş elemanları, destek elemanları ve örtü elemanları olmak üzere beş gruba ayrılarak incelenmiştir. Taşıyıcı sistem elemanlarının tümünde sarı kireç kesme taş kullanılmıştır.

Düşey taşıyıcılar

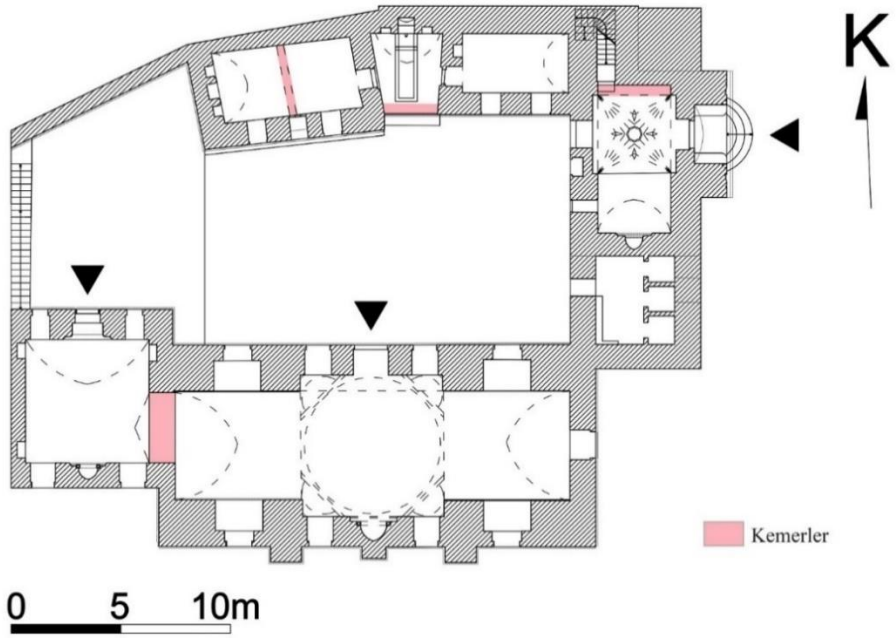
Caminin harim bölümünde mihrap önü kubbe ve beşik tonozlar, yükleri düşey taşıyıcı olan beden duvarlar aracılığı ile zemine aktarılmaktadır. Harim bölümünde değinildiği üzere beden duvarları haricinde, başka bir düşey taşıyıcı eleman bulunmamaktadır. En az derinliğe sahip beden duvarı kadın harim bölümü ile ana harim bölümünün kaydırıldığı noktada yer alan 70 cm'lik duvardır. En fazla derinliğe sahip beden duvarı ise güney cephe duvarında yer almaktadır ve derinliği 212 cm'dir. Benzer durum giriş eyvanı, imam odaları ve avlu mekanları için de geçerlidir. Beden duvarları ile taşınan mekanlarda, herhangi başka bir düşey taşıyıcı eleman yer almamaktadır. Günümüzde caminin kuzeydoğu ucunda yaklaşık 2,80 x 2,80 m boyutlarında kare kaideli başlayan, süslemeli daire gövdeli minaresi bulunmaktadır. Kaide yapının duvarları ile bitişik konumda yer almaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Düşey taşıyıcıların tanımlandığı plan

Eğri eksenli taşıyıcılar

Yapının eğri eksenli taşıyıcıları kemerlerden oluşmaktadır (Şekil 2.6). Harim mekânı tek sahınlıklı olması nedeniyle ve yapının tümünde taşıyıcı ayakların bulunmaması nedeniyle az sayıda kemer bulunmaktadır. Kadın harim mekanı ile ana harim mekanını bağlayan yerde sivri kemer tipinde, düzgün kesme taş ile inşa edilen kemer yer almaktadır. Ayrıca giriş eyvanında, selsebilde ve selsebilin batı yönünde kalan imam odasında da yer alan tonozların yükünü aktaran kemerler bulunmaktadır.



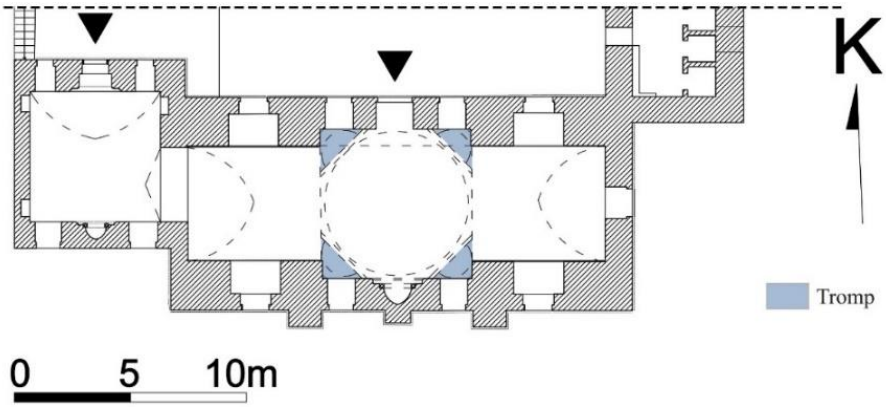
Şekil 2.6. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Eğri eksenli taşıyıcıların tanımlandığı plan

Geçiş elemanları

Kubbe mimarisinin en önemli elemanlarından biri olan tromp, kasnak üzerine oturan kubbenin köşe noktalarında dayanaklarını meydana getirmek amacıyla oluşturulur. Kubbe açıklığının çok geniş olmadığı mekan tasarımlarında tromplar, taşıyıcı özelliği yerine biçimsel amaçlar ile kullanılmaktadır (Kuban, 2010: 47).

Melik Mahmut Cami'de taşıyıcı işlevde, harim mekânında mihrap önü kubbesinin dairesel biçimi arasında kalan bölümlerde geçiş elemanı olarak tromp kullanılmıştır. Mihrabın önündeki kare birimi örten tromp geçişli kubbenin zemin üst kotundan başlayarak yüksekliği

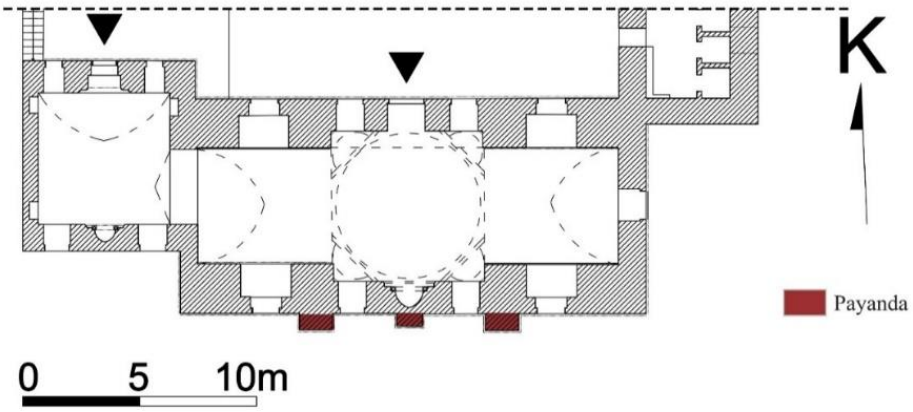
12,33 m'dir. Trompların başlangıcı ise 6,68 m, kubbe eteğinin başlangıcı 8,60 m yükseklikte yer almaktadır (Şekil 2.7)



Şekil 2.7. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Destek elemanlarının tanımlandığı plan

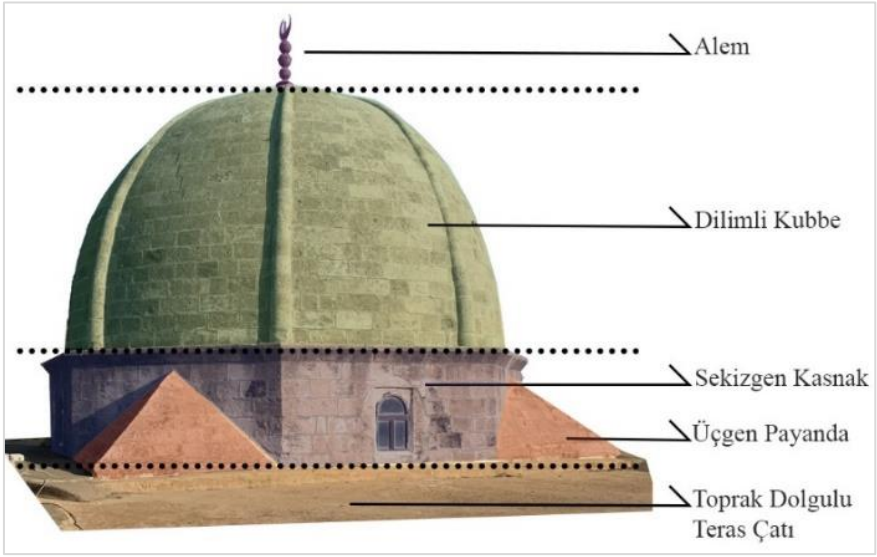
Destek elemanları

Melik Mahmut Cami güney cephesi duvarında 3 adet düşey payanda bulunmaktadır (Şekil 2.8). Bu payandalar, kubbe altında bulunan mihrabın sırt kısmında bir adet ve mihrabın merkez noktasına simetrik doğu ve batı yönünde iki adet olmak üzere toplamda 3 biçimde yer almaktadır. Doğu ve batı yönündeki iki payandanın, geçiş elemanları olan trompların yükünü karşılayan beden duvarlarına bitişik olması; kubbeyi de destekleyici olduğunu göstermektedir. Bu iki payandanın mihrap payandasından 1,17 m daha yüksek olması bu durumu doğrular niteliktedir. Payandalar yarım kubbe ile örtülüdür.



Şekil 2.8. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Destek elemanlarının tanımlandığı plan

Camide dıştan mihrap önü kubbesini taşıyan sekizgen kasnağın köşe noktalarında üçgen payandalar da bulunmaktadır (Şekil 2.9).

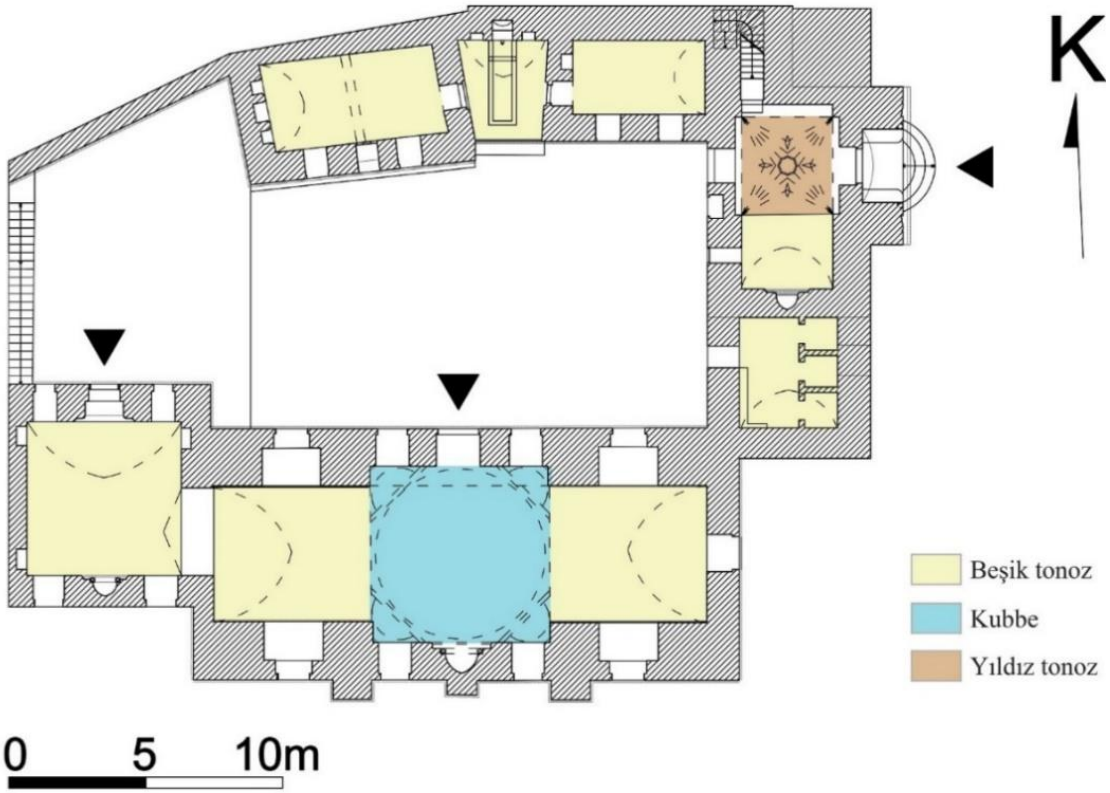


Şekil 2.9. Melik Mahmut Cami – Kubbenin dıştan çözümlenmesi

Örtü elemanları

Caminin enine dikdörtgen planlı harim mekanını mihrap önü kubbesi ve enine beşik tonozlar örtmektedir. Kubbe çapının yaklaşık iç ölçüsü 7,10 m, dış ölçüsü 7,50 m'dir. Kubbe, sekizgen kasnak üzerine oturmaktadır ve köşe noktalarından üçgen piramit şeklindeki destek payandaları bulunmaktadır. Kubbe üzerinde 8 adet dilim görünmektedir. Artuklu dönemi özelliği olan tamamı dilimli kubbeler ile benzerlik gösterdiği düşünülmektedir.

Yapının mihrap önü kubbesi dışında kalan tüm mekanlar tonoz ile örtülüdür. Mekanlar arasında tonoz tipi farklılık göstermektedir. Giriş eyvanında yıldız tonoz, imam odaları, selsebil ve ıslak hacimlerde ise beşik tonoz kullanılmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Melik Mahmut Cami (plan müellif Promim Mimarlık Ofisi'nden düzenlenmiştir.) – Örtü elemanlarının tanımlandığı plan

2.5. Mardin Ulu Cami

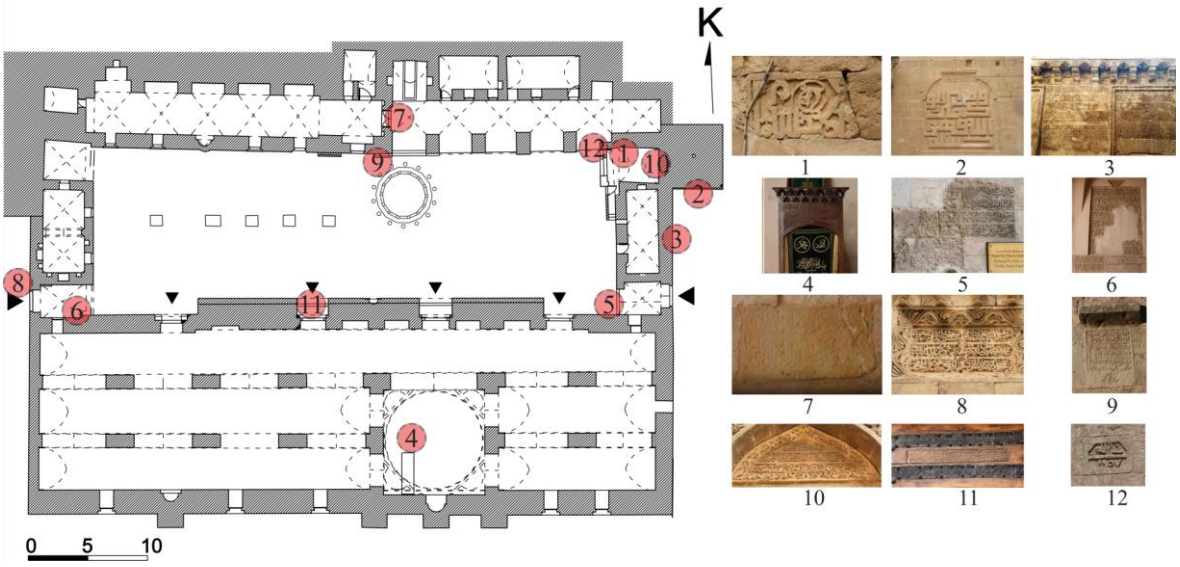
Mardin'in merkez ilçesi Artuklu'da Ulu Cami Mahallesi'nde bulunan Mardin Ulu Cami, tarihi Mardin kentsel dokusunun yoğun olduğu sit alanı içerisinde yer almaktadır. Mardin'i doğudan batıya doğru ikiye bölen ve en önemli caddesi olan Birinci Cadde'nin güney yönünde, Mardin dağının eteklerine doğru konumlanmaktadır. 416 ada 15 numaralı parsele kayıtlı olan tarihi cami, Vakıflar Genel Müdürlüğü'ne aittir. Bulunduğu parsel göre uyumlu şekillenen yapı, 1.874,66 metrekarelik tapu alanında bulunmaktadır (Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü).

12 tane kitabesi bulunan camide avlunun kuzey yönünde, revakların doğu bölümünde, duvar içerisinde kufi tekniği ile yapılmış, yıkılmış olan minarenin olduğu düşünülen 1 numaralı kitabe bulunmaktadır. 2 no'lu kitabe, üç parçadan oluşmakta ve minare kaidesinin güney yönünde bulunmaktadır. İl Gazi Kutbeddin adı ve iradesiyle minarenin inşa edildiği yazmaktadır. 3 no'lu kitabe caminin avlu duvarının doğu dış cephesinde yer almaktadır. Kitabe, 582/1186 yılında camiyi inşa ettiren Kutbeddin İlgazi oğlu Hüsameddin Yavlak

Arslan'ın emri ile veziri Ebu Mansur Alpkuş Bin Abdullah'ın 13 satırlık vergi kitabesidir. Artuklu dönemine ait olduğu düşünülen 4 no'lu üç satırlık kitabede, caminin içerisinde minber kapısının kenarında yer almaktadır. 5 no'lu kitabe Akkoyunlular döneminde kasaplardan alınan vergi hakkında bir fermandır ve caminin kuzey cephesinin doğu yönünde iki kitabe şeklinde yer almaktadır. 6 no'lu kitabe, caminin kuzey cephesinin bayı yönünde giriş eyvanındaki pencere çevresinde sekiz satır halinde bulunmaktadır. Çoğu tahrip olan kitabede Artuklu dönemine aittir ve 1260-1285 tarihlerinde sultanlık yapmış "Melik Muzaffer" adı geçmektedir. 7 no'lu kitabe, avlunun kuzeyinde, sadece H 1278/1861 M tarihinin okunabildiği Osmanlı dönemine ait iki satırlık silik kitabedir. 8 no'lu kitabe, avlunun batı cephesinde giriş kapısı üstünde yer almaktadır. Üç satır iki ayak şeklinde yazılan ve dini öğütler içeren kitabe, camide Osmanlıca olan tek kitabedir. 9 no'lu kitabe, avlunun kuzey yönünde ve şadırvanın arkasında bulunmaktadır. Mustafa Mevla'nın emri ile Hacı Ahmet adındaki zat tarafından H 1113/1702 M tarihlerinde bu bölümün onarıldığı anlaşılmaktadır. Minare kapısında bulunan 10 no'lu kitabe, II. Abdülhamit zamanında ve üzerinde H 1306/1888 M tarihinin yazıldığı üç satırlık kitabedir. 11 no'lu kitabe avludan harime açılan ortadaki kapının üzerinde iki demir kuşağın arasında yer almaktadır. Barındırdığı izlerden kapıya sonradan monte edildiği anlaşılan kitabede, Artuklu sultan sıfatları "melik, alim, adil" isimler geçmektedir. Kuzey yönündeki revakların üst kotunda bulunan 12 no'lu kitabe, camide Cumhuriyet döneminde yazılmış olan tek kitabe özelliği taşımaktadır. Tek bir taşın üzerine "Maşallah 1957" yazısı kazılmıştır (Çağlayan, 2017a; Çağlayan, 2017b; Altun, 1971b; Altun, 1978; Erdal, 2017, Şekil 2.11).

Yapıda fazla sayıda kitabe bulunsa da inşa tarihinin net olarak yazılı olduğu bir kitabe bulunmamaktadır. Minare kaidesindeki kitabeye göre 1176-1186 yılları arasında inşa edilmiştir ve en erken tarihli kitabe de Artuklu dönemine aittir (Çağlayan, 2017a: 14). Caminin günümüzde enine gelişim gösteren dikdörtgen bir plana sahip olması ve mihrap önü kubbesinin vurgulanması, Artuklu döneminde inşa edildiğini doğrular niteliktedir (Kutlu ve Soyluk, 2021).

1832'de Osmanlı yönetim sistemine karşı ayaklanan isyancı kuruluşların, Mardin'de devlet orduları ile yaptığı çatışma sırasında patlayan bombaların Mardin Ulu Cami'nde büyük hasarlara yol açtığına dair bilgiler bulunmaktadır (Ainsworth, 1842: 114). Cami bu dönemde köklü bir şekilde onarılmış olsa da onarım ile ilgili herhangi bir kitabe yer almamaktadır (Altun, 1978).



Şekil 2.11. Mardin Ulu Cami (plan Diyarbakır Kültür Varlıklarını Koruma Kurulu'ndan – DKVKK düzenlenmiştir) – Kitabelerin cami içerisindeki konumları

2.5.1. Mekansal kurgu ve cephe özellikleri

Tarihi Mardin kent dokusunu ikiye ayıran Birinci Cadde'den güneye doğru inilen yoldan ulaşılan camiye, günümüzde aynı hizada bulunan doğu ve batı kapılarından giriş sağlanmaktadır.

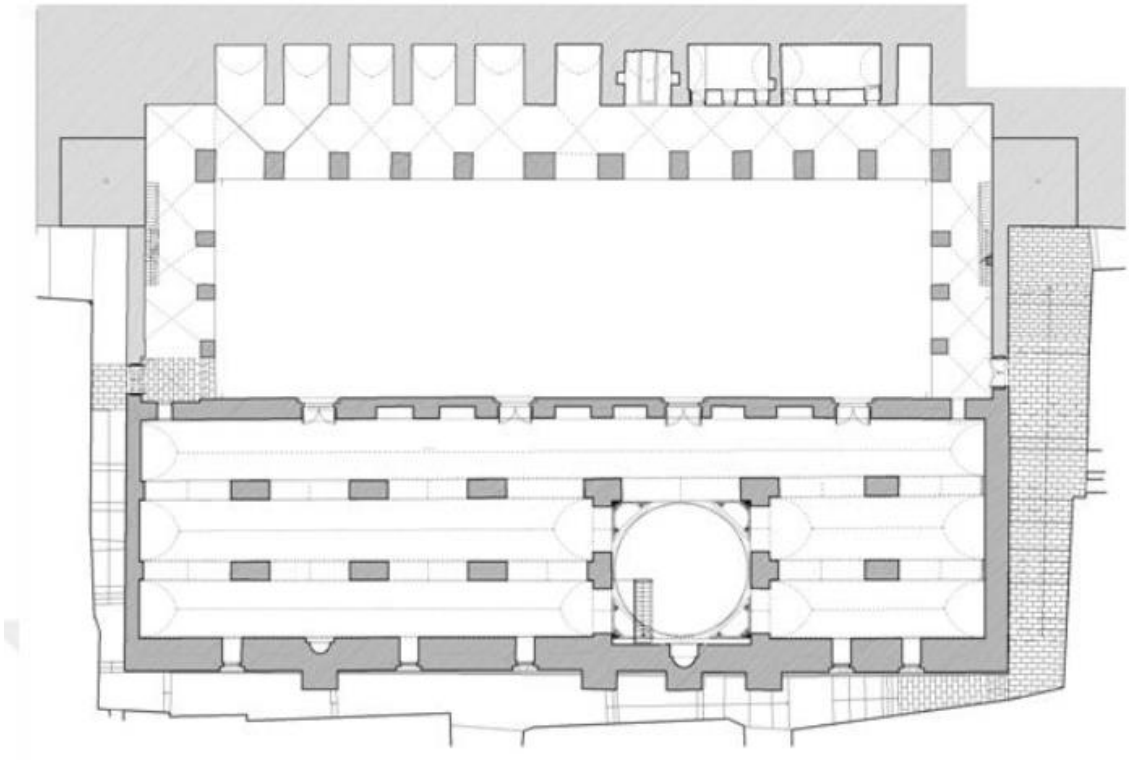
Mardin Ulu Cami, yaklaşık olarak 55 x 40 m doğu-batı doğrultusunda uzanan dikdörtgen planlı, enine doğrultulu, iç mekanda taşıyıcı ayaklara sahip, mihrap önü tek kubbeli, avlulu ve özgün halinde çifte minareli olduğu düşünülen bir yapıdır. Dikdörtgen sınırın güney yönünde harim mekanı, ortasında avlu ve kuzey yönünde revaklı mekanlar olmak üzere üç farklı bölümden oluşmaktadır. Mardin dağının eteklerindeki yapı topluluğu, kuzeyden güneye eğimin doldurulmasıyla konumlandırılmıştır (Resim 2.10).

Dikdörtgen harim kütlesinin kuzey yönünde bulunan yaklaşık olarak 45 x 15 m boyutlarında doğu-batı doğrultusunda uzanan avlu bulunmaktadır. Avluya, batıda ve doğuda aynı hizada yer alan iki kapı ile girilir. Simetrik olarak düzenlenen kapılar, çapraz tonozlu üstü kapalı yarı açık mekana ve oradan da sivri kemerlerle avluya erişim sağlamaktadır. Bu girişlerin, kuzey yönünde farklı düzenlere sahip, güney-kuzey doğrultusunda uzanan mekanlar yer almaktadır. Bu mekanların özgün olmadığı yapım tekniklerinden anlaşılmaktadır. Batı yönündeki tek katlı, beşik tonozlu dikdörtgen planlı; doğu yönündeki iki katlı alt katı beşik tonozlu üst atı çapraz tonozlu dikdörtgen planlı mekanlardır. Avlunun kuzey ve batı

yönlerinde 18. ve 19. yüzyıl dönem ekleri, doğu yönünde ise 15. ve 16. yüzyıl ekleri olduğu ve özgün durumunda avlunun doğu, batı ve kuzey yönlerinde revaklar ile çevrili olduğu DKVKK'nın 2009 yılında yapmış olduğu restitüsyon çalışmasında ve geliştirilerek Çağlayan (2017a) doktora tezinde yer almaktadır (Şekil 2.12).



Resim 2.10. Mardin Ulu Cami yivli kubbe, harim duvarı, avlu ve revaklı bölüm genel görünüm (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)



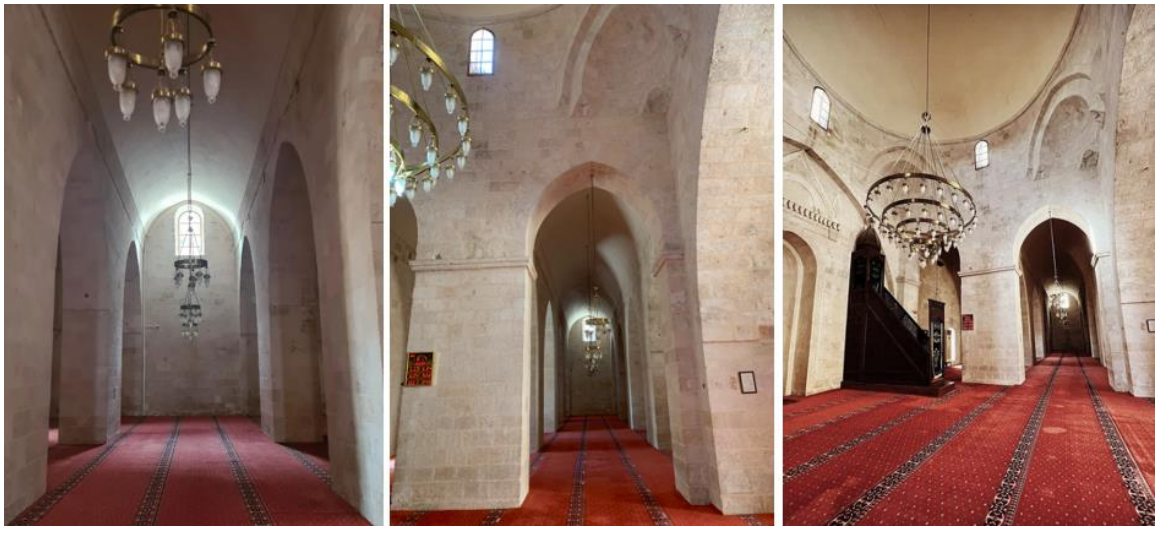
Şekil 2.12. Mardin Ulu Cami restitüsyon çalışması (Çağlayan, 2017a)

Avlunun kuzey yönünde kapatılan revakların bir bölümü günümüzde kadınlar için ayrılan harim olarak kullanılmaktadır. Bu bölüm ile revak bölümü arasında Mardin tarihi yapılarında sık sık rastlanılan selsebil bulunmaktadır (Resim 2.11).



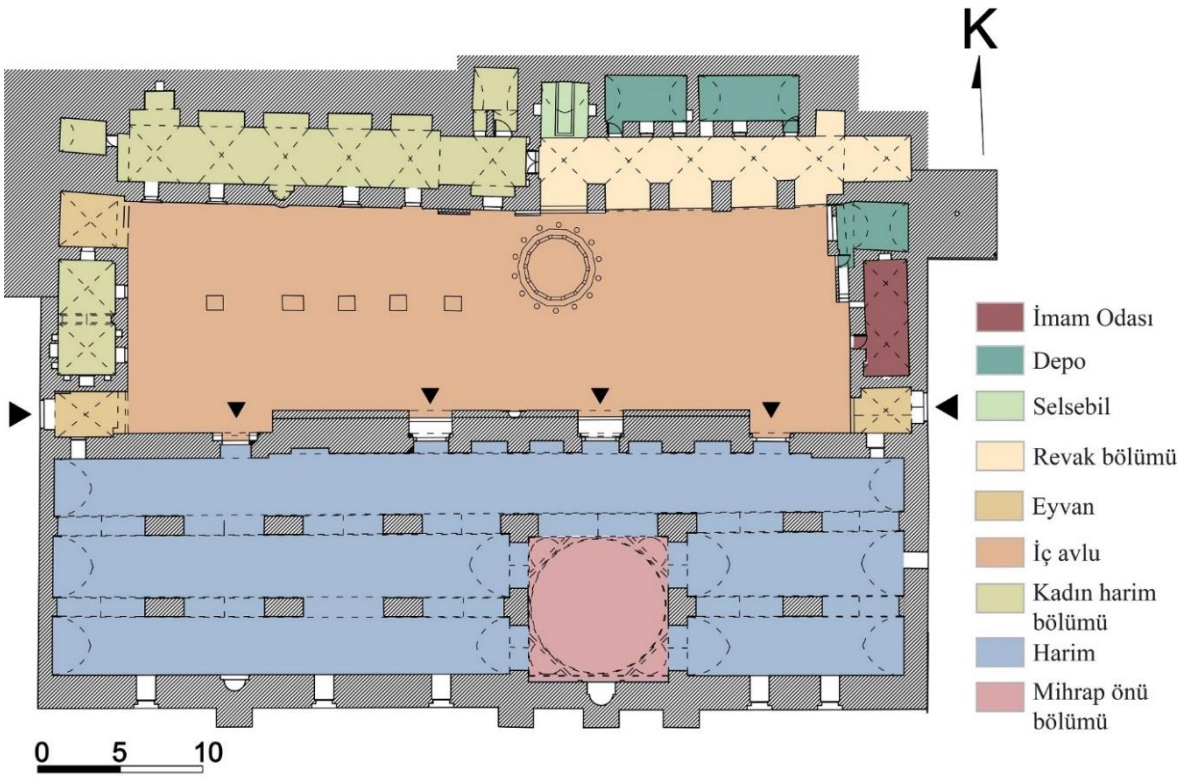
Resim 2.11. Mardin Ulu Cami – Avlu günümüz görünümü

Cami harimi, dikdörtgen planlı cami kütlesinin güney ucunda, 51,50 x 13,10 m boyutlarında doğu-batı yönünde enlemesine uzanmaktadır. İki adet duvara bitişik, iki adet düzgün olmayan T kesitli olmak üzere toplamda sekiz adet ayağın yaklaşık olarak 3,5 metre arayla iki sıra halinde düzenlenmesi sonucu, cami içerisinde mihrap duvarına paralel üç sahın oluşmuştur (Resim 2.12).



Resim 2.12. Mardin Ulu Cami harim mekânı (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Sahınlar, enine uzanan beşik tonozlar ile örtülüdür ancak doğu yönüne yakın hizada, sahınlardan güneyden başlayarak ikisini kesecek şekilde mihrap önü kubbe yer almaktadır. Böylece Artuklu dönemi yakın çevresinde inşa edilen enine düzenli, mihrap önü kubbeli cami tipi oluşmuştur. Harim içerisinde arka arkaya bulunan T kesitli ikişer ayaklardan güney duvarına bitişik ayaklara uzanan iki kemerin üzerine tromp geçiş elemanı kullanılarak oturan 8,34 m çapında dıştan yivli mihrap önü kubbesi bulunmaktadır. Kubbe, Artuklu dönemi yapılarında olduğu gibi bütün harim alanında en vurgulu mimari elemandır. Harimde; ana kubbe altında Hanefi mezhebine, aynı duvarın batı yönüne doğru ise Şafi mezhebine ayrılmak üzere iki mihrap kullanılmaktadır. Caminin güney cephesinde, mihrapların arkasına gelecek hizada üstü yarım daire kemerli iki payanda olmak üzere toplamda dört payanda bulunmaktadır. Harime kuzey yönündeki duvarda sivri kemerli ve sütunceleri olan 4 farklı kapı ile girilmektedir. Kapılar arasında kalan duvarlarda, günümüzde destek duvarları görünmektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Mardin Ulu Cami (plan DKVKK'dan düzenlenmiştir) – Mekânsal ilişkinin tanımlandığı plan

Kuzey-güney doğrultusunda eğimli bir arazide konumlanmış olmasına rağmen arazi düzlendikten sonra caminin inşa edildiği anlaşılmaktadır. Ancak eğimden dolayı cami avlusunun kuzey yönünde, üst kotta bulunan dükkanların pencere açıklıkları bulunmaktadır.

Cami cephelerinin çevre yapılar ile çok yakın, özellikle kuzey cephesinin de çarşılar ile bitişik olması nedeniyle; günümüzde cephelere oranla çoğunlukla minaresi, yivli kubbesi ve güney cephesinde dört yarım kemerli payandaları ile dikkat çekmektedir.

Caminin özgün durumunda çifte minareli olduğu söylenmektedir. Günümüzde doğu cephesinde 5,40 x 5,40 m kare kesitli kaide üzerine oturan minarenin, batı cephesine aynı hizasında bir minarenin daha bulunduğu restitüsyon çalışmalarında görülmektedir. Doğudaki mevcut minarenin kare planlı kaide kısmı özgün özelliklere sahiptir. Minarenin Hicri 1304, Miladi 1887 yılında düşen bir yıldırım sonucu yıkıldığı ve günümüzdeki görünümünü H 1306/1889 M yılında aldığı bilinmektedir. Günümüzde mevcut olmayan batıdaki minare minarenin ne zaman yıkıldığı bilinmemekle birlikte Hicri 803, Miladi 1400 yılında Timur'un istilası sırasında yıkıldığı düşünülmektedir (Bulduk, 1999: 50). Caminin en dikkat çekici bölümü olan yivli kubbesi ile ilgili Gabriel (2014/1931)'in özgün olmadığına dair görüşleri bulunmaktadır. Ancak, 14. yüzyıl sonlarında inşa edilen Zinciriye Medresesi ve 15. yüzyıl eseri Kasımiye Medresesi kubbelerinin de yivli biçimde olması bu görüşleri zayıflatmaktadır (Resim 2.13).



Resim 2.13. Mardin Ulu Cami yivli kubbe (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

Caminin güney cephesinde dört adet yaklaşık 1,20 m dışarıya taşan, genişliği 2 m'yi bulan ve yüksekliği de 9 – 13 m arasında değişkenlik gösteren dört adet payanda bulunmaktadır (Resim 2.14).



Resim 2.14. Cami güney cephesinde bulunan payandalar (İzzettin Kutlu arşivi, 2022)

2.5.2. Malzeme özellikleri

Caminin günümüz durumu ele alındığında, taşıyıcı sistemin tamamen bölgeye özgü sarı kireç taşı ile inşa edildiği, mimari elemanlarda ise ahşap, bakır, çelik, demir ve kurşunun da kullanıldığı görülmektedir.

Camide kullanılan sarı kireç taş malzeme, bütün yüzeylerde düzgün kesme taş tekniği ile örülmüştür. Taş ocaklarında istenilen boyutlarda işlenebilen taşlar 50-55 cm yükseklikte, 20-25 cm derinlikteki kullanılmıştır. Aynı boyutlardaki taşlar kubbe ve kemerlerde de görülmektedir. Bu taşlar tarihi Mardin kentinin güney eteklerinde bulunan ve günümüzde kullanılmayan taş ocaklarından çıkarılmıştır. Bugünkü hali ile çatı da kesme taş ile kaplıdır. Çatının özgün halinde sıkıştırılmış toprak çatı olduğu, Vakıflar tarafından gerçekleştirilen 1950-1980 yılları arasındaki onarımlar sonucu betonla kaplandığı ve 2000 yıllarında gerçekleştirilen onarımlar sonucu ise beton şap döküldükten sonra taşı ile kaplanmıştır (Çağlayan, 2017b).

Ahşap, cami içerisinde tüm kapı ve pencere kanatlarında görülmektedir. Bu açıklıkların parmaklıklarında ve kenetlerinde demir, demir kenetlerin bağlantısında da kurşun kullanılmıştır.

Kubbe aleminde özgün olduğu düşünülen bakır malzeme bulunmaktadır.

2.5.3. Yapım tekniği ve taşıyıcı sistem özellikleri

Camide taşıyıcı sistem elemanları; dikey/düşey taşıyıcılar, eğri eksenli taşıyıcılar, geçiş elemanları, destek elemanları ve örtü elemanları olmak üzere beş gruba ayrılarak incelenmiştir.

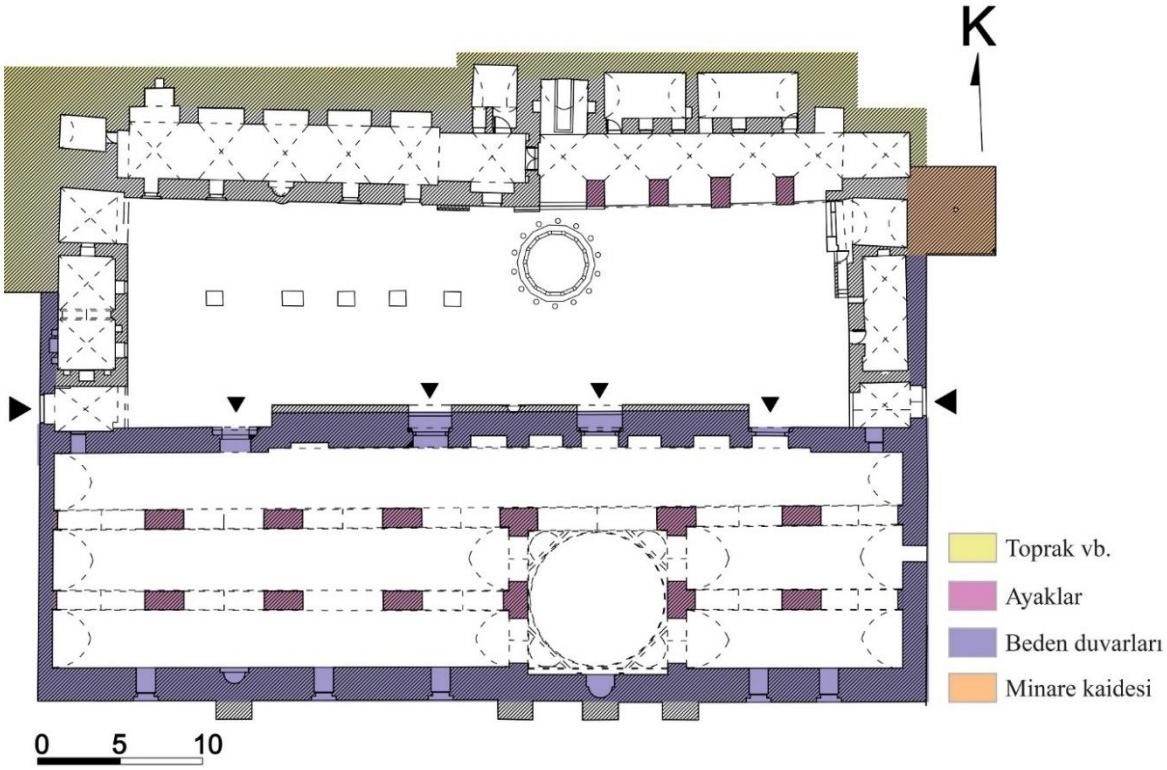
Taşıyıcı sistem elemanlarında da tümüyle sarı kireç kesme taş kullanılmıştır.

Düşey taşıyıcılar

Caminin harim bölümünde mihrap önü kubbe ve beşik tonozlar, yükleri iki merkezli sivri kemerler ile düşey taşıyıcılara aktarmaktadır. Harim bölümünde, ikisi duvara bitişik, ikisi T kesitli olan 8 adet ayağın mekânı üçe bölecek şekilde iki sıra halinde tekrar etmesi sonucunda toplamda 16 adet düşey taşıyıcılar ve beden duvarları ana taşıyıcıları oluşturmaktadır. Dikdörtgen kesitli ayaklar, yaklaşık 1,15 x 2,35 m boyutlarındadır. Ayak arası mesafe doğu-batı doğrultusunda 4,90 m – 5,30 m, kuzey-güney doğrultusunda ise 3,50 – 3,80 m arasında değişiklik göstermektedir. Düzgün olmayan T kesitli dört adet ayak ise mihrap önü kubbenin yükünü karşılamaktadır. Kubbenin örtüğü alan 8,50 x 8,50 m boyutunda kare mekandır. Beden duvarları; taştan iki dış yüzey ve merkezi harç dolgulu duvar olmak üzere, toplamda üç bölüm ve çift cidardan oluşturulmuştur. Kalınlığı en geniş noktada 2,11 m, en dar noktada ise 0,85 m'dir.

Caminin açık avlu mekânında düşey taşıyıcı bulunmamaktadır. Özgün durumunda avluyu saran ve günümüzde kuzeydoğu yönünde özgün olarak bulunan revaklarda ayaklar, yaklaşık olarak 1,15 x 1,75 m boyutlarında dikdörtgen kesitlidir. Harim bölümündeki ayaklar doğu-batı ekseninde uzanırken revaklarda ayaklar kuzey-güney ekseninde konumlandırılmıştır.

Caminin kuzeydoğu köşesinde 5,40 x 5,40 m ölçülerine sahip kare kaideli ve süslemeli silindirik gövdeli bir minare bulunmaktadır. Kitabenin yer aldığı kare kesitli kaide minarenin özgün kısımdır. DKVKK tarafından yapılan restitüsyon çalışmasında vakfiyesinden, ilk inşa edildiğinde çifte minareli olduğu tespit edilmiştir. Doğu yönünde bulunan mevcut minarenin batı yönü hizasında, simetrik bir minare olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.14).

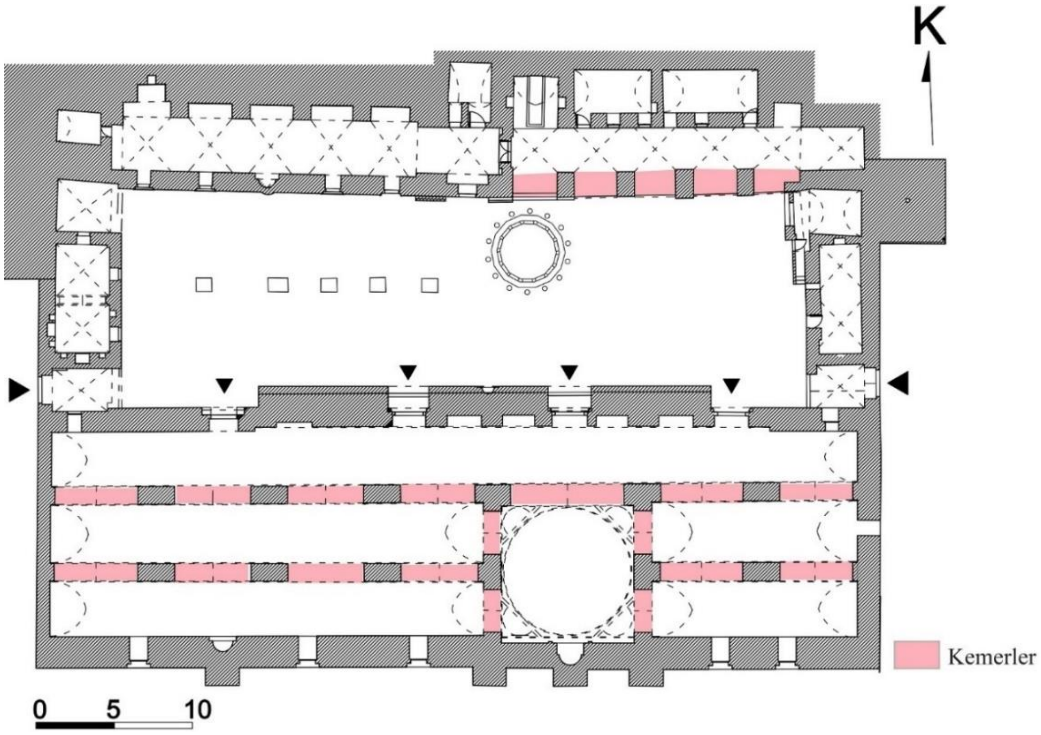


Şekil 2.14. Mardin Ulu Cami (plan DKVKK'dan düzenlenmiştir) – Düşey taşıyıcıların tanımlandığı plan

Eğri eksenli taşıyıcılar

Yapının eğri eksenli taşıyıcıları kemerlerden oluşmaktadır. Camide ayakları birbirine bağlayan çok sayıda kemer yer almaktadır. Tamamı iki merkezli sivri kemer tipinde, düzgün kesme taş ile inşa edilmiştir.

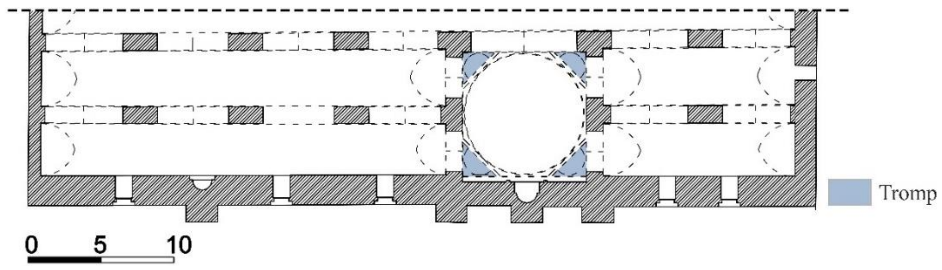
Harimi örten ana kubbeyi taşıyan, düzgün olmayan T kesitli ayakları birbirine bağlayan beş ana kemer yapıdaki en önemli kemerlerdir. Kubbe ve revak kemerleri bir sıra tek ve bir sıra çift taşla örülmüştür. Kubbeyi taşıyan kemerler ile avluda revak kemerlerinin açıklığı aynı olmak üzere 2,73 m'dir. İki merkezli sivri kemerlerde, açıklık 0,91 m olmak üzere üç eşit parçaya bölünmüş ve her bir yayın yarıçapı açıklığın üçte ikisi olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Mardin Ulu Cami (plan DKVKK'dan düzenlenmiştir) – Eğri eksenli taşıyıcıların tanımlandığı plan

Geçiş elemanları

Kubbe mimarisinin en önemli elemanlarından biri olan tromp, kasnak üzerine oturan kubbenin köşe noktalarında dayanaklarını meydana getirmek amacıyla oluşturulur. Kubbe açıklığının fazla olmadığı durumlarda ise tromplar, biçimsel ve estetik amaçlı kullanılmaktadır (Kuban, 2010: 47). Mardin Ulu Cami mihrap önü kubbesinde taşıyıcı işlevde geçiş elemanı olarak tromp kullanılmıştır. Mihrabın önündeki kare birimi örten tromp geçişli kubbenin yüksekliği 15,37 m'dir. Trompların başlangıcı 8,00 m., kubbe eteğinin başlangıcı 10,67 m. yükseklikte yer almaktadır (Şekil 2.16).

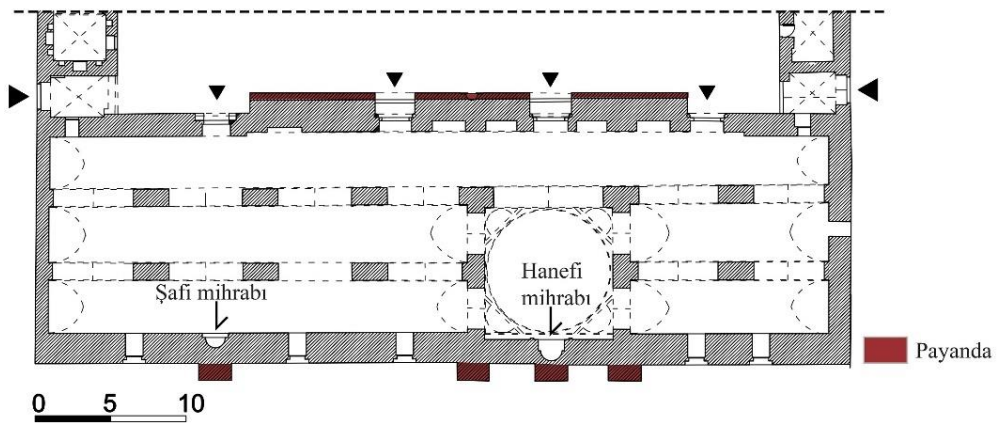


Şekil 2.16. Mardin Ulu Cami (plan DKVKK'dan düzenlenmiştir) – Tek geçiş elemanı olarak kullanılan tromp

Destek elemanları

Mardin Ulu Cami'de güney cephesi duvarında 4 adet düşey payanda bulunmaktadır. Bu payandalardan biri Hanefi mihrabının arkasında, biri Şafi mihrabının arkasında ve kalan iki payanda ise kubbe altında bulunan Hanefi mihrabının doğu ve batı yönünde yer almaktadır. Bu payandaların, kubbeyi taşımak amacıyla duvara bitişik iki adet ayak ile aynı hizada olması; kubbeyi de desteklediklerini göstermektedir. Bu iki payandanın mihrap payandasından 0,80 m daha yüksek olması bu durumu doğrular niteliktedir. Mihrapların arkasına denk gelen payandalar yarım kubbe, diğerleri ise dilimli yarım kubbe ile örtülüdür. Camide dıştan mihrap önü kubbesini taşıyan sekizgen kasnağın köşe noktalarında üçgen payandalar da bulunmaktadır.

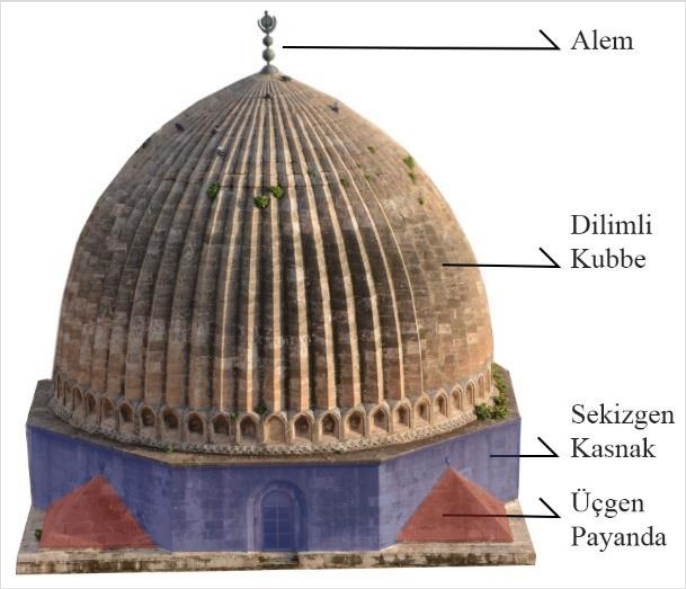
Günümüzde caminin harimine giriş cephesinde bulunan 4 kapı arasında kalan duvarların arasında özgün olmayan destek duvarları bulunmaktadır. Derinliği 0,45 m olan destek duvarlarının yapım tekniği ile özgün olmadığı açıkça anlaşılmaktadır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Mardin Ulu Cami (plan DKVKK'dan düzenlenmiştir) – Destek elemanlarının tanımlandığı plan

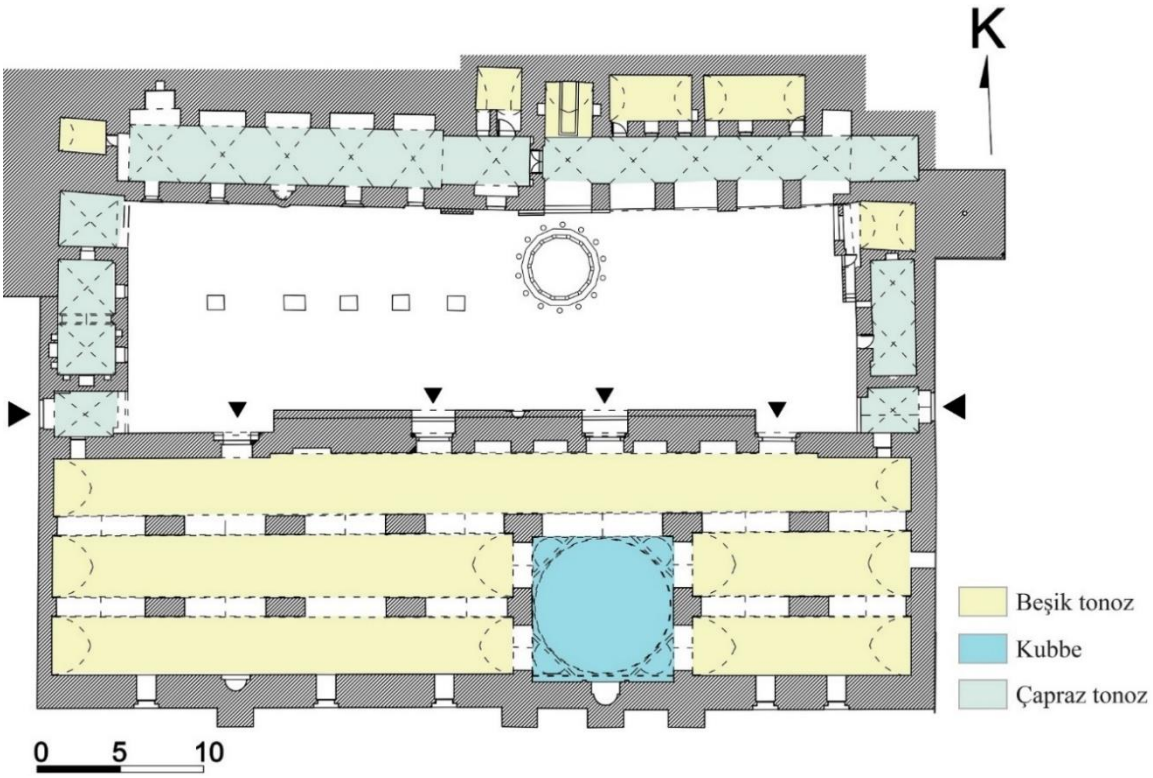
Örtü elemanları

Cami harim mekanı, mihrap önü kubbesi ve beşik tonozlar ile örtülüdür. Kubbe çapı iç ölçüsü 8,34 m, dış ölçüsü 8,90 m'dir ve kubbenin çift cidarlı inşa edildiği düşünülmektedir. Kubbe kasnağı sekizgen olup dört köşeden üçgen payandalarla desteklenmiştir. Kubbe iç mekanda yarım küre biçiminde algılansa da, rölöveler sonucu iki merkezli sivri kubbe olduğu görülmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Mardin Ulu Cami – Dilimli kubbenin dıştan çözümlenmesi

Özgün halinde avluyu üç yönde saran revaklarda ise günümüzde halen çapraz tonozlar bulunmaktadır. Bugün depo olarak kullanılan kuzeydoğu yönünde bulunan 3 mekanın ve eyvanların üzeri ise beşik tonozlar ile örtülüdür (Şekil 2.19).



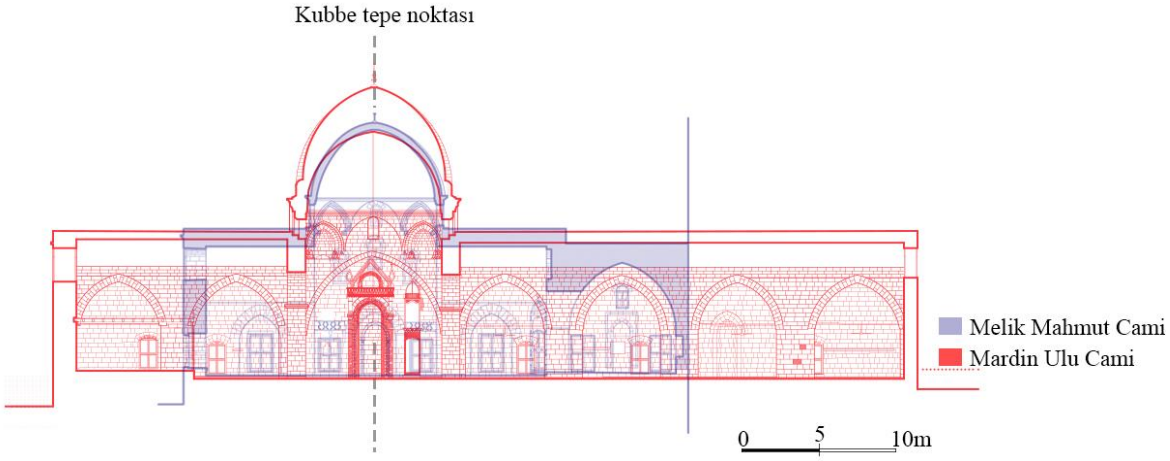
Şekil 2.19. Mardin Ulu Cami (plan DKVKK'dan düzenlenmiştir) – Örtü elemanlarının tanımlandığı plan

Tez kapsamında Mardin Ulu Cami ve Melik Mahmut Cami ele alınmaktadır. Artuklu dönemi eserleri olduğu hem üzerlerinde bulunan kitabelerden hem de benzer özellikleri taşımalarından anlaşılan camilerin benzerlikleri ve farklılıkları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. İncelenen yapılarda günümüz mekansal kurgu, taşıyıcı malzeme ve taşıyıcı sistem özelliklerinin karşılaştırılması

		Melik Mahmut Cami	Mardin Ulu Cami
Mekânsal Kurgu	Mihrap önü kubbe	Mevcut	Mevcut
	Avlu	Mevcut	Mevcut
	Revak	-	Mevcut
Taşıyıcı Malzeme Özellikleri		Kireç taşı	Kireç taşı
Taşıyıcı Sistem	Düşey taşıyıcı boyutları (Dikdörtgen kesitli)	Beden duvarları	1,10 x 2,10 m
	Kemer açıklıkları	3,20 m – 3,32 m	3,00 m – 3,80 m
	Kullanılan geçiş elemanı	Tromp	Tromp
	Destek elemanları	Cephe duvarı payandası	Cephe duvarı payandası
	Kubbe açıklıkları	7,10 m	8,34 m

Aynı dönem yapılarından olan iki caminin en büyük farklılıklarından biri de mihrap önü kubbelerinde görülmektedir. Yapıldığı dönemin en geniş kubbe açıklığından birine sahip olan Mardin Ulu Cami ile tek açıklığa sahip Melik Mahmut Cami'nin kesitleri karşılaştırıldığında bu durum açıkça görülmektedir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Camilerin mihrap önü kubbe kesitlerinin karşılaştırılması – dışta Mardin Ulu Cami, içerde Melik Mahmut Cami

3. TARİHİ YIĞMA YAPILARIN STRÜKTÜREL ANALİZİ VE FOTOGRAMETRİK MODELLEME

Yığma sistemli yapılar, hem kırsal alanlarda halen tercih edilmeleri hem de tarihi kültür mirasımızı oluşturmaları nedeniyle ülkemiz için oldukça önemli bir yapı grubudur. Yığma sistemli yapıların sahip olduğu taşıyıcı sistem özellikleri, malzeme ve yapım teknikleri ve bir araya getiriliş şekilleri, birçok yapı grubuna kıyasla farklılık göstermektedir. Dolayısıyla karkas sistemli beton ve çelik binalara kıyasla farklı sismik davranış sergilemektedirler. Bu nedenle yığma yapıların strüktürel analizinde, taşıyıcı sistemlerin doğrusal olmayan davranışını güvenilir sayısal simülasyonlar ile temsil edebilen algoritmalar gerekmektedir (Caliò, Marletta ve Pantò, 2012).

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte son yıllarda tarihi yapıların analizinde, sayısal modellerin kullanılması yaygınlaşmakta ve analizlerde çeşitli metodolojiler ve yöntemler geliştirilmektedir. Yığma yapı sistemleri, özgün yapım tekniklerini barındırması ve farklı yapı malzemelerinden oluşması nedeniyle farklı doğrultularda farklı davranışlar sergileyebilen karaktere sahiptir. Ortaya çıkarılacak olan modellemelerde de esas olan bu davranışın doğru bir temsilinin oluşturulmasıdır. Modeller aracılığıyla yapının gerçek davranışının simülasyonu için birtakım idealleştirmeler ve basitleştirici varsayımlar gerekmektedir. Yapının strüktürel davranış tespitinde harcanan zamanın ve kullanılan bilgisayar teknolojisinin önemi oldukça fazladır. Süreci etkin yönetmek adına, birtakım yaklaşım sınırları kabul edilebilmekte ve analizler için farklı idealleştirme ilkeleri ve modelleme teknikleri kullanılabilmektedir. Örneğin, yapının genel strüktürel değerlendirmesi için fazla detaylı olmayan-gereken detaya sahip model oluşturulabileceği gibi, yapıda mevcut bir elemanın bölgesel davranışını incelemek için çok detaylı bir model oluşturulabilir.

Tarihi yapıların strüktürel yapısı, genellikle karmaşık bir geometriye sahiptir. Bu nedenle yapının tamamının detaylı model oluşturulması çok zaman almakta ve yüksek hızlı işletim sistemine sahip bilgisayar teknolojisini kullanmak zorunda bırakmaktadır. Tarihi yapıların karmaşık geometrik özelliklere sahip olması, taşıyıcı elemanların özellikle kesitlerine ilişkin bilginin yetersiz olması, birçok farklı yapı malzemesinin bir arada kullanılması, yapı malzemelerinin mekanik özelliklerinin tespitinin zaman alıcı olması ve zorlu deneysel süreçleri gerektirmesi, mevcut hasar durumunun ve dönemsel müdahalelerin

belirlenememesi, zamanla malzemelerdeki mekanik ve fiziksel değişimlerin tespitinin net olarak yapılamaması gibi birçok neden strüktürel davranış analiz sürecini zorlaştırmaktadır (Baran, 2015; Lourenço, 2001; Peña, Lourenço, Mendes, ve Oliveira, 2010; Ünay, 2002).

Tarihi yığma yapıların farklı dış etkenler ve yükler karşısında gösterdiği direnç, yapısal dayanım ve performans ile ilişkilendirilmektedir. Dolayısı ile yapısal dayanımı ve performansı belirlerken doğru sonuçlar alabilmek için strüktürel modelin gerçek davranışa uygun hazırlanması gerektiği gibi etkiyecek yüklerin de modele doğru tanımlanması gerekmektedir. Hesaplamalar sırasında yapıların kendi ağırlığı ve sabit yükler de göz önünde bulundurulmalıdır (Can ve Ünay, 2012).

Düzensiz geometriye sahip olan tarihi yapılarda kullanılan malzeme, teknik, kesit özelliği vb. gibi birçok bilinmeyenin olduğu ve tespit edilebilirliğinin zor olması nedeniyle, yapılan analiz sonuçlarının mutlak güvenilir olması genellikle pek mümkün olmamaktadır. Fakat bu bölümde değinilen teknik bilgiler göz önünde bulundurularak hazırlanacak modellerin analiz sonuçları ile tarihi yapıların davranışları konusunda değerlendirmeler yapılabilmektedir.

3.1. Tarihi Yığma Yapıların Strüktürel Davranışı

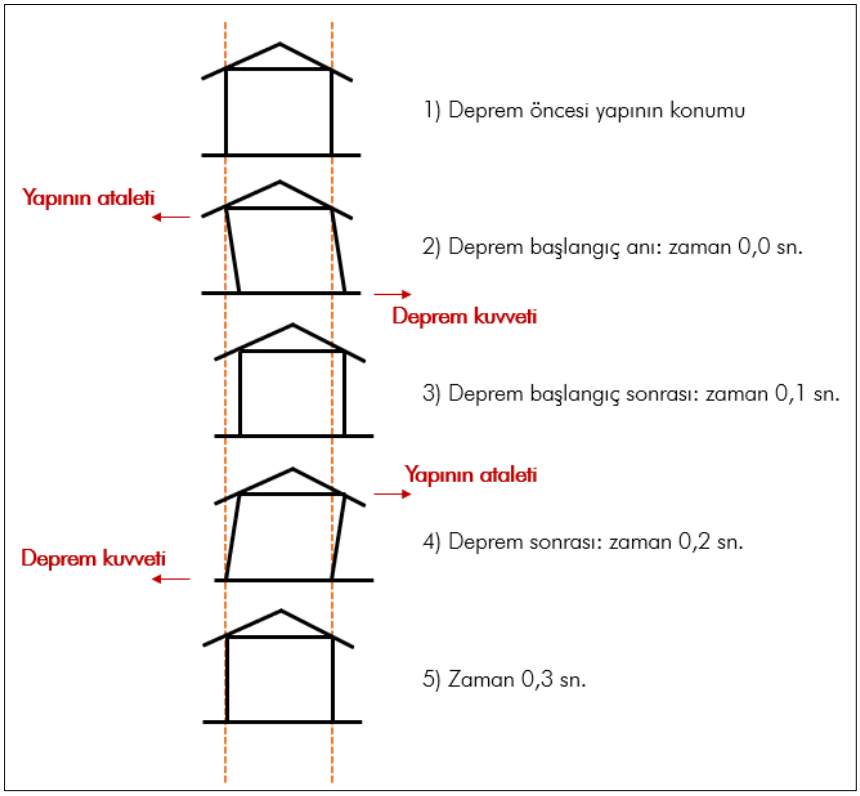
Deprem etkisini düşey yüklerden farklılaştıran en temel özellik, deprem yükü sırasında düşey kuvvetlerin yanında yatay kuvvetler de oluşmaktadır. Yapının sadece düşey yüklerin etkisi altında sağlam kalması, deprem etkisi için de yeterli güvenliğe sahip özellikler taşıdığı anlamına gelmemektedir. Yığma yapıların kütle değerinin fazla olması, depremlerde büyük etkilere neden olmaktadır. Çoğunlukla basınç etkisi altında olan yığma elemanlar, deprem ile ortaya çıkabilecek çekme gerilmeleri sonucunda büyük hasarlar alabilmektedirler. Özellikle deprem büyüklüğü fazla olan depremlerin büyük yer hareketi-ivme oluşturması sonucunda, tarihi yapılarda kalıcı hasarlar oluşabilmektedir. Büyüklüğü ve ivme değeri daha küçük olan olan ancak daha sık gerçekleşen depremlerde ise hasarlar daha sınırlıdır.

Yüzyıllar boyunca ayakta olan tarihi yapıların zemin ile etkileşimi, zaman içerisinde belirli bir dengeye ulaşmaktadır ve dış etkiler sonucunda herhangi bir fiziksel müdahaleye maruz kalmadıkça yeni bir zemin hareketinin oluşması beklenmemektedir. Ancak deprem etkisi

gibi oldukça güçlü düşey ve yatay kuvvetler oluşturabilecek bir etki sonucu yapı yıkılma tehlikesi altında kalabilmektedir (Ünay, 2002).

Yığma yapılar, taş veya tuğla gibi malzemelerin aralarına bağlayıcı eleman olan harçların konularak birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan yapı türüdür (Akaslan, 2019: 15). Yapıdaki başlıca taşıyıcı elemanlardan biri olan duvarlar, yapı üzerine etkiyen kuvvetleri karşılarken aynı zamanda da bölücü bir duvar özelliği göstermektedirler. Duvarların taşıyıcı özelliği bulunmasından dolayı yığma yapılar rijit davranış sergilemektedir. Düşey yüklere karşı avantaj sağlarken ağırlığının çok fazla olması ve beraberinde deprem gibi yatay yüklere dayanımının zayıf olması da dezavantaja neden olmaktadır. Gevrek davranış gösteren yığma yapılar, yatay yüklere karşı esnek davranış gösterememektedir. Bunun sonucunda yeterli yer değiştirme sağlayamadığından çabuk hasar görme ve tamamen yıkılma ihtimali bulunmaktadır (Uzun, 2017: 14). Rijit özelliklerinden dolayı bu yapıların periyotları da kısa olmaktadır. Yığma yapıların doğal titreşim periyodu, uygulanan yükler sonrası titreşim gerçekleştikten sonra eski durumuna dönene kadar geçen süredir. Yığma yapılarda doğal titreşim periyodu genellikle 0,05-0,20 sn arasında olmaktadır ve yapının sahip olduğu geometrik özellikleri, ölçüleri, kütlesi ve etkiyecek olan yük ile yakından ilişkilidir (Bayülke, 1992).

Hareketli veya durağan halde olan bir nesneye, herhangi bir dış kuvvet uygulanması sonucunda nesne kuvvete karşı direnç göstermektedir. Bu durum eylemsizlik kanunu olarak tanımlanmaktadır ve yapıların yükler karşısındaki davranışı eylemsizlik kanunu ile benzerlik göstermektedir. Yapılara deprem kuvvetinin etki etmesi sonucu, yapı bulunduğu durumu korumaya çalışarak deprem kuvvetinin tersi yönünde bir direnç kuvveti gösterecektir. Ortaya çıkan direnç kuvveti ‘atalet kuvveti’ olarak adlandırılmaktadır (Batur, 2006: 5). Zeminde oluşan deprem hareketi kuvvetleri ile yapının kendi konumunu korumaya çalışması sonucu ortaya çıkan atalet kuvvetleri yapıyı farklı uç noktalardan çekmeye başlar. Eğer yığma yapıyı oluşturan elemanlar bu kuvvetlere karşı yeterli direnç gösterebilirse kuvvet sönümlenir ve deprem sonunda yapı hasar almadan eski konumuna geri dönebilir ancak elemanların bir arada tutunma gücü yoksa yapıda çatlaklar oluşmaya başlar (Şekil 3.1). Çatlak oluşumu sonrasında depremin devam etmesi sonucu, çatlaklar genişler ve yapının taşıyıcı elemanlarının parçalanarak dağılmasına ve yapının yıkılmasına neden olur.



Şekil 3.1. Deprem kuvvetinin ve yapıların depreme karşı gösterdiği atalet kuvvetinin şematik açıklanması (Akaslan, 2019: 16'dan geliştirilmiştir.)

Tarihi yapılara bir bakıma değer kazandıran zaman faktörü, bir yandan da tarihi yapının malzemelerinde yaşlanmalara, bozulmalara, tahribata, kullanıcı müdahalelerine vb. gibi sorunları da ortaya çıkarmaktadır. Zamanla ortaya çıkan sorunlar nedeniyle doğal afetler sonucunda ortaya çıkan kuvvetlere karşı yapının direnç kuvveti de azalmaktadır. Azalan direnç kuvveti sonucunda yığma yapılarda hasarlar meydana gelmektedir. Yapılarda hasara neden olan en önemli etmenler:

- Yapıda bağlayıcı olarak kullanılan harcın çekme mukavemetinin düşük olması,
- Yapının basit, simetrik ve düzgün geometrik biçimler ile tasarlanmış olmaması,
- Yapıda ağırlığın fazla olması nedeniyle deprem sırasında oluşan yatay yükün fazla etki etmesi,
- Yapıdaki rijitlik merkezi ile kütle merkezinin çakışmaması sonucunda ortaya çıkan burulma etkisi,
- Yapının periyodunun, oturduğu zeminin periyodu ile çakışması,
- Yapıda taşıyıcı eleman birleşim detaylarının iyi kurgulanmaması,
- Zemin etüdü yapılacak şartların olmaması sonucu temel oturmalarının oluşması,

- Yapı elemanlarının yeterli mukavemetinin olmaması, dayanımlarının düşük olması ve deprem davranışlarında gevrek davranması,
- Taşıyıcı eleman olan duvarlarda bağlayıcı olan harcın, yapı elemanları ile olan boşluklara yeterli seviyede doldurulamaması,
- Yağış almayan bölgelerde yapılan düz toprak dolgulu çatının yapıdaki ağırlığı arttırması,
- Yapım kalitesinin yetersiz olmasıdır (Özsaraç, 2009; Batur, 2006; Akaslan, 2019; Bayülke, 1995).

Yığma yapıların taşıyıcı sistemindeki en önemli elemanlardan biri duvarlardır ve yapıda bulunan her duvar son derece önem taşımaktadır. Özellikle çok katlı yığma sistemli yapılarda bu duvarların sürekliliği önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, taşıyıcı duvarlarda bulunan açıklıklar taşıyıcı sistemin sürekliliğini engellemektedir. Açıklıkların çevresinde sürekliliğin engellenmesi nedeni ile de gerilmeler oluşmaktadır. Dış cephe açıklık oranı fazla oldukça, depremde etkiyen kesme kuvvetlerinin taşınması için yapıda yeterli alan olmamaktadır. Bu nedenle yığma yapılar için dış cephe açıklık/boşluk oranları toplam cephenin %40'ını geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır (Bayülke, 2011).

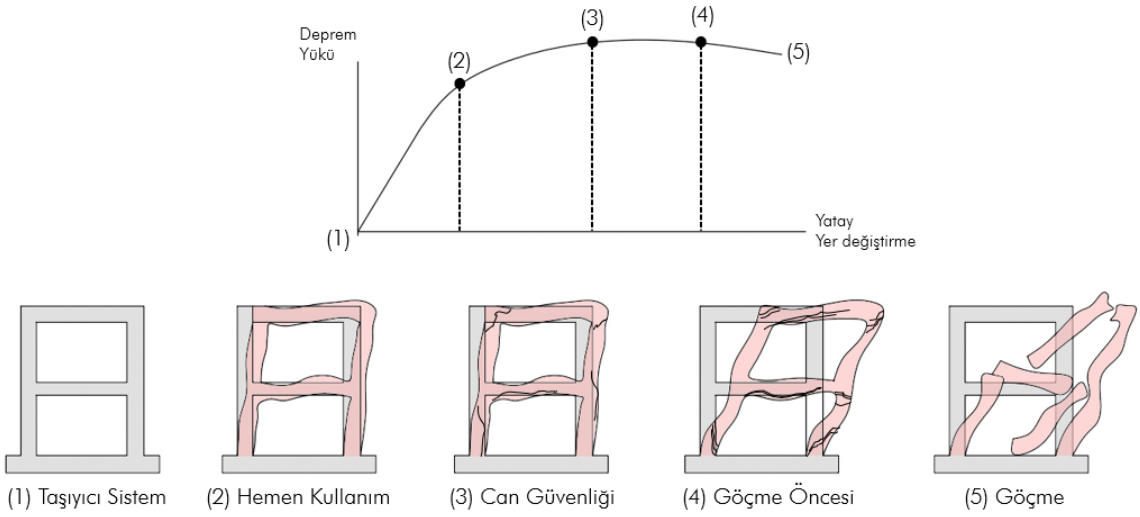
Yığma yapılarda duvarların da taşıyıcı özelliğinin olmasından dolayı, duvarlarda oluşacak hasarlar doğrudan taşıyıcı sisteme etki etmektedir (Çizelge 3.1). Değinildiği üzere yığma duvarların gevrek kırılmaya eğilimli olması, zayıf sünekliliğe sahip olması ve deformasyon özelliğinin az olması gibi olumsuz özellikleri mevcuttur. Barındırdığı özellikler sonucu dış yükler etkisiyle duvarlarda çatlaklar ve belirli bir zamandan sonra da yıkılmalar görülmektedir. Başlangıçta oluşan çatlakların genişliğine göre yapının hasar derecesi belirlenebilmekte ve taşıyıcı sisteme etki edip etmediği anlaşılmaktadır. Çatlağın genişliği, çatlak oluştuktan sonra depremdeki kayma gerilmelerinin etki süresine ve ara yüzeydeki sürtünme kuvvetlerine bağlı olarak değişmektedir (Arun, 2005).

Çizelge 3.1. Yığma yapılarda çatlak genişliğine göre hasar derecesi (Bayülke, 1995; Önal ve Koçak, 2005)

Çatlak Genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
0,1'den az	Önemsiz	Yapıya ve kullanıma etkisi yoktur.
0,1-0,3 mm	Önemsiz, az	Taşıyıcı sisteme ve yapının kullanımına bir etkisi yoktur.
0,3-1,0 mm	Az	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır.
Buraya kadar olan çatlaklar kılcal çatlaklardır. Çoğu zaman gözden kaçabilir. 1 mm yakın çatlaklarda varsa duvar kağıtlarında buruşukluklar gözlenebilir.		
Çatlak Genişliği	Hasar Derecesi	Açıklamalar
1,0-2,0 mm	Orta	Taşıyıcı sisteme bir etkisi yoktur. Estetik açıdan sakıncalı olabilir. Dış cephe elemanlarının yıpranmasını hızlandırır. Bu düzeydeki çatlaklar ve briketleri, pencere ve kapı lentolarını çatlatabilir. Birkaç metre uzaktan fark edilebilirler. Bu yüzeyden daha ileri düzeydeki çatlaklar yapıda oturanları önlem alınması için harekete geçirebilir.
2-5 mm	Orta	Taşıyıcı sisteme etkilemeye başlar. Dış duvarlardan içeriye hava akımları duyumsamaya başlar. Pencere ve kapılar sıkışır. Yapının kullanımı eklenmeye başlar.
5,0-15,0 mm	Orta-Ağır	Kapı ve pencereler sıkışabilir. Su ve kanal bağlantıları kırılabilir. Binaya su ve soğuk hava girebilir. Pencere camları çatlayabilir veya kırılabilir. Sıvalar dökülmeye başlayabilir. Tuğla duvarlar parçalanabilir ve yığma kemerler çökebilir. Bu boyutta oluşan çatlaklar, yapıları zorlayabilir.
15,0-25,0 mm	Ağır	Ciddi onarım ve güçlendirme gerektirir. Yapının stabilitesi çok büyük bir tehlike altındadır.
25,00 mm'den çok	Çok ağır	Yapıda ağır hasar, ciddi onarım veya yeniden yapım gerektirebilir.

Yığma yapıların depreme karşı davranışında, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan duvarlardaki blokların basınç kuvvetine karşı dayanımı önemlidir. Çünkü yığma blokların çekme dayanımı oldukça düşüktür. Dolayısıyla duvar düzlemine dik olabilecek veya özellikle deprem gibi yataydan gelen kuvvetlere karşı eğilme dayanımı çok zayıftır (Arun, 2005). Eğilme dayanımı oldukça zayıf olan bu duvarlarda meydana gelen herhangi bir hasar, bozulma veya çatlama duvarların da içerisinde bulunduğu taşıyıcı sistemi doğrudan etkilemektedir. Duvarlar, depremin neden olduğu yatay yer değiştirme ve zemin oturması sonucunda çatlayabilmektedir. Bu durum, zemin oturmalarına göre hareket edemeyen ve

elastik davranış sergileyen yığma yapıların rijit davranışından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.2; Çamlıbel, 1984: 12). Yapı malzemesi olarak kullanılan elemanların mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle yığma yapılar da doğrusal olmayan özelliklere sahiptir. Kullanılan malzemelerin yer değiştirme ve gerilme özelliklerinin bilinmesi, alınacak olan önlemler için önem arz etmektedir.

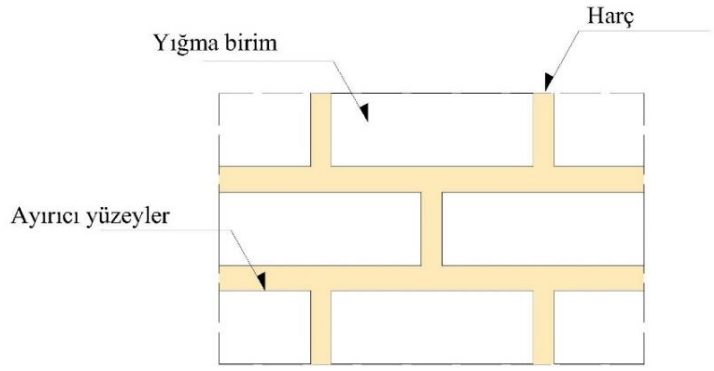


Şekil 3.2. Deprem anında yapılar için öngörülen taşıyıcı sistem deformasyonları

Tarihi yapılara etki eden asıl yük, deprem sırasında ortaya çıkan kuvvet direnci (atalet kuvveti) ile ilişkilidir ve dolayısıyla yapının kendi ağırlığına bağlıdır. Yapı ne kadar ağır olursa, deprem sırasında yapıya etkiyen kuvvet de o kadar fazla olmaktadır. Yapıların dış yüklere karşı direnci; duvar geometrisine, en kesit ölçülerine, kullanılan malzemelere ve yığma blokların birleşim detaylarına bağlıdır (Arun, 2005). Yığma yapılarda ağır hasarların görüldüğü bölümler genellikle kemer, tonoz, ayak ve geniş cephelerdir (Casolo ve Sanjust, 2009). Bunun nedeni ise açıklıklar gibi taşıyıcı sistemin sürekliliğinin engellendiği bölümlerde bu elemanların kullanılmasıdır.

3.2. Klasik Modelleme Teknikleri

Yığma yapılar, her yerinde aynı özellik göstermeyen heterojen bir dokuya sahiptir. Bu nedenle yığma birimlerin, bağlayıcı harcın ve bunlar arasındaki aderansın, statik ve dinamik yükler karşısında gösterdiği davranış dikkate alınmaktadır (Şekil 3.3). Bu nedenle modelleme yapılırken çeşitli varsayımlar kabul edilebilmekte ve bu varsayımlara göre de çeşitli stratejilerden faydalanılmaktadır.



Şekil 3.3. Örnek yığma duvar modeli

Modeli oluşturulacak yapı detaylı incelenerek doğrusal, iki boyutlu veya tamamen üç boyutlu elemanlardan farklı şekillerde idealize edilebilmektedir. Yeni dönem yapılarından farklı olarak, düzgün bir geometriye sahip olmayan tarihi yapıların strüktürel modeli için idealleştirmeler uygulanmaktadır. Daha önce değinilen zorluklar nedeniyle, geometri idealleştirmesinin uygulanabileceği koşulları tanımlamak zorlu bir süreçtir. Genellikle, dekoratif ve yapısal öğeler arasında bir ayrım olmadığından, tarihi duvar yapısının geometrisi oldukça karmaşıktır ve taşıyıcı eleman ile taşıyıcı olmayan eleman arasında ayrımı doğru yapmak gerekmektedir. Bu nedenle, modelleme yapılırken ilk izlenim olarak, üç boyutlu öğelerin kullanılmasını önermek mantıklı görünse de doğru idealleştirmelerin yapılması durumunda iki boyutlu elemanlar ile de doğru sonuç elde edilebilmektedir. Tarihi yapıların sahip olduğu karmaşık özellikler göz önüne alındığında, bu yapıların pratik analizinin ciddi basitleştirmeler gerektirdiği açıktır. Kural olarak, geometrik idealleştirme, ele alınan problem için yeterli kabul edilebildiği sürece mümkün olduğu kadar basit tutulmalıdır. Özellikle aşağıda yer alan durumlara dikkat edilmelidir:

- Tamamen üç boyutlu modeller, modelin hazırlanması, gerçek hesaplamaların yapılması ve sonuçların analiz edilmesi açısından genellikle çok zaman almaktadır.
- Kabuk elemanlarını içeren modellerin sonuçlarının, elemanların kalınlığı boyunca gerilmelerin değişkenliği nedeniyle analiz edilmesi oldukça zor olmaktadır.
- Modelin ayrıntılarını ve boyutunu artırmak, önemli yönleri bulanıklaştıran çoğunlukla olumsuz ve doğru olmayan bilgiyle sonuçlanabilir (Lourenço, 2001).

Doğru bir sayısal modellemenin temel prensipleri dört başlıkta sıralanabilir;

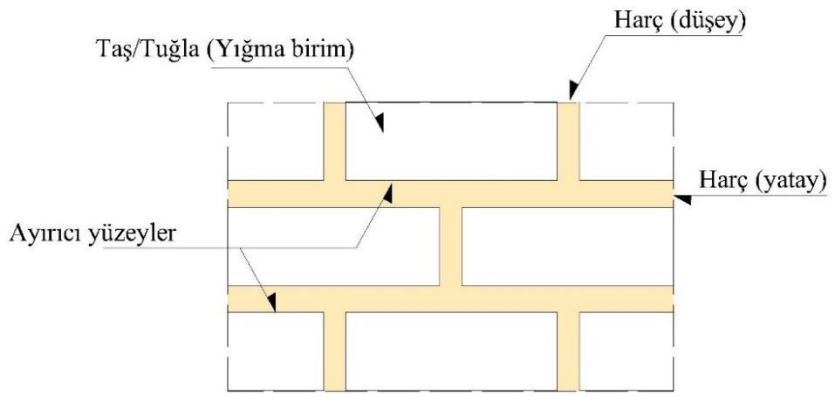
1. En etkili sayısal model daima en basit olandır. Çünkü istenen sonuçların kapsamı dışında kalan daha detaylı modeller gereksiz olabilmektedir.

2. Sayısal modelde elemanların boyutlandırılmasında, hesaplama için gerekli olan yapısal bütün etkiler dikkate alınmalıdır.
3. Büyük bir modelin bir bölümünü ayırarak oluşturulan yeni model, o bölümün ayrıntılı davranışını yansıtmaz. Ayrıntılı analiz için özel bir model gerekmektedir.
4. Yapının tamamının daha az detaylı bir şekilde modellenmesine "makro model", ayrıntılı modellenmesine "mikro model" denilmektedir (Can ve Ünay, 2012).

3.2.1. Mikro modelleme

Detaylı mikro modelleme

Yığma yapı sistemlerinde derzler yapısal zayıflığın belirgin olduğu düzlemler olarak kabul edilmektedir. Detaylı bir modelde, tuğla veya taştan oluşan yığma birimler ve derzleri oluşturan harç ayrı ayrı modellenerek davranış farklılığı dikkate alınmaktadır (Şekil 3.4). Derzlerde kullanılan harçların, yığma birimlere nazaran zayıf özelliklerde sahip olması nedeniyle derzlere odaklanan bir modelleme yaklaşımı olan mikro modelleme, genellikle küçük ölçekli yapılarda veya yapıların bir bölümünün ya da yapı elemanının detaylı analizinde kullanılmaktadır (Lourenço, 2004). Elastisite modülleri, Poisson oranları ve yığma duvarı oluşturan yığma birim ve harcın elastik olmayan mekanik özellikleri ayrı ayrı ele alınmaktadır. Dolayısı ile modelleme öncesinde detaylı bir malzeme çalışması yapılarak her bir yığma yapı biriminin ve bağlayıcıların mekanik özelliklerinin net olarak öğrenilmesi gerekmektedir (Dabanlı, 2008). Çatlakların, yapıda herhangi bir hasar meydana geldikten sonra yığma birim ile harç arasındaki arabirimlerde oluştuğu varsayılmaktadır.

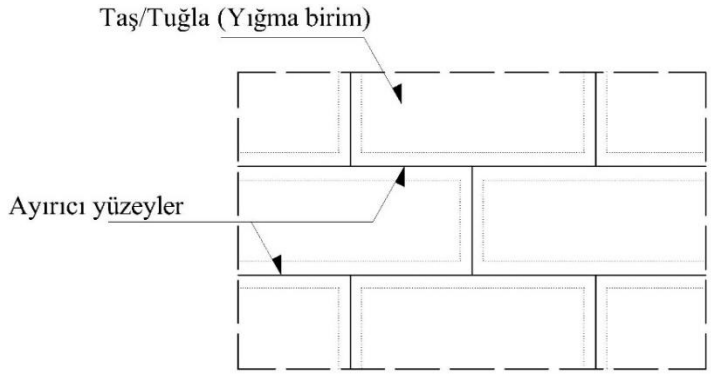


Şekil 3.4. Yığma duvar modelleme tekniği – Detaylı mikro model

Basitleştirilmiş mikro modelleme

Detaylı mikro modelleme tekniği, yığma yapıların strüktürel davranışını anlamak için tercih edilen en gerçekçi modelleme tekniklerinden biridir. Ancak bilgisayar teknolojisinin günümüz durumu değerlendirildiğinde, büyük yığma yapıların çözümünde pek yaygın kullanılmadığı görülmektedir. Büyük ölçekli sistemlerde rijitlik matrisi çözüm süresini uzatarak bilgisayarlarda yüksek boyutlu dosyalar oluşturmaktadır. Bu nedenlerle farklı modelleme teknikleri geliştirilmiştir.

Basitleştirilmiş mikro modelleme, büyük yığma sistemlerin daha kısa sürede ve yüksek kapasite gerektirmeyen bilgisayarlarda çözümünü mümkün kılmaktadır. Bu modelleme yaklaşımında, yığma birimlerinin boyutlarını, harç tabakasının kalınlığının yarısı kadar genişleterek modellemeyi ve harç tabakasının ihmal edilmesi önerilmektedir. Dolayısı ile yığma birimler birbirinden sadece ayırıcı yüzey çizgileriyle ayrılmaktadır (Şekil 3.5). Yığma duvarda gerçekleşecek olan çekme ve kayma çatlaklarının bu ayırıcı yüzeylerde oluşacağı ve yapıda herhangi bir hasar sonrası muhtemel çatlakların da ayırıcı yüzey çizgilerinde meydana geleceği kabul edilmektedir.

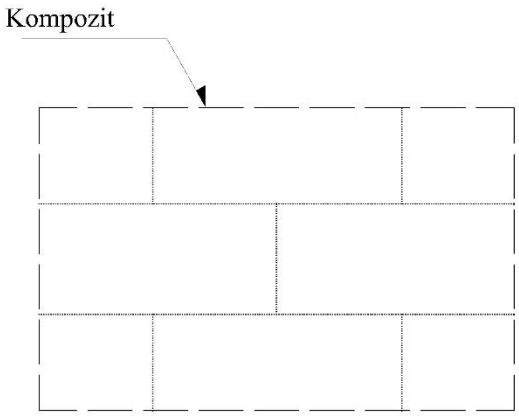


Şekil 3.5. Yığma duvar modelleme tekniği – Basitleştirilmiş mikro model

3.2.2. Makro modelleme

Makro modellemede, sistemi oluşturan yığma birim ve harcın özellikleri homojenleştirme süreçlerine tabi tutularak kompozit bir malzeme biçiminde modellenmektedir (Şekil 3.6). Büyük sistemlerin analizi gerektiğinde, yığma birimler ile harç arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir. Bunun temel nedeni değinildiği üzere günümüz bilgisayar teknolojisi ile

özellikle doğrusal özellik göstermeyen malzemelerin modelinde veya zaman-tanım olarak analizlerinde tüm bir yığma yapı sisteminin mikro modelinin oluşturulmasındaki zorluklardır. Sistem rijitlik matrisinin çok büyük olmasına ve yapısal analiz programları tarafından üretilecek sonuç dosyalarının büyük boyutuna engel olmak amacıyla büyük yığma sistemler için en uygun modelleme tekniği makro modellemedir. Makro modellemenin, uygulanacak varsayımların ve sınır koşullarının doğruluğu sağlandığı takdirde kolay ve zaman kazandırıcı bir teknik olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.6. Yığma duvar modelleme tekniği – Makro model

Her iki modelleme tekniği de farklı sistem özellikleri için tercih edilmektedir. Mikro modellemeler yığma sistemli yapılarda duvarların detaylı modellenerek değerlendirilmesinde ve riskli alanların analizinde; makro modellemeler ise kompleks ve büyük ölçekli yığma yapıların genel analizinde kullanılmaktadır.

3.2.3. Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal modelleme

Çağdaş bir matematiksel yöntem olan sonlu elemanlar yöntemi (finite elements analysis), bilgisayar teknolojisinin gelişmesine paralel olarak kullanımı sıklaşan günümüzdeki en önemli sayısal model oluşturma yöntemlerindendir. Bu yöntem, yapıların 3 boyutlu statik ve dinamik analizlerinin yapılmasına olanak sağlayan, lineer ve lineer olmayan analizlerin gerçekleştirilebildiği ve sonuçların numerik veya grafik olarak görüntülenebildiği bir analiz yöntemidir (Dabanlı, 2008). Genel olarak yapı bilimindeki sınır değer sorunları için yaklaşık sonuçlar elde etmek amacıyla kullanılan bir analitik hesaplama yöntemidir (Hutton, 2003).

Yapısal problemlerin çözümlenmesinde, sistemi tanımlayan taşıyıcı sistem denklemlerinin idealleştirilerek kurgulanması, yöntemin temelini oluşturmaktadır. Bu yöntem, 1943 yılında Courant tarafından kısmi diferansiyel denklem çözümleri ile hızlanmış ve 1950'li yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile beraber bugünkü şekline yakın bir hale gelmiştir (Wait ve Mitchell, 1985). Düzensiz ve karmaşık geometrik özelliklere sahip sistemlerin basitleştirilmiş modellerine veya yapıdaki kritik bölümlerin daha detaylı modellenerek incelenmesine imkan tanımaktadır. Yöntemin amacı, problemi bilgisayar ortamında sonlu sayıda bilinmeyen kullanarak ve aynı zamanda gerçeğe mümkün olduğunca yakın bir şekilde çözmektir (Omurtag, 2010). Mekanik, uzay, inşaat, otomotiv, mühendislik, yapısal analiz gibi farklı disiplinlerde farklı amaçlarla kullanılabilmektedir.

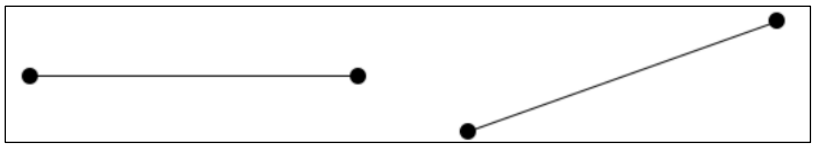
Tarihi yapılara yapılacak müdahaleler öncesinde yapısal davranışlarının doğru bir şekilde tespite edilmesi gerekmektedir. Bu davranış özellikleri, gelişmiş sayısal yöntemler ile bilgisayar ortamında analiz etmek mümkündür. Genellikle düzenli olmayan geometrik özelliklere sahip yığma sistemli yapılarda, yükü karşılayan ve aktaran yapısal elemanların üç boyutlu yapısal davranış sergilemesi nedeniyle bu davranışları analiz etmede en uygun hesap yöntemi olarak sonlu elemanlar analizini karşımıza çıkarmaktadır (Toker ve Ünay, 2004).

Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan yığma yapı model sürecinde, yapının sahip olduğu taş ve tuğla gibi birimler ile çeşitli harçlar tek tür sonlu eleman kullanımını zor hale getirmektedir. Bu durumda mevcut fiziki durumdan uzaklaşmayan bir modelleme tekniği geliştirmek veya bu birimleri tek tek modelleme tercih edilmektedir. Yığma birimlerin ve ara yüzey elemanlarının birbirinden ayrı modellendiği durumlarda bilinmeyen sayısının fazlalığı nedeniyle uzun uğraş gerektirmektedir (Tetik, 2015; Ural, 2009).

Sonlu eleman tipleri

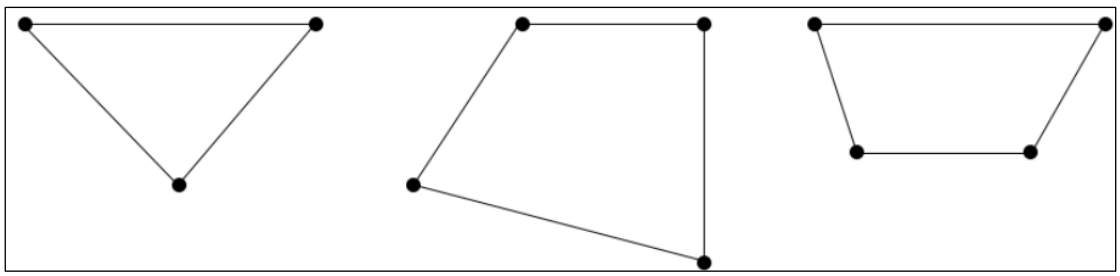
Zaman tasarrufu ve kolay çözümleme özelliği nedeniyle tercih edilen sonlu eleman yöntemi, farklı eleman tiplerini birlikte kullanmayı mümkün kılmaktadır. Bu eleman tipleri bir boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu olmaktadır. Bu elemanlar düğüm ya da düğüm noktası olarak adlandırılan noktalarda birbirlerine bağlanmaktadır (Yang, 1986).

Bir boyutlu elemanlar (1D), iki boyutunun ihmal edilebilecek kadar küçük ölçekli olan çubuk elemanlardır (Şekil 3.7). Kolon, kiriş, kemer, yay, kafes vb. gibi yapı elemanlarından oluşan bir boyutlu elemanlar, tez kapsamında kullanılan SAP2000 programında "frame" olarak adlandırılmaktadır.



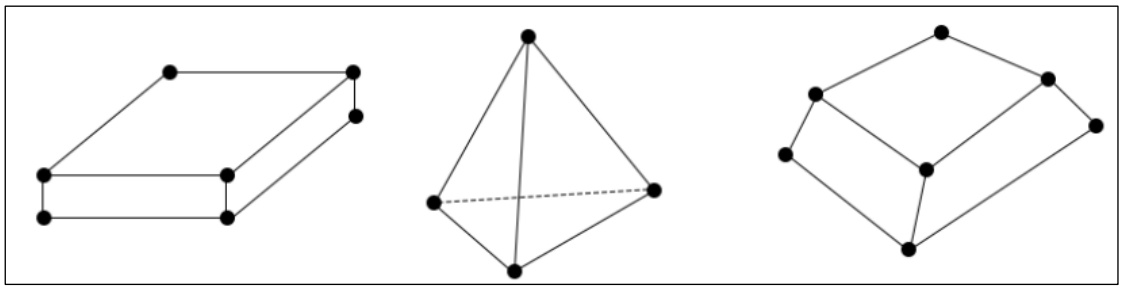
Şekil 3.7. Bir boyutlu çubuk eleman örnekleri

İki boyutlu elemanlar (2D), bir boyutu diğer iki boyuta kıyasla ihmal edilebilecek ölçüde küçük ölçekli olan elemanlardır (Şekil 3.8). Membran, perde, döşeme, kabuk vb. gibi yapı elemanlarından oluşan iki boyutlu elemanlar, tez kapsamında kullanılan SAP2000 programında "shell" olarak adlandırılmaktadır. Shell eleman yüzey taşıyıcı elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır. Shell eleman, sadece kendi düzlemine dik olarak yüklenen yüzey taşıyıcı sistemleri modellemek için plak eleman ile sadece kendi düzlemine yüklenen yüzey taşıyıcı elemanları modellemek için kullanılan membran elemanın kombinasyonundan oluşmaktadır.



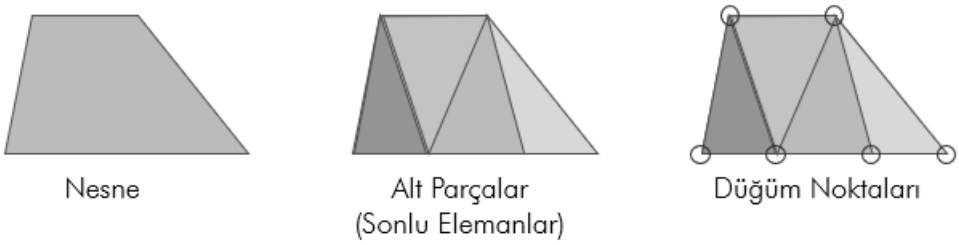
Şekil 3.8. İki boyutlu düzlem eleman örnekleri

Üç boyutlu elemanlar (3D), hiçbir boyutun ihmal edilmediği ve tüm boyutları aynı derecede önem taşıyan elemanlardır (Şekil 3.9). Asimetrik yüklü zeminler, beton bloklar vb. elemanlardan oluşan üç boyutlu katı elemanlar, tez kapsamında kullanılan SAP2000 programında "solid" olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.9. Üç boyutlu katı eleman örnekleri

Bir yapı sistemi modellenirken, yapı biden çok bir, iki ya da üç boyutlu sonlu eleman tipine bölünebilmektedir. Yan yana gelen sonlu elemanlar birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmakta ve yapı sisteminin problemini temsil eden bir ağ oluşturmaktadır (Şekil 3.10). İdealleştirilerek oluşturulan bu sistem ağı, çeşitli şekillerdeki sonlu elemanları temsil etmektedir. Bu süreçte, modelleme aşaması ve sonlu eleman tip seçimi son derece kritiktir. Belirlenecek sonlu eleman tiplerinin, boyutlarının ve sonrasında oluşturulacak olan sonlu eleman ağının, hedefi doğru temsil etmesi gereklidir. Sistemin herhangi bir yüke karşı göstereceği davranışın gerçeğe yakın temsilinin doğru yolu, uygun sonlu eleman ağı ile oluşturulmuş sayısal modelden geçmektedir. Aksi durumda yanlış oluşturulan bir modelden doğru çözümlemeler ve davranış üzerine değerlendirmeler gerçekleştirilememektedir.



Şekil 3.10. Sistemi temsil eden bir ağ örneği

Tarihi yapıların taşıyıcı sisteminin, düşey ve deprem yükleri altında güvenliğinin belirlenmesi, hasarların yorumlanması ve önerilen onarım ve güçlendirme müdahalelerinin uygunluğunun tespiti için önemli bir adımdır. Bu adımda yapının taşıyıcı sistem modeli oluşturulmaktadır ve belirli yükler etkisinde yapısal analizler gerçekleştirilerek ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmektedir. Farklı tip ve özellikteki tarihi yapılarda, malzeme ve yapısal özelliklere göre farklı modelleme teknikleri kullanılmaktadır. Bu tür yapıların modellenmesi sırasında, malzeme ve taşıyıcı elemanların ve bunların kombinasyonları için basitleştirici varsayımlar yapılmaktadır. Analizlerden ulaşılan sonuçların, yapılan varsayımların ve

idealleştirmelerin uygun olduğu ölçüde yapının davranışını doğru yansıtacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan basitleştirici varsımlar nedeniyle, ortaya çıkan sonuçların, nihai doğrulukta olduğu kabul edilmemelidir. Bu sonuçlar yalnızca yol gösterici olmaktadır. Sürecin alanda uzmanlar tarafından ele alınarak takibinin yapılması, sonuçların yorumlanması ve gerçeğe uygunluğu açısından faydalı olacaktır. Birçok farklı alanda kullanıma ve geliştirilmeye açık olan sonlu elemanlar metodu ile çalışmanın getirdiği kolaylıklar aşağıda sıralanmıştır (Dabanlı, 2008; Ünay, 2002; Öztaş, 2009):

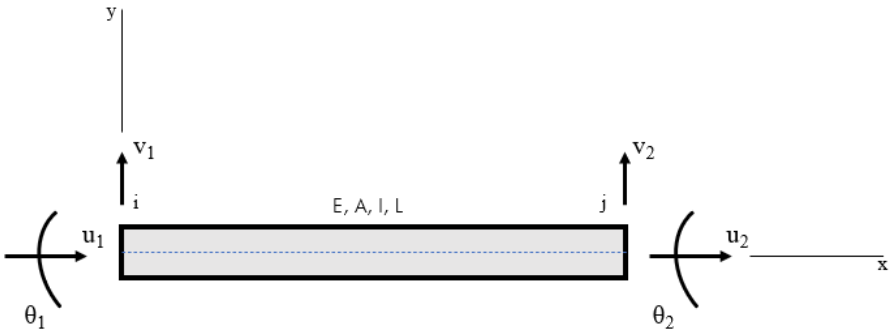
- Eğri, karmaşık geometrik biçimlere sahip veya tamamı ile amorf elemanlar kolaylıkla modellenebilmektedir.
- Elemanlar istenilen büyüklükte parçalara bölünerek istenilen hassasiyette sonuçlar edilebilmektedir. Aynı yapı elemanı içinde farklı malzeme özelliklerini kullanma imkânı sağlanabilmektedir.
- Farklı özelliklere sahip ve farklı malzemelerden oluşturulmuş yapı elemanlarının kombinasyonuna imkân verebilmektedir.
- Sınır koşulları tanımlanabilmekte ve kontrol edilebilmektedir.
- Yığma yapılar örneği başta olmak üzere, çok sayıda farklı elemanın birbirlerine bağlanmasıyla oluşan sistemlerin, gerçek yapım tekniğine uygun bir model oluşturulabilmektedir.
- Eleman özellikleri ve boyutları analizi gerçekleştirecek kişiler tarafından değiştirilebilmektedir. Böylelikle kritik değişikliklerin olabileceği alanlarda daha küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler gerçekleştirilebilirken, aynı parçanın farklı bölgeleri daha büyük elemanlar ile modellenerek işlem sürecinin hızı artırılabilir.
- Sonlu elemanlar yönteminin çok yönlülüğü ve esnekliği, karmaşık yapılar, sürekli ortam, uzay ve diğer problemlerdeki neden-sonuç ilişkilerini analiz etmek, değerlendirmek ve yorumlamak için etkili kullanılabilmektedir.

Sonlu elemanlarda serbestlik dereceleri

Sonlu elemanlar yönteminin temeli, sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip bir sistemin, düğüm noktalarından birbiri ile bağlantılı olan sonlu sayıda basit elemanlara indirgemeye dayanmaktadır. Bu sayede, gerçek hayatta mevcut sonsuz değerlere sahip bir problemi temsil edece sonlu bir sayısal model oluşturulabilmektedir. Oluşturulan bu model belirli sayıda daha küçük alt parçalara/sonlu elemanlara bölünmektedir. Oluşturulan sonlu

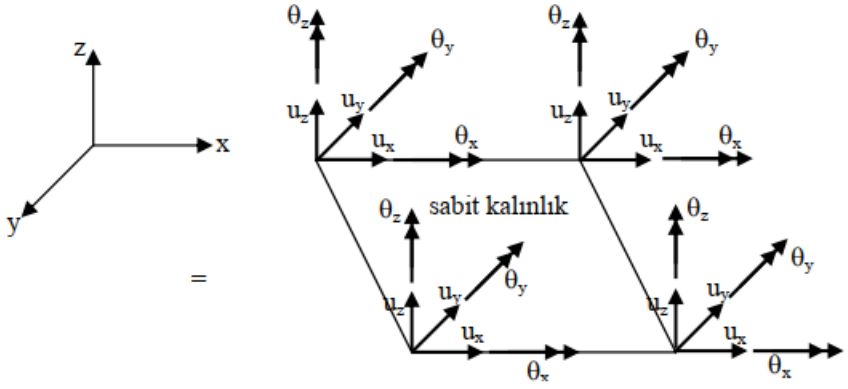
elemanın sahip olduğu düğüm noktalarının yapabileceği yer değiştirmelerin sayısı, elemanın serbestlik derecesi olarak tanımlanmaktadır (Szabó ve Babuška, 2021). Düğüm noktalarının serbestlik derecelerine göre bu noktalarda uç kuvvetler oluşmaktadır. Sonlu bir elemanın uzay ortamında 6 farklı serbestlik derecesi bulunmaktadır. X, Y, Z eksenleri yönünde Ux, Uy, Uz yer değiştirmeleri (deplasmanlar) ve X, Y, Z eksenleri etrafında Θxy, Θyz, Θxz dönmeleri uzay çerçeve elemanının serbestlikleridir. Bu serbestlikler sonucunda X, Y, Z, eksenleri doğrultusundaki Fx, Fy, Fz kuvvetleri ve sırasıyla X, Y, Z, eksenleri etrafında Mxy, Myz, Mxz momentleri, o sonlu elemana ait uç kuvvetleri diğer bir ifade ile kesit tesirlerini göstermektedir (Özbaba, 2020).

İki boyutlu problemlerin sonlu elemanlara dönüştürülmesi sürecinde çubuk elemanlar kullanılabilmektedir. Bölünmüş bir çubuk elemana ait serbestlik dereceleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Burada çubuk uzunluğu (L), kesit atalet momenti (I), elastisite modülü E ve kesit alanı (A) tercih edilen malzemenin özellikleri ile değişiklik göstermektedir. U, v, θ ise i ve j noktalarındaki serbestlik dereceleridir. Dolayısıyla 2 boyutlu bir elemanın her düğüm noktası için 3 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Tek bir çubuk elemanda iki farklı düğüm noktası olması nedeniyle toplamda 6 serbestlik derecesi oluşacaktır.



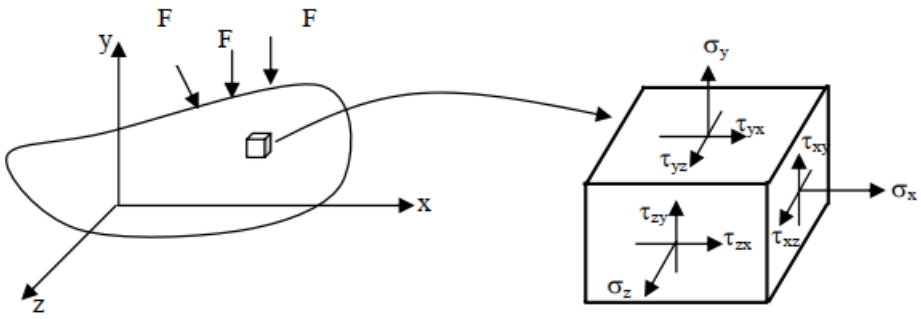
Şekil 3.11. Çubuk elemana ait serbestlik dereceleri

İki ve üç boyutlu problemlerin sonlu elemanlara dönüştürülmesi sürecinde düzlem-kabuk elemanlar da kullanılabilmektedir. Kabuk elemanlarda, Z ekseninin de sürece dahil olması nedeniyle her bir düğüm noktasında gerilme ve yer değiştirmeler için 6 bileşen bulunmaktadır. Dolayısıyla kabuk elemanların düğüm noktası için 6 serbestlik derecesi oluşmaktadır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kabuk elemana ait serbestlik dereceleri

Üç boyutlu problemlerin sonlu elemanlara dönüştürülmesi için katı elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Üç boyutlu problemler için katı eleman

Herhangi bir eleman ile oluşturulmuş sonlu elemanlar modelinde bulunan ağlardaki toplam serbestlik derecesi, toplam düğüm sayısı ile her bir düğümdeki serbestlik derecesinin çarpımına eşit olmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, gerçek problemi doğru temsil etmek amacıyla belirli sınır ve şartlar göz önünde tutularak oluşturulan matematiksel formülasyon üstünden analizler gerçekleştirilerek çözüm elde edilmektedir. Bu sayede, daha küçük parçalar üzerinde yapılan işlemler, sonuçların daha hassas elde edilmesine fayda sağlayacaktır.

3.3. Fotogrametrik Modelleme

Nesnelerle fiziksel temas etmeden yüzeylerin ve nesnelerin özellikleri hakkında güvenilir bilgi edinme ve bu bilgileri ölçme ve yorumlama bilimi olan “Fotogrametri" kelimesinin

anlamı, *ışık* anlamına gelen phos veya phot, *harf veya çizilmiş* bir şey anlamına gelen gramma ve *ölçü* adı olan metrein olmak üzere üç Yunanca kelimeden türemiştir ve "ışık yardımıyla ölçme-çizim" anlamına gelmektedir (Selvaggi, 2017).

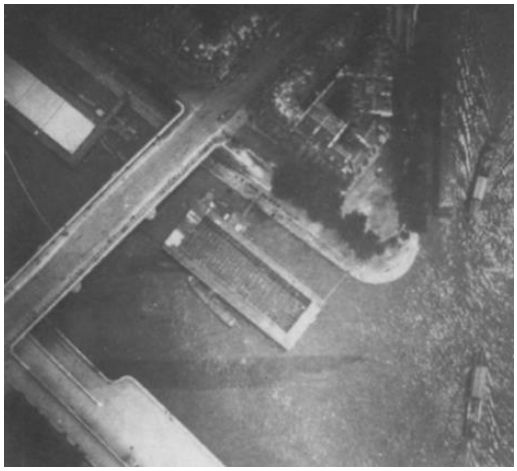
Fotogrametrinin gelişimi, açıkça bilim ve teknolojinin genel gelişimine bağlıdır ve ortaya çıkışında fotoğrafçılık ve fotoğrafçılığın gelişimi oldukça önemlidir. Fotoğrafçılık alanında öncü kabul edilen Joseph Nicephone Niépce, 1826'da ilk kez fotoğraf çekme yöntemi geliştirmiştir ve 1839'da Niépce tarafından ilk fotoğrafın çekilmesiyle birbirini takip eden teknolojik gelişmeler yaşanmıştır (Resim 3.1, Kork, 2006: 6; Burtch, 2008: 2).



Resim 3.1. Nicéphore Niepce'in 1826 yılında çektiği karşı evin çatılarını gösteren ve fotoğrafçılık alanında bilinen ilk fotoğraf

1851 yılında Aimé Laussedat, fotoğraflar üzerinden ölçümler yapılmasına imkân tanıyan bir görüntüleme aracı olan kamerayı icat etmiştir. 1858 yılında Alman mimar A. Meydenbauer'in kamu binalarının belgelenmesi amacıyla fotoğraflar üzerinde ölçümler yapmasıyla gelişmeler devam etmiştir (Konecny, 2003: 106). 1855 yılında, bilinen ilk hava fotoğrafı Gaspard-Félix Tournachon tarafından bir balondan alınmıştır (Resim 3.2, Kork, 2006: 6). Wright Kardeşlerin 1903 yılında uçağı icat etmesiyle, fotogrametri için görüntü elde etmede hava araçları da zamanla yaygınlaşarak kullanılmaya başlanmıştır (Konecny, 2003: 109). Motorlu hava araçlarının icadı ile hava fotogrametrisinde de önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu ardışık gelişmelerin bir sonucu olarak, fotogrametri ilk olarak I. ve II. Dünya Savaşı sırasında uçaklara monte edilen kameralar aracılığıyla edinilen görüntüler sonucu bir foto-mozaik ve harita oluşturmak için kullanılmıştır. Bu zamanlarda fotogrametri, düşman bölgelerin keşfedilmesi, stratejik verilerin takip edilmesi ve savaştaki güncel durumun

yorumlanabilmesi amacıyla kullanılmıştır (Konecny, 2003: 7-9; Van Damme, 2015: 8; Yamafune, 2017: 518).



Resim 3.2. 1855'de Saint-Louis'de balondan çekilen ilk hava fotoğrafı

Fotogrametrinin en yaygın kullanım alanı haritacılıktır. Beraberinde teknolojik gelişmeler ile birlikte mimarlık, kent planlama, arkeoloji, jeoloji, ormancılık, tarım, makine endüstrisi gibi alanlarda da fotogrametriden yararlanılmaya başlanmıştır (Vatan, 2005). Mimarlık alanında fotogrametri, ilk kez Alman mimar Albrecht Meydenbauer'in 1858'de binaların belgelendirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

3.3.1. Fotogrametrinin sınıflandırılması

Geçmişten günümüze birçok alanda fotogrametrik yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Fotogrametri, teknolojinin gelişimine paralel olarak gelişim göstermekte ve zamanla dokümantasyon çalışmalarında tercih edilen bir yöntem haline gelmektedir. Fotogrametrik belgeleme yönteminden önce, farklı geleneksel yöntemler de benzer alanlarda kullanılmış ve halen gerekli durumlarda kullanılmaya devam edilmektedir. Geleneksel ölçüm aletleriyle elde edilen verilerin de doğruluk kıstasları oldukça yüksek olmaktadır ancak özellikle yığma yapıların karmaşık geometrilere sahip olması, bu aletlerin yetersiz kaldığı durumlar ortaya çıkarabilmektedir (Kıvanç, 2019).

Fotogrametrik yöntemlerin sınıflandırılmasında çeşitli durumlara, teknolojilere ve uygulama alanlarına göre farklı kaynaklarda farklı sınıflandırmalara rastlanılabilmektedir. Genel olarak literatürde yer alan incelemeler sonucu; uygulama alanına göre, resimlerin çekildiği

konuma göre, kullanılan fotoğraf sayısına göre, değerlendirilecek objenin boyutuna göre ve değerlendirme yöntemine göre olmak üzere 5 farklı şekilde sınıflandırılmaktadır (Avşar, 2006: 2-4; Kıvanç, 2019: 14-18; Kaya, Akçay, Avşar ve Aydar 2019: 1; Gül, 2021; Vatan, 2005; Burtch, 2008: 6).

1. Uygulama alanına göre:

- Topografik fotogrametri: Harita üretimleri için genellikle haritacılık alanında kullanılan fotogrametrik tekniktir.
- Topografik olmayan fotogrametri: Harita üretimi dışında, yol yapım, arazi durumu ve kesitleri, jeofizik, ormancılık gibi haritacılık alanı dışında ancak yerküre ile ilgili amaçlarla kullanılan fotogrametrik tekniktir.
- Özel amaç fotogrametrisi: Mimarlık, diş hekimliği, arkeoloji alanlarında özel amaçlar ile kullanılan fotogrametrik tekniktir.

2. Resimlerin çekilme konumuna göre:

- Yersel fotogrametri: Alım merkezinin karada bir noktada olması durumunda uygulanan fotogrametrik tekniktir.
- Hava fotogrametrisi: Bir hava aracında bulunan donanımlar ile çekilen fotoğrafların işlenmesi ile uygulanan fotogrametrik tekniktir.
- Uzaktan algılama (remote sensing): Uydudan elde edilen görseller sonucu ölçme ve değerlendirme işlemlerinin yapılabildiği fotogrametrik tekniktir.

3. Değerlendirmede kullanılan fotoğraf sayısına göre:

- Tek resim fotogrametrisi: Tek tek fotoğraflar kullanılarak sayısal bilgiler üretmeyi amaçlayan ve bu yöntem sonrasında foto-plan, foto-mozaik veriler elde edilen yöntemdir.
- Çift resim fotogrametrisi: Ortak karelere sahip fotoğraflar üzerinden ölçümler yaparak veriler üreten fotogrametrik yöntemdir. Bu yöntemde, genellikle stereoskopik görüşten faydalanılmaktadır ve bu nedenle stereo fotogrametri olarak da isimlendirilmektedir.

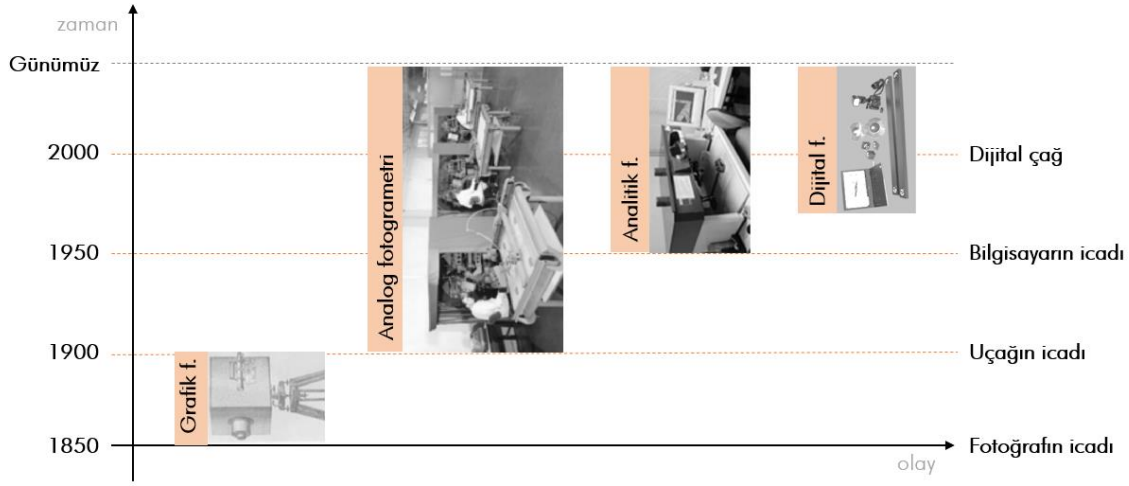
4. Değerlendirilecek objenin büyüklüğüne göre:

- Mikro fotogrametri: Çok küçük cisimler, ayrıntılar, obje ve modellerin fotogrametrik yöntemle incelenmesini ele alan fotogrametri tekniğidir.
- Makro fotogrametri: Büyük cisimler, binalar ve arazi parçalarının fotogrametrik olarak incelenmesi incelenmesini ele alan fotogrametri tekniğidir.

5. Değerlendirme tekniğine göre:

- Grafik (Plançete) fotogrametri: 1850'den 1900'lü yılların başına kadar kullanılan ve temel geometrik ilkeler ile birlikte matematik kullanılarak vektör haritalarının üretildiği fotogrametri tekniğidir. Üretim sırasında, kamera ve hassas bir ölçüm aleti olan teodolitlerden birleştirilen foto-teodolitler kullanılmaktadır. Fotoğraflardan, matematiksel işlemlerin gerçekleştirilmesi sonucu çizgisel haritalar üretilmektedir.
- Analog fotogrametri: 20. yüzyılın ortalarına kadar kullanılan ve analog kameralarla elde edilen fotoğrafların optik veya mekanik aletler kullanılarak çiziminin yapıldığı mekanik bir fotogrametrik tekniktir. Bu şekilde üç boyutlu model elde edilmektedir.
- Analitik fotogrametri: 1960'lı yıllardan günümüze kadar kullanılan bu yöntemde analog resimlerin elde edilmesinin ardından başlayan süreçte ölçüm ve yöneltmeler yapılarak fotogrametrik model oluşturulmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin icadı ile hızlı gelişmeler sağlanmış ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarının sayesinde stereoskop gibi araçlarla elde edilen resmin gerçek dünya koordinatlarının hesaplanmasına, modellenmesine ve ölçekli çizimlerine olanak sağlayan bir fotogrametrik modelleme tekniğidir.
- Dijital fotogrametri: Süreç içerisinde gerekli olan her türlü işlemin dijital ortamda yapılması ile gerçekleştirilmektedir. Analog resimlerin taranarak dijital ortamlara aktarılmasıyla veya dijital makinelerde elde edilen görüntüler kullanılmaktadır. Gerekli hesaplamalar fotogrametrik analiz programları aracılığıyla bilgisayar ortamında yapılmaktadır.

Fotogrametrisinin evrimi ve sınıflandırılması, teknolojinin genel gelişimine sıkı bir şekilde bağımlıdır. Bu bağlamda, fotogrametri alanındaki sınıflandırmaların sayısı ve türü, teknolojik ilerlemelerin paralelinde artış göstermektedir. Fotogrametri, bilgisayar teknolojisi, hava taşıtları, fotoğrafçılık ve dijitalleşme gibi önemli teknolojik gelişim evreleriyle doğrudan ilişkilidir (Şekil 3.14). Fotogrametri, teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürekli olarak evrim geçirmiştir. Özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişimi, fotogrametrinin veri işleme ve analiz kapasitesini büyük ölçüde artırmıştır. Ayrıca, uçak kullanımı, fotogrametriyi daha erişilebilir ve geniş ölçekli projeler için daha etkili hale getirmiştir. Fotoğrafçılık, fotogrametrinin temelini oluşturan veri toplama yöntemlerinden biri olarak uzun bir geçmişe sahiptir. Ancak dijitalleşmenin yükselmesi, fotoğrafçılık tekniklerini daha hassas ve verimli hale getirmiştir. Dijital kameraların yaygınlaşması, veri toplama ve işleme süreçlerini büyük ölçüde kolaylaştırmıştır.



Şekil 3.14. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak fotogrametrinin gelişimi ve kullanılan araçlar (Fotoğraflar; Kıvanç, 2019)

1990 ve 2000'li yıllarda kalibre edilmiş kameralar yardımıyla çekilen ve en az 3 kontrol noktasına sahip görüntüler, yazılımlar aracılığı ile üç boyutlu olarak modellenmeye başlanmıştır. PhotoModeler yazılımının kullanıldığı çalışmalarda, titizlikle kalibre edilen kameralar sayesinde elde edilen görüntülerin referans noktaları ve XYZ koordinatları yazılımda hesaplanarak iki boyutlu planlar ve üç boyutlu CAD çizimleri elde edilmiştir (Yamafune, 2017: 520-521). 2010'lu yıllarda 3D modellerin hızla üretilmeye başlanması ile fotogrametrik modelleme, kültürel miras belgeleme çalışmalarında ve birçok alanda çok sık kullanılan teknik haline gelmiştir. Ayrıca oluşan modellerden ortofotoların üretilmesi, fotogrametri tekniğini daha kullanışlı hale getirmiştir. Mimarlık ve mühendislik alanlarında fotoğraftan elde edilen verilerin çarpıklık ve yükseklik gibi optik hatalardan arındırılarak koordinatlı ve 3D gerçek fotoğraflara dönüştürülmesine ortofoto denilmektedir. 2010 ve sonrasında fotogrametri alanında, Agisoft üretici firması bu alanda ilk tercih edilen CAD yazılımlarını kullanıma sunmuştur (Gül, 2021).

Dijital fotogrametri, yüksek çözünürlüklü veri elde etme, birçok renk ve düzenleme, görsel çıktılarda iyileştirmeler veya isteğe bağlı modelleme gibi seçenekler sayesinde günümüzde en çok tercih edilen değerlendirme yöntemi haline gelmiştir. Dijital fotogrametrik yöntemlerle kültür varlıklarının görselleştirilmesi ve belgelenmesi, elde edilen verilerin dijital ortamlarda kolaylıkla saklanabilmesi ve dijital ortamlarda yönetimi, koruma çalışmaları sırasında zamanla oluşan hasarların tespiti yapılmaktadır (Uslu, Polat, Toprak ve

Uysal, 2016: 166). Ayrıca dijital fotogrametri ile elde edilen nokta bulutu sayesinde koruma stratejileri geliştirmek mümkündür.

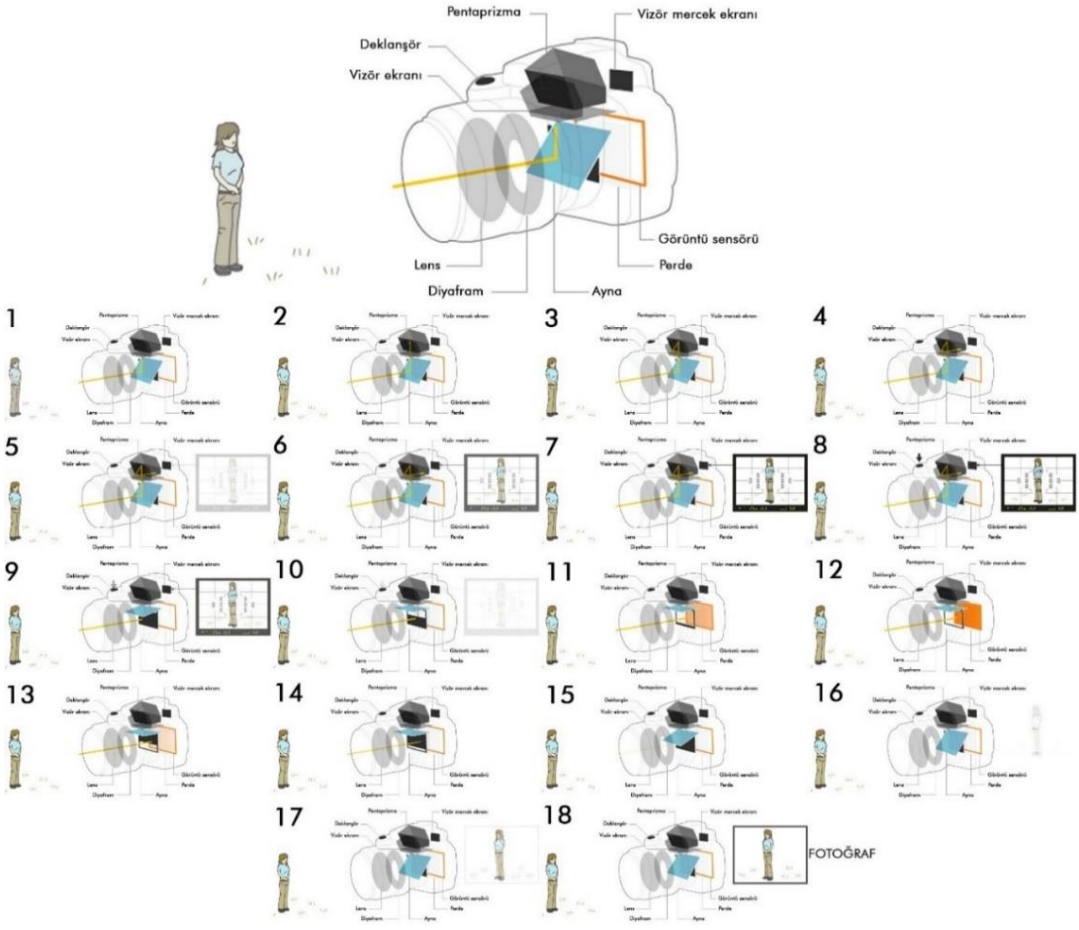
2010 yılı sonrasında hızla gelişen teknoloji ile birlikte artan fotogrametrik tekniklerinde üç boyutlu dijital modelleme sistemini belirtmek için birçok terim kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan başlıca terimler; hareketten yapı (Structure from motion - SfM), çoklu görüntü fotogrametrisi (Multi image photogrammetry), yakın mesafe fotogrametrisi (Close range photogrammetry), bilgisayar görüşü fotogrametrisi (Computer vision photogrammetry) ve bu terimler aynı sistemler ile oluşturulan fotogrametrik modelleme teknikleridir (Yamafune, 2017: 522). Bu terimlerin varlığı ve kullanımı fotogrametrinin birçok farklı alanda ve bilimdeki uzmanlar tarafından uygulanmasından dolayı ortaya konmuştur. Bu tezde birçok terime sahip olduğu görülen ve tezde kullanılan değerlendirme tekniği olan dijital fotogrametri için konu bütünlüğü açısından tez içerisinde fotogrametri terimi kullanılmıştır.

3.3.2. Fotoğraflama

Günümüzde yüksek çözünürlüklü fotoğraf çeken kameralar ile eski delik kameralar temelde aynı sistem ile çalışmaktadır. Ancak günümüz kamera sistemleri, yüksek çözünürlüklü lenslere ve uygun boyutta kullanışlı mekanizmalara sahiptir. Bu mekanizmaların kullanımında kaliteli fotoğraflar çekmek için yüksek netleştirme hassasiyeti, doğru pozlama ve uygun emülsiyon filmleri kullanmak oldukça önemlidir. Kameranın netleştirme aşaması Newton Kanuna göre gerçekleşmektedir. Newton Kanuna göre ışık, izotrop ortamda (fiziksel özelliği her doğrultuda aynı olan ortam), doğrusal yayılmasını temel kabul eden; yansıma, kırılma ve aydınlanma olaylarını inceleyen geometrik optik içerisinde ışığı bir kaynaktan yayılan tanecikler olarak tanımlanmaktadır. Newton'un tanımı ile geometrik optikle yansıma, kırılma ve aydınlanma olayları açıklanabilmektedir. Newton'a göre ışık, kaynağından çıkan ve sabit bir hızla doğru bir şekilde yayılan çok küçük, ağırlıksız, esnek küreciklerden (korpüsküllerden) oluşmuştur. Işığın parçacık teorisi yansıma, kırılma ve dağılma (beyaz ışığın ortamdan geçtikten sonra renklere ayrılması) gibi birçok optik olayı kolayca açıklayabilmektedir (Torun, 2013; Gül, 2021).

Dijital görüntünün oluşabilmesi en önemli donanım kameradır. Görüntü elde edebilmek için kullanılan birçok farklı kamera zamanla geliştirilmiş olsa da temel çalışma prensipleri aynıdır. Kameralarda başlıca kamera gövdesi, lens, diyafram, perde, görüntü sensörü, vizör

ekranı, vizör mercek ekranı, deklanşör, pentoprizma bulunmaktadır. Görüntü elde etme süreci, görüntü alınacak olan nesneye ışık kaynağının yansıması ile başlamaktadır. Gelen ışık nesneye çarptıktan sonra kameranın lensine yansımaktadır. Lenste toplanan ışık, diyafram yardımıyla miktarı ayarlandıktan sonra, kameranın gövdesine gönderilmektedir. Gövdede bulunan aynaya çarpan ışık demetleri pentaprizmaya ulaşmaktadır. Bilindiği üzere nesneye yansıyan ışık kameranın lensinden geçerken ters döner. Ters dönen görüntünün düz görebilmesi için pentaprizma görüntüyü düzleştirmekte ve sonrasında vizör ekranından ve vizör mercek ekranından düz bir şekilde görünmektedir. Beraberinde deklanşöre basılması ile birlikte, kamera gövdesinde bulunan ayna yukarı kalkmaktadır. Örtücü perdenin açılıp kapanması ile ışığın süresi ve miktarı ayarlanmakta ve ışık yani görüntü sensörünün ya da filmin üzerine düşmektedir. Örtücü perdenin açılıp kapanmasıyla görüntü sensörü üzerinde oluşmaktadır. Bu sürece pozlama adı verilmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.15'te basitleştirilmiş kamera sistemi ve beraberinde görüntü elde edimine kadar olan süreç, 18 fragmanda temsil edilmiştir.



Şekil 3.15. Kamera sistemi ve objektiften aynaya yansıyarak vizöre giden optik yol

Fotogrametride elde edilen görüntülerin ardından yeniden yapılandırmanın (rekonstrüksiyon) geometrik doğruluk açısından başarısı, büyük ölçüde görüntü demetinin, pozlama sırasında merceğe giren ana ışın demetine kıyasla benzerliğine bağlıdır. Kamera kalibrasyonunun amacı, benzerliğin mümkün olduğunca yakın hale gelmesi için bir görüntü alanı tanımlamaktır. Fotogrametri, stereoskopik paralaks ve eşdoğrusallık denklemleri kavramına dayanmaktadır. Stereoskopi, görüş için stereopsis aracılığıyla bir görüntüdeki derinlik yanılsamasını yaratmak veya geliştirmek için kullanılan bir tekniktir. Stereoskopik doğal görüş de nesnelerin üç boyutlu algılanmasını sağlar. Bu durum, stereoskopik paralakslara, yani her bir gözün gözlemlenen noktadaki görüntüsünü oluşturan açıların değişimine ve gözler arasındaki mesafeye bağlıdır. Aynı kavramlar, kameralar ile yapay stereoskopik görüşe aktarılabilmekte ve farklı konumlardan alınan aynı nesneyi içeren, homolog noktaların tanımlanacağı bir çift çerçeve oluşmaktadır. Bu sayede derinliği algılamak mümkündür (Selvaggi, 2017).

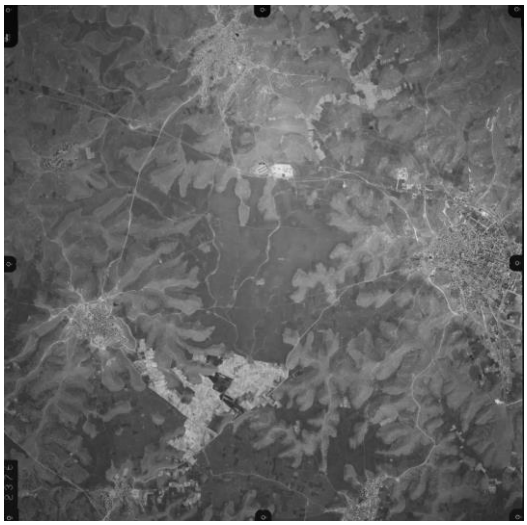
Bu tez kapsamında, Iphone Xs Max ve Iphone 13 Pro Max akıllı telefon kameralarından faydalanılmıştır.

3.3.3. Fotoğraf çeşitleri ve çözünürlük

Fotogrametri biliminde, fotoğraf elde etmek amacıyla yersel ve havadan olmak üzere sıklıkla iki temel fotoğrafçılık sınıfı kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte uydudan elde edilen görsellerin kullanılması ile uzaktan algılama sınıfına da rastlanılmaktadır.

Yersel fotogrametri, dünya yüzeyinde sabit bir noktadan alınan görüntü veya görüntülerle gerçekleştirilen ölçme işlemidir. Yersel fotogrametri, yakın veya uzak mesafeli, tek veya çift kamera aracılığıyla çekilmiş fotoğrafların gereken yönlendirme işlemlerinin ardından iki boyutlu çizimi ve üç boyutlu modellerinin oluşmasını mümkün kılan bir tekniktir (Güleç, 2007). Uzak mesafeli yersel fotogrametri, foto-teodolit veya kameralar aracılığıyla, çoğunlukla topografik çalışmalarda kullanılan ve en az iki noktadan alınan görüntülerin, gerekli işlemlerin yapılmasının ardından verilerin oluşmasını sağlamaktadır (Resim 3.3). Yakın mesafeli yersel fotogrametri ise tek ya da farklı sayıda fotoğraf makinası kullanılarak elde edilen fotoğrafların, nesneye ilişkin üç boyutlu uzamsal bilgi edinmek amacıyla modelleme işlemlerinin tamamlanması sonucu iki boyutta çizimlerinin ve üç boyutlu modelinin üretilmesine imkan tanımaktadır (Güleç, 2007). Genellikle yakın mesafede

bulunan nesnelerin modellenmesinde uygulanmaktadır. Bu fotogrametrik model oluşturma tekniği, topografik üretimler için pek kullanışlı olmamaktadır. Yakın resim fotogrametrisinde üç boyutlu verilerin elde edilme süreci, farklı merkezlerden ardışık ve birbirini tanımlayacak bindirmeli görüntüler alınmasına dayanmaktadır. Bunun gerçekleştirilebilmesi için nesne üzerindeki kontrol noktalarının sayısı ve konumu, kamera dizilimi ve mesafeleri iyi ayarlanmalı ve kalibrasyonun doğru yapılması gerekmektedir.



Resim 3.3. Uzak mesafe yersel fotogrametride kullanılabilecek Mardin'e ait hava fotoğrafı (Harita Genel Müdürlüğü'nden elde edilmiştir.)

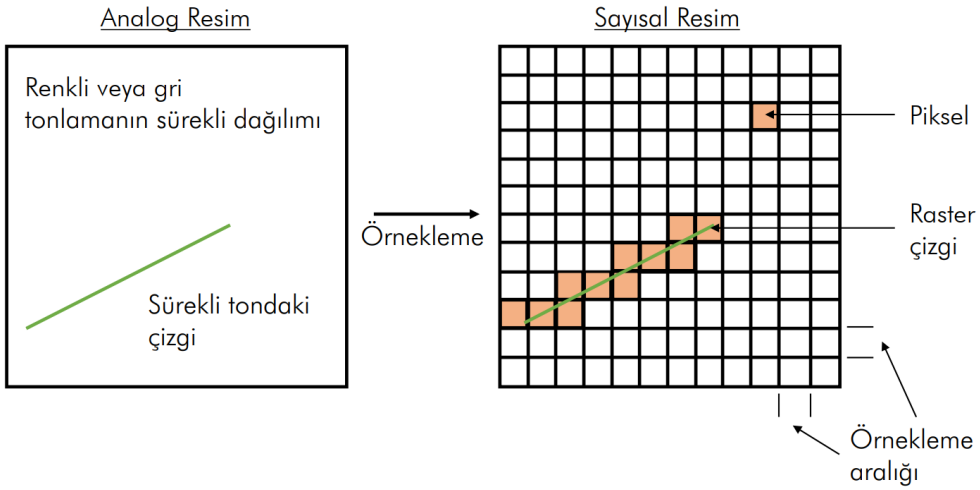
Yakın mesafe yersel fotogrametrisinde kameranın objeye yakınlığı 100 m'den az, uzak mesafe yersel fotogrametride ise objeye yakınlık 100 m'den fazla olmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki resmi sivil havacılık organizasyonu olan Federal Havacılık İdaresi (FAA) bu yakınlık mesafesini 300 m olarak belirlemiştir (Tunçay, 2006).

Fotogrametri tekniğinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, görüntü elde etme sürecinde uçak, balon, helikopter gibi farklı araçların kullanılması ile havadan elde edilen görüntüler sonucunda fotogrametrik modeller oluşturulmaya başlanmıştır (Numan, 2020). Bu duruma paralel olarak gelişen teknoloji sonucu son yıllarda özellikle İHA ile fotogrametrik modelleme kullanımı artmaya başlamıştır.

Tez kapsamında kullanılan fotogrametri tekniğinde, akıllı telefonlarda bulunan dijital kameralar ile görüntüler elde edilmiştir. Dijital görüntüler, piksel olarak adlandırılan sayısal verilerin sınırlı gruplar halinde nesnenin iki boyutlu temsil edilmiş durumudur (Sidek ve

Ahmad, 2009). Piksel, görüntüye ait en küçük birimidir. Dijital görüntüde yer alan satır ve sütundaki dijital görüntünün her pikseli sabit bir sayı içermektedir.

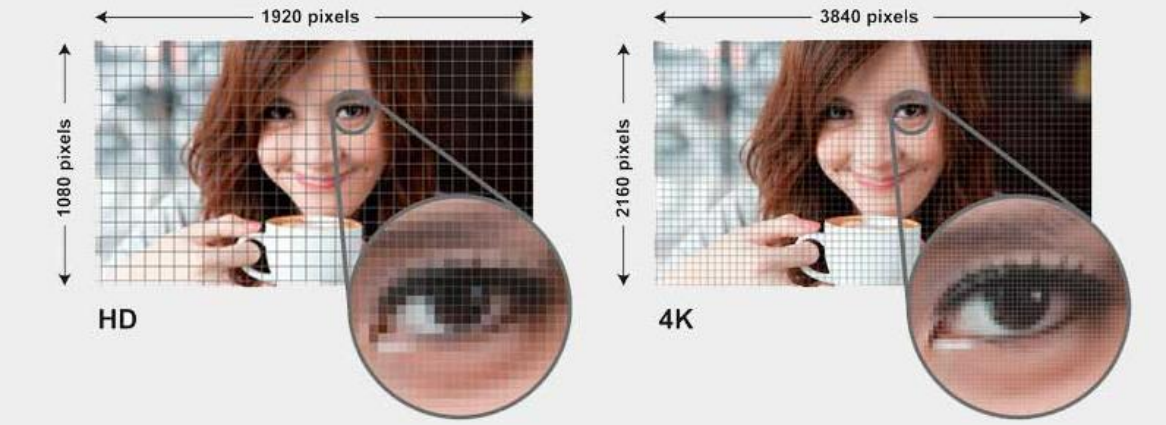
Analog teknikler ile elde edilen görüntülerde piksel oluşmamakta ve sürekli tonda devam eden çizgiler ile görüntü oluşmaktadır. Dijital (sayısal) görüntü tanımlamalarında ise pikseller ile belirli kareler sonucu görüntü oluşmaktadır (Şekil 3.16). Piksel ızgaralarından oluşan raster görüntülerin yüksek çözünürlüğe sahip olması, bilgisayar ortamında farklı renklerde alınabilmesi, görüntüde istenildiği gibi iyileştirmelerin gerçekleştirilebilmesi gibi nedenler sonucu dijital fotogrametriye gösterilen ilgi de artmıştır. Raster formatındaki görüntüler, bilgisayar grafiklerinde ve dijital fotoğrafçılıkta, bir bilgisayar ekranı, kâğıt veya başka bir görüntüleme ortamı aracılığıyla görüntülenebilen, dikdörtgen bir matris veya kare piksel ızgarası olarak iki boyutlu bir görüntüyü temsil etmektedir (Kılınçoğlu, 2016). Raster veri modelinde, görüntü üzerinde yer alan her konum bağımsız bir piksel ile temsil edilmektedir. Bu tip bir raster gösteriminde, hücrelerin koordinatları satır ve sütun numaralarına göre belirlenmektedir. Koordinat sisteminin orijininde ise her zaman ekranın sol üst köşesi referans alınmaktadır. Sütun olarak isimlendirilen yatay eksen X ve satır olarak isimlendirilen eksen ise Y olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.16. Analog ve dijital resim (Kılınçoğlu, 2016'dan geliştirilmiştir.)

Raster bir görüntü yapısında, piksel büyüklüğü görüntünün hassasiyetini ve ayırt etme durumunu göstermektedir. Ayrıca pikseller sahip olduğu sınırlandırılmış yüzeylere ve kapsadığı alanlara ilişkin bilgiler barındırmaktadır. Bu bilgiler yoğunluk ve gri değerler ile ilgili olup renk derinliği olarak adlandırılmaktadır. Bir piksel sınırı, kırmızı-yeşil-mavi (RGB, red-green-blue) renklerinden oluşmaktadır.

Dijital bir görüntü, video kaydı veya fotoğrafta çözünürlük, görüntünün oluşturulduğu sırada sahip olduğu piksel sayısı ile ilişkilidir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Piksel sayı farkının fotoğraf çözünürlüğünde etkisi (Bayraktar, 2019)

Yüksek çözünürlüklü görüntülerde, inç başına düşen piksel sayısı (pixel per inch – PPI) değeri önem arz etmektedir. İnç başına daha fazla piksel sayısı, daha yüksek çözünürlük ve daha keskin görüntü anlamına gelmektedir. PPI bir görselin web ve ekran için görüntü kalitesini belirtmektedir ancak baskı ve matbaa çalışmalarında inç başına düşen pikselin yerine inç başına düşen nokta sayısı (dots per inch – DPI) önem arz etmektedir (Bayraktar, 2019). DPI, bir yazıcı kullanılarak basılan bir görüntünün bir inçinde basılan nokta sayısını belirtmektedir. Ancak bu noktalar, kare resim öğeleri değil, küçük mürekkep noktalarıdır. Yazıcılar, kâğıda minyatür mürekkep damlacıkları püskürterek bir baskı oluşturmaktadır. Görüntünün bir pikselini oluşturmak için birçok nokta gerekir. Dolayısıyla basılı bir çalışma için DPI kavramı büyük önem taşırken basılı olmayan dijital görüntülerde ise PPI değeri önem taşımaktadır (Şekil 3.18). DPI ile benzer özellikler taşımasına rağmen PPI, daha yüksek kalitede dijital görüntünün amaçlandığı dijital çalışmalarda büyük bir önem taşımaktadır. Buna göre, daha fazla piksele ve dolayısıyla daha iyi bir PPI değerine sahip bir görüntünün kalitesinin de artacağı sonucuna varılabilir. Ayrıca görüntüler kaydedilirken çoğunlukla megapiksel (MP) ile ifade edilen görsellerde, milyonlarca piksel bulunmaktadır. Tamamen piksellerden oluşan dijital görüntülerde megapiksel kavramı, bir kameranın çekebildiği en yüksek kaliteyi ifade etmek için kullanılmaktadır. Örneğin, 1 MP'lik bir görüntü içerisinde 1 milyon megapiksel içermektedir. 12 MP'lik bir görüntüde ise bu oran tam 12 kat daha fazladır ve 12 milyona eşittir.



Şekil 3.18. Dijital görüntülerde PPI ve DPI ayrımı

Fotogrametrinin en önemli ve başlangıç adımı, görüntülerin elde edilmesidir. Derinlik (stereo) değerlendirmenin gerçekleştirilebilmesi için aynı nesnenin farklı iki veya birçok istasyon noktasından görüntüsünün çekilmesi gerekmektedir. Dolayısı ile en önemli konu olan fotoğraf çekimi için uygun bir zaman, yüksek çözünürlüklü kamera ve fotoğraflara göre uygun tekniğin seçilmesi gerekmektedir.

Fotoğraf çekimi sırasında dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

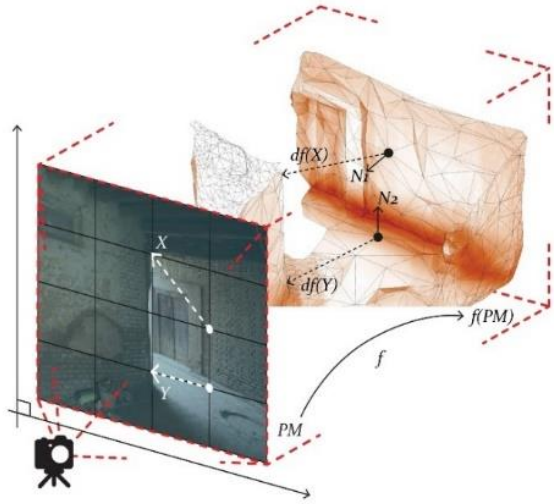
1. Çok güneşli veya parçalı bulutlu havalar çekim için uygun değildir. Fotoğraflarda parlak veya karanlık yüzeylerin olmaması gerekmektedir.
2. Çekilen nesnenin ve kontrol noktalarının bütünüyle kadraj içerisinde yer almasına ve görüş alanı içerisinde herhangi bir engel olmamasına özen gösterilmelidir.
3. Fotoğraf çekiminin kontrollü ve önceden hazırlanan bir listeye göre gerçekleştirilmesi süreci daha etkin ve doğru kullanmaya katkı sağlamaktadır.
4. Renkli fotoğraf çekimi gerçekleştirilmelidir ve fotoğrafların birbirileriyle bindirmeli olacak şekilde çekilmesi gerekmektedir. Fotogrametrik modelde kullanılacak programın, fotoğrafları tanımlayabilmesi ve hizalayabilmesi için bindirmeli çekim büyük önem arz etmektedir. Bunun için fotoğraflar arası yaklaşık %30 benzerlik olması söylenebilir.
5. Çekimi gerçekleştirilen nesnelerdeki tüm detayların modelde oluşabilmesi için program tarafından değerlendirilebilecek şekilde farklı istasyonlardan ve mesafelerden fotoğraf çekilmesi gerekmektedir.
6. Yüksek çözünürlüğe sahip fotoğrafların kullanılması, fotoğrafların program tarafından tanımlanmasını kolaylaştırmakta ve daha doğru bir sonuç ürün oluşturmaktadır.

Analog görüntülerin ardından dijital görüntülere geçiş, fotogrametri alanında yeni bir değerlendirme tekniği olan dijital fotogrametrinin ortaya çıkmasına ve hızla gelişmesine olanak tanımıştır. Günümüz teknolojisiyle birlikte gelişen güçlü bellekler ve hızlı işlemciler, dijital fotogrametrinin yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır (Numan, 2020).

Dijital görüntülerin kullanılmasının sağladığı avantaj aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Elde edilen görüntünün kalitesi arttırılabilir olmaktadır.
2. Mekanik ve fotoğraf çekimi dışında insan gücü gerektirmeyen dijital görüntüler bilgisayar üzerinde işleme alınabilmekte ve ölçümler yapılabilmektedir.
3. Uygulamalar bilgisayar, telefon gibi dijital destek sağlayan araçlar ile anlık olarak çalışma sahasında kontrol edilebilmektedir.

Fotoğraflar üzerinden, nesneleri ölçme tekniği ve görüntü verilerinin metrik yorumlaması olan fotogrametride, fotoğraf çekim işleminin tamamlanması ile birlikte kullanılan yazılımın özel modelleme algoritması sayesinde metrik yorumlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Yazılımın özel modelleme algoritması Şekil 3.19'da gösterilmektedir (Aydın, 2018).



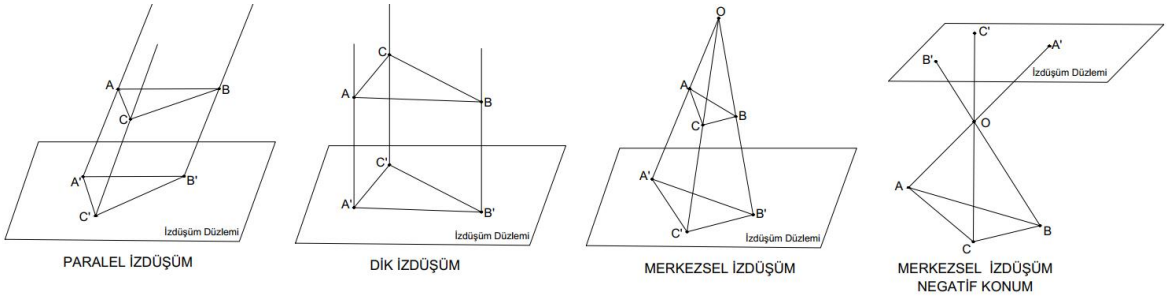
Şekil 3.19. Çin'in Kaşgar ilinde yer alan eski kentteki dar yollardan çekilmiş olan 2 boyutlu fotoğraflardan üretilen 3 boyutlu modelin diyagramı (Aydın, 2018)

3.3.4. Üç boyutlu nokta bulutu

Günümüzde fotogrametri, bir nesnenin farklı açılardan çekilmiş üst üste binen görüntülerinin -farklı fotoğraf karelerindeki ortak görüntüler- eşleştirilmesi ve ardından

izdüşüm denklemleri aracılığıyla derinlik haritalarının oluşturulması ilkesine dayandırılmaktadır.

Üç boyutlu uzaydaki noktalar iki boyutlu uzay olan düzlemlere üç farklı izdüşüm yöntemi kullanılarak geometrik yöntemlerle aktarılabilmektedir (Vatan, 2005). Bu yöntemler paralel izdüşüm, dik (ortoganal) izdüşüm ve merkezsel izdüşümdür (Şekil 3.20). Fotogrametri tekniğinde merkezsel izdüşüm kullanılmaktadır.



Şekil 3.20. İzdüşüm yöntemleri (Vatan, 2005'ten geliştirilmiştir.)

Nokta bulutları (point clouds), çok boyutlu verileri içinde barındıran bir yapıya sahiptir ve nesneleri veya alanı temsil eden veri kümelerinden oluşmaktadır. Noktalar, modeli oluşturulan yüzeydeki tek bir noktanın x, y ve z geometrik koordinatlarını temsil etmektedir. Nokta bulutları, bir bütünü temsil edebilecek çok sayıda tekil uzamsal ölçümün, bir dizi veri kümesinde harmanlanmasının bir şeklidir (Thomson, 2019). Fotogrametri yazılımı da ortamdaki nesne ve noktalar arasındaki mesafeyi ölçerek ortamı modellemektedir (Funker, 2021). Koordinat sisteminde özellikle z aksı, sadece derinliğe göre kamera konumu ile nesne yüzeyine olan uzaklığı kaydetmektedir. X ve y koordinatları ise derinlik dışında kalan uzunlukları ifade etmektedir. Fotoğraf çekiminde kullanılan kamera özelliklerine göre bazı nesne verileri, mesafeye bağlı olarak tanımsız veriler oluşmasına neden olabilmektedir. Örneğin Kinect model kamera verileri için 0,8 ile 4 metre arasında nesneye uzaklık ayarlanmalıdır (Özbay, 2018). Her kamera için ifade edilebilecek kesin uzaklık mesafeleri olmamakla birlikte, birbirini tanımlayabilecek şekilde farklı mesafelerden ve farklı açılardan fotoğrafların çekilmesi modelin oluşmasında kolaylık sağlamaktadır.

Dijital görüntülerden elde edilen üç boyutlu nokta bulutları, günümüzde bilgisayar destekli fotogrametrik görme kapsamında gerçekleştirilen işlem aşamalarının çok sayıdaki noktaya eş zamanlı olarak uygulanması ve bu noktalara üç boyutlu konum bilgisi ataması ile

oluşturulmaktadır. Genellikle halihazır harita üretimi, sayısal arazi modeli, sayısal yükseklik modeli, dijital yüzey modelleri, kent modelleri, bina modelleri, nesne modelleri, ortofoto gibi neredeyse her nesnenin 3D modelini elde etmek için kullanılmakta ve bu veriler x, y ve z koordinatlarından oluşmaktadır (Glueck, 2021). Bindirmeli fotoğrafların program tarafından hizalanması ile paralel olarak gelişen noktalar ne kadar yoğun olursa, temsil o kadar ayrıntılı olmakta, bu da daha küçük özelliklerin ve doku ayrıntılarının daha net ve kesin olarak tanımlanmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, Londra'daki Tower Bridge'in nitelikli fotoğraf çekimleri sonrasında oluşturulmuş bir fotogrametrik modelinde nokta bulutlarına yakınlaştırıldığı zaman, tüm nokta bulutunu oluşturan daha küçük noktaları görülebilmektedir (Resim 3.4).



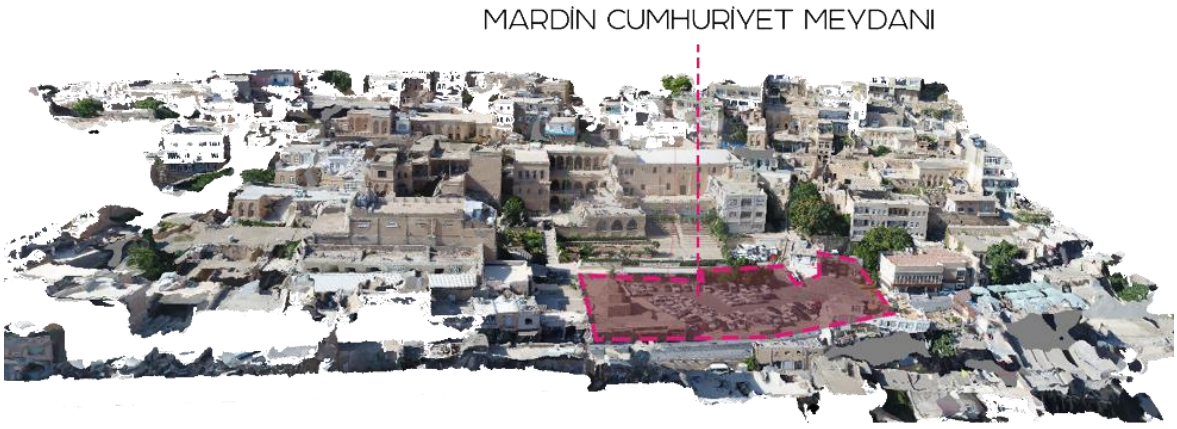
Resim 3.4. Tower Bridge nokta bulut modeli (URL-2)

Veriler, herkesin erişebileceği ve anlaşılabilirliği yüksek bilgileri içermektedir. Yapı tasarımı süreçlerinde, planlanma ve bakım yöntemlerini dönüştürme verilerine sahiptir. Fotoğraftan üretilen modeller gerçekçi detaylar barındırabilmektedir. Dikiş makinesi büyüklüğünde bir nesnenin modelinin üretilebilmesi için etrafından çekilecek olan yaklaşık 30 fotoğrafın yazılıma yüklenmesi ve yaklaşık 20-30 dakika gibi bir sürede işlemin tamamlanmasının beklenmesi yeterli olmaktadır (Resim 3.5).



Resim 3.5. Mardin’de bir evde yer alan dikiş makinesinin çekilen fotoğraflar üzerinden 3 boyutlu modele dönüştürülmüş hali (Serdar Aydın arşivi, 2020)

Fotogrametrik model ile yapısal ve kentsel ölçekte de fotoğraflardan gerçekçi modeller üretilebilmektedir. Resim 3.6, Eski Mardin'de bulunan Cumhuriyet Meydanı'na ait 3 boyutlu fotogrametrik modeli göstermektedir. Model üretimlerinde genellikle nesneye bağlı olmadan önemli olan husus, çok sayıda yüksek çözünürlüklü ve birbirinin devamı olacak şekilde fotoğrafların çekilerek yazılıma tanımlanmasıdır.



Resim 3.6. Mardin Cumhuriyet Meydanı 2020 yılına ait durumunu gösteren 3 boyutlu modele dönüştürülmüş hali

Tez kapsamında da modelinin üretilmesi düşünülen yapılar, günümüz DAFS etkisi altında yer alan ve bin yıllık geçmişe sahip kültürel değerleri barındıran Artuklu eserleridir. Bu eserler, bulunduğu bölgenin sahip olduğu tarihi bilgilere ışık tutması sonucu güncel yaşamın vazgeçilmez parçasına dönüşmüş ve kayıt altına alınması gereken camilerdir. Bu kültürel çeşitlilik üzerinden yapılacak olan modellemelerle, Artuklu dönemi camilerinin strüktürel davranışlarının belirleneceği gibi süreç içerisinde oluşturulan modeller, yapıların çevresindeki kültürel zenginliklerin 2022 yılı özellikleri gerçekçi modeller aracılığı ile bütüncül olarak incelenmesine olanak tanıyarak gelecek nesillere aktarımı da sağlanmış olacaktır.

Fotogrametrik modelin yapısal analiz sürecinde, programa tanıtılma işlemi 5 aşama ile gerçekleşmektedir (Şekil 3.21). İlk aşamada modeli oluşturulacak nesneden dijital görüntüler toplanmaktadır. Beraberinde kullanılacak olan programa dijital görüntüler aktarılarak üç boyutlu nesnenin modeli oluşturulmaktadır. Oluşan model, programın kendi içerisinde otomatik tanımlamaları ile ağ olarak gelmekte ve üçüncü adımda bu ağ içerisinde, hatalı olan bölümleri düzeltmek gerekmektedir. Düzeltilen ağ, CAD programında gerekli katmana taşınarak üç boyutlu yüzey nesnelerinin yapısal analiz programına aktarılmadan

önceki son aşaması da tamamlanmış olmaktadır. Son aşama kullanılan program içerisine modelin aktarılmasıdır.



Şekil 3.21. Dijital fotogrametrik araştırmadan bir üç boyutlu yapısal modelin üretilmesi için yönetim sistemi

3.4. Modellerde Gerçekleştirilebilecek Analiz Yöntemleri

Tarihi yapıların analizi sürecinde, gerçekleştirilecek olan kabuller doğrultusunda "doğrusal (Lineer)" veya "doğrusal olmayan (Non-Lineer)" analiz yöntemleri kullanılabilmektedir.

Yapı malzemesinin davranışında (gerilme-deformasyon ilişkisi) doğrusal ve elastik kabulünün yapımasın, malzeme açısından analizin doğrusal elastik olduğu söylenebilir. Malzeme davranışındaki doğrusallık, gerilme-deformasyon arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu ifade etmektedir ve tek bir elastisite modülü bulunmaktadır. Doğrusal olmayan yapısal davranışta ise uygulanan kuvvetle doğrusal bir şekilde deformasyon oluşmamaktadır. Kuvvetin artması, malzemenin daha kolay esnemesine veya esneyemez hale gelmesine sebebiyet verebilmektedir. Dolayısıyla kuvvetten gelecek olan ikinci derece etkilerin deforme olmuş durum üzerine geldiği davranışa doğrusal olmayan (nonlineer) davranış denilmektedir.

Doğrusal analiz yöntemleri, yapı malzemesinin doğrusal davranış sergilediği varsayılarak gerçekleştirilen analizlerdir. Doğrusal analiz, yapının sahip olduğu limit-yük durumlarını kontrol etmekte kullanılmaktadır ve yaklaşık hesaplama yöntemi olarak nitelendirilmektedir. Yapının barındırdığı düzensizliklerine uygun bir yöntem seçilmekte ve

model oluşumuna başlanmaktadır. Genellikle bilgisayarlı çözümler gerçekleştirilirken yer değiştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunun nedeni doğrusal analiz yöntemleri, daha az bilinmeyene sahip ve sınırlı bir bant aralığına sahiptir. Binaların dayanımlarının tespit edilmesi için kullanılabilecek doğrusal hesap yöntemleri, *"Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi"*dir (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği – TBDY, 2018). Tarihi yapılara etkiyen farklı yük veya fiziksel etkiler sonrası ortaya çıkan gerilmelerin, yapının taşıyıcı sistem elemanlarının taşıma kapasitesi ve gerilme değerleriyle karşılaştırılması bu analiz yönteminin temelini oluşturmaktadır.

Doğrusal olmayan analiz, mevcut veya güçlendirilmiş yapıların gerçekleşen veya gerçekleşmesi tahmin edilen deprem yükünün tanımlanması ile yapısal performanslarının belirlenmesinde ve güçlendirme hesaplarında kullanılabilmektedir. Doğrusal olmayan hesap yöntemleri, tanımlanmış bir deprem yükü altında sünek davranışa yönelik plastik şekil değiştirme ve dönme taleplerinin, gevrek davranışa yönelik iç kuvvet taleplerinin hesaplanmasını amaçlamaktadır. Güçlendirilmiş veya inşa edilmiş yapıların incelenmesinde kullanılabilecek doğrusal olmayan hesap yöntemleri, *"Tek Modlu İtme Yöntemleri, Çok Modlu İtme Yöntemleri ile Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemi"*dir (TBDY, 2018). Analiz ile birlikte ortaya çıkan talep büyüklükleri, şekil değiştirme değerleri ve iç kuvvet kapasiteleri birbirleriyle mukayese edilerek strüktürel davranış kesit ve bina bazında değerlendirilebilmektedir.

Doğrusal olmayan analiz, yığma yapıların dinamik yükler karşısındaki davranışını belirlemek amacıyla sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Özellikle karmaşık geometrik özelliklere sahip yığma yapıların dinamik yükler karşısında doğrusal davranış gösterememesi, davranış analizi süreçlerinde bu yöntemin kullanılmasının daha detaylı ve kesin sonuçlar vereceğini göstermektedir. Doğrusal olmayan analiz yönteminde hem malzemelerin deneysel gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerine duyulan gereksinim, hem de analizin yürütülmesi ve sonuçların yorumlanmasında ortaya çıkan birtakım güçlükler nedeniyle uygulanması zordur. Doğrusal olmayan analiz yöntemleri, doğrusal analiz yöntemlerine nazaran çok daha fazla zaman almakta ve ileri düzeyde bilgisayar teknolojisi kullanımını gerektirmektedir. Model oluşturma ve analiz sürecinde yapılan tanımlamalarda oluşabilecek basit bir hata, önemli yanlışlıklara neden olabilmektedir. Doğru bir sayısal modelin üretilmesi, uygun malzeme özelliklerinin atanması ve gerçekçi deprem yüklerinin tanımlanması sonucunda doğrusal analiz yöntemleri de doğru sonuçlar verebilmektedir.

Doğrusal analiz yöntemi sayısal modelin temsil ettiği yapı ile ilgili sınır koşullarını belirlemek için kullanılabilmektedir. Ancak, sınır koşullarının aşılmasının ardından bu analiz yöntemi doğru sonuçlar üretememektedir. Daha detaylı sonuçlar için doğrusal olmayan analiz yöntemleri gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerde yapıların doğrusal-elastik davranış sergilediği, kalıcı deformasyona uğramadığı ve malzemenin rijitliğinin analiz süresince sabit olduğu varsayılmıştır.

3.4.1. Modal analiz

Herhangi bir yapıya statik denge konumunda titreşim (hareket) verilirse, yapı kütle yoğunluğu ve rijitlik özelliğine göre belirli bir frekansta titreşim göstermeye başlayacaktır. Yapıdaki toplam serbestlik derecesine göre gerçekleşen frekans, yapının doğal frekansını belirtmektedir. Yapının mevcut konumundan, tam bir tur titreşim sonrası mevcut konumuna geri döndüğü anda geçen zaman dilimi de yapının periyodunu belirlemektedir. Belirli bir frekansta titreşen yapının, her bir periyotta aldığı şekillere ise mod şekilleri denilmektedir (Chopra, 1995). Eigenvalue veya öz değer analizi olarak da tanımlanabilen modal analiz, yapıya ait kütle yoğunluğu ve rijitlik matrislerini kullanarak titreşim altındaki doğal frekansı, periyotu, iç sönümlemeyi, titreşim süresindeki mod şekli ve kütle katılım oranları gibi değişkenleri tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır (Dabanlı, 2008).

Modal analiz, yüklerden bağımsız olarak sadece yapının geometrik özelliklerin program tarafından doğru algılanıp algılanmadığını da göstermektedir. Bu durum özellikle tarihi yapıların analizinde oldukça önemlidir. Tez kapsamında farklı modelleme yöntemlerinin karşılaştırılmasında, modal analiz sırasında ortaya çıkan ilk 5 moddaki periyotların ve mod şekillerinin aynı çıkması, ortaya konulan modellerin de birbirleriyle olan benzerliklerini göstermektedir.

3.4.2. Statik analiz

Statik analiz, yapıya etkiyen düşey yüklerin yapı üzerindeki etkisinin incelenmesini sağlayan analiz türüdür. Zamandan bağımsız bir şekilde gerçekleştirilen bu analiz türü, yapının kendi ağırlığını taşıyıp taşıyamayacağı veya üzerinde bulunacak olan hareketsiz bir yüke karşı

nasıl dayanım göstereceğini anlamak için kullanılmaktadır. Yapı sisteminin durağan halde ne kadar yüke karşı koyabileceği ortaya çıkmaktadır.

Düşey yükler altında gerçekleştirilen statik analiz, yapıya deprem gibi dinamik yükler öncesi sabit, hareketli ve kar yükleri gibi durumlarda yapıdaki yer değiştirme ve gerilme durumunun belirlenmesi için gerçekleştirilmektedir. Yapıya, yerçekimi ivmesi uygulanarak statik analiz için tanımlanacak yüklerin hesabı sağlanmaktadır ve daha sonra bu yükler yapıya etkiyen yük olarak tanımlanarak statik analiz gerçekleştirilmektedir. Genellikle yapının düşey yükler etkisinde bir sorun yaşamaması beklenmektedir. Ancak zaman içerisinde yapıda oluşan bazı hasarlar, düşey yüklerin yapı tarafından karşılanmasında zayıflıklara neden olabilmektedir. Statik analizler ile mevcut zayıflıklar ortaya çıkarılabilmekte ve yapıda risk taşıyan alanlar incelenebilmektedir.

3.4.3. Dinamik analiz

Deprem etkisi gibi etkiyen yük periyot değerinin, mevcut yapı periyodundan daha düşük olması durumunda dinamik hesap teknikleri uygulanmalıdır (Soyluk, 2010). Bu analiz tekniğinde de yapıya ait rijitlik matrisi kullanılmaktadır. Yapı sistemine etkiyen yük, dinamik bir karakteristiğe sahip ise zamana bağlı olarak kütlelerde, yer değiştirme ivmeleri ve atalet kuvvetleri oluşacaktır. Dolayısıyla, yapı sisteminin yapının hareketine neden olan dış yük ve hareketin ivmelenmesine eylemsizlik göstermesi sonucu ortaya çıkan atalet kuvvetleri olmak üzere iki farklı yük etkisi altında olduğu söylenebilir. Yapı üzerinde ortaya çıkan iç kuvvetlerin hesaplanabilmesi amacıyla atalet kuvvetlerinin de tespit edilmesi gerekmektedir (Kumbasar ve Celep, 1996).

3.4.4. Eşdeğer deprem yükü yöntemiyle analiz

Eşdeğer deprem yükü, TBDY'de her bina için uygun görülmemiştir. Deprem tasarım sınıfı (DTS) 1-2a arasındaki tüm binalar için yükseklik sınıfına 5'e eşit veya büyük olanlar, DTS 3-4a arasında olan tüm binalar için yükseklik sınıfı 6'ya eşit veya büyük olanlar için uygulanabilirdir. Bu yöntemde, toplam eşdeğer deprem yükü yapının ağırlığı, süneklik özellikleri, zemin durumu ve yer aldığı deprem kuşağı değerlendirilerek hesaplanmaktadır. Ortaya çıkarılan bu yük, yapıya etkiyebilecek depremler için birbirine dik X ve Y yönlerinde ayrı ayrı tanımlanmalıdır. Analiz sürecinde, kat ağırlıklarının kat seviyesinde toplandığı ve

yüklerin kat seviyesinde uygulandığı kabul edilmektedir. Bu yarı dinamik yöntemin hesabında, yapıya ait birinci doğal titreşim periyodu kullanılmaktadır (Tetik, 2015).

3.4.5. Mod birleştirme yöntemiyle analiz

Mod birleştirme yöntemiyle analiz sürecinde ele alınan bir deprem doğrultusunda deprem spektrumu kullanılarak her bir titreşim modundaki davranış büyüklüklerinin maksimum değerleri, modal hesaplama yöntemi ile bulunmaktadır (TBDY, 2018). Dinamik bir analiz yaklaşımı olan mod birleştirme, yapı kütlesinin düğüm noktalarında toplandığını varsaymaktadır. Birinci modların yanı sıra yüksek diğer modların etkisinin de kabul edilmesiyle bulunan kütle katılım oranları istatiksel şekilde birleştirilmektedir. Bu şekilde yapıda ortaya çıkan maksimum iç kuvvetler ve deformasyonlar belirlenebilmektedir.

3.4.6. Tek modlu itme yöntemleriyle analiz

Tek modlu itme yöntemiyle analiz, mod birleştirme yönteminin tek modlu uygulamasının doğrusal olmayan artımsal karşılığıdır (TBDY, 2018). Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi adıyla da bilinmekte olan bu yöntem aracılığıyla yapı elemanlarındaki iç kuvvetlerin artan yükler doğrultusunda yeniden dağılımı göz önünde bulundurularak zamana bağlı gerçeğe daha yakın sonuçlar alınabilmektedir.

3.4.7. Çok modlu itme yöntemleriyle analiz

Çok modlu itme yöntemlerinin çözümünde, modal kuvvetler yapıya birbirlerinden bağımsız olacak şekilde etki ettirilmektedir ve statik itme (push-over) analizi yapılmaktadır. Bu analiz sonucunda, değerlendirilen tüm modlar için modal performans diyagramları ve modal deformasyon şekilleri ortaya çıkarılmaktadır.

3.4.8. Zaman tanım alanında analiz

Zaman tanım alanında analiz, yapı sisteminin bulunduğu yer ve bölgeye de bağlı olarak gerçekleşen bir deprem kaydına dayalı uygulanmaktadır. Bu analiz yönteminde yapıya, deprem etkisiyle ortaya çıkan zemin hareketi ve ivmeler, hareketin oluştuğu süre zarfında yaşatılmaktadır. Doğrusal veya doğrusal olmayan hesaplar için zaman tanım analizi

kullanılabilmektedir. Ayrıca, gerçekleştirilen ayrıntılı incelemeler veya çözümlerde ulaşılan bulguların yorumlanmasında da bu analiz türünden faydalanılabilmektedir.

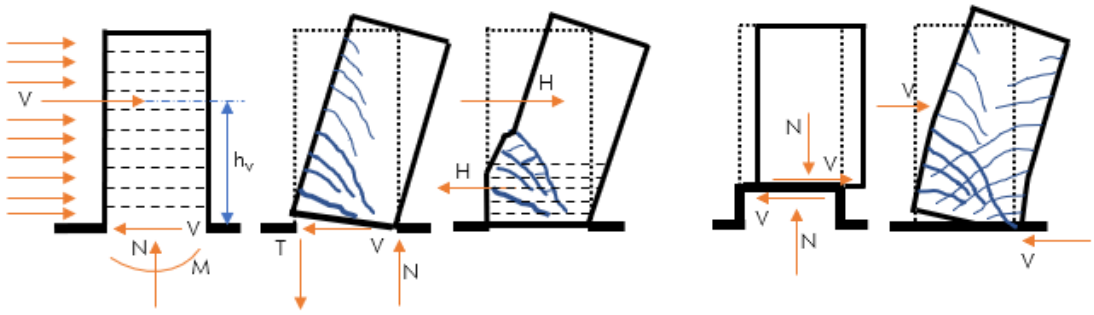
3.5. Yığma Yapı Elemanlarının Mekanik Özellikleri

Yığma yapıların mekanik özelliklerine etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Yığma yapım teknikleri ve malzeme özellikleri, gelişen teknolojik sistemler ile ortaya çıkan betonarme ve çelik gibi yeni yapı malzemelerinin özelliklerinden oldukça farklıdır ve karmaşık özellikleri barındırmaktadır. Yığma yapıların mekanik özellikleri, taşıyıcı duvarlarının yapımında kullanılan taş, tuğla, harç vb. malzemelerin mekanik ve duvar örgü sistemi gibi özelliklere bağlı olmaktadır. Taş kullanılarak örülmüş bir yığma yapı sisteminin mekanik özellikleri kullanılan taşın mekanik özelliklerine, tuğla kullanılarak örülmüş bir yığma yapı sisteminin mekanik özellikleri kullanılan pişmiş toprağın mekanik özelliklerine, ahşap kullanılarak örülmüş bir yığma yapı sisteminin mekanik özellikleri kullanılan ağaç cinsinin mekanik özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca bu elemanların birleşiminde kullanılan detay çözümler de yığma yapının mekanik özelliklerine etki etmektedir. Bağlayıcı olarak harçların kullanıldığı yapılarda, harcı oluşturan bileşenler yapının mekanik özelliklerine etkilemektedir. Harcı oluşturan bileşenlerin oranı ise tamamen duvar ustasının deneyimlerine bağlı olmaktadır (Özbudak, 2006: 8). Kırsal bölgelerde harç yerine çamur kullanılmaktadır. Çamurun zamanla bağlayıcı özelliğini kaybetmesi, yığma yapının mekanik özelliğine ve mukavemetine de tesir etmektedir (Üstündağ, 2000). Ahşabın yoğun olarak kullanıldığı bölgelerde her ağaç türünün farklı yoğunlukta olması nedeniyle kullanılan ahşap malzemeler; fiziksel, mekanik, kimyasal ve teknolojik farklılıklar sergilemesi ve bozulmaya karşı fazla direnç gösterememesi gibi olumsuz özelikler barındırmaktadır. Bu durum ahşabın kullanıldığı yığma yapıların mekanik özelliklerine etki etmektedir (Çalışkan, Meriç ve Yüncüler, 2019).

Yığma yapı sistemlerinde kullanılan malzemenin basınç mukavemeti yüksek, bağlayıcı elemanı ile aderansının iyi olması gerekmektedir. Özellikle donatısız yığma duvarlarda, malzemenin diziliş şekli ve duvar elemanının bağlayıcı ile olan aderansına bağlı olarak yatay ve düşey yüklere karşı bir bütün olarak davranış sergilemektedirler (Akgündüz, 2004).

Bir nesneye uygulanan kuvvet etkisi sonucu oluşan şekil değiştirmeye karşı gösterilen fiziksel direnç, rijitlik olarak adlandırılmaktadır. Yapısal sistemin ötelenmeye, eğilmeye,

burulmaya karşı dayanıklı olması, yapının rijitliğine bağlı olmaktadır. Yığma yapılar ağır ve rijit yapılardır. Az katlı ve donatı kullanılmadan inşa edilen yığma yapıların, titreşim periyotları da küçük olacağından deprem etkilerine karşı rijit davranış göstermektedirler (Özbudak, 2006: 9). Yapılardaki kat sayısı arttıkça periyot değerleri de artacağı için riitlik özelliklerinde de artış görülmekte ve yük karşısında zemin ile aynı hareketi yapmaktadırlar (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Rijit yapılarda yanal yükler sonucu oluşabilecek hasarlar (Paulay ve Priestley, 1992'den düzenlenmiştir.)

Yığma yapılarda, taşıyıcı duvarların üst bölümlerinden aktarılan yüklerin alt katlarda yer alan taşıyıcı elemanlara iletilebilmesi amacıyla katlar arasında bulunan döşemelerin de yatay yükler etkisine yeterli rijitliği göstermesi gerekmektedir. Bu sayede yapıya etkiyen yatay yükler, döşemeler aracılığıyla rijitlikleri oranında duvarlara dağıtılabilmektedir. Duvarın boyutları, kullanılan yapı malzeme özelliği, duvarlarda kullanılan bağlayıcılar gibi özellikler yığma yağının rijitliğini etkilemektedir (Çamlıbel, 1999).

Bir malzemenin, yapı elemanının, yapı bileşeninin veya yapının tamamının maruz kaldığı bir yük sonrasında ciddi bir dayanım kaybı yaşamadan plastik şekil değiştirme yapabilmesine süneklik denilmektedir. Süneklik, yığma yapının sahip olduğu mekanik özellikler ile ilişkilendirilmektedir (Bayülke, 1995). Yığma yapılarda, bütün yükler yığma beden duvarları ve yapıda varsa ayaklar tarafından karşılanmaktadır. Dolayısıyla duvarların tamamen taşıyıcı olacak şekilde inşa edilmiş olması, sistemi oldukça rijit duruma getirmektedir. Bunun sonucunda da yığma yapılar deprem gibi herhangi bir yatay yük sırasında sünek davranamazlar ve yeterli yer değişliği gerçekleştiremeden hasar alma ihtimalleri yüksektir (Uzun, 2017; Erçolak, 2020).

Sünekliğin tersi ise kırılganlıktır. Diğer bir ifadeyle gevreklik durumunda, belli bir yük karşısında elastik davranan yapı, yük ortadan kalkmadıkça zamanla çatlamaya ve kalıcı deformasyonlar yapmaya başlamaktadır. Yapının çatlama sonrası kopma noktasına kadar yaptığı deformasyon miktarı, yapının kırılgan veya sünek bir durumda olduğunu göstermektedir. Yapıların sahip olduğu süneklik, deprem karşısındaki performansını etkileyen en önemli faktördür (Batur, 1999). Geleneksel yığma sistemli yapılar genellikle yığma duvarlardan oluşturulmuştur ve bu duvarları meydana getiren taş, tuğla, kerpiç, harç vb. malzemelerin sünekliği hemen hemen sıfırdır ve sünek davranış sergilemezler. Dolayısıyla bu malzemelerden oluşan yığma yapılar da sünek davranış gösteremezler. Sünek davranamayan yığma yapılar, çekme ve kesme gerilmeleri etkisinde hasar alabilmekte ve zamanla strüktürel sistem yükü karşılamayacak duruma gelerek ağır hasarlara neden olabilmektedir (Yalnız, 2020).

3.5.1. Basınç dayanımı

Basınç kuvveti, malzemeyi oluşturan parçacıkların, maruz kalınan yük sonucu birbirine doğru itildiği gerilme durumudur.

Yığma yapıyı oluşturan elemanlar, bileşik malzeme olarak ele alınmaktadır. Yığma yapılarda, duvarları oluşturan malzeme ile duvar bloklarını bağlamak için kullanılan harç, yapının basınç karşısındaki sergileyeceği davranışı etkilemektedir. Yapı sistemlerinin basınç dayanımını yığma sistemin form özellikleri, malzeme dayanım özellikleri, birim elemanının su emilim kapasitesi, bağlayıcı harç karışım özellikleri, harcın boyutları, harcın şekil değiştirme kapasitesi, bölgenin iklimsel verileri, nem miktarı, gibi faktörler etkilemektedir (Avrupa Standardizasyon Komitesi - CEN, 1996).

Yapılara ait basınç dayanımının belirlenebilmesi amacıyla literatürde ve ülkelerin yönetmeliklerinde farklı yaklaşımlar yer almaktadır. Yığma sistemli bir yapıdaki elemanların dayanım özelliklerinin belirlenme sürecindeki en güvenilir yöntem, özgün duvar yüzeyinden alınan malzemenin deneysel çalışmalar gerçekleştirmektir. Bu deneyler sonucunda ortaya çıkan test sonuçları oldukça güvenilir olmaktadır. Yığma yapıdan özgün malzeme örneğinin alınamaması ve test işlemlerinin gerçekleştirilememesi gibi durumlarda, dayanım özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla yapı elemanının benzer özelliklere sahip olması konusuna dikkat edilerek deneylere bağlı denklemler gerçekleştirilebilir. Bu

denklemlerde, birim elemanın ve kullanılan harcın basınç dayanım ortalaması esas alınarak hesaplar yapılabilmektedir (Akaslan, 2019).

3.5.2. Çekme dayanımı

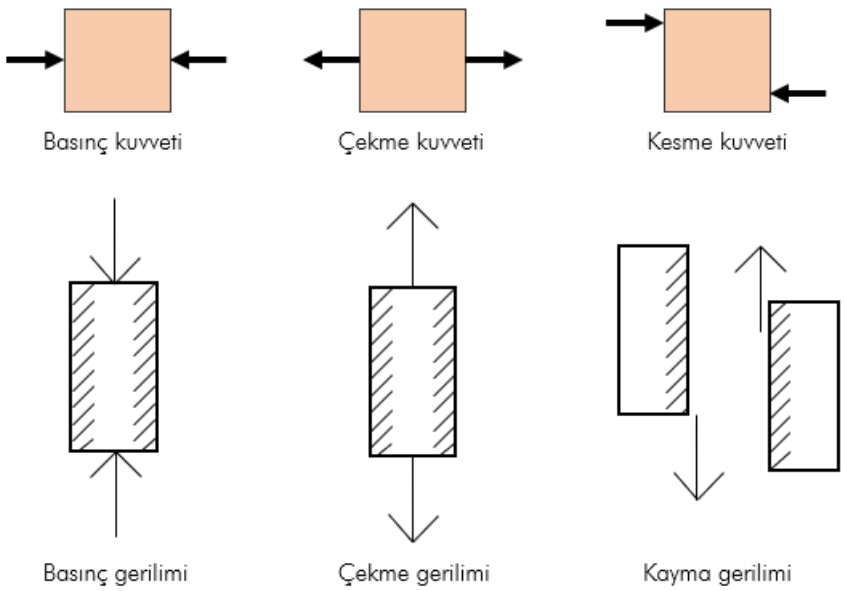
Çekme kuvveti, basınç kuvvetinin karşıtı olan ve malzeme parçacıklarının, maruz kalınan yük sonucu uzaklaşma eğiliminde olduğu durumdur.

Yığma yapıların çekme davranışı, basınca karşı gösterilen davranışa kıyasla oldukça küçüktür. Yığma yapı elemanları oldukça kırılgan bir malzeme olması nedeniyle ani çekme kırılmaları etkisinde yıkılma tehlikesi ile karşı karşıya kalmaktadır. Kubbe, tonoz, kemer ve pandantif gibi eğilime yakın yapı elemanlarında çekme gerilmeleri etkisinde riskli bölgeler oluşmakta ve yapı bu bölgelerde zorlanmaktadır. Çekme kuvveti etkisinde hasar alınan bölgeler genellikle harç aralıklarında boşalmalar ve yığma blokların birleşim noktalarındaki yüzeylerde ayrılmalar şeklinde gerçekleşmektedir (Ünay, 2002). Yığma bloklar ve harç arasındaki çatlak genişliğinin en yüksek seviyeye ulaşması sonucunda, yığma birimler birbirinden ayrılarak dayanım sıfıra düşmektedir (Akaslan, 2019).

3.5.3. Kayma dayanımı

Yığma yapı sisteminin aynı eksende fakat zıt yönlerde yüklere maruz kalması sonucunda, kayma etkisinde farklı gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin oluşmasına kayma dayanımı denilmektedir.

Kayma gerilmesi, yapı elemanında kullanılan harç ile birim eleman arasındaki birleşim şekline bağlı olmaktadır. Kayma gerilimi, yığma malzeme (tuğla, taş vb.) ile harcın sahip olduğu fiziksel ve mekanik özelliklerine göre yapıya etki etmektedir. Basınç ve çekme kırılmaları etkisindeki yığma yapılar, kayma kırılmaları etkisi sonucunda da yıkılma riski taşımaktadır (Ünay, 2002; Akaslan, 2019). Yığma yapılara etkiyen yükler ve ortaya çıkan gerilmeler aşağıdaki Şekil 3.23'te şematik halde gösterilmiştir:



Şekil 3.23. Basınç, çekme ve kesme kuvvetleri sonucunda ortaya çıkan gerilimlerin şematik gösterimi

4. YÖNTEME İLİŞKİN ANALİZLER

Çalışmanın bu bölümünde, tarihi yapıların strüktürel analizini belirlemede kullanılan sonlu elemanlar yöntemine dair analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler doğrultusunda kullanılan eleman çeşidine ve elemanın boyutlarına karar verilirken sürece entegre edilmesi amaçlanan fotogrametrik modelden alınan verilerin ağırlık merkezi durumu da ele alınmıştır. İncelenen Artuklu dönemi eserleri Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami'den alınan kesitler ile analizler gerçekleştirilmiştir.

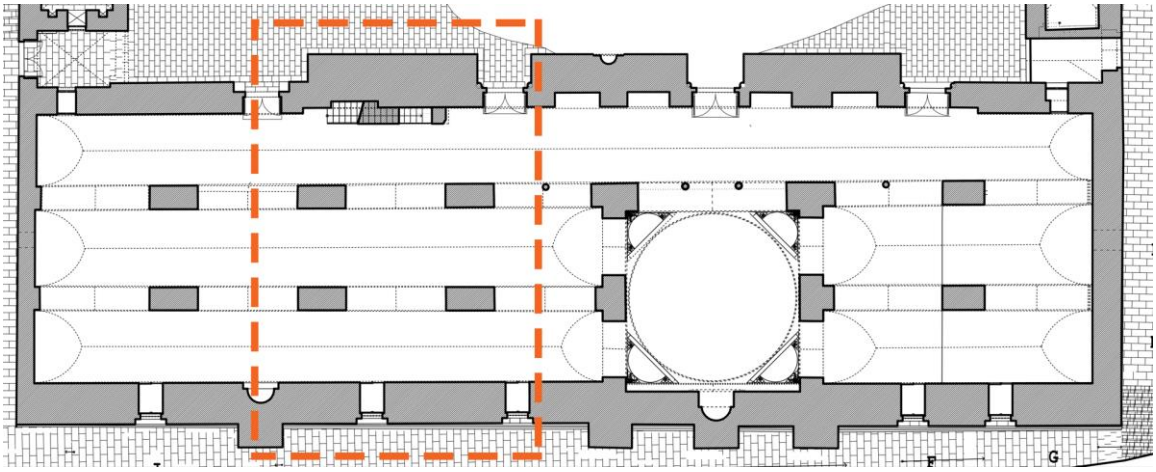
4.1. Sonlu Elemanlar Modelinde Eleman Kullanımının Analizi

Geniş kesite sahip yığma duvarların, tonozların, kemerlerin ve kubbelerin geçiş bölgelerinin analitik modellemesi dikkatli ve hassas bir süreç gerektirmektedir. Son 20 yılda sonlu elemanlar analiz yazılımlarının çeşitliliği ve sayısı artmış, sayısal analizlerin hız ve kapasiteleri oldukça gelişmiştir. Bu gelişmiş yazılım, çağdaş mimari ve mühendislik tasarım projeleri ve inşaat işleri için çok uygun modelleme sağlamaya başlamıştır. Ancak her biri kendine özgü geometrik ve yapısal özelliklere sahip olan tarihi yığma yapıların sayısal modellemesi daha fazla hassasiyet ve dikkat gerektirmektedir. Hızlı ve kolay anlaşılır bir yapısal analiz yöntemi, mimari restorasyon projelerinin hazırlanması, tarihi yığma yapıların onarım ve güçlendirmelerinin planlanması sırasında uygun kararların alınmasını sağlayabilmektedir. Tarihi binaların yapısal performansının değerlendirilmesi, yapının kayıp riskinin yanı sıra küresel veya kısmi bir çöküş durumunda kültür ve ekonomi üzerindeki potansiyel etki nedeniyle önemli bir konudur. Bu nedenle, bu tür yapıları korumak için yapıların strüktürel davranışının tespit edilmesi gerekmektedir.

Mardin Ulu Camii'nin tonozlarla bütünleşen iç kemerlerinin büyük taş yığma kolonları genel kabuk elemanlarla modellendiğinde sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Düğümlerin kabuk elemanlarının merkez ekseni üzerinde olması gerektiğinden, kesişme noktasında yapının düzensiz geometrisi nedeniyle model üzerinde eksantrikler meydana gelmektedir. Böyle bir durumda en doğru modelleme seçeneği kabuk elemanlar yerine 3 boyutlu katı elemanlar kullanmaktır. Ancak tarihi yığma yapıların yapı elemanları 3 boyutlu katı elemanlarla modellendiğinde, içeride kalan ve aktif olarak taşıyıcı olan, görülemeyen ve kesit boyutları tam olarak belirlenemeyen kısımlar hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Karmaşık geometrik

boyutlara ve şekillere sahip bağlantı bölgelerinin analitik modellemesi için, sonlu elemanlar yazılımlarının temel modelleme ve analiz ilkeleriyle çelişmemek kaydıyla, farklı eleman kullanımı basitleştirilmiş bir modelleme yaklaşımı olarak uygulanabilir.

Bu basitleştirilmiş sayısal modelleme yaklaşımı, Mardin Ulu Camii'nin tonozları, kemerleri ve kemer ayaklarını içeren yaklaşık 10,0 x 15,0 m boyutlarında bir bir iç mekânı dikkate alınarak üç farklı kısmi modelle gerçekleştirilen analizlerle test edilmiştir (Şekil 4.1).

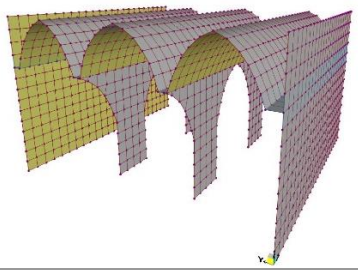
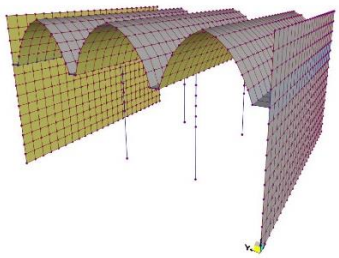
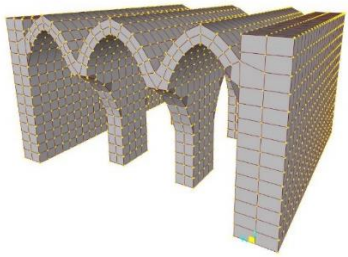


Şekil 4.1. Mardin Ulu Cami kısmi modellerinin oluşturulduğu bölüm

Birinci modelde (MGM-162) belirlenen bölümün, tonoz-kemer-kemer sütun kesişimi tamamen kabuk elemanlar ile modellenmiştir. İkinci modelde ise (MGM-164) aynı bölümde bulunan kemer ayakları farklı kesit boyutları dikkate alınarak çubuk elemanlar ile modellenmiştir. Üçüncü sayısal model (MGM-166), ilk iki model yaklaşımında elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak için katı elemanlarla modellenen yapının bir kısmını temsil etmektedir (Çizelge 4.1). Bu üç model ile yapılan analiz sonuçları yer değiştirmeler, taban kaymaları, gerilmeler ve momentler açısından karşılaştırılmıştır.

Yığma tarihi yapıların orta şiddette bir depremde bile en ağır hasarın ortaya çıkabileceği kısımlar, o yapının kemerler, tonoz, sütunlar ve geniş cepheler gibi yapısal elemanlarıdır (Akan ve Özen, 2005). Bu yapı elemanları üzerindeki sismik risklerin gerçekçi bir şekilde tahmin edilebilmesi için dinamik ve statik analizlerin uygulanması gerekmektedir.

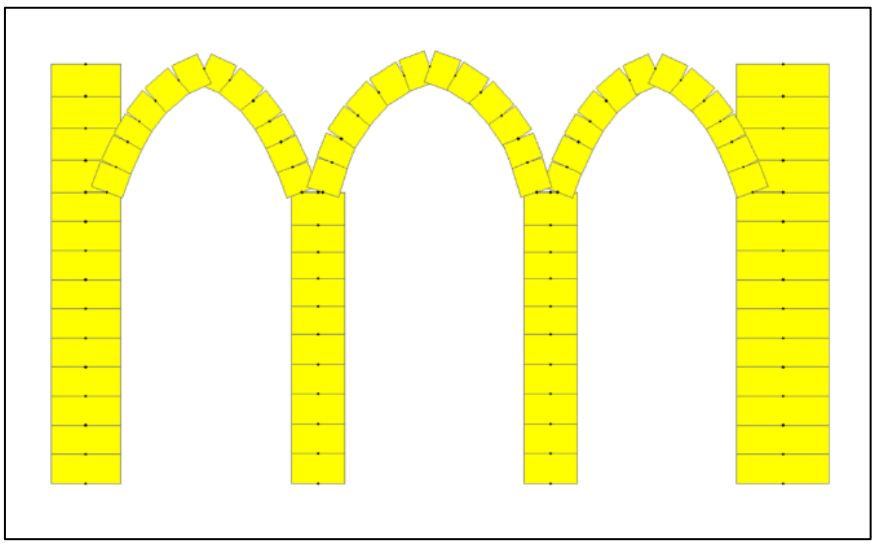
Çizelge 4.1. Farklı elemanlar ile oluşturulan üç model

MGM-162	MGM-164	MGM-166
		

4.1.1. Birinci model (MGM-162)

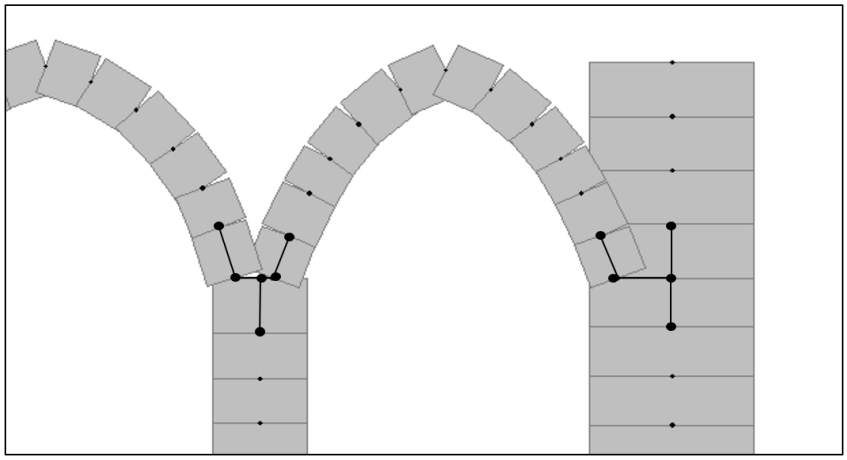
Kuzey duvarı 200 cm, güney duvarı 150 cm, kemer ve sütunlar 115 cm, tonozlar 70 cm kabuk elemanlar ile modellenmiştir.

Tonozların dış duvarlar ve kemerlerle kesişme noktalarında, tipik bir bağlantı yöntemi kullanılmıştır. Bu bağlantı, düğümlere dayalı analitik modelleme teorisine göre, kabuk elemanlarının merkezi eksenleri, yapının mevcut durumuna göre farklı bir şekilde bağlanmaktadır. Mardin Ulu Camii'ndeki gibi farklı kalınlıktaki duvarlarda veya çok kalın duvarlarda kabuk elemanlarının eksenlerine göre ağ yapıldığında Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ihmal edilemeyecek bir dışmerkezlik oluşmaktadır.



Şekil 4.2. Kabuk elemanlarının merkezi eksenlerine göre düğümlere dayanan analitik modelde ortaya çıkan eksantriklik

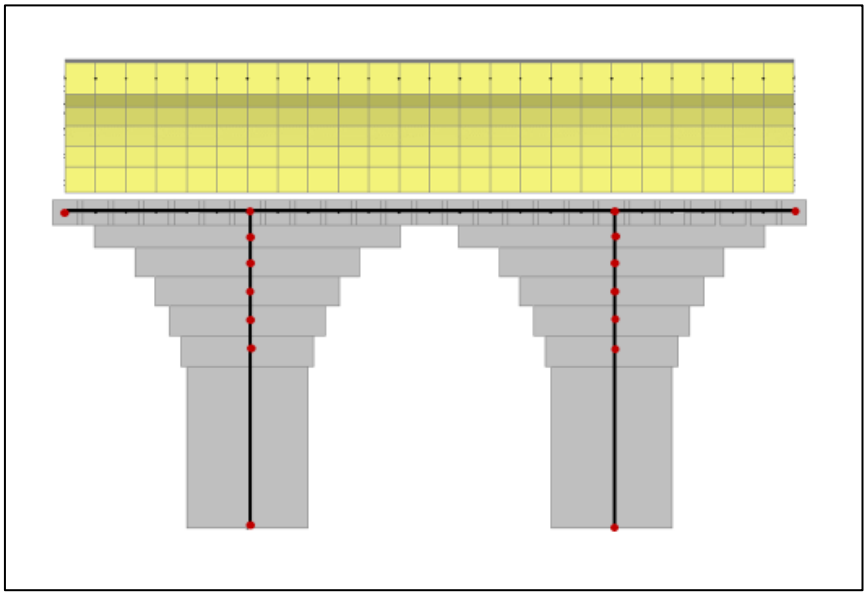
Ortaya çıkabilecek eksantriklik durumu, elde edilen sonuçların doğruluğu hakkında kritik bir soruyu gündeme getirmektedir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, bu sorunun üstesinden gelmek için makul bir çözüm uygulanabilir. 200 cm kalınlığındaki duvarın tonozla kesiştiği noktadaki kayma yüzeyinin çok rijit olduğu varsayılarak buraya malzeme özellikleri ağırlıksız ve kütlesiz olan ancak elastisite modülü çok büyük olan 1 cm kalınlığında kabuk elemanlar yerleştirilmiştir. Ancak, denklemleri çözmek için kullanılan yazılıma ve kullanılan donanımın konfigürasyonuna göre elastisite modülüne dayalı rijitliğin belirlenmesinde belirli bir matematiksel teori yoktur. Bu nedenle, bu basitleştirilmiş analiz yaklaşımında, tüm yapının modeli hazırlanmadan önce, yüksek rijitlik sağlayacak olan elastisite modülü, analiz sonuçlarının daha kolay karşılaştırılabileceği küçük bir model üzerinde test edilmelidir. Yukarıda da belirtildiği gibi rijit eleman tanımı için yazılım ve donanıma bağlı olarak "E=1.0x109"kN/m2 ("E=1.0x106 MPa) elastisite modülünün alınması belirsiz sonuçlara neden olmayacaktır. Uygulanan yöntem, çağdaş yapısal sistemlerin modellenmesinde, "LINK" elemanları gibi bazı özel unsurlar veya "rijit uç" tanımı gibi modelleme seçenekleri ile aslında birçok yapısal analiz yazılımında tanıtılmaktadır. Ancak, Mardin Ulu Camii örneğinde olduğu gibi karmaşık kesit özelliklerine sahip tarihi yapıların analitik modellemesinde bu seçenekler etkin bir şekilde kullanılmamaktadır. Basitleştirilmiş analitik modelleme yaklaşımında çubuk elemanları da kullanıldığında, malzeme özellikleri açısından daha yüksek rijitliğe sahip olarak tanımlanan çubuk elemanları, rijit kabuk elemana benzer şekilde birleşimlerde rijit bölge sağlamak için kullanılabilir. Bu kabulden hareketle 2 cm çapında dairesel çubuk elemanları birleşimdeki kabuk elemanların kenarları boyunca rijit bir ızgara oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.3. Eksantriklik probleminin üstesinden gelmek için rijit çubuk eleman kullanımı

4.1.2. İkinci model (MGM-164)

Sonlu elemanlar modelinin bütünlüğünü sağlamak için kemer bölümlerinin, taşıyıcı ayaklar ile birleştiği bazı yığma yapılarda ayakların modellenmesinde kabuk elemanların kullanılması yaygın bir uygulamadır. Bu gibi durumlarda, kabuk elemanlarla modellenen sütunlarda analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Çoğu durumda, sütunlar tonoz, pandantif, yarım kubbe ve kubbe gibi yapısal elemanlarla birleştiğinde elemanların merkez eksenlerinin çakışmaması nedeniyle analitik modellemede dışmerkezlik uyumsuzluğu ortaya çıkmaktadır. Bu gibi durumlarda çubuk elemanların kullanılması pratik bir çözüm gibi görünse de eksenlerin çakışmaması ve uygun olmayan rijit bölge tanımı gibi önemli modelleme sorunlarına neden olmaktadır. Analitik modelin karşılaştırmalı analizlerinin ikinci aşamasında, Mardin Ulu Camii'nin iç kemerleri ve kemer payeleri ve payandaları, kesit boyutlarına bağlı olarak 10 seviyede değişen çerçeve elemanları ile modellenmiştir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi, kemerler ve kemer ayakları, birinci modelde (MGM-162) uygulanan kabuk elemanları ile aynı kütle ve ağırlıkta, 115 cm kalınlığında, kalınlığa oturtulabilen çubuk elemanlarından oluşturulmuştur.



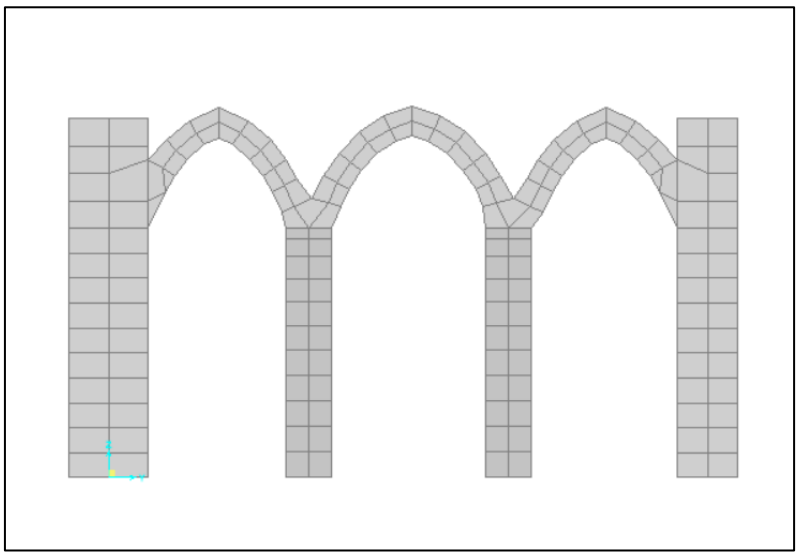
Şekil 4.4. Kemer özelliklerinin kütlesini ve rijitliğini belirlemek için değişen boyutlardaki çubuk elemanlar

Ayakları temsil eden çubuk elemanlara, kemerin şekline göre değişen boyutlarda atamalar tanımlanmıştır. Çubuk elemanlarının kemeri temsil eden kısmı ve ayakların ekseninden kemerin tepesine kadar olan bölüm, bir önceki paragrafta açıklanan "rijit ızgara-çerçeve" ve

"rijit levha" elemanları ile tonozlara entegre edilmiştir. Böylece kemer, tonoz ve payandaların birleşim yerlerindeki rijit bölge, sonlu elemanlar analiz denklemlerinin genel formülasyonuna göre tanımlanmıştır.

4.1.3. Üçüncü model (MGM-166)

Kabuk elemanları ile oluşturulan birinci analitik modelin ve kabuk elemanları + çubuk elemanları ile birleştirilen ikinci analitik modelin analiz sonuçlarını karşılaştırmak için yapının aynı kısmı için 3 boyutlu katı elemanlarla üçüncü bir analitik model oluşturulmuş ve aynı yük durumları altında analiz edilmiştir (Şekil 4.5). En gerçekçi modelle yapıldığı varsayılan bu yapısal analizin sonuçları, taban kayması, modal analiz periyotları, yer değiştirmeler ve gerilmeler açısından diğer iki modelle yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.5. Rijit bir eleman tanımına gerek duyulmayan katı eleman modeli

4.1.4. Analiz sonuçları

Bu üç modelleme yaklaşımında dikkate alınan malzeme özellikleri, mesnet koşulları ve yük durumları aşağıdaki gibidir;

- Yığma taş duvarın elastisite modülü, bilimsel literatürde benzer yapılar için yaygın olarak kabul edilen bir değer olan E=450 MPa olarak kabul edilmiştir (Altunışık, Bayraktar ve Genç, 2016: 1339; Can, vd., 2012: 681).

- Rijit elemanların malzeme özellikleri, analizlerde kararsızlık oluşmaması amacıyla kullanılan yazılım ve donanımın yeterliliğine göre çeşitli basit modellerde yapılan deneme yanılma analizleri sonucunda E= 1.0 x 106 MPa olarak kabul edilmiştir.
- Kabuk elemanların ve çubuk elemanların mesnetleri sabit mesnetler olarak tanımlanırken, 3D katı elemanların mesnetleri mafsallı mesnetler olarak tanımlanmıştır.
- Sismik analiz yapılmayacak olmakla birlikte, bu üç sayısal modelin genel geometrik şekillerini izlemek için ilk beş modu incelemek üzere modal analiz yapılmıştır.

Sırasıyla aşağıdaki yük durumları uygulanmıştır;

- İlk olarak, yerçekimi yükleri (sabit yükler) uygulanmıştır. Bu yükler, sayısal modellerde yapının ağırlığını tam olarak dikkate alacak şekilde tanımlanan kesit boyutları sonucunda yapısal elemanların kendi ağırlığının tanımlandığı dikey yönde tanımlanmıştır.
- Daha sonra, ikinci ve üçüncü yük durumları olarak, kemerler ve kemer dayanakları dışındaki tüm kabuk ve 3D katı elemanların kütlesinin %40'ı global X ve Y eksenlerinde yatay ağırlık yükleri olarak uygulanmıştır.
- MGM-164 modelinde kemer ve kemer dayanakları çubuk elemanlar ile modellendiğinden, tüm analiz yazılımlarında kabuk ve 3D katı elemanlar ile aynı koşullar altında çubuk elemanlarına yatay yerçekimi yükü olarak ağırlığın %40'ının yüklenmesi mümkün değildir. Bu elemanlar yatay yüklemeden muaf tutulmuştur.

Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi, her üç model ile yapılan analizlere göre ilk beş mod için periyotlar hemen hemen aynı hesaplanmıştır. Öte yandan, x ve y yönlerindeki düşey yük ve yatay yükler sonucunda, her üç modelde de taban kesme kuvveti ve rastgele seçilen noktalardaki yer değiştirmeler aynı hesaplanmıştır. 3 boyutlu katı elemanlarla modellenen MGM-166 modelindeki yer değiştirmeler diğer iki modelin sonuçlarına göre bazı noktalarda %10 - %20 farklılık göstermesine rağmen bu durumun tamamen farklı bir modelleme özelliği olan 3D katı elemanlarla oluşturulan sayısal modelde malzemenin özelliklerinden kaynaklandığı söylenebilir. MGM-162 ve MGM-164 modellerinde gerilmeler eşit değerlerde hesaplanırken katı elemanlarla hazırlanan modelde kullanılan eleman tipine bağlı olarak bazı küçük farklılıklar görülmüştür. Bu farklılık daha çok tonozlarla duvarların kesiştiği noktada ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.2. Üç modelin yapısal analizinin sonuçlarının özeti

Analiz Türü	Sonuç	Birim	Birinci Model MGM-162	İkinci Model MGM-164	Üçüncü Model MGM-166
İlk beş doğal frekans için modal analiz	T1	saniye	0.7601	0.7617	0.7112
	T2	saniye	0.4618	0.4623	0.3601
	T3	saniye	0.3349	0.3396	0.3506
	T4	saniye	0.2738	0.2757	0.2492
	T5	saniye	0.2408	0.2416	0.2150
Kesme Kuvveti (Base shear)	DEAD LOAD	kN	18289.90	18299.61	17904.91
	Fx (HRZTL-X)	kN	-6437.05	-6437.05	-6283.05
	Fy (HRZTL-Y)	kN	-6437.05	-6437.05	-6283.05
Yer Değiştirmeler (Tonozun tepe noktası)	Δx	mm	8.61	8.92	5.93
	Δy	mm	59.77	59.69	51.63
	Δz	mm	-6.91	-7.02	-7.03
Gerilmeler (Tonozun tepe noktası)	DL S22	kN/m^2	-95.65	-95.29	-34
	DL S11	kN/m^2	-2.53	-2.53	-1.58
	HRZTL-X S22	kN/m^2	-35.05	35.67	15.82
	HRZTL-X S11	kN/m^2	0.86	0.84	0.21
	HRZTL-Y S22	kN/m^2	-442.84	-446.67	-382.24
	HRZTL-Y S11	kN/m^2	-20.52	-20.31	-13.33

4.1.5. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

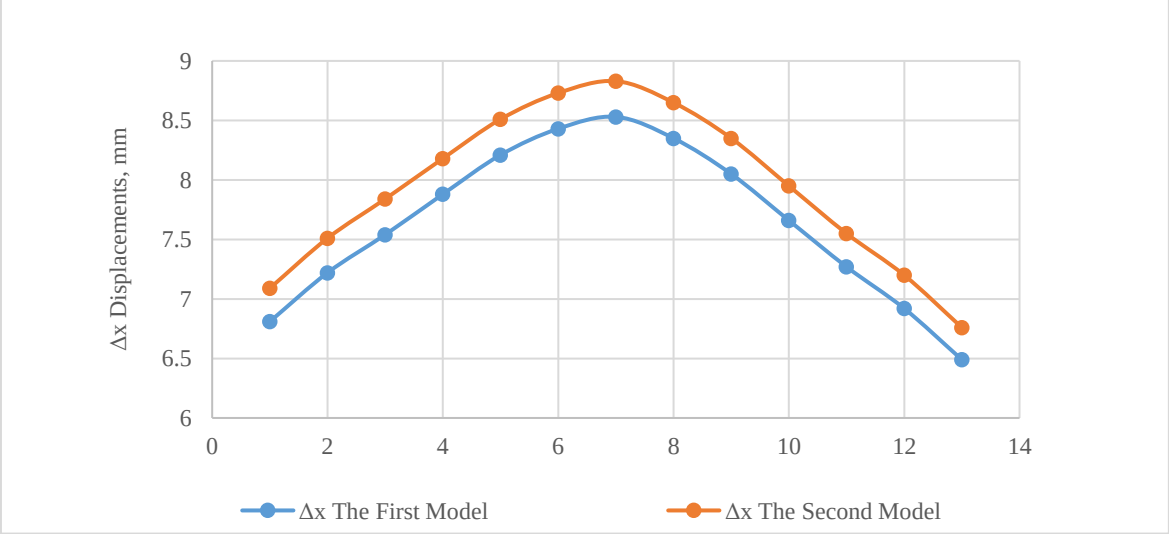
Bu karşılaştırmalı analizler ve analiz sonuçlarının yorumlanmasında, nispeten daha pratik olan çubuk elemanlarında, genel kabuk elemanlar ile modellendiğinde bazı belirsizliklere yol açan mekansal bölümlerde (kemer üzengi noktası) sorunsuz kullanılabileceği belirlenmiştir. Tarihi yığma binalar genellikle benzersiz yapısal özelliklere sahiptir. Bu nedenle, her yapı bireysel çalışmayı gerektirmektedir.

Mardin Ulu Camii örneğinde, taş duvarlar ve kemer dayanaklarında kesme gerilmeleri ve kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi önem arz ederken; tonozlardaki yer değiştirmelerin ve gerilmelerin yapısal değerlendirmesi daha büyük önem taşımaktadır. Kolonlar ve ince sütunlar gibi yapısal elemanların genel kabuk elemanlarla veya 3D katı elemanlarla modellenmesi, genellikle analitik modelde bir uyumluluk sorununa neden olur. Bu nedenle, tarihi yığma binaların analitik modellemesi için önerilen, çubuk elemanların kabuk elemanlarla birlikte kullanımını içeren bu basitleştirilmiş analiz yaklaşımı, Mardin Ulu Camii'nin kısmi sayısal modeli ile gerçekleştirilen yapısal analizde güvenilir sonuçlar göstermiştir.

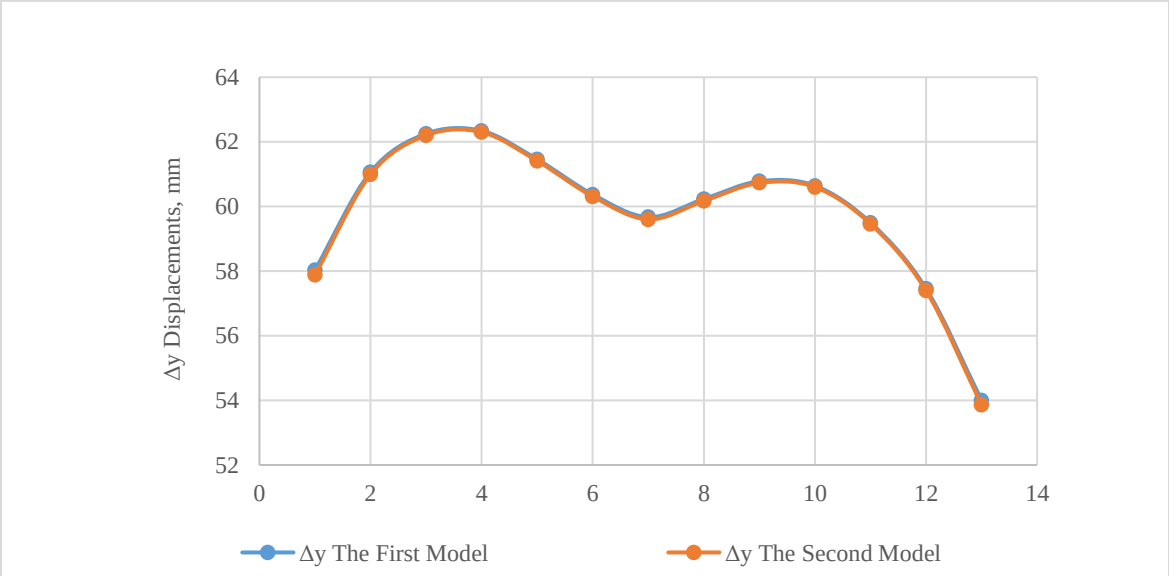
Kabuk elemanlarından (MGM-162) oluşan sayısal modelin analiz sonuçları ile kemer mesnet noktasının ve ayaklarının çerçeve elemanları ile modellendiği analiz sonuçları (MGM-164), tonozların ve kemer dayanaklarının birleştiği seçilen noktalarda karşılaştırılmıştır. Bu iki sayısal modelleme yaklaşımı ile yapılan yapısal analiz sonucunda yer değiştirmeler ve gerilmeler açısından hemen hemen karşılık gelen noktalarda aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de, dikey yük analizi sonucunda tonoz eğrisi boyunca global Z ekseni yönünde, yatay yük analizi sonucunda global X ve global Y eksenleri yönünde yer değiştirmelerin değişimi sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Dikey yükler nedeniyle Δz yer değiştirmelerinin tonoz eğrisi üzerindeki değişimi

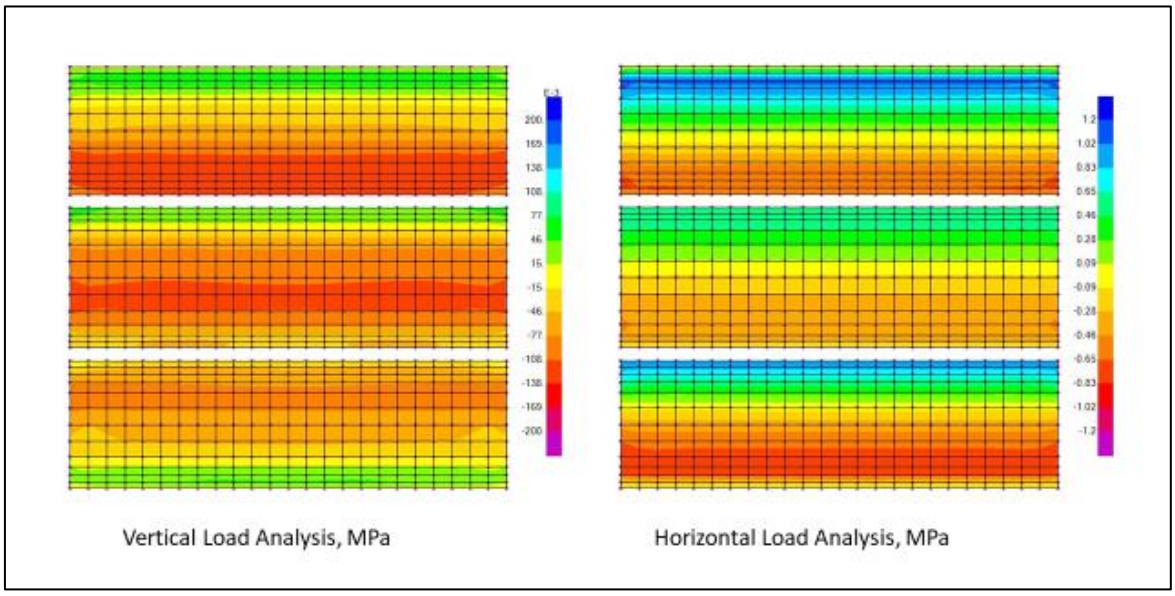


Şekil 4.7. Global X ekseni yönündeki yatay yükler nedeniyle Δx yer değiştirmelerinin tonoz eğrisi üzerindeki değişimi

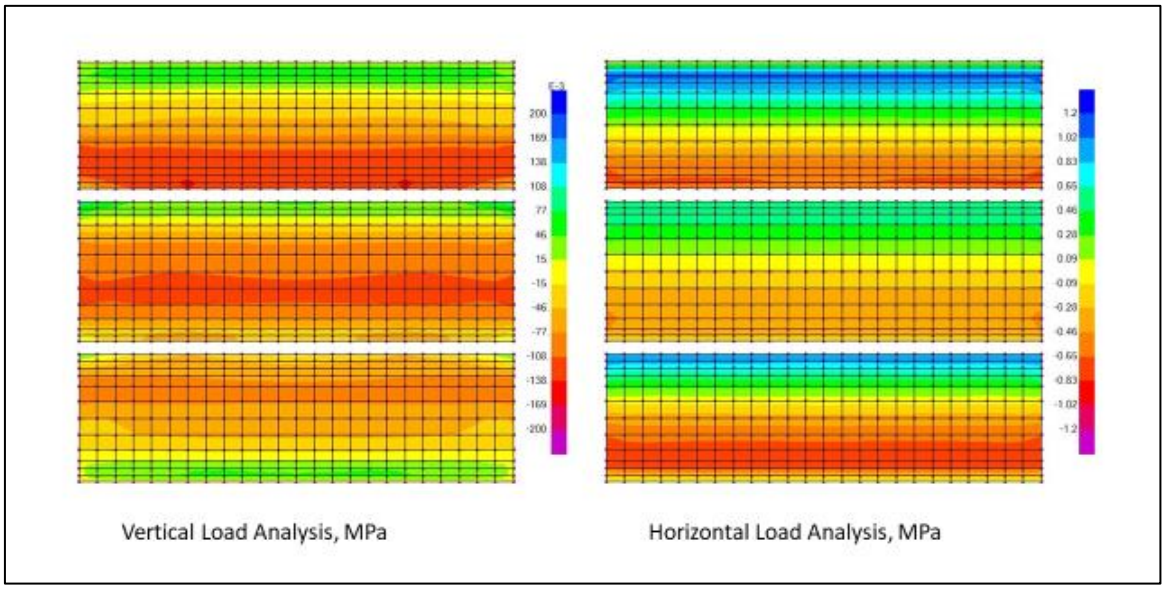


Şekil 4.8. Global Y ekseni yönündeki yatay yükler nedeniyle Δx yer değiştirmelerinin tonoz eğrisi üzerindeki değişimi

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, tonozun geometrisine bağlı olarak nispeten kavranması ve değerlendirilmesi basit olduğundan, tonozların en dış yüzeyindeki dikey ve yatay yüklerde hesaplanan gerilmeler karşılaştırılmıştır.

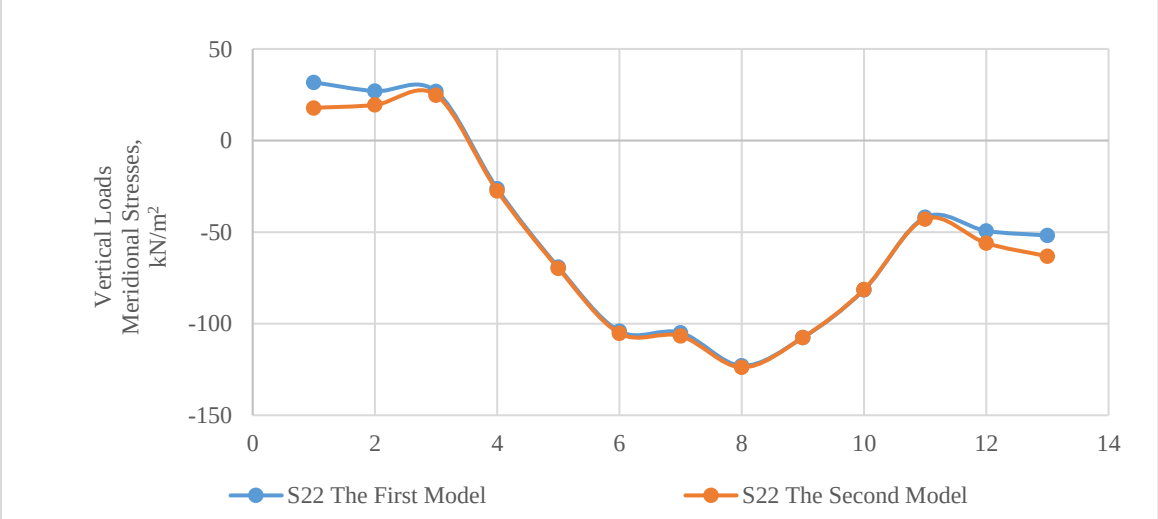


Şekil 4.9. Birinci Modelde (MGM-162) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların gerilme değişimi

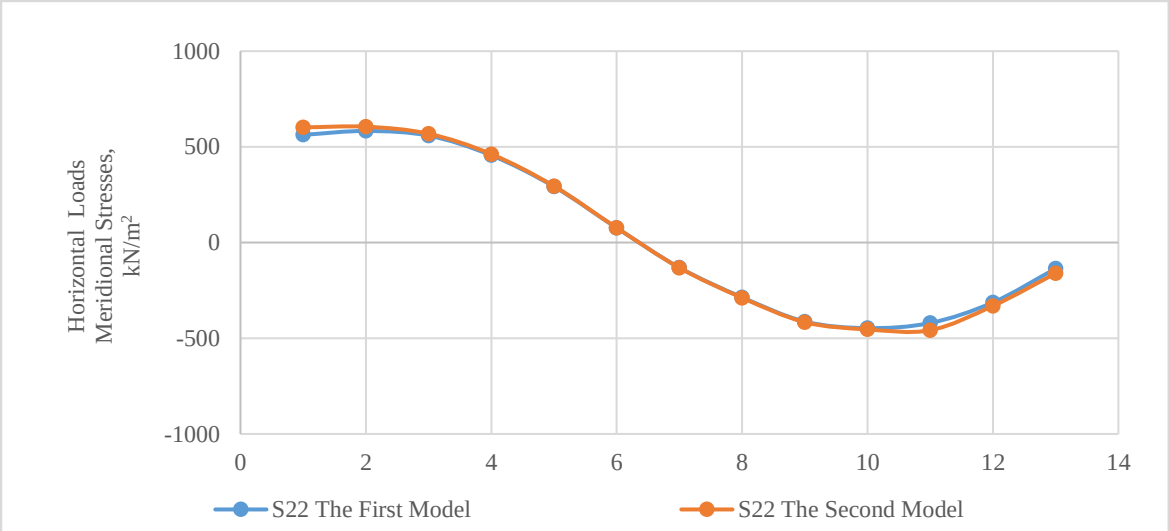


Şekil 4.10. İkinci Modelde (MGM-164) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların gerilme değişimi

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'deki grafikler, seçilen noktalarda aşağı yukarı aynı gerilme değerlerinin hesaplandığını göstermektedir. Bu karşılaştırmalı analizlerin sonuçlarıyla tutarlı olarak, karmaşık geometriye ve orantısız eleman kesitlerine sahip tarihi yığma binalarda kullanılmasının daha uygun olduğu rijit bağlayıcılar uygun şekilde tanımlanarak daha güvenilir hesaplamalar yapılabilir.



Şekil 4.11. Birinci Modelde (MGM-162) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların meridyen yönündeki gerilme değişimi



Şekil 4.12. İkinci Modelde (MGM-162) dikey ve yatay yüklemelere bağlı olarak tonozların meridyen yönündeki gerilme değişimi

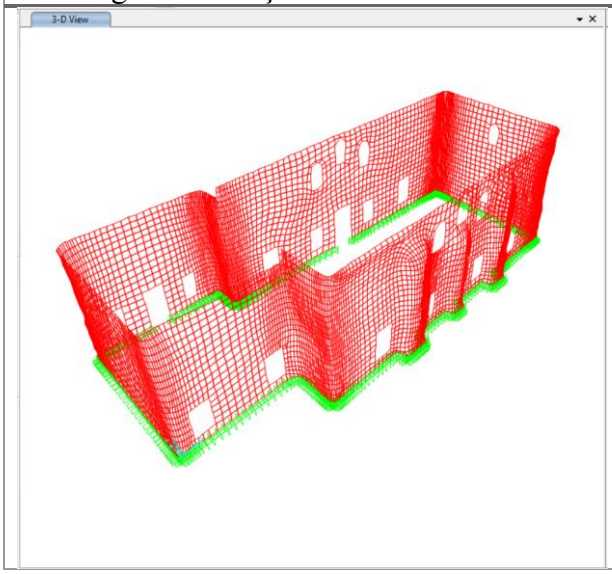
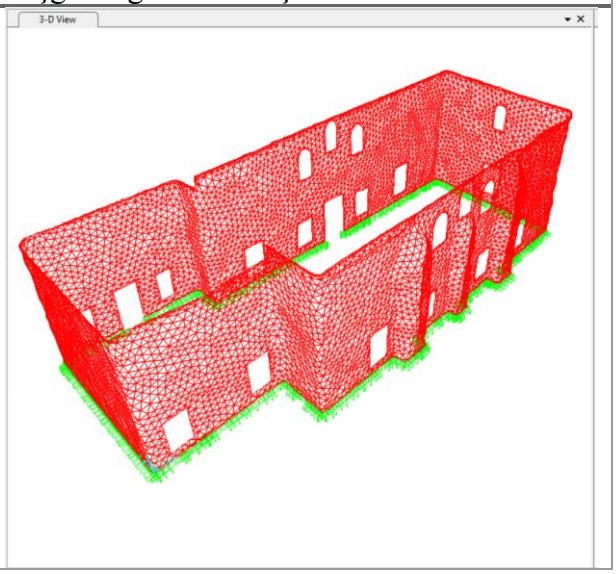
Son yıllarda tarihi yapı ve anıtların sayısal yöntemlerle yapısal analizlerinde yaşanan gelişmeler, bazı özel durumlarda talebin asıl amacından uzaklaşmasına neden olmaktadır. Kagir yapının karmaşık malzeme özelliklerine dayalı olarak sürekli gelişen analitik modelleme ve yapısal analiz yöntemleri test edilmektedir. Genellikle dış gözlem ve ölçümlerle taşıyıcı kesitlerinin tam olarak belirlenemediği yığma binalarda, yapının yüzey geometrisinin sağladığı sayısal verilerin yapısal analiz yazılımlarına senkronize aktarımı nedeniyle göz ardı edilen mütevazı hatalar çok daha fazlasına neden olabilir. Yapının görünür boyutları hakkındaki verilerin senkronize iletimi, yapının genel geometrisi hakkında tam güvence sağlamaktadır. Yapısal analiz sürecinde elemanlar üzerinden gerçekleştirilen analizler, doğru tanımlamaların yapılması durumunda her üç eleman tipi için de doğru sonuçlara ulaşılabileceğini göstermiştir. Sonuç olarak, her üç elemanın da modelleme sürecinde kullanılabileceği tespit edilse de pratik ve uygulanabilir olanın seçilmesi gerekmektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen modellerde de sürecin daha etkin ve verimli kullanılmasını sağlayacak olan kabuk elemanlar ile modeller oluşturulmuştur.

4.2. Sonlu Elemanlar Modelinde Eleman Boyutlarının Analizi

Günümüzde gerçekleştirilen yapısal davranış analizi çalışmalarında genellikle dörtgen elemanlar kullanılmaktadır. Elemanlar arasındaki fark serbestlik derecelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bölümde üçgen (triangle) ve dörtgen (quadrilateral) elemanların analiz sonuçlarında bir fark oluşturup oluşturmadığı ele alınmıştır.

Mardin Melik Mahmut Cami örneğinden üçgen ve dörtgen shell (kabuk) elemanlarla modeller hazırlanmıştır (Çizelge 4.3). Model hazırlanma sürecinde, fotogrametrik modelleme tekniği kullanılmıştır. Yalnızca taşıyıcı beden duvarlarının modellendiği cami örneğinde tonoz, kubbe, kemer gibi taşıyıcı elemanlar shell elemanların boyutlarının analizi amaçlanan bölümde sürecin hızlandırılması adına modellenmemiştir.

Çizelge 4.3. Melik Mahmut Cami – Kare ve üçgen ağ modelleri

Kare Ağlardan Oluşan Model	Üçgen Ağlardan Oluşan Model
	

4.2.1. Analiz sonuçları

Her iki modelleme yaklaşımında dikkate alınan malzeme özellikleri, mesnet koşulları ve yük durumları aşağıdaki gibidir;

- Yığma taş duvarın elastisite modülü, bilimsel literatürde benzer yapılar için yaygın olarak kabul edilen bir değer olan E=450 MPa olarak kabul edilmiştir (Altunışık vd., 2016: 1339; Can, vd., 2012: 681).
- Mesnetler, ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Sayısal modellerin genel geometrik davranışlarını belirlemek amacıyla ilk beş modu incelemek üzere modal analiz yapılmıştır.
- Kare ağlardan oluşan model 7820 shell eleman, üçgen ağlardan model 14339 shell eleman kullanılmıştır.

Sırasıyla aşağıdaki yük durumları uygulanmıştır;

- İlk olarak, yerçekimi yükleri (sabit yükler) uygulanmıştır. Bu yükler, sayısal modellerde yapının ağırlığını tam olarak dikkate alacak şekilde tanımlanan kesit boyutları sonucunda yapısal elemanların kendi ağırlığının tanımlandığı dikey yönde tanımlanmıştır.
- Daha sonra, ikinci ve üçüncü yük durumları olarak, elemanların kütlesinin %40'ı global X ve Y eksenlerinde yatay ağırlık yükleri olarak uygulanmıştır.

Mardin Melik Mahmut Camisinin üçgen ve dörtgen shell elemanlarla hazırlanan sayısal modelleriyle gerçekleştirilen strüktürel analizlerin karşılaştırılması sonucunda, her iki analizin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır. Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi;

- Modal analizin ilk 5 periyodu hemen hemen aynıdır.
- Taban kesme kuvvetleri x, y ve x eksenleri doğrultusunda aynıdır.
- Rastgele seçilen üç noktada DL (düşey yük), HRZ-X ve HRZ-Y (yatay yükler) analizleri sonucunda x, y ve z yönlerindeki deplasmanlar aynıdır.

Çizelge 4.4. Modellerin yapısal analizinin sonuçlarının özeti

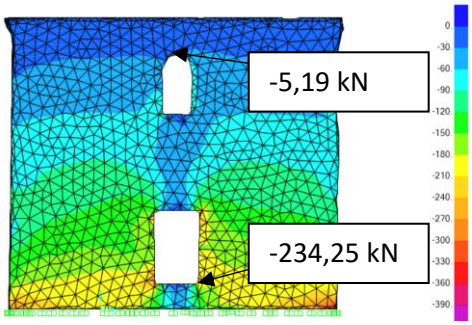
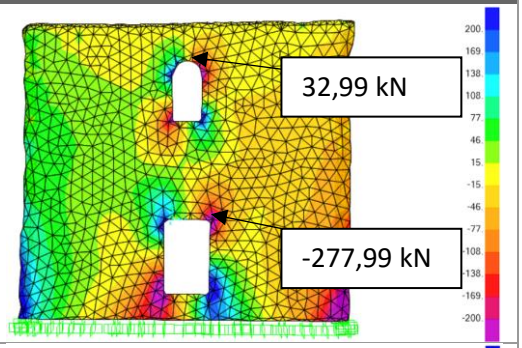
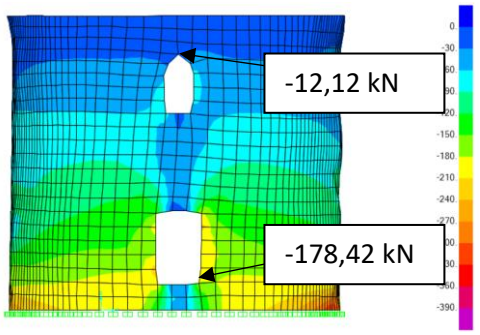
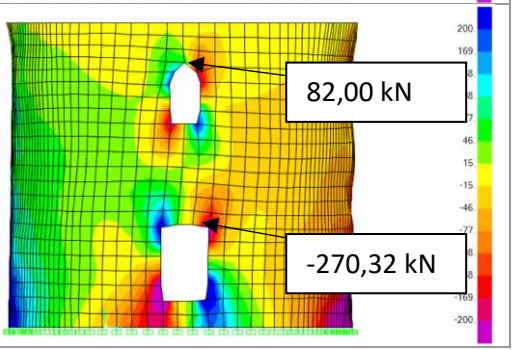
Analiz sonucu tipi	Sonuç	Birim	MMM-TRI	MMM-QUAD
Modal analiz ilk 5 periyot	T1	saniye	0.35642	0.344376
	T2	saniye	0.33161	0.325836
	T3	saniye	0.25161	0.241637
	T4	saniye	0.24466	0.233151
	T5	saniye	0.21314	0.204521
Taban kesme kuvveti	DEAD LOAD	kN	17660.504	17421.903
	Fx (HRZTL-X)	kN	-7064.202	-6968.761
	Fy (HRZTL-Y)	kN	-7064.202	-6968.761
Kuzey-batı köşesinde duvarların üst noktasında deplasman	Δx	mm	4.1	3.86
	Δy	mm	4.22	4.29
	Δz	mm	-1.32	-1.31
Giriş kapısı sol üst noktadaki deplasman	Δx	mm	2.4	2.4
	Δy	mm	5.6	5.3
	Δz	mm	1.29	1.05
Doğu duvarı kemerli pencere üst noktasındaki deplasman	Δx	mm	6.68	6.43
	Δy	mm	5.29	5.23
	Δz	mm	-1.61	1.06

4.2.2. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Hesaplanan gerilmelerin karşılaştırılması amacıyla doğu duvarı seçilmiştir. Doğu duvarının seçilme nedeni, daha tanımlanabilir bir geometriye sahip olması nedeniyle eleman boyutlarının karşılaştırılmasının amaçlandığı bölümde sonuçların daha net görülebilecek olmasıdır. Çizelge 4.5'te gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Doğu duvarındaki Smin

(Basınç gerilmesi aralığı: -390 – 0 kN/m2) gerilme şekli her iki analiz için de hemen hemen aynıdır. Daha belirgin ve yorumunun daha kolay olacağı düşünülen gerilme dağılımının gözlenmesi amacıyla Y yönündeki yatay yük analizi S22 gerilmeleri (Gerilme değerleri aralığı: -200 +200 kN/m2) karşılaştırıldığında, tekrar aynı gerilmeler elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Üçgen ve dörtgen ağ modellerinde oluşan gerilmelerin doğu duvarı üzerinden karşılaştırılması

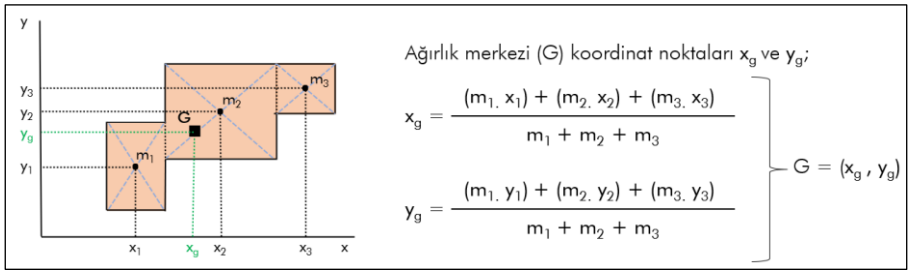
Model Türü	Sabit yük sonrası S_{min} gerilmeleri	HRZ-Y yatay yük sonrası S22 gerilmeleri
MMM-TRI		
MMM-QUAD		

Sonuç olarak Mardin Melik Mahmut Camisin geometrik boyutları ve özelliklerine benzer tarihi yığma yapıların SAP2000 yazılımı ile gerçekleştirilen hesaplarında, sayısal modelin üçgen veya dörtgen genel shell elemanlarıyla hazırlanan modelleriyle yapılacak sonlu elemanlar hesaplarının sonuçlarında belirgin bir fark olmayacağı düşünülmektedir. Modellemenin gerektirdiği diğer zorlular dikkate alındığında, SAP2000 yazılımında her ne kadar dörtgen elemanların kullanılması önerilmiş olsa da zorunlu hallerde üçgen elemanların kullanılabileceği uygun olabilecektir.

4.3. Sonlu Elemanlar Modelinde Ağırlık Merkezi

Bir nesneyi oluşturan küçük parçacıkları etkileyen yer çekimi kuvvetlerinin bileşkesinin, nesne üzerindeki uygulama noktasına ağırlık merkezi denilmektedir (İdemen, 2003).

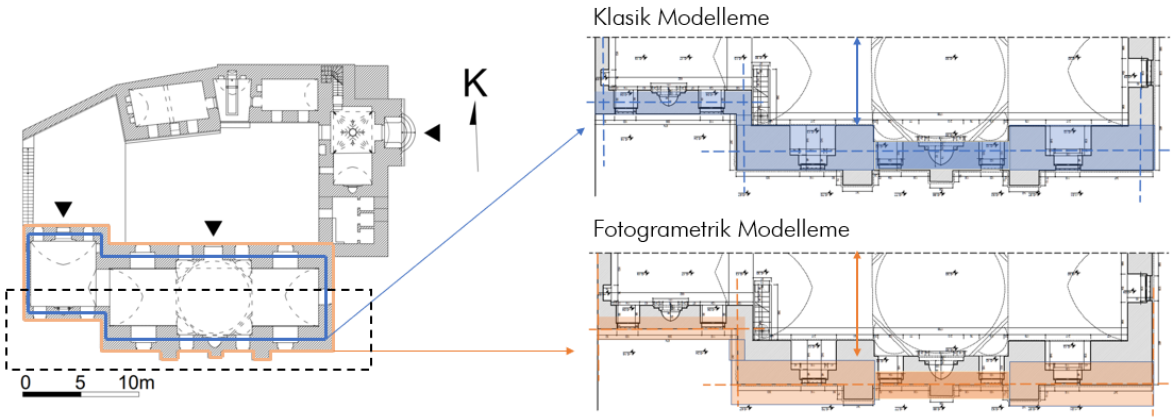
Düzgün geometrik şekillerde ağırlık merkezi kolayca tespit edilebilmektedir. Fakat daha karmaşık ve düzgün şekillere sahip olmayan cisimler için bazı hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalarda temel hedef, geometrik şeklin referans alınan yatay ve düşey doğrultuya göre ağırlık merkezinin belirlenmesidir (Dündar ve Tokgöz, 2006). Dikdörtgen formu incelendiğinde, ağırlık merkezinin tespitinde hesaplamaya gerek duyulmamaktadır. Bunun nedeni yatay ve dikey kenarlarının orta noktasının kesişimi ile ağırlık merkezinin bulunmasıdır. Aynı şekilde kare ve üçgen gibi tanımlı şekillerde benzer kısayollar uygulanabilmektedir. Fakat düzgün olmayan geometrik şekiller için Şekil 4.13'te yer alan çözümlemelere göre ağırlık merkezinin koordinat noktaları bulunabilmektedir. Karmaşık geometrik şekiller öncelikle daha tanımlı şekil parçalarına bölünmektedir. Beraberinde şekillerin boyutlarına göre kütleleri temsil eden m değeri bulunarak, kütlelerin koordinat noktalarından yola çıkılmaktadır.



Şekil 4.13. Farklı geometrilerin ağırlık merkezini koordinatlarının kütle ve koordinat noktalarına göre hesaplanması

Yatay yük altındaki bir yapının herhangi bir katında bulunan kolon, perde vb. gibi düşey taşıyıcıların eğilme dayanımlarının ağırlık merkezi ise rijitlik merkezi anlamına gelmektedir (Hasgür ve Gündüz, 1996). Hesaplandığı katın öteleme gerçekleştirmeden çevresinde döneceği nokta rijitlik merkezidir. Bu merkez, aynı zamanda düşey yapı elemanların ataletinin ağırlık merkezi şeklinde de ifade edilmektedir (Celep ve Kumbasar, 1993). Bir yapının herhangi bir kat plan düzleminden ağırlık merkezi elde edilebilirken, aynı kat planında yer alan düşey taşıyıcı elemanlarından ise rijitlik merkezi bulunmaktadır. Rijitlik merkezi, düşey taşıyıcı elemanların yatay yüklerden oluşan kesme kuvvetlerinin etkidiği noktadır. Ağırlık merkezi ise kattaki kütlelere etkiyen yerçekimi kuvvetinin bileşkesinin yer aldığı noktadır. Bu iki nokta arasındaki uzaklığa ekdışmerkezlik adı verilmektedir. Ekdışmerkezlik, deprem yüklerinde oluşan etkilere ilave momentler oluşturmaktadır. Bu uzaklığın Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmeliğinde, o kat planındaki en uzun kenarın l/20 sini aşmaması gerektiği belirtilmiştir.

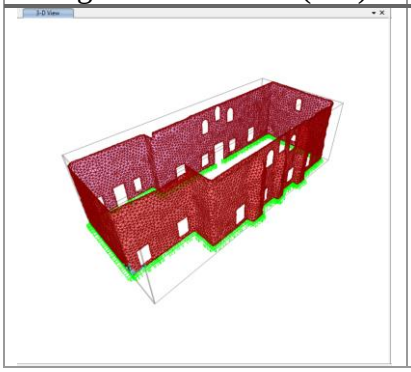
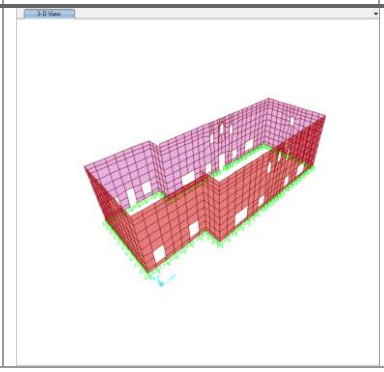
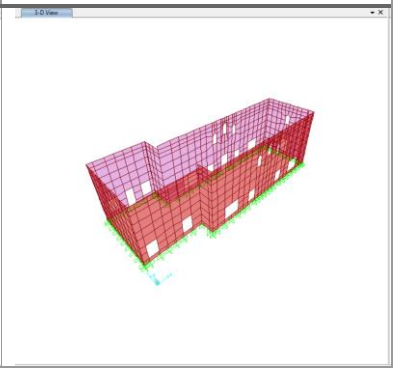
Fotogrametri, modeli oluşturulmak istenen nesnenin yüzeyini gören açılardan çekilen fotoğraflar ile elde edilmektedir. Dolayısıyla oluşan fotogrametrik model, kalınlığı olan bir nesnenin dış sınırından bir yüzey ortaya çıkarmaktadır. Tarihi yapıların da fotogrametrik olarak modellenmesi dış yüzeyden gerçekleştirildiği için yapısal analiz programında duvar kalınlığının tanımlanması durumunda, yığma duvarların ağırlık merkezlerinde kayma gerçekleşebilmektedir. Özellikle tez kapsamında kullanılan SAP2000 yapısal analiz programında duvar kalınlığının derinliği, seçilen yüzeyin her iki eksenine bölüştürülerek tanımlanmaktadır. SAP2000'e 100 cm olan bir duvar kalınlığı tanımlandığında, seçilen yüzeyde X eksenine doğru 50 cm ve Y eksenine doğru 50 cm olacak şekilde bir dağılım olmaktadır. Kullanıcının tercihine göre bir eksende 100 cm doğrudan kalınlık tanımlanamamaktadır. Bu durum, üç boyutlu çalışan tam bir yapının fotogrametrik modelleme tekniği ile olan yapısal analizinin yığma birimlerinde ağırlık merkezini değiştirmektedir. Melik Mahmut Cami güney duvarı incelendiğinde, payandaların bulunduğu bölümün duvar kalınlığı 2,12 m'dir. Şekil 4.14'te görüldüğü üzere dış yüzeyden çekilen fotoğraflar ile oluşturulan model sonucu 1,06 m ağırlık merkezinde kayma gerçekleşmektedir. Kadın harim bölümünün bulunduğu duvarın kalınlığı ise 1,05 m'dir. Fotogrametrik model ile oluşturulan veriye SAP2000 programında kalınlığın tanımlanması ile ağırlık merkezinde 0,525 m boyutunda kayma meydana gelmektedir. İki boyutta çalışan veya tümüyle kapalı bir mekân olmayan yapılarda bu durum oluşmamaktadır. Örneğin çalışma kapsamında ele alınan basit yığma yapı elemanları avlu duvarı, L plan tipi duvar ve Melik Mahmut Cami güney duvarında yapıların iki boyutta çalışması ve X veya Y eksenden biri ile birlikte Z ekseninin olması bu durumu oluşturmamaktadır.



Şekil 4.14. Yapısal analiz programında ortaya çıkan yığma birim ağırlık merkezi farkı

Çalışmanın bu bölümünde, küçük nesnelerde bu durumun problem oluşturabileceği ancak büyüklüğü yapısal ölçekte olan nesnelerde bu durumun analiz sonuçlarında çok büyük etki göstermediği açıklanmaktadır. Mardin Melik Mahmut Cami örneğinden üç farklı model oluşturulmuştur. Model hazırlanma sürecinde bir adet fotogrametrik modelleme tekniği, bir adet klasik model ile yapının dış yüzeyinden oluşturulan model (KM1) ve bir adet klasik modelleme tekniği ile yığma duvarların ağırlık merkezine göre ayarlanmış model (KM2) olmak üzere toplamda 3 farklı model oluşturulmuştur (Çizelge 4.6). Yalnızca taşıyıcı beden duvarlarının modellendiği cami örneğinde tonoz, kubbe, kemer gibi taşıyıcı elemanlar ağırlık merkezinden ortaya çıkabilecek farkların analizi amaçlanan bölümde sürecin hızlandırılması adına modellenmemiştir.

Çizelge 4.6. Oluşturulan üç farklı model

Fotogrametrik Model (FM)	KM1	KM2
		

4.3.1. Analiz sonuçları

Her iki modelleme yaklaşımında dikkate alınan malzeme özellikleri, mesnet koşulları ve yük durumları aşağıdaki gibidir;

- Yığma taş duvarın elastisite modülü, bilimsel literatürde benzer yapılar için yaygın olarak kabul edilen bir değer olan E=450 MPa olarak kabul edilmiştir (Altunışık vd., 2016: 1339; Can, vd., 2012: 681).
- Mesnetler, ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Sayısal modellerin genel geometrik davranışlarını belirlemek amacıyla ilk beş modu incelemek üzere modal analiz yapılmıştır.
- Modellerde shell eleman kullanılmıştır.

Sırasıyla aşağıdaki yük durumları uygulanmıştır;

- İlk olarak, yerçekimi yükleri (sabit yükler) uygulanmıştır. Bu yükler, sayısal modellerde yapının ağırlığını tam olarak dikkate alacak şekilde tanımlanan kesit boyutları sonucunda yapısal elemanların kendi ağırlığının tanımlandığı dikey yönde tanımlanmıştır.
- Daha sonra, ikinci ve üçüncü yük durumları olarak, elemanların kütlesinin %40'ı global X ve Y eksenlerinde yatay ağırlık yükleri olarak uygulanmıştır.

Mardin Melik Mahmut Camisinin yığma birimlerinde ağırlık merkezi tanımlamalarından dolayı ortaya çıkabilecek farklılıkların oluşturulan sayısal modellerde gerçekleştirilen strüktürel analizlerin karşılaştırılması sonucunda, her üç modelin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır. Çizelge 4.7'de gösterildiği gibi;

- Modal analizin ilk 5 periyodu benzerdir.
- Rastgele seçilen üç noktada DL (düşey yük), HRZ-X ve HRZ-Y (yatay yükler) analizleri sonucunda x, y ve z yönlerindeki deplasmanlar yakındır.

Çizelge 4.7. Modellerin yapısal analizinin sonuçlarının özeti

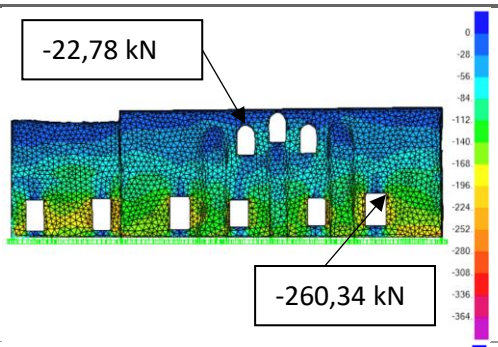
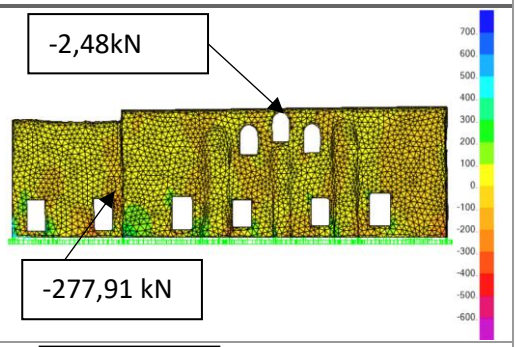
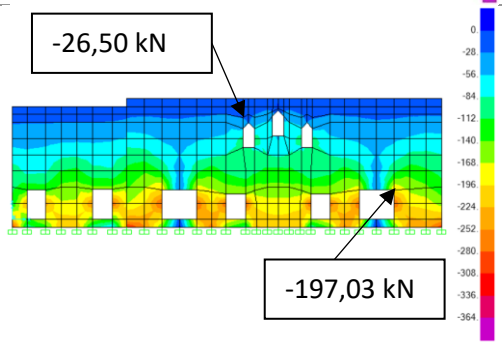
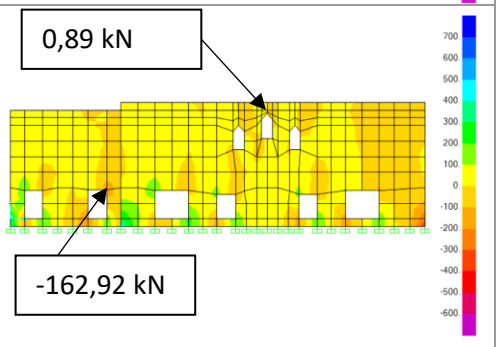
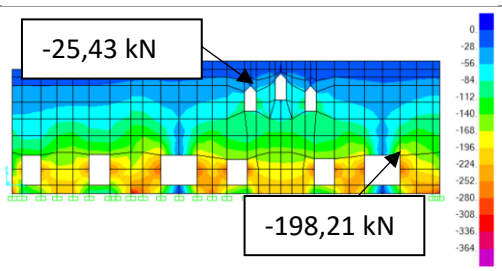
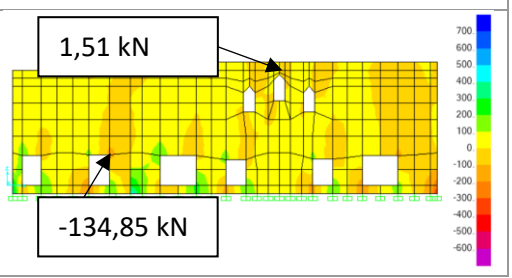
Analiz sonucu tipi	Sonuç	Birim	MMM-FM	MMM-KM1	MMM-KM2
Modal analiz ilk 5 periyot	T1	saniye	0.35642	0.404936	0.39661
	T2	saniye	0.33161	0.37094	0.377987
	T3	saniye	0.25161	0.300793	0.274166
	T4	saniye	0.24466	0.26964	0.266249
	T5	saniye	0.21314	0.255421	0.234263
Taban kesme kuvveti	DEAD LOAD	kN	17660.50	21131.94	19914.47
	Fx (HRZTL-X)	kN	-7064.202	-8452.778	-7815.361
	Fy (HRZTL-Y)	kN	-7064.202	-8452.778	-7815.361
Güney duvarı ana giriş kapısı orta üst noktadaki deplasman (DL)	Δx	mm	0.005	0.02	0.02
	Δy	mm	0.06	0.006	0.01
	Δz	mm	-1.54	-1.68	-1.68
Kadın harim mekanı ile ana harim mekanının üst birleşim noktası (HRZx)	Δx	mm	3.29	4,07	3.98
	Δy	mm	2.89	3.65	3.31
	Δz	mm	0.48	0.69	0.74
Güney duvarı orta kemerli pencere üst noktası deplasman (HRZy)	Δx	mm	1.16	1.14	1.13
	Δy	mm	22.07	25.71	24.88
	Δz	mm	-0.20	-0.02	-0.01

Özellikle modal analiz sonuçları, yüklerden bağımsız olarak sadece geometrik özelliklerin program tarafından doğru algılanıp algılanmadığını göstermektedir. Bu durumda oluşturulan üç farklı modelde yakın periyot sonuçlarının ve aynı yönde ötelenmelerin ortaya çıkması, sayısal olarak modellerin birbirleriyle olan benzerliğini göstermektedir.

4.3.2. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

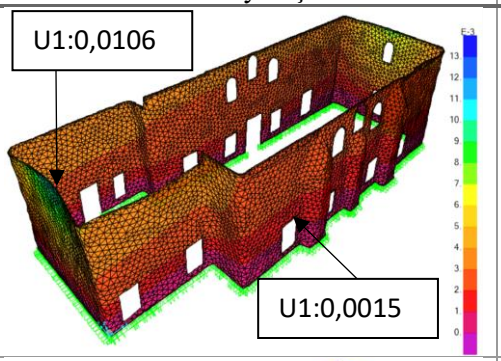
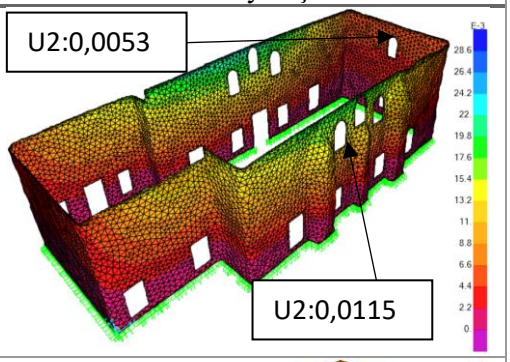
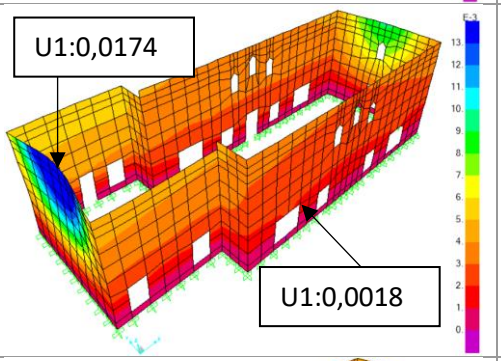
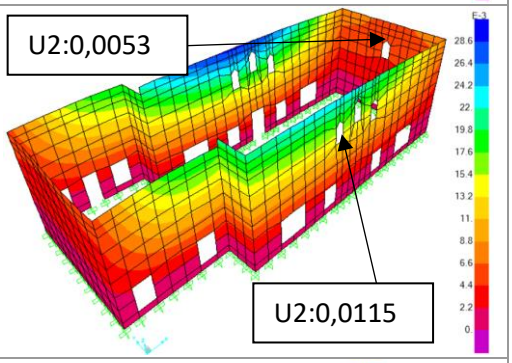
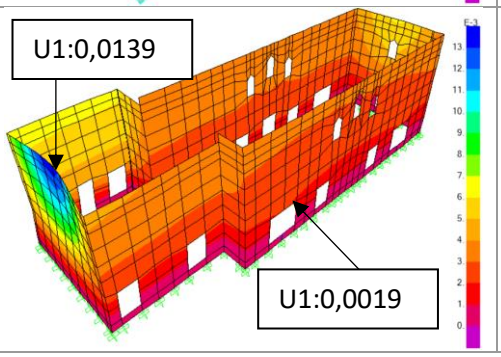
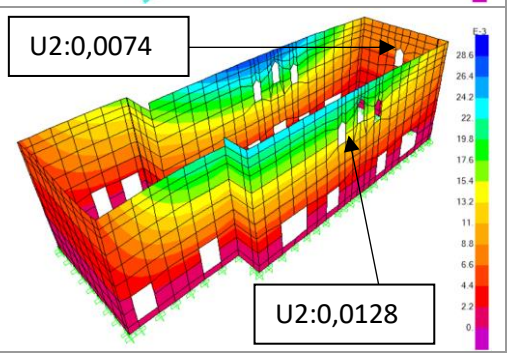
Tanımlanan yükler sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve deformasyon değerleri de karşılaştırılmıştır. Her analiz sonucu için ortaya çıkan renk tonları, modellerin birbiriyle oldukça yakın davranışlar sergilemektedir. Değerler caminin kuzey duvarı üzerinden karşılaştırılmıştır. Kuzey duvarının seçilme nedeni, kapı ve pencere açıklıklarının fazla bulunmasıdır. Farklı noktaları barındıran bu duvar üzerinde farklılaşan değerlerin ortaya çıkma ihtimali daha yüksektir. Çizelge 4.8'de gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Kuzey duvarındaki Smin (Basınç gerilmesi aralığı: -364 – 0 kN/m2) gerilme şekli her üç model için de hemen hemen aynıdır. X yönündeki yatay yük analizi sonucunda S22 gerilmeleri karşılaştırıldığında (Basınç gerilmesi aralığı: -600 – 700 kN/m2), tekrar yakın gerilmeler elde edilmiştir.

Çizelge 4.8. Modellerde gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Model Türü	Sabit yük sonrası Smin gerilmeleri	HRZ-X yatay yük sonrası S22 gerilmeleri
Fotogr. Model		
KM1		
KM2		

Deformasyon değerlerinin renk kontürlerinin benzer dağılımda olması, sayısal modellerin benzer davranış gösterdiğini desteklemektedir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Modeller arasında oluşan deplasman değerlerinin karşılaştırılması

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
Fotogr. Model		
KM1		
KM2		

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, yapısal ölçekteki bir nesnede birimlerin ağırlık merkezindeki kaymanın sonuçlara etki etmediği tespit edilmiştir. Küçük açıklığa sahip yapılarda veya küçük ölçekli nesnelerde ağırlık merkezi durumu büyük bir farka sebebiyet verebilir. Ancak, büyük ölçekli çalışmalarda yüksek bir hassasiyet farkı olmamaktadır. Bu hassasiyet farkının küçüklüğü, süreç içerisinde elde edilen kazançlar ile oranlayınca tolere edilebilecek boyuttadır. Yapıların dijital olarak belgelenmesi, modeller üzerinden rölövelerin oldukça pratik şekilde elde edilebilmesi, üç boyutlu model sayesinde yapıdaki değişimlerin zaman-tahribat takibinin kolaylıkla yapılabilmesi ve ani-kritik durumlarda

daha hızlı kararlar alabilecek şekilde yapısal analiz sürecini sağlaması önemli kazançlar arasında yer almaktadır.

Tarihi yapıların yapısal davranış sürecinde hassas ve detaylı bir sonuç aranıyorsa, malzeme deneyleri yapılara doğrusal olmayan elastik malzeme özellikleri altında lokal veya mikro modeller üretilmelidir.

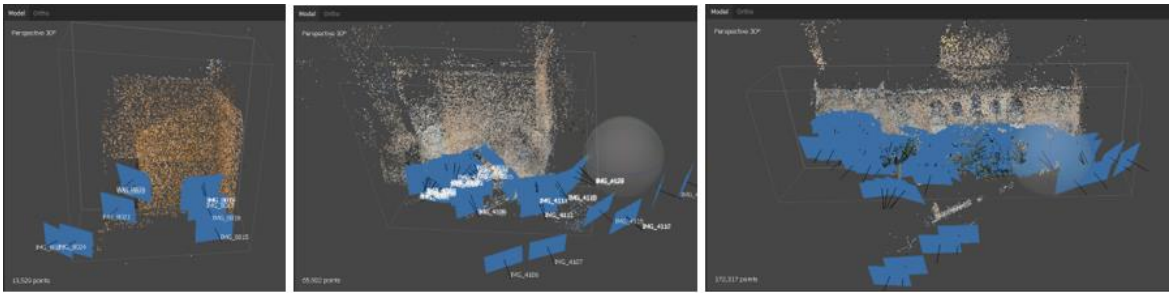
5. STRÜKTÜREL PERFORMANSIN BELİRLENMESİNDE FOTOGRAMETRİK MODELLEME TEKNİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çalışmanın bu bölümünde, fotogrametrik verilerinin yapısal analiz programına aktarılacağı süre içerisindeki aşamalar ve tüme varım şeklinde ilerleyen sayısal analizlerinde Melik Mahmut Cami modelinden önce, basit yapı elemanları üzerinde oluşturulan modeller ele alınmıştır. Nitel araştırmanın temel özelliklerinden biri olan tümevarıma dayalı analiz, "özelden genele gitmeyi içeren bir akıl yürütme süreci" olarak tanımlanmaktadır (Christensen, Johnson ve Turner, 2015: 7). Tezin yapısal analiz bölümü; edinilen bilgilerden hareketle, bir teoriye ulaşma ve bilgilerin anlamlı bir yapıya kavuşturulma sürecini yansıtan tümevarıma dayalı analiz yöntemiyle devam etmiştir (Yıldırım, 1999; 11-14). Bu bölümde, basit yapı elemanı olarak sırasıyla (1) yığma duvar, (2) tek açıklığa sahip L biçimli yığma duvar, (3) Melik Mahmut Cami güney duvarı üzerinde hem fotogrametrik hem de klasik yöntem ile modeller oluşturulmuş ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen bu sıralı tüme varım yöntemi sayesinde fotogrametrik modelleme ile yapısal analiz, küçük ölçekteki yapıdan hatta yapı elemanlarından başlanarak değerlendirilmiş ve büyük ölçekli yapıların davranış değerlendirmeleri için zemin hazırlanmıştır. Karmaşık bir yapı modelinde oluşabilecek bir hatayı incelemek ve çözüm üretmek uzun süreçler gerektirebilmektedir. Dolayısı ile tüme varım şeklinde küçük ölçekli yapı modelleme sürecinden başlayarak klasik ve fotogrametrik modelleme arasındaki hataları ve faydaları aşama aşama ortaya koymak hem zaman hem de dijital araçların kullanımı açısından avantaj sağlayabilmektedir.

5.1. Fotogrametrik Model Oluşturma Süreci

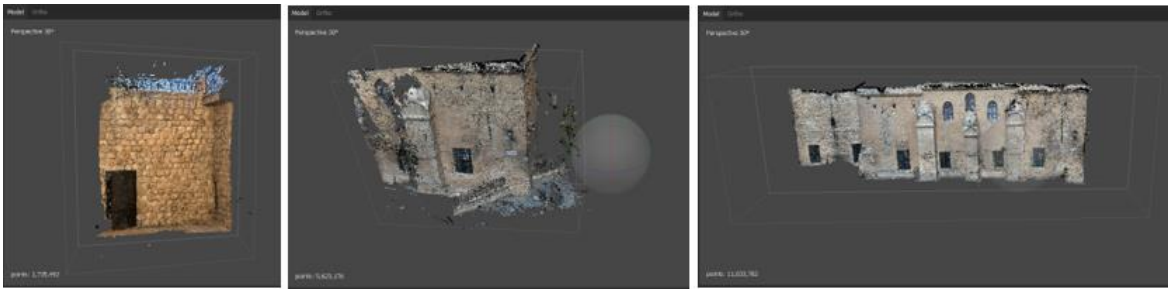
Tez kapsamında fotogrametrik model oluşturma süreci, fotoğrafın tanımlanması ve model oluşturulma yöntemi ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Fotogrametrik model oluşturmak amacıyla tez kapsamında Metashape (üretici firma Agisoft) programı kullanılmıştır. Bu programın profesyonel sürümünün kullanımı belirli bir lisans ücretini gerektirmektedir, ancak; eğitim versiyonu sayesinde ücret bir miktar azalmaktadır. Metashape programı, fotogrametrik modelleme sürecini adım adım gerçekleştirmek için bir dizi özellik ve araç sunmaktadır. Program içerisinde geliştirilebilen fotogrametrik modelleme süreci, programın geliştiricileri Agisoft tarafından açıklanan beş ana adımdan oluşur (Agisoft, 2021):

1. İlk adım, kamera hizalama aşamasıdır. Bu adımda Metashape, birleştirilecek fotoğraflar üzerinde ortak noktalar aramaktadır. Çekilen fotoğraflar Metashape programı üzerinde "İş Akışı (Workflow)" sekmesi içerisinde bulunan "Fotoğrafları Ekle (Add Photos)" komutu seçilerek veya programın içerisine doğrudan sürüklenerek programa aktarılmaktadır. Beraberinde aynı sekme içerisinde bulunan "Fotoğrafları Hizalama (Align Photos)" komutu seçilerek işlem başlatılmakta ve program tarafından fotoğraflar hizalanmaktadır. Bu adımın sonucunda, seyrek noktalardan oluşan bir bulut ve bir dizi kamera konumu ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.1). Nokta bulutları, fotoğraflar arasındaki hizalama sonuçlarını temsil etmektedir. Bu nokta bulutları, 3D modelin temel bileşenlerinden biri olarak kabul edilir ve sonuçta oluşturulan modelin doğruluğunu ve detaylarını büyük ölçüde etkiler. Mevcut ortaya çıkan 3D nokta bulutu haliyle, farklı programlarda, farklı kullanım alanları için dışa aktarılabilmektedir. Metashape yazılımıyla gerçekleştirilen model oluşturma aşamasında, elde edilen veri topluluğu, özellikle kamera konumlarıyla ilişkilendirilen bilgilere dayanmaktadır. Bu kamera konumu verileri, çeşitli açılardan çekilen fotoğrafların bir araya getirilmesi ve işlenmesi sürecinde kritik bir öneme sahiptir.



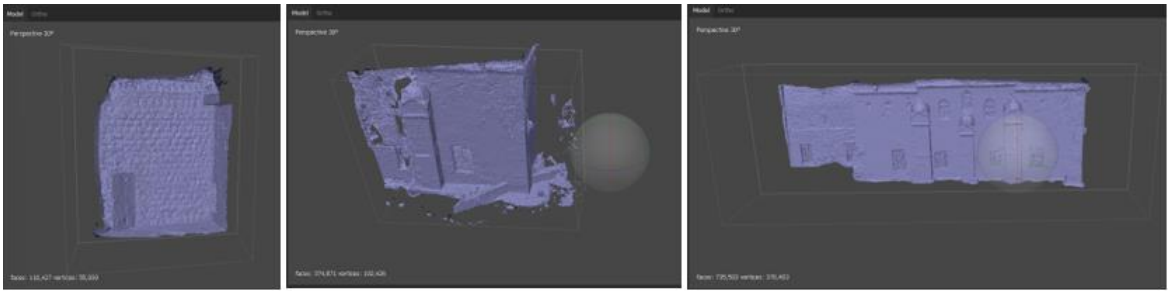
Şekil 5.1. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programından elde edilen kamera hizalama aşamaları ve oluşan nokta bulutu örnekleri

2. Bir sonraki aşama yoğun nokta bulutunun oluşturulmasıdır. Metashape programı, kameranın tahmini konumlarına bağlı olarak daha yoğun ve ayrıntılı bir nokta bulutu oluşturmaktadır (Şekil 5.2). İşlem, program üzerinde bulunan "İş Akışı (Workflow)" sekmesi içerisinde "Yoğun Bulut Oluşturma (Build Dense Cloud)" komutu seçilerek başlatılmaktadır. Oluşan nokta bulutu, 3D bir ağ modelinin oluşturulmasıyla dışa aktarılmadan önce değiştirilebilmekte ve analizler için gerekli görülmeyen veriler temizlenebilmektedir.



Şekil 5.2. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programından elde edilen yoğun nokta bulutu örnekleri

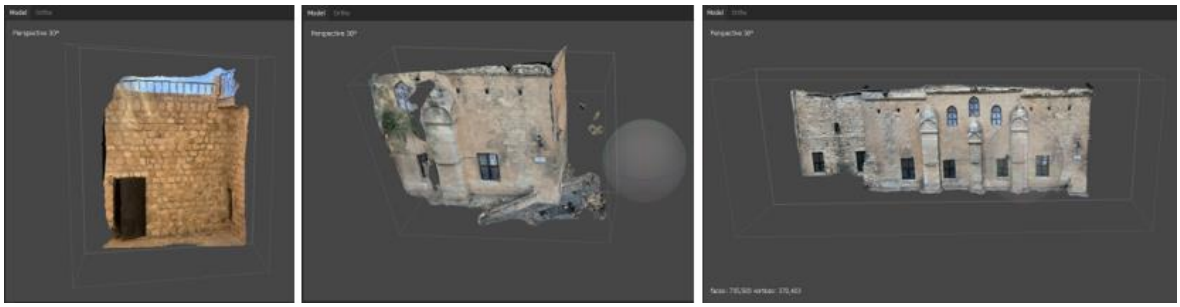
3. İkinci işlemin ardından ağ (mesh) yapımına geçilmektedir. İşlem, program üzerinde bulunan "İş Akışı (Workflow)" sekmesi içerisinde "Ağ Oluşturma (Build Mesh)" komutu seçilerek başlatılmaktadır. Metashape, önceki adımdan elde edilen yoğun nokta bulutlarına dayalı olarak nesneyi temsil eden bir 3D çokgen ağının yüzeyini yapılandırmaktadır (Şekil 5.3). Ağ yüzeylerine fotoğrafta bulunan dokuların aktarılması için tekrar aynı sekme içerisinde bulunan "Doku Oluşturma (Build Texture)" komutu seçilmektedir. Bu işlem, bir sonraki aşama olan orto fotoların elde edilmesi için gerekmekte ve ağlar ile beraber çekilen fotoğraflarda yer alan dokuların da model üzerinde görünmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.3. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh) örnekleri

4. Poligon ağ, oluşturduktan sonra bazı ayarlamalar yapmak gerekebilmektedir. Metashape içerisinde, ağın yok edilmesi, izole edilmiş bileşenlerin çıkarılması, deliklerin kapatılması vb. düzeltmeler yapılabilmektedir. Daha karmaşık ve ayrıntılı bir düzenleme yapılması gerektiğinde, harici bir düzenleme yazılımı kullanılabilir. Bu bağlamda Metashape, diğer yazılımlarla daha fazla düzenleme imkânı tanımak amacı ile ağın dışa aktarılmasına izin vermektedir. Ardından, düzenlenmiş model istenildiği durumda Metashape'e tekrar aktarılabilir.

5. Geometri ve ağın düzenlenmesi ile birlikte, farklı açıdan çekilen fotoğraflar üzerindeki dokular model üzerinde görünebilir hale getirilmektedir ve/veya ortofoto üretimi için de kullanılabilmektedir (Şekil 5.4). Bu üretim de "İş Akışı (Workflow)" sekmesi içerisinde bulunan "Döşemeli Model Oluşturma (Build Tiled Model)" komutunun gerçekleştirilmesi ve sonrasında da aynı sekme içerisinde "Ortomozaik Oluşturma (Build Orthomosaic)" komutu ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.4. Tez kapsamında oluşturulan ve Metashape programına tanıtılan fotoğraf açılarından elde edilen dokuların modele aktarıldığı örnekler

Bu önemli 5 adım sırasında program her işlemde "en yüksek (highest), yüksek (high), orta (medium), düşük (low), en düşük (lowest)" olmak üzere tercih edilmesi gereken doğruluk oranı bulunmaktadır. Tez kapsamında, fotoğrafların ilk hizalama aşamasında, program tarafından hizalanabilecek fotoğraf sayısının artması adına "en yüksek (highest)" seçeneği seçilmiştir. Özellikle fotoğraf sayısının sınırlı olduğu ve tanımlamanın zor olduğu durumlarda "en yüksek (highest)" seçilerek işlemin başlatması, fotoğrafları en yüksek çözünürlük ile programa tanıtma sürecini başlatması nedeniyle daha başarılı sonuçlar vermektedir. Tez çalışmasında, hizalama sonrası yapılan işlemlerde "orta (medium)" seçilmiştir. Bunun nedeni, hizalama sonrası yapılan işlemlerin genellikle fotoğraflardaki dokuların aktarımı ile ilişkili olması ve "orta (medium)" seçeneği ile daha düşük dosya boyutlarına sahip verilerin elde edilebilmesidir. Bu seçeneklerde tercih edilen yükseklik derecesine göre oluşan modelin dosya boyutu artmaktadır. Her işlem aşamasında "en yüksek" doğruluk oranının seçilmesi, dosya boyutunu çok arttırarak yüksek işletim sistemine sahip bilgisayar kullanımını zorunlu kılacaktır. Ayrıca bu doğruluk oranında, sayısal modelleme için gerekli olmayan verileri de içeren bir fotogrametrik model ortaya çıkarabilmektedir. Dolayısı ile hizalama aşaması sonrası "orta (medium)" seçeneği ile programda ilerlemek, çoğunlukla hem bilgisayar kullanımını rahat hale getirebilmekte hem de yapısal analiz için ideal kalitede gerekli olan ağları oluşturabilmektedir.

Fotogrametrik modelleme, günümüzde teknolojik araçların gelişmesi ile birlikte yüksek çözünürlüklü kameralara sahip akıllı telefonlardan elde edilen fotoğraflar ışığında üretilebilmektedir. Üretim sırasında doğru bir modelin ortaya çıkabilmesi için önemli süreçler aşağıda özetlenmiştir;

- Fotoğrafların yüksek çözünürlüklü olması, modelleme aşaması sırasında birbirini takip eden fotoğrafların program tarafından tanınmasına ve hizalanmasına yardımcı olmaktadır. Yüksek çözünürlüklü olmayan fotoğraflarda ise yüklenen fotoğrafların program tarafından tanınması genellikle mümkün olmamakta veya tanınması durumunda dahi bütün fotoğraflar hizalanamamakta ve bütüncül bir model ortaya çıkmamaktadır.
- Süreç, fotoğrafların çekilmesi ile tamamlanmamakta ve fotoğrafların modele tanıtılmasından önce çeşitli işlemlerden geçmesini de gerektirmektedir. Öncelikle programın daha hızlı ve doğru yanıt verebilmesi için çekilen fotoğrafların aynı ölçülere sahip olması büyük avantaj sağlamaktadır. Bu durum fotoğrafların program tarafından doğru hizalanmasına da yardımcı olmaktadır. Aynı ölçüye sahip olmayan fotoğrafların manuel olarak aynı ölçülere getirildikten sonra programa tanıtılması önerilmektedir.
- Araç ve insan trafiğinin fazla olduğu, hareket eden nesnelerin bulunduğu alanlarda çekilen fotoğrafların; program tarafından tanınmasında ve hizalanmasında zorluk çıkardığı ve fotoğrafların bu tip gereksiz verilerden arındırılması gerektiği görülmüştür. Arındırma, fotoğraf üzerinde bu verilerin siyah renk ile kapatılması ile gerçekleştirilebilir. Bu işlemlerin ardından fotoğraflar, fotogrametrik model oluşumuna imkân sağlayan programlara tanıtılabilmektedir.
- Modeli oluşturulan fotoğraflarda her ne kadar arındırma işlemleri yapılsa dahi, yapı ile iç içe birtakım nesneler tamamen arındırılamamakta ve modelin içerisinde gerekli olmayan veriler oluşabilmektedir. Bu veriler oluşan model üzerinde manuel olarak temizlenmelidir.
- Yapısal analiz programı için gerekli olmayan tüm verilerin temizlenmesi gerekmektedir. Ayrıca model sırasında yapılarda bulunan kapı, pencere gibi açıklıkların da program tarafından kapalı bir yüzey gibi algılandığı görülmektedir. Bu durumda yapıdaki mevcut açıklıkların da manuel olarak kapalı ağların kaldırılması ve yüzeyin açık hale getirilmesi gerekmektedir. Bu temizlik işlemi fotogrametrik modelleme programında yapılabileceği gibi bir sonraki aşamada kullanılan "ağ düzenleme" programında da gerçekleştirilebilir. Çalışmada, analizi gerçekleştirilecek olan yapıya yakın mesafede bulunmayan verilerin fotogrametrik modelleme programında, yakın mesafede bulunan verilerin ise ağ

düzenleme programında temizlenmesi önerilmektedir. Bunun nedeni ağ düzenleme programının kusurlu ağları tespit edebiliyor olmasıdır. Temizlenen verilerin, mevcut istenen verilerde kusur oluşturma ihtimaline karşılık bu düzenlemelerin programda kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmesi kolaylık sağlamaktadır.

5.2. Fotogrametrik Modelin Yapısal Analiz Programına Aktarılması

Fotogrametrik model oluşturulma sürecinin tamamlanmasıyla, ortaya çıkan modelin yapısal analiz programına aktarılması süreci başlamaktadır. Fotogrametrik modelin doğrudan yapısal analiz programına aktarılamamasının nedenleri; (1) modelin gerçekteki ölçülere uygun bir boyuta sahip olup olmadığının kontrol edilmesi gerektiği, (2) modelde ihtiyaç duyulmayan verilerin de fotogrametri model içerisinde oluşması ve temizlenme ihtiyacı, (3) modeli oluşturan ağların birbiri ile "sonlu eleman" şeklinde bağlanmamış olma ihtimali ve bu kusurun giderilmesi gerektiği, (4) fotogrametrik modelde oluşturulamayan yüzeylerin tamamlanması gerektiği ve (5) ağ boyutlarının birbirine yakın hale getirilmesi gerekliliğidir. Bu süreçlerde temizleme ve tamamlama işlemleri dışındaki süreçler, bilgisayar yazılımlarına tanımlı otomatikleştirilmiş komutlar ile kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Model üzerindeki işlemlerin tamamlanmasıyla, katman ve dışa aktarma formatı ayarlanarak süreç tamamlanmış olacaktır.

Süreçlerin birbirini sırasıyla takip etme zorunluluğu bulunmamaktadır. Örneğin, öncelikle tamamlama ve temizleme işlemleri gerçekleştirildikten sonra ölçeklendirme veya ağ kusurlarını giderme işlemleri gerçekleştirilebilir. Ağ boyutları birbirine yakın hale getirildikten sonra temizleme işlemleri yapılabilir. Bu işlemlerin sırası, kullanıcının çalışma prensibine göre değişebilir ve bir işlem güvenilir bir model üretmek amacıyla birkaç kere uygulanabilir. Modelin Geomagic programına aktarılması ile öncelikle ağ kusurlarını kaldırıldıktan sonra ölçeklendirme, tamamlama, temizleme ve yeniden ağ oluşturma işlemlerinin ardından tekrar ağ kusurlarını giderme komutu kullanılarak modelin düzenleme işlemleri sonrası ağlarında yeniden bir kusur ortaya çıkıp çıkmadığı tespit edilebilir. Bu şekilde süreç daha sağlıklı yönetilebilir. Tez kapsamında, yapısal analiz programı için fotogrametrik model üretme süreci bu şekilde yönetilmiştir.

Tez içerisinde ölçeklendirme, temizleme, ağ kusurlarını giderme, tamamlama ve yeniden ağ oluşturma işlemleri Geomagic programında gerçekleştirilmiştir. Geomagic Wrap ticari bir

yazılımdır ve ücretsiz bir şekilde faydalanılamamaktadır. Belirli bir ücret fiyatı ile profesyonel sürümü kullanılabilen bu programda, eğitim fiyatı için kullanım ücreti azalabilmektedir. Bu program, nokta bulutlarının, oluşturulan ağın düzenlenmesi amacıyla gelişmiş yüzey düzenlemeye imkân tanımaktadır. Modelin, Geomagic programına geçişi için Metashape üzerinden elde edilen üç boyutlu model farklı formatlarda dışa (export) aktarılabilmektedir. Metashape arayüzünde, "Dosya (File)" sekmesi içerisinde "Dışarıya Aktar (Export)" komutunda bulunan "Modeli Dışarı Aktar (Export Model)" işlemi ile dışarı aktarılmak istenen format tercihi seçilebilmektedir. Bu çalışmada STL formatı (Stereo Lithography interface formatı veya Standard Triangulation Language) kullanılarak modeli bilinen kesin bir ölçüye göre ölçeklendirmek ve diğer aşamaları gerçekleştirmek üzere Geomagic Wrap programına aktarım gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Ölçeklendirme

Fotogrametrik model sonrası gerçekleştirilebilecek ilk işlem, elde edilen üç boyutlu modelin, kesin ölçüsü bilinen bir elemana göre yeniden ölçeklendirilmesidir. Ölçeklendirme işlemi, modelin oluştuğu Metashape programında yapılabileceği gibi farklı programlara aktarım sağlanarak da gerçekleştirilebilmektedir. Metashape programı arayüzünde "Model" sekmesi içerisinde "Objeyi Dönüştür (Transform Object)" komutunda model üzerinde belirli bir ölçüye göre taşıma, döndürme ve ölçeklendirme işlemleri gerçekleştirilebilir.

Geomagic programına aktarımın gerçekleşmesi ile birlikte, Geomagic arayüzü üzerinde "Araçlar (Tools)" sekmesi içerisinde "Düzenle (Modify)" komutunda bulunan "Ölçeklendir (Scale)" işlemi ile ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ölçeklendirme işlemi için "Ölçek Faktörü (Scale Factor)" sayısı gereklidir. Bu sayı, gerçek ölçü ile model ölçüsünün birbirine oranlanmasıyla elde edilmektedir ve dolayısıyla, model ölçüsünün gerçek ölçülerden ne kadarlık bir oranda farklı olduğu da tespit edilmiş olunmaktadır. Model üzerinde ölçüm işlemi "Analiz (Analysis)" sekmesi içerisinde "Ölçüm (Measure)" komutunda bulunan "Mesafe (Distance)" işlemi ile yapılmaktadır. Bu işlemin seçilmesi ile arasındaki mesafenin bilinmesi gereken iki nokta işaretlenmekte ve program iki nokta arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Ölçekli modelin elde edilmesi ile birlikte doğrudan yapısal analiz programına geçmek mümkün olmamaktadır. Bunun nedeni dışa aktarılan ağ, ağı oluşturan çeşitli noktalar

arasındaki uyumsuzlukla ilgili hatalardan etkilenmesidir. Dolayısı ile modeli doğrudan bir yapısal analiz programına aktarmak doğru sonuçlar vermemektedir. Ağ kusurlarının giderilmesi gerekmektedir.

5.2.2. Temizleme

Temizleme, model üzerinde yapısal analiz programında kullanılmayacak olan ağların silinmesidir. Fotogrametrik model, çekilen fotoğraf üzerindeki bütün nesneleri derinlik algoritması sayesinde algılar ve tamamının modelini oluşturur. Dolayısıyla ağaç, gökyüzü, kapı, pencere gibi fotoğraf karesinde iki boyutlu olan yüzeylerin de 3D modeli ortaya çıkmaktadır. Bu yüzeylerin manuel olarak seçilerek temizlenmesi gerekmektedir. İhtiyaç duyulan modele uzak mesafede olan ağlar kolaylıkla Metashape veya Geomagic programından silinebilir. Tez kapsamında, detaylı ve dikkatli bir temizleme işlemi için ise Geomagic programının kullanılması tavsiye edilmektedir.

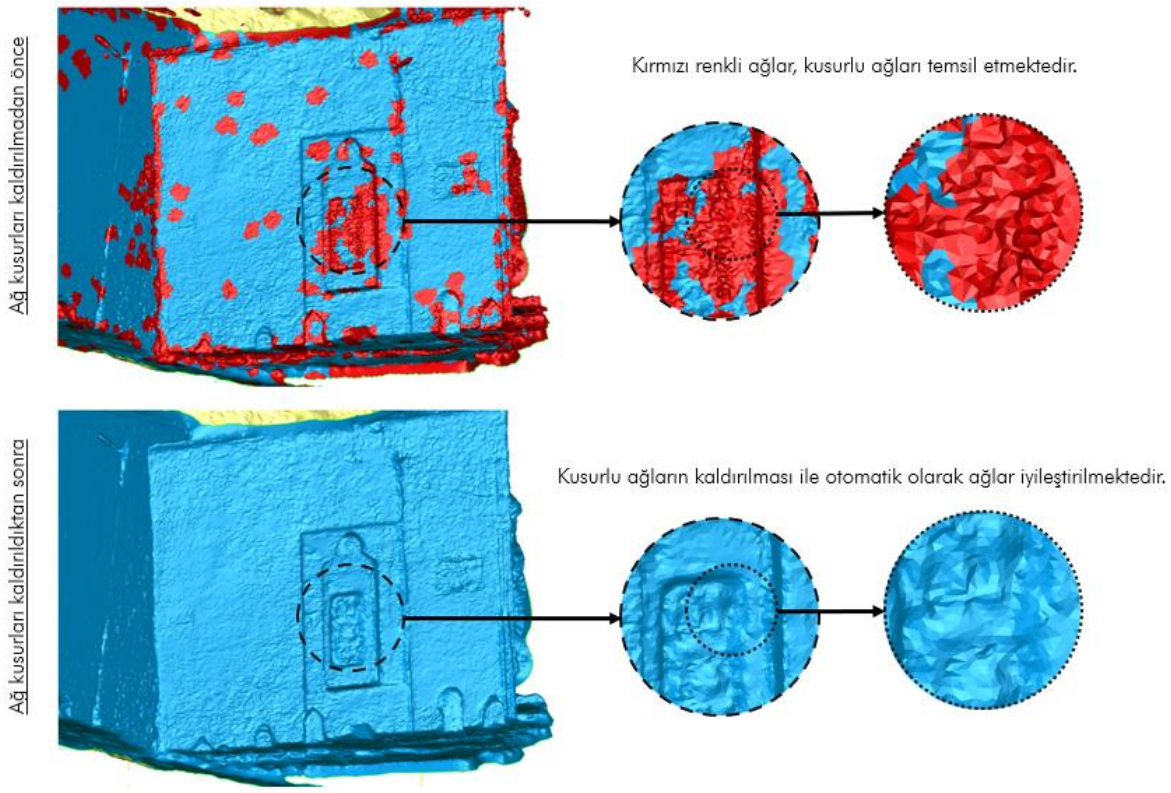
Geomagic programının arayüzünde, modelin aktarılması ile aktif hale gelen “Çokgenler (Polygons)” sekmesi içerisinde “Tamir Et (Repair)” komutunda bulunan “Kırp (Trim)” işlemi ile temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Temizleme işleminde düzlem ile kırpma, eğri ile kırpma ve levha ile kırpma seçenekleri bulunmaktadır. Bu seçeneklerden, temizlenecek olan yüzey için uygun olanı tercih edilebilir. Zemindeki temizlemeler için düzlem ile kırpma, kapı ve pencere açıklıkları için eğri ile kırpma ve yapının köşe noktaları için levha ile kırpma önerilebilir.

5.2.3. Ağ kusurlarını kaldırma

Fotogrametrik model üzerinden elde edilen ağlar birleşmeme, üst üste binme, herhangi bir ağa bağlı olmama, asılı kalma gibi kusurları barındırabilmektedir. Bu kusurları birçok ağı içerisinde barındıran modelde gözle görmek oldukça zor olmaktadır. Dolayısıyla bilgisayar yazılımları tarafından otomatikleştirilmiş bir program kullanılması kolaylık sağlamaktadır. Geomagic programı, ağ kusurlarını otomatik olarak tanımlamakta ve otomatik olarak düzenleyebilmektedir.

Program içerisine, STL formatından modelin aktarılması ile birlikte otomatik olarak tanımlı “ağ doktoru (Mesh Doctor)” komutu aktif hale gelmekte ve işlemin onaylanıp

onaylanmadığı sorulmaktadır. Onaylanması durumunda poligon ağı otomatik olarak düzenlenebilmektedir. Başlangıçta bu işlemi gerçekleştirilmedikten sonra, "Çokgenler (Polygons)" sekmesinde bulunan "Tamir Et (Repair)" komutu içerisinde "Ağ Doktoru (Mesh Doctor)" seçeneği manuel olarak da seçilerek aktif hale getirilebilir. Aktif hale gelen işlem sırasında, model üzerindeki kusurlu ağlar kırmızı renk ile temsil edilmektedir. İşlem onaylandıkça kırmızı olarak görünen yüzeylerde düzenleme işlemi gerçekleşmekte ve kusurlu ağlar da modelin rengi olan maviye dönüşmektedir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Geomagic programında gerçekleştirilebilen ağ kusurlarını giderme işlemi örneği

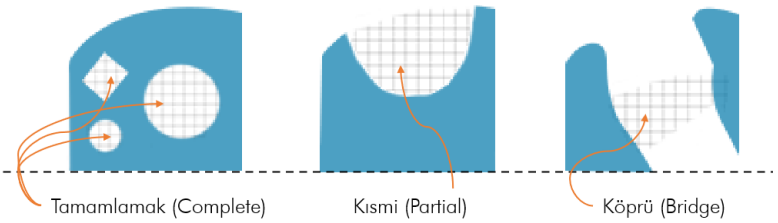
5.2.4. Tamamlama

Fotogrametrik model oluşturma sürecinde, temizlenmesi gereken veriler olduğu gibi ihtiyaç duyulan ancak modelde oluşmayan verilerin de tamamlama işlemlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Modeli oluşturulan yapının yakın çevresinde ağaç olması ve fotoğraf karelerinde ağacın olması, yapının ağaç arkasında kalan yüzeyinin modelinin oluşmasını engelleyecektir. Bitişik nizamlı olan yapılar için de aynı durum geçerlidir. Yapının, komşu yapı ile bitişik olduğu duvar yüzeyi fotoğraf karelerinde çıkmayacaktır ve dolayısıyla

fotogrametrik modeli oluşmayacaktır. Bu tür yüzeylerin manuel olarak tamamlanması gerekmektedir.

Geomagic programında tamamlama işlemleri için “Çokgenler (Polygons)” sekmesinde “Boşlukları Doldurma (File Holes)” komutu içerisinde “Tek Doldur (Fill Single)” ve “Hepsini doldur (Fill All) olmak üzere iki farklı boşlukları doldurma seçeneği bulunmaktadır. Hepsini doldur seçeneği ile köşe sınırları çizili ve belirli olan bir boşluk tek seferde tamamlanabilmektedir. Tek doldur seçeneği ise üç farklı tek doldurma imkanı tanımaktadır. (1) “Tamamlamak (Complete)” seçeneği tüm bir açıklığın doldurulacağını belirtmektedir ve doldurulacak deliğin seçilmesi gerekmektedir. Yüzey içerisinde bulunan herhangi bir deliğin doldurulması örnek olarak düşünülebilir. (2) “Kısmi (Partial)” bir boşluğun/deliğin bir bölümünün dolduracağını belirtmektedir ve bir başlangıç yeri belirlemek için deliğin kenarında bulunan bir nokta tıklanmalıdır. Kısmi doldurma işlemi sınırını belirlemek için deliğin kenarında yer alan başka bir noktanın da seçilmesi ile beraber boşluğun sol veya sağ tarafından hangi kısmın dolduracağının belirtilmesi için sınır çizgisinin de seçilmesi gerekmektedir. (3) “Köprü (Bridge)” bir delik üzerinde bir köprü kurulacağını ve onu ayrıca doldurulabilir deliklere bölünebileceğini belirtmektedir (Şekil 5.6). Özellikle karmaşık bir deliği daha doğru doldurabilecek daha küçük deliklere bölmek için köprü doldurma seçeneğini kullanmak kolaylık sağlamaktadır. Bir deliğin kenarındaki noktanın tıklanması ile beraber bağlanması istenen diğer kenara da tıklanarak köprü oluşturulabilmektedir.

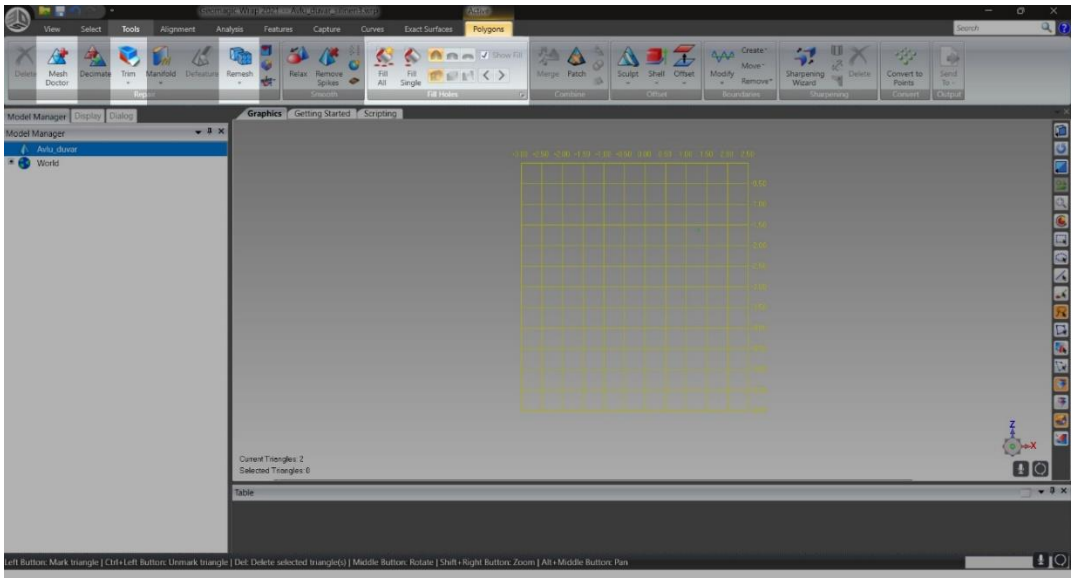
Doldurulamayan bölümlerde alternatif bir çözüm yolu olarak da ağ yüzeylerinden oluşan model, “Nokta bulutuna dönüştür (Convert to points)” seçeneği ile nokta bulutu haline dönüştürülmüş ve nokta bulutu düzenleme seçeneklerinden “Noktalar ekle (Add points)” sekmesi ile yüzeyler nokta eklenerek tamamlanmıştır. Nokta ekleme sırasında, program hangi düzleme noktaların ekleneceğine dair bir düzlem tanımlanmasını gerektirmektedir. Burada mevcut nokta bulutları ile eklenecek noktaların aynı düzleme getirilmesi önem arz etmektedir. Noktaların eklenmesi ile nokta bulutu, “Sar (Wrap)” seçeneği ile tekrar poligonlara dönüştürülerek poligonlar üzerinden eksik kalan yerler tamamlanabilmektedir.



Şekil 5.6. Tamamlama seçeneklerinin kullanılabileceği bölgelerin temsili

Fotogrametrik modelde bulunan ağların düzenlenmesi için gerekli işlemlerde kullanılan Geomagic Wrap programının arayüzünde, komutların konumları ve simge görünümleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir ve komutların işlevleri özetlenmiştir.

Çizelge 5.1. Geomagic Wrap programının arayüzünde fotogrametrik model ağlarının düzenlenmesi üzere kullanılan komutların konumları, simgeleri ve açıklamaları

Geomagic Wrap arayüzünde kullanılan komutların konumları	
	
Geomagic Wrap arayüzünde kullanılan komutların simgeleri ve açıklamaları	
	Ağlar üzerindeki kusurları gidermek amacıyla kullanılmaktadır. Komut aktif edildiğinde kusurlu ağlar kırmızı renkler ile temsil edilmektedir.
	Temizleme işlemleri sırasında kullanılmaktadır. Temizleme alternatifleri sunarak ağ modeline göre biçimsel bir temizlik fırsatı sağlamaktadır.
	Ağ modeli üzerindeki ağ sayılarının düzenli hale getirilmesine, azaltılmasına veya arttırılmasına imkan tanımaktadır.
	Tamamlama işlemlerinde aktif hale getirilmektedir. Boşluğun tamamının tek seferde tamamlanabileceği gibi seçerek sırayla da tamamlanabilmektedir.
	Ölçeklendirme işlemi sırasında kullanılmaktadır. Tools – Araçlar, sekmesinde bulunan "scale" komutu, belirlenecek oranlarda modeli ölçeklendirmektedir.

5.2.5. Yeniden ağ oluşturma

Fotogrametrik teknik kullanılarak elde edilen modelde üçgen ağlar oluşmaktadır. Bu ağların boyutları, fotoğraflardan elde edilen derinlik algoritmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Farklı boyutlardaki ağlar ile de yapısal analiz gerçekleştirilebilir. Fakat, ağ boyutlarındaki farklılığın ve tutarsızlığın yapısal analiz programına etki edebileceği düşünülmektedir. Yapısal analizde, sonlu eleman boyutu küçüldükçe taşıma gücü değerleri azalmaktadır. Eleman boyutunun gereğinden büyük olması ise rijitliğin gerçek değerinden daha yüksek kalmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla daha küçük elemanlar içeren modeller, yapının gerçek taşıma gücünden daha önce tükenmektedir ve daha büyük elemanlı modeller ise gerçek taşıma gücünden daha sonra güç tükenmesine erişmektedir (Dabanlı, 2008; Koçak, 1999). Bu sebeple, gerçeği temsil edebilecek şekilde en optimum bir eleman boyutu seçmek oldukça önem arz etmektedir.

İdeal boyutlardaki ağlar ile otomatik yeniden ağ oluşturmak Geomagic programında mümkün olmaktadır. Ağ problemlerinin giderilmesinin ardından yapısal analiz programında daha doğru sonuçlar alabilmek ve dosya boyutunun çok yüksek olmasını engellemek adına ağ boyutlarını birbirine yakın hale getiren “Yeniden Ağ (Remesh)” uygulanmıştır. Komut, programın ara yüzünde “Çokgenler (Polygons)” sekmesinde, “Tamir Et (Repair)” komutunda “Yeniden Ağ (Remesh)” seçeneği ile erişilebilmektedir. Bu seçeneğin aktif olması ile birlikte, yeniden oluşturulacak ağın boyutlarına dair özelliklerin programa girilmesi gerekmektedir. Bu uygulama, modelin tamamında yakın ölçülere sahip ağlar ile duvarı yeniden modellemeyi sağlamaktadır. Uygulama sonucunda da yapısal analize aktarılacak olan modelde, zeminde bulunan ağlara atanacak olan ankastre mesnet mesafelerinin yakın olması sağlanmıştır.

5.2.6. Katman ayarı

Son adım olarak hazır halde bulunan modelin yapısal analiz programı tarafından tanımlanabilmesi amacıyla Geomagic programından dışa aktarılması ve katman ayarlarının yapılması gerekmektedir Katman ayarlarının yapılabilmesi için AutoCAD programı kullanılmıştır. AutoCAD ticari bir yazılımdır ve ücretsiz bir şekilde faydalanılamamaktadır. Belirli bir ücret ile profesyonel sürümü kullanılabilen bu programda, eğitim sürümü ile ücretsiz kullanım da gerçekleştirilebilmektedir. AutoCAD programına modelin

aktarılabilmesi için modelin, Geomagic programından DXF formatında (Drawing Exchange Format) dışa aktarılması gerekmektedir. Geomagic farklı birçok formatta modelin dışa aktarılmasına imkân tanımaktadır. Arayüzünde “Dosya (File)” sekmesi altında “Farklı Kaydet (Save As)” seçeneği ile dışa aktarılmak istenen format türü seçilebilmektedir.

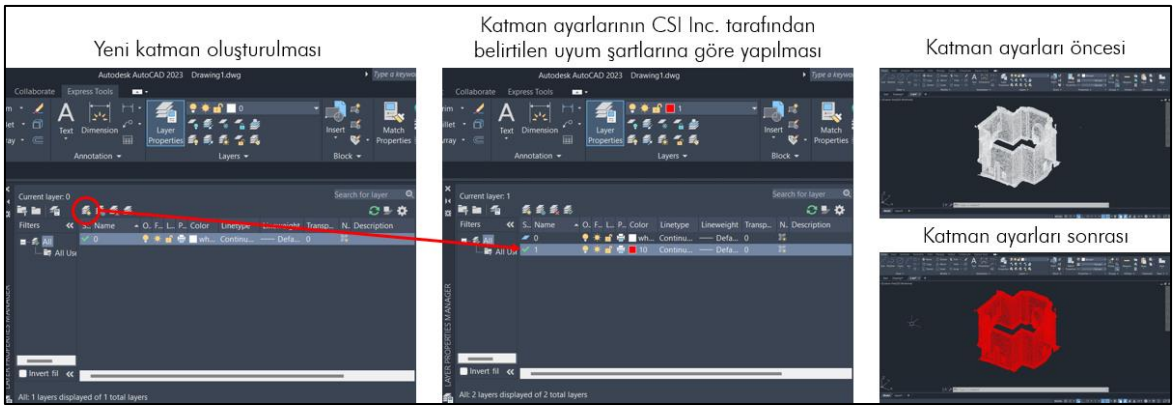
Beraberinde AutoCAD'e aktarılan dosyada, yeni bir katman oluşturmak ve içe aktarılan modeli katmana tanıtmak gerekmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen deprem davranış analizi için sonlu eleman yazılımı SAP2000 (SAP2000 CSI inc. Berkeley, Cal, ABD) seçilmiştir. Bu süreçte hedeflenen amaç SAP2000 veya diğer yapısal analiz programlarına aktarılabilen geometrik öğeler otomatik olarak dışa aktarmaktadır; ancak, tek sorun otomatik olarak AutoCAD içerisine "layer 0" adında otomatik bir katman oluşturmasıdır. Çalışma kapsamında kullanılacak olan sap2000 programında ise CAD uzantılı bir dosyanın aktarılmasını sağlamak için farklı bir katmanın kullanılması gerekmektedir. AutoCAD programı dışa aktarılan DXF formatını açabilmektedir. Açılan program arayüzünde “Ev (Home)” sekmesinde, “Katmanlar (Layers)” komutunda “Katman Özellikleri (Layer Properties)” seçeneği ile çizimlerdeki katmanlar kontrol edilebilmektedir. Burada yeni bir katman oluşturulması gerekmektedir. Yeni katmanın özellikleri, DXF model çiziminde “Üç Boyutlu Yüzey (3D Face)” tanımlı ağlar ile SAP2000 programında tanımlanacak nesneler arasındaki uyum ve gerçekleştirilmesi gereken düzenlemeler programın geliştiricileri CSI tarafından gösterilmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. DXF/DWG varlıklarının içe aktarılmadan önce SAP2000 ile koordine edilmesi gereken katmanları (CSI inc, 2021)

	DWG Varlıkları	Sap2000 Objesi	Renk
1	Nokta (Point)	Joint	Cyan
2	Çizgi (Line)	Çubuk (Frame)	Sarı
3	Nokta (Point)	Link (one-point)	Cyan
4	Çizgi (Line)	Link (two-point)	Yeşil
5	Üç Boyutlu Yüzey (3D Face)	Kabuk (Shell)	Kırmızı
6	N/A	Katı (Solid)	N/A

Katman ayarlarının yapılması ile birlikte modelin x, y, z koordinatlarına göre konumunun kontrol edilmesi ve gerekiyorsa yeniden konumlandırılması analizlerin daha anlaşılır gerçekleştirilebilmesi için önerilmektedir. Çalışmada, SAP2000 koordinat sistemi içerisinde

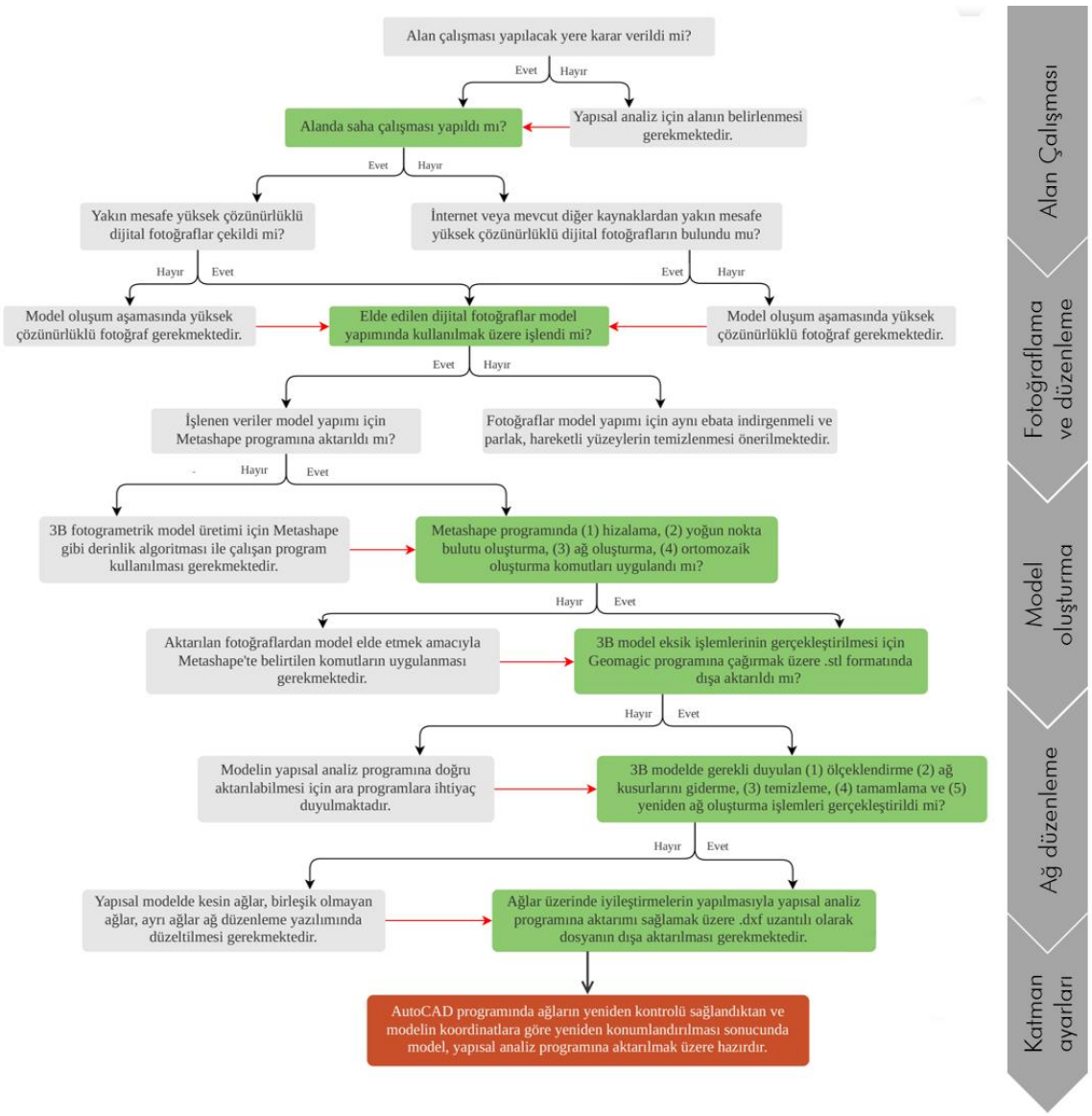
kullanımı kolaylaştırmak amacıyla tüm modeller AutoCAD programı üzerinde 0, 0, 0 noktasına orijinlenmiştir. DXF dosyası içerisinde düzenlemeler yapıldıktan sonra model SAP2000'e aktarılabilmektedir (Şekil 5.7). Sap2000 programına DXF veya DWG formatı üzerinden doğrudan aktarım yapılabilmektedir.



Şekil 5.7. Katman ayarlarının yapılması ve örnek bir model

Şekil 5.8 yapısal analiz programı için üretilecek verilerin hangi aşamalardan geçmesi gerektiğini açıklamaktadır. Öncelikle analizi yapılacak yapıya karar verilerek saha çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Saha çalışması yapılma imkanı yoksa, internet veya başka kaynaklar üzerinden yakın mesafeli ve yüksek çözünürlüklü dijital fotoğrafların elde edilmesi ile süreç yönetilebilir. Fakat gerek saha çalışmasından elde edilen gerekse mevcut kaynaklardan elde edilen fotoğraflar düzenlenmeye ihtiyaç duyabilmektedir. Fotoğraflar, derinlik algoritmasına göre model oluşturan programların hızlı tanımlama ve hizalama işlemleri için aynı boyutlarda olmalıdır. Fotoğraf içeriğinde aşırı parlak veya aşırı karanlık bölgelerin olmaması tavsiye edilmektedir. Fotoğraf düzenlemeleri ile birlikte program içerisinde gerçekleştirilen süreç başlatılabilir. Tez kapsamında Agisoft tarafından geliştirilen Metashape programı kullanılmıştır. Bu programa alternatif PhotoScan (geliştirici Agisoft), Recap (geliştirici Autodesk), RealityScan (geliştirici Capturing Reality), Meshroom (geliştirici Alice Vision) gibi programlar bulunmaktadır. Hizalama ve nokta bulutu oluşturma, yoğun nokta bulutu oluşturma, ağ oluşturma, ortomozaik model oluşturma gibi programın aşama aşama ilerleyeceği komutlar ile fotogrametrik model oluşturulmaktadır. Bu model, çok sayıda ağlardan meydana gelmektedir ve bu ağların strüktürel analiz programı öncesinde kusurlarının giderilmesi, eksik kalan yerlerin tamamlanması veya fazla ve ihtiyaç duyulmayan verilerin temizlenmesi, ağ sayısının kontrol edilmesi gibi işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle fotogrametrik model programında ağlar, STL

formatında dışarıya aktarılmakta ve ağ düzenleme programları tarafından açılabilmektedir. Tez kapsamında Oqton tarafından geliştirilen Geomagic Wrap programı ağ düzenleme işlemlerinde kullanılmıştır. Bu programa alternatif olarak Rhino (geliştirici Rhinoceros), MeshLab (geliştirici Visual Computing Lab.), CloudCompare (geliştirici Daniel Girardeau-Montaut), Creo Options Modeler (geliştiricisi PTC Digital Transformas), gibi programlar bulunmaktadır. Ağların düzenlenmesi ile birlikte oluşan model DXF (Drawing Exchange Format) formatında dışarıya aktarılarak katman ayarlarının yapılması üzere bir çizim programında açılabilmektedir. Katman ayarları için tez kapsamında Autodesk tarafından geliştirilen AutoCAD kullanılmıştır. Bu programa alternatif FreeCAD, LibreCAD, SketchUp, Revit gibi farklı birçok program bulunmaktadır.



Şekil 5.8. Fotoğraf verilerinin yapısal analize aktarılma sürecinin akış şeması

Tezde, kullanılan programların tamamı entegre bir biçimde kullanılmış, her programda düzenleme yapılmasa dahi ağlar kontrol edilerek bir sonraki programa geçilmiştir.

Yapısal analize doğru bir şekilde aktarılan modelde, her yapı için tanımlamaların yapılması ve analiz verilerinin tanıtılması gerekmektedir. Çalışmada fotogrametrik modelleme yöntemi ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan her iki model tekniği için de aynı tanımlamalar yapılmıştır. Bunun nedeni, çalışmanın amacının yapısal analiz sürecine entegre edilebilecek olan fotogrametrik modelleme tekniği ile klasik modelleme tekniği arasındaki farklılıkları ortaya koymak, sonuçları tespit etmek ve fotogrametrik modelleme tekniğini geliştirecek süreçleri açıklamak olmasıdır. Bu doğrultuda modelleme teknikleri dışında diğer verilerin değişkenlik göstermemesi gerekmektedir.

5.2.7. Yapısal analiz süreçlerinde ortak tanımlamalar

Tez kapsamında izlenen süreç sonunda aktarımın gerçekleştirilmesi ile birlikte oluşturulan modellerin yapısal davranışları incelenmiştir. Yapısal davranışların incelebilmesi için model üzerinde malzeme ve yük tanımlamalarının yapılması gerekmektedir. Öncelikle basit yapı elemanları ve beraberinde Artuklu Dönemi eserleri üzerinden modellerin üretildiği çalışmada, yapı sisteminin harç ile beraber doğrusal elastik davranış özelliği gösterdiği kabul edilmiştir. Malzeme özelliği tanımlamalarında, deneysel süreçte oluşacak maliyet, izin ve zaman problemleri nedeniyle literatürde yer alan mevcut kaynaklar üzerinden yakın malzeme özellikleri seçilmiştir (Çizelge 5.3). Ancak, kesin bir yapısal analiz sürecinde, malzemelerin mekanik özelliklerinin deneysel yollarla ortaya çıkarılmasını gerektirdiği unutulmamalıdır.

Çizelge 5.3. Tezde oluşturulan sonlu elemanlar modelleri üzerine tanımlanan malzeme özellikleri (Altunışık vd., 2016: 1339; Can vd., 2012: 681)

Eleman Türü	Elastisite Modülü (kN/m^2)	Özgül Ağırlık (kN/m^3)	Poisson Oranı
Taş Duvarlar (Harç ile birlikte)	450.000,00	24,00	0,2

Modeller üzerinde, kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmelidir. Kabuk (SHELL) eleman olarak yapısal analiz programlarında modellemelerin gerçekleştirildiği çalışmada, kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı kesit özelliği “Kalın Kabuk (Shell – Thick)” olarak

belirlenmiştir. Fakat duvar kalınlığı ölçüleri, modellerin gerçek özellikleri referans alınarak tanımlanmıştır ve ortak bir kalınlık ölçüsü bulunmamaktadır.

Modal ve sabit yük analizi gerçekleştirilen modellerde, statik ve dinamik yük analizleri de gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sırasında, modellerin ilk 12 moduna ait veriler dikkate alınmıştır. Düzenli ankastre sistem için Türkiye Deprem Yönetmeliği gereğince ilk 4 modun dikkate alınması yeterli olmaktadır. İlk 4 modun dikkate alınması yönetmelikte verilen, göz önüne alınan birbirine dik x ve y yatay deprem doğrultularının her birinde, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütlesinin %90'ından daha az olmaması kuralına göre belirlenmiştir. Düzensiz sistemde ise bu şart ancak ilk 12 modun dikkate alınmasıyla sağlanabilmektedir (TBDY, 2018; Soyluk, 2010).

5.3. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Yığma Duvar Üzerinden İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, Mardin Artuklu Üniversitesi (MAÜ) Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'ne ait avluda bulunan kesme taştan oluşan yığma bir duvar modellenmiştir. Duvar yüzeyi içerisinde 2,45 x 4,86 m boyutlarındaki düz duvar sınırı belirlenmiştir (Resim 5.1). Yığma ve açıklığı olmayan bu duvar fotogrametrik ve klasik yöntem ile modellenerek yapısal analiz programına aktarılmış ve sismik davranışları modelleme tekniklerinin sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile analiz edilmiştir.

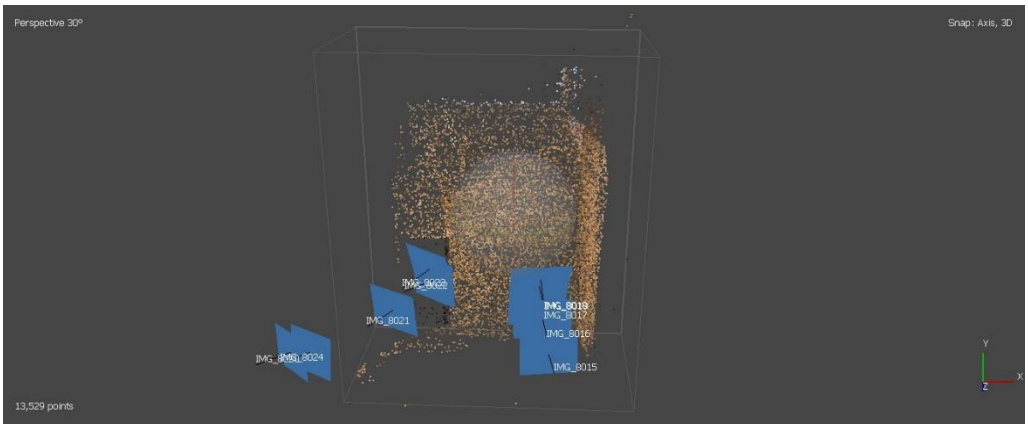


Resim 5.1. Modeli oluşturulan duvarın planı ve görünümleri (kesikli sınır içerisinde kalan duvarın analizi gerçekleştirilmiştir.)

5.3.1. Fotogrametrik yöntem ile yığma duvar modeli

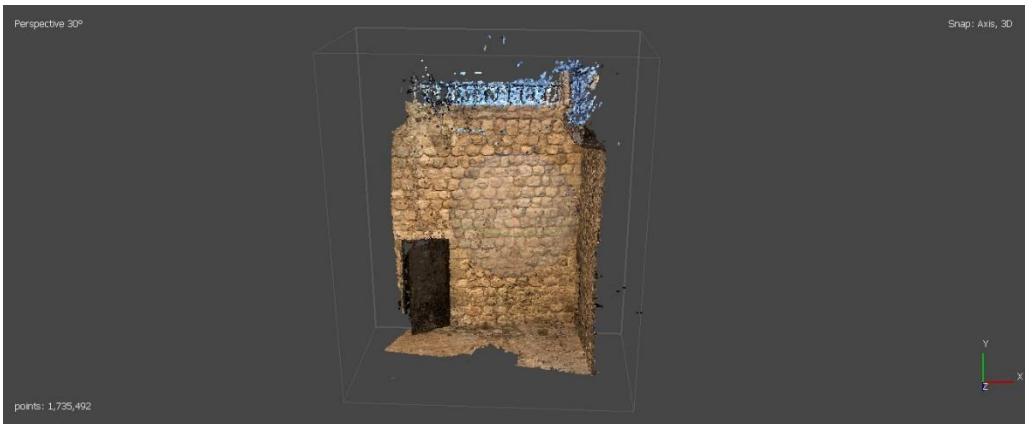
Fotorgrametrik modeli oluşturulacak olan yığma duvar için 10 adet fotoğraf çekilmiş ve program çekilen fotoğrafların 10 adetini tanımlayarak hizalamıştır. Akıllı telefon aracılığı ile çekile bu fotoğraflar 3024 x 4032 piksel boyutuna ve 72 DPI yatay ve düşey çözünürlüğe sahiptir. Fotoğrafın tanımlanma ve model oluşturulma süreci, beş ana adımdan oluşmuştur:

1. İlk adım olan kamera hizalama aşamasında çekilen 10 adet fotoğrafın tamamı programa yüklenmiştir. Bu adım sonucunda nokta bulutundan ve kamera açılarından oluşan bir model ortaya çıkmıştır (Şekil 5.9).



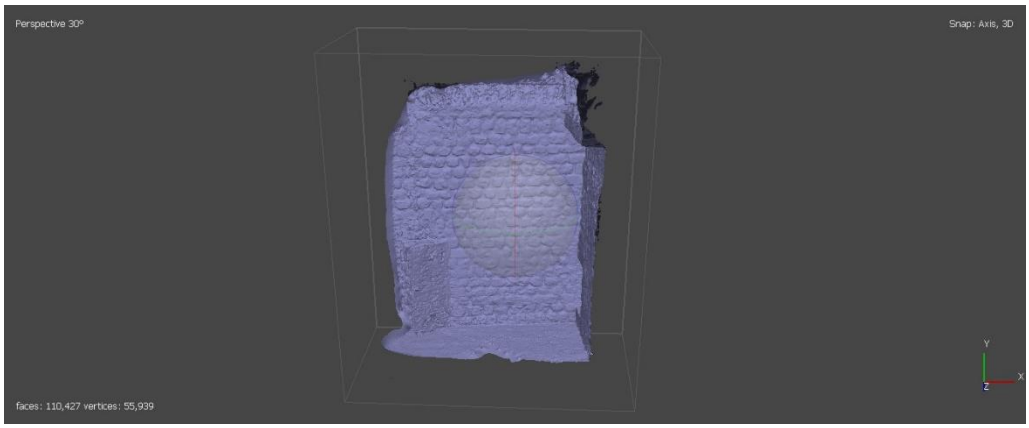
Şekil 5.9. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu

2. Hizalama aşamasının tamamlanması ile birlikte yığma duvarın yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 5.10). Metashape programı, kamera hizalamasına bağlı olarak daha yoğun ve ayrıntılı bir nokta bulutu oluşturmaktadır.



Şekil 5.10. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından elde edilen yoğun nokta bulutu

3. İkinci işlemin ardından, nokta bulutları ağlara dönüştürülmüştür (Şekil 5.11). Metashape, önceki adımdan elde edilen yoğun nokta bulutlarına dayalı olarak nesneyi temsil eden bir 3D çokgen ağının yüzeyini yeniden yapılandırmaktadır.



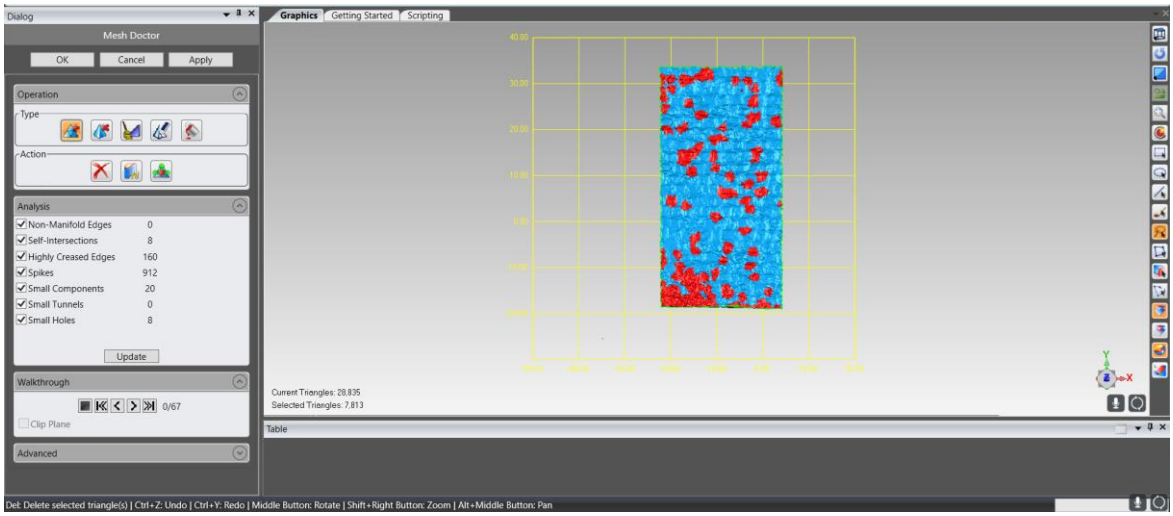
Şekil 5.11. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh)

4. Ağ oluşturulduktan sonra yığma duvar dışında kalan gereksiz veriler temizlenebilmektedir. Bu işlem ayrıca kullanılan Geomagic Wrap programı üzerinden de detaylı yapılabilmektedir. Bu modelde, kolay silinebilen elemanlar Metashape üzerinde temizlenmiştir. Devamında hassas ölçü ayarı ve daha detaylı temizleme işlemi için Geomagic Wrap programı kullanılmıştır.
5. Geometri ve ağın düzenlenmesi ile birlikte, farklı açıdan çekilen fotoğraflar üzerindeki dokular model üzerinde "Build Orthomastic" komutu ile görünür hale getirilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. MAÜ avlu duvarı - Metashape programından fotoğraf açılarından elde edilen dokuların modele aktarılması

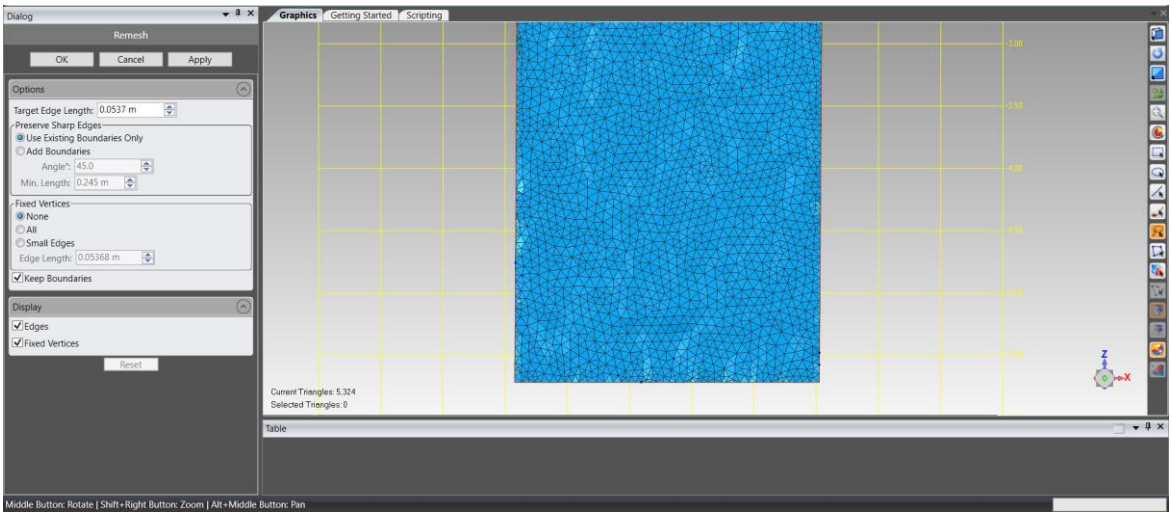
Elde edilen üç boyutlu modelin, yapı üzerinde kesin ölçüsü bilinen bir elemana göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Tez kapsamında ölçeklendirme işlemi, Geomagic Wrap programında gerçekleştirilmiştir. Avlu duvarı üzerinde 2,45 m olarak alınan kesin ölçü noktalarına göre ölçeklendirme gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme sonrası modelde bulunan ağ kusurlarının ortadan kaldırılması amacıyla, Geomagic Wrap programı içerisinde otomatik olarak tanımlı "ağ doktoru (Mesh Doctor)", poligon ağı otomatik olarak modelin aktarıldığı sırada aktif olmuştur (Şekil 5.13). Aktif olmadığı durumlarda, Geomagic Wrap ara yüzünde "Çokgenler (Polygons)" sekmesine gelerek manuel olarak da "ağ doktoru" aktif edilip uygulanabilmektedir. Yığma avlu duvarı üzerinde ağ doktorunun aktifleşmesi ile düzeltilme işlemi onaylanmış ve modeldeki ağ kusurları giderilmiştir.



Şekil 5.13. MAÜ avlu duvarı - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi

Tez kapsamında, ağ problemlerinin giderilmesinin ardından yapısal analiz programında daha doğru sonuçlar alabilmek ve dosya boyutunun çok yüksek olmasını engellemek adına ağ boyutlarını birbirine yakın hale getiren "Yeniden Ağ (Remesh)" komutu uygulanmıştır (Şekil 5.14). Komut, programın ara yüzünde "Çokgenler (Polygons)" sekmesinde erişilebilmektedir. Bu uygulama, duvarın tümünde yakın ölçülere sahip ağlar ile duvarı yeniden modellemeyi sağlamaktadır. Uygulama sonucunda da yapısal analize aktarılacak olan modelde, zeminde bulunan ağlara atanacak olan ankastre mesnet mesafelerinin yakın olması sağlanmıştır. Ayrıca bu mesnet sayılarının ortaya konması ile klasik modelleme tekniği ile oluşturulacak modelde de bu mesnet sayısına göre ağ boyutları ayarlanacaktır. Yapısal analiz programında en yakın karşılaştırmayı yapabilmek amacıyla her iki yöntemle

uygulanan modellerin ağ sayılarının yakın olması daha yakın sonuçlar alabilmek için önemli bir adımdır. Bununla birlikte ağ sayılarının statik ve dinamik analiz sonuçlarına etkisini görebilmek adına farklı ağ boyutlarına sahip modeller oluşturulmuştur.



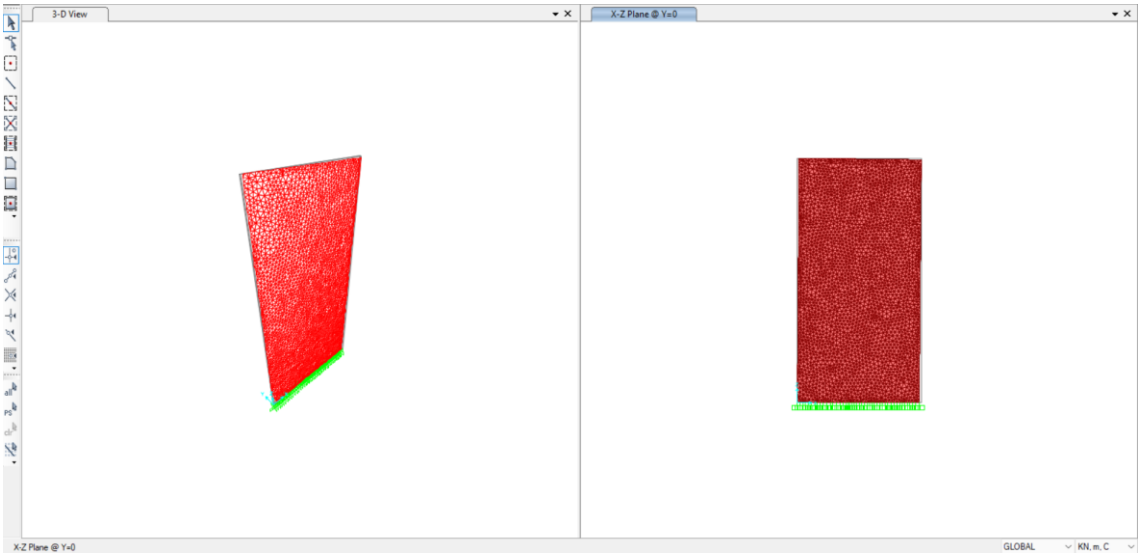
Şekil 5.14. MAÜ avlu duvarı - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü

Yakın boyutlara indirilen ağlar sonucu model, AutoCAD programına aktarılmaya hazır hale gelmiş ve Geomagic Wrap programından DXF formatında dışa aktarılmıştır. Tez kapsamında yapısal analiz için kullanılan SAP2000 programı için AutoCAD üzerinde katman ayarlarının yapılması gerekmektedir. AutoCAD programında üç boyutlu yüzey (3D Face) olarak ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan "0" katmanına gelen ağların SAP2000'e aktarımı sırasında kabuk eleman olarak tanımlanabilmesi için kırmızı renkli yeni bir katman oluşturmuştur.

Tamamlanan süreç sonunda modeli oluşturulan avlu duvarı, SAP2000 programına aktarılmıştır. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Yığma duvar fotogrametrik modeli, SHELL eleman olarak programa aktarılmıştır.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 45 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 2797 düğüm noktası ve 5319 SHELL eleman ile oluştuğu görülmüştür. Bundan sonraki aşamalarda sap2000 programında analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.15).

- Kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı 0,7 m seçilmiş ve “Kalın Kabuk (Shell – Thick)” kesit özelliği belirlenmiştir.



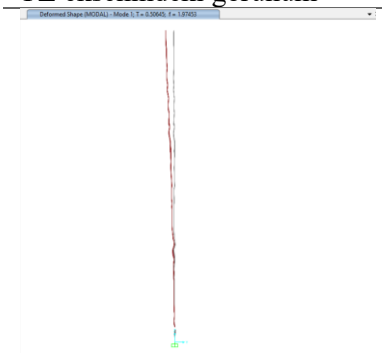
Şekil 5.15. Fotogrametrik modelleme tekniği aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan avlu duvarı modeli

Fotogrametrik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.4’te ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.5’te görülmektedir.

Çizelge 5.4. MAÜ avlu duvarı - Fotogrametrik modelin periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.50645	0.000001694	0.62016	2.171E-07
MODAL	Mod	2	0.164237	0.61999	0.0000001	0.00002193
MODAL	Mod	3	0.126516	0.00022	1.586E-08	1.913E-08
MODAL	Mod	4	0.086219	0.000005386	0.19842	0.00018
MODAL	Mod	5	0.045735	0.00009031	0.000005474	0.81025
MODAL	Mod	6	0.042475	0.22884	0.000002643	0.00006959
MODAL	Mod	7	0.040995	0.00108	0.000008754	0.00016
MODAL	Mod	8	0.033489	0.00001481	0.07065	0.00085
MODAL	Mod	9	0.023053	0.000003747	0.000008096	4.504E-07
MODAL	Mod	10	0.021231	0.0001	0.00131	1.228E-07
MODAL	Mod	11	0.02022	0.05728	0.00001102	0.0000046
MODAL	Mod	12	0.018794	0.00005645	0.03447	0.00002343

Çizelge 5.5. MAÜ avlu duvarı - Fotogrametrik modelin ilk üç moda ait mod şekilleri

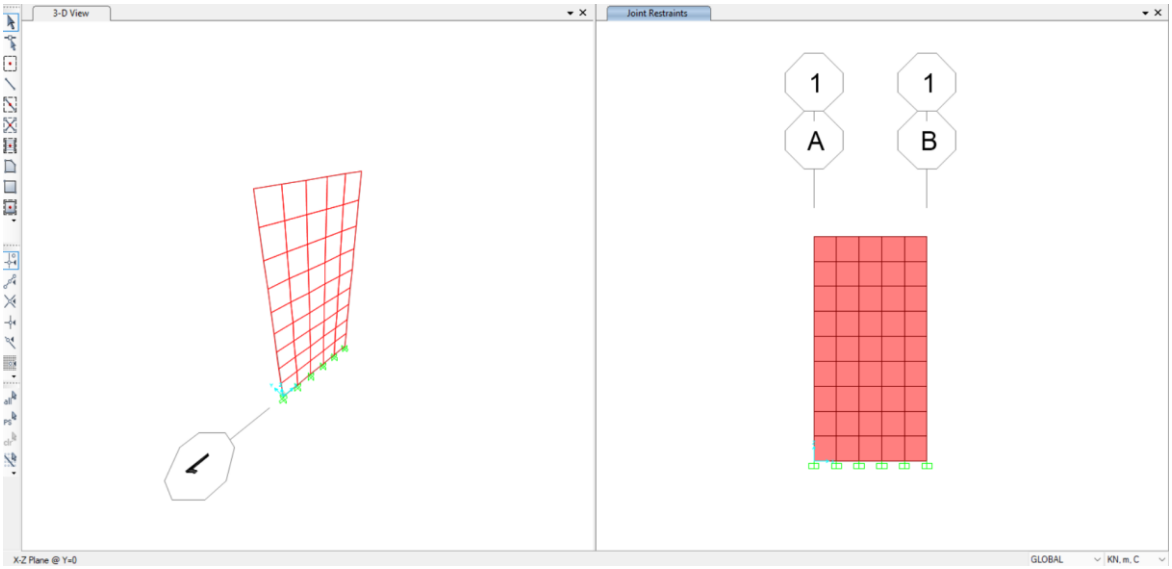
Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (X yönünde ötelenme) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

5.3.2. Klasik yöntem ile yığma duvar modeli

Yukarıda belirtilen fotogrametrik modelleme tekniği ile oluşturulan modelin yapısal analiz sonucu mod değerleri ve şekillerine, klasik modelleme tekniği sonuçlarının yakınlık derecesini belirlemek adına aynı ölçülerde (2,45 x 4,86 m) klasik yöntem ile modeller oluşturulmuştur. Klasik modeller oluşturulurken yapıdaki ağ boyutlarının ve sayılarının analiz sonuçlarına etkisini görebilmek amacıyla iki farklı ağ ölçüsüne sahip model oluşturulmuştur. 0,6 x 0,6 m boyutunda büyük ağlardan oluşturulan model GMODEL-1, 0,075 x 0,075 m boyutunda küçük ağlardan oluşturulan model GMODEL-2 olarak adlandırılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda sap2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda 0,6 x 0,6 m ağ boyutlarına sahip sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Yığma duvar SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 6 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 60 düğüm noktası ve 45 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Resim 5.16).
- Fotogrametrik model kullanılarak yapılan analizde kullanılan değerlerin tümüyle aynı atamalar gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı 0,7 m seçilmiş ve "Kalın Kabuk (Shell – Thick)" kesit özelliği belirlenmiştir.



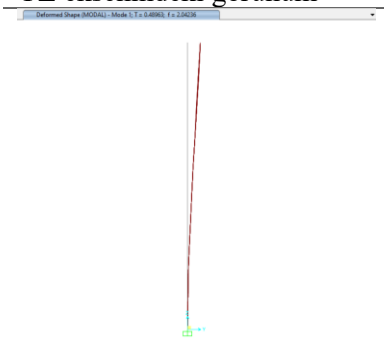
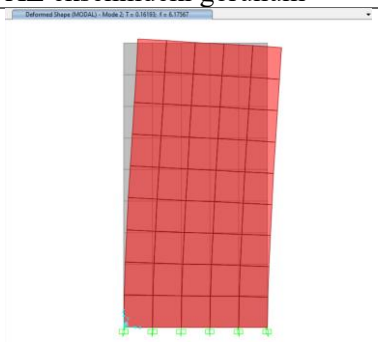
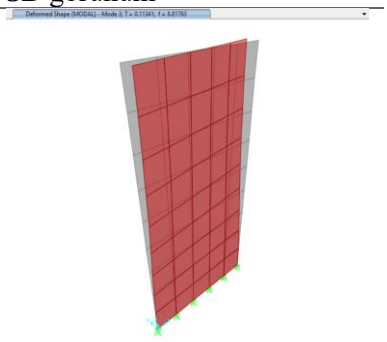
Şekil 5.16. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan 0,6 x 0,6 m boyutunda ağlardan oluşturulan GMODEL-1

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek ve mod ve periyot değerlerinin fotogrametrik model ile oluşturulan model ile yakınlık derecesini görmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.6'da ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.7'de görülmektedir.

Çizelge 5.6. GMODEL-1 periyot ve ötelenme değerleri

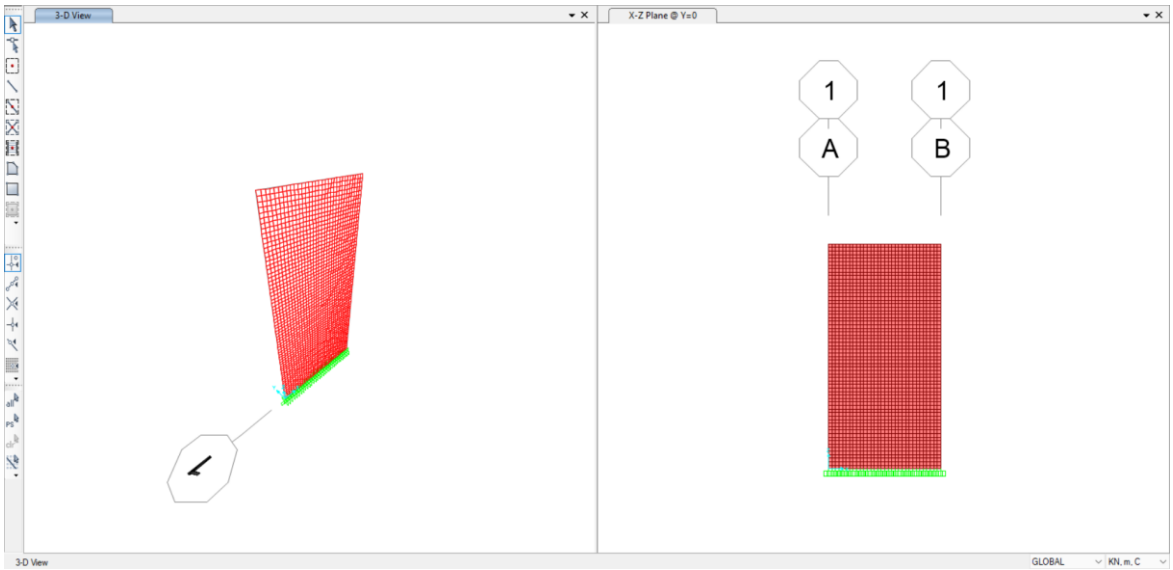
Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.489629	0	0.64999	0
MODAL	Mod	2	0.161926	0.64299	0	0
MODAL	Mod	3	0.113409	0	0	1.315E-19
MODAL	Mod	4	0.084688	0	0.20994	0
MODAL	Mod	5	0.045282	5.797E-17	8.453E-18	0.84997
MODAL	Mod	6	0.042164	0.24088	3.975E-19	2.419E-18
MODAL	Mod	7	0.038421	8.434E-16	1.622E-18	1.856E-17
MODAL	Mod	8	0.033468	0	0.07242	1.843E-18
MODAL	Mod	9	0.022754	7.233E-18	0.0007	2.425E-15
MODAL	Mod	10	0.022727	4.28E-15	2.032E-16	4.797E-17
MODAL	Mod	11	0.020268	0.05905	7.016E-15	1.129E-13
MODAL	Mod	12	0.019337	5.894E-15	0.03348	6.747E-15

Çizelge 5.7. GMODEL-1 ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (X yönünde ötelenme) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

Fotogrametrik yöntem ile oluşturulan model sonuçlarında ağ sayılarının etkisinin ve yakınlık derecesinin tespiti amacıyla klasik modelleme tekniği ile 0,075 x 0,075 m ağ boyutlarına sahip GMODEL-2, SAP2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Yığma duvar SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 2145 düğüm noktası ve 2048 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Resim 5.17).



Şekil 5.17. 0,075 x 0,075 m boyutunda ağlardan oluşturulan GMODEL-2

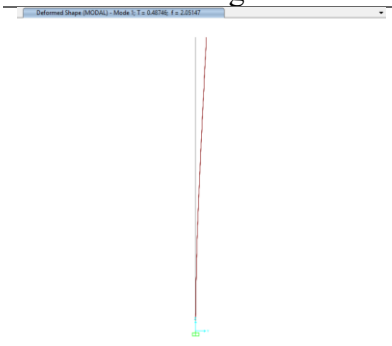
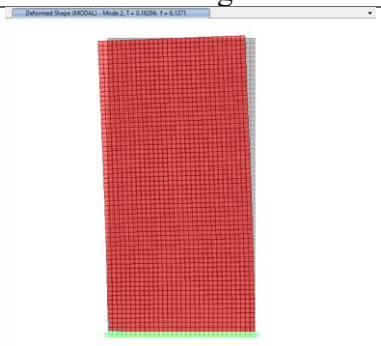
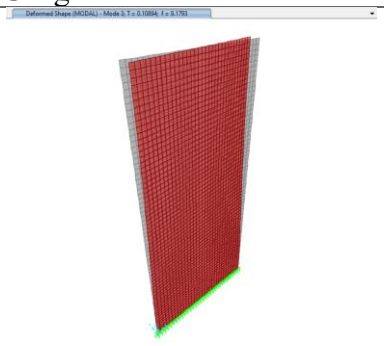
- Kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı modal analizi gerçekleştirilen diğer modeller ile aynı olacak şekilde 0,7 m seçilmiş ve “Kalın Kabuk (Shell – Thick)” kesit özelliği belirlenmiştir.

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek üzere modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.8’de ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.9’da görülmektedir.

Çizelge 5.8. GMODEL-2 periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.487456	0	0.62175	0
MODAL	Mod	2	0.162943	0.62191	0	0
MODAL	Mod	3	0.108941	0	0	0
MODAL	Mod	4	0.083213	2.712E-18	0.20029	3.636E-18
MODAL	Mod	5	0.045246	1.386E-17	3.224E-19	0.81351
MODAL	Mod	6	0.04214	0.23095	1.908E-17	4.207E-17
MODAL	Mod	7	0.036572	1.722E-17	1.958E-18	1.437E-18
MODAL	Mod	8	0.032441	1.547E-15	0.07085	4.17E-16
MODAL	Mod	9	0.021215	2.499E-16	8.609E-17	2.766E-18
MODAL	Mod	10	0.020266	3.564E-15	0.00105	5.569E-16
MODAL	Mod	11	0.02006	0.05791	1.633E-15	3.581E-16
MODAL	Mod	12	0.018333	3.699E-15	0.03509	3.471E-15

Çizelge 5.9. GMODEL-2 ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (X yönünde ötelenme) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

5.3.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan yığma duvar modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

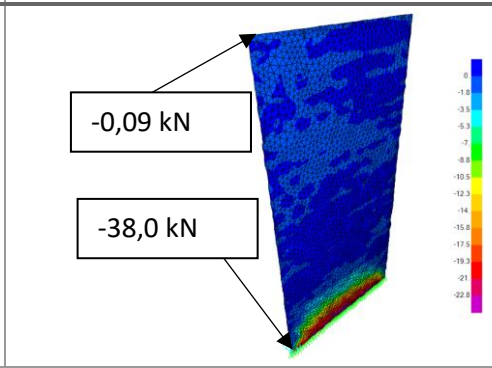
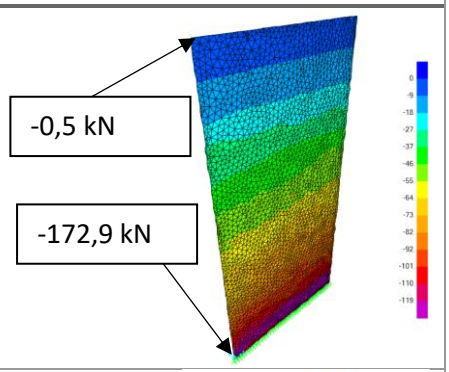
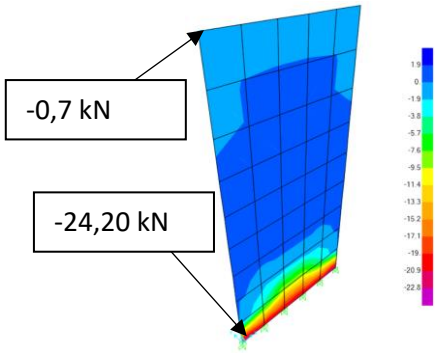
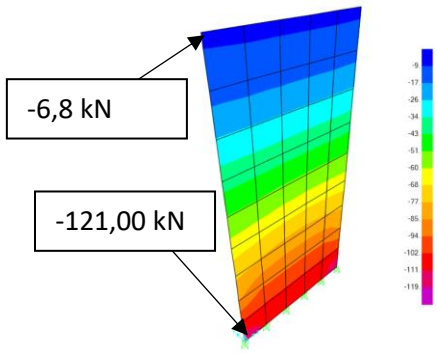
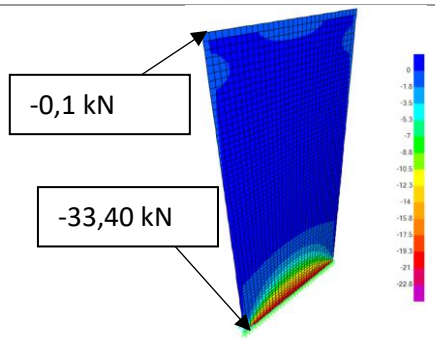
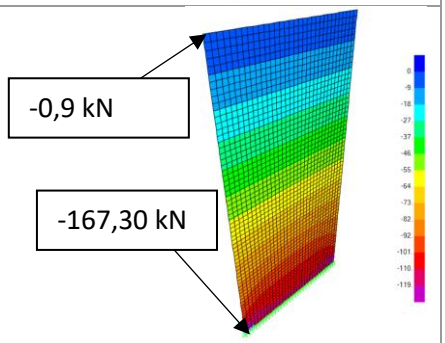
Tezde, basit yapı elemanlarının farklı modelleme teknikleri ile modellendiği bölümlerde, modelleme teknikleri arasındaki avantajları ve dezavantajları ortaya koymak amacıyla hızlı uygulanabilecek yığma duvarların kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanmıştır. Öncelikle her üç model için yukarıda detaylandırılan mod değerlerinin karşılaştırılmasına Çizelge 5.10'da yer verilmiştir. Modal analizlerde gerçekleşen ötelenme durumları her üç modelde de benzerlik göstermektedir. Mod 1, Y yönünde ötelenme; Mod 2, X yönünde ötelenme; Mod 3, burulma hareketine neden olmuştur ve analiz sonucu ortaya çıkan periyot ve ötelenme değerleri de yakınlık göstermektedir. Yığma duvar için gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve modelde oluşturulan ağ sayısının, modal analiz sonuçlarına büyük bir etki etmediği görülmektedir.

Çizelge 5.10. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen yığma avlu duvarının modal analiz sonuçları

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)
FOTOGRAMETRİK MODEL	Mod	1	0.50645	0.000001694	0.62016
	Mod	2	0.164237	0.61999	0.0000001
GMODEL-1	Mod	1	0.489629	0	0.64999
	Mod	2	0.161926	0.64299	0
GMODEL-2	Mod	1	0.487456	0	0.62175
	Mod	2	0.162943	0.62191	0

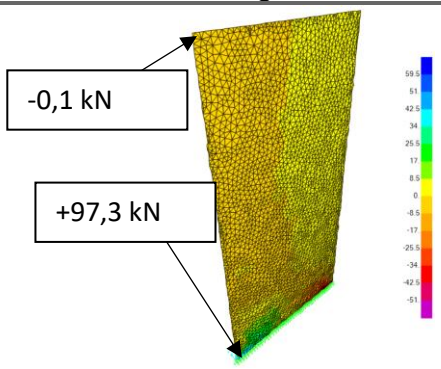
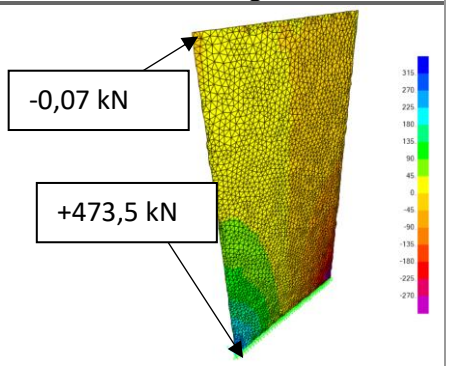
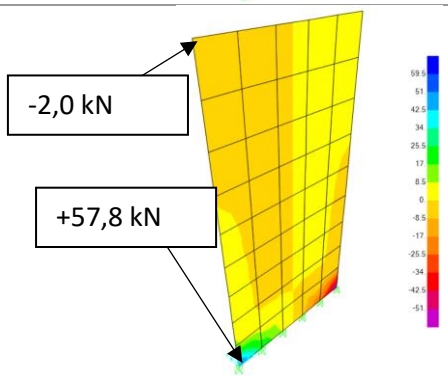
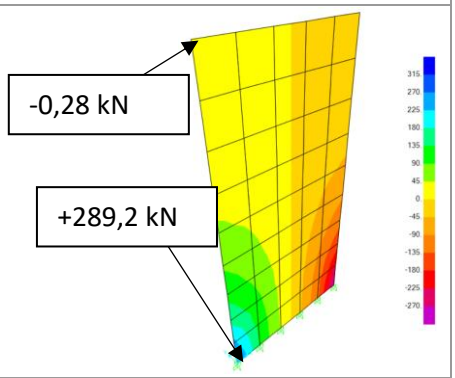
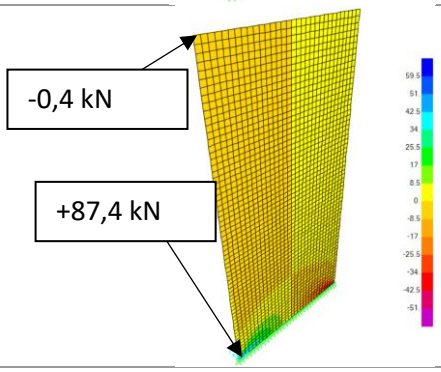
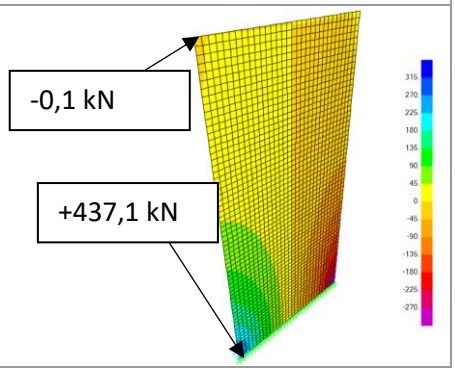
Avlu duvarına ait oluşturulan modeller üzerindeki sabit yük gerilmeleri Çizelge 5.11'de detaylandırılmıştır. Gerilme değerleri ele alındığında, aynı noktalarda yakın değerlerin olduğu görülmektedir. Özellikle fotogrametrik model ile GMODEL-2 arasındaki gerilme değerlerinin, ağ sayılarına yakın olduğu göz önüne alındığında, ağ sayısının gerilme değerleri üzerindeki etkisinin belirgin olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, gerilme analizlerinde ağ sayısının kritik bir faktör olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, gerilme değerlerinin uyumlu bir oranda artıp azaldığı, gerilme değerlerini temsil eden renk kontürlerinden açıkça görülebilmektedir. Bu durumda, değerler farklılaşsa dahi sonuçların paralellik gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 5.11. MAÜ avlu duvarı - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	S11 Gerilme Değerleri	S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
GMODEL-1		
GMODEL-2		

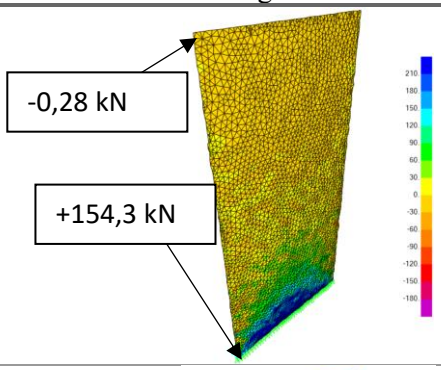
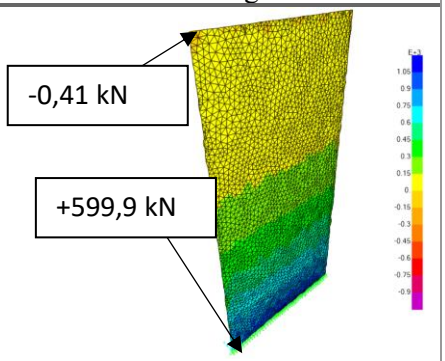
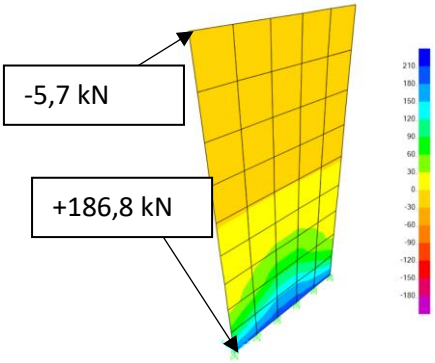
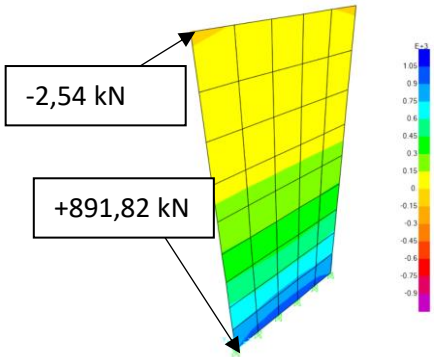
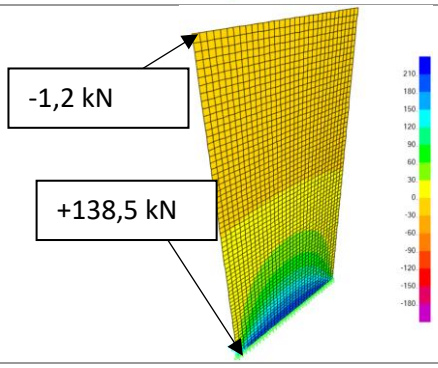
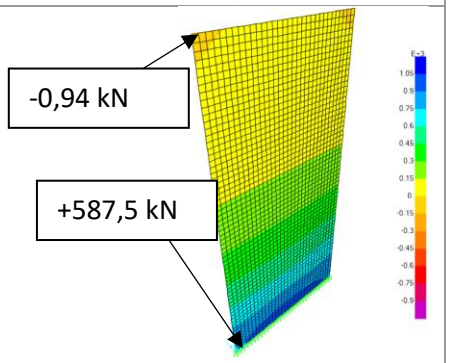
Yığma duvarların kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanması sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yatay yüklerin etkisi altında gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarının, sabit yükler altında gerçekleştirilen analiz sonuçları ile benzerlik gösterdiği ve ağ sayıları benzerlik gösteren modellerin, gerilme değerlerinin daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca değerlerin farklılık gösterdiği modeller incelendiğinde, gerilme değerlerinin uyumlu bir oranda artıp azaldığı, gerilme değerlerini temsil eden renk kontürlerinden açıkça görülebilmektedir. Bu durumda, değerler farklılaşsa dahi sonuçların paralellik gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 5.12. MAÜ avlu duvarı - X düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
GMODEL-1		
GMODEL-2		

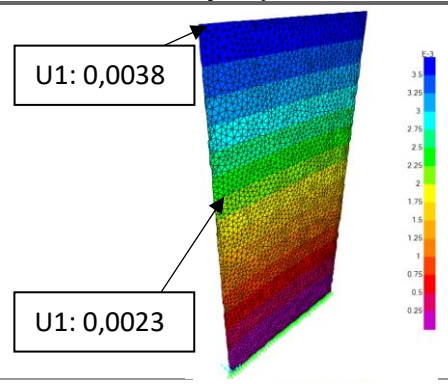
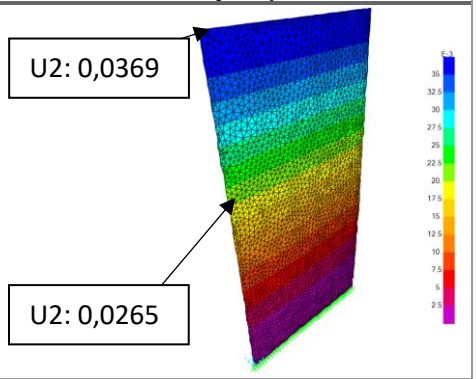
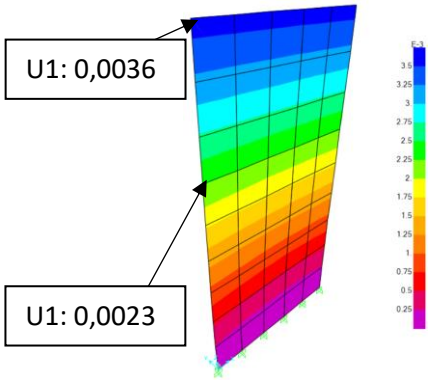
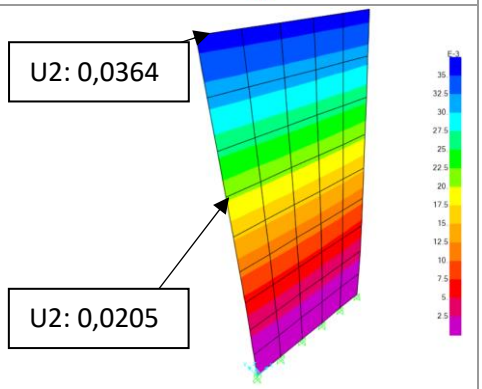
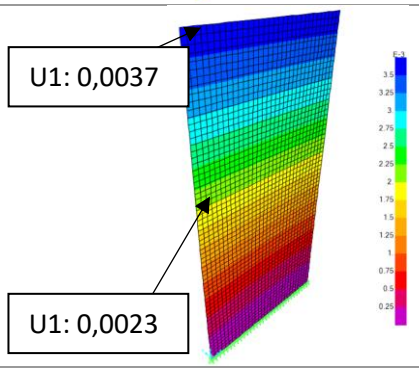
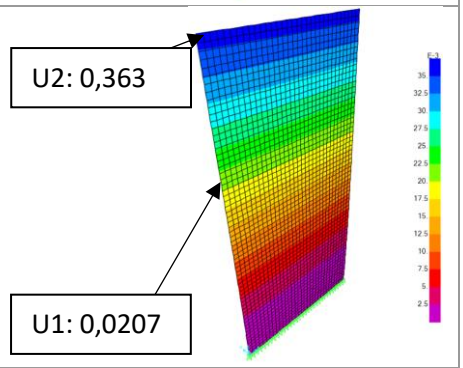
Yapılan analize göre, Y düzleminde uygulanan yatay yük analizi sonuçları ile X düzleminde uygulanan yatay yük analizi sonuçları arasında benzer durumlar gözlenmiştir. Ağ sayısı yakın olan avlu duvarı modelleri arasındaki gerilme değerlerinin daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç her iki düzlemde de aynı türde yatay yüklerin uygulanmasını da ifade etmektedir.

Çizelge 5.13. MAÜ avlu duvarı - Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
GMODEL-1		
GMODEL-2		

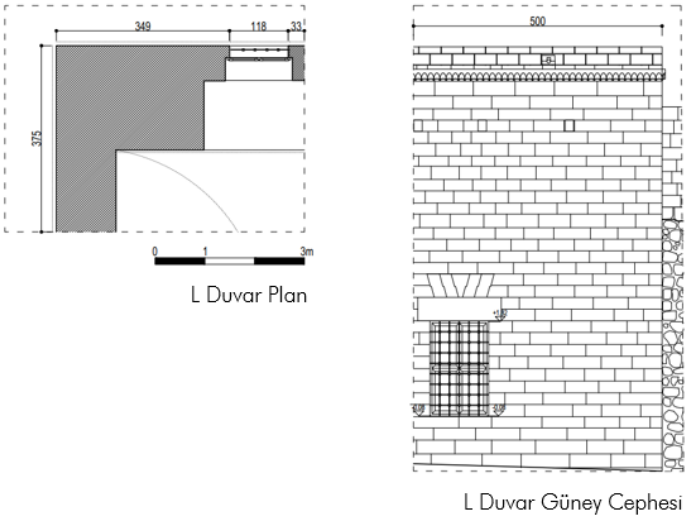
Yığma duvarlara tanımlanan yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analizde, deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizgileri Çizelge 5.14'te detaylandırılmıştır. Değerler, ağ sayılarının yer değiştirme sonuçlarında bir farklılık oluşturmadığını göstermektedir. Her üç model için de çok yakın yer değiştirme sonuçlarına ulaşılmıştır. Ağ sayısındaki farklılıklar, deformasyonlarda belirgin bir etkiye yol açmamıştır. Bu bulgular, yapısal analizin, yatay yükler altında deformasyonların değerlendirilmesi açısından, farklı ağ sayılarına sahip modellerde güvenilir sonuçlar üretebildiğini ve bu sonuçların birbirine yakın olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.14. MAÜ avlu duvarı - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm)

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
Fotogr. Model		
GMODEL-1		
GMODEL-2		

5.4. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Tek Açıklığa Sahip L Plan Tipi Yığma Duvar Üzerinden İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, Melik Mahmut Cami güney duvarında kesme taştan oluşan yığma L biçimli ve tek açıklığa sahip duvar parçası modellenmiştir. L biçimli duvarın, doğu-batı doğrultusunda uzanan ve pencerenin bulunduğu yüzeyinin ölçüsü 5,00 m ve kuzey-güney doğrultusunda uzanan yüzeyinin ölçüsü 3,75 m olarak belirlenmiştir. Yükseklik ise caminin mevcut yüksekliği olan 7,42 m olarak kullanılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. L plan tipi duvara ait plan ve cephe ölçüleri

Yığma ve tek açıklığa sahip bu duvar, Birinci Cadde üzerinde yer almaktadır (Resim 5.2). Fotogrametrik ve klasik yöntem ile modellenerek yapısal analiz programına aktarılan duvar, modelleme tekniklerinin sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile analiz edilmiştir.

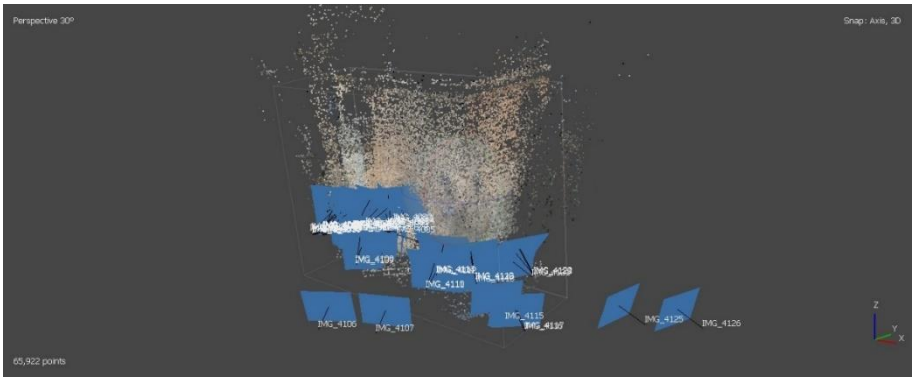


Resim 5.2. Modeli oluşturulan L duvarın görünümleri (kesikli sınır içerisinde kalan duvarın analizi gerçekleştirilmiştir.)

5.4.1. Fotogrametrik yöntem ile L plan tipi duvar modeli

Fotogrametrik modeli oluşturulacak olan duvar için 54 adet fotoğraf çekilmiş ve program çekilen fotoğrafların 54 adetini tanımlayarak hizalamıştır. Akıllı telefon aracılığı ile çekilen bu fotoğraflar 3024 x 4032 piksel boyutuna ve 72 DPI yatay ve düşey çözünürlüğe sahiptir. Fotoğrafın tanımlanma ve model oluşturulma süreci, beş ana adımdan oluşmuştur:

1. İlk adım olan kamera hizalama aşamasında çekilen 54 adet fotoğrafın tamamı programa yüklenmiştir. Bu adım sonucunda nokta bulutundan ve kamera açılarından oluşan bir model ortaya çıkmıştır (Şekil 5.19).



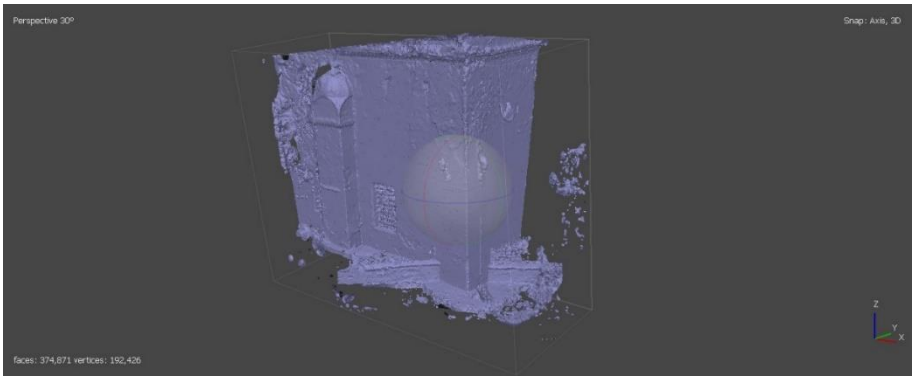
Şekil 5.19. L plan tipi duvar - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu

2. Hizalama aşamasının tamamlanması ile birlikte L plan tipi duvarın yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. L plan tipi duvar - Metashape programından elde edilen yoğun nokta bulutu

3. Yoğun nokta bulutu işleminin ardından, nokta bulutları ağlara dönüştürülmüştür (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. L plan tipi duvar - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh)

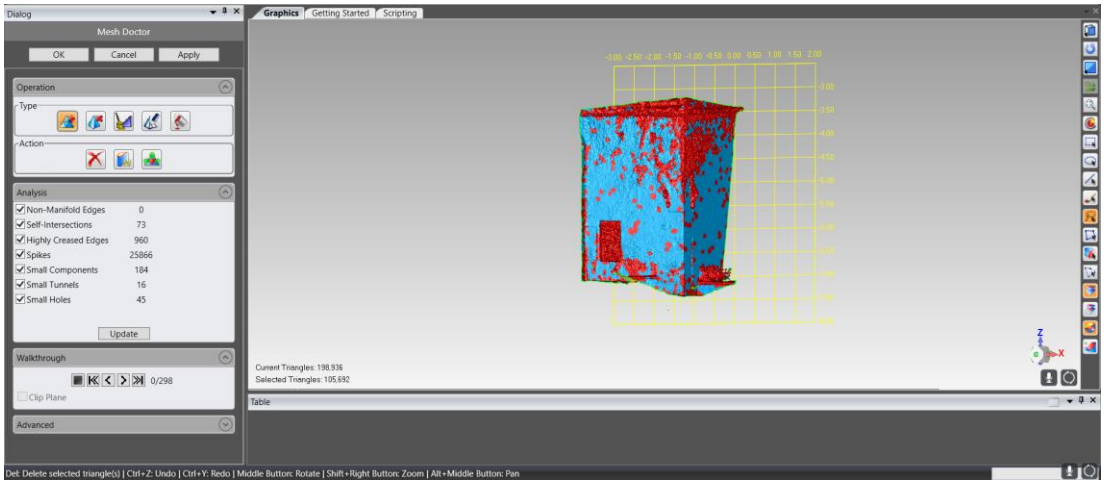
4. Ağ oluşturulduktan sonra L duvar dışında kalan gereksiz veriler temizlenebilmektedir. Bu işlem ayrıca kullanılan Geomagic Wrap programı üzerinden de detaylı yapılabilmektedir. Bu modelde, kolay silinebilen elemanlar Metashape üzerinde temizlenmiştir. Devamında hassas ölçü ayarı ve daha detaylı temizleme işlemi için Geomagic Wrap programı kullanılmıştır.
5. Geometri ve ağın düzenlenmesi ile birlikte, farklı açıdan çekilen fotoğraflar üzerindeki dokular model üzerinde "Build Orthomastic" komutu ile görünür hale getirilmiştir (Şekil 5.22).



Şekil 5.22. L plan tipi duvar - Metashape programından fotoğraf açılarından elde edilen dokuların modele aktarılması

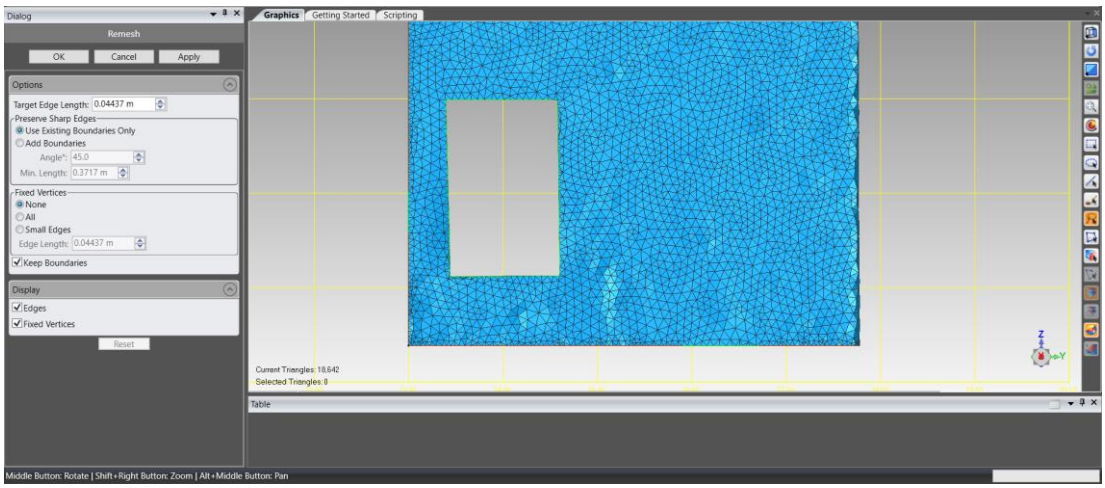
Elde edilen üç boyutlu modelin, yapı üzerinde kesin ölçüsü bilinen bir elemana göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Ölçeklendirme ve ağ temizleme işlemi, Geomagic Wrap programında gerçekleştirilmiştir. L plan tipi duvar modeli üzerinde 1,18 x 1,74 m boyutlara sahip tek açıklık pencere üzerinden kesin ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme sonrası modelde bulunan ağ kusurlarının ortadan kaldırılması amacıyla, program içerisinde otomatik olarak tanımlı "ağ doktoru (Mesh Doctor)", poligon ağı otomatik olarak modelin aktarıldığı sırada aktif olmuştur (Şekil 5.23). Aktif olmadığı durumlarda, Geomagic Wrap ara yüzünde "Çokgenler (Polygons)" sekmesine gelerek manuel olarak da "ağ doktoru" aktif edilip uygulanabilmektedir. Duvar üzerinde ağ doktorunun aktifleşmesi ile modeldeki ağ kusurları giderilmiştir. Tez kapsamında, ağ problemlerinin giderilmesinin ardından yapısal analiz programında daha doğru sonuçlar alabilmek ve dosya boyutunun çok yüksek olmasını engellemek adına ağ boyutlarını birbirine yakın hale getiren "Yeniden Ağ (Remesh)" komutu uygulanmıştır (Şekil 5.24). Bu uygulama, duvarın tümünde yakın ölçülere sahip ağlar ile duvarı yeniden modellemeyi sağlamaktadır. Uygulama sonucunda da yapısal analize aktarılacak olan modelde, zeminde

bulunan ağlara atanacak olan ankastre mesnet mesafelerinin yakın olması sağlanmıştır. Ayrıca bu mesnet sayılarının ortaya konması ile klasik modelleme tekniği ile oluşturulacak modelde de bu mesnet sayısına göre ağ boyutları ayarlanacaktır. Yapısal analiz programında en yakın karşılaştırmayı yapabilmek amacıyla her iki yöntemle uygulanan modellerin ağ sayılarının yakın olması daha yakın sonuçlar alabilmek için önemli bir adımdır.



Şekil 5.23. L plan tipi duvar - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi

Geomagic Wrap programında, ağ kusurlarının giderilebildiği gibi manuel olarak da istenmeyen ağlar silinebilmektedir. Özellikle fotogrametri tekniğinde, kapı ve pencere gibi açıklıkların da yüzey olarak tanımlanarak modelinin oluşması, bu açıklıkları manuel olarak temizlemeyi gerektirmektedir.

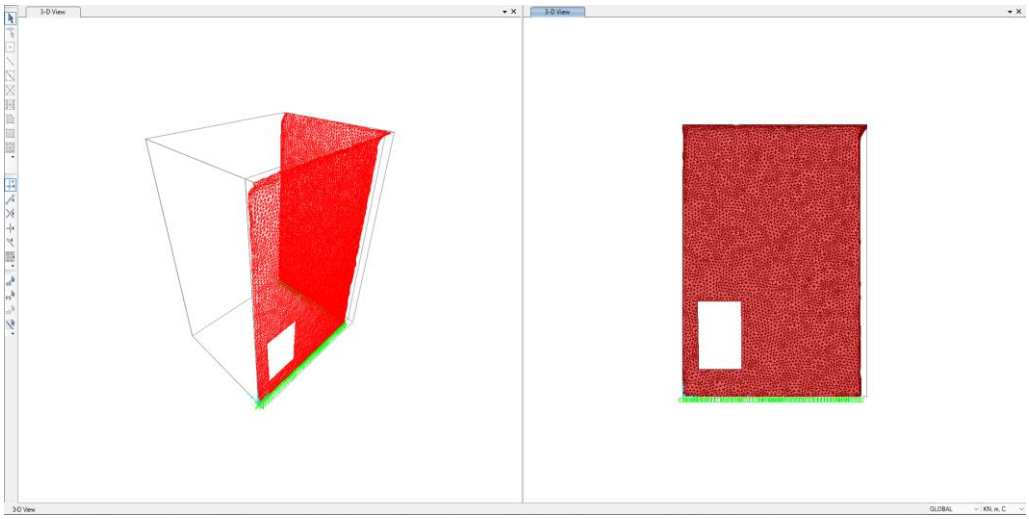


Şekil 5.24. L plan tipi duvar - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası pencere etrafının model görünümü

Yakın boyutlara indirilen ağlar sonucu model, AutoCAD programına aktarılmaya hazır hale gelmiş ve aktarılmak üzere Geomagic Wrap programından DXF formatında model dışa aktarılmıştır. Tez kapsamında yapısal analiz için kullanılan SAP2000 programı için AutoCAD üzerinde katman ayarlarının yapılması gerekmektedir. AutoCAD programında üç boyutlu yüzey (3D Face) olarak ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan "0" katmanına gelen ağların SAP2000'e aktarımı sırasında kabuk eleman olarak tanımlanabilmesi için kırmızı renkli yeni bir katman oluşturmuştur.

Tamamlanan süreç sonunda modeli oluşturulan L plan tipi duvar, SAP2000 programına aktarılmıştır. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- L plan tipi yığma duvarın fotogrametrik modeli, SHELL eleman olarak programa aktarılmıştır.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 132 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 9651 düğüm noktası ve 18718 SHELL eleman ile oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.25).
- Kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı 0,7 m seçilmiş ve "Kalın Kabuk (Shell – Thick)" kesit özelliği belirlenmiştir.



Şekil 5.25. Fotogrametrik modelleme tekniği aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan L plan tipine sahip duvar modeli

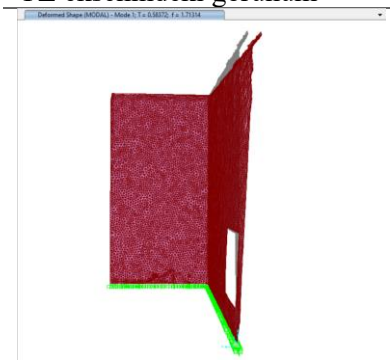
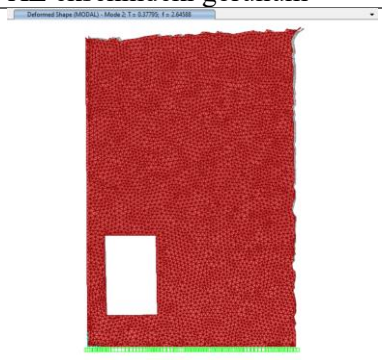
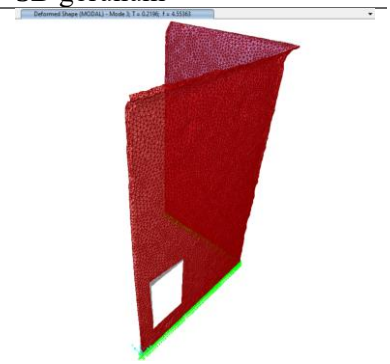
Fotogrametrik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek

amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.15'te ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.16'da görülmektedir.

Çizelge 5.15. L plan tipi duvar - Fotogrametrik modelin periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mode	1	0.583722	0.03902	0.28018	0.000001388
MODAL	Mode	2	0.377946	0.41833	0.14271	0.00025
MODAL	Mode	3	0.219605	0.00525	0.07494	0.00023
MODAL	Mode	4	0.184016	0.18762	0.12477	0.00263
MODAL	Mode	5	0.152099	0.01193	0.09627	0.000003669
MODAL	Mode	6	0.128098	0.07895	0.00955	0.00011
MODAL	Mode	7	0.088043	0.00002472	0.00316	0.00074
MODAL	Mode	8	0.077847	0.05875	0.00317	0.3708
MODAL	Mode	9	0.072861	0.00388	0.05463	0.23486
MODAL	Mode	10	0.068649	0.03052	0.01885	0.19465
MODAL	Mode	11	0.063477	0.0058	0.02398	0.00017
MODAL	Mode	12	0.061498	0.02123	0.00157	0.00404

Çizelge 5.16. L plan tipi duvar - Fotogrametrik modelin ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (X yönünde ötelenme) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

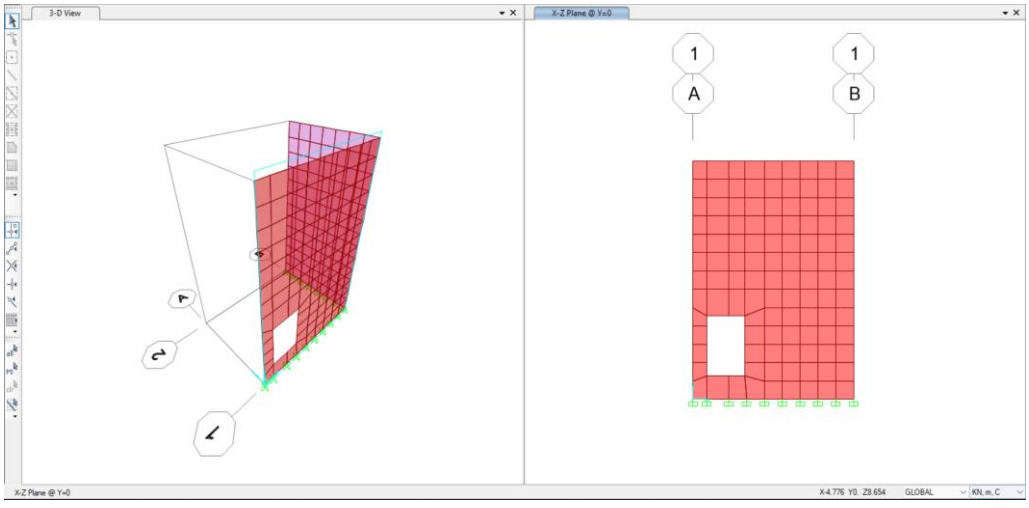
5.4.2. Klasik yöntem ile L plan tipi duvar modeli

Yukarıda belirtilen fotogrametrik modelleme tekniği ile oluşturulan L plan tipine ait modelin yapısal analiz sonucu mod değerleri ve şekillerine, klasik modelleme tekniği sonuçlarının yakınlık derecesini belirlemek adına aynı ölçülerde klasik yöntem ile modeller oluşturulmuştur. Yığma duvar modeli üzerinde, modeller üzerinde ağ sayıları karşılaştırılmış olsa da farklı formlara sahip yapılarda, ağ boyutlarının ve sayılarının analiz sonuçlarına

etkisini görebilmek ve yığma duvar modelinde elde edilen yakın değerlerinde değişiklik olup olmadığını tespit etmek üzere bu bölümde tekrar iki farklı ağ ölçüsüne sahip modeller oluşturulmuştur. 0,6 x 0,6 m boyutunda ağlardan oluşturulan model GMODEL-3, 0,1 x 0,1 m boyutunda küçük ağlardan oluşturulan model GMODEL-4 olarak adlandırılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda SAP2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda 0,6 x 0,6 m boyutlarında L plan tipine sahip duvarın sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Yığma duvar SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 17 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 235 düğüm noktası ve 200 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Şekil 5.26).
- Fotogrametrik model kullanılarak yapılan analizde kullanılan değerlerin tümüyle aynı atamalar gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı 0,7 m seçilmiş ve "Kalın Kabuk (Shell – Thick)" kesit özelliği belirlenmiştir.



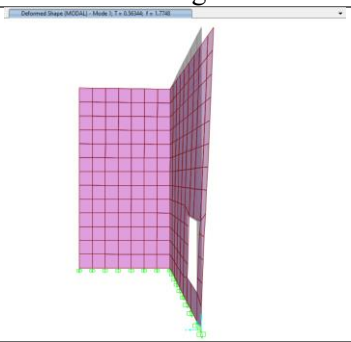
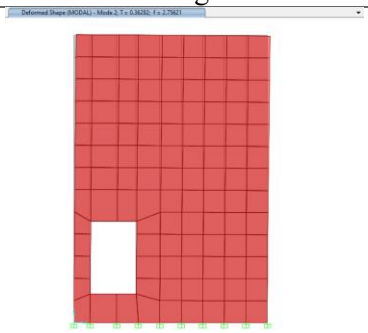
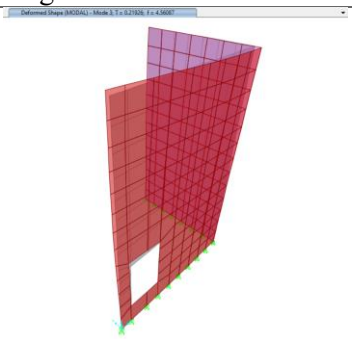
Şekil 5.26. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan 0,6 x 0,6 m boyutunda büyük ağlardan oluşturulan GMODEL-3

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, mod ve periyot değerlerinin fotogrametrik model ile oluşturulan model ile yakınlık derecesini görmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.17'de ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.18'de görülmektedir.

Çizelge 5.17. GMODEL-3 periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.563443	0.0337	0.31028	6.748E-10
MODAL	Mod	2	0.362817	0.4257	0.13488	0.00025
MODAL	Mod	3	0.219256	0.00308	0.0982	0.0002
MODAL	Mod	4	0.178526	0.21218	0.10891	0.00242
MODAL	Mod	5	0.146315	0.00907	0.09783	0.00002313
MODAL	Mod	6	0.124103	0.0822	0.0077	0.00023
MODAL	Mod	7	0.09138	0.00018	0.00191	0.0000763
MODAL	Mod	8	0.076314	0.05623	0.00388	0.41679
MODAL	Mod	9	0.072015	0.00163	0.06431	0.18512
MODAL	Mod	10	0.067823	0.04394	0.01159	0.23277
MODAL	Mod	11	0.062719	0.00275	0.02445	0.00002747
MODAL	Mod	12	0.060862	0.01932	0.00083	0.00194

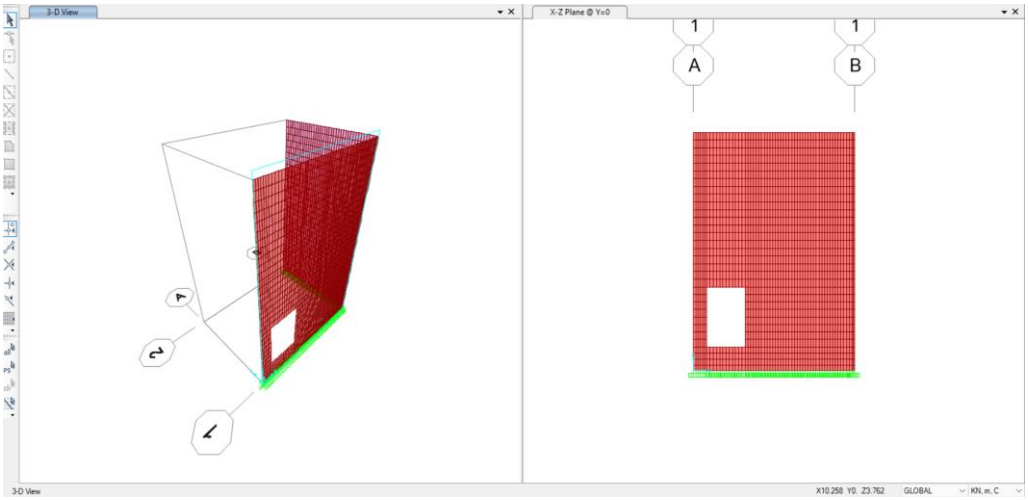
Çizelge 5.18. GMODEL-3 ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (X yönünde ötelenme) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

Fotogrametrik yöntem ile oluşturulan model sonuçlarında ağ sayılarının etkisinin ve yakınlık derecesinin tespiti amacıyla klasik modelleme tekniği ile 0,1 x 0,1 m ağ boyutlarına sahip GMODEL-4, SAP2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Yığma duvar SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 3223 düğüm noktası ve 3072 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Şekil 5.27).

- Kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı modal analizi gerçekleştirilen diğer modeller ile aynı olacak şekilde 0,7 m seçilmiş ve “Kalın Kabuk (Shell – Thick)” kesit özelliği belirlenmiştir.



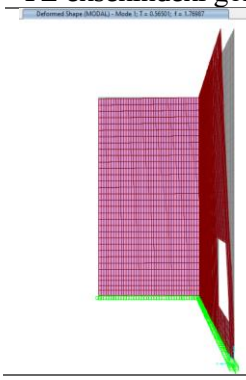
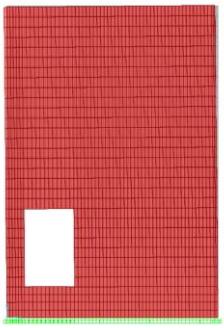
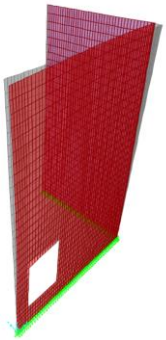
Şekil 5.27. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan 0,075 x 0,075 m boyutunda küçük ağlardan oluşturulan GMODEL-4

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek üzere modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.19’da ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.20’de görülmektedir.

Çizelge 5.19. GMODEL-4 periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.565014	0.03326	0.30287	1.707E-09
MODAL	Mod	2	0.364244	0.42078	0.1301	0.00029
MODAL	Mod	3	0.218612	0.00338	0.0931	0.00024
MODAL	Mod	4	0.179612	0.20064	0.10948	0.00266
MODAL	Mod	5	0.146492	0.00828	0.09579	0.0000264
MODAL	Mod	6	0.12332	0.08153	0.00695	0.00029
MODAL	Mod	7	0.090039	0.00013	0.00206	0.00014
MODAL	Mod	8	0.076989	0.05623	0.00204	0.40876
MODAL	Mod	9	0.071602	0.0039	0.06259	0.17915
MODAL	Mod	10	0.067764	0.03711	0.01687	0.22334
MODAL	Mod	11	0.061731	0.00286	0.02253	0.00002482
MODAL	Mod	12	0.059848	0.019	0.00091	0.00158

Çizelge 5.20. GMODEL-4 ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (X yönünde ötelenme) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

5.4.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan L plan tipi duvar modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

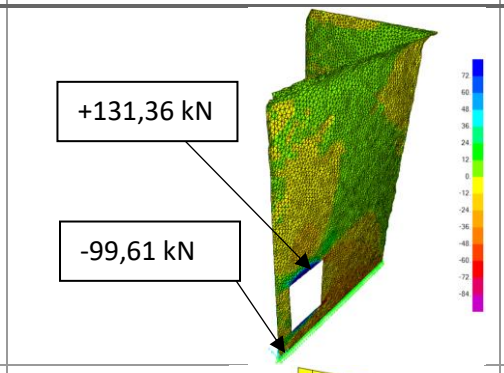
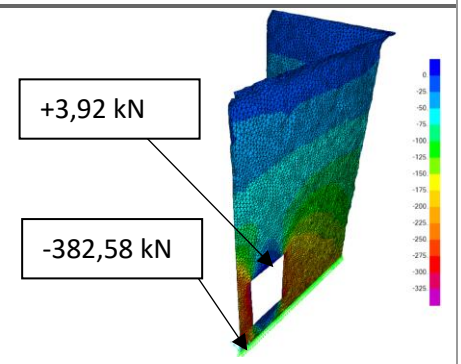
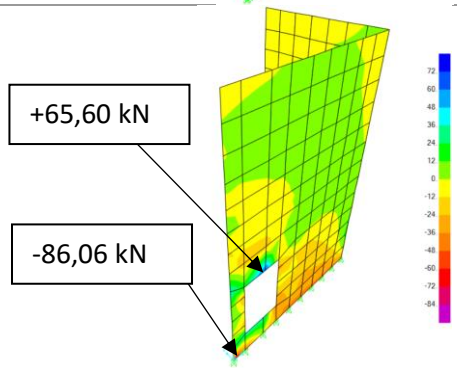
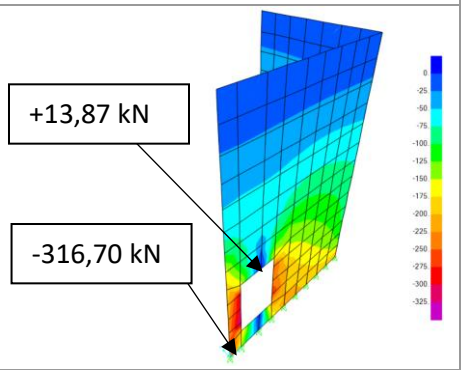
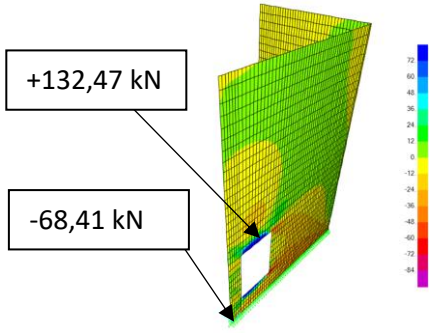
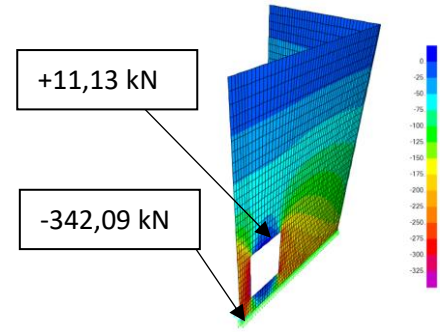
Tezde, basit yapı elemanlarının farklı modelleme teknikleri ile modellendiği bölümlerde, modelleme teknikleri arasındaki avantajları ve dezavantajları ortaya koymak amacıyla hızlı uygulanabilecek yığma duvarların kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanmıştır. Öncelikle her üç model için yukarıda detaylandırılan mod değerlerinin karşılaştırılmasına Çizelge 5.21'de yer verilmiştir. Modal analizlerde gerçekleşen ötelenme durumları her üç modelde de benzerlik göstermektedir. Mod 1, Y yönünde ötelenme; Mod 2, X yönünde ötelenme; Mod 3, burulma hareketine neden olmuştur ve analiz sonucu ortaya çıkan periyot değerleri de yakınlık göstermektedir. Tek açıklığa sahip L plan tipi duvar için gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve ağ sayısının, modal analiz sonuçlarına etki etmediği görülmektedir.

Çizelge 5.21. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen L plan tipi duvarın modal analiz sonuçları

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)
FOTOGRAMETRİK MODEL	Mod	1	0.583722	0.03902	0.28018
	Mod	2	0.377946	0.41833	0.14271
GMODEL-3	Mod	1	0.563443	0.0337	0.31028
	Mod	2	0.362817	0.4257	0.13488
GMODEL-4	Mod	1	0.565014	0.03326	0.30287
	Mod	2	0.364244	0.42078	0.1301

Avlu duvarına ait oluşturulan modeller üzerindeki sabit yük gerilmeleri Çizelge 5.22'de detaylandırılmıştır. Gerilme değerleri ele alındığında, aynı noktalarda yakın değerlerin olduğu görülmektedir. Özellikle ağ sayılarının yakın olduğu, fotogrametrik model ile GMODEL-4 arasındaki değerlerin daha yakın olması, gerilme değerlerinde ağ sayısının önemini bu model üzerinde de ortaya koymaktadır.

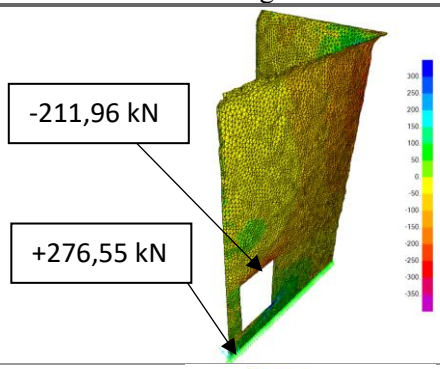
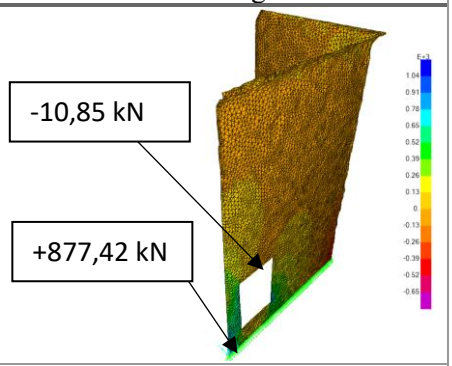
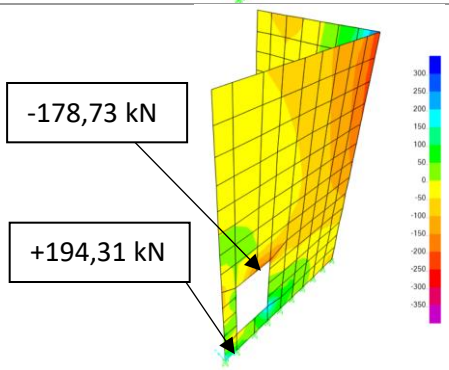
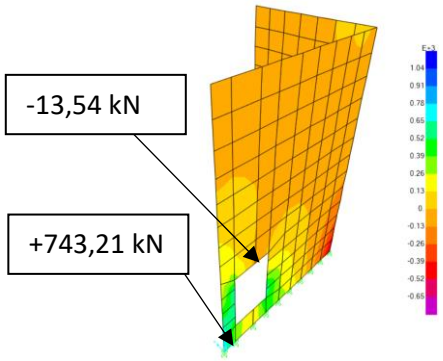
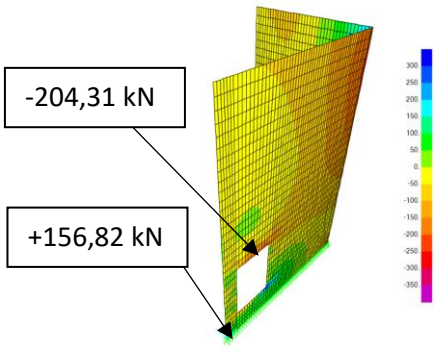
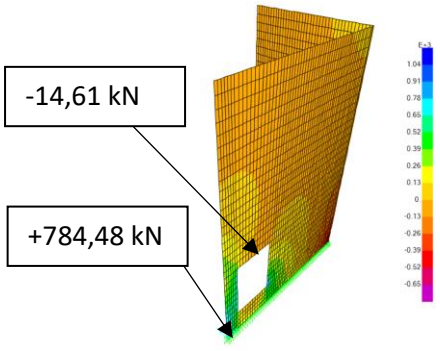
Çizelge 5.22. L plan tipi duvar - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	S11 Gerilme Değerleri	S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
GMODEL-3		
GMODEL-4		

L plan tipi yığma duvarın kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanması sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24'te detaylandırılmıştır. Yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarının, sabit yükler altında yapılan analiz sonuçları ile benzerlik taşıdığı ve ağ sayıları yakınlık gösteren modellerin, gerilme değerlerinin daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca

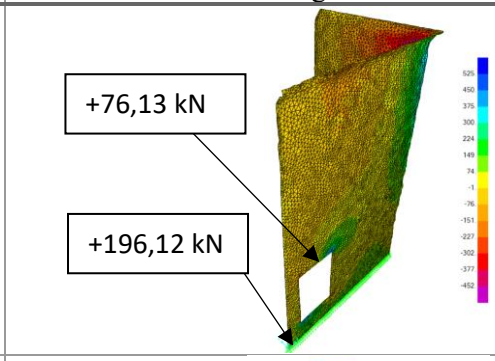
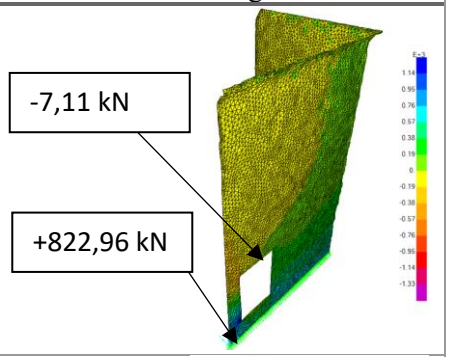
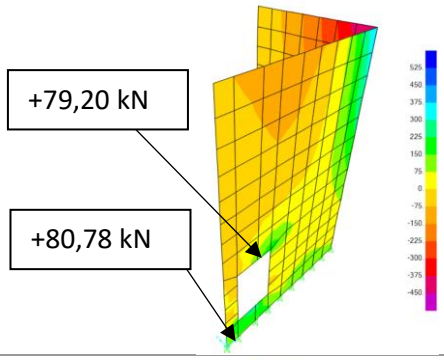
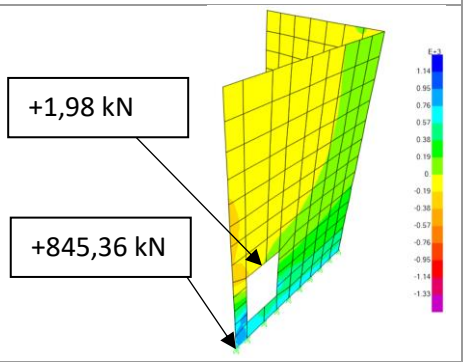
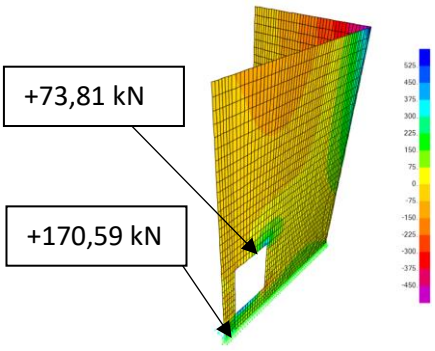
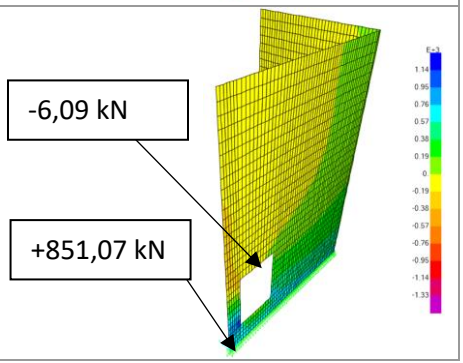
değerlerin farklılık gösterdiği modeller incelendiğinde, gerilme değerlerinin uyumlu bir oranda artıp azaldığı, gerilme değerlerini temsil eden renk kontürlerinden açıkça görülebilmektedir. Bu durumda, değerler farklılaşsa dahi sonuçların paralellik gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 5.23. L plan tipi duvar - X düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
GMODEL-3		
GMODEL-4		

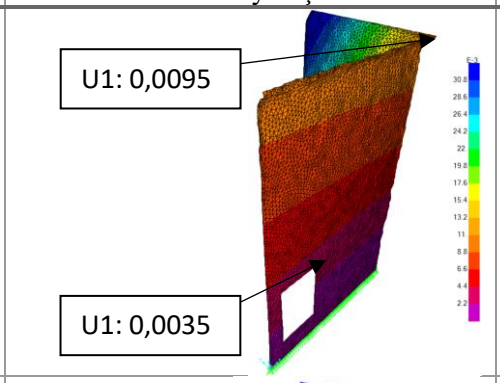
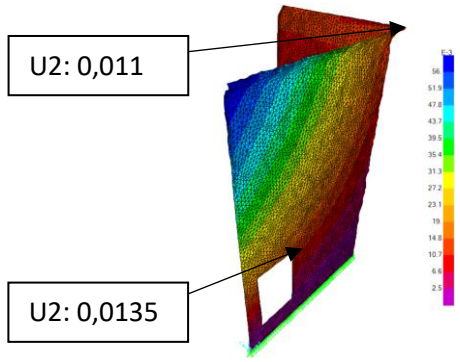
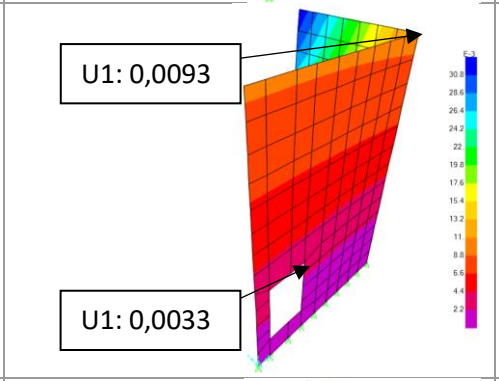
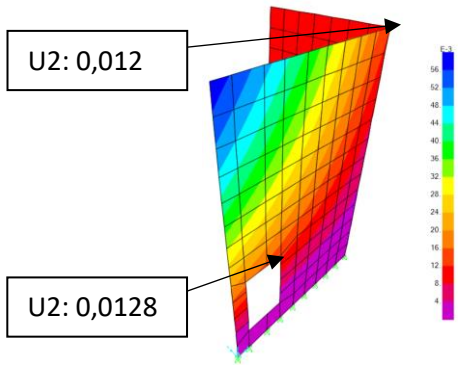
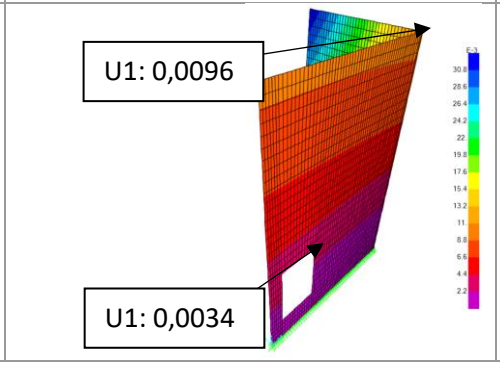
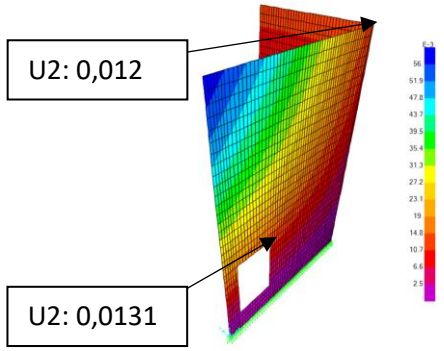
Gerçekleştirilen analize dayalı olarak, Y düzleminde yapılan yatay yük analizi sonuçları ile X düzleminde yapılan yatay yük analizi sonuçları arasında benzer durumlar tespit edilmiştir. Ağ sayısı yakın olan modellerde yakın gerilme değerleri görülmüştür.

Çizelge 5.24. L plan tipi duvar - Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
GMODEL-3		
GMODEL-4		

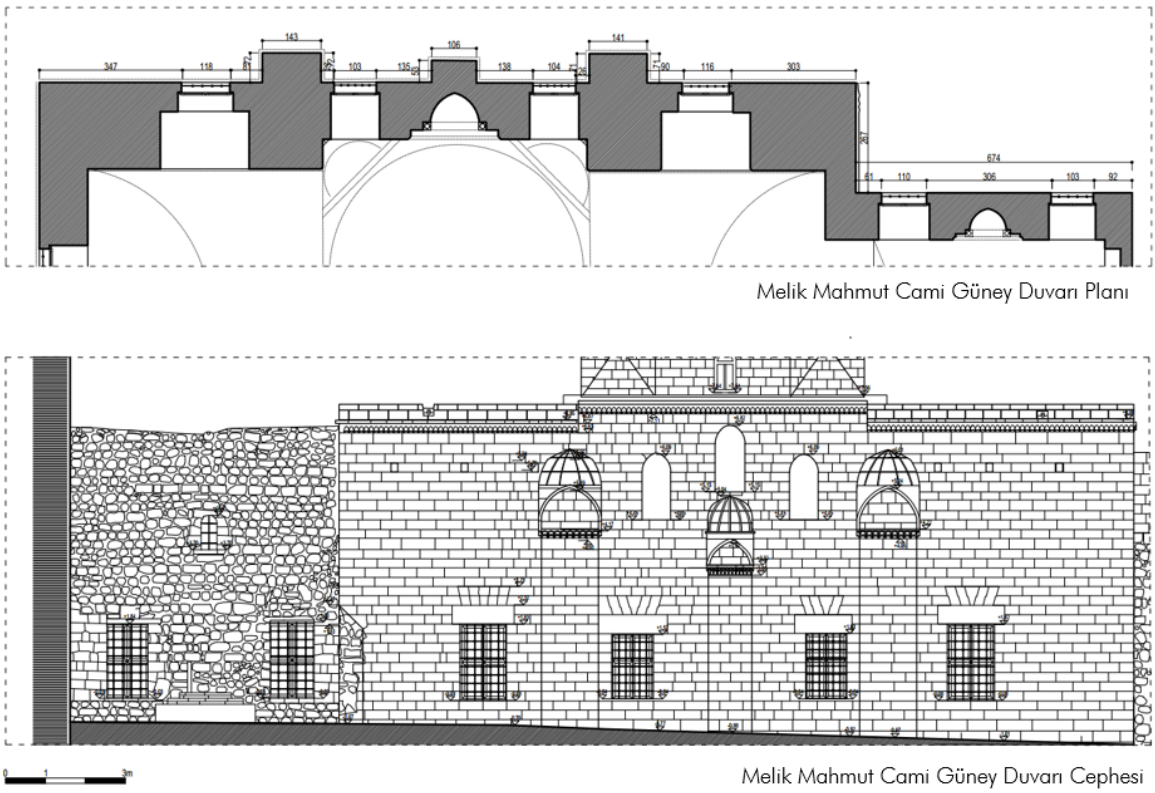
L plan tipi yığma duvara uygulanan yatay yüklerin etkisi altında gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarına dayalı olarak, deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizgileri, Çizelge 5.25'te kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Bu çizelge, ağ sayılarının yer değiştirme sonuçları üzerinde herhangi bir belirgin fark yaratmadığını göstermektedir. Üç farklı model için elde edilen yer değiştirme sonuçları oldukça benzerdir. Bu sonuçlar, yapıdaki yatay yüklerin neden olduğu deformasyonların, kullanılan farklı ağ sayılarına sahip modellerde benzer şekillerde gerçekleştiğini göstermektedir. Sonuç olarak ağ sayısındaki değişikliklerin, deformasyonlarda gözle görülür bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

Çizelge 5.25. L plan tipi duvar - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm)

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
Fotogr. Model		
GMODEL-3		
GMODEL-4		

5.5. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Melik Mahmut Cami Güney Duvarı Üzerinden İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, Melik Mahmut Cami güney duvarı modellenmiştir. Doğu-batı doğrultusunda uzanan duvarın toplam ölçüsü 26,65 m'dir ve batı yönüne doğru 19,91 m noktasında kuzeye doğru 2,67 m uzunluğunda içe geçmektedir (Şekil 5.28). Bu şekilde tam anlamıyla düz bir duvar olmadığı görülebilmektedir. Duvar üzerinde, 1 adet mihrap nişinin hizasına gelecek şekilde olmak üzere toplamda 3 payanda ve 9 pencere açıklığı yer almaktadır. Yükseklik ise 7,42 m olarak ölçülmüş ve bu özellikler ile modellenme işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 5.3).



Şekil 5.28. Modeli oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı planı ve cephesi

Yığma ve tek açıklığa sahip bu duvarın fotogrametrik ve klasik yöntem ile modellenerek yapısal analiz programına aktarılmış ve modelleme tekniklerinin sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile analiz edilmiştir.



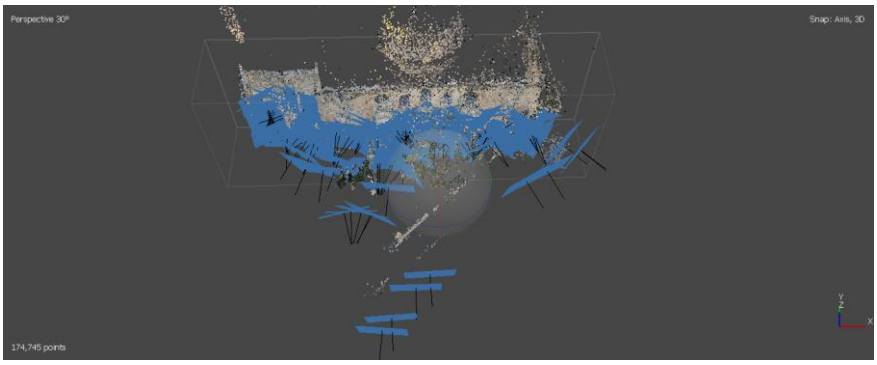
Resim 5.3. Mardin Melik Mahmut Cami güney duvarı (İzzettin Kutlu, 2023)

5.5.1. Fotogrametrik yöntem ile Melik Mahmut Cami güney duvarı modeli

Fotogrametrik modeli oluşturulacak olan güney duvarı için 160 adet fotoğraf çekilmiş ve program çekilen fotoğrafların 160 adetini tanımlayarak hizalamıştır. Akıllı telefon aracılığı ile çekilen bu fotoğraflar 3024 x 4032 piksel boyutuna ve 72 DPI yatay ve düşey çözünürlüğe sahiptir.

Fotoğrafın tanımlanma ve model oluşturulma süreci, beş ana adımdan oluşmuştur:

1. İlk adım olan kamera hizalama aşamasında çekilen 160 adet fotoğrafın tamamı programa yüklenmiştir. Bu adım sonucunda nokta bulutundan ve kamera açılarından oluşan bir model Şekil 5.29'de gösterilmiştir.



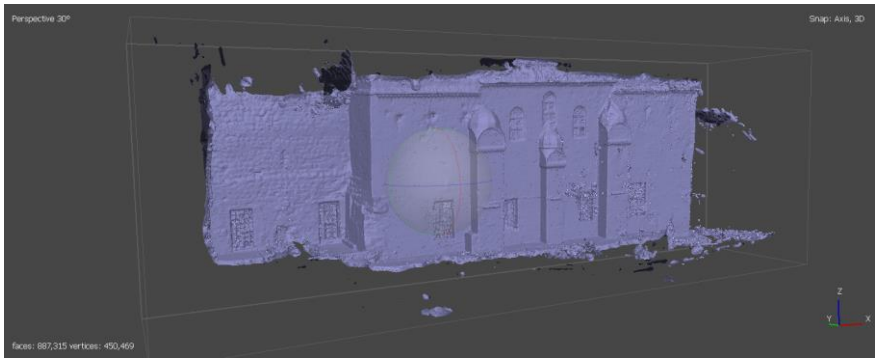
Şekil 5.29. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu

2. Hizalama aşamasının tamamlanması ile birlikte güney duvarının yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 5.30). Metashape programı, kamera hizalamasına bağlı olarak daha yoğun ve ayrıntılı bir nokta bulutu oluşturmaktadır.



Şekil 5.30. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından elde edilen 3D yoğun nokta bulutu

3. Yoğun nokta bulutu işleminin ardından, nokta bulutlarının ağlara dönüştürülme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.31). Metashape, önceki adımdan elde edilen yoğun nokta bulutlarına dayalı olarak nesneyi temsil eden bir 3D çokgen ağının yüzeyini yeniden yapılandırmaktadır.



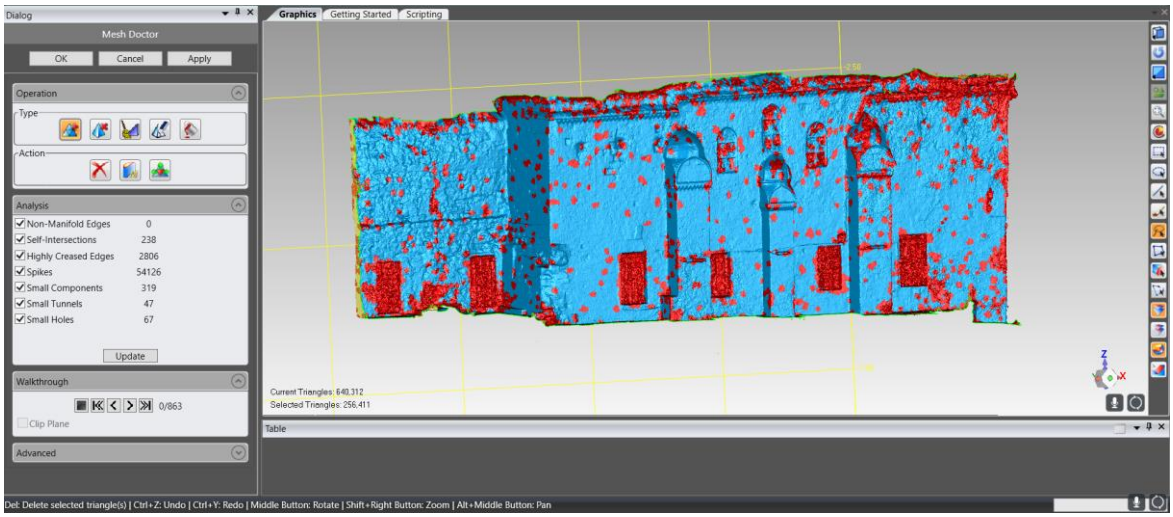
Şekil 5.31. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh)

4. Ağ oluşturulduktan sonra Melik Mahmut Cami güney duvarı dışında kalan gereksiz veriler temizlenebilmektedir. Bu işlem ayrıca kullanılan Geomagic Wrap programı üzerinden de detaylı yapılabilmektedir. Bu modelde, kolay silinebilen elemanlar Metashape üzerinde temizlenmiştir. Devamında hassas ölçü ayarı ve daha detaylı temizleme işlemi için Geomagic Wrap programı kullanılmıştır.
5. Geometri ve ağın düzenlenmesi ile birlikte, farklı açıdan çekilen fotoğraflar üzerindeki dokular model üzerinde "Build Orthomastic" komutu ile görünür hale getirilmiştir (Şekil 5.32).



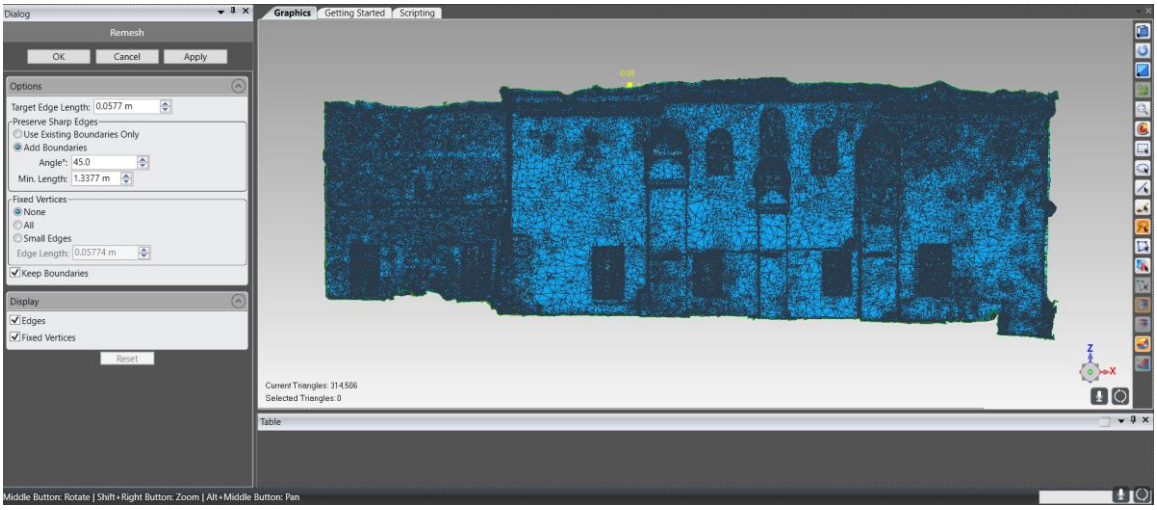
Şekil 5.32. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Metashape programından farklı açılardan elde edilen dokuların modele aktarılması

Elde edilen üç boyutlu modelin, yapı üzerinde kesin ölçüsü bilinen bir elemana göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Ölçeklendirme ve ağ temizleme işlemi, Geomagic programında gerçekleştirilmiştir. Güney duvarı üzerinde yer alan 1,18 x 1,74 m boyutlarına sahip pencere üzerinden kesin ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme sonrası modelde bulunan ağ kusurlarının ortadan kaldırılması amacıyla, Geomagic Wrap programı içerisinde otomatik olarak tanımlı "ağ doktoru (Mesh Doctor)", poligon ağı otomatik olarak modelin aktarıldığı sırada aktif olmuştur (Şekil 5.33). Güney duvarı üzerinde ağ doktorunun aktifleşmesi ile düzeltilme işlemi onaylanmış ve modeldeki ağ kusurları giderilmiştir.

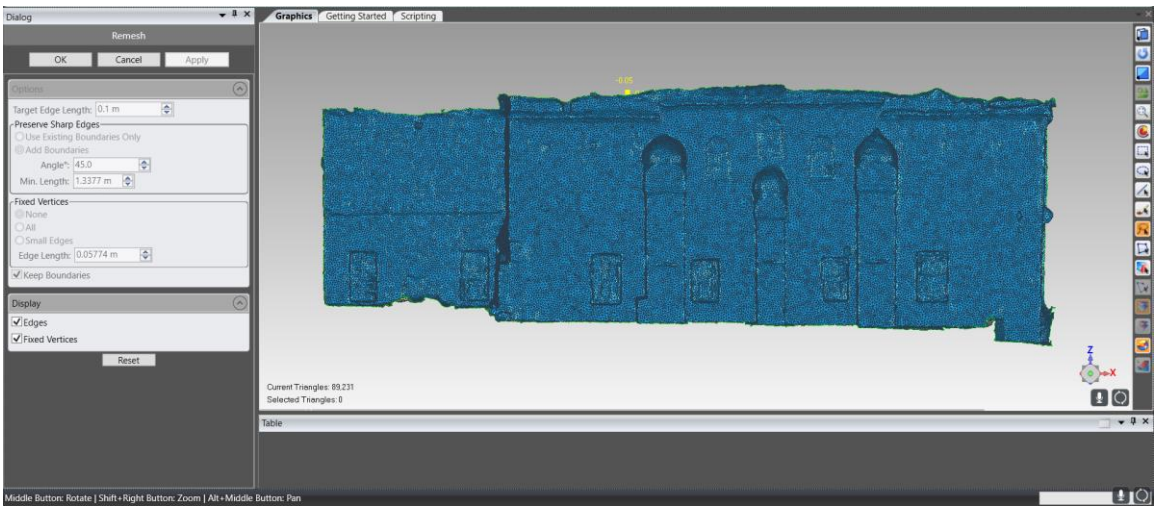


Şekil 5.33. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi

Tez kapsamında, ağ problemlerinin giderilmesinin ardından yapısal analiz programında daha doğru sonuçlar alabilmek ve dosya boyutunun çok yüksek olmasını engellemek adına ağ boyutlarını birbirine yakın hale getiren "Yeniden Ağ (Remesh)" komutu uygulanmıştır. Komut, programın ara yüzünde "Çokgenler (Polygons)" sekmesinde erişilebilmektedir. Bu uygulama, duvarın tümünde yakın ölçülere sahip ağlar ile duvarı yeniden modellemeyi sağlamaktadır (Şekil 5.34). Uygulama sonucunda da yapısal analize aktarılacak olan modelde, zeminde bulunan ağlara atanacak olan ankastre mesnet mesafelerinin de birbirlerine yakın olması sağlanmıştır (Şekil 5.35). Ağ sayılarının yeniden düzenlenmesi ile birlikte pencere ve kapı gibi açıklıklarda yer alan ağların temizlenmesi gerekmektedir.



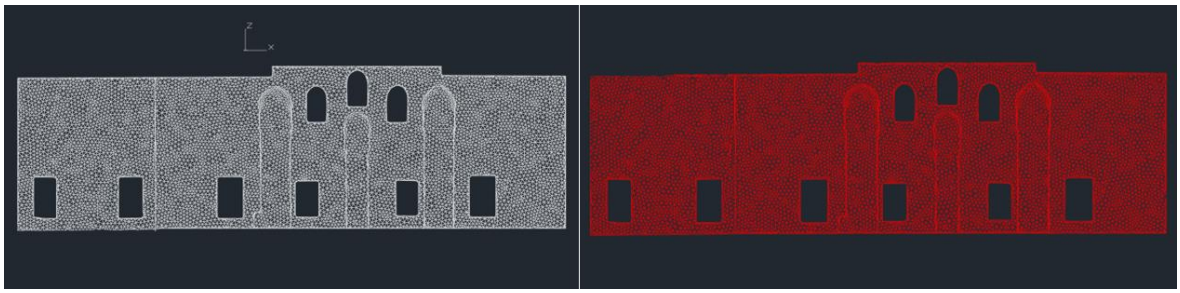
Şekil 5.34. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" öncesi model görünümü



Şekil 5.35. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü

Yakın boyutlara indirilen ağlar sonucu model, AutoCAD programına aktarılmaya hazır hale gelmiş ve aktarılmak üzere Geomagic Wrap programından DXF formatında model dışa aktarılmıştır. AutoCAD programında üç boyutlu yüzey (3D Face) olarak ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan "0" katmanına gelen ağların SAP2000'e aktarımı sırasında kabuk eleman olarak tanımlanabilmesi için kırmızı renkli yeni bir katman oluşturmuştur (Şekil 5.36). Ayrıca AutoCAD programında, manuel olarak da ağ kontrollerinin yapılması önerilmektedir. Özellikle farklı duvar kalınlıklarına sahip yüzeylerde, ağlar arası belirgin bir sınır oluşturmak, mevcut koordinat noktalarını yeniden ayarlamak ve SAP2000 programında farklı kalınlıkları tanımlamak üzere AutoCAD üzerinde düzenlemeler yapılabilmektedir. Tezde, kullanılan programların tamamı entegre

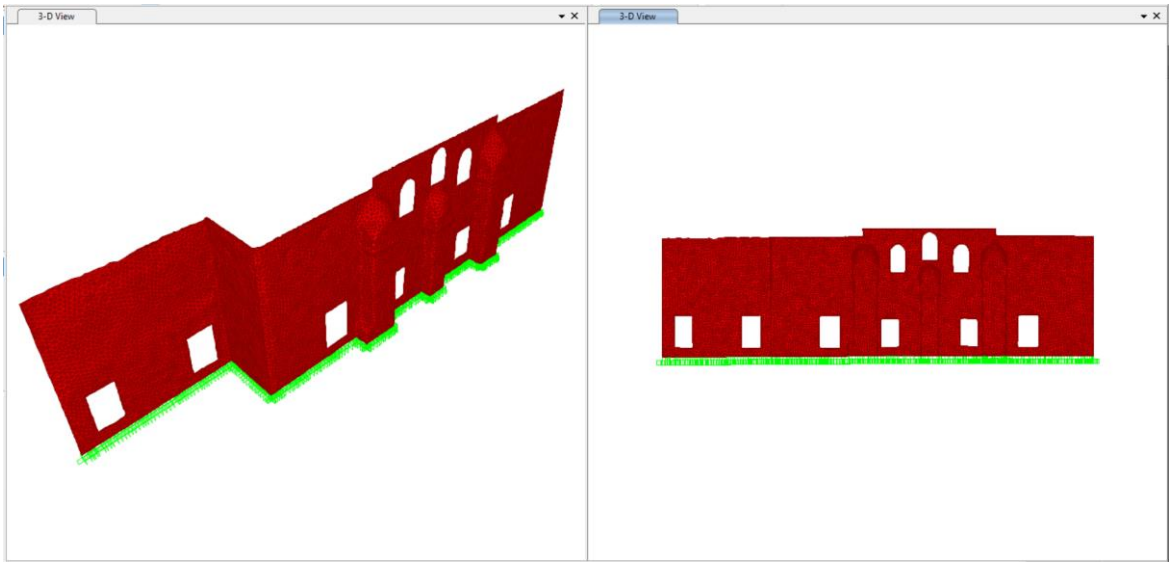
bir biçimde kullanılmış, her programda düzenleme yapılmasa dahi ağlar kontrol edilerek bir sonraki programa geçilmiştir.



Şekil 5.36. Melik Mahmut Cami güney duvarı - AutoCAD programında ağ ve katman ayarlarının yapılması

Tamamlanan süreç sonunda modeli oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı, SAP2000 programına aktarılmıştır. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Güney duvarı fotogrametrik modelin aktarımı sonucu SHELL eleman olarak programa aktarılmıştır.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 285 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 9791 düğüm noktası ve 18364 SHELL eleman ile oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.37).
- Malzeme özellikleri de belirlenen model üzerine öncelikle malzeme tanımlamaları ve kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında Diyarbakır Vakıflar Bölge Müdürlüğü'nden edinilen bilgiler sonucu Melik Mahmut Cami restorasyonu proje yöneticisi olan Promim İç Mimarlık Tasarım Mimarlık Restorasyon İnş. San. Tic. Ltd. Şti iletişime geçilmiş ve elde edilen rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınarak duvar kalınlıkları ayarlanmıştır. Duvarın batı uç noktasında 2 pencere açıklığına sahip olan duvara 1,05 m; kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvara 0,7 m; payandaların bulunduğu en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m kalınlık tanımlanmış ve tamamında "Kalın Kabuk (Shell – Thick)" kesit özelliği belirlenmiştir.



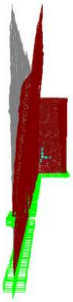
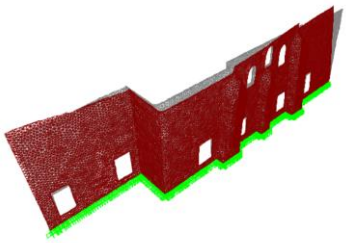
Şekil 5.37. Fotogrametrik modelleme tekniği aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan Melik Mahmut Cami güney duvarı modeli

Fotogrametrik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.26'da ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.27'de görülmektedir.

Çizelge 5.26. Melik Mahmut Cami güney duvarı fotogrametrik modelinin modal analiz sonucu periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.451404	0.0011	0.19262	3.543E-07
MODAL	Mod	2	0.376703	0.00001362	0.40917	0.00000328
MODAL	Mod	3	0.279632	0.01019	0.03527	0.00001546
MODAL	Mod	4	0.204132	0.05245	0.0033	0.00003078
MODAL	Mod	5	0.167855	0.11523	0.00798	0.00003567
MODAL	Mod	6	0.148889	0.59798	0.00043	0.000001901
MODAL	Mod	7	0.137361	0.00261	0.00064	0.00005149
MODAL	Mod	8	0.110679	0.00152	0.01397	0.00027
MODAL	Mod	9	0.105259	6.194E-07	0.0077	0.00028
MODAL	Mod	10	0.10027	0.00361	0.00124	0.00052
MODAL	Mod	11	0.085128	0.00157	0.00003542	0.00095
MODAL	Mod	12	0.079749	0.0000666	0.15051	0.01376

Çizelge 5.27. Melik Mahmut Cami güney duvarı fotogrametrik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri

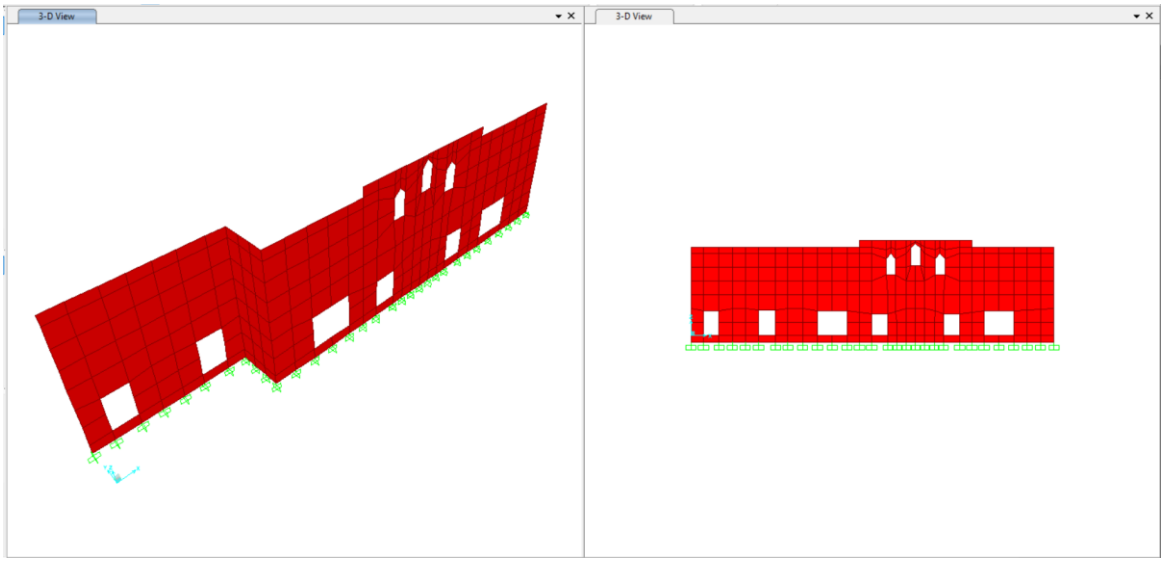
Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3D görünüm
		

5.5.2. Klasik yöntem ile Melik Mahmut Cami güney duvarı modeli

Yukarıda belirtilen fotogrametrik modelleme tekniği ile oluşturulan Mardin Melik Mahmut Cami güney duvarına ait modelin yapısal analiz sonucu mod değerleri ve şekillerine, klasik modelleme tekniği sonuçlarının yakınlık derecesini belirlemek adına yakın ölçülerde klasik yöntem ile ideal ağ sayısına sahip olduğu düşünülen tek bir model oluşturulmuştur. Yığma duvar ve L plan tipi duvar analizlerinde ağ sayılarının yapısal analiz sonuçları üzerinde etkisi ortaya konmuştur. Çalışmanın bu bölümünde de yüksek bilgisayar teknolojisi gerektirmeden ideal ağ boyutlarına sahip olarak oluşturulmuş klasik modelleme tekniğine yer verilmiştir. Bu amaç doğrultusunda SAP2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda mevcut rölöve çizimleri üzerinde belirli idealleştirmeler gerçekleştirilerek Melik Mahmut Caminin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde ağ boyutları, çoğunlukla 0,6 x 0,6 m boyutlarında tercih edilmiştir. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Güney duvarı SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi toplamda 32 adet ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Toplam 311 düğüm noktası ve 248 SHELL eleman kullanılmıştır (Şekil 5.38).
- Model üzerine öncelikle malzeme tanımlamaları ve kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmiştir. Kesit atamalarında rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınmıştır. Duvarın batı uç noktasında 2 pencere açıklığına sahip olan duvar 1,05 m; kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvar 0,7 m; payandaların bulunduğu en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m tanımlanmış ve “Kalın Kabuk (Shell – Thick)” kesit özelliği

belirlenmiştir. Ayrıca klasik modellemede, mevcutta bulunan payandaların olduğu bölümlerde duvar kalınlığı, 2,84 m olacak şekilde tanımlanmıştır.



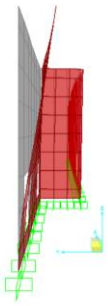
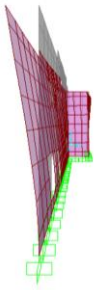
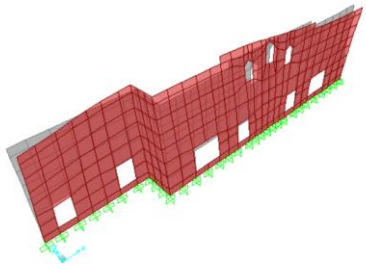
Şekil 5.38. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, mod ve periyot değerlerinin fotogrametrik model ile oluşturulan model ile yakınlık derecesini görmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 5.28'de ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 5.29'da görülmektedir.

Çizelge 5.28. Melik Mahmut Cami güney duvarı klasik modelinin periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.459742	0.00078	0.20686	1.625E-08
MODAL	Mod	2	0.354048	0.00023	0.43525	2.199E-07
MODAL	Mod	3	0.27272	0.00557	0.03532	0.000002548
MODAL	Mod	4	0.186516	0.04008	0.00116	0.000007564
MODAL	Mod	5	0.152468	0.21696	0.00675	0.00004183
MODAL	Mod	6	0.140682	0.53444	0.00019	0.000006012
MODAL	Mod	7	0.131474	0.01519	0.00013	0.00005606
MODAL	Mod	8	0.113337	0.01064	0.00684	0.00009342
MODAL	Mod	9	0.106202	0.0016	0.02245	0.00017
MODAL	Mod	10	0.092311	0.00162	0.00004332	0.00752
MODAL	Mod	11	0.081756	0.00091	0.00002267	0.00011
MODAL	Mod	12	0.077833	0.00019	0.14237	0.000003976

Çizelge 5.29. Melik Mahmut Cami güney duvarı klasik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Burulma) 3-d görünüm
		

5.5.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan Melik Mahmut Cami güney duvarı modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

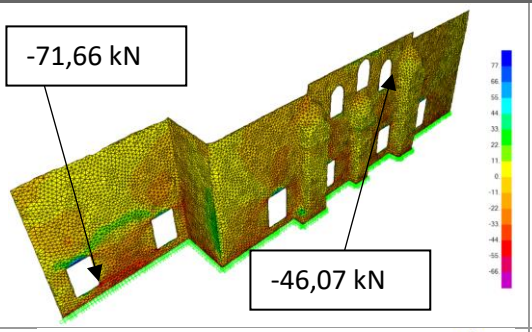
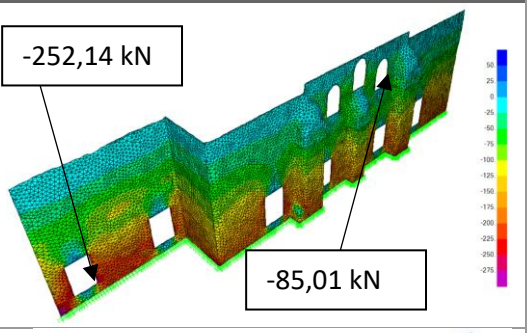
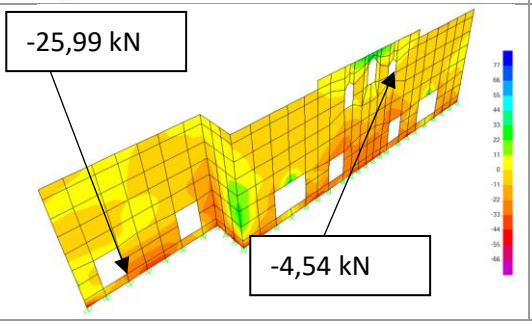
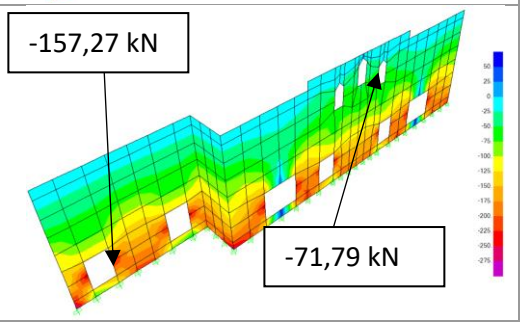
Tezde, modelleme teknikleri arasındaki avantajları ve dezavantajları ortaya koymak amacıyla hızlı uygulanabilecek yük atamaları gerçekleştirilmiş, yapıların kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanmıştır. Öncelikle Melik Mahmut Cami güney duvarı fotogrametrik ve klasik modeli için yukarıda detaylandırılan mod değerlerinin karşılaştırılmasına Çizelge 5.30'da yer verilmiştir. Modal analizlerde gerçekleşen ötelenme durumları her iki modelde de benzerlik göstermektedir. Her iki modelleme tekniğinde de Mod 1, Y yönünde ötelenme; Mod 2, Y yönünde ötelenme; Mod 3, burulma hareketine neden olmuştur ve analiz sonucu ortaya çıkan periyot değerleri de büyük yakınlık göstermektedir. Güney duvarı için de gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve modelde oluşturulan ağ sayısının, modal analiz sonuçlarına büyük bir etki etmediği görülmektedir.

Çizelge 5.30. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen Melik Mahmut Cami güney duvarının modal analiz sonuçları

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)
FOTOGRAMETRİK MODEL	Mod	1	0.451404	0.0011	0.19262
	Mod	2	0.376703	0.00001362	0.40917
	Mod	3	0.279632	0.01019	0.03527
KLASİK MODEL	Mod	1	0.459742	0.00078	0.20686
	Mod	2	0.354048	0.00023	0.43525
	Mod	3	0.27272	0.00557	0.03532

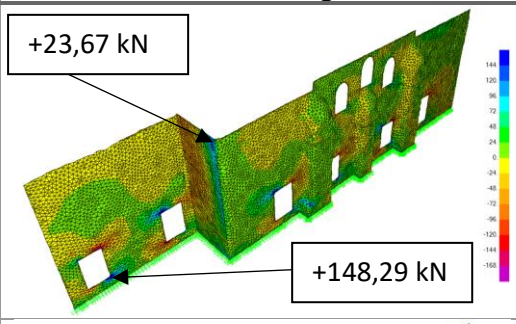
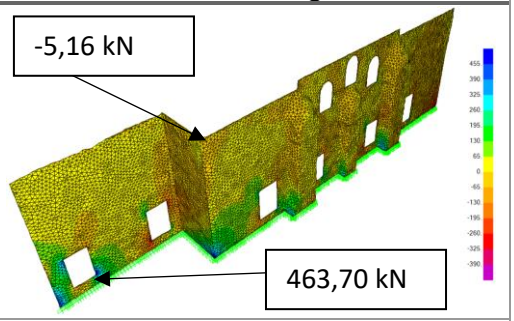
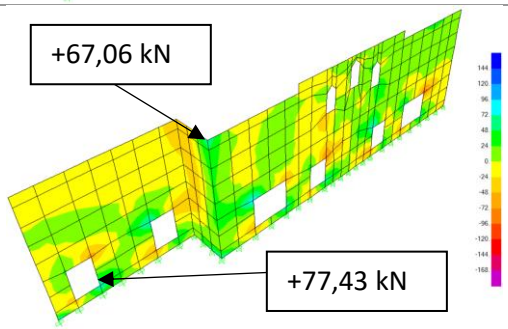
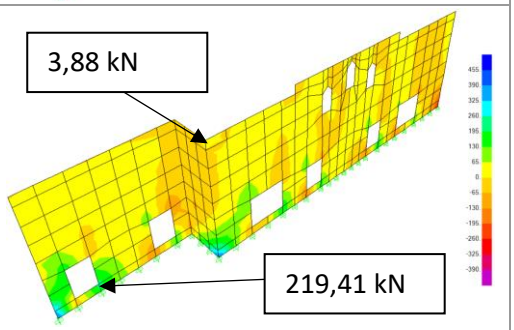
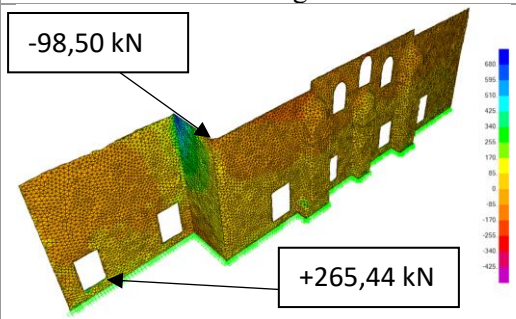
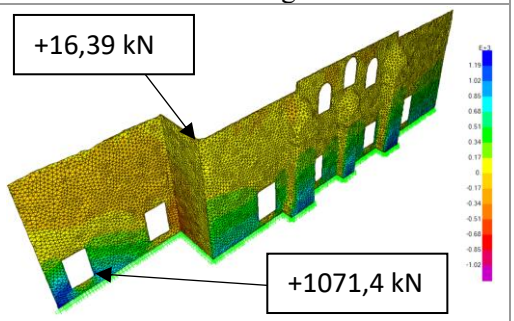
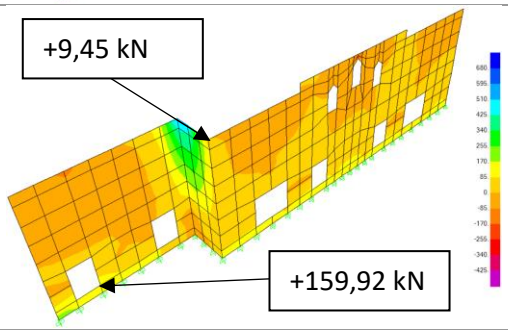
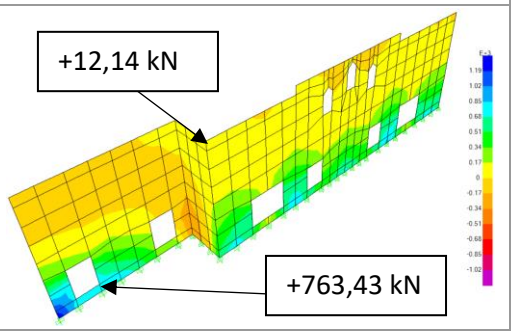
Güney duvarına ait oluşturulan modeller üzerindeki sabit yük gerilmeleri Çizelge 5.31'de detaylandırılmıştır. Gerilme değerleri ele alındığında, daha önce ağ sayılarının yakın oldukça gerilme değerlerinin yakın sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Bu durumda, ideal büyüklükteki ağ sayısı ile oluşturulmuş klasik model ile fotogrametrik model arasında gerilme değerleri çok yakın sonuçlar göstermemektedir. Ancak, her iki model incelendiğinde de aykırı bir durumun olmadığı, ortaya çıkan değerlerin aynı bölgelere doğru benzer oranda artma ve azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Gerilme değerlerini temsil eden renk tonları benzer aralıkta ayarlandığı durumda, ortaya çıkan sonucun da yakınlık gösterdiği görülebilmektedir.

Çizelge 5.31. Melik Mahmut Cami güney duvarı - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	S11 Gerilme Değerleri	S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
Klasik Model		

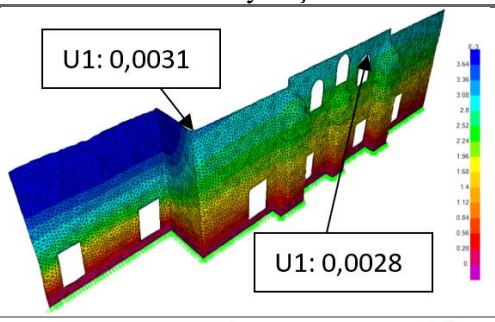
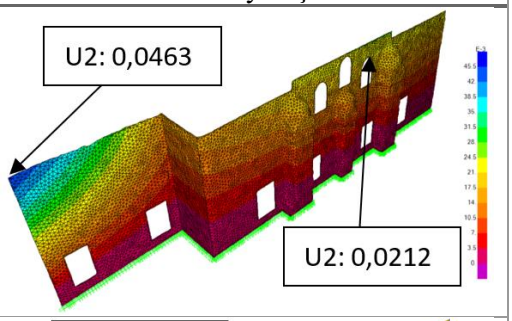
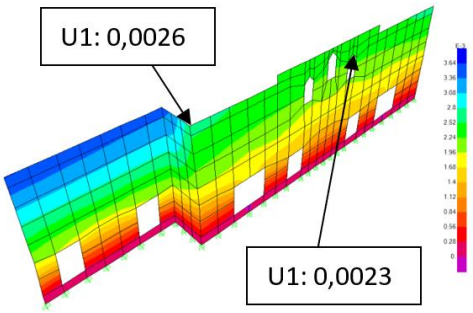
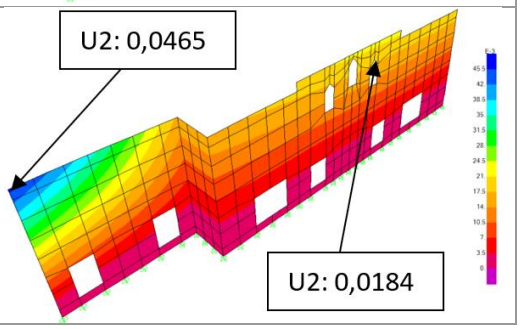
Melik Mahmut Cami güney duvarının kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanması sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları Çizelge 5.32'de detaylandırılmıştır. Yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarının, sabit yükler altında yapılan analiz sonuçları ile benzerlik taşıdığı ve yakın değerlerin görülmemesin rağmen benzer oranda artma ve azalmaların olduğu, renk tonları ile gerilme değerlerinin temsilinin gösterildiği resimlerden anlaşılabilmektedir.

Çizelge 5.32. Melik Mahmut Cami güney duvarı - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
Klasik Model		
	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Fotogr. Model		
Klasik Model		

Güney duvarı için tanımlanan yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analizde, deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizgileri Çizelge 5.33'te detaylandırılmıştır. Değerler, ağ sayılarının yer değiştirme sonuçlarında bir farklılık oluşturmadığını göstermektedir. Her iki model için de çok yakın yer değiştirme sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çizelge 5.33. Melik Mahmut Cami güney duvarı - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm)

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
Fotogr. Model		
Klasik Model		

6. FOTOGRAMETRİK VE KLASİK YÖNTEMİN ENTEGRE MODEL ÜRETİMİ

Çalışmanın bu bölümünde, Melik Mahmut Cami ile Mardin Ulu Cami'nin analitik modelleri farklı tekniklerle ve bu tekniklerin birlikte kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Fotogrametrik modeller, yapıların dış cephelerinden alınan görüntülerden elde edilmesi nedeniyle iç mekânda bulunan taşıyıcı elemanları barındıramamaktadır. İç ve dış mekânın birlikte alındığı ve 3D fotogrametrik modellerin üretilebilmesi mümkündür; ancak, bu durum yapısal analiz programı olan SAP2000'de yapının davranışını tespit etmeyi zorlaştırmaktadır. Bunun nedeni, SAP2000'e shell eleman olarak gelen modelde, duvar kalınlıkları arasında boşlukların kalacak olmasıdır. Farklı yapısal analiz programları, otomatik ağlar tanımlayarak bu sorunu çözebilmektedir. Çalışmada bu durum fotogrametrik model ile klasik model yöntemini birlikte kullanarak bir entegre modelleme tekniği sunulmuştur. Öncelikle dış cephelerinin fotogrametrik modeli oluşturulan yapısal analize hazır hale getirilen modellere, klasik modelleme tekniği ile sahip oldukları iç mekân taşıyıcıları entegre edilmiştir. Bu entegrasyonun verilerini analiz edebilmek adına aynı modellerin tamamen klasik modelleme tekniği ile de analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, yapıların hem üç boyutlu dijital modelleri arşivlenirken hem yapısal davranışları tespit edilmiş hem de süreç içerisinde avantaj/dezevantaj durumu yapılarak yapısal analiz sürecine bir yöntem önerilmiştir.

Entegre modeller ile klasik modellerin karşılaştırıla sürecinde de modeller üzerinde ortak kabuller bulunmaktadır. Her model için yapı sistemlerinin harç ile beraber doğrusal elastik davranış özelliği gösterdiği kabul edilmiştir. Malzeme mekanik özelliği tanımlamalarında, deneysel süreçte oluşacak maliyet, izin ve zaman problemleri nedeniyle literatürde yer alan mevcut kaynaklar üzerinden yakın malzeme özellikleri seçilmiştir (Çizelge 6.1). Kesin sonuçlar için malzemeler üzerine deneysel çalışmaların gerekliliği unutulmamalıdır.

Çizelge 6.1. Tezde oluşturulan sonlu elemanlar modelleri üzerine tanımlanan malzeme özellikleri (Altunışık vd., 2016: 1339; Can vd., 2012: 681)

Eleman Türü	Elastisite Modülü (kN/m^2)	Özgül Ağırlık (kN/m^3)	Poisson Oranı
Taş Duvarlar (Harç ile birlikte)	450.000,00	24,00	0,2

Modeller üzerinde, kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmelidir. Kabuk (SHELL) eleman olarak yapısal analiz programlarında modellemelerin gerçekleştirildiği çalışmada, kesit atamaları sırasında duvar kalınlığı kesit özelliği "Kalın Kabuk (Shell – Thick)" olarak belirlenmiştir. Fakat duvar kalınlığı ölçüleri, modellerin gerçek özellikleri referans alınarak tanımlanmıştır ve ortak bir kalınlık ölçüsü bulunmamaktadır.

Sıkıştırılmış toprak dolgulu düz çatı, yük aktarımı açısından düşünüldüğünde sahip olduğu sabit yükleri tonoz ve kemerler aracılığıyla zemine aktarmaktadır. Dolayısıyla modeller üzerinde taşıyıcı özelliğe sahip olmadığından çatı kaldırılarak iç mekanda yer alan kemerler, tonozlar ve kubbe modellenmiştir.

Modal ve sabit yük analizi gerçekleştirilen modellerde, statik ve dinamik yük analizleri de gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sırasında, modellerin ilk 12 moduna ait veriler dikkate alınmıştır. Düzenli ankastre sistem için Türkiye Deprem Yönetmeliği gereğince ilk 4 modun dikkate alınması yeterli olmaktadır. İlk 4 modun dikkate alınması yönetmelikte verilen, göz önüne alınan birbirine dik x ve y yatay deprem doğrultularının her birinde, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütlesinin %90'ından daha az olmaması kuralına göre belirlenmiştir. Düzensiz sistemde ise bu şart ancak ilk 12 modun dikkate alınmasıyla sağlanabilmektedir (TBDY, 2018; Soyluk, 2010).

6.1. Fotogrametrik Modelleme ve Klasik Modelleme Yönteminin Melik Mahmut Cami Üzerinden İncelenmesi

Melik Mahmut Cami, Artuklu dönemi özelliklerini barındıran tek açıklığa sahip camidir. Caminin doğu-batı doğrultusunda uzanan ana harim mekânı, 26,65 x 10,79 boyutlarına sahiptir. Günümüzde kadın harim bölümü olarak kullanılan bölüm ana harim bölümünden 1,58 m kuzeye doğru girinti yapmaktadır. Dolayısı ile cami tam olarak dikdörtgen bir plan düzlemine sahip değildir. Kuzey ve güney duvarlarında karşılıklı pencere açıklıkları bulunan yapının, batı cephesi bitişik nizamlı düzenlenmiş ve doğu cephesinde ise 2 adet pencere açıklığı bulunmaktadır. Mevcut barındırdığı tüm özellikleri dikkate alınan Melik Mahmut Cami entegre edilmiş fotogrametrik model ve klasik yöntem ile modellenerek yapısal analiz programına aktarılmış ve sismik davranışları modelleme tekniklerinin sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile analiz edilmiştir.

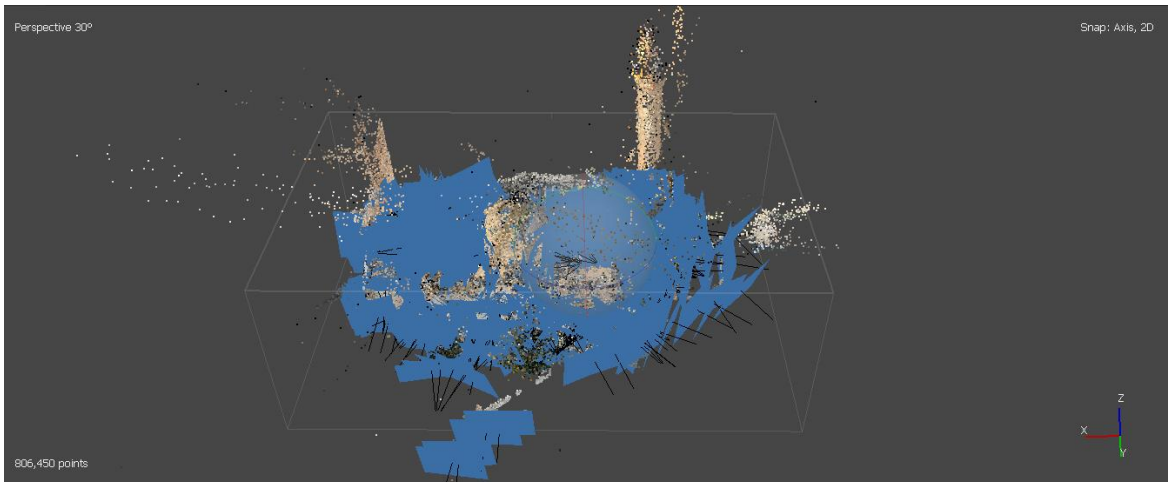
6.1.1. Fotogrametrik yöntem ile Melik Mahmut Cami modeli

Fotogrametrik modeli oluşturulan Melik Mahmut Cami için 815 adet fotoğraf çekilmiştir ve program çekilen fotoğrafların 815 adetini tanımlayarak hizalamıştır. Akıllı telefon aracılığı ile çekilen bu fotoğraflar 3024 x 4032 piksel boyutuna ve 72 DPI yatay ve düşey çözünürlüğe sahiptir. Fotoğrafların tamamının tanımlanması ve hizalanması tek seferde oluşan bir süreci içermemektedir. Çekilen 815 adet fotoğrafın ilk tanımlama işlemlerinde, tanımlanamayan fotoğraflar tespit edilmiş ve fotoğraf üzerinde parlak nesnelerin yüzeyi siyah ile kapatılarak yeniden programa aktarılmıştır.

Melik Mahmut Cami fotoğraf çekim işlemleri için 2 ayrı gün saha çalışması yapılmıştır. İlk gün yapının cephelerinin görüntüleri alınmıştır ve bu çalışma yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür. İkinci gün ise yapının kubbesine erişilmiş ve kubbeye dair görüntüler alınmıştır. Bu saha çalışması da yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür. Toplamda fotoğraf çekim işlemleri için 4 saatlik bir süre yeterli olmuştur. Bu şekilde fotoğrafların saha çalışması ile çekilmesi ve modelin oluşturulması ile toplamda yaklaşık 6 saatlik bir zaman diliminin ardından Melik Mahmut Cami'nin fotogrametrik modeli oluşturulmuştur.

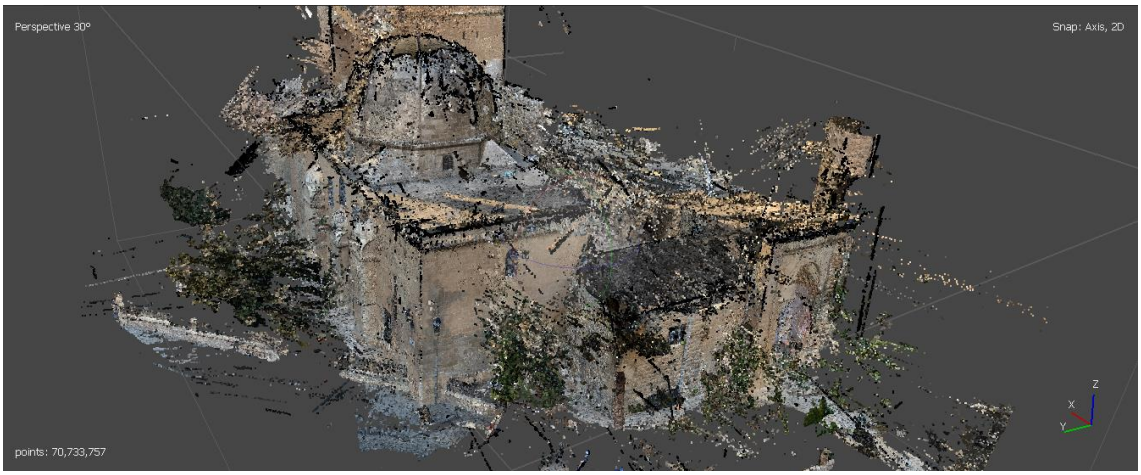
Fotoğrafların tanımlanma ve model oluşturulma süreci, beş ana adımdan oluşmuştur:

1. İlk adım olan kamera hizalama aşamasında çekilen 815 adet fotoğrafın tamamı programa yüklenmiştir. Bu adım sonucunda nokta bulutundan ve kamera açılarından oluşan bir model Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



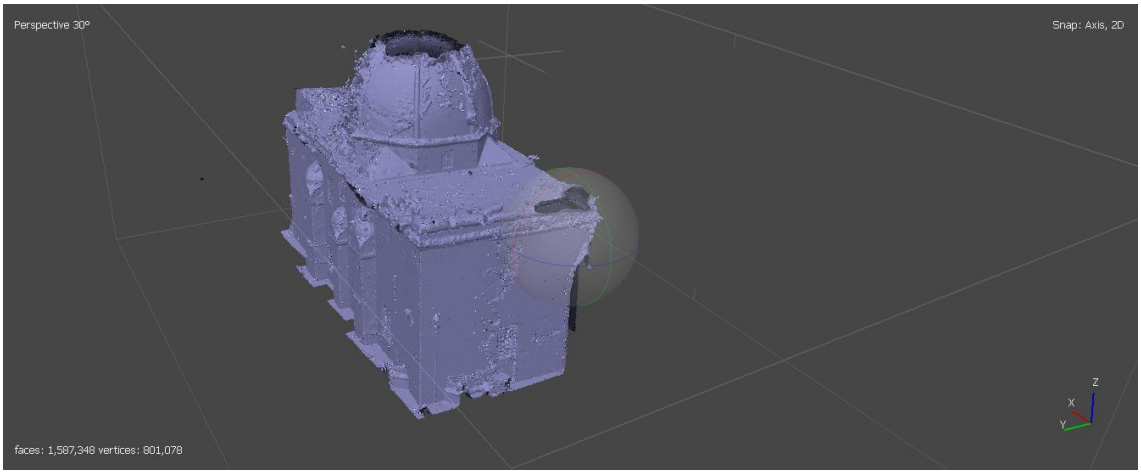
Şekil 6.1. Melik Mahmut Cami - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu

2. 815 adet fotoğrafın hizalanma aşamasının tamamlanması ile birlikte Melik Mahmut Cami'nin 3D yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 6.2). Metashape, kamera hizalamasına bağlı olarak daha yoğun ve ayrıntılı bir nokta bulutu oluşturmaktadır.



Şekil 6.2. Melik Mahmut Cami - Metashape programı ile elde edilen 3D yoğun nokta bulutu

3. Yoğun nokta bulutu işleminin ardından, nokta bulutlarının ağlara dönüştürülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Metashape, önceki adımdan elde edilen yoğun nokta bulutlarına dayalı olarak nesneyi temsil eden bir 3D çokgen ağının yüzeyini yeniden yapılandırmaktadır. Ağa dönüştürülme işlemi öncesinde, ihtiyaç duyulmayan nokta bulutlarının temizlenmesi özellikle büyük ölçekli yüzeylerden model oluşturma sürecini kolaylaştırmaktadır. Ağların oluşturulması sonrasında, detaylı bir temizleme işlemi için tekrar diğer programlar kullanılabilir (Şekil 6.3). Temizleme işleminin ardından ağ oluşturma süreci daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermektedir.



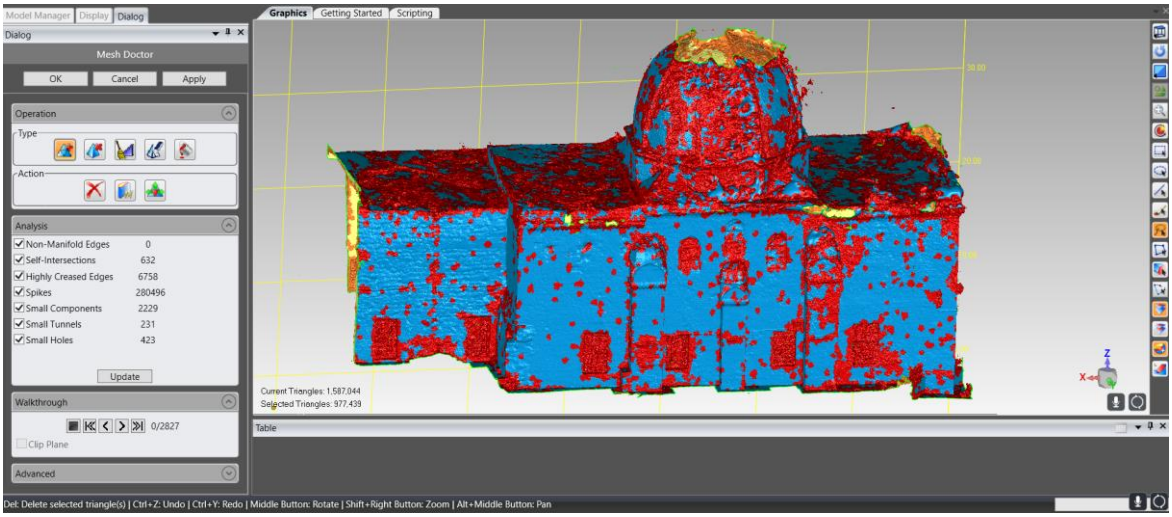
Şekil 6.3. Melik Mahmut Cami - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh)

4. Ağ oluşturulduktan sonra Melik Mahmut Cami dışında kalan gereksiz ağ yüzeylerine ait veriler temizlenebilmektedir. Bu işlem ayrıca kullanılan Geomagic Wrap programı üzerinden de detaylı yapılabilmektedir. Bu modelde kolay silinebilen ağ yüzeyleri Metashape üzerinde temizlenmiştir. Devamında hassas ölçü ayarı ve daha detaylı temizleme işlemleri için Geomagic Wrap programı kullanılmıştır.
5. Geometri ve ağın düzenlenmesi ile birlikte, farklı açıdan çekilen fotoğraflar üzerindeki dokular model üzerinde "Build Orthomastic" komutu ile görünür hale getirilmiştir (Şekil 6.4).



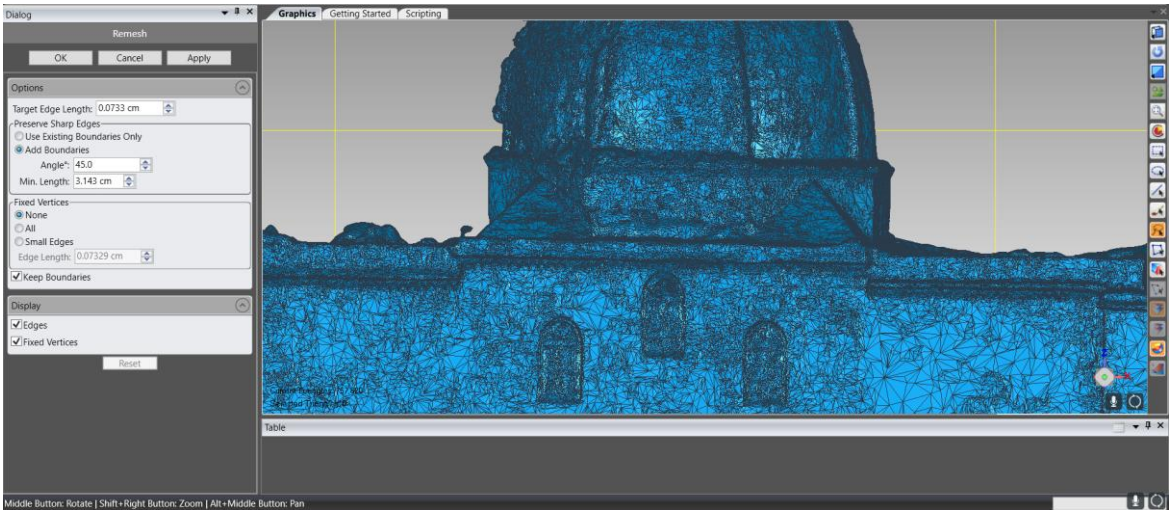
Şekil 6.4. Melik Mahmut Cami - Farklı açılardan elde edilen dokuların modele aktarılması

Elde edilen üç boyutlu modelin, yapı üzerinde kesin ölçüsü bilinen bir elemana göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Ölçeklendirme ve ağ temizleme işlemi, Geomagic programında gerçekleştirilmiştir. Güney duvarı üzerinde yer alan 1,18 x 1,74 m boyutlarına sahip pencere üzerinden kesin ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ölçeklendirme sonrası modelde bulunan ağ kusurlarının ortadan kaldırılması gerekmektedir. Geomagic Wrap programı içerisinde otomatik olarak tanımlı "ağ doktoru (Mesh Doctor)", komutu ile bu işlem gerçekleştirilmiştir. Modelin programa tanımlandığı sırada bu komut otomatik olarak aktif hale gelmektedir (Şekil 6.5). Melik Mahmut Cami üzerinde ağ doktorunun aktifleşmesi ile düzeltilme işlemi onaylanmış ve modeldeki mevcut ağ kusurları giderilmiştir.

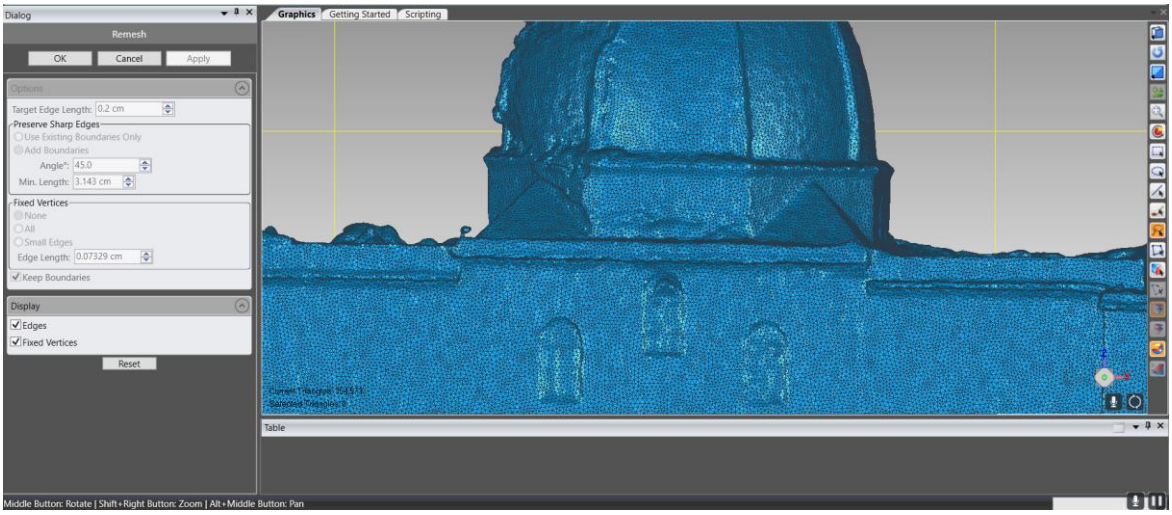


Şekil 6.5. Melik Mahmut Cami - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi

Ağ problemlerinin giderilmesinin ardından yapısal analiz programında daha doğru sonuçlar alabilmek ve dosya boyutunun çok yüksek olmasını engellemek adına ağ boyutlarını birbirine yakın hale getiren "Yeniden Ağ (Remesh)" komutu uygulanmıştır. Bu uygulama, duvarın tümünde yakın ölçülere sahip ağlar ile duvarı yeniden modellemeyi sağlamaktadır (Şekil 6.6). Ayrıca çok sayıda olan ağ sayısını düşürebilmektedir. Uygulama sonucunda da yapısal analize aktarılacak olan modelde, zeminde bulunan ağlara atanacak olan ankastre mesnet mesafelerinin de birbirlerine yakın olması sağlanmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.6. Melik Mahmut Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" öncesi model görünümü

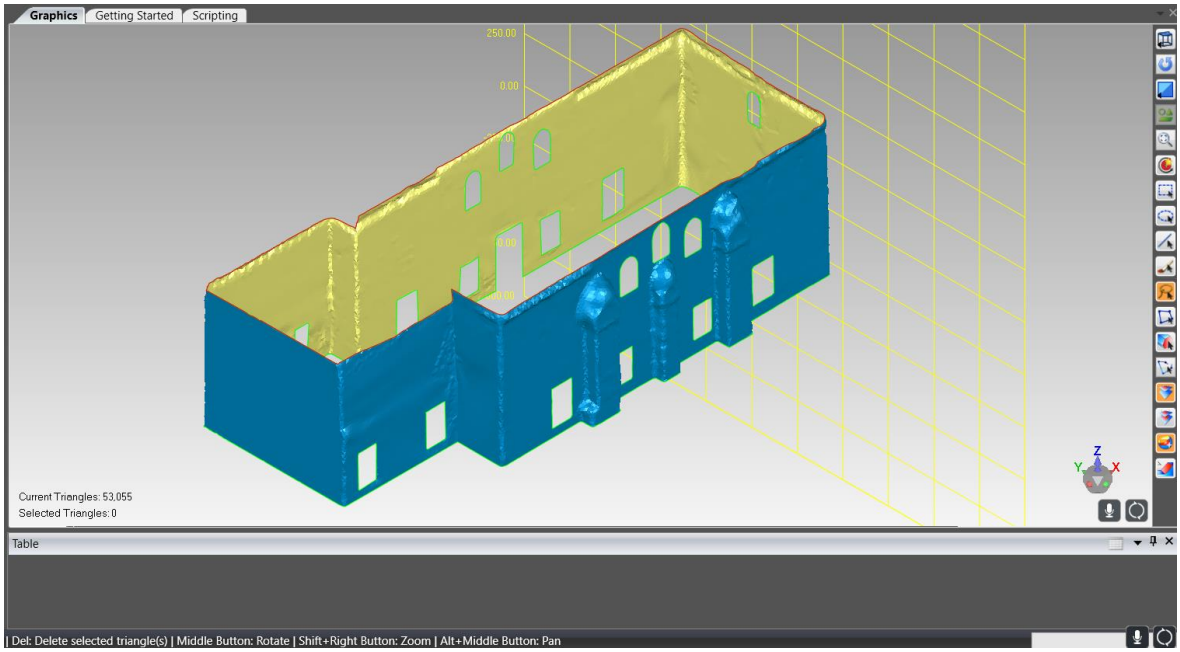


Şekil 6.7. Melik Mahmut Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü

Ağ sayılarının yeniden düzenlenmesi ile birlikte pencere ve kapı gibi açıklıklarda yer alan ağlar temizlenmelidir. Fotogrametrik modelde yüzey olarak tanımlanan ve ağ olarak modellenen açıklıklar, gerçek modeli yansıtması ve açıklıklardaki yapısal davranışların doğru temsil edilmesi adına temizlenmesi gerekmektedir.

Ölçeklendirme ve ağ kusurlarının giderilme işlemlerinin tamamlanması ile beraber Melik Mahmut Cami fotogrametrik modelinde de görüldüğü üzere yapının kubbe tepe noktasının modeli oluşmamıştır. Ayrıca bitişik nizamlı olduğu batı cephesi ve abdesthanelerin kuzey uç noktasında bitişik olduğu doğu cephesinde oluşturulamayan ağların Geomagic Wrap programında tamamlanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu programa ağ yüzeylerden oluşan bir model olarak aktarılan Cami yapısında gerekli yerleri tamamlamak için öncelikle, "Çokgenler (Polygons)" sekmesinde bulunan "Boşlukları Doldur (Fill Holes)" bölümünden faydalanılmıştır. Melik Mahmut Cami modelinde delikleri kapatmak ve ağ yüzeylerini birleştirmek amacıyla değinilen doldurma seçeneğinden sıklıkla faydalanılmıştır. Ayrıca doldurulamayan bölümlerde alternatif bir çözüm yolu olarak da ağ yüzeylerinden oluşan model, "Nokta bulutuna dönüştür (Convert to points)" seçeneği ile nokta bulutu haline dönüştürülmüş ve nokta bulutu düzenleme seçeneklerinden "Noktalar ekle (Add points)" sekmesi ile yüzeyler nokta eklenerek tamamlanmıştır. Nokta ekleme sırasında, program hangi düzleme noktaların ekleneceğine dair bir düzlem tanımlanmasını gerektirmektedir. Burada mevcut nokta bulutları ile eklenecek noktaların aynı düzleme getirilmesi önem arz etmektedir.

Kapı ve pencere açıklıkları temizlenen ve eksik duvarları tamamlanan Melik Mahmut Cami'nin, iç mekânda bulunan tonoz, kubbe ve kemerlerinin modeli klasik yöntem ile modellenerek fotogrametrik model içerisinde entegre edilmiştir. Bu süre zarfında, yapının fotogrametrik modelde oluşan üst örtüsünün tamamen temizlenmesi gerekmektedir. Geomagic programında yapının üst örtüsü temizlenmiştir (Şekil 6.8).



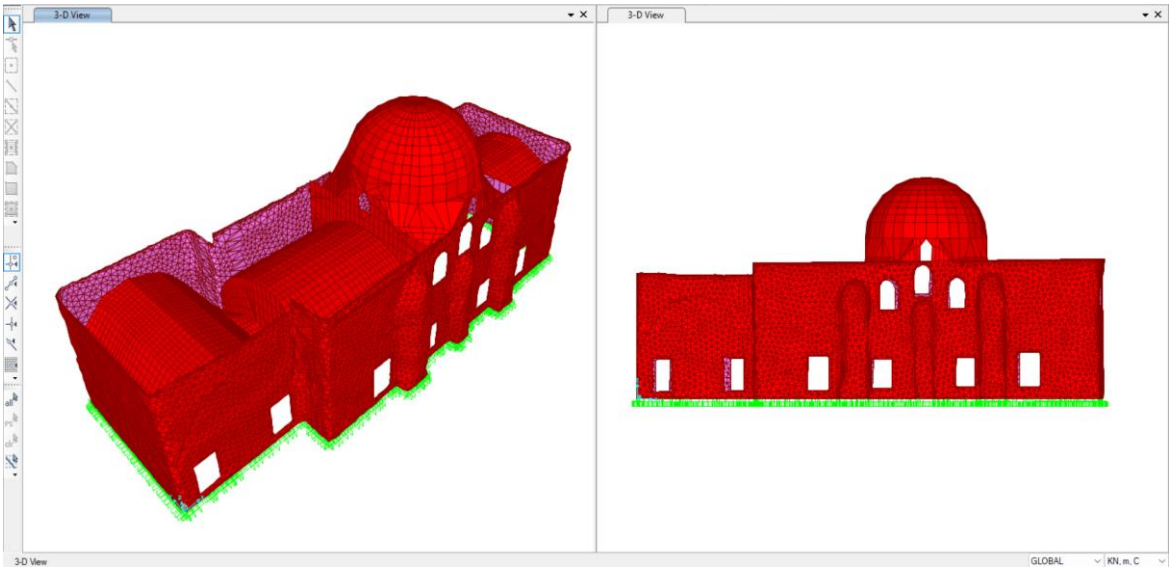
Şekil 6.8. Üst örtüsü temizlenerek klasik model ile entegrasyona hazır fotogrametrik model

Dışa aktarılmaya hazır halen gelen model üzerinde, tekrar Geomagic Wrap programında ağ doktoru komutunun aktif edilmesi ve varsa yeni oluşan ağ problemlerinin giderilerek dışa aktarılması tavsiye edilmektedir. Model, AutoCAD programına aktarılmaya hazır hale gelmiş ve aktarılmak üzere Geomagic Wrap programından DXF formatında model dışa aktarılmıştır. Tez kapsamında yapısal analiz için kullanılan SAP2000 programı için AutoCAD üzerinde katman ayarlarının yapılması gerekmektedir. AutoCAD programında üç boyutlu yüzey (3D Face) olarak ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan "0" katmanına gelen ağların SAP2000'e aktarımı sırasında kabuk eleman olarak tanımlanabilmesi için kırmızı renkli yeni bir katman oluşturmuştur. Ayrıca AutoCAD programında, manuel olarak da ağ kontrollerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Özellikle farklı duvar kalınlıklarına sahip yüzeylerde ağlar arası belirgin bir sınır oluşturmak, mevcut koordinat noktalarını yeniden ayarlamak ve SAP2000 programında farklı kalınlıkları tanımlamak üzere AutoCAD üzerinde düzenlemeler yapılabilmektedir.

Tezde, kullanılan programlar entegre bir biçimde kullanılmış, her programda düzenleme yapılmasa dahi ağlar kontrol edilerek bir sonraki programa geçilmiştir. Tamamlanan süreç sonunda modeli oluşturulan Melik Mahmut Cami, SAP2000 programına aktarılmıştır. Modelde yığma birimler ağırlık merkezine göre SAP2000 programında taşınmıştır. Taşıma işlemi, SAP2000 modelinde taşınacak düğüm noktaların seçilerek "Düzenleme (Edit)" sekmesinde "Taşı (Move)" komutu ile gerçekleştirilebilmektedir. Üçgen ağlardan oluşan modelde taşıma işlemleri sırasında ağların üst üste gelmemesi için taşınacak bölgedeki ağların işlem öncesi temizlenmesi gerekmektedir. Temizleme işleminden sonra taşıma işlemi gerçekleştirilerek düğüm noktalarının birbirine tekrar manuel olarak bağlanması veya arada kalan boşluklara SAP2000'de SHELL eleman çizilerek tamamlanması gerekmektedir.

Yığma birimlerin ağırlık merkezine göre konumlandırılmasıyla birlikte fotogrametrik model içerisinde, ayrı bir SAP2000 dosyasında çizilen Melik Mahmut Cami'nin iç mekânda bulunan taşıyıcı elemanları fotogrametrik model içerisine entegre edilmiştir. Entegrasyon sürecinde, fotogrametrik modelde oluşan ağlar ile klasik yöntem ile iç mekân taşıyıcı elemanların düğüm noktalarının modeldeki SHELL elemanların birlikte hareket edebilmesi için birbirlerine bağlanması gerekmektedir. Taşıma ve SHELL elemanların birbirine bağlanma işlemi Melik Mahmut Cami entegre modeli için yaklaşık olarak 90 dakika sürmüştür. Ortaya çıkan entegre modelin oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Melik Mahmut Cami entegre modeli SHELL eleman kullanılarak oluşturulmuştur.
- Yapının zemin ile ilişkisi toplamda 1372 adet ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Analizi yapılacak olan entegre modelde, toplamda 10778 düğüm noktası ve 16803 SHELL eleman bulunmaktadır (Şekil 6.9).
- Malzeme özellikleri de belirlenen model üzerine öncelikle malzeme tanımlamaları ve kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında elde edilen rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınarak duvar kalınlıkları ayarlanmıştır. Caminin kubbesi 0,4 m; tonozlar 0,7 m; doğu duvarı 1,18 m; batı duvarı 0,7 m; güney duvarı batı uç noktasında 2 pencere açıklığına sahip olan duvar bölümü 1,05 m, kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvar bölümü 0,7 m ve payandaların bulunduğu en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m; kuzey duvarında ise batı uç noktası 1,37 m, kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvar bölümü 1,05 m ve en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m kalınlık tanımlanmıştır.



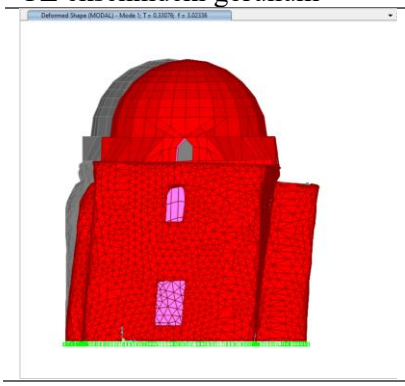
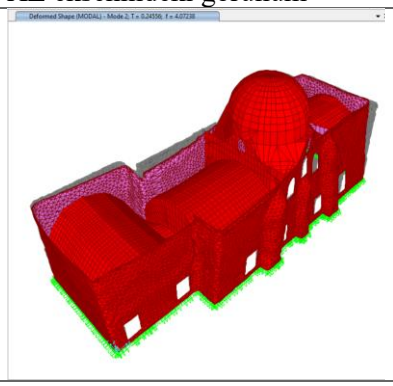
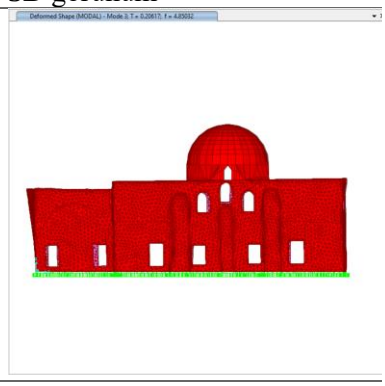
Şekil 6.9. Entegre model üretimi aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan Melik Mahmut Cami sonlu eleman modeli

Fotogrametrik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek amacıyla modal analiz sonucu ortaya çıkan davranışları incelenmiştir. Modal analiz ile oluşan periyot değerleri Çizelge 6.2'de ve ilk üç moda ait mod şekilleri ise Çizelge 6.3'te görülmektedir.

Çizelge 6.2. Melik Mahmut Cami entegre modelinin modal analiz sonucu periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.330758	0.00193	0.6676	0.00027
MODAL	Mod	2	0.245556	0.02922	1.063E-06	3.348E-06
MODAL	Mod	3	0.206172	0.43046	8.954E-05	0.00013
MODAL	Mod	4	0.177419	0.31742	0.00245	0.00052
MODAL	Mod	5	0.168789	4.638E-05	0.03288	0.00385
MODAL	Mod	6	0.161673	0.01645	0.03331	0.01411
MODAL	Mod	7	0.146896	0.00032	0.0139	3.181E-05
MODAL	Mod	8	0.141948	0.00051	0.00375	2.939E-06
MODAL	Mod	9	0.134454	0.0167	0.00025	0.00311
MODAL	Mod	10	0.129139	0.00307	0.0072	0.00175
MODAL	Mod	11	0.118492	0.00693	0.00247	0.00262
MODAL	Mod	12	0.115672	0.00041	1.099E-05	0.00558

Çizelge 6.3. Melik Mahmut Cami entegre modelinin ilk üç mod şekilleri

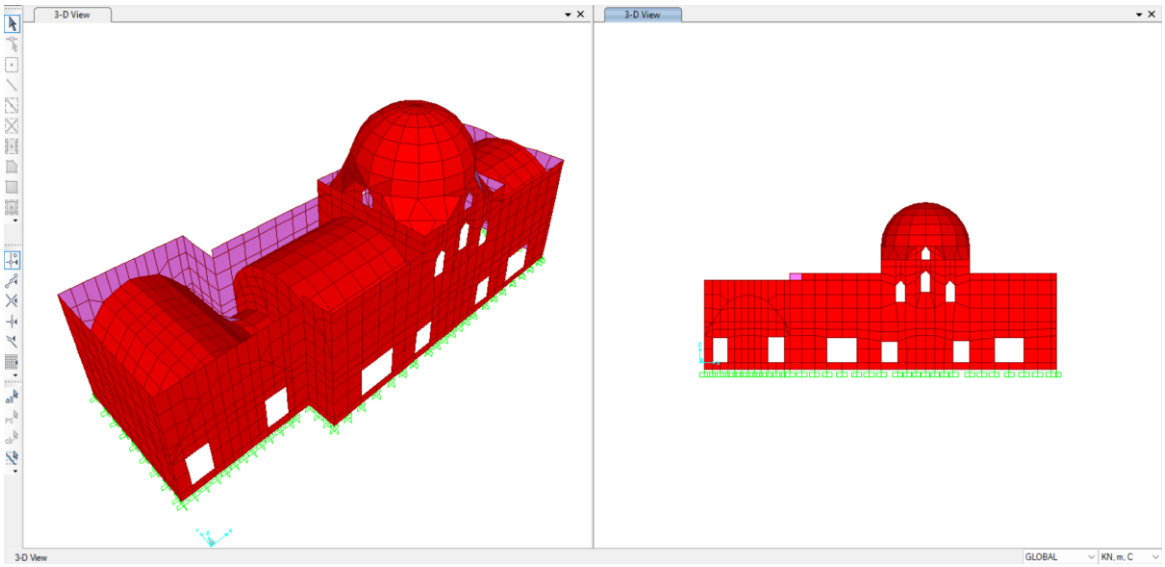
Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Burulma) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (X yönünde ötelenme) 3D görünüm
		

6.1.2. Klasik yöntem ile Melik Mahmut Cami modeli

Yukarıda belirtilen entegre modelleme tekniği ile oluşturulan Mardin Melik Mahmut Cami modelinin, yapısal analiz sonucu mod değerleri ve şekillerine, klasik modelleme tekniği sonuçlarının yakınlık derecesini belirlemek adına klasik yöntem ile ideal ağ sayısına sahip olduğu düşünülen tek bir model oluşturulmuştur. Bu amaç doğrultusunda SAP2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda mevcut rölöve çizimleri üzerinde belirli idealleştirmeler gerçekleştirilerek Melik Mahmut Caminin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde ağ boyutları, çoğunlukla 1,0 x 1,0 m boyutlarında tercih edilmiştir. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Cami, SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi toplamda 83 adet ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır.
- Model, 1383 düğüm noktası ve 1341 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Şekil 6.10).
- Kesit atamaları sırasında elde edilen rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınmıştır. Caminin kubbesi 0,4 m; tonozlar 0,7 m; doğu duvarı 1,18 m; batı duvarı 0,7 m; güney duvarı batı uç noktasında 2 pencere açıklığına sahip olan duvara 1,05 m, kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvara 0,7 m ve payandaların bulunduğu en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m kalınlık tanımlanmıştır. Ayrıca klasik modellemede, mevcutta bulunan payandaların olduğu bölümlerde duvar kalınlığı, 2,84 m olacak şekilde tanımlanmıştır. Kuzey duvarında ise batı uç noktası 1,37 m, kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvar bölümü 1,05 m ve en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m kalınlık tanımlanmıştır.

- Duvar kalınlığı tanımlama işleminde fotogrametrik model ile oluşan en önemli fark payandaların olduğu bölümdür. Klasik yöntemde payandaların olduğu bölüm için belirli kalınlık tanımlanabilirken fotogrametrik modelde payandaların da modelinin oluşturulması nedeniyle ayrı bir kalınlık tanımlaması yapılmamıştır.



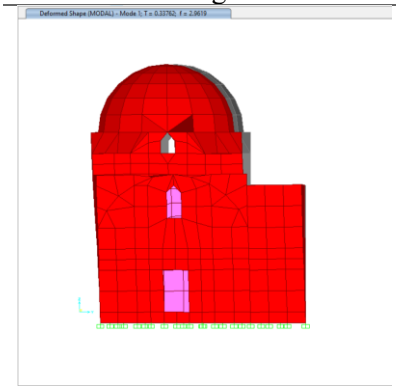
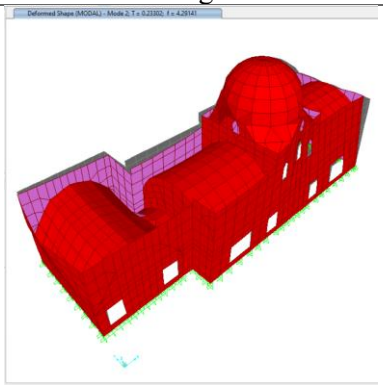
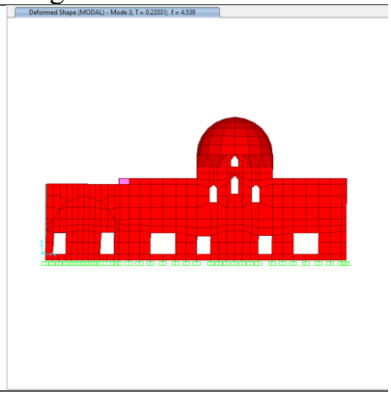
Şekil 6.10. Melik Mahmut Cami - Klasik modelleme tekniği ile sonlu eleman modeli

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, mod ve periyot değerlerinin entegre yöntem ile oluşturulan model ile yakınlık derecesini görmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 6.4'te ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 6.5'te görülmektedir.

Çizelge 6.4. Melik Mahmut Cami klasik modelinin periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.337621	0.00095	0.65999	1.66E-05
MODAL	Mod	2	0.233024	0.05105	0.00573	4.065E-06
MODAL	Mod	3	0.220313	0.31951	0.00011	0.00023
MODAL	Mod	4	0.182992	0.4319	0.00011	3.17E-05
MODAL	Mod	5	0.16846	0.01562	0.08385	0.0019
MODAL	Mod	6	0.161921	0.0075	0.0162	0.02354
MODAL	Mod	7	0.151361	0.00147	0.00419	0.00016
MODAL	Mod	8	0.143271	0.0045	0.0094	1.571E-05
MODAL	Mod	9	0.139271	0.01359	0.0054	0.00085
MODAL	Mod	10	0.131155	0.0022	0.00117	0.00499
MODAL	Mod	11	0.118561	0.00017	0.00722	0.00532
MODAL	Mod	12	0.113656	0.01276	0.00058	8.748E-07

Çizelge 6.5. Melik Mahmut Cami klasik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Burulma) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (X yönünde ötelenme) 3D görünüm
		

6.1.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan Melik Mahmut Cami modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

Tezde, modelleme teknikleri arasındaki avantajları ve dezavantajları ortaya koymak amacıyla hızlı uygulanabilecek yük atamaları gerçekleştirilmiş, yapıların kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanmıştır. Öncelikle Melik Mahmut Cami'ne ait entegre model ve klasik modeli için yukarıda detaylandırılan mod değerlerinin karşılaştırılmasına Çizelge 6.6'da yer verilmiştir. Modal analizlerde gerçekleşen ötelenme durumları her iki modelde de benzerlik göstermektedir. Her iki modelleme tekniğinde de Mod 1, Y yönünde ötelenme; Mod 2, burulma; Mod 3, X yönünde ötelenmeye neden olmuştur ve analiz sonucu ortaya çıkan periyot değerleri de büyük yakınlık göstermektedir.

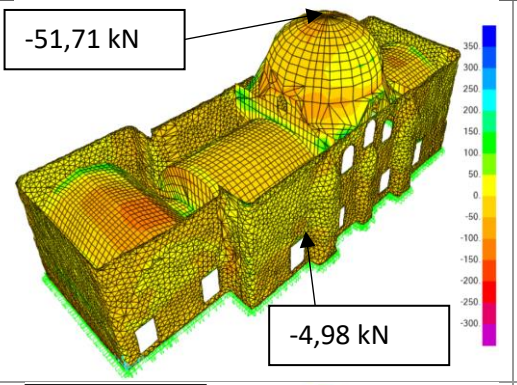
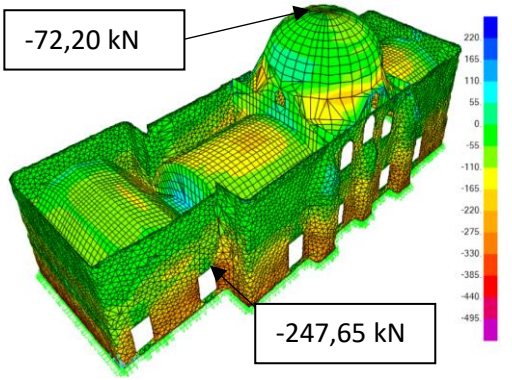
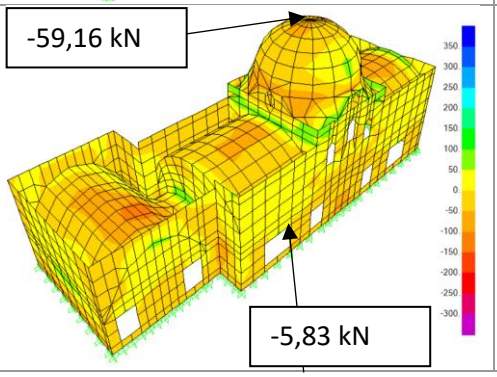
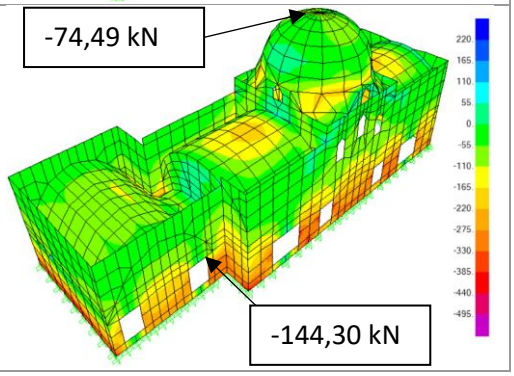
Çizelge 6.6. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen Melik Mahmut Cami'nin modal analiz sonuçları

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)
ENTEGRE MODEL	Mod	1	0.330758	0.00193	0.6676
	Mod	2	0.245556	0.02922	1.063E-06
	Mod	3	0.206172	0.43046	8.954E-05
KLASİK MODEL	Mod	1	0.337621	0.00095	0.65999
	Mod	2	0.233024	0.05105	0.00573
	Mod	3	0.220313	0.31951	0.00011

Melik Mahmut Cami'ne ait oluşturulan modeller üzerindeki sabit yük gerilmeleri Çizelge 6.7'de detaylandırılmıştır. Gerilme değerleri ele alındığında, daha önce ağ sayılarının yakın olan modeller üzerinde gerilme değerlerinin yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bu

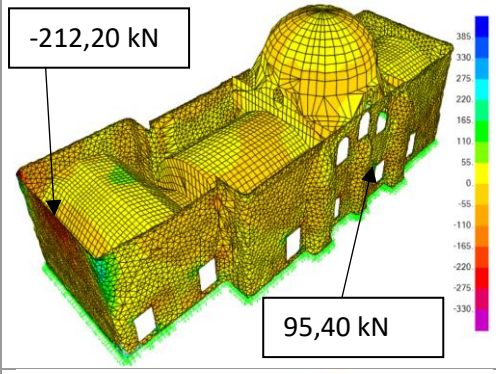
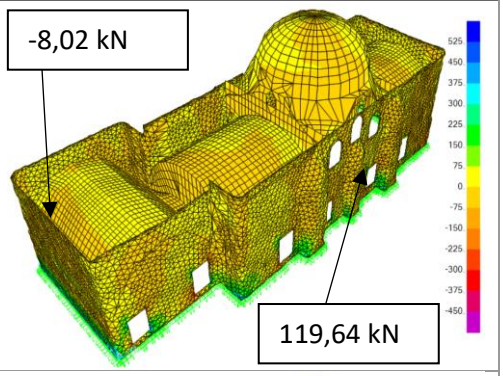
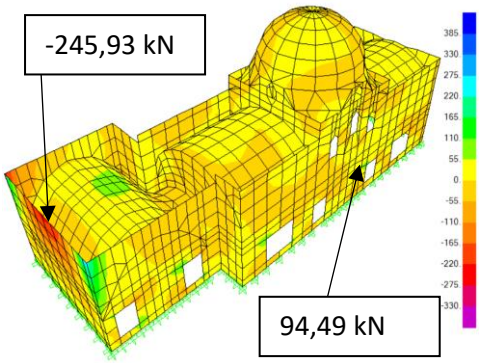
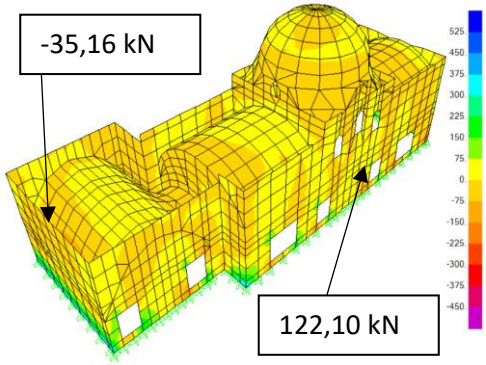
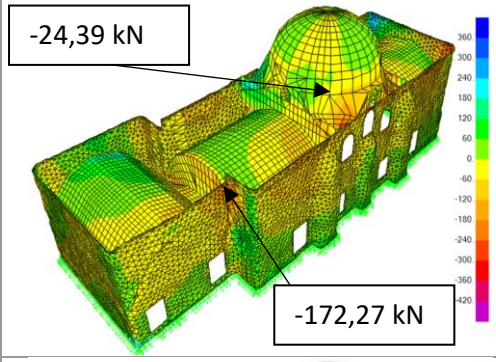
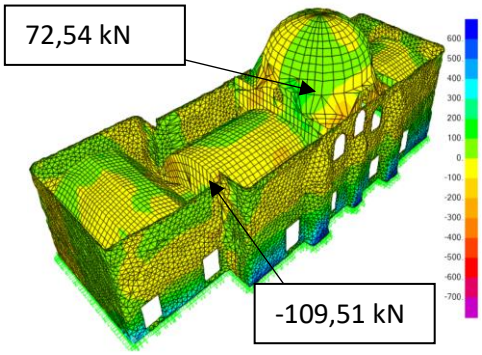
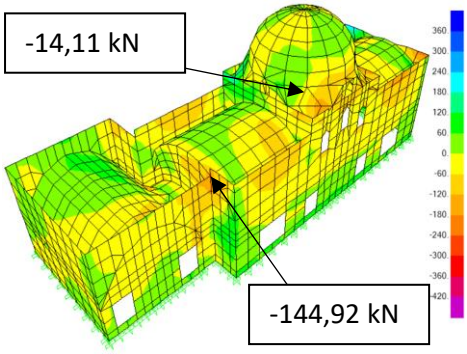
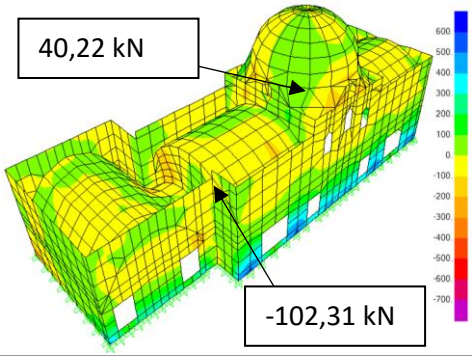
durumda, ideal büyüklükteki ağ sayısı ile oluşturulmuş klasik model ile entegre model arasında gerilme değerleri arasında bazı noktalarda farklılıklar görünmektedir. Ancak, her iki model incelendiğinde de aykırı bir durumun olmadığı, ortaya çıkan değerlerin aynı bölgelere doğru benzer oranda artma ve azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Gerilme değerlerini temsil eden renk tonları benzer aralıkta ayarlandığı durumda, ortaya çıkan sonucun da yakınlık gösterdiği görülebilmektedir.

Çizelge 6.7. Melik Mahmut Cami - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	S11 Gerilme Değerleri	S22 Gerilme Değerleri
Entegre Model		
Klasik Model		

Melik Mahmut Cami modelinin kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanması sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları Çizelge 6.8'de detaylandırılmıştır. Yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarının, sabit yükler altında yapılan analiz sonuçları ile benzerlik taşıdığı ve yakın değerlerin görülmemesin rağmen benzer oranda artma ve azalmaların olduğu, renk tonları ile gerilme değerlerinin temsilinin gösterildiği resimlerden anlaşılabilmektedir.

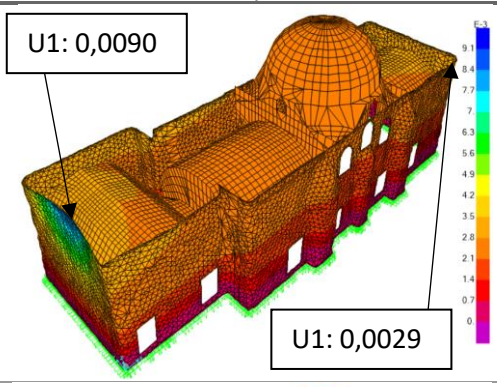
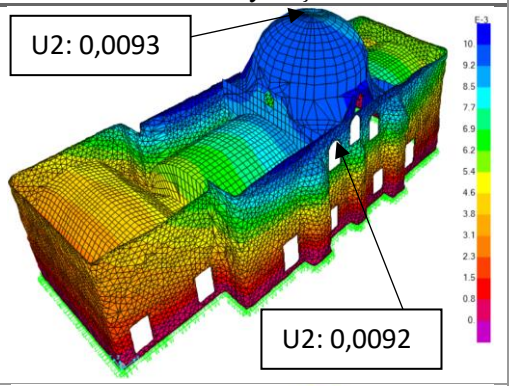
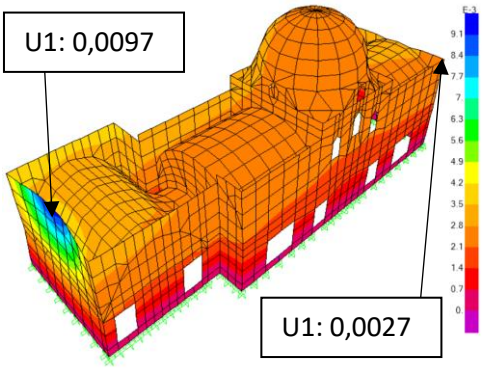
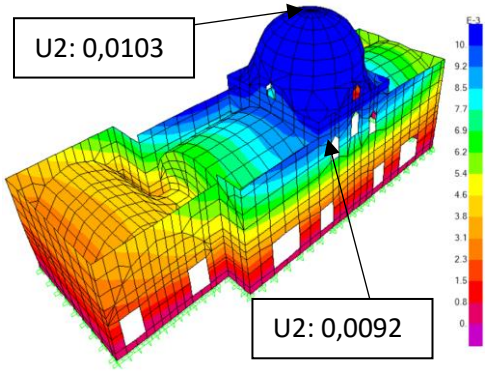
Çizelge 6.8. Melik Mahmut Cami – Yatay yük analizleri sonucu gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Entegre Model		
Klasik Model		
	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Entegre Model		
Klasik Model		

Cami için tanımlanan yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analizde, deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizgileri Çizelge 6.9'da detaylandırılmıştır. Değerler, ağ sayılarının

yer değiştirme sonuçlarında bir farklılık oluşturmadığını göstermektedir. Her iki model için de çok yakın yer değiştirme sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çizelge 6.9. Melik Mahmut Cami - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm)

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
Entegre Model		
Klasik Model		

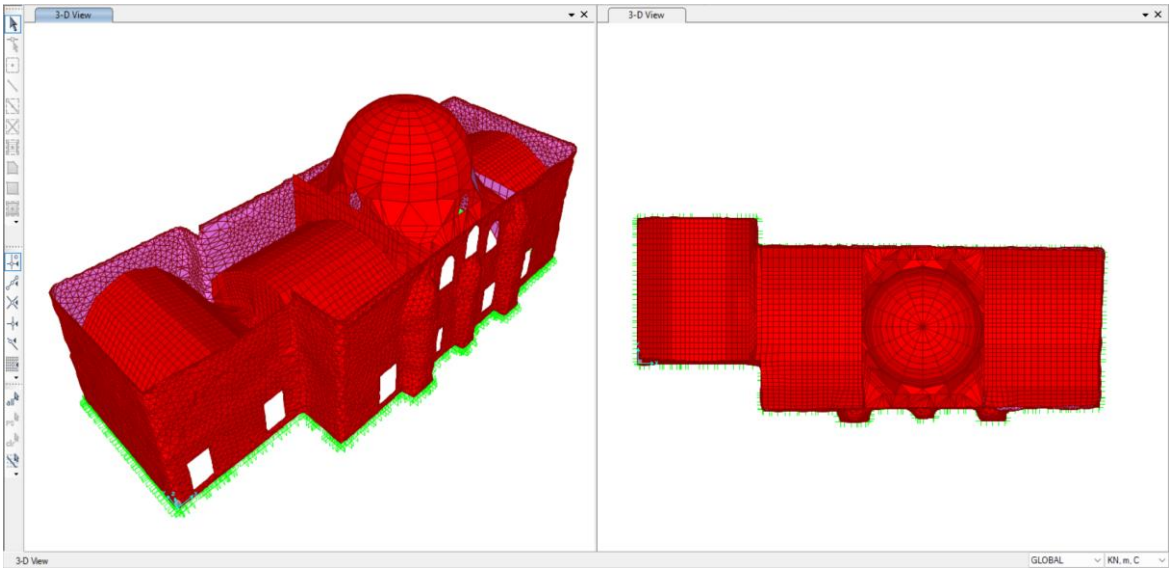
Yapısal analiz süreci "bilgi belgelerin temin edilmesi ve rölövelerin alınması, modelin oluşturulması, modelni düzenlenmesi, analiz süreci" başlıklarında model oluşturma süresi karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.10). Burada yer alan süreler kullanılan bilgisayar işlemcilerinin kalitesine, kullanıcının bilgisayar kullanım hızına ve programa hakim olma durumlarına göre kişiden kişiye değişiklik gösterebilir. Örneğin, Monster markalı Tulpar T7 V21.7 modeli bilgisayar işlemcisinde Metashape programı ile yaklaşık 1 saatte oluşturulan model, Asus markalı Tuf Gaming A15 modelinde bilgisayar işlemcisine göre Metashape programı ile yaklaşık 4 saatte model oluşturulmuştur. Bu çalışmada Monster Tulpar T7 V21.7 modeli bilgisayar kullanılmıştır. Süreçte kullanılacak model teknikleri için tek kriterin zaman olmadığı unutulmamalıdır. Alan çalışmasına özgü hangi teknik daha avantajlı olacak ise onun değerlendirilmesinin yapılması ile modelleme tekniği seçilmelidir.

Çizelge 6.10. Melik Mahmut Cami - Entegre model ve klasik model oluşum sırasında yaklaşık zaman kullanımı

Aşama	MMM- Entegre Model	MMM- Klasik Model
Bilgi Belgelerin Temini ve Rölöve	-	~20-25 gün
Modelin Oluşturulması	~6 saat	~12 saat
Modelin Düzenlenmesi	~10 saat	-
Analiz	2 dakika	1 dakika
Toplam	~16 Saat 2 dakika	~25 gün 12 saat 1 dakika

Çalışmada gerçekleştirilen fotogrametrik model ile oluşturulan 3D modellerin, cephe fotoğrafları ile oluşturulması nedeniyle tarihi yapıların analiz süreçlerinde yığma birimlerin ağırlık merkezinde kaymanın olacağı belirtilmiştir. Fakat gerçekleştirilen analizler ile bu kaymanın analiz sonuçlarına önemli bir etki etmediği ortaya konmuştur (bkz. Bölüm 4.3, sayfa 137). Yapısal analizleri, yığma birimlerinin ağırlık merkezine göre SAP2000 programında taşıma işlemi ile gerçekleştirilen Melik Mahmut Cami'nin, entegre modelinde taşıma işlemi gerçekleştirilmeden de yapısal davranışları analiz edilmiştir. Bu model, çizelgelerde kolaylık olması adına EMA-2 (Entegre Model Ağırlık Merkezi-2) olarak isimlendirilmiştir. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Cami, SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 297 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 10797 düğüm noktası ve 17034 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Şekil 6.11).
- Malzeme özellikleri de belirlenen model üzerine öncelikle malzeme tanımlamaları ve kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında elde edilen rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınarak duvar kalınlıkları ayarlanmıştır. Caminin kubbesi 0,4 m; tonozlar 0,7 m; doğu duvarı 1,18 m; batı duvarı 0,7 m; güney duvarı batı uç noktasında 2 pencere açıklığına sahip olan duvara 1,05 m, kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvara 0,7 m ve payandaların bulunduğu en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m kalınlık tanımlanmıştır. Kuzey duvarında ise batı uç noktası 1,37 m, kuzey-güney doğrultusunda uzanan duvar bölümü 1,05 m ve en uzun duvar bölümüne ise 2,12 m kalınlık tanımlanmıştır.



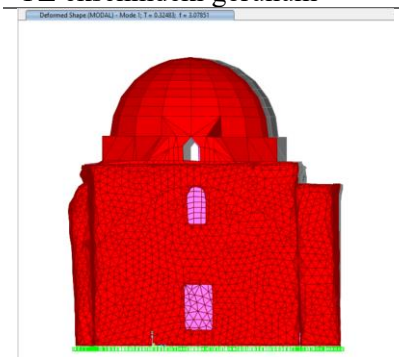
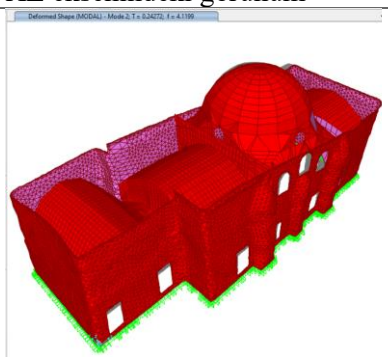
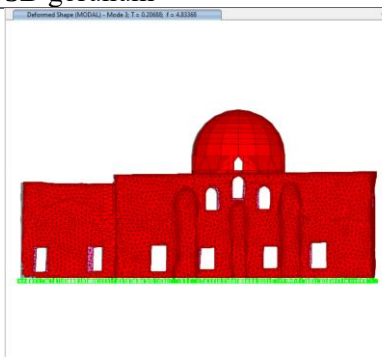
Şekil 6.11. Yığma birimlerin ağırlık merkezine doğru taşınmadan gerçekleştirilen model

EMA-2'de modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 6.11'de ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 6.12'de görülmektedir. Değerler incelendiğinde, entegre model ile klasik modelde ortaya çıkan sonuçlara çok yakın oldukları görülebilmektedir. Bu modelde birinci titreşim periyodu 0,324 sn iken; ağırlık merkezine doğru taşınan modelde 0,330 ve klasik modelde ise 0,337 sn olduğu görülmektedir. Modal analizlerde gerçekleşen ötelenme durumları diğer iki model ile aynıdır. Mod 1, Y yönünde ötelenme; Mod 2, burulma; Mod 3, X yönünde ötelenmeye neden olmuştur ve ötelenme değerleri de birbirlerine yakınlık göstermektedir.

Çizelge 6.11. EMA-2 periyot ve ötelenme değerleri

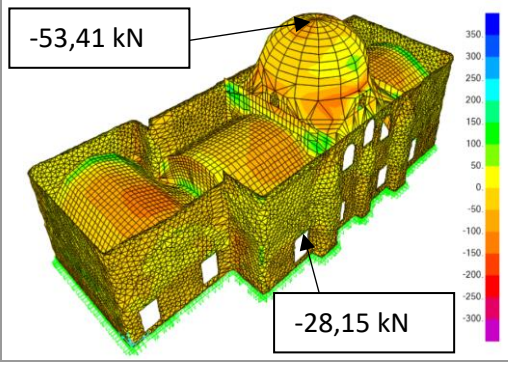
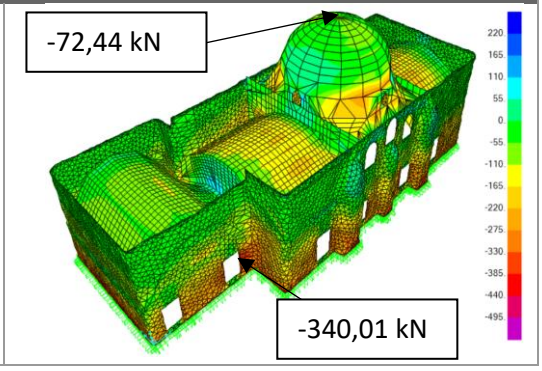
Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.324833	0.00326	0.66943	0.00051
MODAL	Mod	2	0.242725	0.04126	0.0018	1.032E-06
MODAL	Mod	3	0.206882	0.46562	0.00015	4.131E-05
MODAL	Mod	4	0.185061	0.17425	0.00038	0.00784
MODAL	Mod	5	0.174824	0.09971	0.00365	0.01111
MODAL	Mod	6	0.166889	0.00069	0.03518	1.965E-05
MODAL	Mod	7	0.157178	0.01516	0.03187	0.00116
MODAL	Mod	8	0.144051	0.00222	0.01598	1.383E-05
MODAL	Mod	9	0.135643	0.00611	0.00021	0.00841
MODAL	Mod	10	0.130145	0.00956	0.00494	0.00025
MODAL	Mod	11	0.123448	0.00434	0.0023	0.00274
MODAL	Mod	12	0.115517	0.00023	0.00153	0.07343

Çizelge 6.12. EMA-2 ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Burulma) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (X yönünde ötelenme) 3D görünüm
		

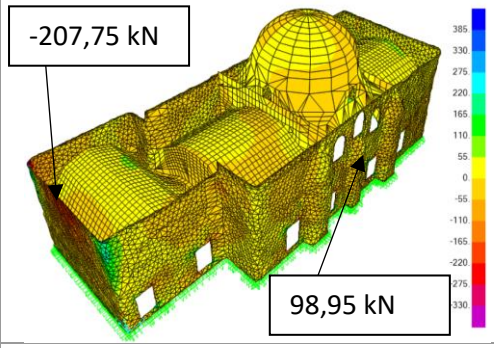
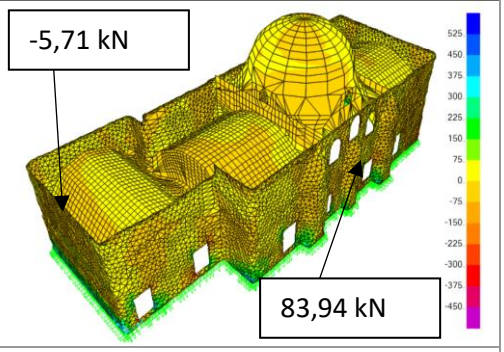
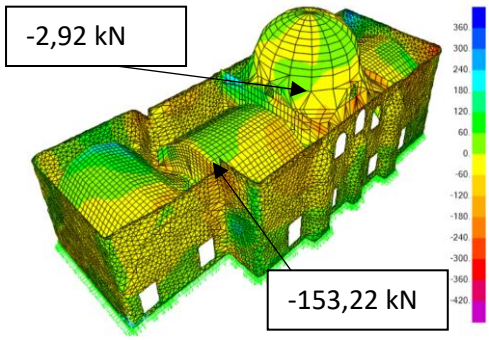
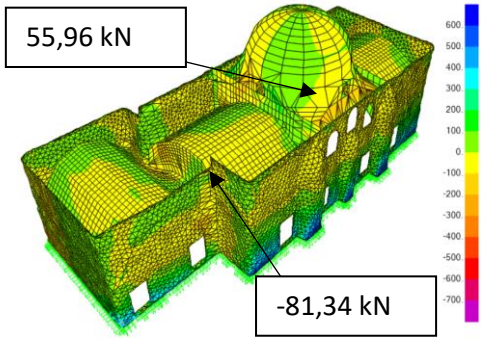
EMA-2 üzerindeki sabit yük gerilmeleri Çizelge 6.13'te detaylandırılmıştır. Gerilme değerleri ele alındığında, daha önce analizleri gerçekleştirilen her iki model sonuçlarına göre aykırı bir durumun olmadığı, ortaya çıkan değerlerin aynı bölgelere doğru benzer oranda artma ve azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Kubbe tepe noktası S22 gerilme değerleri karşılaştırıldığında kubbe tepe noktasında EMA-2 -72,44 kN'luk bir gerilme değeri oluşurken; entegre modelde -72,20 kN, klasik modelde ise -74,49 kN'luk gerilme değerlerinin oluştuğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.13. Melik Mahmut Cami - EMA-2 sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	S11 Gerilme Değerleri	S22 Gerilme Değerleri
EMA-2		

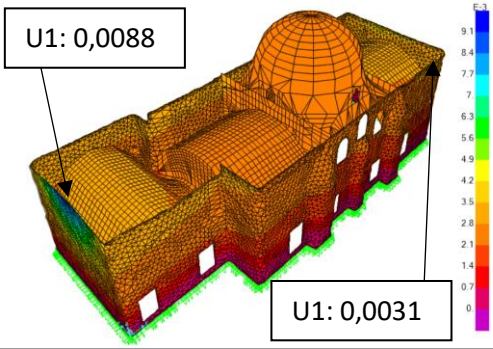
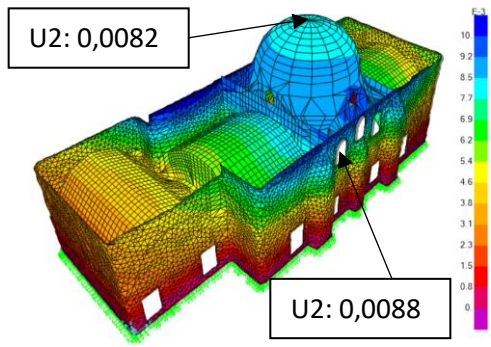
EMA-2 modelinin kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanması sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları Çizelge 6.14'te detaylandırılmıştır. Ağırlık merkezine göre taşıma işleminin gerçekleştiği entegre model ile klasik model ile yakın sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür.

Çizelge 6.14. Melik Mahmut Cami – EMA-2 yatay yük analizleri sonucu gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
EMA-2		
	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
EMA-2		

EMA-2 için tanımlanan yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analizde, deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizgileri Çizelge 6.15'te detaylandırılmıştır. Entegre model ve klasik modele yakın yer değiştirme sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çizelge 6.15. Melik Mahmut Cami – EMA-2 X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri

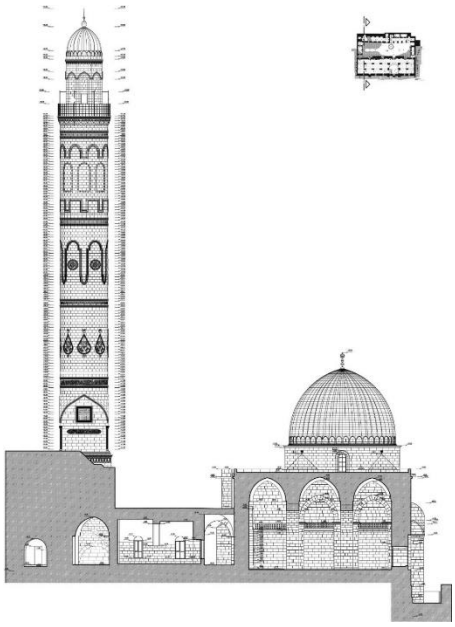
Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
EMA-2		

EMA-2 modelinde gerçekleştirilen analizler sonucunda, fotogrametrik modelleme tekniği ile gerçekleştirilecek olan analizlerde herhangi bir ağırlık merkezi düzenleme işlemi

yapılmadığı durumda da doğru sonuçlar elde edilebileceğini yeniden gösterilmiştir. Ağırlık merkezine göre yığma birimlerinin taşıma durumu da fazla zaman gerektirmeyen bir süreçtir. Strüktürel davranışı tespit edilecek yapılarda, daha hassas ve detaylı sonuçların elde edilmesi isteniyorsa mikro modelleme tekniklerinin kullanılması ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarına göre analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

6.2. Fotogrametrik Modelleme Yönteminin Mardin Ulu Cami Üzerinden İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, fotogrametrik modelleme tekniği ile büyük ölçekli bir yapının modeli oluşturulmak üzere Mardin Ulu Cami'nin yapısal analiz modelleri oluşturulmuştur. Mardin Ulu Cami'nin doğu-batı doğrultusunda uzanan ana harim mekanı 54,48 x 16,19 m boyutlarına sahiptir. Tamamen dikdörtgen planlı bir forma sahip olan caminin, güney cephe duvarında 5 adet pencere açıklığı ve 4 adet payanda bulunmaktadır. Avluya bakan kuzey cephe duvarında 4 adet giriş kapısı ve 2 adet pencere açıklığı bulunmaktadır. Kuzey cephesinde bulunan kapı açıklıklarının arasında sonradan inşa edilmiş beden duvarı ile yatayda aynı boyuta sahip payandalar yer almaktadır. Doğu ve batı cephelerinde ise karşılıklı 1 adet pencere açıklığı bulunmaktadır. Caminin kubbesi, Anadolu'da oldukça dikkat çeken ve Artuklu dönemine özgü dilimli şekilde inşa edilmiştir. Caminin avlu kotu ile güney cephe duvarı zemin kotu arasında yaklaşık 2,5 m'lik yükseklik farkı bulunmaktadır. Dolayısıyla yapının cephe beden duvarları farklı yüksekliklere sahiptir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Mardin Ulu Cami kesiti

Mevcut barındırdığı tüm özellikleri dikkate alınan Mardin Ulu Cami'nin fotogrametrik modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada büyük ölçekli yapılar için fotogrametrik modelleme tekniği ile klasik modelleme tekniğinin entegre bir biçimde çalıştıran bir öneri geliştirilmiştir.

6.2.1. Fotogrametrik yöntem ile Mardin Ulu Cami modeli

Fotogrametrik modeli oluşturulan Mardin Ulu Cami için 1766 adet fotoğraf çekilmiştir ve program çekilen fotoğrafların 1766 adetini tanımlayarak hizalamıştır. Akıllı telefon aracılığı ile çekilen bu fotoğraflar 3024 x 4032 piksel boyutuna ve 72 dpi (inç başına düşen nokta sayısı) yatay ve düşey çözünürlüğe sahiptir. Fotoğrafların tamamının tanımlanması ve hizalanması tek seferde oluşan bir süreci içermemektedir. Çekilen 1766 adet fotoğrafın ilk tanımlama işlemlerinde, tanımlanamayan fotoğraflar tespit edilmiş ve fotoğraf üzerinde parlak nesnelerin yüzeyi siyah ile kapatılarak yeniden programa aktarılmıştır. Metashape programının fotoğraf tanımlama ve hizalama aşamasında, hizalanamayan bölgeler için tekrar alana gidip, bölgeye yönelik yeni fotoğraflar çekilmelidir.

Mardin Ulu Cami fotoğraf çekim işlemleri için 2 ayrı gün saha çalışması yapılmıştır.

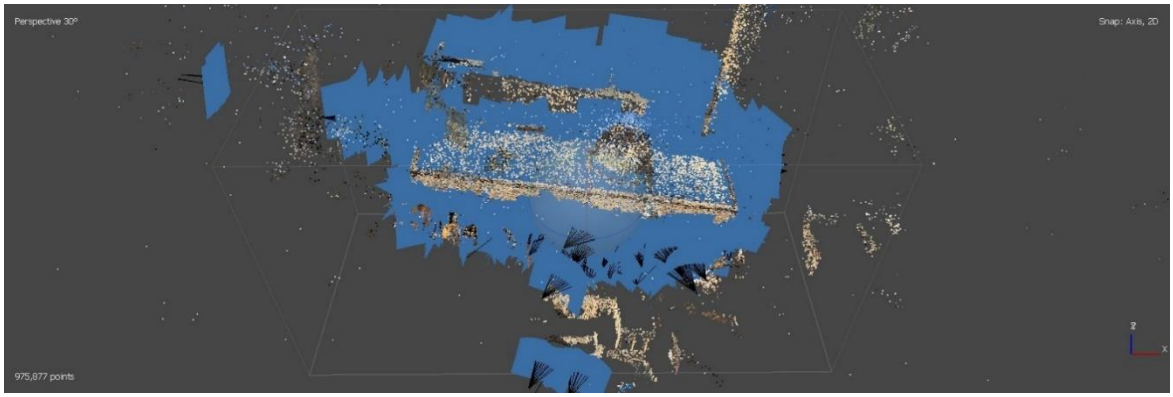
İlk gün yapının cephelerinin görüntüleri alınarak modeli oluşturulabilir duruma getirilmiştir ve bu çalışma yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür. Ayrıca, bu süreç içerisinde yapının kubbesinin görüntüleri alınabilecek komşu yapılar tespit edilmiştir. İkinci gün ise yapının ulaşılamayan kubbesine dair görüntüler alınmaya çalışılmıştır ve bu çalışma da yaklaşık olarak 2 saat sürmüştür. Mardin'in eğimli topografik yapısı sayesinde yakın çevre yapılarının çatılarından kubbenin görüntüleri alınmıştır. Ayrıca çatı döşemesinin ve kubbenin görüntülerinin fotoğraf karelerinde tam olarak yer edinmesi amacıyla 2,10 m yüksekliğe sahip tripod kullanılmıştır (Resim 6.1). Mardin Ulu Cami fotogrametrik modeli için gerçekleştirilen saha çalışmalarının toplamında fotoğraf çekim işlemleri için 4 saatlik bir süre yeterli olmuştur.



Resim 6.1. Tripod ile kubbe fotoğraflarının çekilmesi

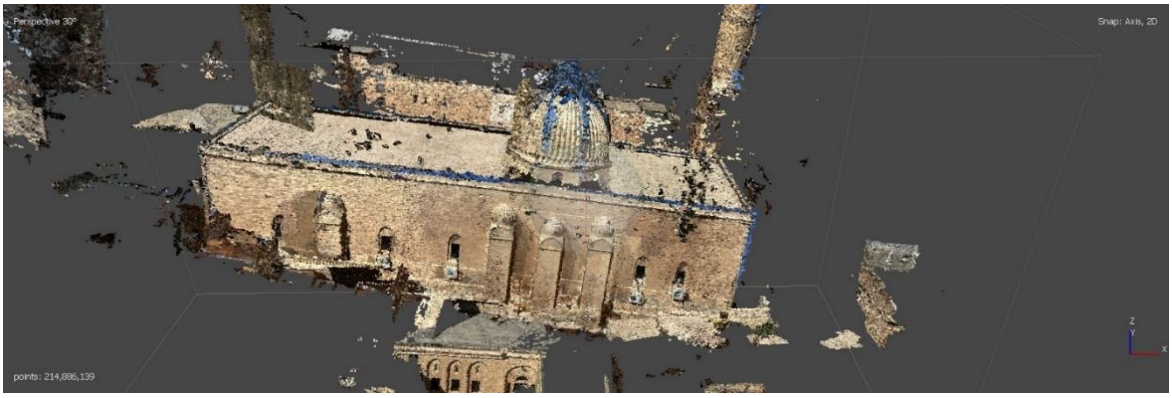
Fotoğrafların tanımlanma ve model oluşturulma süreci, beş ana adımdan oluşmuştur:

1. İlk adım olan kamera hizalama aşamasında çekilen 1766 adet fotoğrafın tamamı programa yüklenmiştir. Bu adım sonucunda nokta bulutundan ve kamera açılarından oluşan bir model Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



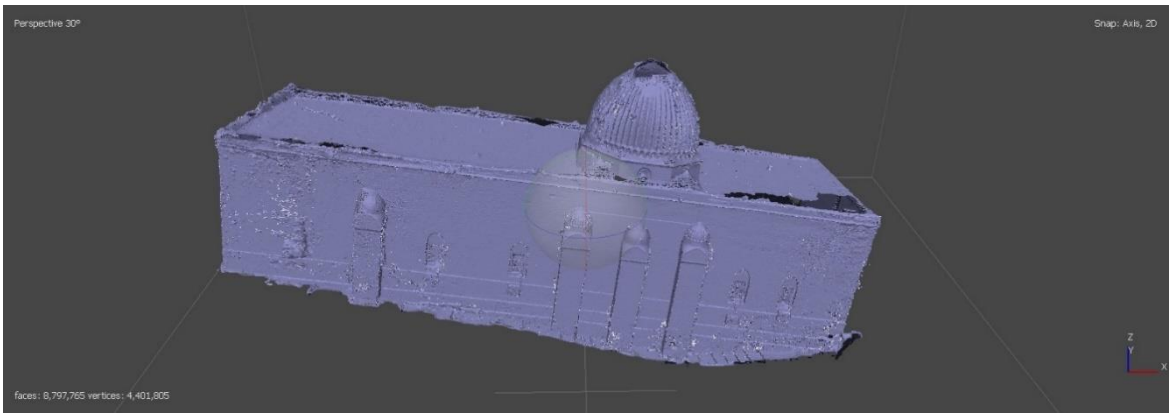
Şekil 6.13. Mardin Ulu Cami - Metashape programından elde edilen kamera açıları ve nokta bulutu

2. Hizalama aşamasının tamamlanması ile birlikte Mardin Ulu Cami'nin yoğun nokta bulutu oluşturulmuştur (Şekil 6.14). Metashape programı, kamera hizalamasına bağlı olarak daha yoğun ve ayrıntılı bir nokta bulutu oluşturmaktadır.



Şekil 6.14. Mardin Ulu Cami - Metashape programından elde edilen 3D yoğun nokta bulutu

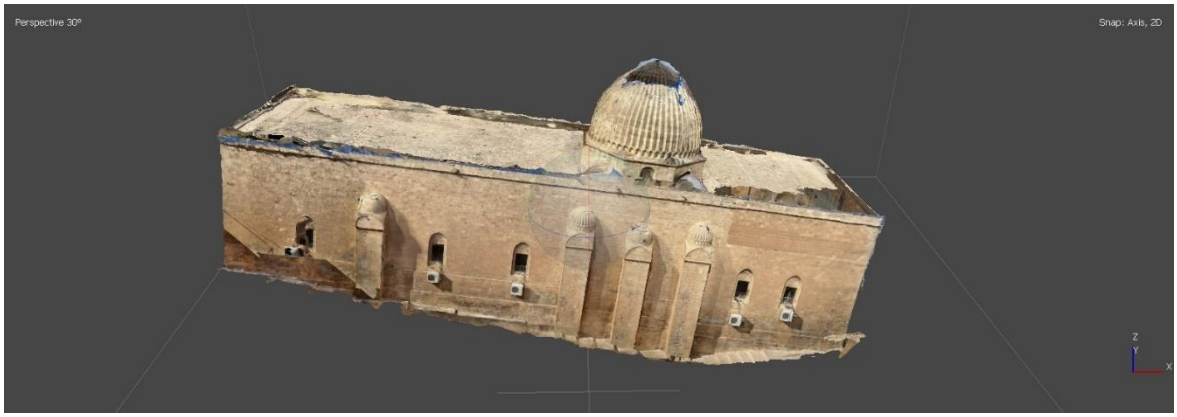
3. Yoğun nokta bulutu işleminin ardından, nokta bulutlarının ağlara dönüştürülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Metashape, önceki adımdan elde edilen yoğun nokta bulutlarına dayalı olarak nesneyi temsil eden bir 3D çokgen ağının yüzeyini yeniden yapılandırmaktadır. Ağa dönüştürülme işlemi öncesinde, ihtiyaç duyulmayan nokta bulutlarının temizlenmesi özellikle büyük ölçekli yüzeylerden model oluşturma sürecini kolaylaştırmaktadır. Ağların oluşturulması sonrasında, detaylı bir temizleme işlemi için tekrar diğer programlar kullanılabilir (Şekil 6.15). Temizleme işleminin ardından ağ oluşturma süreci daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermektedir.



Şekil 6.15. Mardin Ulu Cami - Metashape programından elde edilen ağ yüzeyi (mesh)

4. Ağ oluşturulduktan sonra Mardin Ulu Cami dışında kalan gereksiz ağ yüzeylerine ait veriler temizlenebilmektedir. Bu işlem ayrıca kullanılan Geomagic Wrap programı üzerinden de detaylı yapılabilmektedir. Bu modelde kolay silinebilen ağ yüzeyleri Metashape üzerinde temizlenmiştir. Devamında hassas ölçü ayarı ve daha detaylı temizleme işlemleri için Geomagic Wrap programı kullanılmıştır.

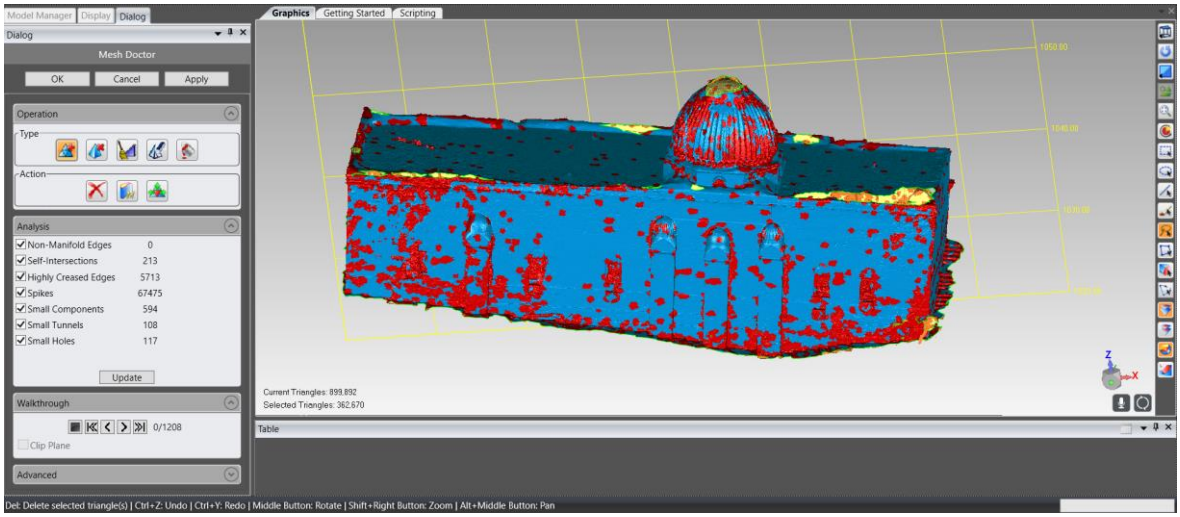
5. Geometri ve ağın düzenlenmesi ile birlikte, farklı açıdan çekilen fotoğraflar üzerindeki dokular model üzerinde “Build Orthomastic” komutu ile görünür hale getirilmiştir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16. Mardin Ulu Cami - Metashape programından farklı açılardan elde edilen dokuların modele aktarılması

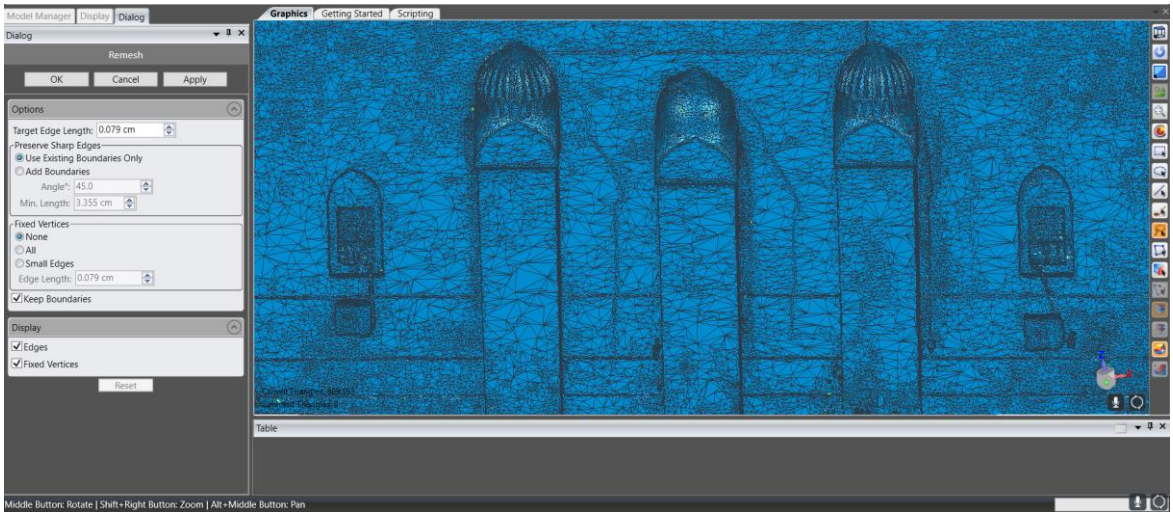
Elde edilen üç boyutlu modelin, yapı üzerinde kesin ölçüsü bilinen bir elemana göre ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Tez kapsamında ölçeklendirme işlemi, Geomagic Wrap programında gerçekleştirilmiştir. Geomagic Wrap programına aktarım için Metashape programından STL formatı kullanılarak modeli dışarı aktarmak gerekmektedir. Mardin Ulu Cami güney cephe duvarı üzerinde 1,01 m olarak rölöve planlarında yer alan pencere açıklığına göre ölçeklendirme gerçekleştirilmiştir.

Ölçeklendirme sonrası modelde bulunan ağ kusurlarının ortadan kaldırılması amacıyla, Geomagic Wrap programı içerisinde otomatik olarak tanımlı “ağ doktoru (Mesh Doctor)”, poligon ağı otomatik olarak modelin aktarıldığı sırada aktif olmuştur (Şekil 6.17). Aktif olmadığı durumlarda, Geomagic Wrap ara yüzünde “Çokgenler (Polygons)” sekmesine gelerek manuel olarak da “ağ doktoru” aktif edilip uygulanabilmektedir. Mardin Ulu Cami üzerinde ağ doktorunun aktifleşmesi ile düzeltilme işlemi onaylanmış ve modeldeki ağ kusurları giderilmiştir.

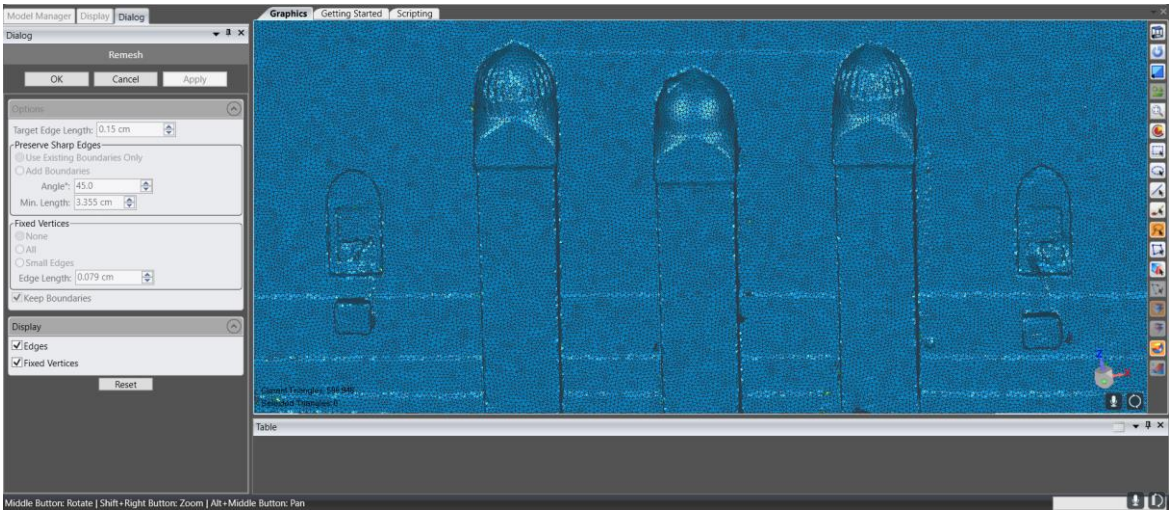


Şekil 6.17. Mardin Ulu Cami - Geomagic Wrap programında hatalı olarak tanımlanan ağların kırmızı olarak gösterilmesi

Ağ problemlerinin giderilmesinin ardından yapısal analiz programında daha doğru sonuçlar alabilmek ve dosya boyutunun çok yüksek olmasını engellemek adına ağ boyutlarını birbirine yakın hale getiren "Yeniden Ağ (Remesh)" komutu uygulanmıştır. Komut, programın ara yüzünde "Çokgenler (Polygons)" sekmesinde erişilebilmektedir. Bu uygulama, duvarın tümünde yakın ölçülere sahip ağlar ile duvarı yeniden modellemeyi sağlamaktadır (Şekil 6.18). Uygulama sonucunda da yapısal analize aktarılacak olan modelde, zeminde bulunan ağlara atanacak olan ankastre mesnet mesafelerinin de birbirlerine yakın olması sağlanmıştır (Şekil 6.19).



Şekil 6.18. Mardin Ulu Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" öncesi model görünümü



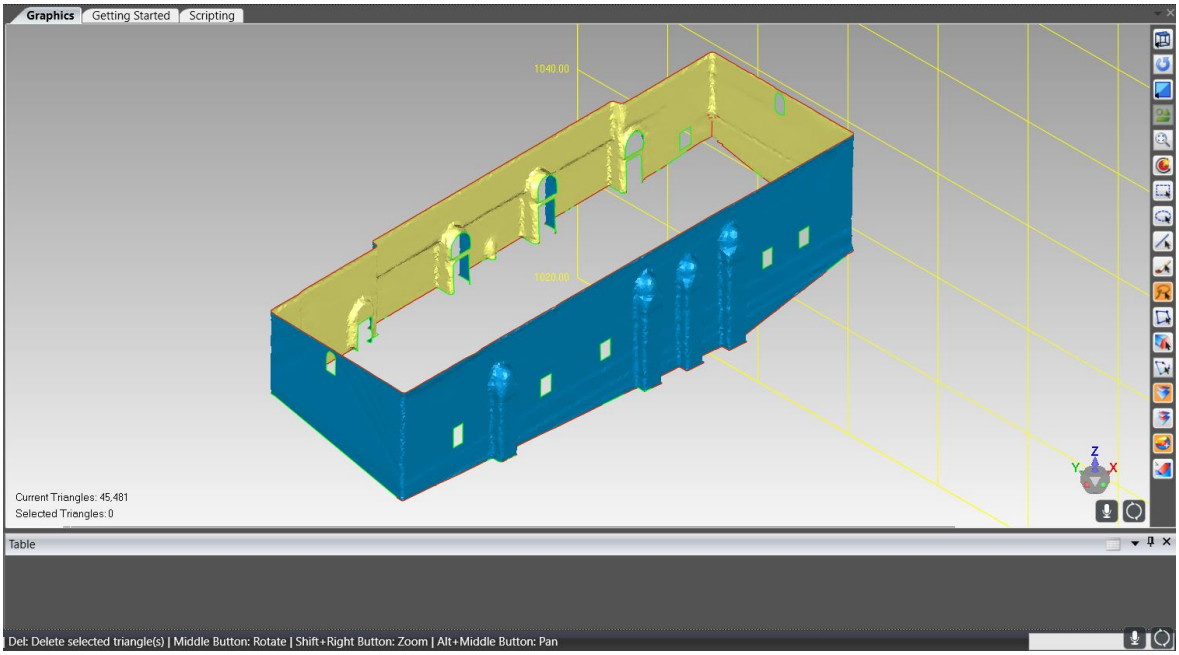
Şekil 6.19. Mardin Ulu Cami - Geomagic Wrap programında "Yeniden ağ (Remesh)" sonrası model görünümü

Ağ sayılarının yeniden düzenlenmesi ile birlikte pencere ve kapı gibi açıklıklarda yer alan ağlar temizlenmelidir. Fotogrametrik modelde yüzey olarak tanımlanan ve ağ olarak modellenen açıklıklar, gerçek modeli yansıtması ve açıklıklardaki yapısal davranışların doğru temsil edilmesi adına temizlenmesi gerekmektedir. Mardin Ulu Cami'de kuzey duvarında 4 adet kapı ve 5 adet pencere, güney duvarında 5 adet pencere, doğu duvarında 1 adet pencere ve batı duvarında 1 adet pencere bulunmaktadır. Açıklıklarda fotogrametrik model sürecinde oluşan ağlar manuel olarak temizlenmiştir.

Ölçeklendirme ve ağ kusurlarının giderilme işlemlerinin tamamlanması ile beraber Mardin Ulu Cami fotogrametrik modelinde de görüldüğü üzere yapının kubbe tepe noktasının modeli oluşmamıştır. Ayrıca avlu duvarı ile cami beden duvarlarının birleşim yerlerinde ve çatıda bazı birleşim yerleri fotoğraf karelerinde olmayınca modeli oluşmamış Geomagic Wrap programında temizleme ve tamamlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu programa ağ yüzeylerden oluşan bir model olarak aktarılan Cami yapısında gerekli yerleri tamamlamak için öncelikle, "Çokgenler (Polygons)" sekmesinde bulunan "Boşlukları Doldur (Fill Holes)" bölümünden faydalanılmıştır. Mardin Ulu Cami modelinde delikleri kapatmak ve ağ yüzeylerini birleştirmek amacıyla değinilen üç doldurma seçeneğinden faydalanılmıştır. Mardin Ulu Cami'de tamamlama işlemi sürecinde, Melik Mahmut Cami'de ihtiyaç duyulan modelin nokta bulutuna dönüştürülmesine gerek duyulmamıştır.

Kapı ve pencere açıklıkları temizlenen, eksik duvarları ve kubbesi tamamlanan Mardin Ulu Cami bu süreçte dijital olarak kayıt altına alınmış ve camide yapılacak çalışmalara veri

sağlayacak hale gelmiştir. Yapısal davranış sürecinde ise iç mekânda bulunan tonoz, kubbe ve kemerlerinin modeli klasik yöntem ile modellenerek fotogrametrik model içerisinde entegre edilmesi gerekmektedir. Bu süre zarfında, yapının fotogrametrik modelde oluşan üst örtüsünün tamamen temizlenerek klasik model ile entegrasyonu sağlanmalıdır. Geomagic programında yapının üst örtüsü temizlenmiştir (Şekil 6.20).

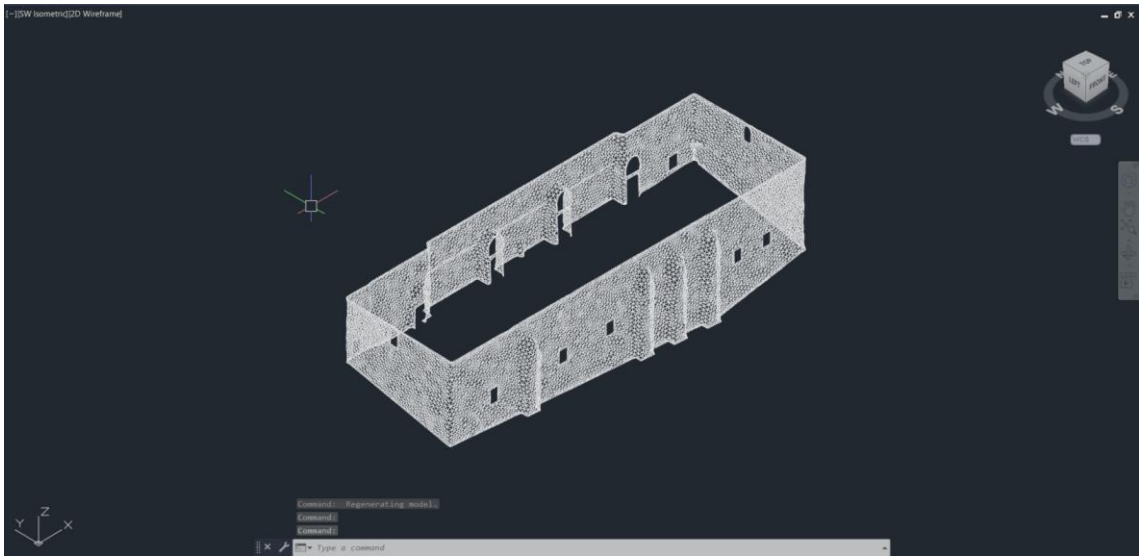


Şekil 6.20. Mardin Ulu Cami - Üst örtüsü temizlenerek klasik model ile entegrasyona hazır fotogrametrik model

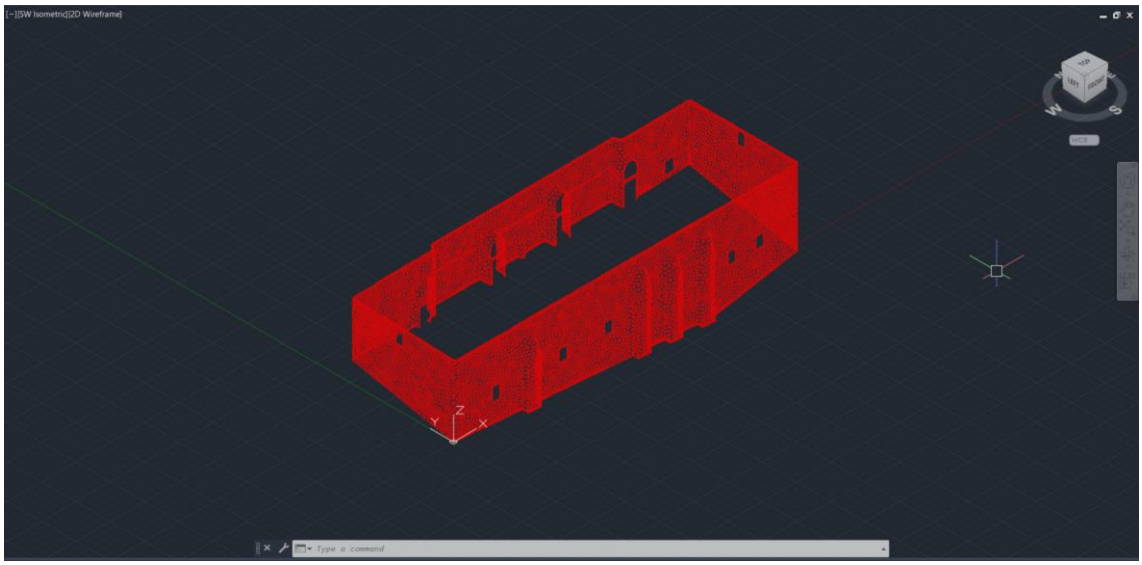
Dışa aktarılmaya hazır halen gelen model üzerinde, tekrar Geomagic Wrap programında ağ doktoru komutunun aktif edilmesi ve varsa yeni oluşan ağ problemlerinin giderilerek dışa aktarılması tavsiye edilmektedir.

Yakın boyutlara indirilen ağlar sonucu Mardin Ulu Cami modeli, AutoCAD programına aktarılmaya hazır hale gelmiş ve aktarılmak üzere Geomagic Wrap programından DXF formatında model dışa aktarılmıştır. Tez kapsamında yapısal analiz için kullanılan SAP2000 programı için AutoCAD üzerinde katman ayarlarının yapılması gerekmektedir (Şekil 6.21). AutoCAD programında üç boyutlu yüzey (3D Face) olarak ve program tarafından otomatik olarak oluşturulan "0" katmanına gelen ağların SAP2000'e aktarımı sırasında kabuk eleman olarak tanımlanabilmesi için kırmızı renkli yeni bir katman oluşturmuştur (Şekil 6.22). Ayrıca AutoCAD programında, manuel olarak da ağ kontrollerinin yapılması tavsiye edilmektedir. Özellikle farklı duvar kalınlıklarına sahip yüzeylerde ağlar arası belirgin bir

sınır oluşturmak, mevcut koordinat noktalarını yeniden ayarlamak ve SAP2000 programında farklı kalınlıkları tanımlamak üzere AutoCAD üzerinde düzenlemeler yapılabilmektedir. Tezde, kullanılan programlar entegre bir biçimde kullanılmış, her programda düzenleme yapılmasa dahi ağlar kontrol edilerek bir sonraki programa geçilmiştir ve bu süreçte hiçbir veri kaybı oluşmayacak şekilde değinildiği gibi aktarımlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.21. Mardin Ulu Cami – AutoCAD programında katman ayarlarının gerçekleştirilmesi ve ağ kontrollerinin tamamlanması sonrası model



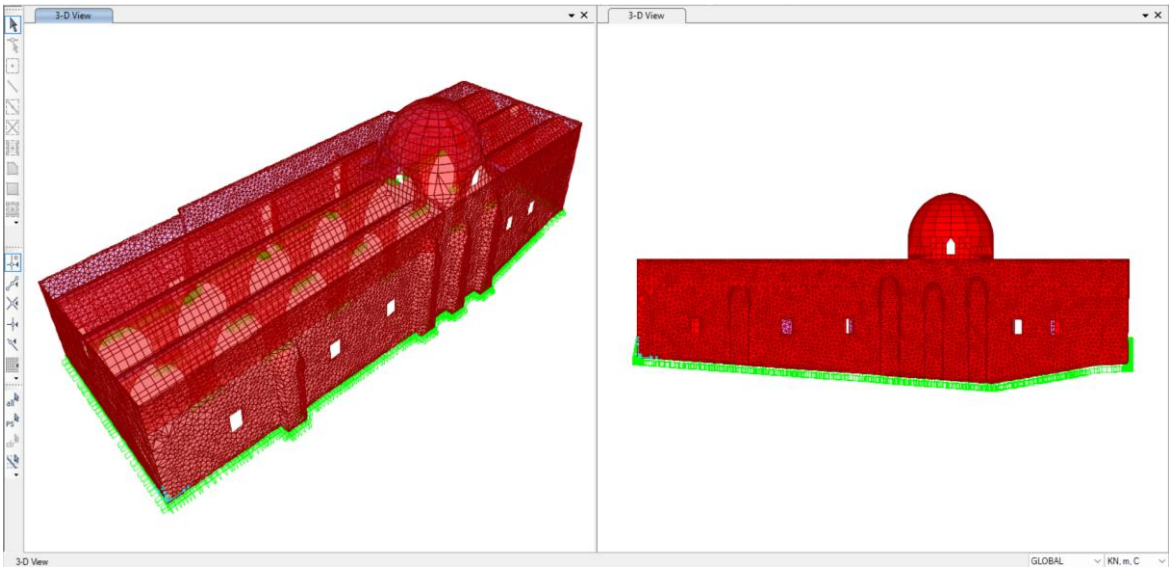
Şekil 6.22. Mardin Ulu Cami – AutoCAD programında katman ayarlarının gerçekleştirilmesi ve ağ kontrollerinin tamamlanması sonrası model

Tamamlanan süreç sonunda fotogrametrik modeli oluşturulan Mardin Ulu Cami, SAP2000 programına aktarılmıştır. Mardin Ulu Cami modelinde, yığma birim ağırlık merkezine göre

SAP2000 programında taşınmıştır. Taşıma işlemi gerçekleştirilmeden de yapısal analiz gerçekleştirilebilmektedir (bkz. Bölüm 4.3, sayfa 137). Taşınması durumunda ise SAP2000 modelinde düğüm noktaları seçilerek "Düzenleme (Edit)" sekmesinde "Taşı (Move)" komutu ile taşıma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Üçgen ağlardan oluşan modelde taşıma işlemleri sırasında ağların üst üste gelmemesi için taşınacak bölgedeki ağların işlem öncesi temizlenmesi gerekmektedir. Temizleme işleminden sonra taşıma işlemi gerçekleştirilerek düğüm noktalarının birbirine tekrar manuel olarak bağlanması veya arada kalan boşluklara SAP2000'de SHELL eleman çizilerek tamamlanması gerekmektedir. Bu süreç, çok kompleks olmamakla birlikte Mardin Ulu Cami için taşıma süreci yaklaşık 30 dakika içerisinde tamamlanmıştır.

Yapısal davranış sürecinde, kemer, tonoz ve kubbe davranışlarının da doğru temsil edilebilmesi için caminin dış taşıyıcı beden duvarlarını barındıran model içerisine iç mekan taşıyıcı sistemleri entegre edilmelidir. Ayrı bir SAP2000 dosyasında çizilen Mardin Ulu Cami'nin iç mekânda bulunan taşıyıcı elemanları fotogrametrik model içerisine entegre edilmiştir. Entegrasyon sürecinde, fotogrametrik modelde oluşan ağlar ile klasik yöntem ile iç mekân taşıyıcı elemanların düğüm noktalarının birlikte hareket edebilmesi için birbirlerine bağlanması gerekmektedir. SHELL elemanların birbirine bağlanma ve taşıma işlemleri Mardin Ulu Cami entegre modeli için yaklaşık olarak 180 dakika sürmüştür. Ortaya çıkan entegre modelin oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Mardin Ulu Cami entegre modeli SHELL eleman kullanılarak oluşturulmuştur.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 531 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan entegre modelde, toplamda 14467 düğüm noktası ve 22857 SHELL eleman bulunmaktadır (Şekil 6.23).
- Malzeme özellikleri de belirlenen model üzerine öncelikle malzeme tanımlamaları ve kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında elde edilen rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınarak duvar kalınlıkları ayarlanmıştır. Caminin kubbesi 0,45 m; tonozlar 0,7 m; doğu duvarı 1,45 m; batı duvarı 0,84 m; güney duvarı 2,0 m, güney duvarında bulunan payandalar 3,0 m; kuzey duvarı 1,5 m ve payandalar bölümü ise 2,58 m; yapının içerisinde bulunan taşıyıcı ayaklara ise 1,15 m kalınlık tanımlanmıştır.



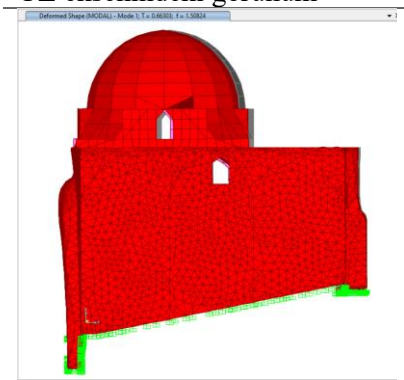
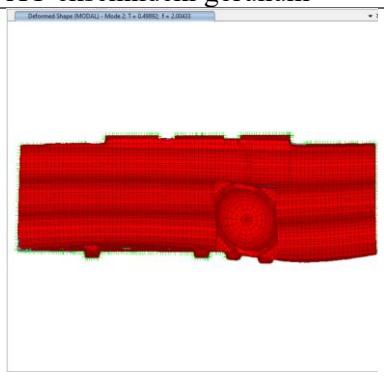
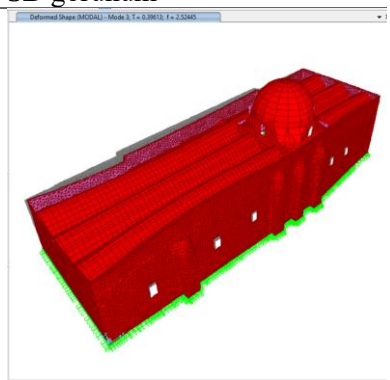
Şekil 6.23. Entegre model üretimi aşamalarının gerçekleştirilmesinden sonra SAP2000 programı içerisine aktarılan Melik Mahmut Cami sonlu eleman modeli

Entegre modelde öncelikle, dinamik yükler altında davranışını bölge ve depremden bağımsız olarak sadece kendi sistemine bağlı analizini gerçekleştirmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda oluşan periyot değerleri Çizelge 6.16'da ve ilk üç moda ait mod şekilleri Çizelge 6.17'de görülmektedir.

Çizelge 6.16. Mardin Ulu Cami entegre modelinin modal analiz sonucu periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.663026	1.527E-05	0.5263	0.00031
MODAL	Mod	2	0.49892	6.498E-05	0.01931	1.434E-06
MODAL	Mod	3	0.396127	0.00198	0.02658	0.00018
MODAL	Mod	4	0.37432	0.00027	0.07102	8.829E-05
MODAL	Mod	5	0.350498	0.00682	0.00083	6.229E-05
MODAL	Mod	6	0.299088	0.01189	0.01093	1.88E-05
MODAL	Mod	7	0.285672	0.05083	0.01154	1.857E-07
MODAL	Mod	8	0.275937	0.17346	0.00307	1.318E-05
MODAL	Mod	9	0.273408	0.00526	0.00042	0.00128
MODAL	Mod	10	0.266932	0.38727	0.00289	1.641E-05
MODAL	Mod	11	0.249833	7.313E-06	0.00053	4.899E-05
MODAL	Mod	12	0.243653	0.01827	0.00064	0.00023

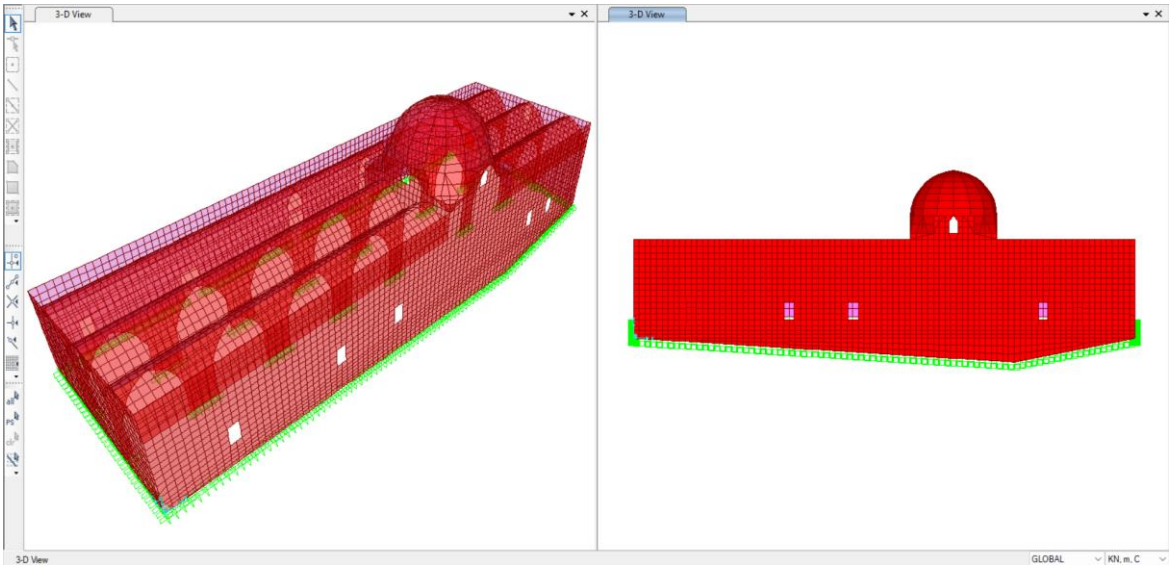
Çizelge 6.17. Mardin Ulu Cami entegre modelinin ilk üç mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Burulma) XY eksenindeki görünüm	Mod 3: (Sıkışma) 3D görünüm
		

6.2.2. Klasik yöntem ile Mardin Ulu Cami sonlu elemanlar modeli

Entegre modelleme tekniği ile oluşturulan Mardin Ulu Cami yapısal modelinin, analiz sonucu mod değerleri ve şekillerine, klasik modelleme tekniği sonuçlarının yakınlık derecesini belirlemek adına klasik yöntem ile bir modeli daha oluşturulmuştur. Bu amaç doğrultusunda SAP2000 programı model hazırlama özellikleri ve kuralları doğrultusunda mevcut rölöve çizimleri üzerinde belirli idealleştirmeler gerçekleştirilerek Mardin Ulu Caminin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde ağ boyutları, çoğunlukla 1,0 x 1,0 m boyutlarında tercih edilmiştir. Model oluşturma ve hesap değerleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Cami, SHELL elemanlar ile modellenmiştir.
- Yapının zemin ile ilişkisi ankastre mesnet olarak tanımlanmıştır ve toplamda 294 adet mesnet noktası oluşmuştur.
- Analizi yapılacak olan model, toplamda 7927 düğüm noktası ve 7822 SHELL eleman ile hazırlanmıştır (Şekil 6.24).
- Malzeme özellikleri de belirlenen model üzerine öncelikle malzeme tanımlamaları ve kabuk eleman kesit atamaları gerçekleştirilmiştir. Kesit atamaları sırasında elde edilen rölöve çizimlerinde yer alan ölçüler esas alınarak duvar kalınlıkları ayarlanmıştır. Caminin kubbesi 0,45 m; tonozlar 0,7 m; doğu duvarı 1,45 m; batı duvarı 0,84 m; güney duvarı 2,0 m, güney duvarında bulunan payandalar 3,0 m; kuzey duvarı 1,5 m ve payandalar bölümü ise 2,58 m; yapının içerisinde bulunan taşıyıcı ayaklara ise 1,15 m kalınlık tanımlanmıştır.



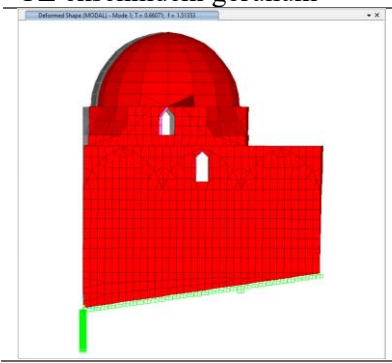
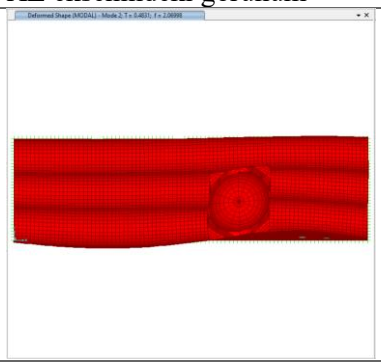
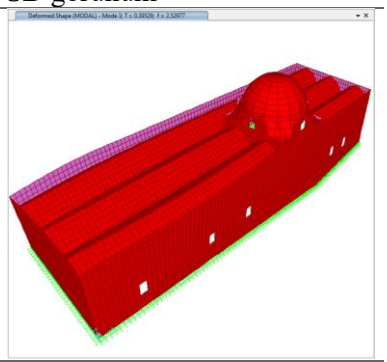
Şekil 6.24. Mardin Ulu Cami - Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan sonlu elemanlar modeli

Klasik yöntem ile oluşturulan modelde öncelikle, mod ve periyot değerlerinin entegre yöntem ile oluşturulan model ile yakınlık derecesini görmek amacıyla modal analiz altındaki davranışları incelenmiştir. Modal analiz sonucunda elde edilen periyot değerleri, Çizelge 6.18'de sunulmuştur ve aynı zamanda ilk üç moda ait mod şekilleri de Çizelge 6.19'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.18. Mardin Ulu Cami klasik modelinin periyot ve ötelenme değerleri

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)	Ötelenme-Z (mm)
MODAL	Mod	1	0.660707	1.627E-05	0.55025	0.00024
MODAL	Mod	2	0.483097	0.00018	0.01881	5.385E-06
MODAL	Mod	3	0.395293	0.00045	0.02981	0.00135
MODAL	Mod	4	0.359905	0.00077	0.06597	8.34E-05
MODAL	Mod	5	0.339925	1.778E-05	0.00158	0.00045
MODAL	Mod	6	0.288798	0.0011	0.00627	3.602E-06
MODAL	Mod	7	0.272726	0.00725	0.00763	2.543E-06
MODAL	Mod	8	0.265529	0.02343	0.00531	0.00215
MODAL	Mod	9	0.259633	0.47836	0.00214	0.00017
MODAL	Mod	10	0.253447	0.11345	0.00888	4.604E-06
MODAL	Mod	11	0.242129	3.855E-05	7.097E-05	9.287E-05
MODAL	Mod	12	0.23554	0.03214	0.00048	0.00047

Çizelge 6.19. Mardin Ulu Cami klasik modelinin ilk üç moda ait mod şekilleri

Mod 1: (Y yönünde ötelenme) YZ eksenindeki görünüm	Mod 2: (Burulma) XZ eksenindeki görünüm	Mod 3: (Sıkışma) 3D görünüm
		

6.2.3. Fotogrametrik ve klasik modelleme yöntemi ile oluşturulan Melik Mahmut Cami sonlu eleman modellerinde yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi

Tezde, modelleme teknikleri arasındaki avantajları ve dezavantajları ortaya koymak amacıyla hızlı uygulanabilecek yük atamaları gerçekleştirilmiş, yapıların kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanmıştır. Öncelikle Mardin Ulu Cami'ne ait entegre model ve klasik modeli için yukarıda detaylandırılan mod değerlerinin karşılaştırılmasına Çizelge 6.20'de yer verilmiştir. Modal analizlerde gerçekleşen ötelenme durumları her iki modelde de benzerlik göstermektedir. Her iki modelleme tekniğinde de Mod 1, Y yönünde ötelenme; Mod 2, burulma; Mod 3, sıkışmaya neden olmuştur ve analiz sonucu ortaya çıkan periyot değerleri de büyük yakınlık göstermektedir.

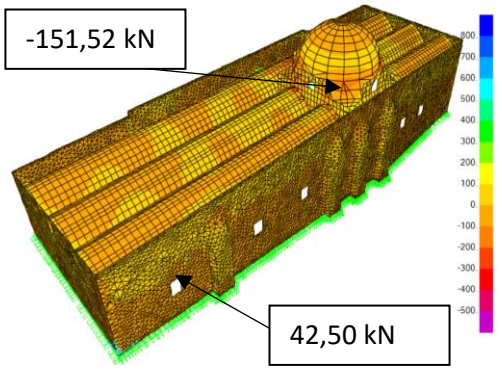
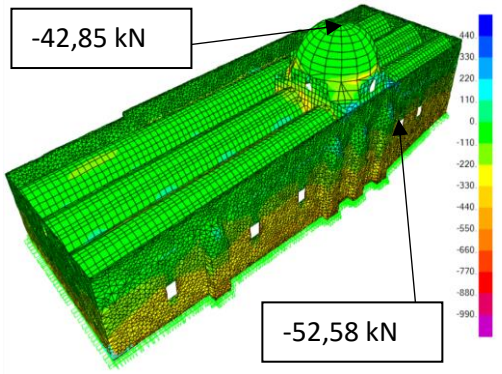
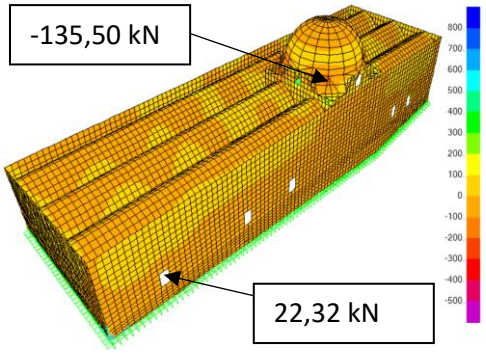
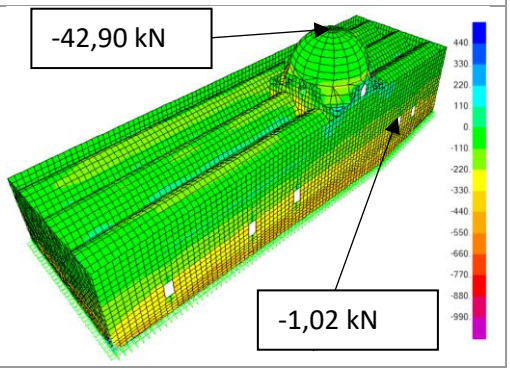
Çizelge 6.20. Farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen Mardin Ulu Cami'nin modal analiz sonuçları

Analiz Türü	Türü	No.	Periyot (s)	Ötelenme-X (mm)	Ötelenme-Y (mm)
ENTEGRE MODEL	Mod	1	0.663026	1.527E-05	0.5263
	Mod	2	0.49892	6.498E-05	0.01931
	Mod	3	0.396127	0.00198	0.02658
KLASİK MODEL	Mod	1	0.660707	1.627E-05	0.55025
	Mod	2	0.483097	0.00018	0.01881
	Mod	3	0.395293	0.00045	0.02981

Mardin Ulu Cami'ne ait oluşturulan modeller üzerindeki sabit yük gerilmeleri Çizelge 6.21'de detaylandırılmıştır. Gerilme değerleri ele alındığında, daha önce ağ sayılarının yakın olan modeller üzerinde gerilme değerlerinin yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bu

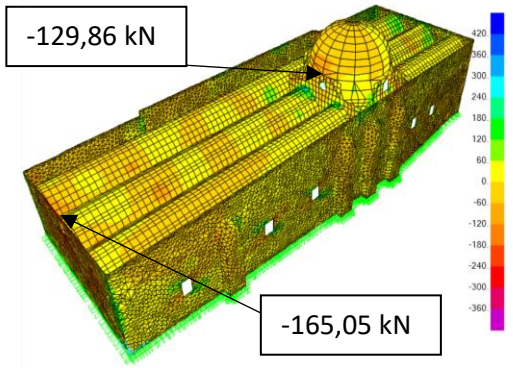
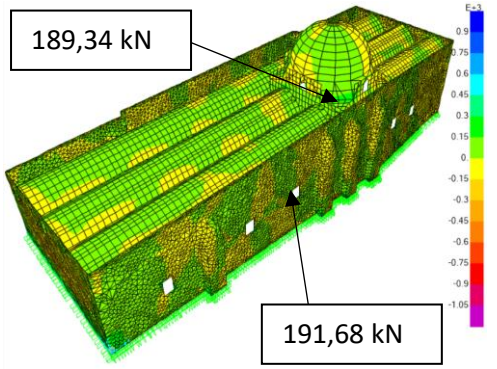
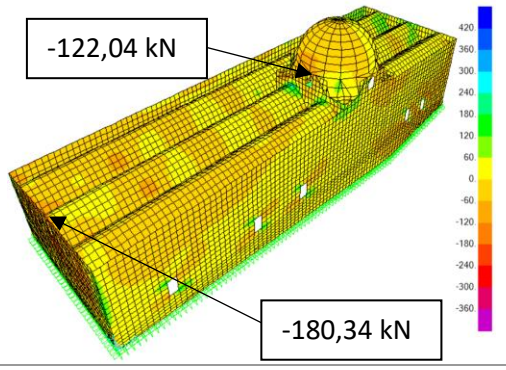
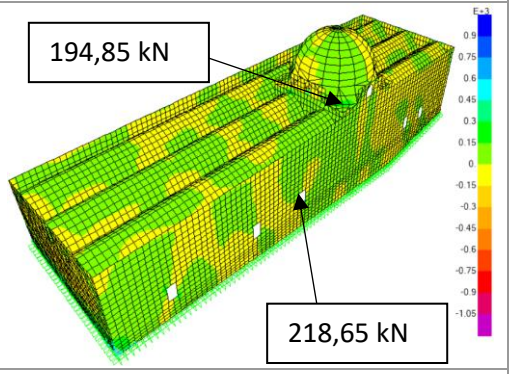
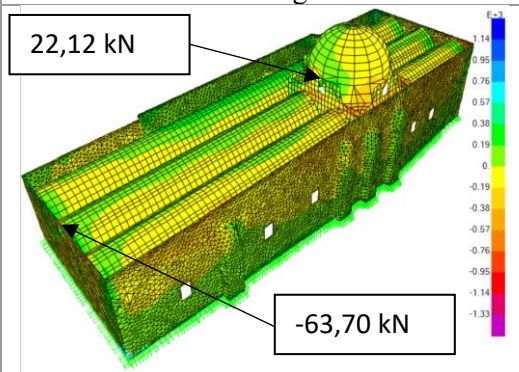
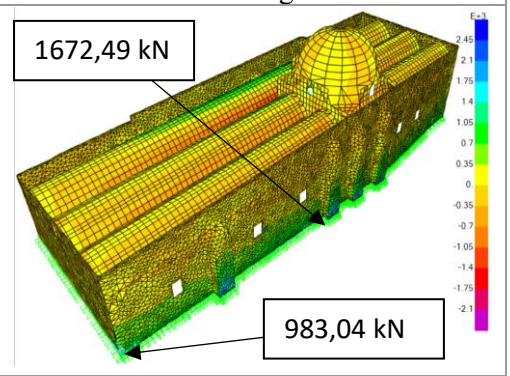
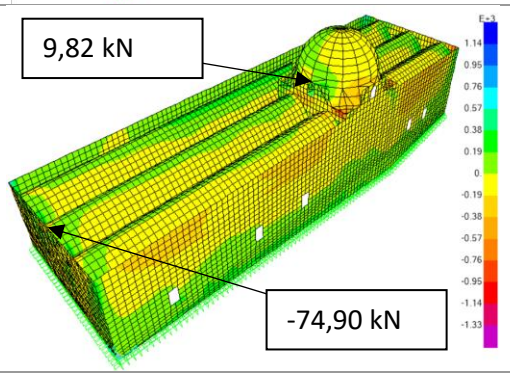
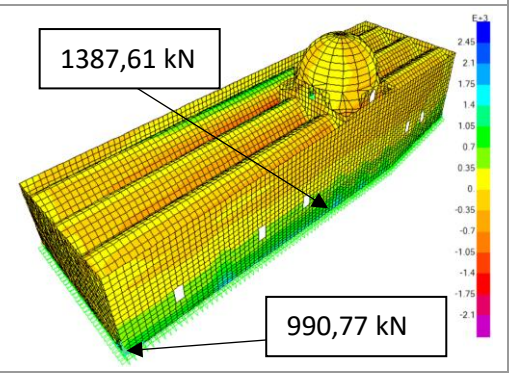
durumda, ideal büyüklükteki ağ sayısı ile oluşturulmuş klasik model ile entegre model arasında gerilme değerleri arasında bazı noktalarda farklılıklar görünmektedir. Ancak, her iki model incelendiğinde de aykırı bir durumun olmadığı, ortaya çıkan değerlerin aynı bölgelere doğru benzer oranda artma ve azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Gerilme değerlerini temsil eden renk tonları benzer aralıkta ayarlandığı durumda, ortaya çıkan sonucun da yakınlık gösterdiği görülebilmektedir.

Çizelge 6.21. Mardin Ulu Cami - Sabit yük analizi sonucu ortaya çıkan gerilme değerleri

Model Türü	S11 Gerilme Değerleri	S22 Gerilme Değerleri
Entegre Model		
Klasik Model		

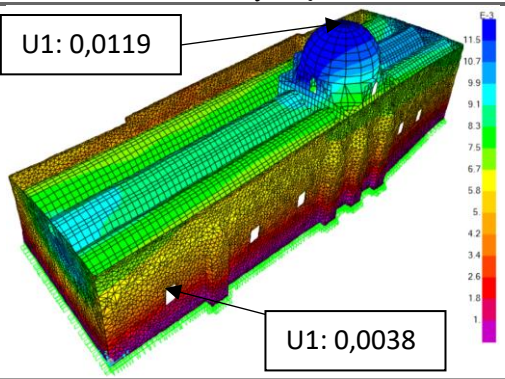
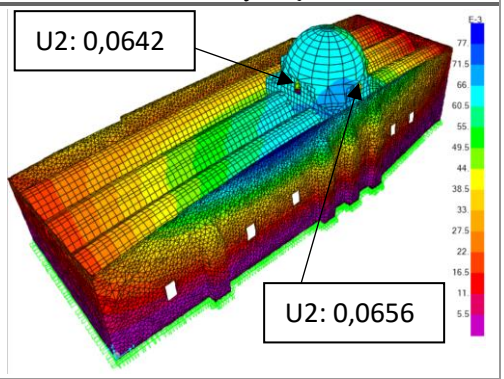
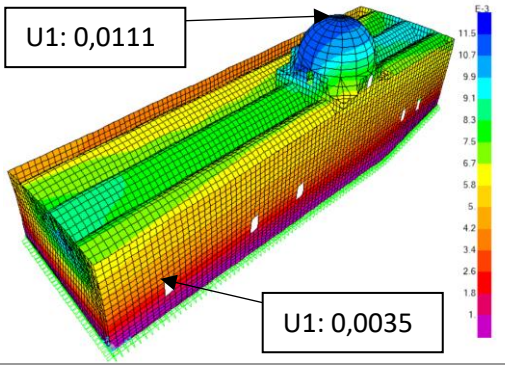
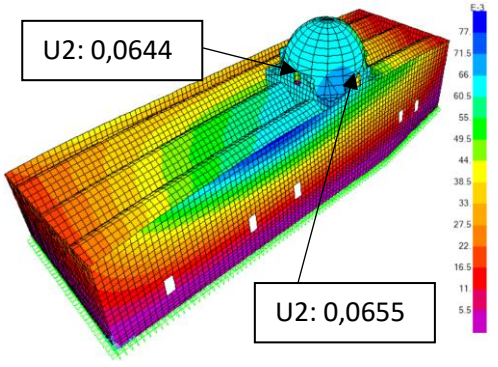
Mardin Ulu Cami modelinin kendi ağırlığının %40'ı X ve Y düzlemlerinde yatay yük olarak tanımlanması sonucu gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçları Çizelge 6.22'de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Yatay yüklerin etkisi altında gerçekleştirilen yapısal analiz sonuçlarında tamamen aynı sonuçlar gözlenmese de, benzer oranda artışlar ve azalmalar olduğu görülmektedir. Benzer oranda gerçekleşen bu farklılıklar, renk tonları ile gösterilen gerilme değerleri haritaları ile daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir.

Çizelge 6.22. Mardin Ulu Cami – Yatay yük analizleri sonucu gerilme değerleri

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-X yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Entegre Model		
Klasik Model		
	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S11 Gerilme Değerleri	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu S22 Gerilme Değerleri
Entegre Model		
Klasik Model		

Cami için tanımlanan yatay yükler sonucu gerçekleştirilen yapısal analizde, deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizgileri Çizelge 6.23'te detaylandırılmıştır. Her iki model için de çok yakın yer değiştirme sonuçlarına ulaşılmıştır.

Çizelge 6.23. Mardin Ulu Cami - X ve Y düzlemlerinde uygulanan yatay yük analizi sonucu ortaya çıkan deformasyon şekillerine ait eş yükselti çizelgeleri (mm)

Model Türü	HRZ-X yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli	HRZ-Y yatay yük analizi sonucu deformasyon şekli
Entegre Model		
Klasik Model		

Yapısal analiz süreci "bilgi belgelerin temin edilmesi ve rölövelerin alınması, modelin oluşturulması, modelni düzenlenmesi, analiz süreci" başlıklarında model oluşturma süresi karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.24). Burada yer alan süreler kullanılan bilgisayar işlemcilerinin kalitesine, kullanıcının bilgisayar kullanım hızına ve programa hakim olma durumlarına göre kişiden kişiye değişiklik gösterebilir. Bu çalışmada Monster Tulpar T7 V21.7 modeli bilgisayar kullanılmıştır. Süreçte kullanılacak model teknikleri için tek kriterin zaman olmadığı unutulmamalıdır. Alan çalışmasına özgü hangi teknik daha avantajlı olacak ise onun değerlendirilmesinin yapılması ile modelleme tekniği seçilmelidir.

Çizelge 6.24. Mardin Ulu Cami - Entegre model ve klasik model oluşum sırasında yaklaşık zaman kullanımı

Aşama	Mardin Ulu Cami Entegre Model	Mardin Ulu Cami Klasik Model
Bilgi Belgelerin Temini ve Rölöve	-	~20-25 gün
Modelin Oluşturulması	~8 saat	~15 saat
Modelin Düzenlenmesi	~20 saat	-
Analiz	3 dakika	2 dakika
Toplam	~28 Saat 3 dakika	~25 gün 15 saat 2 dakika

7. DEĞERLENDİRME

Çalışmanın bu bölümünde, analiz sonuçlarından ortaya çıkan 4 farklı başlıkta değerlendirmelere yer verilmiştir.

Öncelikle uzun yıllardır yapısal analiz süreçlerinin en zaman alıcı, mühendislik bilgisi gerektiren ve önemli yapısal idealleştirmelere ihtiyaç duyulan modelleme aşamasına yönelik sürece kolay adapte edilebilecek fotogrametrik modelleme tekniğinin avantaj ve dezavantaj durumları ortaya konmuştur. Fotogrametrik modelleme ile klasik modellemenin birlikte ele alındığı tezde, oluşturulan modeller üzerinden, tekniklerin kullanım durumları değerlendirilmiştir.

İkinci alt başlıkta, tezde kullanılan fotogrametrik modelleme tekniği sonrası yapısal analiz programına aktarım sürecinde kabuk eleman (SHELL) olarak sürece dahil edilen modelde analiz sonuçlarına etki eden bir durumun olup olmadığı gösterilmiştir.

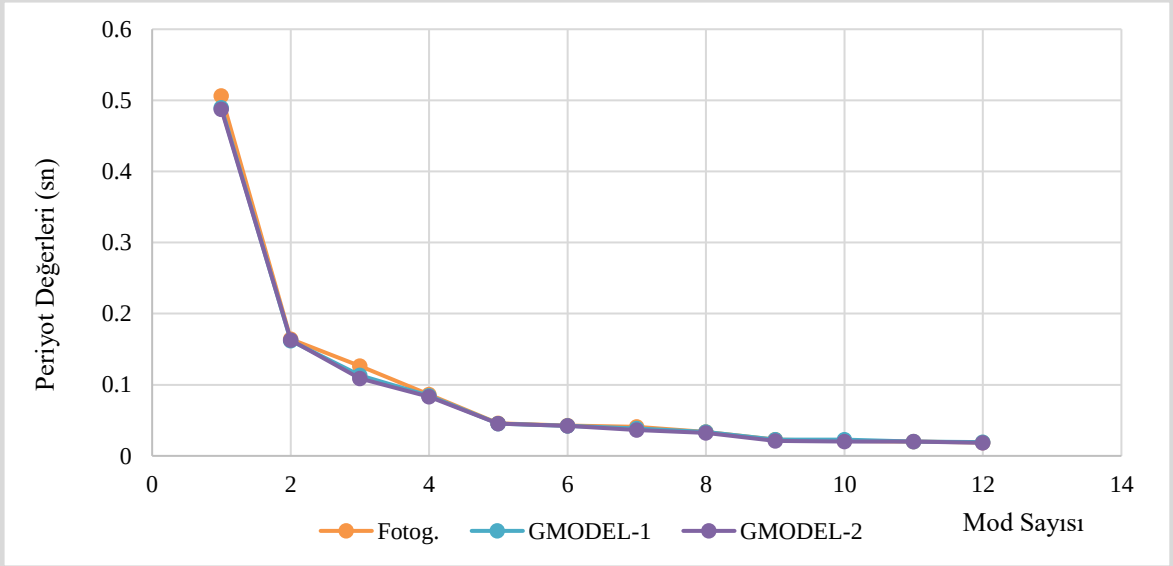
Üçüncü değerlendirme başlığında ise analiz sonuçlarında elde edilen gerilme ve yer değiştirme değerlerinin yapısal davranışı incelemede etkisi ele alınmıştır. Yer değiştirme değerleri ile gerilme değerlerini etkileyen parametrelere yer verilmiştir.

Son değerlendirme başlığında ise tez çalışmasında analitik modelleri üretilen Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami'nin strüktürel davranış durumlarına değinilmiştir.

7.1. Fotogrametrik ve Klasik Modelleme Tekniği Yakınlık Değerlerinin ve Kullanım Durumlarının Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde, tez kapsamında gerçekleştirilen modelleme ve analizler sonucunda yapısal analiz modelleme tekniklerinin avantaj ve dezavantaj durumları tespit edilmiştir. Basit yapı elemanları ile başlayan analiz süreçlerinde görüldüğü gibi sonuçlar arasında gerçeğe yakın olmayan bir durum söz konusu değildir. Özellikle yüklerden ve bölgeden bağımsız olarak geometrik özelliklerin doğru tanımlanıp doğru hareket edip etmediğini gösteren modal analiz sonuçları, tez kapsamında gerçekleştirilen bütün modellerin benzer hareketler sergilediğini göstermiştir.

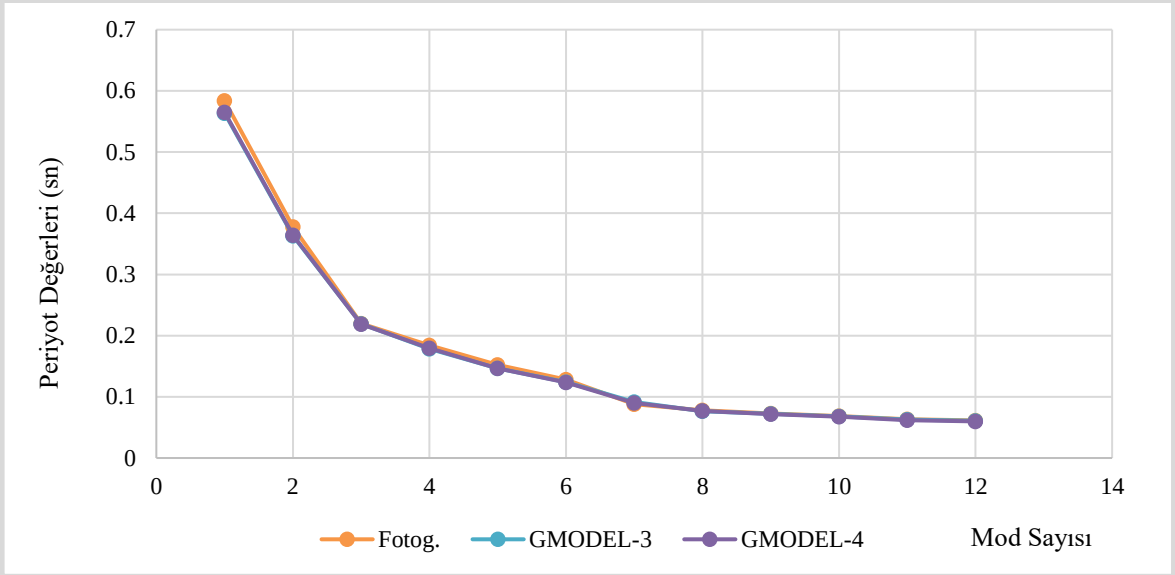
Avlu duvarı için gerçekleştirilen analizler sonucunda fotogrametrik modelin birinci periyot değeri 0,506 sn, GMODEL-1 birinci periyot değeri 0,489 sn ve GMODEL-2 birinci periyot değerinin 0,487 sn olduğu görülmektedir. Bu durumda fotogrametrik model avlu duvarı birinci periyot değeri, klasik modellere %96 oranında yakınlık göstermiştir (Şekil 7.1).



Şekil 7.1. Avlu duvarı periyot değerlerinin karşılaştırılması

Periyot değerlerindeki yakınlık, avlu duvarındaki gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir. Mod şekilleri de aynı modlarda aynı şekillere sahiptir. Sabit yük analizi sonucu S11 gerilme değerleri fotogrametrik model köşe ankastre noktasında -38,0 kN, GMODEL-1 köşe ankastre noktasında -24,2 kN ve GMODEL-2 köşe ankastre noktasında -33,4 kN gerilme değerleri oluşmuştur. Yüzdelik oran olarak fotogrametrik model ile GMODEL-1 %64 oranında, fotogrametrik model ile ağ sayıları daha yakın sayıda olan GMODEL-2 arasında ise %87 oranında yakınlık göstermiştir. Yüzdelik değer olarak birbirlerine çok yakın olmayan gerilme değerlerinin benzer oranda artıp azaldığı ve modeller üzerinde anormal bir sonucun oluşmadığı gerilme renk kontürlerinden açıkça görülebilmektedir (bkz. Bölüm 5.3, sayfa 163). X yönünde yatay yük analizi sonucu yer değiştirme değerleri incelendiğinde, fotogrametrik model tepe noktasında 0,0038 m, GMODEL-1 tepe noktasında 0,0036 m ve GMODEL-2 tepe noktasında 0,0037 m'lik değerler oluşmuştur. Bu değerler yaklaşık %99 oranında benzerlik taşımaktadır. Avlu duvarı örneğinde görülen bu sonuçlar, tanımlanan yükler sonrasında yapıdaki gerilme değerlerinin ağ sayısı ile ilişkili olabileceği ve ağ sayısı yakın olan modellerin daha yüksek oranda yakınlık değeri taşıdığını ancak yer değiştirme değerlerinin ağ sayısı ile ilişkili olmadığını göstermiştir.

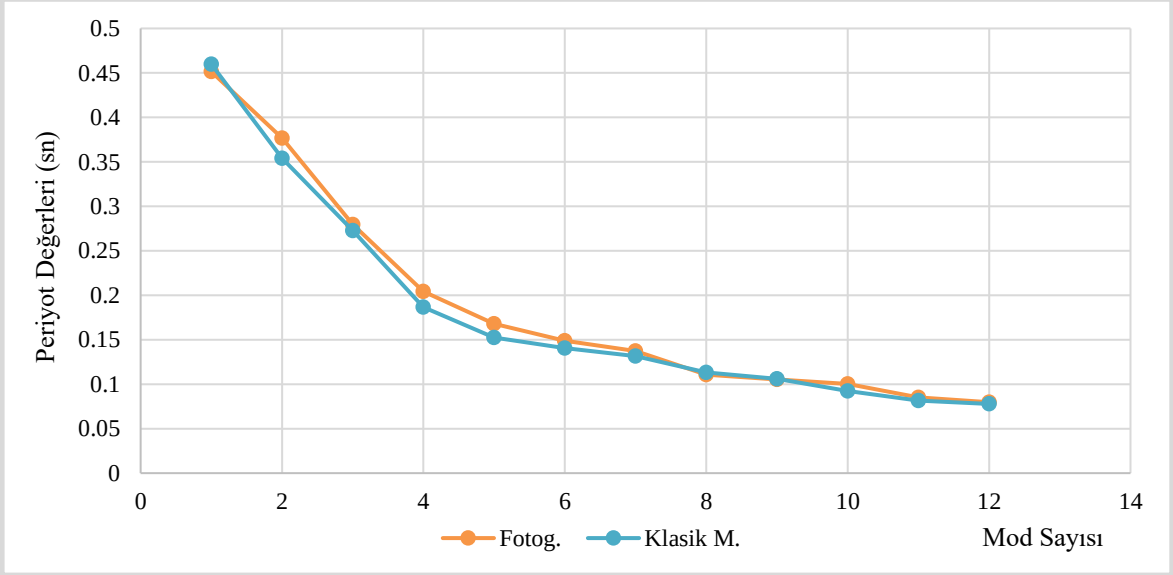
Tek açıklığa sahip L plan tipi yığma duvar için gerçekleştirilen analizler sonucunda fotogrametrik modelin birinci periyot değeri 0,583 sn, GMODEL-3 birinci periyot değeri 0,563 sn ve GMODEL-4 birinci periyot değerinin 0,565 sn olduğu görülmektedir. Bu durumda fotogrametrik model L plan tipi duvarın birinci periyot değerlerinin, klasik modellere %97 oranında yakınlık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Birinci mod değerlerinin yanı sıra 12 mod değerlerinin karşılaştırmalı grafiğine Şekil 7.2'de yer verilmiştir.



Şekil 7.2. Tek açıklıklı L plan tipi periyot değerlerinin karşılaştırılması

Periyot değerleri yakın olan sonuçlar, L plan tipi duvarda gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir. Modellerde oluşan mod şekilleri de aynı modlarda aynı şekillere sahiptir. Sabit yük analizi sonucu S11 gerilme değerleri fotogrametrik model tek açıklığın tepe noktasında noktasında +131,36 kN, GMODEL-3 tek açıklığın tepe noktasında +65,60 kN ve GMODEL-4 tek açıklığın tepe noktasında +132,47 kN gerilme değerleri oluşmuştur. Yüzdelik oran olarak fotogrametrik model ile GMODEL-3 %50 oranında, fotogrametrik model ile ağ sayıları daha yakın sayıda olan GMODEL-4 arasında ise %99 oranında yakınlık göstermiştir. GMODEL-3 ile yüzdelik olarak yakınlık olmasa dahi anormal bir artış veya azalmanın olmadığı gerilme değerlerinin verildiği renk kontürlerinde açıkça görülebilmektedir (bkz. Bölüm 5.4, sayfa 177). Y yönünde yatay yük analizi sonucu tek açıklık üzerinde oluşan yer değiştirme değerleri incelendiğinde, fotogrametrik modelde 0,0135 m, GMODEL-3 üzerinde 0,0128 m ve GMODEL-4 üzerinde 0,0131 m'lik değerler oluşmuştur. Fotogrametrik model ile GMODEL-3 arasında %95 oranında yakınlık varken fotogrametrik model ile GMODEL-4 arasında %97 oranında benzerlik görülmektedir.

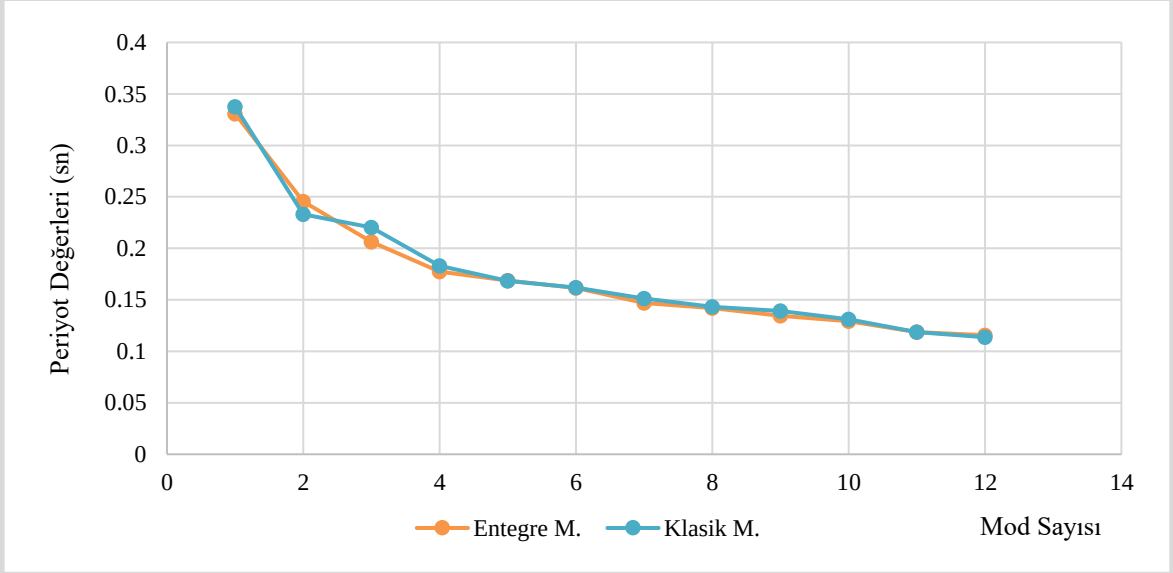
Melik Mahmut Cami güney duvarı için gerçekleştirilen analizler sonucunda fotogrametrik modelin birinci periyot değeri 0,451 sn ve klasik model için birinci periyot değeri 0,459 sn olduğu görülmektedir. Bu durumda fotogrametrik model Melik Mahmut Cami güney duvarı birinci periyot değeri, klasik modele %98 oranında yakınlık göstermiştir. Modal analiz sonucu ulaşılan 12 mod değerlerinin karşılaştırmalı grafiğine Şekil 7.3'te yer verilmiştir.



Şekil 7.3. Melik Mahmut Cami güney duvarı periyot değerlerinin karşılaştırılması

Periyot değerleri yakın olan sonuçlar, Melik Mahmut Cami güney duvarında gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir. Modellerde oluşan mod şekilleri de aynı modlarda aynı şekillere sahiptir. Sabit yük analizi sonucu doğu yönündeki kemerli pencere köşe noktasındaki S22 gerilme değerleri fotogrametrik modelde -85,01 kN, klasik modelde ise -71,79 kN oluşmuştur. Yüzdelik oran olarak fotogrametrik model ile klasik model %84 oranında yakınlık göstermiştir. Analizler sonucunda oluşan gerilme değerlerinin verildiği renk kontürlerinde de benzerlik açıkça görülebilmektedir (bkz. Bölüm 5.5, sayfa 191). Y yönünde yatay yük analizi sonucu Melik Mahmut Cami güney duvarının batı tepe noktası üzerinde oluşan yer değiştirme değerleri incelendiğinde, fotogrametrik modelde 0,0463 m ve klasik modelde 0,0465 m'lik değerler oluşmuştur. Fotogrametrik model ile GModel-3 arasında %99,5'lik oranda yakınlık göstermiştir. Güney duvarı üzerindeki farklı noktalarda da yer değiştirme değerleri incelendiğinde daha önce analizi gerçekleştirilen örnekler gibi oldukça yakın sonuçlar görülebilmektedir.

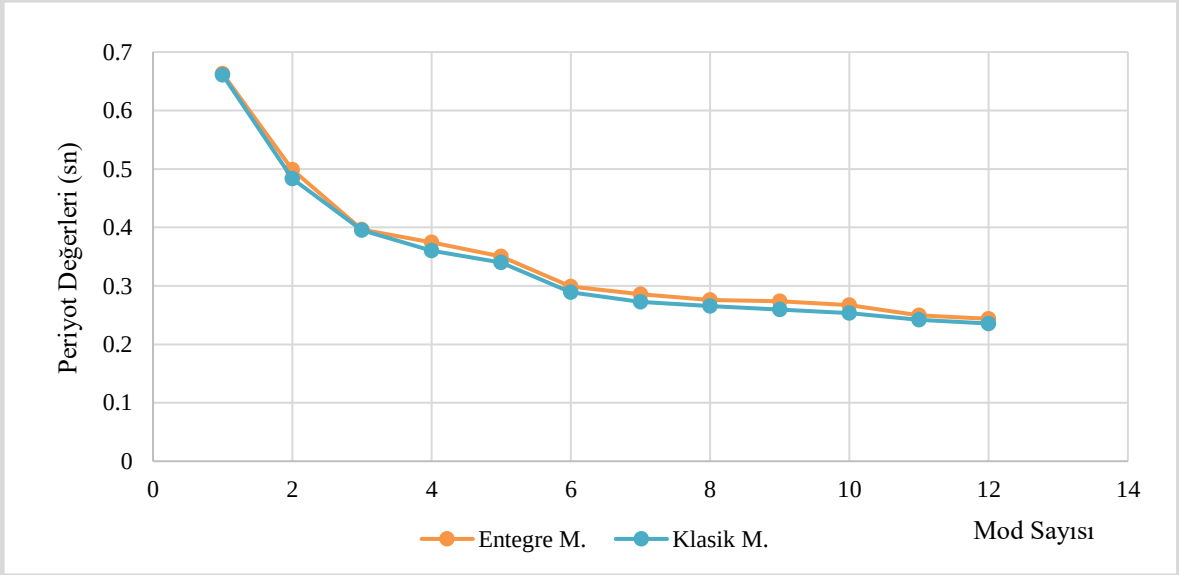
Melik Mahmut Cami tamamının modellendiği entegre model ve klasik model analiz sonuçları ele alındığında, entegre modelin birinci periyot değeri 0,330 sn ve klasik model için birinci periyot değeri 0,337 sn olduğu görülmektedir. Bu durumda entegre model Melik Mahmut Cami birinci periyot değeri, klasik modele %98 oranında yakınlık göstermiştir. Modal analiz sonucu ulaşılan 12 mod değerlerinin karşılaştırmalı grafiğine Şekil 7.4'te yer verilmiştir.



Şekil 7.4. Melik Mahmut Cami entegre ve klasik model periyot değerlerinin karşılaştırılması

Periyot değerleri yakın olan sonuçlar, Melik Mahmut Cami'ndeki analizler sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir. Mod şekilleri de aynı modlarda aynı şekillere sahiptir. Sabit yük analizi sonucu S22 gerilme değerleri entegre model kubbe tepe noktasında -72,20 kN ve klasik model kubbe tepe noktasında -74,49 kN gerilme değerleri oluşmuştur. Yüzdelik oran olarak entegre model ile klasik model %97 oranında yakınlık göstermiştir. Yüzdelik değer olarak birbirlerine çok yakın olan kubbe tepe noktası gerilme değerinin, yapı üzerindeki diğer noktalar için de geçerli benzerlik taşıdığı ve anormal bir sonucun oluşmadığı gerilme renk kontürlerinden de incelenebilmektedir (bkz. Bölüm 6.1, sayfa 206). Y yönünde yatay yük analizi sonucu oluşan yer değiştirme değerleri incelendiğinde, entegre model kubbe tepe noktasında 0,0093 m, klasik model kubbe tepe noktasında 0,0103 m'lik değerler oluşmuştur. Bu değerlerin birbirleriyle %90 oranında benzerlik taşıdığı görülmektedir. Ağırlık merkezi dikkate alınmadan oluşturulan EMA-2 modelinde ise kubbe tepe noktasında 0,0082 m'lik bir yer değiştirme değeri ortaya çıkmıştır.

Entegre model üretiminde Mardin Ulu Cami de analiz edilmiştir. Bunun nedeni Melik Mahmut Cami, tek açıklığa sahip ve iç mekanında taşıyıcı ayakların olmadığı bir tarihi yapı olmasıdır. İç mekanda taşıyıcı elemanların olduğu durumlarda fotogrametrik veriler ile klasik modelleme tekniğinin nasıl entegre edilebileceği ele alınmıştır. Mardin Ulu Cami tamamının modellendiği entegre model ve klasik model analiz sonuçları ele alındığında, entegre modelin birinci periyot değeri 0,663 sn ve klasik model için birinci periyot değeri 0,660 sn olduğu görülmektedir. Bu durumda entegre model Mardin Ulu Cami birinci periyot değeri, klasik modele %99,5 oranında yakınlık göstermiştir. Modal analiz sonucu ulaşılan 12 mod değerlerinin karşılaştırmalı grafiğine Şekil 7.5'te yer verilmiştir.



Şekil 7.5. Mardin Ulu Cami entegre ve klasik model periyot değerlerinin karşılaştırılması

Periyot değerleri yakın olan sonuçlar, Mardin Ulu Cami'ndeki analizler sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir. Mod şekilleri de aynı modlarda aynı şekillere sahiptir. Sabit yük analizi sonucu S11 gerilme değerleri entegre model tromp orta noktasında -151,52 kN ve klasik model tromp orta noktasında -135,50 kN gerilme değerleri oluşmuştur. Yüzdelik oran olarak entegre model ile klasik model %89 oranında yakınlık göstermiştir. Birbirlerine oldukça yakın olan tromp gerilme değerinin, yapı üzerindeki diğer noktalar için de geçerli benzerlik taşıdığı ve anormal bir sonucun oluşmadığı gerilme renk kontürlerinden de incelenebilmektedir (bkz. Bölüm 6.2, sayfa 225). Y yönünde yatay yük analizi entegre model batı yönü kubbe pencere tepe noktasında 0,0642 m, klasik model batı yönü kubbe pencere tepe noktasında 0,0644 m'lik yer değiiştirme değerleri oluşturmuştur. Bu değerler birbirleriyle %99,6 oranında benzerlik taşımaktadır.

Tez kapsamında ortaya çıkan sonuçların klasik modelleme tekniği referans alınarak yakınlık değerleri hesaplanmış ve aşağıda tablolaştırılmıştır (Çizelge 7.1):

Çizelge 7.1. Analizler sonucu fotogrametrik ve klasik modelleme tekniklerinden ortaya çıkan yakınlık değerleri

Tez kapsamında oluşturulan modeller	Modal Analiz (%)	Gerilme Değerleri (%)	Yer Değiştirme Değerleri (%)
Avlu Duvarı (Fotogrametrik ile GMODEL-1 değerlerine göre)	%96	%64	%99
Avlu Duvarı (Fotogrametrik ve GMODEL-2 değerlerine göre)	%96	%87	%99
L Duvar (Fotogrametrik ve GMODEL-3 değerlerine göre)	%97	%50	%95
L Duvar (Fotogrametrik ve GMODEL-4 değerlerine göre)	%97	%99	%97
Melik Mahmut Cami Güney Duvarı (Fotogrametrik ve klasik model değerlerine göre)	%98	%84	%99
Melik Mahmut Cami (Entegre ve klasik model değerlerine göre)	%98	%97	%90
Mardin Ulu Cami (Entegre ve klasik model değerlerine göre)	%99	%89	%99

Tez kapsamında fotogrametrik model, entegre model ve klasik modeller üzerinde gerçekleştirilen bütün analizlerde yakın ve uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Özellikle yer değiştirme ve modal analiz sonuçlarının analizlerdeki %95 üzerinde benzerlik oranları, oluşturulan modellerin benzer davranışlar sergilediklerini açıkça göstermektedir. Gerilme değerlerinde ise uyumlu bir dağılım olduğu ve genellikle ağ sayıları yakın olan modellerde daha yakın değerlerin ortaya çıkmıştır. Analiz sonuçlarının benzer olmasının ardından klasik ve fotogrametrik modelleme teknikleri arasındaki optimum kullanım durumlarını ortaya çıkarmak gerekmektedir. Bu denli yakın sonuçların elde edilmesi üzerine, uzun yıllardır yapısal analiz programlarında kullanılan klasik yönteme veri sağlayan fotogrametrik modelin, hangi ortamlarda ve durumlarda kolaylıkla kullanılabileceği veya ne zaman dezavantajlı durumları ortaya çıkarabileceğine aşağıda yer verilmiştir:

- Tarihi yapıların fotogrametrik modeli oluşturulurken yapının mevcut durumunun 3D dijital ortamlarda arşivlenmesi de sağlanmaktadır. Dolayısıyla bu durum gelecek

nesillere etkileşimli bir dijital ortam ve yapıyı 3D olarak deneyimleme fırsatı sunabilmektedir. Fotogrametrik modelleme tekniğinin sürece entegre edilmesi sadece yapısal analiz sürecine veri sağlamamakta, koruma ve belgeleme çalışmalarına da katkı sunmaktadır.

- Klasik modelde, mevcut veya yoksa yeni alınması gereken rölöveler üzerinden süreç işletilirken; fotogrametrik modelleme sürecinde ise ayrıntılı bir ölçülü 3D model oluşmaktadır. Model üzerinden kolaylıkla iki boyutlu çizimler elde edilebilmektedir. Bu durum, detaylı bir rölöve alma sürecine ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca geçmişte çalışılmış bir yapının rölöve, restitüsyon ve restorasyon projelerinin temini için gerekli olan resmi prosedürleri azaltabilmektedir.
- Fotogrametrik model ile daha pratik ve anlaşılabilir bir süreç içeren yapısal analiz, kullancısı mimarlar olan süreçleri de içerebilecektir. Fotogrametrik model sayesinde mühendislik bilgisine olan ihtiyaç azalmaktadır ve günlük rutin işlemler ile gerçekleştirilebilecek fotoğraflama ile model oluşturulabilmektedir. Modelin, yapısal analiz programına aktarılması, sadece bilgisayar ve program kullanımını gerektirmektedir.
- Fotogrametrik model ile model oluşturma süreci, klasik modelleme tekniğine oranla daha pratik olabilmektedir. Alan çalışmasının durumunun belirleyici olduğu bu süreçte, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapıların klasik yöntem ile idealleştirilmesi zor ve zaman alıcı bir süreçtir. Fotogrametrik modelin etkin kullanımında bu süreç kolaylaştırılabilir.
- Üç boyutlu fotogrametrik model oluşum sürecinde çalışma alanına dair zorluklar ortaya çıkabilmektedir. Yapıya gün içerisinde vuran ve parlamaya neden olan güneş ışığı, ortam ışığının yetersiz ve karanlık olması, yapının yakın çevresinde bulunan ağaç ve sabit mobilyalar, yapıda ulaşılamayan ve görüntü alınamayan yüzeyler gibi fotogrametrik modelin oluşumunu zorlaştıran durumlar bulunmaktadır. Bu durumda, modelin oluşmasının ardından ara programlardan faydalanılabilir ya da klasik modelleme tekniği ile entegre bir süreç yönetilebilir.
- Dış koşulların uygun olduğu durumlarda dahi bazı yapıların tasarım özelliklerinden dolayı görüntü almak mümkün olmamaktadır (Çizelge 7.2). Örneğin bitişik nizamlı yapıların, bitişik olduğu cephe duvarlarının fotogrametrik modelde oluşması mümkün değildir. Bazı yapıların çatılarından görüntü almak mümkün olmamaktadır. Bu durumda klasik modelin entegre edilmesi veya kullanılması kolaylık sağlayabilir. Ayrıca ara

programlarda eksik bölümler tamamlanabilmekte veya İHA kullanılarak gelişmiş görüntü alma teknikleri kullanılabilmektedir.

Çizelge 7.2. Fotogrametrik modelin oluşma süreçlerini etkileyen değişkenlere genel değerlendirilmesi (Iglhaut vd., 2019; James, Robson ve Smith, 2017'den geliştirilmiştir.)

Etki Alanı	Değişken	Tavsiyeler
Sahne	Doku	Yüksek yüzey kontrastı, özellikli noktaların tespiti için önemlidir. Yüzeyler arasındaki farklılık ve kontrast, noktaların doğru bir şekilde algılanmasını ve eşleştirilmesini kolaylaştırır. Yüksek kontrasta sahip yüzeyler, daha belirgin ve tanımlanabilir özellik noktaları üretir, bu da daha hassas ve doğru bir üç boyutlu model oluşturmaya yardımcı olur.
	Yüzey tekrarı	Bindirme tekniği ile çekilen görseller, modelin doğruluğunu arttırır.
	Hareketli yüzeyler	Kaçınılmalıdır.
	Kapalı yüzeyler	Bir nesnenin veya özelliğin bir başka nesne veya engel tarafından kısmen veya tamamen gizlenmesi durumunda kamera görüş açıları arttırılmalıdır.
Aydınlatma	Güneş açısı	Dik olmalıdır. Gün içinde güneşin en yüksek noktada olduğu vakit idealdir.
	Hava	Bulutlu hava, yapısal araştırmalar için homojen aydınlatma ortamı sağlayabilir.
	Değişen aydınlatma	Kaçınılmalıdır.
Kamera	Odak uzunluğu	Lensin optik merkezinden odak düzlemine olan mesafenin geniş olması ama bozulmaları en aza indirmek için de çok geniş olmaması önerilmektedir. 28-35 mm iyi bir ölçüdür.
	Işıklandırma (Exposure)	Ne aşırı aydınlık ne de aşırı karanlık bölgeler olmamalıdır.
	Piksel aralığı	Pratiklik sağlayacak kadar yüksek fiziksel piksel boyutları tercih edilebilir, çünkü bu durum görüntüde daha dinamik aralık ve hassasiyet sağlar.
Araştırma Özellikleri	Görsel örtüşme/bindirme tekniği	Yüksek nesnelerin bulunduğu ortamlar için genel bir kural olarak, yüksek (> 80% ileri ve yan) bir açı tercih edilmelidir. Bindirmeli Teknik ile bu açıdan çekilecek fotoğraflar, hareketli özellikler ve/veya engellerin olduğu sahnelerde eşleştirme kabiliyetini artırmaya yardımcı olur. Genel bir kural olarak, veri toplama işlemi planlanırken fotoğraflardaki her bir noktanın, en az farklı 4-5 görüntüde de görünür olacağı şekilde tasarlanmalıdır.
	Görüş açısı	Sistemik hataların azaltılması için görüntülerin benzer perspektifte çekilmesini sağlayan yakınsak (convergent) yöntem tercih edilmelidir.
	Araştırma mesafesi	Nesne veya sahneye olan mesafe arttıkça, yani her pikselin temsil ettiği alan genişledikçe, araştırma hassasiyeti azalır. Bu, daha az ayrıntıyı yakalayabileceğiniz ve ölçümlerdeki doğruluk ve hassasiyetin azalabileceği anlamına gelir.

- Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan modellerin ağ sayısı, çalışmacı tarafından kolaylıklar kontrol edilebilecek sayıdadır. Fotogrametrik model, çok sayıda ağlardan oluşmaktadır ve bu ağların sayısı ne kadar azaltılsa dahi klasik modelleme tekniği gibi kolaylıkla kontrol edilememektedir.
- Yapısal analiz sürecinde, yapıların iç mekanında bulunan kemer, tonoz, ayak gibi taşıyıcı elemanların doğru bir şekilde programa tanımlanması oldukça önemlidir. Fotogrametrik modelde, iç mekanların modeli de oluşturulabilmektedir. Fakat, tez kapsamında kullanılan SAP2000 programında fotogrametrik modelde oluşan ağlar, shell eleman olarak tanımlanmaktadır. SAP2000 programı ağlar üzerinden otomatik olarak bir solid eleman ataması gerçekleştirmemektedir. Dolayısıyla iç mekanın modellenmesiyle, yapının beden duvarları ve taşıyıcı ayakları gibi kesit kalınlığı olan elemanların SAP2000 programında shell eleman olarak tanımlanması nedeniyle arada boşluklar kalmaktadır. Farklı yapısal analiz programlarında ağlar üzerinden otomatik solid eleman atamaları gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumda yapının tüm iç ve dış duvarlarının fotogrametrik modeli oluşturularak süreç yönetilebilir; ancak, yapıdaki taşıyıcı elamanların kesit özelliklerinin tamamı ile bilinmediği bir süreç olduğu unutulmamalıdır. Dolayısıyla otomatik tanımlamalar gerçekleştirilen programlarda, modelin yoğun bir kontrol sürecinden geçmesi gerekmektedir.
- İç mekan taşıyıcı elemanların, fotogrametri ile modellenmediği durumlarda, klasik modelleme tekniği kullanılarak entegre model üretim süreci gerçekleştirilebilmektedir. Entegre model üretiminde, farklı bir Sap2000 dosyasında iç mekan taşıyıcı elemanlar klasik teknikler ile modellenerek fotogrametrik modelin bulunduğu dosyaya aktarılabilmektedir. Bu noktada en önemli husus, fotogrametrik ağlar ile klasik yöntem ile gelen ağların kesişim noktalarının düğüm noktalarına göre taşınmasıdır. Bu işlem manuel bir süreci gerektirmektedir. Klasik modelleme tekniği ile oluşturulan elemanlar ile fotogrametrik modelleme tekniği ile oluşan elemanlar, yeni ağlar oluşturularak veya mevcut ağların düğüm noktaları taşınarak birbirlerine bağlanmalıdır. Bu işlem, entegre model üretim sürecinin en önemli ve zaman alıcı bölümüdür.

Tez kapsamında, her iki modelleme tekniğinde ortaya çıkan gerilme ve deformasyon değerlerinin, SAP2000 programında analiz sonuçlarında değerleri gösteren renk kontürleri de dikkate alındığında orantılı bir değişikliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile modellemeye entegre edilen fotogrametrik süreç, görsel bir değerlendirmeyi içermektedir. Tarihi yapının etrafından çekilen görsellerden oluşturulan model, yapının üç boyutlu dijital verilerini arşivlemek için kullanılabilmektedir. Bu sayede zaman içerisinde yapıda gerçekleşebilecek olan hasar durumlar, dijital ortamlarda etkileşimli şekilde tespit edilebilecektir. Görsel gözlemlerin gerçekleştirilmesinin ardından ihtiyaç duyulması halinde detaylı analizler gerçekleştirilebilir. Tarihi yapıların görseller üzerinden hasar değerlendirme sürecinde Çizelge 7.3'te görüldüğü gibi avantajlar sağlanabilmektedir:

Çizelge 7.3. Tarihi yapı gözlem çalışmalarının değerlendirilme süreci (Vatan, 2012'den geliştirilmiştir.)

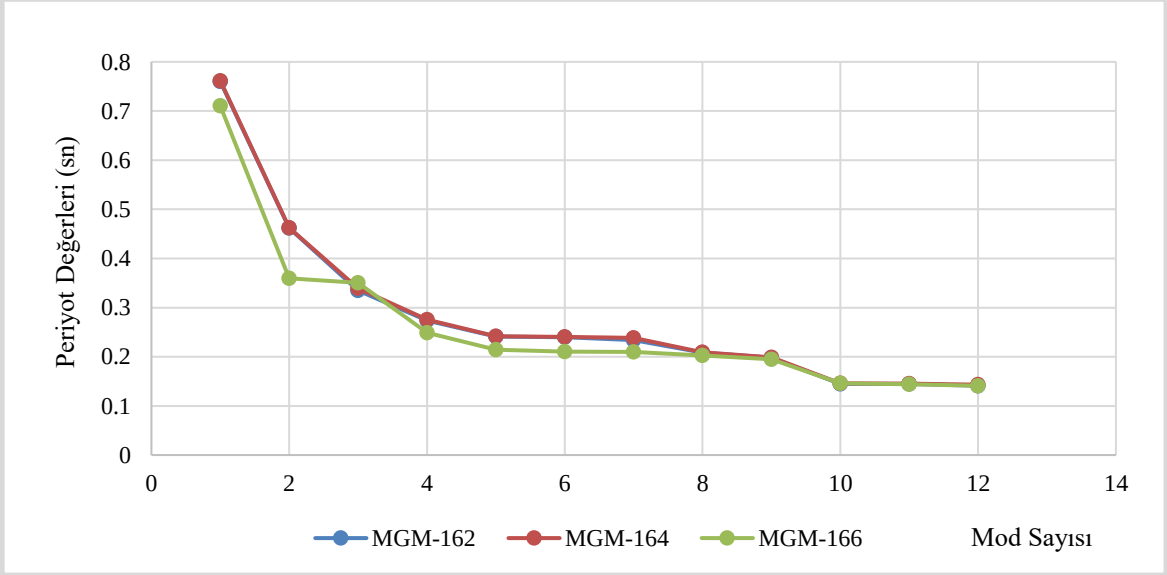
Görseller ile Değerlendirme	Detaylı Çalışmalar ile Değerlendirme
Görsel gözlemlere dayanmaktadır.	Mekanik, fiziksel, kimyasal testler gibi süreçleri içermektedir.
Herhangi bir uzmana gerek duyulmaz.	Uzmanlara ve spesifik tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır.
Zaman tasarrufu sağlanabilir ve düşük bütçe ile süreç yönetilebilir.	Maliyetli ve çok zaman gerektiren bir süreç olmaktadır.
Çok sayıda yapıya pratik bir şekilde uygulanabilir.	Sınırlı sayıda yapılara uygulanabilir.
Kısa zamanda ihtiyaç duyulan birçok veriyi sağlayabilir.	Veri elde edilmesi için uzun süreler gerektirebilir.

Tarihi yapılar ile ilgili yapılacak birçok çalışma için ilk aşamada çağın gerektirdiği dijital ve teknolojik gelişmeler dahilinde görsel gözlem verilerinin oluşturulması ve sonuçlara göre gerekli görüldüğü takdirde detaylı analizlere geçilmesi gerektiği düşünülmektedir.

7.2. Yapısal Analiz Sürecinde Çubuk, Kabuk ve Katı Eleman Kullanımının Değerlendirilmesi

Tezin bu bölümünde, yapısal analiz programlarında kullanılan eleman tipinin doğru tanımlamalar ve atamalar ile birlikte kullanıldığı zaman analiz sonuçlarında herhangi bir değişiklik yaratmama durumu değerlendirilmiştir. Özellikle fotogrametrik modellemede oluşan ağların, shell eleman olarak programa tanıtıldığı ve analiz sonuçlarında solid eleman kullanımı ile oluşabilecek farklılıklar ele alınmıştır.

Farklı eleman kullanımları sonucu, çubuk (MGM-162), kabuk (MGM-164) ve katı elemanlar (MGM-166) ile modeli oluşturulan Mardin Ulu Camii'nin bir bölümünde, gerçekleştirilen analizler sonucunda MGM-162 birinci periyot değeri 0,760 sn, MGM-164 birinci periyot değeri 0,761 ve MGM-166 birinci doğal periyot değeri 0,711 olduğu görülmektedir (Şekil 7.6).



Şekil 7.6. Eleman kullanımının analizi için oluşturulan MGM-162, MGM-164 ve MGM-166 modellerinin periyot değerleri

Periyot değerleri yakın olan sonuçlar, sabit yük analizi ve dinamik yükler analizi sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir (bkz. Bölüm 4.1, sayfa 125). Dolayısıyla, tarihi yığma yapıların analitik modellemesinde, çubuk elemanların kabuk elemanlarla birlikte kullanımını, tamamen kabuk elemanların kullanımını ve tamamen katı elemanların kullanımını içeren bu analiz yaklaşımı, Mardin Ulu Camii'nin kısmi sayısal modeli ile gerçekleştirilen yapısal analizde güvenilir sonuçlar göstermiştir. Bu durumda model oluşum sürecinde, eleman tiplerinin doğru tanımlamalar ve atamalar sonucunda gerçek strüktürel davranışı, farklı veya bir arada kullanımları ile de temsil edebilecekleri görülmüştür. Eleman tiplerinin bir arada kullanımında, dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elemanların düğüm noktalarından birbirlerine bağlanmış olması gerekmektedir. Bağlantılar, yapısal elemanlar arasındaki düğüm noktalarını temsil etmektedir. Tek bir eleman olarak düşünüldüğünde, çubuk elemanların uçlarında ve kabuk ve katı elemanların ise köşelerinde programlar tarafından otomatik olarak düğüm noktaları atanmaktadır. İkinci bir elemanın eklenmesi durumunda ise yapısal elemanların birbiri ile bağlantılı olması adına

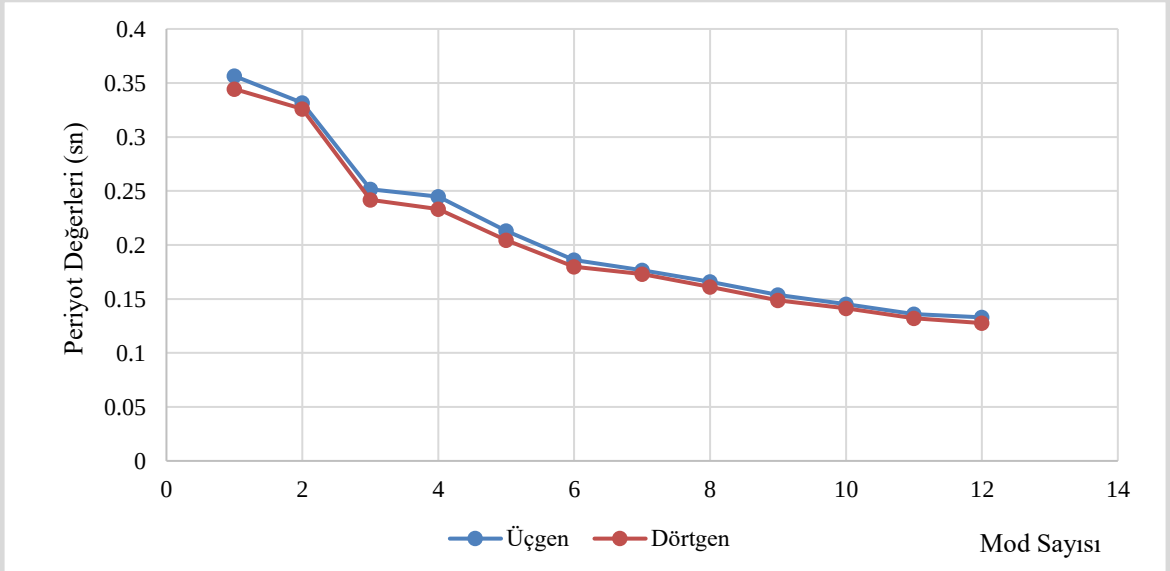
düğüm noktalarından bağlanmış olması gerekmektedir. Düğüm noktaları, gerilme ve gerinmelerin düğüm noktalarının yer değiştirme değerine göre çözülmesi nedeniyle sayısal modelleme için doğru oluşturulması gereken en temel gerekliliktir. İlk olarak, düğüm noktaları ile bağlanan ve ardından yüklemeye maruz kalan yapısal nesnelerin çizilmesi ile nesne tabanlı bir model oluşturulmalıdır.

Sonlu elemanlar analizlerinde eleman seçiminde en önemli kriter, yapının davranışını doğru temsil edebilecek modeli oluşturmaktır. Gerçekleştirilecek olan idealleştirmeler doğrultusunda, hangi eleman tipi pratik ve uygulanabilir şekilde çözüm üretecek ise ona uygun bir seçim yapılmalıdır. Kabuk elemanlar etkili sonuçlar için kullanılabileceği gibi katı elemanlar da etkili bir sonuç elde etme sürecinde kullanılabilmektedir. Kabuk elemanlar, daha az ağ elemanı ile modellenmesine imkan tanımaları sayesinde büyük hesaplama süresi tasarruflarına katkı sağlayabilmektedir. Ayrıca kabuk elemanlar, daha az sayıda düğüm noktasına sahip olmaları nedeniyle ağları oluşturmak ve modeli tamamlamak adına daha pratik bir süreci içermektedir (Zardadkhan, 2012). Bir kabuk elemanın içi boştur ve kabuklar, özel şekilli katıların matematiksel olarak basitleştirilmesidir. Her sonlu eleman uygulaması çubuk, kabuk ve katı modeller arasındaki fark göz önünde bulundurmalıdır. Tezde gerçekleştirilen analiz sonuçları da bu farklılıkların göz önünde bulundurulması ile oluşturulan modellerde, aslında elemanların bir "modelleme aracı" olduğunu ve uygun atamalar ve tanımlamalar ile farklı elemanların birbirleri yerine kullanılabileceğini göstermiştir. Eleman kullanım çeşitliliğinde, kullanılan yapısal analiz programlarında belirli bir sınırlamanın veya zorunluluğun olmadığı ve kullanıcının kendi ihtiyacına göre seçimler yapabileceği sonucuna varılmıştır.

Sonlu eleman modeli için en uygun olabilecek elemana karar verilmesi ile birlikte elemanların boyutlarına da karar verilmesi gerekmektedir. Yapılar, hesaplama yönteminin amacına uygun olacak şekilde ve sayıda birtakım elemanlara ayrılmaktadır. Ayırma aşamasında, yapıyı oluşturan taşıyıcı sistem elemanlarının daha küçük parçalara bölünerek tanımlanması da gerekebilmektedir (Vintzileou, Zagkotsis, Repapis ve Zeris, 2007). Yapının geometrik boyutları, mesnet özellikleri ve taşıyıcı elemanlarının düğüm noktalarındaki hareket kabiliyetleri ve serbestlik dereceleri, yapıya etkiyen yükler dikkate alınarak model elemanlara bölünmelidir (Can ve Ünay, 2012). Özellikle tarihi yapılar gibi büyük ölçülere ve yığma sistemi nedeniyle kalın duvar, ayak, kemer gibi taşıyıcı elemanlara sahip modellerde de tek boyuttaki bir eleman ile çözüm gerçekleştirilemez. Bunun en önemli

nedenlerinden biri, tarihi yapı elemanlarının çok büyük ölçülere sahip taşıyıcı elemanlardan oluşması ve yapıların taşıyıcı sistemini oluşturan duvarların zemin ile kurduğu ilişkinin tamamında ankastre çalışmasıdır. Dolayısıyla, gerçeğe yakın strüktürel davranışı sergileyebilmeleri için zemin ile yeterli sayıda ankastre mesnetlenmesi ve kullanılacak elemanların ağlara bölünmesi gerekmektedir. Ağ sayısının fazla veya az olması, daha doğru bir model oluşturmak için kriter değildir. Modelin, yüklü bir dosya boyutuna sahip olmaması ve daha hızlı bir süreç işletebilmek adına kontrol edilebilir seviyede ağ sayılarının olması ideal bir çözüm olmaktadır.

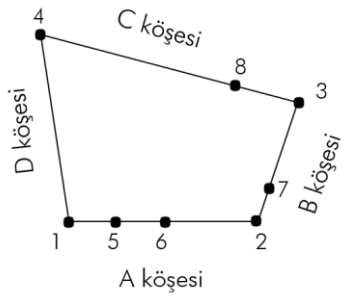
Aynı kabuk eleman kullanımları fakat üçgen ve dörtgen boyutlarının seçilmesi ile Melik Mahmut Cami modeli üzerinden gerçekleştirilen analizler sonucunda üçgen elemanlara sahip modelin birinci periyot değeri 0,356 sn, dörtgen elemanlara sahip modelin ise birinci periyot değeri 0,344 olduğu görülmektedir (Şekil 7.7). Periyot değerleri yakın olan sonuçlar, sabit yük analizi ve dinamik yükler analizi sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve yer değiştirmeler için de geçerlidir (bkz. Bölüm 4.2, sayfa 136). Bu analizler, tarihi yığma yapıların analitik modellemesinde kullanılan elemanların boyutlarının üçgen veya dörtgen olmasının sonuçlarda değişiklik yaratmadığını göstermiştir.



Şekil 7.7. Eleman boyutlarının analizi için oluşturulan üçgen ve dörtgen ağ modellerinin periyot değerleri

SAP2000 programının üreticisi CSI America, modeli oluşturulacak nesnelerin kenar noktalarını ekleyerek veya bölerek ağ oluşturma sisteminin sadece üçgenler ve dörtgenler

için geçerli olduğuna Şekil 7.8'deki örnek üzerinden ele almıştır. 1'den 4'e kadar olan noktalar ve A'dan D'ye kadar olan kenarlarla tanımlanan bir nesneyi gösteren aşağıdaki şekil göz önünde bulundurulduğunda, 5 ve 6 numaralı noktalar A kenarında, 7 numaralı nokta B kenarında ve 8 numaralı nokta C kenarında yer almaktadır. Bu noktalardan eleman ağlara bölünmek istendiğinde üçgen veya dörtgen elemanlar oluşturulmalıdır.



Şekil 7.8. Düğüm noktalarından parçalara bölünebilecek eleman modeli

Modeller oluşturulurken üçgen ve dörtgen elemanların bir arada kullanımı da mümkündür. Özellikle tarihi yapılar gibi kompleks geometrik özelliklere sahip yapıların, kemer ve duvar birleşim noktalarında bu tür uygulamalara ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu kullanım için de en önemli husus, düğüm noktalarından bağlantıların sağlanması gerektiğidir. Tez kapsamında Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami entegre model üretim süreçlerinde, fotogrametrik verilerden elde edilen ağlarda üçgen elemanlar kullanılırken entegre olarak modele dahil edilen ağlarda ise dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Bu durumun analiz sonuçlarında ve yapıların strüktürel davranışında herhangi bir anormalliğe yol açmadığı gözlenmiştir. Dolayısıyla sonlu elemanlar modeli, üçgen ve dörtgen eleman kullanımına açık bir şekilde geliştirilmekte ve iki eleman tipinin uygun koşullarda bir arada kullanımına da imkân sağlamaktadır.

7.3. Gerilme ve Yer Değiştirme Değerlerinin Yapısal Analiz Sürecinde Etkilerinin Değerlendirilmesi

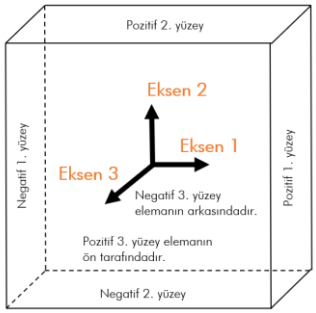
Çalışmanın bu bölümünde, gerilme değerlerinin modellerde ağ sayıları gibi nedenlerle uyumlu bir biçimde de olsa farklılık gösterebileceği ancak yer değiştirme değerlerinin her zaman yakın sonuçlar verme durumu değerlendirilmiştir.

Yığma yapılar için hazırlanan yönetmeliklerde, genellikle düşey yükler ve deprem etkileri altında hesaplanan basınç ve kayma gerilmelerinin, sistemin sahip olduğu öngörülen sınır verilerine göre değerlendirmelerin yapılması tavsiye edilmektedir. Yığma yapılar çoğunlukla taşıyıcı duvarlardan oluşması nedeniyle, elemanların emniyetli sınır gerilmelerinin hesabında duvarlar esas alınarak yöntemler uyglanmaktadır. Duvarların sınır gerilmelerinin hesaplanabilmesi için yönetmeliklerde, deneysel çalışmaların gerekliliği belirtilmektedir. Yığma yapının sahip olduğu taşıyıcı duvarlara benzer özelliklerde oluşturulan duvarlar üzerinden bu deneylerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir (TBDY, 2018; Dabanlı, 2018). Bu tür bir deneyi gerçekleştirmek oldukça kapsamlı ve zaman alıcı bir çalışmayı gerektirmektedir. Duvar deneyinin yanı sıra duvarlarda kullanılan malzemelerin deneyler ile mekanik özelliklerini belirlemek dahi oldukça kısıtlıdır. Malzemenin basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tarihi yapılardan örnek numunelerin alınması konusundaki zorluklar ile birlikte, yığma yapıda kullanılan herhangi bir taşın, aynı sırada bulunan diğer bir taş ile farklı mekanik özellikle sahip olma ihtimali bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı tarihi yığma yapıların gerilme sonuçlarına göre strüktürel davranışları ve dayanımları hakkında yorumlar yapmak zorlaşmaktadır.

Yığma yapıların basınca karşı dayanımı yüksek ve çekme gerilmesine karşı ise düşüktür. Bu özellik, yığma yapı sisteminin gerilmelere karşı bilinmesi gereken en temel özelliğidir. Yığma yapıların yapısal formu basınç kuvvetlerine dayanırken çok kırılgan bir davranış sergilemektedirler. Çekme gerilmelerinin oluştuğu bölgelerde ani kırılmalar meydana gelebilmektedir.

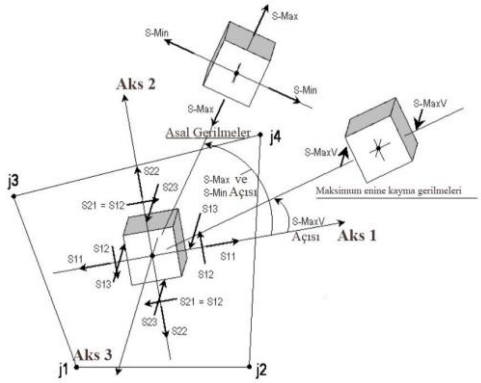
Sonlu elemanlar analizinde S11, S12, S22, Smax ve Smin terimleri gerilme bileşenlerini temsil etmektedir. Bir kabuk elemanın altı yüzü Şekil 7.9'da gösterildiği gibi pozitif 1 yüzü, negatif 1 yüzü, pozitif 2 yüzü, negatif 2 yüzü, pozitif 3 yüzü ve negatif 3 yüzü olarak tanımlanır. Bu tanımda 1, 2 ve 3 sayıları kabuk elemanın yerel eksenlerine karşılık gelmektedir. Elemanın pozitif 1 yüzü, elemanın 1-eksenine dik olan ve dış normali (elemandan uzağa bakan) pozitif 1-eksen yönünde olan yüzdür. Elemanın negatif 1 yüzü, elemanın 1-eksenine dik olan ve dış normali (elemandan uzağa bakan) negatif 1-eksen yönünde olan bir yüzdür. Diğer yüzler de benzer tanımlara sahiptir. Analiz sonuçları değerlendirilrken bu eksenlere göre yorumlar yapılmalıdır. S11 gerilme bileşeni, eksen 1 yönünde pozitif ve negatif 1 yüzeyler üzerinde etkili olan doğrudan gerilmeyi

göstermektedir. S22 gerilme bileşeni, eksen 2 yönünde pozitif ve negatif 2 yüzeyler üzerinde etkili olan doğrudan gerilmeyi göstermektedir. S12 gerilme bileşeni, eksen 2 yönünde de pozitif ve negatif 1 yüzeyler üzerinde etkili olan kesme gerilimini ve eksen 1 yönünde pozitif ve negatif 2 yüzeyler üzerinde etkili olan kesme gerilimini temsil etmektedir. Smax, yapısal bileşende en büyük gerilme değeridir. Bu değer, yapının uygulanan yük altında maksimum gerilme değerini temsil etmektedir. Smax, yapısal mukavemetin sınırlarını belirlemede önemli bir rol oynar ve potansiyel risk altındaki bölgeleri belirlemek için kullanılmaktadır. Smin ise yapının en küçük gerilme değeridir. Bu değer, yapısal bileşenlere uygulanan yük altında minimum gerilme değerini temsil etmektedir. Smin, gerilme dağılımının simetri veya asimetrisini değerlendirmede tercih edilmektedir.



Şekil 7.9. Kabuk elemanı iç kuvvetler/stresler sonuç kuralları

Kabuk elemanlarda oluşan S11, S22, S12, S13 ve S23 gerilmelerinin karşı geldiği yüzeyler Şekil 7.10'da gösterilmiştir. S-Max ve S-Min oluşabilecek en büyük basınç ve çekme değerlerini vermektedir. Tarihi yapıların çekme dayanımlarına karşı dayanımlarının düşük olması nedeniyle Smax değerleri de titizlikle incelenmelidir.



Şekil 7.10. Kabuk elemanlarda oluşan gerilmeler (CSI Analysis Reference Manual, 2016)

Bu gerilme bileşenleri, yapısal analizlerde gerilme durumunu daha ayrıntılı bir şekilde anlamak ve yapısal dayanıklılık, güvenlik faktörleri ve potansiyel risk bölgelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Gerilme bileşenleri, malzeme mukavemetinin sınırlarını değerlendirmede, tasarım optimizasyonunda ve genel yapısal performansın değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar.

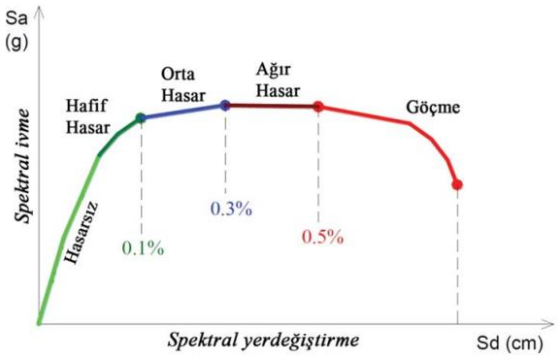
Sonlu elemanlar analizlerinde gerilme ve yer değiştirme değerleri birbirlerinden farklı özellikleri ifade etmekte ve farklı önem taşımaktadırar. Bu iki değer arasındaki farklar ve hangi değerin mevcut durumda daha çok dikkate alınması gerektiği hakkında aşağıda bazı bilgilere değinilmiştir (Sedmak, Radaković, Milović ve Svetel, 2012; Moevani, 2011: 834):

- Gerilme değerleri, malzemeye etkiyen kuvvetlerin birim alanına orantılanmasıdır. Genellikle uygulanan yükler veya kısıtlamalardan oluşan iç kuvvetlerin, malzemenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Gerilme değerleri, malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini göstermektedir. Ayrıca, yapısal bileşenlerin kritik bölgelerini tespit etmek ve malzeme hasarının meydana gelebileceği noktaları belirlemek için önemlidir. Gerilme değerleri, mevcut veya yeni inşa edilecek olan yapılar için malzeme seçiminde, boyutlandırmada ve tasarım optimizasyonunda dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Malzeme özelliklerine dayanan gerilme limitleri, yapısal bileşenlerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kullanılır.
- Yer değiştirme değerleri meydana gelebilecek yapısal deformasyonun büyüklüğünü, ölçüsünü ve yönünü ifade etmektedir. . Uygulanan yükler veya kısıtlamalar altında bir yapının veya bileşenin ne kadar yer değiştirdiğini göstermektedir. Bu değerler, yapısal bütünlüğü değerlendirmek ve olası deformasyon bölgelerini tespit etmek için önemlidir. Yer değiştirme değerlerinden yapısal stabiliteyi, yapısal bağlantıları ve yapısal deformasyonu yorumlayabilmek amacıyla faydalanılmaktadır. Bir yapının performansını değerlendirmek ve yer değiştirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamak için kullanılmaktadırlar.

Hangi değerin daha çok dikkate alınması gerektiği, yapısal tasarımın amaçlarına ve gereksinimlerine bağlıdır. Genel olarak, her iki değer de önemlidir ve birlikte değerlendirilmelidir. Gerilme değerleri, malzemenin dayanıklılığı ve güvenliği açısından önemlidir, ancak yer değiştirme değerleri, yapısal bütünlük ve deformasyon analizi için önemlidir. Tasarımın güvenlik faktörlerini belirlemek için gerilme değerlerine odaklanmak

önem arz ederken, ancak yapısal deformasyonun kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamak için yer değiştirme değerleri de dikkate alınmalıdır. Gerilme ve yer değiştirme değerleri birbirini tamamlayan bilgiler sağlamaktadır ve yapısal tasarımın güvenlik ve performansının tam bir değerlendirmesi için birlikte değerlendirilmelidir. Bu bağlamda, malzemelerin kesin doğru sonuçlarının elde edilmesinin oldukça zor ve yapısal bütünlüğün oldukça önemli olduğu tarihi yapılar özelinde strüktürel değerlendirmede, yer değiştirme değerlerinin acil müdahaleler gerektip gerektirmediği konusunda incelenmesine öncelik verilebileceği düşünülmektedir. Tez kapsamında uyumlu değişiklik gösteren gerilme değerleri ile çok yakın sonuçlar ortaya koyan yer değiştirme değerleri, fotogrametrik modelleme tekniğinin yapısal analiz süreçlerine entegre edilmeye ve geliştirilmeye açık olduğunu göstermektedir.

Yığma yapıların strüktürel performansının değerlendirilmesinde, gerilmelerin hesaplanması ve sınır değerlerle karşılaştırılması yerine çoğunlukla yer değiştirme (deplasman) kriterleri kullanılmaktadır (Dabanlı, 2016). Gerilme analizleri, yığma birimlerin düzlem içi davranışlarına dayanmaktadır, fakat bu yapıların hasar oluşum süreçlerinde düzlem dışı hareketler büyük önem taşımaktadır. Uluslararası yönetmeliklerde bu tür yapıların deprem etkisi sonrası belirli performans seviyesini karşılayıp karşılamadığının ya da hangi performans düzeyinde bulunduğunun, deprem etkisi altında yapıda meydana gelen yer değiştirme oranları ile tespit edilmesi önerilmektedir (Şekil 7.11).



Şekil 7.11. Kargir yapılarda performans seviyeleri (Dabanlı, 2016)

Spektral yer değiştirme ve spektral ivme oranları %0,1 ise yapı hafif hasar alacağı ve hızlı müdahaleler ile kullanılabileceği düşünülmektedir. Oran %0,3 olduğunda ise yapının can güvenliğini sağlayacağı ancak kapsamlı müdahaleler ve onarımlar sonrası kullanılabileceği düşünülmektedir. Oranın %0,5 ve yüksek olması durumunda ise can güvenliğinin tehlikede

olduğu düşünülmektedir. Yüksek maliyetli ve oldukça kapsamlı müdahaleler sonrası yapının yeniden kullanılabileceği gibi yeniden inşa etmek de gerekebilmektedir (Çizelge 7.4).

Çizelge 7.4. Kargir yapılar için performans kriterleri

Performans Seviyesi	Performans Kriterleri
Hasarsız Hemen Kullanım	Herhangi bir hasar oluşmamaktadır.
Hafif Hasar Hemen Kullanım	Hasarlar kolayca restore edilebilecek düzeydedir. *Ötelenme üst sınırı: %0,1.*
Orta Hasar Can Güvenliği	Hasarlar detaylı bir onarım sürecini gerektirecek düzeydedir. *Ötelenme üst sınırı: %0,3*
Ağır Hasar Göçmenin Önlenmesi	Hasarlar ağır ve can güvenliği tehlikesi olabilecek düzeydedir. Pahalı ve kapsamlı bir restorasyon sürecini gerektirebilir. *Ötelenme üst sınırı: %0,5.*

Dünya genelinde pek çok ülke, depreme karşı yapıların tasarımı ve inşası için kendi yönetmeliklerini ve standartlarını belirlemiştir. Bu yönetmelikler, deprem riski olan bölgelerde yaşayan insanların ve yapıların güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulmuştur. Her ülkenin kendi coğrafi, jeolojik ve yapısal özellikleri nedeniyle farklı risklerle karşı karşıyadır ve dolayısıyla, depremle mücadele için geliştirilen yönetmelikler de ülkelere ve bölgelere özgüdür. Örneğin, Türkiye gibi yüksek deprem riskine sahip bir ülkede, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, yapıların depreme karşı güvenliğini sağlamak için önemli rol oynamaktadır. Japonya ise deprem ve tsunamilere karşı yüksek risk taşıyan bir ülkedir. Japonya'da, Japonya Yapı Standardı (Japanese Building Standards Act) gibi özel yönetmelikler ve deprem kodları bulunur. Bu standartlar, depremle mücadelede özel olarak tasarlanmış yapı malzemelerini, teknolojileri ve inşa yöntemlerini içermektedir. Sismik tasarım ve değerlendirmeye ilişkin mevcut birçok yönetmelik ve kılavuzlar arasında, sadece birkaçı yığma yapıların performansa dayalı değerlendirmesi için ayrıntılı talimatlara yer vermektedir. Bu belgelerden bazıları Amerikan FEMA 356 (2000), ASCE/SEI 41-06 (2007), Eurocode 8 Bölüm 3 (EN 1998-3, 2005), İtalyan NTC08 (2008) ve Yeni Zelanda NZSEE (2012)'dir (Demir, 2012: 224).

FEMA 356 (2000) yönetmeliğini esas alan ASCE/SEI 41-06 (2007), yığma bir yapıdaki hareketleri deformasyon kontrollü veya kuvvet kontrollü olarak sınıflandırmakta ve mevcut yığma binaların değerlendirilmesi için hem doğrusal hem de doğrusal olmayan prosedürlerin

kullanılmasına olanak tanımaktadır. Eurocode 8 Bölüm 3 (EN 1998-3, 2005), donatısız yığma duvarların düzlem içi tepkisi için ötelenme sınırları sağlamaktadır. Bu kod, yapıların davranışını, yükleme koşullarının türüne göre kesme veya eğilme baskın olarak sınıflandırmakta ve buna göre ötelenme oranlarını tanımlamaktadır. Yığma yapı için çeşitli detaylar içeren kodlardan biri İtalyan NTC08 (2008) kodudur. Bu kod hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analizler için prosedürler içermekte ve güvenlik değerlendirmesi ve mevcut binalara yapılan müdahalelerin tasarımı, yürütülmesi ve kontrolü için genel kriterleri tanımlamaktadır. Yeni Zelanda NZSEE (2012) yönetmeliği, donatısız yığma yapıların ayrıntılı sismik güvenlik değerlendirmesine yönelik prosedürlere yer vermektedir. Diğer yönetmeliklere oranla ötelenme ve kesme hasar modları için daha yüksek sınırlar önerilse de, aşırı mukavemet bozulmasını önlemek için kesme gerilmesine bir sınır getirilmiştir. Bahsedilen uluslararası yönetmeliklerde hızlı kullanım, can güvenliği ve göçme önleme performans seviyeleri için, bahsedilen hasar sınıflandırmalarına benzer ve yer değiştirme limit oranları için çok yakın değerler verildiği görülmektedir (Dabanlı, 2016: 357). Amerikan şartnameleri FEMA ve ASCE aynı değerlere sahipken, Avrupa normu EN1998 daha büyük limitlere ve İtalyan şartnamesi NTC08 daha ara değerlere sahiptir (Çizelge 7.5).

Çizelge 7.5. Uluslararası yönetmeliklerde yer alan kargir yapıların performans seviyeleri

Ülke	Yönetmelik	Hemen Kullanım (%)	Can Güvenliği (%)	Göçmenin Önlenmesi (%)
Amerika	FEMA 356 (Donatısız kargir-Derzde kayma)	0,10	0,30	0,40
	FEMA 356 (Donatısız kargir-Blok devrilme)	0,10	0,28	0,37
	FEMA 356 (Donatılı kargir-Eğilme)	0,10-0,20	0,20-0,30	0,20-0,40
	FEMA 356 (Donatılı kargir-Kayma)	0,40	0,60	0,75
	ASCE/SEI 41-06 (Donatısız kargir-Blok devrilme)	0,10	0,28	0,37
	ASCE/SEI 41-06 (Donatılı kargir-Eğilme)	0,10-0,20	0,20-0,30	0,20-0,40
	ASCE/SEI 41-06 (Donatılı largir-Kayma)	0,40	0,60	0,75
Avrupa	EN 1998-3 (Donatısız kargir-Eğilme)	Akma noktası	0,80	1,07
	EN 1998-3 (Donatısız kargir-Kayma)	Akma noktası	0,40	0,53
İtalya	NTC08 (Donatısız kargir-Eğilme)	0,30	0,60	-
	NTC08 (Donatısız kargir-Kayma)	0,30	0,40	-
	NTC08 (Donatılı kargir-Eğilme)	0,40	0,60	-
	NTC08 (Donatısız kargir-Kayma)	0,40	0,40	-
Yeni Zelanda	New Zealand NZSEE (Donatısız kargir-Blok devrilme)	-	1,00	-
	New Zealand NZSEE (Donatısız kargir-Kayma)	-	0,50	-
- Değerler duvar yüksekliği ve uzunluğunun yaklaşık eşit hesaplanmasına göre verilmiştir.				

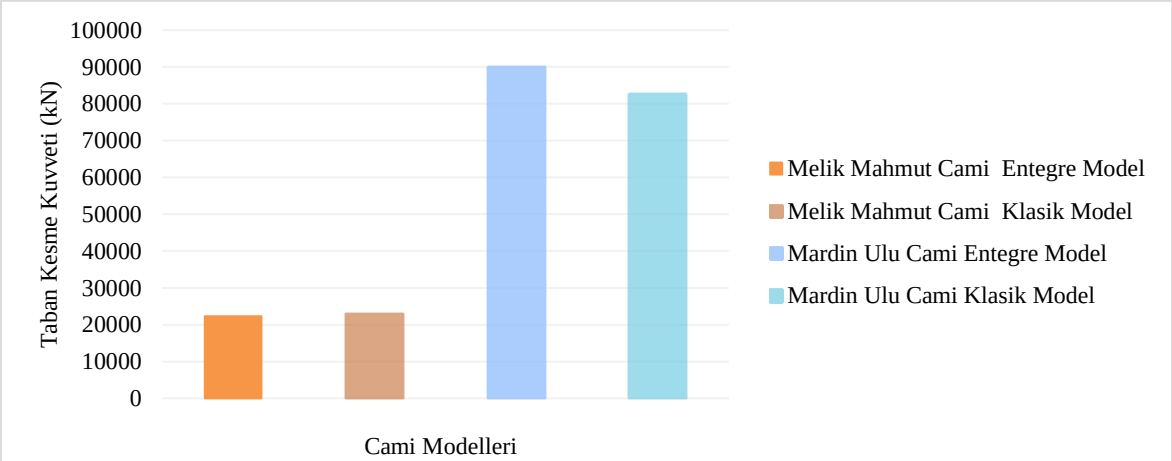
Her ülkenin depremle ilgili yönetmelikleri ve standartları, ulusal hükümetler, yerel yönetimler ve uzman kuruluşlar tarafından belirlenmekte ve güncellenmektedir. Bu yönetmelikler, deprem risklerinin sürekli olarak değerlendirildiği ve deprem mühendisliği ve yapı güvenliği alanındaki yeni gelişmelerin dikkate alındığı önemli dokümanlardır. Bu dökümanlar referans alınarak yorumlamaların yapılması, yapının güvenliği konusunda bilgi sahibi olmak adına önemli bir yöntemdir.

7.4. Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Caminin Strüktürel Davranışlarının Değerlendirilmesi

Uzun yıllardır SAP2000 programı yapısal analiz sürecinde modelleme işlemlerinde kullanılmış ve yapılan onarım ve güçlendirmeler, bu programdan çıkan sonuçlar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Klasik modelleme tekniğinin SAP2000 programında uzun yıllardır kullanılması sonucu, fotogrametrik model üzerinde çıkan değerler ile klasik modelleme değerleri karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen analizlerin tarihi yapıların karmaşık ve kompleks özelliklerinden dolayı kesin doğru sonuçlar verdiğini söylemek mümkün olmamaktadır. Detaylı ve kesin doğru sonuçların istenildiği durumda ivme ölçerler, malzeme analizleri, deneysel yollarla yapılacak olan davranış çalışmalarında daha detaylı çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Ancak bu durum fotogrametrik ve klasik modellleme teknikleri ile yapılan çalışmaların hatalı olduğu anlamına gelmemektedir. Tarihi yapılar üzerinde yapılan çalışmalarda, hem malzeme özelliklerini tespit etmenin zorluğu hem de doğal bir afet olan deprem hareketinin belirsizliği hiçbir zaman çalışmalarda net bir doğrunun elde edilmeyeceğini göstermektedir. Dolayısıyla birebir kesin sonuçlar elde etmek yerine yapıların davranışlarının tahmin edilebileceği ve yaklaşık değerlerin sunulabileceği yöntemler de yapısal analiz süreçlerinde etkili olmaktadır.

Artuklu dönemi camilerinin ele alındığı tez kapsamında, farklı modelleme teknikleri ile yapıların strüktürel davranışlarının belirlenmesine yönelik analizler gerçekleştirilmiştir. Modelleme tekniklerinin avantaj ve dezavantaj durumlarının tespiti amacıyla modal analiz, gerilme ve yer değiştirme değerleri üzerinden yorumlamaları gerçekleştirilmiştir. Yapıların sonlu elemanlar analizlerinin sonuçlarının yorumlanması için taban kesme kuvvetleri, maksimim-minimum gerilme değerleri ve maksimum yer değiştirme değerlerini gösteren grafiklerden faydalanılmıştır.

Analizler sonucunda Melik Mahmut Cami için taban kesme kuvveti her iki modelleme tekniğinde de 22200 - 22700 kN bandında tespit edilmiştir. Mardin Ulu Cami için ise taban kesme kuvvetti her iki modelleme tekniğinde de 82000 – 89000 kN bandında olduğu belirlenmiştir (Şekil 7.12). Taban kesme kuvveti, yapının tabanında sismik yer ivmesi nedeniyle oluşması beklenen maksimum yanal kuvvettir (Desai, Bookseller ve Vyas, 2016; Fanaie ve Dizaj, 2023). Taban kesme veya deprem kuvveti, binanın ağırlığı ile yatay sismik ive katsayısının çarpımına eşittir. Dolayısıyla taban kesme kuvvetleri, yapıların ağırlığı hakkında bilgi sahibi olmak için kullanılabilmektedir. Ortaya çıkan analiz sonuçları, Melik Mahmut Cami'nin yük karşısında ağırlığına bağlı olarak daha az bir yüke maruz kalacağını, Mardin Ulu Cami'nin ise daha büyük bir yüke maruz kalacağını göstermektedir. Ayrıca farklı modelleme tekniklerinde de benzer değerde ağırlıkların ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum modelleme tekniklerinin ağırlıklarına bağlı olarak benzer yüklere maruz kalacağını ve benzer sonuçlar vereceğini göstermektedir.



Şekil 7.12. Camilerin Global FZ yönündeki taban kesme kuvveti değerleri

Tarihi yapıların sonlu elemanlar analizinde maksimum ve minimum gerilme değerleri, yapı elemanlarının mekanik yük altında maruz kaldığı gerilme durumlarını ifade etmektedir. Bu değerler, yapı elemanlarının dayanıklılığı ve mukavemeti hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Sonlu elemanlar modelleri üzerinde ortaya çıkan gerilme değerlerinin risk taşıdığı bölgeler tespit edilebilmektedir.

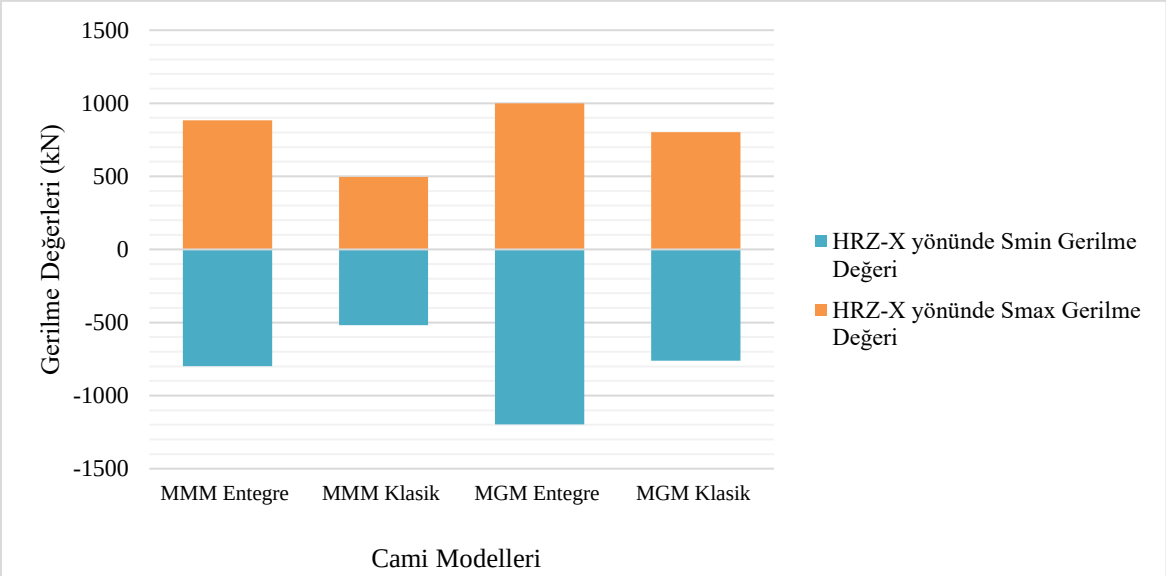
Yığma yapılar için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve literatürde yer alan değerler dikkate alınarak Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami yapım malzemesi olan Mardin kireç taşının özellikleri belirlenmiştir. Semerci (2008), Mardin'de inşasına Artuklu

döneminde başlanan fakat dönemde yaşanan savaş ve saldırılardan dolayı 15.yüzyılın sonlarında Akkoyunlular tarafından tamamlanan Kasımiye Medresesi'nden örnek numuneler ile malzeme deneyleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada aynı yapılar üzerinden iki farklı kireç taşı numunesinin alınmasının ardından gerçekleştirilen deneylerde, aşırı olmayan farklılıklar gözlenmiştir. Adin (2007), Mardin ve Midyat'ta yığma yapı malzemesi olarak kullanılan taşların fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Her iki taş için de farklı taş ocaklarından numuneler anılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Malzeme üzerine yapılan deneyler sonucu basınç ve gerilme değerleri ile sonlu elemanlar analizinde ortaya çıkan değerler birlikte yorumlanmıştır. Çalışmada ele alınan iki cami ile çok yakın dönemlerde inşa edilmesi nedeniyle Kasımiye Medresesi numuneleri ele alınmıştır (Çizelge 7.6). Karşılaştırma sırasında kullanılan değerler, belirtildiği üzere taşın özellikleridir. Daha kesin karşılaştırma değerleri için bağlayıcı eleman olarak kullanılan harç ile birlikte gerçekleştirilen analiz değerlerinin kullanılması sürecin daha etkin olmasını sağlayacaktır. Taşın ana yapı malzemesi olarak kullanıldığı yığma yapı elemanlarında dayanım, taşın dayanımının harçtan daha az dayanıma sahip olduğu durumlarda, harcın dayanımına bağlı olmaktadır (Ünay, 2002).

Çizelge 7.6. Mardin kireç taşına dair yapılan çalışmalarda ortaya çıkan değerler

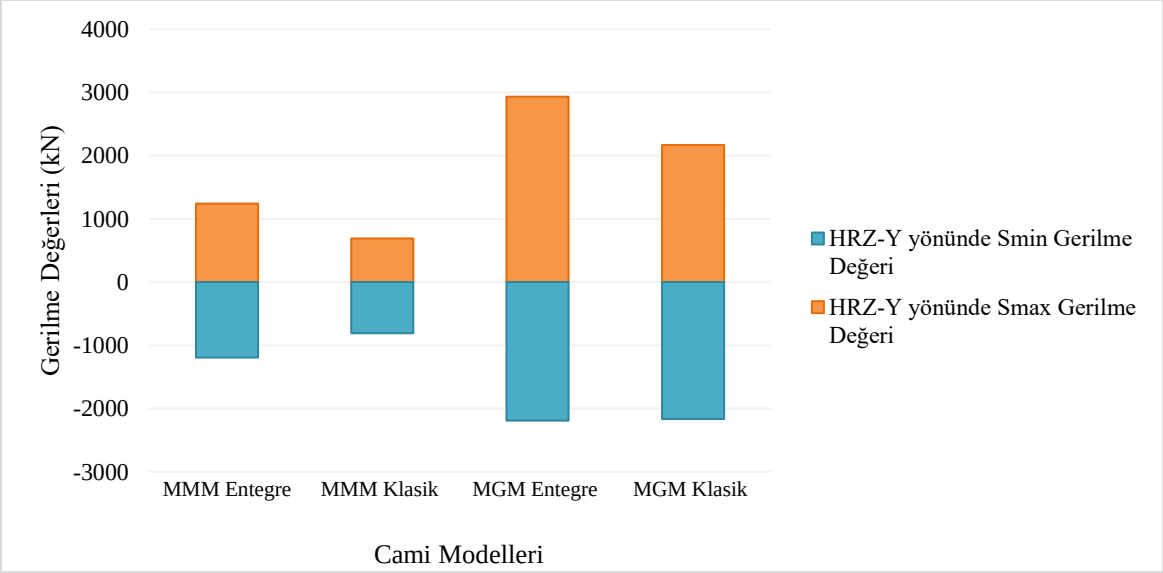
Numune	Çekme Dayanımı (N/mm2)	Basınç Dayanımı 1 (N/mm2)	Basınç Dayanımı 2 (N/mm2)
Kasımiye Medresesi (Semerci, 2008)	4,06	16,7	25,6
Mardin Taşı (Adin, 2007)	0,77	4,939	-

HRZ-X yönünde 0,4 g şiddetindeki etkin yer ivmesine sahip bir hareket sonucu ortaya çıkan Smax gerilme değerlerinde Melik Mahmut Cami için entegre modelde 882,98 kN/m2'lik değer tespit edilirken Mardin Ulu Cami için entegre modelde 1000,37 kN/m2'lik değer tespit edilmiştir. Ağ sayısının fazla olduğu entegre modellerin daha yüksek gerilim değerine sahip olduğu görülmüştür. HRZ-X yönünde Smin gerilme değerleri ele alındığında, Melik Mahmut Cami için -798,87 kN/m2'lik değer tespit edilirken Mardin Ulu Cami için -1198,05 kN/m2'lik değer tespit edilmiştir. Her iki en yüksek Smin değerine, entegre modellerden ulaşılmıştır (Şekil 7.13).



Şekil 7.13. Camilerin HRZ-X yönündeki Smax ve Smin gerilme değerleri

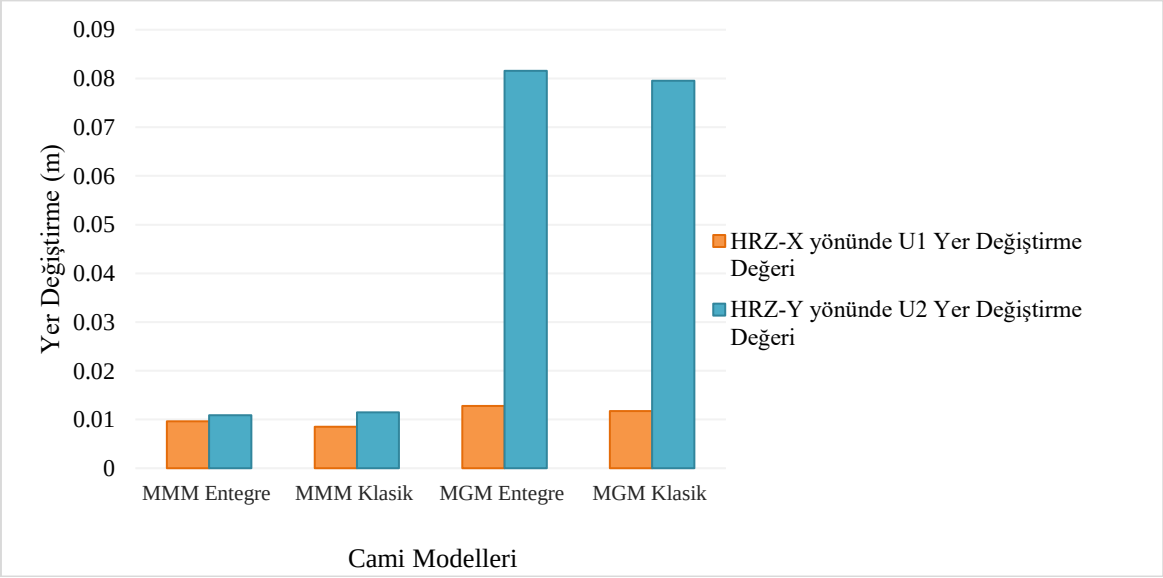
HRZ-Y yönünde 0,4 g şiddetindeki etkin yer ivmesine sahip bir hareket sonucu ortaya çıkan Smax gerilme değerlerinde Melik Mahmut Cami için entegre modelde 1241,28 kN/m2'lik değer tespit edilirken Mardin Ulu Cami için entegre modelde 2934,94 kN/m2'lik değer tespit edilmiştir. HRZ-Y yönünde Smin gerilme değerleri ele alındığında, Melik Mahmut Cami için -1195,22 kN/m2'lik değer tespit edilirken Mardin Ulu Cami için -2190,97 kN/m2'lik değer tespit edilmiştir. Ağ sayısının fazla olduğu entegre modellerin daha yüksek gerilim değerine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 7.14).



Şekil 7.14. Camilerin HRZ-Y yönündeki Smax ve Smin gerilme değerleri

Ortaya çıkan Smax ve Smin değerlerin, oluşturulan bütün modeller için Mardin kireç taşı dayanım değerlerinden düşük olduğu ve yapılar için gerçekleştirilen analiz sonucu ortaya çıkan gerilme değerlerinin bir risk oluşturmadığı görülmektedir. Malzeme için referans alınan çalışmalarda ortaya çıkan yaklaşık 4060 kN/m2 çekme dayanımı ve 16700 kN/m2 basınç dayanımı değerleri, analizler sonucu ortaya çıkan değerler için oldukça yüksek olduğu ve Mardin bölgesinde kullanılan kireç taşının yüksek dayanım özelliklerine sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Analizler sonucu 0,4 g şiddetindeki etkin yer ivmesine sahip bir hareket sonucu ortaya çıkan maksimum ve minimum yer değiştirme değerleri, modelleme teknikleri arasındaki en yüksek değerler üzerinden incelenmiştir. HRZ-X yönünde Melik Mahmut Cami'nin batı duvarı orta tepe noktasında yaklaşık 0,0097 m ve Mardin Ulu Cami'nin kubbe tepe noktasında 0,0119 m değerinde yer değiştirmeye maruz kalacağı görülmüştür. HRZ-Y yönünde yer değiştirme değerleri ele alındığında, Melik Mahmut Cami'nin güney duvarı sekizgen kasnak pencere tepe noktası 0,0111 m ve Mardin Ulu Cami'nin ise güney duvarı orta tepe noktasında 0,0795 m'lik değer ortaya çıkmıştır (Şekil 7.15).



Şekil 7.15. Modellerde ortaya çıkan maksimum yer değiştirme değerleri

Ayrıca tez içerisinde daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi modellerdeki ağ sayıları, yer değiştirme sonuçlarına etki etmemiş ve entegre ile klasik modell değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Yapıdaki en büyük yer değiştirmelerin HRZ-X ve HRZ-Y yükü analizlerinde ortaya çıkmasından yola çıkılarak, uluslararası yönetmeliklerde yer alan performans seviyelerine göre değerlendirme yapabilmek adına yapının seçilen noktalarında göreli ötelenme oranları ortaya konmuştur (Çizelge 7.7). Yapıda, referans alınan noktanın yer değiştirme değerinin zeminden yüksekliğine bölünmesiyle göreli ötelenme oranları hesaplanmıştır. Yapıda ortaya çıkan maksimum yer değiştirme değerleri ele alınarak en büyük ötelenme değerinin Melik Mahmut Cami için %0,13 olabileceği belirlenmiştir. Bu durumda ilgili sınırlar dikkate alındığında Melik Mahmut Cami'nin hemen kullanım performans düzeyinde olduğu ve belirlenen yükler karşısında kolayca tamir edilebilecek hasarların oluşabileceği anlaşılmaktadır. Mardin Ulu Cami'nin ise özellikle HRZ-Y yönünde gerçekleşebilecek yüklere karşı performans değerinin kubbe tepe noktasında %0,34 ve güney duvarı orta tepe noktasında ise %0,75 olabileceği görülmektedir. Bu durum, uluslararası yönetmeliklerde bulunan standartların üzerinde yer almaktadır ve yapıda ağır hasarların oluşabileceğini göstermektedir. Gerçekleşebilecek sismik aktivitelere ve zemin hareketlerine bağlı olarak daha detaylı çalışmalar ile gerekli müdahalelerin yapılması tavsiye edilmektedir.

Çizelge 7.7. Maksimum yer değiştirme noktalarının göreli ötelenme oranları

Cami	Konum	Yükseklik m	Entegre Model		Klasik Model	
			HRZ-X %	HRZ-Y %	HRZ-X %	HRZ-Y %
Melik Mahmut Cami	Batı duvarı orta tepe noktası	7,5	0,12	0,04	0,12	0,04
	Güney duvarı kasnak pencere tepe noktası	8,5	0,03	0,11	0,03	0,13
Mardin Ulu Cami	Kubbe tepe noktası	18,0	0,06	0,34	0,06	0,34
	Güney duvarı orta tepe noktası	10,5	0,06	0,75	0,05	0,75

8. TARTIŞMA

Artuklu dönemi eserleri üzerinden sayısal modelleme tekniklerinin kullanımını fotogrametri yöntemi ile karşılaştırılmasını ve entegrasyonunu konu alan bu tezde, giriş bölümünde ele alınan araştırma problemleri cevaplanmıştır.

İlk araştırma problemi olan *"Yıllardır Doğu Anadolu Fay Sistemi etkisinde olan Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami nasıl bir strüktürel davranış sergilemektedirler?"* sorusuna yönelik, Doğu Anadolu Fay Sistemi etkisindeki Mardin Ulu Cami ve Melik Mahmut Cami'nin strüktürel davranışları belirlenmiştir. Her iki caminin de yığma yapı sistemlerinin genel özelliklerine uygun bir şekilde, açıklıkların üstlerinde ve kubbe tepe noktalarında çekme gerilme değerlerinin arttığı, yapıların oldukça rijit bir davranış sergilediği ve paralelinde kubbe tepe noktalarında da yer değiştirme miktarlarının arttığı görülmüştür. Özellikle geniş kubbe açıklığına sahip Mardin Ulu Cami'nin X yönündeki yüke karşı yaklaşık olarak yaklaşık 12 mm'lik bir deformasyon yapacağı görülmüştür. Uluslararası yönetmeliklerde yer alan sınır koşullar dikkate alındığında, gerçekleştirilen analizler sonucu Melik Mahmut Cami'nin hemen kullanım performans düzeyinde olduğu ve tamir edilebilecek hasarların oluşabileceği, Mardin Ulu Cami'de ise ağır hasarların gerçekleşebileceği tespit edilmiştir.

İkinci araştırma problemi olan *"Klasik modelleme tekniği ve fotogrametrik modelleme tekniği ile gerçekleştirilen tarihi yapıların strüktürel analizinde, modelleme yöntemlerinin oluşturacağı avantaj/dezavantaj durumları ve sağlayacağı zorluklar/kolaylıklar nelerdir?"* sorusuna yönelik, strüktürel analiz sürecinde klasik modelleme tekniği ile fotogrametrik modelleme tekniği arasındaki avantaj ve dezavantajlar ortaya konmuştur. Her iki modelleme tekniğinin de farklı alan çalışmalarına göre kolaylıklar sağlayabileceği görülmüştür. Çalışmada, fotogrametrik modelleme tekniğinin dijital bir arşiv oluşturmasının, kültürel mirasın koruma-belgeleme çalışmalarına önemli bir altlık sunmasının, karmaşık geometrilere sahip yapıların boyutlarının elde edilmesini hızlandırmasının ve gelecek nesillere aktarım sürecinde etkileşimli ortamlar sağlamasının klasik modelleme tekniğine kıyasla oldukça önemli ayrıcalıkları olabileceği tespit edilmiştir. Klasik modelleme teknğinde ise modelde kontrol edilebilir ağ sayısının olması ve beraberinde bilgisayar dosya boyutunun daha küçük olması önemli ayrıcalıklarıdır. Ayrıca klasik modelleme tekniği ile

farklı modelleme tekniklerinin entegrasyonuna ihtiyaç olmadan idealleştirmeler gerçekleştirilerek yapıların sonlu eleman modelinin oluşturulabilmesi, fotogrametrik modelleme tekniğine kıyasla önemli kolaylık sağlamaktadır.

Üçüncü araştırma problemi olan *"Modelleme sürecini daha anlaşılabilir düzeye indirgeyeceği düşünülen fotogrametrik modelleme tekniği, tarihi yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde hangi süreçlerden geçerek kullanılacaktır/kullanılmalıdır?"* sorusuna yönelik, fotogrametrik modelleme tekniğinin, strüktürel davranışların belirlenme sürecinde hangi aşamalardan geçmesi gerektiği konusu detaylandırılmıştır. Fotogrametrik model oluşturmak için öncelikle yüksek çözünürlüklü fotoğrafların elde edilmesi gerekmektedir. Beraberinde fotoğraf düzenlemelerinin (parlak yüzeyler, kontrast, gereksiz nesneler vb. temizlenmesi) yapılması ile programlar arasında gerçekleştirilen süreç başlamaktadır. Daha önce değinildiği üzere, tez kapsamında fotogrametrik model oluşturma amacıyla Metashape programı (alternatifler PhotoScan, Agisoft – Recap, Autodesk – RealityScan, Capturing Reality – Meshroom, Alice Vision vb.) kullanılmıştır. Fotogrametrik modelin oluşmasının ardından, modelde oluşan ağların kusurlarının giderilmesi ve gereksiz verilerin temizlenebilmesi vb. için ağ düzenleme programlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında Geomagic Wrap programı (alternatifler Rhino, Rhinoceros – MeshLab, Visual Computing Lab. – CloudCompare, Daniel Girardeau-Montaut - Creo Options Modeler, PTC Digital Transformas vb.) ağ düzenleme işlemlerinde kullanılmıştır. Ağların düzenlenmesi ile modelde katman ayarlarının yapılması ve son kontrollerinin gerçekleştirilmesi için modelin vektörel olarak görülebileceği çizim programı gerekmektedir. Tez kapsamında AutoCAD programı (alternatifler FreeCAD, LibreCAD, SketchUp, Revit vb.) kullanılmıştır. Modelin hazır hale gelmesi ile birlikte son olarak yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi için ise SAP2000 programı (alternatifler ANSYS, Numesys Engineering – ETABS, IDEA Statica Syncs, Midas FEA, MIDAS Engineering vb.) kullanılmıştır.

Dördüncü araştırma problemi olan *"Fotogrametrik modelleme tekniğinin kullanılamayacağı durumlar nelerdir? Bu durumların ortaya çıkması sonucu, klasik teknik ile entegre edilerek sürecin yönetilmesi mümkün müdür?"* sorusunda yer alan fotogrametrik modelleme tekniğinin yetersiz kaldığı durumlara, tezin değerlendirme bölümünde kapsamlı bir şekilde yer verilmiştir. Fotogrametrik modelleme görüntüler üzerinden elde edilen bir üç boyutlu veri kaynağıdır. Dolayısıyla modeli oluşturulacak nesneden/yapıdan görüntü alınamadığı

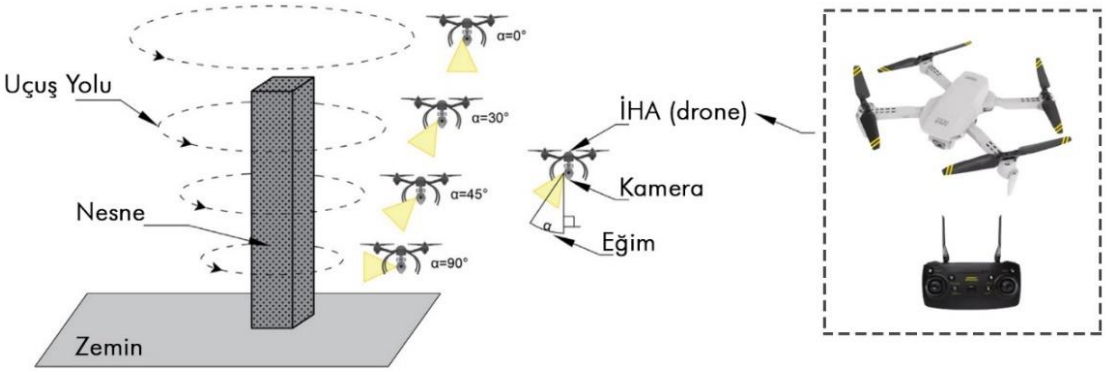
durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu süreçte alternatif araçlar sürece dahil edilebileceği gibi farklı bilgisayar programları ile modelin oluşmadığı kısımlar tamamlanabilmektedir.

Beşinci araştırma problemi olan *"Fotogrametrik modelleme tekniği ile elde edilen veriler, strüktürel modelleme sürecinde kullanılmasa dahi klasik modelleme tekniğine nasıl avantajlar sağlayabilecektir?"* sorusunda yönelik fotogrametrik modellerin, strüktürel modellemede kullanılmasa dahi klasik modelleme tekniğine avantaj sağlayabileceği durumlara değinmek amaçlanmıştır. Fotogrametrik model, yapıların fotoğraflar üzerinden detaylı ve ölçülebilir üç boyutlu modellerini oluşturmaktadır. Özellikle tarihi yapılar gibi kompleks bir geometrik biçime sahip yapıların strüktürel modelleme sürecindeki en önemli noktalarından biri de yapının ölçülerinin ve dış boyutlarının elde edilmesidir. Fotogrametrik modeli oluşturulan yapının, elde edilen 3D modeli üzerinden rahatlıkla istenilen noktalar arası ölçüler elde edilebilmektedir. Ayrıca çizim programına aktarılıp düzenlenerek iki boyutlu rölöveler de oluşturulabilmektedir. Dolayısıyla sağladığı avantajların yanında, klasik modelleme tekniğine yapının geometrisi hakkında verileri kolaylıkla sunmaktadır. Boyutlandırmalar ile birlikte restorasyon ve koruma çalışmalarında altlık olarak kullanılabilmektedir. Tarihi yapılar gibi hassas ve korunması gereken yapıların, modeller üzerinde hasar durumlarının ve süreç takiplerinin de gerçekleştirilmesine imkan tanıyabilmektedir. Farklı dönemlerde oluşturulan fotogrametrik modeller, yapının dönemsel karşılaştırmaları için kullanılabilmekte ve yapının 3D durumu kontrol edilebilmektedir.

Tezdeki son araştırma problemi olan *"Farklı ölçekteki tarihi yapıların strüktürel davranışlarında, fotogrametrik modellerden alınacak verilerin strüktürel davranış farklılık değerleri hangi ölçüde değişiklik gösterecektir?"* sorusunda ise fotogrametrik modellerden alınacak verilerin davranış farklılığı oranları Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami örneklerinden ele alınmıştır. Melik Mahmut Cami tek açıklığa sahip bir yapıdır ve iç mekanlarına taşıyıcı ayakların modellenmesine ihtiyaç duyulmamıştır. Mardin Ulu Cami ise üç sahından oluşan ve sahınların büyük ölçekli taşıyıcı ayaklar ile ayrıldığı bir yapıdır. Mardin Ulu Cami gibi yapılarda, gerçekçi bir sayısal modelin oluşturulabilmesi adına iç mekana mutlaka taşıyıcı elemanların da dahil edilmesi gerekmektedir. Farklı ölçekteki yapıların fotogrametrik-entegre modeller ile sayısal modellerinin oluşturulması, modelleme süresi dışında analizlerde herhangi bir farklılık oluşturmamıştır.

Literatürde yer alan boşluklara göre oluşturulan araştırma problemlerinin cevaplanmasının ardından, aşağıda gelecekte yapılacak çalışmaların nasıl ilerleyebileceğine dair tartışmalara yer verilmiştir:

- Tez çalışmasında kullanılan fotogrametrik modelleme tekniğinde, fotoğraflar akıllı telefonlar kullanılarak elde edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda ise insan ölçeğinde görüntülerin alınabildiği, ulaşılamayan noktalarda tripodların kullanıdlığı telefon kameraları yerine gelişmiş kamera sistemleri kullanılabilir. Özellikle son yıllarda kullanımı sıklaşan dronelar, uzaktan kumandalı olarak yönetilebilen, komuta edilebilen, video ve görüntü kaydı alabilen insansız hava araçlarıdır (Şekil 8.1). Bu özellikler, tarihi yapılar gibi oldukça büyük yapılar için çok önemli ve yüksek çözünürlüklü görüntülerin sağlanmasına katkı sunabilir. Drone ile elde edilen görüntülerde, daha bütün ve daha doğru fotogrametrik modeller oluşmaktadır. Her ne kadar dronelar bu süreci kolaylaştırabilecek olsa da, özellikle güvenlik sorununun olduğu bölgelerde kullanılamayacağını belirtmek gerekir. Ancak kimi zaman oldukça uzun sürebilen resmi prosedürlerin ve izin süreçlerinin ardından drone kullanılabilmektedir.



Şekil 8.1. İnsansız hava araçlarından olan drone ile görüntü elde etme süreci (Micelli ve Cascardi, 2020'den geliştirilmiştir.)

- Fotogrametrik model için görsel üretimi birçok farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. GoPro aksiyon kameraları, yüksek çözünürlüklü kameralar, 360 derece panoramik görüntü elde edebilen kameralar modelleme programına tanımlanabilmektedir (Resim 8.1). Burada modeli oluşturulacak yapının geometrik özelliklerinden çalışmayı gerçekleştiren kişinin maliyet durumuna kadar süreçte tercihe etki eden birçok durum söz konusudur. Ayrıca her GoPro aksiyon kamerası modeli (Hero 11, Hero 10, Hero 9…) arasında, her fotoğraf makinesi modeli arasında kısacası aynı ortamlarda üretilmeyen her

kamera arasında dahi farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar fotogrametrik model üretimi sürecinde görüntülerin kalitesi, detay düzeyi ve doğruluk seviyesi gibi faktörleri etkileyebilir. Bazı telefon kameraları, fotoğraf makinelerinden daha kaliteli görüntüler sağlayabilmekte ya da bazı fotoğraf makineleri GoPro aksiyon kameralarından daha yüksek çözünürlüğe sahip görüntüler elde edebilmektedir. Her bir kamera türünün avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır ve hangi kameranın kullanılacağı, ölçüm veya modelleme gereksinimlerine göre kararlaştırılmalıdır.

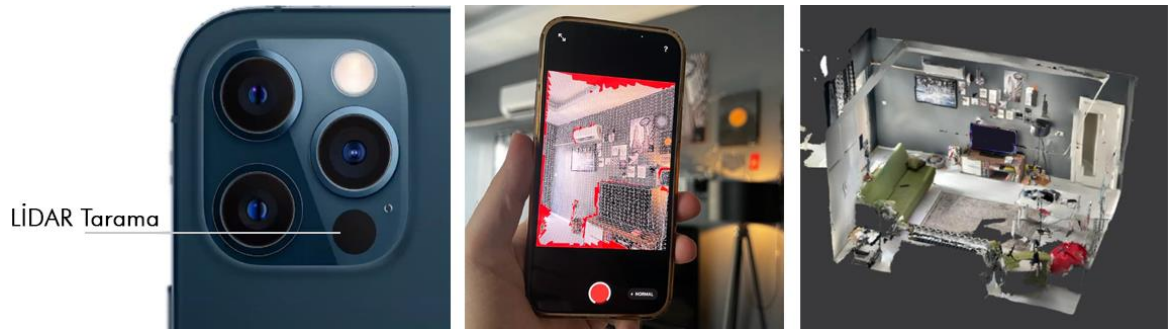


Resim 8.1. Fotoğraf çekiminde kullanılabilecek farklı cihazlar

- GoPro, aksiyon kamerası olarak tanınan dış mekan şartlarına ve aksiyon sporlarına uygun tasarlanan bir kamera markasıdır. Genellikle spor faaliyetleri, aksiyon sporları veya hareketli sahneler için kullanılmaktadır. GoPro kameralar geniş bir görüş açısına sahip olacak şekilde ayarlanabilir ve genellikle geniş açılı lensler içermektedir. Bu, geniş bir yüzeyin veya alanın geniş açıda fotoğraflanabileceği anlamını taşımaktadır. Ancak daha düşük çözünürlüklü ve daha sınırlı ayarlama seçenekleri nedeni ile diğer afrklı profesyonel fotoğraf makinelerine kıyasla kontrolü daha limitli ve daha düşük kalite sunabilmektedir. Fotoğraf makinesi, DSLR (Dijital Tek Lensli Yansıma) veya aynasız kameralar gibi daha yüksek kaliteli görüntü, daha yüksek çözünürlük ve daha fazla ayar seçeneği sunabilmektedir. Bu sayede daha fazla ayrıntı yakalanmakta ve daha yüksek kaliteli görüntüler elde edilmektedir. Panoramik görüş kameraları, geniş bir görüş açısına sahiptir ve çoğunlukla 360 derecelik panoramik görüntüler üretmek için kullanılır. Bu kameralar birden fazla lens veya dönebilen bir sensör kullanarak çevredeki alanı tamamen kaplayan görüntüler üretebilmektedir. Tez kapsamında, model oluşturma ihtiyacını karşılayacak olan Iphone Xs Max ve Iphone 13 Pro Max akıllı telefonları kullanılmıştır. Bu alanda yapılacak çalışmalarda daha detaylı, daha çok noktayı barındıran ve daha fazla ağdan oluşan fotogrametrik model üretimleri hedefleniyor ise

daha yüksek çözünürlüklü çekimler gerçekleştiren bir kamera aracının kullanılması tavsiye edilmektedir.

- Üç boyutlu model üretiminde bir diğer ve yenilikçi alternatif LIDAR (Light Detection and Ranging) taramadır. LIDAR, yüksek yoğunluklu lazer ışınları kullanarak mesafe ve diğer ölçümleri yapmaya yarayan bir teknolojidir. Fotogrametrik modelleme tekniğine göre daha hızlı bir sürede model oluşturabilmektedir fakat modelin detay üretimi yetersiz olabilmektedir. Gelecek çalışmalarda yeni nesil LIDAR sensörleri bulunan cep telefonları üzerinden üç boyutlu modeller üretilebileceği düşünülmektedir. Günümüzde Iphone telefon markasının LIDAR sensörüne sahip telefon modelleri bulunmaktadır (Şekil 8.2).



Şekil 8.2. Iphone LİDAR sensörü ve modelleme (İzzettin Kutlu, 2023)

- Oluşturulan fotogrametrik modeller, gelecek nesillere aktarılmak üzere arşivlenmektedir. Gelecek çalışmalarda, sadece arşivlenmek ile kalmayıp etkileşimli ortamlarda ve artırılmış gerçeklikler (Augemented Reality – AR) ile nesiller arası aktarılabilir. Bu sayede yıllar sonra bile modelin oluşturulduğu yıla dair veriler, sanal gerçeklik gözlükleri ile yapıyı birebir ölçekte tecrübe etme deneyimleri sunulabilir. Günümüzde bu deneyimi sağlayan çalışmaların sayısı zamanla artmaktadır. Portalés, Lerma ve Pérez (2009), fotogrametrik modeller üzerinden İspanya'daki Valencia Katedrali'nde mevcut sunağın eski özelliklerini işlemiş ve sanal gerçeklik gözlükleri ile kullanıcılara tecrübe ettirmiştir. Keil vd. (2011), artırılmış gerçeklik uygulamaları kullanarak Darmstadt'ta Jugendstil (Art Nouveau) mahallesinin tarihini video-görüntü ile görselleştiren bir akıllı telefon uygulaması sunmuştur. Kysela ve Štorková (2015), artırılmış gerçeklik (AR) teknolojisini eğitimde kullanmaya yönelik yıkılan tarihi yapıların boyutlarının yerinde gözlemlenebileceği bir akıllı telefon uygulaması geliştirmiştir. Carrión-Ruiz, Blanco-Pons, Weigert, Fai ve Lerma (2019), Kraliçe

Victoria heykelinin fotogrametrik modeller ile bir AR uygulamasında yeniden canlandırılmış ve Kanada, Ottawa'daki Parlamento Kütüphanesi'nin içinde simüle edilmiştir. Syahputra, Umaya ve Radhmat (2020), tarihi binaların yavaş yavaş yıkılması ve yerlerine yeni binaların inşa edilmesi durumuna karşı, Endonezya'nın Medan kenti için görüntü tabanlı modelleme kullanılarak 3D binalar oluşturmuş ve artırılmış gerçeklik turu düzenlemiştir. MAÜ Mimari Proje Üretimi Uygulama ve Araştırma Merkezi, (2021) tamamladığı atölye çalışmalarında fotogrametrik modeller üzerinden artırılmış gerçeklik ile etkileşimli sahneler kurmuş ve sanal gerçeklik gözlükleri ile kullanıcılarına gerçeğe yakın dijital deneyimler sunmuştur (Şekil 8.3).



Şekil 8.3. Fotogrametrik modellerin birçok etkileşimli ortamda kullanılabileceğine dair görünümler (MAÜ Mimari Proje Üretimi Uygulama ve Araştırma Merkezi, 2021)

- Fotogrametrik teknikler ile elde edilen 3D model, tez kapsamında kullanılan SAP2000 programında kabuk eleman olarak tanımlanmaktadır. İç ve dış mekanın beraber modellenerek SAP2000'e aktarıldığı modelde, otomatik birkatı eleman ataması gerçekleştirilemez ve yüzeyler arasında boşluklar kalacaktır. Örneğin, taşıyıcı ayaklar içi dolu bir katı eleman gibi değil dört yüzeyi olan bir kabuk eleman gibi davranacaktır. Dolayısıyla yapısal davranışı doğru temsil etmeyecektir. SAP2000 programı dışında farklı yazılımlar, oluşturulan ağlar arasına otomatik katı eleman tanımlamaları gerçekleştirebilmektedir. Yapısal analiz programlarının seçimi, projenin gereksinimlerine ve fotogrametrik modelin planlanma sürecine göre değişiklik gösterebilir. Bu tür yazılımlar, otomatik katı elemanlar oluşturabilme, boşlukları tanıyabilme gibi özelliklere sahip olabilir. Bu nedenle, projenin hedeflerini ve verilerin işlenmesini etkileyen gereksinimleri dikkate alarak yazılım seçimi yapılmalıdır. Sürece göre gerçekleştirilen seçim, elde edilen fotogrametrik verilerin en iyi şekilde kullanılmasını ve yapısal analizlerin güvenilir sonuçlar üretmesini sağlayacaktır.

Fotogrametrik model oluşturma sürecinde, yukarıda değinilen gelişmiş teknolojik sistemler dikkate alındığında, esasen, ihtiyaç duyulan düzeyde teknolojik aracın seçilmesi önem arz etmektedir. Çok yüksek çözünürlüklü fotoğraflama teknolojilerinde, yüksek sayıda ağ sayısına sahip fotogrametrik modeller ortaya çıkabilmektedir. Detaylı bir model yapısının istendiği farklı alan çalışmalarında bu teknolojilerin kullanımı etkin sonuçlar verebilir. Fakat strüktürel analiz alanındaki çalışmalarda taşıyıcı olmayan yüzeylerin detaylı modellenmesi, strüktürel model ve analiz süreçlerini uzatabilmektedir. Dolayısıyla yüksek ağ sayısına sahip modeller yerine, bu ağların kontrolünün sağlanabileceği ve dosya boyutunun bilgisayar işletim sistemini yavaşlatmayacağı bir teknolojik fotoğraflama aracı ile modellerin üretilmesi daha verimli olacaktır. Bu noktada tarihi yapıların strüktürel analiz sürecinde yapılacak benzeri çalışmalarda, fotogrametrik model için doğru teknolojinin seçilmesi, en yüksek çözünürlüğü elde eden teknolojinin seçilmesinden daha önemlidir. Bu sayede ağ sayılarının, gerçek durumu doğru simüle edebilmesi kaydıyla, daha kontrol edilebilir seviyeye indirgendiği ve ağ düzenleme süreçlerinin daha da pratikleştiği mümkün olan bir teknoloji geliştirilebilir.

Bu tez çalışmasında, fotogrametrik modelleme tekniğinin strüktürel analiz süreci için kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve tartışmaya açılmıştır. Tarihi yapılar gibi hem iç mekanında hem dış yüzeyinde benzersiz özellikleri barındıran yapıların, görsel araştırmaların yanında deneye dayalı yöntemler ile da strüktürel analizinin gerçekleştirilmesi, sürecin daha sağlıklı yönetilmesini ve daha kesin sonuçlar vermesini sağlayacaktır. Fotogrametri, kullanıcıya görseller üzerinden bir model sunmaktadır; fakat, strüktürel analiz gibi hassas süreçler, deneysel çalışmayı ve hassas modellemeyi de beraberinde gerektirmektedir. Strüktürel analizler için sadece model oluşturmak yeterli değil, doğru bir davranışın temsil edilebilmesi için doğru malzeme ve yük koşullarının da tanımlanması gerekmektedir. Bu durumlar ele alındığında bu çalışma, strüktürel analiz sürecinde fotogrametrinin kullanımını değerlendirmekte ve her tarihi yapı için özellikle strüktürel model oluşturma süreçlerinin farklılık gerektirdiğini de belirtmektedir. Fotogrametrinin sürece entegre edilerek hem yapıların gerekli ölçülerinin elde edilmesinde hem de bu denli özgün yapıların dijital olarak belgelenmesinde büyük katkı sağlayacaktır.

Fotogrametrik model oluşumunun ardından, strüktürel analiz sürecinde klasik modelleme tekniği tercih edilebilir ve klasik model için gerekli olan süreçlerde, etkileşimli bir 3D fotogrametrik model üzerinden boyutlandırmalar ve idealleştirmeler için veriler kolaylıkla

elde edilebilir. Bu tez çalışması, bir tarihi yapının strüktürel analizinin gerçekleştirilmesi durumunda, hangi süreçlerde fotogrametrinin kullanılabileceğini hangi süreçlerde ise yetersiz kalacağını ortaya koymaktadır. Bu alanda yapılacak çalışmalarda, farklı modelleme teknikleri arasında herhangi birinin daha iyi süreç yönettiğini belirtmenin aksine, hangi süreçlerde hangi modelleme tekniğinin daha etkin kullanılabileceğini ortaya koymak daha önemli sonuçlar sağlayacaktır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tarihi yapıların strüktürel analiz sürecinde model oluşturma süreçlerini ele alan bu tez, son yıllarda farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan fotogrametrik modelleme tekniğini değerlendirmiştir. Fotogrametrinin, tarihi yapıların strüktürel analiz sürecine getirebileceği yeni bakış açıları ortaya konmuştur. Bu tez kapsamında, fotogrametri öncelikle tek yüzeyi olan basit yığma yapılar üzerinden uygulanabilirliği tespit edilmiş ve daha sonra kapalı hacime sahip büyük ölçekli yapıların modellenme sürecine entegre edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı ve sayısal modellerin SAP2000 ile oluşturulduğu tez kapsamında gerçekleştirilen analizler ile birlikte, fotogrametrik modeller ile klasik modellerin ortaya koyduğu yakınlık oranları üzerinde durulmuştur. Tez kapsamında hem fotogrametrik hem de klasik olmak üzere çok sayıda üretilen modeller sırasında karşılaşılan modelleme sürecindeki zorluklar genel olarak geometrik karmaşıklık, malzeme özellikleri, eksik veri, değişkenlik ve hasar, çevresel ve iklimsel etkiler ve modelleme hassasiyetidir. Bu zorlukların neden olabileceği durumlar aşağıda sıralanmıştır. Tarihi yapıların strüktürel modelinde ortaya çıkan zorluklar yapıların davranışını değerlendirme sürecinin uzamasına, analitik modelin doğru davranış sergileyememesine, maliyetli bir sürece neden olabilmektedir.

- Tarihi yapılar genellikle *karmaşık geometriye* sahip olabilmektedir. Bu yapılar, farklı açıklıklar, girinti ve çıkıntılar, düzensiz şekiller ve özel detaylar içerebilmektedir. Bu nedenle, yapıyı sonlu elemanlarla modellemek ve doğru bir şekilde temsil etmek zorlaşmaktadır.
- Tarihi yapılar, farklı dönemlerde kullanılan çeşitli malzemelerden inşa edilmiştir ve bu *malzemelerin özelliklerini* tespit etmek yoğun deneysel araştırmaları gerektirmektedir. Bu malzemelerin heterojen ve anizotropik özellikleri, model üzerine atanması gereken mekanik özelliklerin tanımlama sürecinin doğruluğuna etki etmektedir.
- Tarihi yapıların dönemler içerisinde barındırdığı özellikler zamana bağlı veya insan müdahaleleri vb. nedeniyle yok olabilmektedir. Restorasyon ve koruma çalışmaları sırasında bazı bilgiler silinebilmekte ve zamanla *eksik veriler* ile karşılaşılabilmektedir. Eksik veya ulaşılamayan veriler, analiz süreçlerinde idealleştirme süreçlerine bağlı olarak, gerçek davranışların elde edilememesi sorununa sebebiyet verebilmektedir.
- Tarihi yapılar yıllar boyunca çeşitli restorasyon, güçlendirme veya yanlış müdahaleler gibi etkilere maruz kalabilmektedir. Bu durum yapının özgün özelliklerinin *değişmesine*

ve hasarlara neden olabilmektedir. Doğru bir yapısal analiz için yapısal geçmişin ve mevcut durum araştırmalarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

- Tarihi yapılar dış *çevre koşullarına ve iklimsel etkilere* maruz kalabilir. Bu faktörler, yapıların davranışını etkileyebilir ve modellemeyi daha karmaşık hale getirebilir.
- Tarihi yapıların genel özellikleri göz önüne alındığında, sonlu elemanlar modelinin oluşturulması sırasında *modelin hassasiyeti* açısından doğru ölçeklendirme, detaylandırma ve hesaplama bilgilerinin kullanılması oldukça önemlidir. Modelleme sürecindeki hatalar, analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilmekte ve yapısal analiz sürecinde hatalara neden olabilmektedir.

Tez kapsamında strüktürel analiz süreçleri, öncelikle kullanılan sonlu elemanlar yöntemine ilişkin gerçekleştirilen analizler ile başlamaktadır. Sonlu elemanlar modelinde eleman kullanımını, eleman boyutları ve ağırlık merkezi durumları değerlendirilmiştir. Eleman kullanımında çubuk, kabuk veya katı elemanların aynı model için kullanılabileceği görülmüştür. Strüktürel modellerin eleman boyutlarında ise üçgen veya dörtgen geometrik formun kullanılabileceği ve bu iki formun sonuçlarının oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Her iki geometrik şeklin birlikte kullanımının da mümkün olduğu analiz sonuçlarında ortaya konulmuştur. Ayrıca tez kapsamında fotogrametrik modelleme tekniğinin dezavantaja neden olabileceği yapının strüktürel modelinde oluşabilecek ağırlık merkezi kayma durumu değerlendirilmiştir. Nesnelerin dışından çekilen fotoğraflar ile oluşturulan tarihi yapıların fotogrametrik modellerinde, yapısal analiz sürecinde duvar kalınlıklarının tanımlanması ile yapının gerçek açıklıktan daha geniş bir açıklığı temsil edebileceği görülmüştür. Bu durumun neden olabileceği analiz sonuçlarındaki sapmalar üç farklı model üzerinden değerlendirildiğinde, analizlerde büyük bir farklılık oluşturmadığı sonucuna varılsa da bu durumun göz ardı edilmemesi önerilmektedir. Özellikle tez kapsamında incelenen büyük ölçekteki yapılarda bu durum analiz sonuçlarında fark oluşturmazken küçük ölçekli türbe, minare, mescit gibi yapı türlerinde ağırlık merkezi kayması büyük bir farka sebebiyet verebilir. Küçük açıklığa sahip yapıların açıklıkları ile kayma mesafesi oranlandığında, mevcut gerçek açıklığın oldukça üzerinde bir sapma durumu ortaya çıkabilir. Dolayısıyla sonuçlarda da gerçek açıklığın göstereceği davranışa kıyasla farklılıklar gözlenebilir. Büyük ölçekli yapılarda ise bu kaymanın gerçek açıklığa oranla daha küçük bir kaymaya neden olmaktadır ve elde edilen kazanımlar ile ağırlık merkezi kayma durumunu değerlendirildiğinde, ortaya çıkan sonuçların tolere edilebilecek seviyede olduğu sonucuna varılmıştır.

Yönteme ilişkin yapılan analizler sonucu ortaya çıkan verilerden hareketle, öncelikle basit yığma yapı elemanları üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Mardin Artuklu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi avlu duvarının fotogrametrik ve klasik modelleme teknikleri kullanılarak strüktürel modelleri oluşturulmuştur. Düz ve açıklığı olmayan bu duvar örneğinden, modal analiz değerlerinin %96 ve yer değiştirme değerlerinin %99 benzerlik göstermesi ile bir sonraki yığma yapı örneğine geçilmiştir ve L plan tipinde ve tek açıklığı olan bir duvar, fotogrametrik ve klasik modelleme tekniği kullanılarak modellenmiştir. L plan tipi duvar üzerinde gerçekleştirilen analizlerde de modal analiz değerlerinin %97 ve yer değiştirme değerlerinin %97 benzerlik göstermesi ve herhangi bir uyumsuzluğun olmaması sonucunda Melik Mahmut Cami güney duvarı modellenmiştir. Melik Mahmut Cami güney duvarı analiz sonuçlarında da fotogrametrik ve klasik modeller, modal analiz değerlerinde %98 ve yer değiştirme değerlerinde %99 oranında benzerlik göstermiştir. Ayrıca gerilme değerleri ele alındığında, basit yığma yapı elemanları ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarında modellerdeki ağ sayılarının, gerilme değerleri için bir kriter olduğu ortaya konmuştur ve yakın ağ sayısına sahip modellerin gerilme değerlerinin daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Avlu duvarında fotogrametrik model ile ağ sayısı yakın olan klasik GModel-2 gerilme değerlerinin %87 oranında benzerlik gösterdiği, fakat ağ sayısı yakın olmayan klasik GModel-1 ile bu değerin %64'e düştüğü görülmüştür. L plan tipi duvar için de aynı düşüş gözlenmiştir. Fotogrametrik L duvar modelinde görülen gerilme değeri ile ağ sayısı yakın olan klasik GModel-4 arasında %99 gerilme değeri benzerliği görülürken; ağ sayısı yakın olmayan klasik GModel-3 ile bu oranın %50'ye düşmüştür. Bu gerilme sonuçlarına rağmen, düşük yakınlık oranlarında dahi uyumlu bir artış ve azalış olduğunu, gerilme değerlerinin yapılar üzerinde benzer bölgelerde yoğunluştığı tespit edilmiştir. Bu durum analizler sonuçlarında gerilme değerlerini temsil eden renk kontürlerinde kolaylıkla görülebilmektedir. Deformasyon ve doğal titreşim periyotları için yakınlık oranlarında, belirtildiği üzere, ağ sayılarının bir kriter olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tümevarım yöntemi ile gerçekleştirilen süreç, büyük ölçekli yapıların modellenmesinden önce karşılaşılabilecek problemlerin daha kontrol edilebilir olmasını sağlamıştır. Süreç yönetiminde küçük ölçekli yapı elemanlarından başlanması, bilgisayar programları arasındaki bağlantıların daha anlaşılabilir ve açıklanabilir olmasını sağlamıştır. Basit yığma yapı elemanlarında problem teşkil edecek bir sonuca rastlanmaması ve modelleme tekniklerinin benzer davranışlar sergilemesi, strüktürel analiz sürecine fotogrametrinin dahil

edilebileceğini ve geliştirilmeye açık olduğunu göstermiştir. Özellikle iki boyutlu davranış sergileyen ve kapalı bir kütleye sahip olmayan yapılar için fotogrametrik modelleme tekniğinin doğrudan yapısal analiz programlarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Basit yığma yapı modellerinden benzer sonuçlar elde edilmesi ile Artuklu dönemi eserleri olan camilerin strüktürel modelleri oluşturulmuştur. Kapalı bir kütle modelinin oluşturulması sırasında fotogrametrik modelleme tekniğinin yetersiz kaldığı durumlar tespit edilmiştir. Fotogrametri, değinildiği üzere fotoğraflardan elde edilen bir model oluşturma tekniğidir. Tarihi yapılar gibi karmaşık ve benzersiz geometriye sahip yapılarda, iç mekanda detaylı gözlemler yapılmadan ve kesit özellikleri bilinmeden doğru bir strüktürel modelin oluşturulması mümkün değildir. İç mekanda bulunabilecek kemer, tonoz, ayak gibi yapısal elemanların dışarıdan çekilen fotoğraflarda veya dışarıdan gerçekleştirilen gözlemlerde okunabilmesi de zor bir durumdur. Dolayısıyla fotogrametrik modelleme tekniğinde, iç mekandaki yapısal özelliklerin de mutlaka detaylı gözlemler ile belirlenmesi gerekmektedir. Yapının iç ve dış mekanının birlikte fotogrametrik modelinin üretilmesi de mümkündür. Fakat strüktürel analiz sürecinde otomatik ağ tanımı (otomatik mesh edit) gerçekleştiremeyen programlarda, fotogrametri ile oluşan dış duvar ve iç duvar model yüzeylerinin kabuk elemanlar ile tanımlanması sonucu duvar aralıkları boş kalmakta ve katı (solid) bir eleman davranışı göstermemektedir. Bu durum, fotogrametrik modelin sınırlılıklarının da olduğunu gösterdiği gibi strüktürel model oluşturma sürecinin özellikle tarihi yapılar gibi özgün özelliklere sahip yapılarda standardize edilemeyeceğini de göstermektedir. Ortaya çıkan sınırlılıklar, yeni çözüm önerileri ve teknikler geliştirmek için fırsat sunabilmektedir. Tez kapsamında fotogrametrik modelleme tekniğinin yetersiz kaldığı kapalı hacimli kütlelerde, klasik modelleme tekniği ile entegre bir model üretimi önerisi geliştirilmiştir.

Tez çalışmasında, öncelikle Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami'nin fotogrametrik modelleri oluşturularak hem yapıların herhangi başka bir belgeye ihtiyaç duyulmadan gerekli ölçüleri ve mevcut durumları üç boyutlu olarak elde edilmiş hem de yapılar dijital olarak belgelenerek nesiller arası etkileşim için kullanılabilecek veriler sağlanmıştır. Oluşan fotogrametrik modellerin yapısal analiz programına aktarılmak üzere ağ kusurları ve eksik noktaları giderilmiştir. Beraberinde, kullanılan yapısal analiz programı SAP2000'e aktarılan modelde gerçek davranışı temsil edecek olan kemer, tonoz, ayak, kubbe gibi yapısal elemanlar, klasik modelleme tekniğinde SHELL elemanlar kullanılarak fotogrametrik

modelin içerisine entegre edilmiştir. Bu şekilde entegre model üretimi gerçekleştirilmiştir. Tezde, entegre model üretiminin ilk örneği olan Melik Mahmut Cami, tek açıklı bir camidir ve içerisinde taşıyıcı ayaklar bulunmamaktadır. Fakat sahip olduğu tonoz, kemer ve kubbe, klasik modelleme tekniği kullanılarak fotogrametrik modelin içerisine entegre edilmiştir. Melik Mahmut Cami entegre modeli ve klasik modelinde literatürdeki mevcut çalışmalardan faydalanılarak ortak malzeme ve yük tanımlamaları yapılmıştır. Fotogrametrik modele ek olarak aynı zamanda tamamen klasik modelleme tekniği kullanılarak da yapının ayrı bir strüktürel modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan klaik ve entegre modeller üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda, modal analiz doğal titreşim periyotlarının %98, gerilmelerin %97 oranında ve yer değiştirmelerin de %90 oranında yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir. Bir diğer entegre model sürecinde ele alınan Mardin Ulu Cami ise 3 sahınlıklı, geniş açıklıklara sahip bir camidir ve içerisinde taşıyıcı ayaklar da bulunmaktadır. Melik Mahmut Cami ve Mardin Ulu Cami için hem entegre model hemde klasik model oluşturma süreçleri benzerdir; fakat, Mardin Ulu Cami daha büyük boyutlara ve hacime sahiptir. Camini taşıyıcı ayakları, tonozları, kemerleri ve 8,34 m çapındaki kubbesi klasik modelleme tekniği ile oluşturulmuş ve fotogrametrik modelin içerisine entegre edilerek strüktürel analiz için entegre Mardin Ulu Cami modeli oluşturulmuştur. Mardin Ulu Cami için de tamamen klasik modelleme tekniğinin kullanıldığı strüktürel model de oluşturulmuştur. Farklı iki strüktürel model üzerinden gerçekleştirilen analizler sonucu Mardin Ulu Cami'nde modal analiz doğal titreşim periyotlarının %99, gerilmelerin %89 oranında ve yer değiştirmelerin de %99 oranında yakınlık gösterdiği belirlenmiştir. Ortaya çıkan değerler, farklı iki modelleme tekniği ile oluşturulan entegre ve klasik modellerin benzer davranışlar gösterdiğini ortaya koymuştur. Benzer sonuçlar ve davranışlar, teknolojik gelişmeler ile birlikte fotogrametrik modelleme tekniğinde aşamalar kaydedebileceğini, strüktürel analiz sürecine entegre edilebileceğini ve geliştirilebileceğini göstermiştir.

Çalışma kapsamında farklı modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen analizlerde;

- Yönteme ilişkin analizler ile strüktürel analiz programının doğru tanımlamalar ile farklı kullanımlara imkan tanıyabileceği,
- Basit yığma yapı elemanları ile fotogrametrik modelleme tekniğinin kullanılabilirliği ve doğru sonuçlar verebileceği,
- Melik Mahmut Cami strüktürel analiz sürecinde, fotogrametrik modelleme tekniğinin sınırlılıklarının olabileceği ve entegre model üretimi gibi farklı çözüm önerilerinin geliştirilebileceği,

- Mardin Ulu Cami entegre modeli ile ise daha karmaşık geometriye ve geniş açıklığa sahip yapılarda entegre model üretiminin nasıl ele alınabileceği ortaya konmuştur.

Tez kapsamında fotogrametrik modelleme tekniğinin strüktürel analiz sürecinde kullanılabilirliği, sağlayabileceği avantajlar ve neden olabileceği dezavantaj ortaya konulmuştur. Bu yöntem heykel, yapı cephesi, vadi gibi üzerinde yer alan en ufak ayrıntının modellenmesinin gerektiği durumlarda veya tarihi yapıların koruma amaçlı (taş temizlenmesi, strüktürel olmayan basit müdahaleler vb.) kullanımında süreç takibi, müdahale öncesi simülasyonlar gibi araştırma alanlarında büyük bir iş kolaylığı sağlayabilmektedir. Fakat, söz konusu tarihi yapıların strüktürel analiz süreci olduğunda ise fotogrametrinin sürece entegrasyonu dikkat gerektiren, daha zorlu ve karmaşık süreçleri bir arada içermektedir.

Tez çalışmasında ele alınan ve tüm yönleriyle değerlendirilen fotogrametrik modelleme tekniği, gerektiğinde strüktürel davranışı belirleme sürecini hızlandırabilecek gerektiğinde ise klasik modelleme tekniğine entegre olabilecek ve yardımcı veriler sağlayabilecek bir süreç olarak sunulmuştur. Benzersiz özelliklere sahip tarihi yapıların analiz sürecinde, strüktürel modeli standart hale indirgemek mümkün değildir ve süreç otomatikleştirilemeyecek kadar hassas bir işleyişe sahiptir. Her tarihi dönemin yerel malzemeye bakış açısının farklı olması, inşa edilen tarihi yapıların kendine özgün nitelikleri barındırması, aynı yapının kendi içerisinde dahi ayrışan özelliklerinin olması ve inşa edilen bölgenin koşullarının farklılaşması gibi nedenlerden dolayı tarihi yapıların sonlu elemanlar modelinde tek tipleştirilen bir süreç işletilememektedir. Bu süreçte, iki ayrı modelleme tekniği olarak ele alınan fotogrametri ve klasik yöntem arasında avantaj sağlayacak olanın tercih edilmesi ve diğer yöntemin ise bir veri sağlayıcı olarak dikkate alınması önerilmektedir. Her iki modelleme tekniğinin bu şekilde birlikte kullanımı, çalışma sürecinin daha etkin yürütülmesine katkı sunabilir. Gerçekleştirilecek olan çalışmaların strüktürel model oluşturma sürecinde ise fotogrametri ve klasik yöntem arasında hangisinin kullanılacağı, araştırmacının tercihine bağlı olarak biçimlenecektir.

Tarihi yapıların strüktürel analizinin önemli aşaması olan strüktürel model oluşturma sürecinde; fotogrametrik modelleme tekniğinin klasik modelin bir tamamlayıcısı, kolaylaştırıcısı veya eksik kalınan süreçlerde kolaylıkla kontrol edilerek veri sağlayıcısı olan bir teknik olarak değerlendirmek mümkündür. Özellikle kapalı bir mekan oluşturmayan

veya belirli bölümleri yıkılmış yapılarda (örneğin avlu duvarı, kale duvarı, kule vb.) fotogrametrik modelleme tekniği ile süreç yürütülebilmektedir. Ancak, kapalı kütlesel yapılarda, fotogrametrik modelin iç mekan taşıyıcılarına yönelik oluşturacağı dezavantajlarının önüne geçebilmek ve yapının davranışını doğru temsil edebilmek adına klasik modelleme tekniği ile entegre kullanımı gerektirmektedir veya alternatif teknikler geliştirilmelidir. Günümüzde benzer özelliklerde inşa edilen, dayanımlarının sınır değerleri bilinen, malzeme ile ilgili bütün deneyleri gerçekleştirilen ve yönetmeliklerde sınır değerleri bulunan yapılarda, standartlaştırılabilen ve daha hızlı işletilebilen strüktürel analiz yöntemleri geliştirmek mümkün olabilmektedir. Fakat tarihi yapılar gibi her yapının kendine özgü özellikler barındırması, bu süreçte her yapı için farklı araştırmaları gerektirmektedir. Geometrik özelliklerin elde edilmesi, modelin düzenlenerek strüktürel analiz programına aktarılması, taşıyıcı eleman tanımlamalarının ve atamalarının gerçekleştirilmesi, tarihi yapılarda kesin doğru sonuçların elde edildiği bir strüktürel analiz için yeterli olmamaktadır. Yapıların sahip olduğu malzeme özellikleri için deneysel çalışmalar gerekmektedir. Fakat, tarihi yapılarda kullanılan yerel malzeme çeşitliliği nedeniyle elastisite modülünün belirlenmesinin oldukça zor olması nedeniyle tarihi yapıların analizinin genellikle varsayımlara dayalı bir süreç işletilmektedir. Dolayısıyla ele alınan yapılara müdahaleler gerçekleştirilmeden önce daha detaylı mikro modeller üretilmeli ve malzeme deneylerine göre belirlenen mekanik değerler yapısal analiz programına aktarılarak analizler gerçekleştirilmelidir.

Sonuç olarak gelişen teknolojinin sağladığı faydalar tarihi yapıların strüktürel davranışını modelleme konusunda uzmanlara önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bu açıdan tez kapsamında ortaya konan fotogrametrik modelleme mühendisler ve mimarlar için önemli avantajlar sağlayan ve ilerleyen zamanlar için de geliştirilme potansiyeli olan bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

Açıkyıldız, Ş.B. (2017). Mardin Emineddin Külliyesi: Hami ve Mimari. *Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi,* 34(2), 13-31.

Adin, H. (2007). Mardin ve Midyat'ta kullanılan bina yapı taşlarının bazı fiziksel özellikleri. *Mühendis ve Makina*, 48(570), 13-17.

Ainsworth, W.F. (1842). *Travels and researches in Asia Minor, Mesopotamia, Chaldea and Armenia*. Londra: John W. Parker, West Strand.

Akan, A.E. ve Özen, Ö. (2005). Bursa Yeşil Türbe'nin sonlu elemanlar yöntemi ile deprem analizi. *İkinci Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 758-762.

Akaslan, A.S. (2019). *Tarihi yapıların deprem etkileri altında değerlendirilmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Akçay, İ. (1966). Harput'ta Ulu Cami. *Yeni Fırat Aylık Sanat Fikir Dergisi,* 27, 15-22.

Akgündüz, N. (2004). *Deprem bölgelerinde yığma yapı tasarımının yönetmeliğe göre incelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aksoy, E. ve Aydoğmuş, F. (2017). Tarihi yapıların deprem analizi ve Kargı Han örneği. *6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, Trabzon, Türkiye, 411-419.

Almagro, A. (2001). Simple methods of photogrammetry: Easy and fast. *18th International Symposium of CIPA*, Potsdam, Almanya.

Alptekin, C. (1991). Artuklular. *Türkiye Diyane Vakfı İslâm Ansiklopedisi,* 3, 415-418.

Altun, A. (1971a). *Mardin'de Türk devri mimarisi*. İstanbul: Gün Matbaası.

Altun, A. (1971b). Mardin Ulu Camii ve çifte minareler üzerine birkaç not. *Vakıflar Dergisi, 9*, 191-200.

Altun, A. (1973). Harput Ulu Camiinin durumu. *Sanat Tarihi Yıllığı*, (5), 79-94.

Altun, A. (1978). *Anadolu'da Artuklu devri Türk mimarisi'nin gelişmesi*. İstanbul: Kültür Bakanlığı.

Altun, A. (1991). Artuklu sanatı. *Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi,* 3, 418-419.

Altunışık, A.C., Bayraktar, A. ve Genç, A.F. (2016). A study on seismic behaviour of masonry mosques after restoration. *Earthquakes and Structures*, 10(6), 1331-1346.

Ambraseys, N.N. (2009). *Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900*. Cambrdige: Cambridge University Press.

Amorim, A.L. (2007). Documenting architectural heritage in Bahia–Brazil, using digital technologies. *21st International Symposium of CIPA*, Atina, Yunanstan.

Ardıç, N. (1939). Harput Artuk Oğulları'na Ait Kitabeler. *Türkiyat Mecmuası, 6*, 41-48.

Armstrong, C.G. (1994). Modelling requirements for finite-element analysis. *Computer-Aided Design*, 26(7), 573-578.

Arun, G. (2005). Yığma kagir yapı davranışı. *Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı*. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

Aslanapa, O. (1991). *Anadolu'da ilk Türk mimarîsi: başlangıcı ve gelişmesi*. Ankara: Atatürk Kültür Merkezi Yayınları.

Aslay, S. E. ve Okuyucu, D. (2020). Erzincan Değirmenliköy Kilisesi apsis hasarının teknik olarak araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 387-402.

Asteris, P.G., Chronopoulos, M.P., Chrysostomou, C.Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N. and Silva, V. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Engineering Structures*, 62, 118-134.

Augusti, G., Ciampoli, M. and Giovenale, P. (2001). Seismic vulnerability of monumental buildings. *Structural Safety*, 23(3), 253-274.

Avşar, E.Ö. (2006). *Tarihi köprülerin digital fotogrametri tekniği yardımıyla modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aydin, S. and Schnabel, M.A. (2015). Decoding Kashgar. *Conference of Institute of Electrical and Electronics Engineers In 2015 Digital Heritage*, Granada, İspanya, 471-472.

Aydın, S. (2018). *Decoding Kashgar: A digital design approach to steer and diversify creative engagement in digital heritage*, Doktora Tezi, Victoria University of Wellington, Yeni Zelanda.

Bakırer, Ö. (1980). Harput Ulu Camii minaresi. *Hacettepe Üniversitesi Sosyal ve İdari Bilimler Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, Özel Sayı, 374-395.

Ballabeni, M., Angelillo, D.R. and Modde, E. (2007). Practice for built environment awareness: From survey to 3D modelling and related database. *21st International Symposium of CIPA*, Atina, Yunanstan.

Baltacı, E.Ş. ve Yeğin, M. (2011). Mimari fotogrametri yöntemlerinin rölöve çalışmaları açısından değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2), 127-136.

Baran, Y. (2015). *Tonozlarda geometrik şekil değişikliğinin yapısal dayanıma etkileri; Diyarbakır İç Kale Camisi örneği.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Barrile, V., Bilotta, G., D'Amore, E., Meduri, G.M. and Trovato, S. (2016). Structural modeling of a historic castle using close range photogrammetry. *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 10, 370-380.

Baş, G. (2009). Silvan Ulu Camii mimari süslemeleri. *X. Ortaçağ-Türk Dönemi Kazıları ve Sanat Tarihi Araştırmaları Sempozyumu*, Ankara, Türkiye.

Batur. A. (1999). *Donatısız yığma binaların yatay yükler altındaki davranışı ve bazı ülkelerin şartnamelerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Batur, N. (2006). *Yığma yapı tasarımı ve analizi*. Bitirme Tezi, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Bayülke, N. (1992). *Yığma yapılar*. Ankara: Özyurt Matbaacılık.

Bayülke, N. (1995). *Depremde hasar gören yapıların onarım ve güçlendirilmesi*. İzmir: İnşaat Mühendisliği Odası Yayınevi.

Bayülke, N. (2011). Yığma yapıların deprem davranışı ve güvenliği. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Ankara, Türkiye.

Betti, M. and Vignoli, A. (2008). Modelling and analysis of a Romanesque church under earthquake loading: Assessment of seismic resistance. *Engineering Structures*, 30(2), 352-367.

Bilgin, H. (2006). Mimar Sinan yapılarında kubbeli örtü sistemlerinin yapısal analizi. *Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology*, 21(3-4), 119-128.

Blachut, T.J. and Burkhardt, R. (1989). *Historical development of photogrammetric methods and instruments*. Louisiana: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Publishing.

Bulduk, A. (1999). *Mardin tarihi*: Ankara: TC Başbakanlık Güneydoğu Anadolu Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı.

Caliò, I., Marletta, M. and Pantò, B. (2012). A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings. *Engineering Structures, 40*, 327-338.

Can, H. ve Ünay, A.İ. (2012). Tarihi yapıların deprem davranışını belirlemek için sayısal analiz yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27*(1), 211-217.

Can, H., Kubın, J. ve Ünay, A. (2012). Düzensiz geometrik şekile sahip tarihi yiğma binalarin sismik davranişi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (3), 679-686.

Carrión-Ruiz, B., Blanco-Pons, S., Weigert, A., Fai, S. and Lerma, J. L. (2019). Merging photogrammetry and augmented reality: The Canadian Library of Parliament. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 367-371.

Casolo, S. and Sanjust, C.A. (2009). Seismic analysis and strengthening design of a masonry monument by a rigid body spring model: The ``Maniace Castle'' of Syracuse. *Engineering Structures*, 31(7), 1447-1459.

Celep, Z. ve Kumbasar, N. (1993). *Çözümlü örneklerle betonarme,* İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Vakfı.

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

Chiostrini, S., Foraboschi, P. and Vignoli, A. (1992). Structural analysis and damage evaluation of existing masonry buildings by dynamic experimentation and numerical modelling. *10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, İspanya, 3481-3486.

Chopra, A.K., (1995). *Dynamics of structures*, Londra: Prentice Hall New Jersey.

Christensen, L.B., Johnson, B. and Turner, L.A. (2011). *Research methods, design, and analysis*. New Jersey: Pearson Education Inc,.

Çağlar, N., Kırtel, O., Vural, İ., Sümer, Y. ve Sarıbıyık, A. (2020). *24 Ocak 2020 Mw 6.8 Elazığ-Sivrice depremi inceleme ve değerlendirme raporu*. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Deprem Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Sakarya.

Çağlayan, M. (2017a). *Mardin anıtsal yapılarında değişmişlik ve özgünlük sorunları.* Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çağlayan, M. (2017b). *Mardin Ortaçağ anıtları ve yapım teknikleri*. İstanbul: Hiperlink Eğitim İletişim Yayın Gıda Sanayi ve Pazarlama Tic. Ltd. Sti.

Çağlayan, M. (2018). Ortaçağ'dan günümüze bir anıt: Mardin Ulu Camii. *Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, 1*(21), 29-40.

Çalişkan, Ö., Meriç, E. ve Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dünü, bugünü ve yarını. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 109-118.

Çamlıbel, N. (1984). *Temellerin takviyesi (Geleneksel yapılarda stabilitenin iyileştirilmesi)*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Çamlıbel, N. (1999). İstanbul'daki Bizans Devri yapılarında deprem riskinin belirlenmesine ilişkin bir ön çalışma, *Mimarlık & Dekorasyon Dergisi*, (80), 34-40.

Çarhoğlu, A.İ., Zabin, P. ve Korkmaz, K.A. (2014). Kars Kümbet Camisinin deprem davranısının incelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 2(1), 189-196.

Çavuş, M. ve Sözen, Ş. (2018). Çelik payandalarla güçlendirilmiş Tokat Deveci Hanı'nın sismik analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 347-360.

Çelik, O.C., Bal, A., Atasever, K., Emanet, S. ve Koca, S. (2020). 24 Ocak 2020 Doğanyol (Malatya)-Sivrice (Elazığ) Depremi'nden Gözlemler (Mw 6.7-Doğu Anadolu Fay Zonu). *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, 34(134), 5-29.

Çetin, Y. (2008). Silvan Ulu Camii'nin plan bakımından bir değerlendirmesi ve Anadolu Türk Cami mimarisine katkıları. *Atatürk Üniversitesi İlahiyat Fakültesi Dergisi*, (30), 21-40.

Dabanlı, Ö. (2008). *Tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dabanlı, Ö. (2016). *Nur-u Osmaniye Camii'nin deprem performansının belirlenmesi ve koruma önerileri*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Dan, S., Herban, S. and Ionescu, D. (2016). Structural Rehabılıtatıon of Hıstorıcal Masonry Buıldıngs In Romanıa. *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering*, University of Novi Sad, Sırbistan.

Demir, C. (2012). *Seismic behaviour of historical stone masonry multi-leaf walls*, PhD dissertation, Istanbul Technical University Graduate School of Science Engineering and Technology, Istanbul.

Denknalbant, A. (2012). Ulucami (Silvan Ulu Cami). *Türkiye Diyanet Vakfı İslâm Ansiklopedisi, 42*, 114-115.

Desai, H., Bookseller, T. and Vyas, P. (2016). Base shear calculation of RCC structure, *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 5(1), 126-132.

Duman T.Y ve Emre Ö. (2013). The East Anatolian Fault: Geometry, segmentation and jog characteristics. *Geological Society, London, Special Publications*, 372(1), 495-529.

Duran, Z. ve Toz, G. (2010). Tarihi eserlerin fotogrametrik olarak belgelenmesi ve coğrafi bilgi sistemine aktarılması. *İTÜDERGİSİ/d*, 2(6), 19-30.

Durukan, A. (1995). Artuklu mimarisinin düşündürdükleri. *9. Milletlerarası Türk Sanatları Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 51-62.

Durukan, A. (1999). Harput Ulu Camii'nin düşündürdükleri. *Dünü ve Bugünüyle Harput Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye Diyanet Vakfı Elazığ Şubesi Yayınları, (8), 305-338.

Düzgün, A.O., Hatipoğlu, S.Y., Artar, M., Yurdakul, M. ve Öner, E. (2015). Zahit Efendi Camisi'nin sonlu elemanlar analizi ile taşıyıcı sistem performansının belirlenmesi. *5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Erzurum, Türkiye, 155-168.

Erçolak, A. (2021). *Yığma yapıların duvarlarının kesme gerilme dayanımının deneysel olarak araştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Erdal, Z. (2017). Mardin Ulu Cami üzerine yeni görüşler. *Van Yüzüncüyıl Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi,* 17(2), 433-447.

Erdemir, M. ve Başar, M.E. (2019). Tarihi Konya Hasbey Dar'ül Huffazı'nın (Mescit) sonlu elemanlar analizi yöntemiyle deprem davranışının incelenmesi. *Journal of Awareness,* 4(4), 419-432.

Erdoğan, C. (2005). Tarihi çeşmelerin dijital fotogrametrik yöntemle rölövelerinin hazırlanması. *Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu,* İstanbul, Türkiye, 187-200.

Erdoğan, A., Kabadayı, A. ve Akin, E.S.S. (2021). Kültürel mirasın fotogrametrik yöntemle 3B modellenmesi: Karabıyık Köprüsü örneği. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3(1), 23-27.

Erdoğan, H.A. (2018). *Türk minarelerinin sonlu elemanlar analizi yöntemiyle deprem performanslarının karşılaştırılması*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Ergin, Ş. ve Dal, M. (2019). An investigation of Silvan Selahattin-i Eyyubi Mosque (Ulu Mosque) in terms of construction system and materials used. *The Kerpic'19 - Earthen Heritage, New Technology, Management 7th International Conferance*, Muğla, Türkiye, 295-302.

Fanaie, N. and Dizaj, E. A. (2023). Cable-cylinder bracing system: theoretical background, structural behavior, and seismic design coefficients. I. Mansouri and P.O. Awoyera (Editörler), *In Seismic Evaluation, Damage, and Mitigation in Structures* (51-97). Sawston: Woodhead Publishing.

Gabriel, A. (2014). *Şarki Türkiye'de arkeolojik geziler.* (çev. İ. Çetin). Ankara: Dipnot Yayınları (Eserin orijinali 1931'de yayımlandı).

Giordano, A., Mele, E. and De Luca, A. (2002). Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24(8), 1057-1069.

Gönül, A. ve Sakcalı, G. B. (2019). Tarihi Irgandı köprüsünün deprem performansı. *The 5th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology,* Ankara, Türkiye.

Gül, U. ve Bayram, U. (2014). Kentsel dönüşüm projelerinde deprem etkisi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2), 1-11.

Gül, S.M. (2021). *Sualtı Kültür Mirası'nın belgelenmesinde güncel fotogrametri yöntemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Akdeniz Uygarlıkları Araştırma Enstitüsü, Antalya.

Güleç, S.A. (2007). *Yersel fotogrametri yöntemi ile rölöve alım tekniğinin taç kapılarda uygulanışı Konya örnekleri.* Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Güler, M. ve Aktuğ Kolay, İ. (2006). 12. yüzyıl Anadolu Türk camileri. *İTÜDERGİSİ/a, 5*(2), 83-90.

Günay, U. (2012). *Türklerin tarihi - Geçmişten geleceğe*. Ankara: Akçağ Yayınları.

Hasgür, Z. ve Gündüz A.N. (1996). *Betonarme çok katlı yapılar*, İstanbul: Beta Yayınları.

Hemmleb, M. and Wiedemann, A. (1997). Digital rectification and generation of orthoimages in architectural photogrammetry. *16th International Symposium of CIPA*, Göteborg, İsveç.

Hutton, D.V. (2003). *Fundamentals of finite element analysis*. New York: McGraw-Hill Education.

Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J. and Rosette, J. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5, 155-168.

İdemen, A.E. (2003). *Bina ağırlık merkezi-rijitlik merkezi ilişkisini mimari tasarım aşamasında kuran bir uzman sistem*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İmamoğlu, M.Ş. ve Çetin, E. (2007). Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve yakın yöresinin depremselliği. *Dicle Üniversitesi Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi*, (9), 93-103.

İnternet: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). URL: https://www.afad.gov.tr, Son Erişim Tarihi: 05.10.2023.

İnternet: Agisoft, (2021). 3D model reconstruction. URL: https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000152092, Son Erişim Tarihi: 27.05.2023.

İnternet: Avrupa Standardizasyon Komitesi – CEN. (1996). URL: https://www.cencenelec.eu, Son Erişim Tarihi: 23.05.2023.

İnternet: Bayraktar, B. (2019). DPI nedir? PPI ve DPI Arasındaki Farklar Nelerdir? URL: https://www.matbuu.com/blog/dpi-nedir-ppi-nedir.html#:~:text=Pixel%20Per%20Inch%20veya%20Türkçe,yerine%20PPI%20terimi%20ile%20ölçülebilmektedir, Son Erişim Tarihi: 15.05.2022.

İnternet: Burtch, R., (2008). History of photogrammetry. Lecture Notes on the History of Photogrammetry. Ferris State University, Big Rapids. URL: https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/History_of_Photogrammetry.pdf, Son Erişim Tarihi: 15.05.2022.

İnternet: Computers & Structures Inc. (CSI) America. URL: https://www.csiamerica.com/products/sap2000, Son Erişim Tarihi: 05.05.2022.

İnternet: CSI Analysis Reference Manual (2016). SAP2000 Integrated Solution for Structural Analysis and Design. URL: https://docs.csiamerica.com/manuals/sap2000/CSiRefer.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.

İnternet: Demirtaş, R. ve Erkmen, C. (2019). Doğu Anadolu Fay Sistemi Deprem Etkinliği-Gelecek Deprem Potansiyeli. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24235.49449 Son Erişim Tarihi: 21.05.2023.

İnternet: Dündar, C. ve Tokgöz, S. (2006). Çözümlü Örneklerle Betonarme Problemleri, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. URL: https://toros.edu.tr/storage/files/228/BetonarmeÇözümlüÖrnekler.pdf, Son Erişim Tarihi: 12.05.2023.

İnternet: Funker, M. (2021). 3D photoscan with a phone camera and object capture – photogrammetry. URL: https://3dwithus.com/photoscan-mobile-phone-camera-photogrammetry, Son Erişim Tarihi: 22.05.2022.

İnternet: Glueck, P. (2021). All you need to know about 3d point clouds. URL: https://blog.hexagongeosystems.com/all-you-need-to-know-about-3d-point-clouds/#:~:text=Sometimes%20known%20as%20a%203D,models%20of%20almost%20any%20object, Son Erişim Tarihi: 22.05.2022.

İnternet: Haldon, J.F., Collon, D.P.M., Easton, D.F., Seton H.F.L., Philo H.J.C. and Woods, J.E. (2023). Anatolia. Encyclopedia Britannica. URL: https://www.britannica.com/place/Anatolia, Son Erişim Tarihi: 04.10.2023.

İnternet: Köse, O. (2011). Van depreminin açtığı fay çukurları. URL: https://www.milliyet.com.tr/gundem/van-depreminin-actigi-fay-cukurlari-1463084, Son Erişim Tarihi: 20.02.2022.

İnternet: Mardin Artuklu Üniversitesi Mimari Proje Üretimi Uygulama ve Araştırma Merkezi (2021). Şlomo: Göç Edenlerin Ardından URL: https://www.arkitera.com/etkinlik/slomo-goc-edenlerin-ardindan/, Son Erişim Tarihi: 06.10.2023.

İnternet: Özbaba, S. (2020). Sonlu elemanlar yöntemine giriş. URL: http://www.projeinsaat.net/4_SONLU-ELEMANLAR-YÖNTEMİNE-GİRİŞ.asp#:~:text=Bir%20sonlu%20elemanın%20düğüm%20noktalarının,elemanın%20serbestlik%20derecesi%206%20%27dır, Son Erişim Tarihi: 22.02.2023

İnternet: Strateji ve Bütçe Başkanlığı (2023). Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı. URL: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaras-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf, Son Erişim Tarihi: 21.05.2023.

İnternet: Thomson, C. (2019). What are point clouds? 5 easy facts that explain point clouds. URL: https://info.vercator.com/blog/what-are-point-clouds-5-easy-facts-that-explain-point-clouds, Son Erişim Tarihi: 22.05.2022.

İnternet: Torun, C.G. (2013). Bilim Tarihi Işığında Görelilik Teorileri, Kuantum Mekaniği ve Her Şeyin Teorisi. URL: http://evreninsirlari.net/dosyalar/s04_03-Gorelilik_Teorileri_Kuantum.pdf, Son Erişim Tarihi: 16.05.2022.

İnternet: Torun, C.G. (2023). Depremin şiddeti nasıl ölçülür?, URL: https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/depremin-siddeti-nasil-olculur,Son Erişim Tarihi: 21.05.2023.

İnternet: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY. (2018). URL: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm, Son Erişim Tarihi: 20.05.2022.

İnternet: URL-1: https://www.mardiniletisimgazetesi.com.tr/mardin-depreme-ne-kadar-dayanikli/, Son Erişim Tarihi: 16.01.2020

İnternet: URL-2: https://samples.geoslam.com, Son Erişim Tarihi: 28.05.2023.

İnternet: Zardadkhan, I. (2012). Simulation: Shell Elements vs. Solid Elements. URL: https://www.javelin-tech.com/blog/2012/10/shell-vs-solid-elements/, Son Erişim Tarihi: 02.06.2023.

James, M.R., Robson, S. and Smith, M.W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769-1788.

Kaya, F.Z., Akçay, Ö., Avşar, E.Ö. ve Aydar, U. (2019). Su altı fotogrametrik belgelemede güncel uygulamalar, *17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Türkiye Mühendis ve Mimarlar Odası Birliği, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ankara, 1-9.

Keil, J., Zollner, M., Becker, M., Wientapper, F., Engelke, T. and Wuest, H. (2011). The House of Olbrich—An augmented reality tour through architectural history. *2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality-Arts, Media, and Humanities*, Basel, İsviçre, 15-18.

Kılınçoğlu, D.B. (2016). *Farklı insansız hava araçları ile elde edilen görüntülerin otomatik fotogrametrik yöntemlerle değerlendirilmesi ve doğruluk analizi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kıvanç, H. (2019). *Kültürel miras belgeleme çalışmalarında fotogrametrik yöntem ile yersel lazer tarama yönteminin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

Koçak, A. (1999). *Tarihi yapıların statik ve dinamik yükler altında lineer ve non-lineer analizi: Küçük Ayasofya Camii örneği*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kork, E.S. (2006). *Arkeolojik araştırmalarda kültürel mirasın belgelenmesi ve izlenmesi sürecinde "fotogrametri"nin uygulama alanları.* Yüksek Lisans Tezi, Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Muğla.

Kocaman, İ., Okuyucu, D. ve Kazaz, İ. (2019). Tarihi yapı malzeme özelliklerinin dinamik parametrelerle belirlenmesi: Lala Paşa Camii Örneği. *Teknik Dergi, 30*(3), 9125-9146.

Konecny, G. (2003). *Geoinformation remote sensing, photogrammetry and Geographic Information Systems*. London: Taylor & Francis.

Korkmaz, H. (2006). Antakya'da zemin özellikleri ve deprem etkisi arasindaki ilişki. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 4(2), 49-66.

Korkmaz, A.K., Çarhoğlu, I.A., Usta, P. ve Toker, S. (2013). Tarihi kiliselerin deprem davranışının Van Akdamar Kilisesi örneğinde incelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 5*(2), 22-29.

Korkmaz, K., Zabin, P., Çarhoğlu, A. ve Nuhoğlu, A. (2014). Rize Merkez Kurşunlu Camisi'nin deprem davranışının incelenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 18*(3), 149-156.

Korumaz, A.G., Dülgerler, O.N. ve Yakar, M. (2011). Kültürel mirasın belgelenmesinde dijital yaklaşımlar. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 67-83.

Korumaz, M., Betti, M., Conti, A., Tucci, G., Bartoli, G., Bonora, V., Korumaz A.G. and Fiorini, L. (2017). An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study. *Engineering Structures*, 153, 224-238.

Köprülü, F.M. (1941). Artukoğulları. *İslam Tarihi Ansiklopedisi, 2*, 618-625.

Kuban, D. (2002). *Selçuklu çağında Anadolu sanatı*. İstanbul: Yapı Kredi Yayınları-Promat AŞ.

Kuban, D. (2010). *Mimarlık kavramları*. İstanbul: Yem Yayın.

Küçükdoğan, B., Kubin, J. ve Ünay, A.İ. (2010). Seismic assessment of monastery of stoudios (Imrahor Mosque) in İstanbul. X. Gu and X. Song (Editörler), *In Advanced Materials Research*, 133, (721-726). Zürih: Trans Tech Publications Ltd.

Külür, S., Altan, M.O., Duran, Z. ve Kardas, Y. (2003). Documentation of the silhouette changes of Istanbul using digital photogrammetric methods. *19th International Symposium of CIPA*, Antalya, Türkiye.

Kumbasar, N. ve Celep, Z. (1996). *Yapı dinamiği ve deprem mühendisliğine giriş*. İstanbul: Sema Matbaacılık.

Kutlu, İ. ve Soyluk, A. (2021). Artuklu dönemi mimarisinin Anadolu cami tipolojisindeki etkilerinin incelenmesi. *Social Science Development Journal*, 6(24), 22-43.

Kutlu, İ., Soyluk, A. ve Ünay, A.İ. (2022). Developing a Novel Photogrammetry Methodology in Cultural Heritage Documentation: Mardin Melik Mahmut Mosque, *International Conference on Engineering Technologies*, Konya, Türkiye, 354-359.

Kutlu, İ. ve Soyluk, A. (2023). A comparative approach to using photogrammetry in the structural analysis of historical buildings. *Ain Shams Engineering Journal*, 102298.

Kutlu, İ., Soyluk, A. ve Aydin, S. (2023). A review of the usability of photogrammetry technique for studying the structural behavior of historical buildings. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 22(1), 43-48.

Kysela, J. and Štorková, P. (2015). Using augmented reality as a medium for teaching history and tourism. *Procedia-Social and behavioral sciences*, 174(2015), 926-931.

Lourenço, P.B. (1998). Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry. *The II. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, CIMNE*, Barcelona, İspanya.

Lourenço, P. B. (2001). Analysis of historical constructions: from thrust-lines to advanced simulations. P.B. Lourenço and P. Roca (Editörler), *In Historical constructions* (91-116). Guimarães: University of Minho Publishing.

Lourenço, P. B. (2002). Computations on historic masonry structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301-319.

Lourenço, P.B. (2004). Current experimental and numerical issues in masonry research. *6th Congress of Seismology and Earthquake Engineering*, Guimarães, Brezilya.

Mele, E. and De Luca, A. (1970). Behaviour and modelling of masonry church buildings in seismic regions. C.A. Brebbia (Editör), *In Earthquake Resistant Engineering Structures II* 41 (543-552), Southampton*:* WIT Transactions on The Built Environment.

Micelli, F., Cascardi, A. and Aiello, M.A. (2020). Seismic capacity estimation of a masonry bell-tower with verticality imperfection detected by a drone-assisted survey. *Infrastructures*, 5(9), 72.

Micelli, F. and Cascardi, A. (2020). Structural assessment and seismic analysis of a 14th century masonry tower. *Engineering Failure Analysis*, 107, 104198.

Nayır, Ş. (2010). *Artukluların sosyo-ekonomik ve kültürel hayatı*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Nickerson, S. and Chapiro, A. (2005). ASRix: A Simple Digital Image Rectifier. *20th International Symposium of CIPA*, Torino, İtalya.

Numan, B.A. (2020). *Geleneksel fotogrametri ve insansız hava aracı (İHA) sonuç ürünlerinin karşılaştırılması.* Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Omurtag, M.H. (2010). *Çubuk sonlu elemanlar*: İstanbul: Birsen Yayınevi.

Oral, M.Z. (1967). Harput Ulu Camii duvarındaki vergi kitabesi. *VI. Türk Tarih Kongresi* Ankara, İstanbul.

Oreni, D., Fassi, F., Brumana, R., Prandi, F. and Tuncer, H. (2007). Laser scanning supports architectural mappings and historical urban view analysis. *21st International Symposium of CIPA*, Atina, Yunanistan.

Önal, M. ve Koçak, A. (2005). Yığma yapı hasarları onarım ve güçlendirme yöntemlerinin ayrıntıları. *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi,* 1, Antalya, Türkiye, 88-102.

Önal, O., Bozdağ, Ö. ve Ersoy, A. (2017). İzmir Agorası'ndaki Roma Dönemine ait hamam yapısının SFM tekniği ile 3 boyutlu katı modelinin oluşturulması. *Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu*, Trabzon Türkiye.

Özbay, E. (2018). *Nokta bulutu verilerinden nesne ayırt etme*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Özbudak, M. (2006). *Geleneksel yığma taş yapıların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi Beşkonak Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özmen, M.E. (2007). *Anadolu Selçuklularının Artuklular ile ilişkileri.* Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.

Özsaraç, S. (2009). *Yığma yapılarda taşıyıcı tuğla duvarların gfrp ile güçledirimesinin deneysel olarak incelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Öztaş, V. (2009). *Yığma yapıların güçlendirilmesi ve bir yığma yapı örneğinde güçlendirme analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Pampal, S. (1999). *Depremler*. İstanbul: Alfa Basın Yayım Dağıtım Ltd. Şti.

Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings,* New York: John Wiley and Sons Inc.

Peña, F., Lourenço, P.B., Mendes, N. and Oliveira, D.V. (2010). Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. *Engineering Structures, 32*(5), 1466-1478.

Portalés, C., Lerma, J.L. and Pérez, C. (2009). Photogrammetry and augmented reality for cultural heritage applications. *The Photogrammetric Record*, 24(128), 316-331.

Savcı, S. (1956). *Silvan tarihi: Mafarkın âbide ve kitabeleri*: Diyarbakır: Diyarbakır Tanıtma Derneği Yayınları.

Saygı, G. (2009). *Documentation of Necatibey Boulevard in İzmir with close range digital photogrammetry*, Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Sayın, E., Yön, B., Onat, O., Gör, M., Öncü, M.E., Tunç, E.T., Bakır, D., Karaton, M. ve Calayır, Y. (2021). 24 January 2020 Sivrice-Elazığ, Turkey earthquake: geotechnical evaluation and performance of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19, 657–684.

Saylan, A. (2014). *Artuklu dönemi camilerindeki bezemeler.* Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.

Sedmak, S., Radaković, Z., Milović, L. and Svetel, I. (2012). Significance and applicability of structural integrity assessment. *Integritet i vek konstrukcija*, 12(1), 3-30.

Selvaggi, I. (2017). *Surveying and three-dimensional modeling for preservation and structural analysis of cultural heritage*. Doktora Tezi, Bologna University, İtalya.

Semerci, F. (2017). Mardin kireçtaşının yapı malzemesi olarak kullanımına yönelik analizlerinin yapılması: Kasımiye Medresesi Örneği. *Journal of Architectural Sciences and Applications*, 2(2), 60-79.

Sidek, F.K. and Ahmad, A. (2008). Development of mapping procedures using digital imagery derived from unmanned aerial vehicle system. *7th International Symposium & Ehhibition on Geoinformation*, Kuala Lumpur, Malaysia, 1-12.

Soyluk, A. (2010). *Sismik taban izolatörü kullanımının mimari tasarıma etkisi.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Sunguroğlu, İ. (1958). *Harput yollarında* (Vol. 1). İstanbul: Elazığ Kültür ve Tanıtma Vakfı Yayınları.

Sunkar, M. (2011). 8 Mart 2010 Kovancılar-Okçular (Elazığ) depremi; yapı malzemesi ve yapı tarzının can ve mal kayıpları üzerindeki etkisi. *Türk Coğrafya Dergisi* (56), 23-37.

Szabó, B. and Babuška, I. (2021). *Finite Element Analysis: Method, Verification and Validation.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Syahputra, M.F., Umaya, A. and Rahmat, R.F. (2020). Utilization of augmented reality to showcase historical buildings in Medan City. *In Journal of Physics: Conference Series*, 1566(1), 012064.

Şeker, B.Ş. (2011). *Mimar Sinan camilerinin statik ve dinamik yükler etkisinde davranışlarının incelenmesi.* Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Şengör, A.M.C., Tüysüz, O., İmren, C., Sakınç, M., Eyidoğan, H., Görür, N., Le Pichon, X. and Rangin, C. (2005). The North Anatolian fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 37–112.

Şimşek, H. (2010). *Harput Ulu Cami.* Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.

Tetik, T. (2015). *Tarihi yığma yapıların deprem performansı ve güçlendirme teknikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Toker, S. ve Ünay, A.İ. (2004). Mathematical modeling and finite element analysis of masonry arch bridges. *Gazi University Journal of Science, 17*(2), 129-139.

Tunçay, F. (2006). *Yakın resim fotogrametrisinde kullanılan steroskopik resim çekme yöntemlerinin değerlendirme ve nokta duyarlılıklarına etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Turan, Ç. (2014). *Artuklu Dönemi tarihi yapılarındaki figürlü süslemeler ve Orta Asya kültürünün etkileri.* Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Batman.

Turan, M.H. (2004). Mimari fotogrametri alanindaki çağdaş gelişimlerin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(1), 43-50.

Turan, O. (1973). *Doğu Anadolu Türk Devletleri Tarihi*. İstanbul: Boğaziçi Yayınları.

Türkmen, M. ve Bilgin, H. (2002). Geleneksel mimaride kubbeli örtü sistemlerinin yapısal davranışı. *Balıkesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi IV. Mühendislik Mimarlık Sempozyumu*, Balıkesir, Türkiye.

Uluçam, A. (2012a). Ulucami (Harput Ulu Cami). *Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi,* 42, 102-103.

Uluçam, A. (2012b). Ulucami (Mardin). *Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi,* 42, 112-113.

Ulvi, A. ve Yiğit, A. (2019). Kültürel mirasın dijital dokümantasyonu: Taşkent Sultan Çeşmesinin fotogrametrik teknikler kullanarak 3b modelinin yapılması. *Türkiye Fotogrametri Dergisi,* 1(1), 1-6.

Ulvi, A., Yakar, M., Yiğit, A.Y. ve Kaya, Y. (2020). İHA ve yersel fotogrametrik teknikler kullanarak Aksaray Kızıl Kilise'nin 3 Boyutlu nokta bulutu ve modelinin üretilmesi. *Geomatik Dergisi*, 5(1), 22-30.

Ural, A. (2009). *Yığma yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Uslu, A., Polat, N., Toprak, A.S. ve Uysal, M. (2016). Kültürel mirasın fotogrametrik yöntemle 3B modellenmesi örneği. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 165-176.

Uslu, A. (2021). Fotogrametri tekniğine dayalı üç boyutlu baskı uygulaması: Leblebi Anıtı örneği. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 3(2), 46-52.

Utkucu, M., Durmuş, H., Uzunca, F. ve Nalbant, S. (2023). *6 Şubat 2023 Gaziantep (Mw= 7.7) Ve Elbistan (Mw= 7.5) Depremleri Üzerine Bir Değerlendirme*. Sakarya Üniversitesi Afet Yönteim Uygulama ve Araştırma Merkezi – Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sakarya.

Uzun, C. (2014). 17. yüzyılda Harput Ulu Cami. *Fırat Üniversitesi Harput Araştırmaları Dergisi, 1*(2), 29-48.

Uzun, M. (2017). *Yığma yapıların deprem performansının değerlendirilmesi ve bir güçlendirme örneği.* Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Üstündağ, C. (2000). *Bir iki katlı yığma binaların yatay yükler altındaki davranışı ve kesme güvenliğinin sağlanması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ünay, A.İ. (2002). *Tarihi yapıların depreme dayanımı*. Ankara: ODTÜ Basım İşliği.

Ünay, A.İ. (1988). *A study of structural behavior of the Şehzade Mehmet Mosque*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Van Damme, T. (2015*). Computer vision photogrammetry for underwater archaeological site recording: A critical assessment*. Yüksek Lisans Tezi, University of Southern Denmark, Odense.

Vatan, M. (2005). *Yığma yapıların sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz modelinin oluşturulmasında fotogrametrik verilerin kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Vatan, M. (2012). Condition survey of historic buildings by visual inspection-case study: Murat Pasha mosque. *International Journal of electronics, mechanical and mechatronics engineering*, 2(1), 147-156.

Vintzileou, E., Zagkotsis, A., Repapis, C. and Zeris, C. (2007). Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkada, Greece. *Construction and Building Materials*, 21(1), 225-236.

Wait, R. and Mitchell, A. R. (1985). *Finite element analysis and applications*. Liverpool: John Wiley & Sons Incorporated.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. and Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.

Yakar, M. ve Yılmaz, H. M. (2008). Kültürel miraslardan tarihi Horozluhan'in fotogrametrik rölöve çalişmasi ve 3 boyutlu modellenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23(2), 25-33.

Yakar, M., Orhan, O., Ulvi, A., Yiğit, A. Y. ve Yüzer, M. M. (2015). Sahip Ata Külliyesi rölöve örneği. *15.Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10, Ankara.

Yalnız, Z. (2020). *Anıtsal bir yığma binanın yapısal analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Yamafune, K. (2017). A methodology for accurate and quick photogrammetric recording of underwater cultural heritage. *The 3rd Asia-Pacific Regional conference on Underwater Cultural Heritage*, 1, Hong Kong, 517-537.

Yang, T. (1986). *Finite element structural analysis*. Kanada: Pearson College Drive.

Yazgan, İ.O. ve Ünay, A.İ. (2019). Bursa, Yenişehir Sinan Paşa Külliyesi imaretinin sayısal modellenmesi ve yapısal analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 1193-1203.

Yıldırım, A. (1999). Nitel araştırma yöntemlerinin temel özellikleri ve eğitim araştırmalarındaki yeri ve önemi. *Eğitim ve Bilim*, 23(112).

Yıldız, D.H. (1991). Anadolu Beylikleri. *Türkiye Diyanet Vakfı İslam Ansiklopedisi,* 3, 139-141.

Yılmaz, H.M., Yakar, M., Gulec, S.A. ve Dulgerler, O. N. (2007). Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 428-433.



Gazili olmak ayrıcalıktır